

UNIVERSITE CHEIKH ANTA DIOP DE DAKAR



Ecole Doctorale « Eau, Qualité et Usages de l'Eau »



FACULTE DES SCIENCES ET TECHNIQUES

Année 2017 – 2018

THESE DE DOCTORAT UNIQUE

Spécialité : HYDROGEOLOGIE

Présentée par :

Mouhamat SECK

**Actualisation des connaissances sur la nappe du Littoral Nord et
évaluation des impacts potentiels de l'exploitation des sables
minéralisés par Grande Côte Operations : *approche hydrochimique,
isotopique et hydrodynamique par modèle – SENEGAL***

Soutenue publiquement le 27 Juillet 2018, devant le jury composé de :

Président	:	Pr. Cheikh Bécaye GAYE	FST/UCAD - Dakar
Rapporteurs	:	Dr. Soussou SAMBOU	FST/UCAD - Dakar
	:	Pr. Amadou Zanga TRAORE	Ecole Nationale d'Ingénieurs ABT/ Mali
Examineurs	:	Dr. Abdoul Aziz NDIAYE	IST/UCAD - Dakar
	:	Dr. El hadji Ibrahima NDAO	EDEQUE/ UCAD - Dakar
Directeur de thèse	:	Pr. Serigne FAYE	FST/UCAD – Dakar
Invité	:	Ir. Michael ROSE	Grande Côte Operations

Louange à Allah Seigneur de l'Univers qui a permis l'aboutissement de ce travail.

DEDICACE

Tout d'abord,

A mon regretté Père Serigne M'Backé rappelé à DIEU la nuit du 7 janvier 1994 ;

A celui dont l'enseignement et l'éducation ont nourri l'esprit et guidé nos pas sur le chemin de la droiture ;

Père ! Puisse le Miséricordieux te rétribue les efforts que tu as consentis durant toute ta vie à notre formation et à celle de tant d'autres ;

Père ! Nous ne te mériterons vraiment que lorsque l'on fera partie de ceux aux âmes apaisées ;

Dors Père ! Dors ! Puisse le Très Miséricordieux t'élève parmi Ses élus et nous maintienne sur la voie tracée ;

Oui, ton bien-aimé Mouhammad (*PSL*) sera toujours à tes côtés. Ibrahima khalilou Lahi, Astou, Oumy Kalsoum ! Suivons ses traces ;

Mère Sokhna ! L'héritage a été préservé. Effectivement, les mamans constituent une école. Nous demeurons, à jamais, fiers de toi ;

Ma bienaimée Awa ! Mes enfants ! vous m'avez accompagné et supporté tout au long de ce parcours et su rester tolérants face à mes absences et indisponibilités répétées durant les weekends. **MERCI !**

D'autre part,

A mes amis d'enfance, Maguette, Mor, Moustapha Kamal, Moustapha DIENG ;

A la promotion 3^eA du CEM Banque Islamique, à toute la promotion 95 de la série C du Lycée Seydina Limamou Laye de Pikine ;

A tous les collègues de la Promotion Professeur Oumar Sarr de l'IST, de la promotion FPU 2004 de l'EIER (devenue 2IE), de l'EDEQUE ;

A mes condisciples du Professeur Serigne Faye dont Ousmane Coly DIOUF, Mariama KABA, Helene MANDIOUNE, Huguette EMVOUTOU et Ndeye Maguette DIENG,

A tous mes collègues de la compagnie Grande Cote Operations, de l'encadrement jusqu'aux opérations avec mention spéciale réservée à mes collaborateurs du Département des Services Techniques Miniers qui m'ont toujours assisté et encouragé à persévérer ;

Je vous dédie ce travail.

« IL n'y a pas de route royale pour la science, et ceux-là seulement ont la chance d'arriver à ses sommets lumineux qui ne craignent pas de se fatiguer à gravir ses sentiers escarpés ». Karl Marx

AVANT PROPOS

Comme toute ressource limitée, il est important de préserver l'eau en quantité et en qualité. Malheureusement il apparaît que les besoins en eau sont sans cesse plus grands et que bien souvent son utilisation se fait de manière pas très rationnelle. Oui ! l'eau souterraine par définition ne se voit pas. Et tout se passe dans les esprits comme si on ne risquait rien à la dégrader et ne gagnait rien, non plus, à l'améliorer. Le temps est certainement venu de raisonner autrement si l'on veut éviter des préjudices durables. Ce travail constitue ma modeste contribution à cette prise de conscience. Il a été encouragé et promu par la Compagnie Grande Cote Operations à travers ses différents Directeurs : Simon FINIS, Tony HEGARTY, Daniel MARINI, Joseph PATARICA, Michael ROSE et François GODIN. Le management de GCO a très tôt compris la nécessité d'une gestion durable des ressources en eau souterraine au niveau de la mine pour son développement. Or, ce n'est que par une meilleure connaissance de ce système aquifère que le défi pourrait être relevé.

L'engagement d'un promoteur n'a pas suffi à la réalisation de cette thèse. Elle a nécessité dès le début, l'accompagnement et l'encadrement du Professeur Serigne Faye qui n'a ménagé aucun effort pour sa réussite. Merci Professeur !

Au terme de ce travail consacré à l'actualisation des connaissances sur la nappe du Littoral Nord et à l'évaluation des impacts potentiels de l'exploitation des sables minéralisés par GCO, permettez-moi d'adresser mes remerciements à l'endroit du Jury :

- ✚ **Professeur Serigne FAYE**, responsable scientifique de cette thèse, Directeur de l'EDEQUE. Votre rigueur scientifique nous servira toujours de leçon, aussi bien dans le milieu académique que professionnel. Vous avez toujours su faire passer votre message sans l'imposer. La pédagogie et la méthode que vous avez employées nous ont toujours poussé à approfondir la réflexion pour trouver une solution aux problèmes rencontrés. Je ne saurais vous remercier assez d'avoir activement participé à mon initiation au noble métier d'hydrogéologue mais aussi m'accompagner jusqu'à la réalisation de cette thèse. Vous n'avez jamais cessé de me faire bénéficier de votre savoir avec dévouement et abnégation. Que DIEU vous assiste !
- ✚ **Professeur Cheikh Bécaye GAYE**, Responsable de la formation doctorale Hydrogéologie de l'EDEQUE et membre de l'Académie des Sciences du Sénégal. Je me souviens de l'accueil chaleureux et de l'intérêt que vous aviez manifesté au projet de thèse dont je venais vous faire l'économie lors de ma candidature à l'EDEQUE. Vos travaux ont servi d'inspiration à plus d'un titre et vos résultats ont été largement cités dans ce travail. C'est tout un honneur pour moi que vous acceptiez de présider ce jury. Merci du fond du cœur.
- ✚ **Docteur Soussou Sambou**, Maître de Conférence CAMES, Professeur Assimilé UCAD. Il est vrai qu'on a eu un bref contact quand j'étais en CPEST2 (2^e année à l'institut des Sciences de la Terre – IST) lors d'une illustration expérimentale de la loi de Darcy. Mais, c'est au cours de la dernière étape de ce travail, lors de votre examen du manuscrit de thèse que j'ai pu apprécier votre approche scientifique et votre maîtrise approfondie de la modélisation. Vos recommandations ont permis une nette amélioration de ce travail. Je vous présente ma profonde reconnaissance.
- ✚ **Professeur Amadou Zanga TRAORE**, DER de Géologie de l'Ecole Nationale d'Ingénieurs ABDERAHMANE BABA TOURE (ENI-ABT) du Mali. Je vous remercie d'avoir accepté de faire partie de ce jury. Votre évaluation critique et minutieuse de ce travail a beaucoup contribué à son amélioration. Je vous présente mes sincères remerciements.

- ✚ **Docteur Abdoul Aziz NDIAYE**, Enseignant chercheur et Directeur de l'Institut des Sciences de la Terre – IST. M'ayant dispensé mon premier cours de géostatistique il y a 20 ans de cela, je vous remercie à nouveau d'avoir accepté de faire partie de ce jury. Vos observations et recommandations sont d'un grand apport à cette thèse. A travers vous, je remercie tout le corps professoral de l'IST qui a su implémenter en nous les bases fondamentales de l'Ingénieur Géologue de Conception, nécessaires pour gravir les marches vers la thèse de doctorat.
- ✚ **Docteur El hadji Ibrahima NDAO**, Maître-Assistant à L'EDEQUE. Votre expertise sur les questions scientifiques traitées par cette thèse sont bien connues. Votre examen et critiques ont permis de rehausser encore la qualité de ce travail. Je vous remercie d'avoir accepté de participer à ce jury.
- ✚ **Monsieur Michael ROSE**, Ingénieur Minier, Directeur des Operations de Grande Cote Operations. Dès votre prise de fonction, vous avez manifesté un intérêt incommensurable à la gestion des eaux souterraines de la mine. Vous m'avez toujours supporté pour une bonne réussite de cette thèse. A travers vous, je remercie tout le staff managérial de GCO et particulièrement au Directeur Général et à Tony HEGARTHY qui fut le premier promoteur de ce projet.

Je ne saurais oublier mes collègues de la DGPRES, de l'EDEQUE, de l'Amicale des Ingénieurs Géologues sortant de l'IST (AIGIST), de l'Amicale des Ingénieurs sortant de l'EIER, de l'Association des Jeunes Professionnels de l'Eau et de l'Assainissement (AJPEAS) et pour finir, du Partenariat National de l'Eau du Sénégal (PNES).

Loin sans terminer, je dédie cette thèse à tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à sa réalisation.

MERCI A TOUTES ET A TOUS !

RESUME

Les aquifères sableux du Quaternaire et du Maastrichtien situés dans la zone côtière Nord du Sénégal, constituent les principales sources d'approvisionnement en eau pour les besoins urbains et locaux ainsi que les activités agricoles et minières. L'aquifère du Quaternaire, qui fournit l'eau nécessaire à l'irrigation des terres agricoles locales, abrite un important gisement de sables riches en minéraux lourds, exploité par la compagnie Grande Côte Opérations (GCO). En raison de la pluviométrie variable et de l'augmentation des prélèvements d'eau, cet aquifère peu profond a enregistré une baisse continue du niveau d'eau depuis 1970, ce qui pourrait avoir des effets négatifs sur le développement social et économique de la région. L'extraction de minéraux lourds (zircon, ilménite, leucoxène et rutile) à GCO est réalisée à l'aide de techniques de dragage conventionnelles qui nécessitent de grandes quantités d'eau pouvant aller jusqu'à 60000 m³/j dont les 50 voire 60% sont assurés par la nappe profonde du Maastrichtien. L'eau pompée par la drague pour permettre l'extraction des minéraux lourds, s'infiltré dans l'aquifère superficiel, s'écoule vers le bassin de dragage ou s'évapore.

L'objectif de cette étude est d'actualiser les connaissances sur les aspects qualitatif et quantitatif des eaux souterraines du Littoral Nord mais également d'évaluer leurs interactions actuelles et futures avec l'exploitation des sables minéralisés. De façon plus spécifique, il s'agira d'évaluer un bilan hydrique permettant d'assurer en permanence une alimentation en eau du bassin de dragage pour une exploitation optimale. Ce défi devra être relevé tout en minimisant le risque d'inondation des dépressions agricoles adjacentes au site minier ou d'assèchement des puits agricoles par le biais de la modélisation hydrogéologique.

L'analyse de la variabilité climatique par différentes méthodes telles que l'IPS et l'IPD montre la dissymétrie pluviométrique de la zone avec deux périodes qui s'identifient de façon assez nette. La période d'avant 1931 aux années 1969 – 1970 est humide et sèche au-delà. L'analyse piézométrique de la zone d'étude a montré l'existence des deux bassins hydrogéologiques séparés par un dôme piézométrique dont le flanc Ouest est exploité par la compagnie GCO avec un système d'injection et de recyclage et l'Est par la SDE. Le niveau piézométrique du dôme est passé de 25 m en 1975 à 20 m IGN actuellement. Dans la zone minière, l'exploitation des données de suivi des 300 piézomètres de la bande dunaire a permis de constater de façon nette les variations saisonnières de la piézométrie entre 42 et 60 mm, atteignant 26 cm en 2012.

Les forages de recyclage de GCO captant la NSQ de la zone minière ont renseigné sur la lithologie de l'aquifère dans la bande Ouest où les perméabilités sont de l'ordre de 10⁻³ ms⁻¹, proches des valeurs de l'aquifère des calcaires éocènes, situé à l'Est de la zone d'étude. La réalisation et l'analyse des résultats des pompages d'essai sur les onze forages profonds de GCO ont permis la détermination de la transmissivité (T) et de la perméabilité (K) qui sont respectivement de l'ordre de 3 10⁻³ m²s⁻¹ et 3 10⁻⁵ ms⁻¹ reflétant ainsi la nature sableuse de cet aquifère.

En ce qui concerne la recharge, les méthodes du bilan hydrique, de fluctuations piézométriques associées à celles des précipitations et du bilan des chlorures ont été combinés pour son estimation. Les résultats ainsi obtenus ont montré une recharge effective en saison pluvieuse de 14 à 20 mm pour les sables ferrugineux de la partie Sud du domaine d'étude et presque nulle pour la zone Nord. Par ailleurs, les isotopes environnementaux ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ et ^3H) ont été également utilisés pour mettre en évidence le caractère évaporé des eaux souterraines en général et du bassin de dragage en particulier.

L'étude hydrochimique a montré le caractère relativement acide des eaux de la nappe du Littoral (encore appelé Nappe des Sables Quaternaires NSQ) dont la minéralisation est généralement inférieure à 400 mg/l sauf dans certains sites tels que Mboro et Potou où l'intrusion saline est mise en évidence. Les eaux de la NSQ ont un faciès chloruré sodique dans la partie occidentale où est localisée la mine de Diogo et un faciès

bicarbonaté calcique dans la partie Est. Les eaux maastrichtiennes (nappe profonde) sont carbonatées ou chlorurées sodiques avec des valeurs de pH comprises entre 7.9 et 8.3.

Le modèle hydrodynamique réalisé pour la gestion et les prévisions hydrogéologiques de l'exploitation minière a été calibré et testé au cours de la première année d'exploitation. L'erreur quadratique moyenne (RMSE) obtenue est d'environ 0.52 m. Les prévisions indiquent que le système doit récupérer une partie de l'infiltration des résidus au moyen des forages de régulation. D'ici 2020, la quantité d'eau recyclée est estimée à 16000 m³/j en moyenne. Les simulations obtenues avec le modèle montrent un besoin en eau supplémentaire, extrait de l'aquifère Maastrichtien, variant entre 23000 et 28000 m³/j pour maintenir le niveau d'eau optimal du bassin. Au-delà de cette période, jusqu'en 2025, la moyenne du pompage de recyclage serait 30000 m³ et celui d'appoint 40000 m³. Ainsi, le modèle prédit le défi de la réalisation du plan d'exploitation décennal.

Mots clés

Nappe quaternaire, Maastrichtien, dragage, modélisation, FeFLOW, pluviométrie, hydrochimie, isotopie, sables minéralisés, Grande Côte Operations.

ABSTRACT

The Quaternary and Maastrichtian sandy aquifers located in the northern coastal zone of Senegal are the main sources of water supply for urban and local needs as well as agricultural and mining activities. The Quaternary aquifer, which provides the water needed to irrigate local farmland, is contained in a large deposit of sands rich in heavy minerals, operated by Grande Côte Operations (GCO). Due to variable rainfall and increased water abstraction, this shallow aquifer has experienced a steady decline in water levels since 1970, which could have negative effects on the region's social and economic development. The extraction of heavy minerals (zircon, ilmenite, leucoxene and rutile) at GCO is carried out using conventional dredging techniques that require large amounts of water up to 60,000 m³/d, of which 50 or even 60% are insured by the deep Maastrichtian aquifer. The water pumped by the dredge to allow the extraction of heavy minerals, seeps into the shallow aquifer, flows to the dredging pond or evaporates.

The objective of this study is to update knowledge on the qualitative and quantitative aspects of groundwater on the North Shore but also to evaluate their current and future interactions with the exploitation of mineralized sands. More specifically, it will be a question of evaluating a water balance making it possible to ensure permanently a water supply of the dredging basin for an optimal exploitation. This challenge will need to be addressed while minimizing the risk of flooding agricultural depressions adjacent to the mine site or dewatering agricultural wells through hydrogeological modelling.

The analysis of the climatic variability by different methods such as the IPS and the IPD shows the dissymmetry rainfall of the zone with two periods which identify themselves quite clearly. The period from before 1931 to the years 1969 - 1970 is wet and dry beyond. Piezometric analysis of the study area showed the existence of two hydrogeological basins separated by a piezometric dome whose west flank is operated by GCO with an injection and recycling system and is operated by SDE. The piezometric level of the dome has increased from + 25 m in 1975 to 20 m IGN at present. In the mining area, the exploitation of the monitoring data of the 300 piezometers of the dune band made it possible to clearly observe the seasonal variations of the piezometry between 42 and 60 mm, reaching 26 cm in 2012.

The GCO recycling drills that capture the NSQ of the mining area provided information on the lithology of the aquifer in the western band where the hydraulic conductivities are in the order of 10⁻³ ms⁻¹, close to the values of the aquifer of the Eocene limestone, located east of the study area. The realization and the analysis of the results of the test pumping on the eleven deep holes of GCO allowed the determination of the transmissivity (T) and the permeability (K) which are respectively of the order of 3 10⁻³ m²s⁻¹ and 3 10⁻⁵ ms⁻¹ reflecting the sandy nature of this aquifer.

With regard to recharge, water balance methods, piezometric fluctuations associated with precipitation and chloride balance were combined for its estimation. The results thus obtained showed an effective recharge in the rainy season of 14 to 20 mm for the ferruginous sands of the southern part of the field of study and almost zero for the northern zone. In addition, the environmental isotopes ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ and ^3H) were also used to highlight the evaporated nature of groundwater in general and the dredging basin in particular.

The hydrochemical study showed the relatively acidic waters of the Quaternary sand table whose mineralization is generally less than 400 mg/L except in some sites such as Mboro and Potou because of saline intrusion. The waters of the NSQ are sodium chloride facies in the western part of the Diogo mine and calcium bicarbonate facies in the eastern part. Maastrichtian waters are either carbonated or sodium chlorinated with pH ranging between 7.9 and 8.3.

The hydrodynamic model for the hydrogeological management and forecasting of the mining operation was calibrated and tested during the first year of operation. The mean squared error (RMSE) obtained is

approximately 0.52 m. Forecasts indicate that the system must recover some of the tailings seepage through control drilling. By 2020, the amount of recycled water is estimated at 16,000 m³/d on average. The simulations of the model show an additional water requirement, extracted from the Maastrichtian aquifer, varying between 23,000 and 28,000 m³/d to maintain the optimal water level of the basin. Beyond this period, until 2025, the average recycling pumping would be 30,000 m³ and the additional 40,000 m³. Thus, the model predicts the challenge of achieving the 10 years' operating plan.

Keywords

Quaternary, Maastrichtian, aquifer, dredging, FeFLOW, hydrogeological modelling, rainfall, hydrochemistry, isotopy, mineralized sands, Grande Côte Operations.

Table des matières

DEDICACE	I
AVANT PROPOS	II
RESUME.....	IV
ABSTRACT.....	VI
TABLE DES MATIERES	VIII
LISTE DES FIGURES	XI
LISTE DES TABLEAUX	XV
LISTE DES ACRONYMES	XVI
INTRODUCTION	1
1. CONTEXTE SUR LES RESSOURCES DE LA ZONE D'ÉTUDE ET SON IMPORTANCE	1
2. PROBLEMATIQUE.....	1
3. JUSTIFICATION	2
4. OBJECTIF	2
5. METHODOLOGIE CONCEPTUELLE.....	2
6. STRUCTURATION	3
PREMIERE PARTIE	4
CADRE PHYSIQUE ET SOCIO-ECONOMIQUE	4
INTRODUCTION	5
CHAPITRE I. SITUATION GEOGRAPHIQUE ET SOCIO-ECONOMIQUE	5
I.1 SITUATION GEOGRAPHIQUE ET DEMOGRAPHIQUE	5
I.2 SITUATION SOCIO-ECONOMIQUE DE LA ZONE D'ÉTUDE	7
CHAPITRE II. CONTEXTE CLIMATIQUE.....	10
II.1 CONTEXTE CLIMATIQUE DE LA ZONE D'ÉTUDE	10
II.2 VARIABILITE INTERANNUELLE DES PRECIPITATIONS	20
CHAPITRE III. GEOMORPHOLOGIE, L'HYDROGRAPHIE, LES SOLS ET LA VEGETATION	29
III.1 GEOMORPHOLOGIE, HYDROGRAPHIE ET SOLS.....	29
III.2 VEGETATION	33
CHAPITRE IV. GEOLOGIE ET HYDROGEOLOGIE.....	36
IV.1 CONTEXTE GEOLOGIQUE DU BASSIN SENEGALO-MAURITANIEN	36
IV.2 LITHOSTRATIGRAPHIE REGIONALE	38
IV.3 CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE DU BASSIN SENEGALO-MAURITANIEN	48
IV.4 ÉTAT DES CONNAISSANCES – ANALYSES CRITIQUES DES MODELES HYDROGEOLOGIQUES ANTERIEURS	59
CONCLUSION PARTIELLE.....	66
DEUXIEME PARTIE.....	68
METHODOLOGIE D'INVESTIGATION ET OUTILS D'ANALYSE	68
INTRODUCTION	69

CHAPITRE V. DONNEES DE BASE	69
V.1 SITES DE COLLECTE DES DONNEES DE LA MINE DE GCO	69
V.2 NAPPE MAASTRICHIENNE ET FORAGES PROFONDS	70
V.3 NAPPE SUPERFICIELLE ET FORAGES DE REGULATION OU DE RECYCLAGE	70
V.4 BASSIN DE DRAGAGE : LA DRAGUE ET L'USINE DE CONCENTRATION	70
V.5 REJETS DE SABLES OU TERRILS	71
CHAPITRE VI. TRAVAUX DE TERRAIN.....	72
VI.1 ENQUETES	72
VI.2 REALISATION DE FORAGES ET PIEZOMETRES.....	72
VI.3 POMPAGES D'ESSAI.....	72
VI.4 SUIVI PIEZOMETRIQUE	73
VI.5 ECHANTILLONNAGE.....	74
CHAPITRE VII. TRAVAUX DE LABORATOIRE	76
VII.1 DETERMINATION DE L'HUMIDITE DU SOL	76
VII.2 LIXIVIATION	77
VII.3 DOSAGE DES IONS CHLORURES	77
VII.4 ANALYSE GRANULOMETRIQUE	78
VII.5 ANALYSES CHIMIQUES	78
VII.6 ANALYSES ISOTOPIQUES	79
CHAPITRE VIII. OUTILS ET PERTINENCE DES OUTILS	81
VIII.1 POMPAGE D'ESSAI	81
VIII.2 SUIVI PIEZOMETRIQUE	81
VIII.3 HYDROCHIMIE ET ANALYSES ISOTOPIQUES.....	81
VIII.4 RECHARGE	82
VIII.5 MODELISATION.....	87
CONCLUSION PARTIELLE.....	94
TROISIEME PARTIE.....	95
HYDROGEOLOGIE AUTOUR DE LA MINE DE GCO.....	95
INTRODUCTION	96
CHAPITRE IX. MINE DE GCO	97
IX.1 PROCESSUS D'EXPLOITATION DES SABLES DE DUNES.....	97
IX.2 FLUX D'EAUX ENGENDRES PAR LE TYPE D'EXTRACTION PAR VOIE HUMIDE.....	99
IX.3 DRAGAGE	100
IX.4 BASSIN DE DRAGAGE	101
IX.5 REJETS DE SABLE.....	101
IX.6 FORAGES DE RECYCLAGE	102
IX.7 FORAGES D'APPROVISIONNEMENT	104
IX.8 LES GRANDES QUESTIONS SOULEVEES	104
CHAPITRE X. OUVRAGES ET CARACTERISTIQUES HYDRAULIQUES	105
X.1 OUVRAGES CAPTANT LA NAPPE DES SABLES DU QUATERNAIRE.....	105
X.2 OUVRAGES CAPTANT LA NAPPE PROFONDE MAASTRICHIENNE	114

CHAPITRE XI. HYDRODYNAMISME DES EAUX SOUTERRAINES	122
XI.1 NAPPE SUPERFICIELLE DU LITTORAL NORD	122
XI.2 NAPPE DU MAASTRICHTIEN	136
CHAPITRE XII. RECHARGE DE LA NAPPE SUPERFICIELLE	144
XII.1 ESTIMATION QUALITATIVE DE LA RECHARGE	144
XII.2 ESTIMATION QUANTITATIVE DE LA RECHARGE	145
XII.3 RECAPITULATIF DES VALEURS DE RECHARGE OBTENUES	156
CHAPITRE XIII. HYDROCHIMIE ET ISOTOPIE	158
XIII.1 HYDROCHIMIE	158
XIII.2 ISOTOPES ENVIRONNEMENTAUX	176
CONCLUSION PARTIELLE	186
QUATRIEME PARTIE	189
MODELISATION	189
INTRODUCTION	190
CHAPITRE XIV. MODELE CONCEPTUEL ET DISCRETISATION	192
XIV.1 MODELE CONCEPTUEL DE L'AQUIFERE A L'ECHELLE DU DOMAINE	192
XIV.2 DISCRETISATION	197
CHAPITRE XV. DONNEES D'ENTREE ET PARAMETRISATION	200
XV.1 ENTREE DES DONNEES	200
XV.2 PARAMETRISATION DU MODELE	203
CHAPITRE XVI. CALAGE ET SENSIBILITE DU MODELE	205
XVI.1 CALAGE DU MODELE	205
XVI.2 SENSIBILITE ET VALIDATION DU MODELE	218
CHAPITRE XVII. PREDICTIONS	223
XVII.1 SIMULATIONS PREDICTIVES	223
CONCLUSION PARTIELLE	232
SYNTHESE ET DISCUSSIONS	234
7. PIEZOMETRIE ET PARAMETRES HYDRODYNAMIQUES DES NAPPES	234
8. RECHARGE	235
9. HYDROCHIMIE	235
10. INFLUENCE DES POMPAGES DE GCO ACTUELS ET FUTURS MODELISES	236
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES	237
1. CONCLUSION GENERALE	237
2. PERSPECTIVES	239
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	240
ANNEXES	250

Liste des figures

Figure 1: Carte de localisation de la zone d'étude	6
Figure 2 : Hauteur pluviométrique mensuelle des stations de Dakar, Thiès et Louga en 2010	12
Figure 3 : Carte d'évolution des isohyètes moyennes annuelles (Ndong, 1995).....	13
Figure 4: Evolution des températures moyennes annuelles entre 1980 et 2011 au niveau des différentes stations	13
Figure 5: Evolution des températures moyennes mensuelles entre 1980 et 2011 au niveau des stations de Dakar, Louga et Saint Louis	14
Figure 6: Vitesses moyennes mensuelles des différentes stations entre 1981 et 2011	15
Figure 7: Direction dominante des vents de la station de Saint Louis	16
Figure 8 : L'humidité relative moyenne mensuelle pour la période 1981-2011.....	17
Figure 9: La durée d'insolation moyenne mensuelle au niveau des différentes stations (1981-2011)	18
Figure 10: Comparaison entre ETP et pluviométrie de la station de Louga	20
Figure 11: L'évolution pluviométrique annuelle au niveau des différentes stations.....	24
Figure 12: Evolution de l'écart pluviométrique moyenne et de l'indice pluviométrique normalise des différentes stations	26
Figure 13: Évolution de l'écart cumulé des précipitations par rapport à la normale dans les quatre stations	27
Figure 14: Coupe schématique de la zone des Niayes (Michel, 1956)	30
Figure 15 : Typologie des sols dans le secteur d'exploitation minière (USAID, 1986)	32
Figure 16 : Représentation schématique de la végétation d'une Niaye (Michel, 1969)	34
Figure 17 : Affleurement d'un banc de tourbe au plan d'eau du front de dragage de GCO	34
Figure 18: Carte géologique Ouest africain (Trompette, 1973).....	37
Figure 19: Coupe géologique traversant la nappe des sables du Quaternaire du Littoral Nord du Sénégal (Noel, 1978) in Kaba (2017)	41
Figure 20 : Coupe type de la série phosphatée de Taïba (Boujo, 1972).....	44
Figure 21: Carte tectonique interprétative du Sénégal (Lepriol & Dieng, 1985)	47
Figure 22 : Coupe hydrogéologique schématique à travers le bassin du Sénégal, (Travi, 1988) modifié in Seck (2011).....	49
Figure 23 : Carte du mur de l'aquifère des sables (Diouf S. , 1995)	51
Figure 24 : Limites d'extension latérale de l'aquifère des sables du Littoral Nord (Diouf S. , 1995)	52
Figure 25 : Evolution de la piézométrie du système hydrogeologique de 1975 à 1985 (Noel, 1978)	54
Figure 26 : Carte de localisation des piézomètres de la DGPRE et de GCO.....	55
Figure 27 : Carte piézométrique de l'aquifère des sables du Littoral Nord (Novembre 2014).....	56
Figure 28 : Vue en 3D de la piézométrie de la nappe des sables du Littoral Nord en forme « d'anticlinal »	56
Figure 29 : Les valeurs de conductivité électrique et de pH de la nappe des sables dans la zone de Diogo	58
Figure 30 : Diagramme de détermination des débits d'eau pompés.....	71
Figure 31 : Carte de localisation des différentes stations d'échantillonnage (Djigo, 2017)	75
Figure 32 : Cycle du carbone 14 naturel dissous, (Clark & Fritz, 1999)	80
Figure 33 : Coupe longitudinale d'un aquifère en condition libre et captive (Diersch H.-J.G., 2005).....	90
Figure 34 : Vue arrière de la drague (gauche) et vue connexion conduite usine flottante (droite)	98

Figure 35 : Diagramme de flux d'eau à la mine (méthode voie humide)	99
Figure 36 : Schéma type d'une exploitation de minéraux lourds par dragage, modifié (W. Herchenhorn et al, 2006)	100
Figure 37 : Vue aérienne du bassin de dragage de la mine de GCO.....	101
Figure 38 : Coupe hydrogéologique SSO – NNE du secteur de Diogo à la lisière des dunes de sables minéralisés.....	103
Figure 39 : Carte de localisation des forages et piézomètres de la zone pilote.....	105
Figure 40 : Graph de de la courbe de remontée du piézomètre PSB1-1 interprétée selon Jacob-Cooper (gauche) et Neuman (droite)	108
Figure 41 : Carte de localisation des forages de recyclages réalisés (ligne Est) et prévus (ligne Ouest)..	109
Figure 42 : Coupe lithologique et technique du forage de recyclage CB5.....	110
Figure 43 : Le graphe de rendement des forages de recyclage de GCO à la réception.....	112
Figure 44 : Les graphes de résultats de pompage d'essai de CB1 : a / courbe débit-temps, b/ longue durée rabattement temps par la méthode de Newman, CB5 : c/ rabattement –temps par méthode de Hantush-Jacob, d/ Méthode de Neuman sur la courbe de remontée de CB11.....	113
Figure 45 : Carte de localisation des forages et piézomètres captant la nappe maastrichtienne.....	114
Figure 46: Coupe technique et lithologique du forage maastrichtien DW4.....	115
Figure 47: Courbe caractéristique du forage DW4.....	117
Figure 48 : Détermination de la transmissivité par la méthode de Theis : a/ DW1 et b/ DW2	120
Figure 49 : Carte de distribution de la transmissivité (m^2/s) des aquifères supérieurs du Littoral Nord	124
Figure 50 : Carte de distribution de la perméabilité (m/s) des aquifères supérieurs du Littoral Nord...	125
Figure 51 : Carte de localisation des différents types d'ouvrages de suivi de la nappe du Quaternaire .	126
Figure 52 : Carte des ouvrages de suivi de la zone minière de Diogo implantés par GCO	127
Figure 53 : Graphe bi-chronologique des pluies mensuelles et des évolutions piézométriques	128
Figure 54 : Variation piézométrique de la nappe superficielle dans la zone minière de Diogo	130
Figure 55 : Chroniques journalières des débits pompés (CB) et des niveaux piézométriques (PzCB)	132
Figure 56 : Volumes mensuels d'eau recyclés par les forages superficiels ($1000 m^3$)	133
Figure 57 : Evolution du niveau piézométrique du bassin par rapport à la production.....	134
Figure 58 : La piézométrie locale de la zone minière de Diogo suivant l'évolution du bassin de dragage	135
Figure 59 : Carte de rabattement des 12 forages en exploitation du scenario 1	137
Figure 60 : Courbes de rabattement des forages du scenario 3	138
Figure 61 : Carte de rabattement des 5 forages du scenario 2.....	138
Figure 62 : Carte de rabattement des 6 forages du scenario 3.....	139
Figure 63 : Impacts qualitatif des débits des pompages sur les piézomètres DPz1 et DPz2	140
Figure 64 : Variations piézométriques (haut) et de minéralisation (bas) de DPZ1 et DPZ2	141
Figure 65 : Variation piézométrique (DPZ1 et DPZ2) par rapport au régime de pompage du forage DW4	142
Figure 66 : Chronique des pompages globaux par rapport à la piézométrie observée sur DPz1	142
Figure 67 : Evolution du ratio mensuel entre les pompages profonds et superficiels.....	143
Figure 68 : Evolution de l'humidité et de la fraction fine en fonction de la profondeur	144
Figure 69 : Bilan hydrologique mensuel de la zone Sud par la méthode de Turc pour la période 2010 - 2015.....	149

Figure 70 : Bilan hydrologique mensuel de la zone Lompoul par la méthode de Turc pour la période 2010 - 2015.....	150
Figure 71: Détermination graphique du seuil d'Hubert	151
Figure 72: Seuil de Gaguet pour les secteurs de Diogo et de Mboro.....	153
Figure 73: Histogramme des recharges saisonnières.....	154
Figure 74 : Variation de l'humidité et des teneurs en chlorures en fonction de la profondeur.....	155
Figure 75: Histogramme de fréquence du pH.....	158
Figure 76: Carte iso-pH de la nappe des sables quaternaires du Littoral Nord	159
Figure 77: Carte de variabilité spatiale de la minéralisation (mg/L)	160
Figure 78: Carte de distribution des ions chlorure de la nappe des sables quaternaires du Littoral Nord	161
Figure 79: Corrélation entre la minéralisation et la conductivité des eaux souterraines du Littoral Nord	162
Figure 80 : Faciès chimique des eaux de la NQLN, campagne Juillet 2013.....	163
Figure 81 : Faciès chimique des eaux de la NQLN, campagne Décembre 2013	164
Figure 82 : Zonation des Faciès chimique de la Nappe Quaternaire du Littoral Nord	165
Figure 83: Carte de localisation des transects	166
Figure 84 : Les courbes d'évolution des cations majeurs	167
Figure 85 : Variation de l'indice de saturation des minéraux carbonatés selon l'alcalinité d'équilibre ..	170
Figure 86 : Relation Log(PCO ₂) vs IScalcite et Log(PCO ₂) vs ISdolomite des eaux de la nappe des Sables du Littoral Nord.....	170
Figure 87 : Localisation des points choisis et échantillons sur base la piézométrie de la zone minière active de GCO (mai 2015)	172
Figure 88 : Faciès chimique des eaux du site minier de GCO collectées en Mai 2015.....	173
Figure 89 : Diagramme d'équilibre du système Kaolinite - albite – microcline	174
Figure 90 : Faciès chimiques des eaux de la nappe profonde dans la zone minière de GCO	175
Figure 91: Diagramme $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$, droite météorique locale de cette étude	178
Figure 92 : Diagramme deuterium-Oxygene18 des eaux de la mine	180
Figure 93 : Répartition des teneurs en tritium eaux de la mine en fonction de leur distance /bassin	182
Figure 94 : Relation entre le tritium et et l'oxygene 18 des eaux de la mine et du bassin sénégalais....	183
Figure 95 : Diagrammes des flux de la modélisation hydrogéologique de la NSQ du Littoral Nord	191
Figure 96 : Domaine du modèle hydrodynamique	192
Figure 97: Domaine modélisé avec ses différentes composantes	193
Figure 98 : Schéma du processus des flux d'eau à la mine.....	195
Figure 99 : SRTM 3D des Mines de Taiba (Gachet A, 2012).....	196
Figure 100 : Les forages de recyclage et la passe minière découpée en tranches de 2 jours d'avancement	198
Figure 101 : Carte de génération de la maille du modèle	199
Figure 102 : La piézométrie initiale de référence - 2012.....	200
Figure 103 : Les différents points de prélèvements.....	201
Figure 104 : Interface 1 de l'assignation des conditions aux limites du modèle	204
Figure 105 : Piézométrie de de référence du régime permanent _ 2007-2009	206
Figure 106 : Distribution des conductivités hydrauliques (m/j) calibrées	207
Figure 107c: Carte de distribution de la recharge sur le domaine du modèle	208

Figure 108 : Analyse de la piézométrie simulée lors du calage du modèle (Avril 2014)	209
Figure 109 : Superposition de la piézométrie observée et celle simulée de 2007-2009.....	210
Figure 110 : Corrélations des valeurs mesurées et celles calculées.....	211
Figure 111 : La variabilité de la conductivité hydraulique	212
Figure 112 : Courbe de variation pluviométrique en fonction hauteur (m) – temps (j)	214
Figure 113 : Comparaison entre les ETo calculées par les méthodes de Turc et Penman ((Diouf C. e., 2016).....	214
Figure 114 : Comparaison entre la piézométrie observée et celle simulée de 2014 en régime transitoire	215
Figure 115 : Analyse de la piézométrie simulée lors du calage du modèle de régime transitoire	216
Figure 116 : Corrélations des valeurs mesurées et celles calculées.....	217
Figure 117 : La piézométrie de validation un an après le démarrage de la production (Juillet 2015).....	219
Figure 118 : Corrélations des valeurs mesurées et celles calculées en phase production.....	220
Figure 119 : La piézométrie simulée de 2020	224
Figure 120 : Balance d'eau simulée des 4 premières années suivantes de la phase de calibration (2017-2020).....	226
Figure 121 : Carte piézométrique de 2022 (a) et 2023 (b)	228
Figure 122 : La piézométrie simulée de 2025	229
Figure 123 : Variation simulée de la piézométrie entre 2023 et 2025 observée sur différents points d'observation en des différentes zones : Lompoul (L) Diogo (D), Fass Boy (F) et Mboro (M)	229
Figure 124: Balance d'eau quinquennale simulée entre 2020 et 2025.....	231

Liste des tableaux

Tableau 1 : Valeurs de l'ETP (en mm) calculée par la méthode de Turc-stations du Littoral Nord (1981-2011).....	19
Tableau 2 : ETP annuelle (en mm) dans les stations de Saint-Louis et de Louga (Pernel & Gageonnet, 1992).....	20
Tableau 3 : Caractéristiques statistiques des données pluviométriques annuelles	22
Tableau 4 : Fréquence du déficit pluviométrique	27
Tableau 5: Évolution des précipitations: 1931-1969 vs 1970-2008	28
Tableau 6 : Profondeur de l'aquifère du Maastrichtien dans la zone minière de Diogo.....	46
Tableau 7 : Bilan hydraulique de la nappe supérieure pour la période 1968 -2007	65
Tableau 8 : Données d'implantation des forages et piézomètres test.....	106
Tableau 9: Les paramètres hydrodynamiques obtenus à l'issu des pompages d'essais.....	107
Tableau 10 : Résultats d'implantation et de performance des forages de recyclage	111
Tableau 11: Récapitulatif de la performance des forages de recyclage.....	112
Tableau 12: Données des profils techniques des forages profonds	116
Tableau 13: La performance des forages profonds.....	117
Tableau 14 : Récapitulatif des résultats des pompages d'essai de longue durée.....	118
Tableau 15 : Récapitulatif des rayons d'influence.....	121
Tableau 16 : Récapitulatifs des paramètres hydrodynamiques de la nappe supérieure du Littoral Nord	123
Tableau 17 : Le récapitulatif de la recharge annuelle par les méthodes de Turc et Thornthwaite	147
Tableau 18 : Récapitulatif des pluies et des amplitudes de crue annuelles	151
Tableau 19: Les pompages max des forages communautaires captant le Quaternaire de la zone	152
Tableau 20 : L'estimation des prélèvements	152
Tableau 21: Récapitulatif des recharges saisonnières dans la zone d'étude.....	153
Tableau 22 : Le taux de recharge par le bilan des chlorures sur les différents secteurs de la zone d'étude	156
Tableau 23 : Synthèse des valeurs de recharges obtenues par les différentes méthodes.....	156
Tableau 24 : Synthèse des indices de saturation	169
Tableau 25 : Synthèse des résultats des analyses chimiques et isotopique de la zone minière	177
Tableau 26 : Les âges apparents des eaux du bassin et de la nappe selon différents modèles d'estimation	184
Tableau 27 : Les éléments de la vitesse hydraulique	186
Tableau 28 : Périmètre du domaine modélisé.....	193
Tableau 29 : Analyse statistique de la précision du résultat du calage.....	210
Tableau 30 : Bilan du régime permanent	211
Tableau 31 : Les paramètres calibrés du modèle.....	213
Tableau 32 : Analyse de la précision du résultat du calage du modèle en régime transitoire	216
Tableau 33 : Bilan de la nappe en régime transitoire.....	217
Tableau 34 : Analyse de la précision du résultat du calage du modèle en phase production.....	219
Tableau 35 : Récapitulatif des résultats de l'analyse de la sensibilité.....	221
Tableau 36 : Bilan d'eau moyen en fin d'année 2020	227
Tableau 37 : Bilan d'eau moyen en fin d'année 2025	230

Liste des acronymes

AEP	: Alimentation en Eau Potable
ANACIM	: Agence Nationale de l'Aviation Civile et de la Météorologie du Sénégal
ANSD	: Agence Nationale de la Statistique et de la Démographie
BRGM	: Bureau de Recherches Géologiques et Minières
CDH	: Centre pour le Développement de l'Horticulture
CE	: Conductivité Electrique
CSE	: Centre de Suivi Ecologique
DGPRES	: Direction de la Gestion et de la Planification des Ressources en Eau
DHI	: Danish Hydraulic Institute
DML	: Droite Météorique Locale
DMM	: Droite Météorique Mondiale
DTGC	: Direction des Travaux Géographiques et Cartographiques
ETP	: Evapo-Transpiration Potentielle
ETR	: Evapo-Transpiration Réelle
FEFLOW	: Finite Element subsurface Flow
FePEST	: Feflow – Parameter ESTimation
GCO	: Grande Côte Operations
GKW	: German Consulting Company
GPS	: Global Positioning System
IAEA	: International Atomic Energy Agency
IGN	: Institut de Géographie National
ISRA	: Institut Sénégalais de Recherches Agricoles
MDL	: Minerals Deposits Limited
MEF	: Méthode des Eléments Finis
MNT	: Modèle Numérique de Terrain
MODFLOW	: Modular Finite-difference flow
NRMSE	: Normalised Root Mean Squared Error
NS	: Niveau statique
NSQ	: Nappe des Sables du Quaternaire
OMM	: Organisation Météorologique Mondiale
OMS	: Organisation Mondiale de Santé
PDMAS	: Programme de développement des marchés agricoles du Sénégal
pH	: potentiel Hydrogène
RMSE	: Root Mean Squared Error
SDE	: Sénégalaise Des Eaux
SEE	: Standard Error of Estimate
SONES	: Société Nationale des Eaux du Sénégal
TPH	: Tonne par heure
UCAD	: Université Cheikh Anta Diop
USAID	: United States Agency for International Development
ZNS	: Zone non saturée

INTRODUCTION

1. Contexte sur les ressources de la zone d'étude et son importance

Le Littoral Nord correspond à la bande de terre qui longe la côte Atlantique Nord du Sénégal, entre Dakar et Saint Louis. D'une superficie d'environ 3000 km², il est caractérisé par la présence des "Niayes" qui sont des dépressions inter-dunaires où affleure la nappe phréatique et où se pratiquent des cultures maraîchères. Il correspond à l'une des zones les plus convoitées du Sénégal avec une densité variant de 68,7 hbts/km² au Nord à 149 hbts/km² au Sud alors que la moyenne nationale est de 69 hbts/km² (ANSD, 2013). Cette forte densité s'explique, d'une part, par le développement des cultures maraîchères et fruitières et d'autre part, par sa proximité avec l'océan qui lui confère une position privilégiée dans les activités de pêche et de tourisme. Elle compte environ 60% de la production maraîchère nationale et 80% des exportations horticoles (ISRA, 1996). Ses ressources en eau proviennent essentiellement des apports de la nappe superficielle des sables quaternaires. Les principales sources d'alimentation en eau potable, agricole et industrielle de la zone d'étude demeurent la nappe des sables du Quaternaire et l'aquifère du Maastrichtien.

2. Problématique

A l'instar de tous les pays sahéliens, le Sénégal subit l'avancée du désert, la baisse pluviométrique, la recrudescence de la sécheresse et l'urbanisation croissante. Ainsi, les eaux souterraines qui constituent la principale ressource en eau d'approvisionnement du pays se confrontent à une baisse piézométrique depuis les années 65 et à une progression de l'intrusion saline dans certaines parties de la bande côtière. La baisse piézométrique enregistrée par cette dernière serait due aux prélèvements pour l'alimentation en eau de la population dakaroise et à la baisse pluviométrique des dernières décennies du 20^e siècle (Faye S. , 1995). Cette région a connu, au cours des dernières décennies, de profondes mutations découlant des contraintes naturelles et anthropiques dont la baisse de la pluviométrie et son corollaire l'assèchement progressif des dépressions humides qui ont entraîné le déplacement des périmètres maraîchers des marges de celles-ci vers le pied des talus. Il s'y ajoute, l'urbanisation progressive et la démographie croissante induites par le développement du tissu industriel qui ont généré une forte pression anthropique sur les ressources en eau souterraine. Ces effets combinés comportent, pour la nappe des sables, les risques suivants :

- la baisse généralisée de la piézométrie ;
- l'intrusion d'eau saline ;
- la pollution des eaux souterraines du fait de l'urbanisation ;
- la pollution par les engrais chimiques et les pesticides utilisés dans le maraîchage ;

- l'évaporation intense des eaux de la nappe (les étangs naturels des Niayes ou artificiels des excavations minières) ;
- l'augmentation des prélèvements pour des besoins maraichers et miniers.

3. Justification

Dans ce contexte, vient s'ajouter l'exploitation des sables minéralisés du Littoral Nord par la compagnie Grande Côte Operations (GCO) dont le 1^{er} panneau d'exploitation se trouve à 130 km au Nord de Dakar dans les environs du village de Diogo, département de Tivaouane, région de Thiès. Les eaux souterraines demeurent un facteur clé pour la plupart des exploitations minières. Elles interviennent aussi bien dans les processus de production que dans la gestion des rejets. En ce qui concerne l'exploitation des sables minéralisés de la Grande Côte par dragage, elles sont déterminantes dans le résultat de la production du concentré de minéraux lourds. Elles peuvent également être des sources de risques d'inondation des périmètres maraichers aux alentours. La mine de Grande Côte Operations traite en moyenne 150000 tonnes de sable par jour. Cette production est rendue possible grâce aux pompages par la drague de la nappe quaternaire. Ce prélèvement permanent doit être automatiquement et partiellement compensé par un apport d'eau de la nappe maastrichtienne pour le maintien du niveau d'eau optimal d'exploitation. Ainsi, le système d'exploitation des ressources minières de la Grande Côte repose, d'une part, sur un recyclage des eaux de la nappe des sables du Quaternaire (NSQ) et d'autre part, sur un apport d'eau en provenance de la nappe profonde maastrichtienne. La prise en compte de ce nouveau système d'exploitation des sables minéralisés, implanté dans la bande dunaire du Littoral, sera le centre névralgique de la modélisation des écoulements souterrains de la nappe du Quaternaire dans cette zone.

4. Objectif

Ce nouveau contexte d'industrialisation particulière de la zone du Littoral Nord, face aux risques de plus en plus pressants sur les aquifères, constitue l'évènement déclencheur de cette étude. L'objectif global est de contribuer à l'amélioration des connaissances sur les ressources en eaux souterraines du Littoral Nord et l'évaluation des impacts potentiels que pourraient engendrer l'exploitation des sables minéralisés par la compagnie Grande Côte Operations.

5. Méthodologie conceptuelle

Du point de vue conceptuel, la méthodologie portera sur différents aspects. Il s'agira de :

- procéder à la caractérisation hydrodynamique, hydrochimique et isotopique des nappes quaternaires et maastrichtiennes ;

- analyser les impacts des pompages de GCO à travers les résultats du suivi piézométrique ;
- estimer la recharge dans la zone d'étude et analyser la recharge artificielle et le taux de mélange et d'évaporation du bassin de dragage ;
- analyser la pertinence des mesures de protection des périmètres maraichers pour lutter contre l'inondation ;
- concevoir et tester un modèle de gestion hydrogéologique des prochaines passes minières de GCO d'ici l'horizon 2025 ;
- faire des prévisions piézométriques et le bilan d'eau de la nappe du Littoral Nord.

6. Structuration

Cette étude portant sur les aspects quantitatifs et qualitatifs des ressources en eau du Littoral Nord ainsi que sur leurs évolutions spatio-temporelles, s'articule autour de quatre (4) parties.

La première partie est constituée par la présentation de la zone d'étude. Elle traite, d'une part, la description des situations géographique, socio-économique, climatique, géomorphologique, pédologique et végétative et le contexte géologique et hydrogéologique, d'autre part. Cette partie va intégrer l'analyse critique des modèles hydrogéologiques antérieurs réalisés dans la zone.

La deuxième partie est consacrée à la démarche méthodologique et la présentation des différents outils utilisés tels que les sondages manuels, les pompages d'essai, le suivi piézométrique, les analyses hydrochimique et isotopiques et la modélisation hydrodynamique.

La troisième partie traite de façon détaillée le contexte hydrogéologique de la zone minière. Elle est consacrée aux traitements des données collectées à partir des différentes méthodes d'investigation et à l'interprétation des résultats obtenus. Ils ont permis, entre autres, d'estimer la recharge dans la zone d'étude et de procéder aux caractérisations hydrodynamique, hydrochimique et isotopique des nappes.

La dernière partie est consacrée à la modélisation hydrodynamique de la nappe, limitée au sous bassin contenant l'exploitation minière de GCO. Elle traite depuis le modèle conceptuel jusqu'aux résultats des différentes phases de calage, de validation et de simulations prédictives tenant en compte les prévisions de production à l'horizon 2025 de GCO. Cette partie est terminée par un chapitre faisant état de la synthèse des recommandations pour une gestion durable tout en ouvrant les discussions sur l'avenir des ressources en eaux dans le Littoral Nord.

PREMIERE PARTIE

CADRE PHYSIQUE ET SOCIO-ECONOMIQUE

Introduction

Cette partie décrit la situation actuelle et les modifications qui se sont produites dans la zone d'étude sur les plans géomorphologique, environnemental, végétatif, hydrographique, démographique, socio-économique et surtout industriel. Une part importante sera consacrée à la géologie et à l'hydrogéologie dans un contexte de changement climatique et de pression de plus en plus accrue exercée par l'Homme sur les ressources en eau souterraine. Le dernier chapitre fera l'objet de la présentation et de l'analyse des différents modèles hydrogéologiques qui ont été réalisés sur l'aquifère supérieur du Quaternaire dans la zone d'étude.

Chapitre I. Situation géographique et socio-économique

I.1 Situation géographique et démographique

I.1.1 Localisation géographique et administrative

La zone d'étude, communément appelée le Littoral Nord, s'étend entre les parallèles 15° et 16° de latitude Nord, correspondant à la bordure occidentale du bassin sédimentaire sénégal-mauritanien. Elle s'étend sur plus de 100 km de longueur et 30 à 35 km de largeur, ce qui représente une superficie d'environ 3000 km² (Dryade, 1990). Elle est limitée à l'Ouest par l'Océan Atlantique, à l'Est par la route nationale Thiès - Saint-Louis, au Nord par le delta du fleuve Sénégal et au Sud par le plateau de Thiès (FIGURE 1). Elle s'identifie par la présence des Niayes qui sont des bas-fonds inter-dunaires riches en dépôts organiques et surtout marquées par un écosystème particulier composé de reliques d'anciennes colonies forestières. Dans certaines dépressions, la nappe superficielle affleure, par endroit malgré une baisse généralisée de la piézométrie. Ces conditions hydro-morphologiques et pédologiques y ont permis le développement des cultures maraîchères.

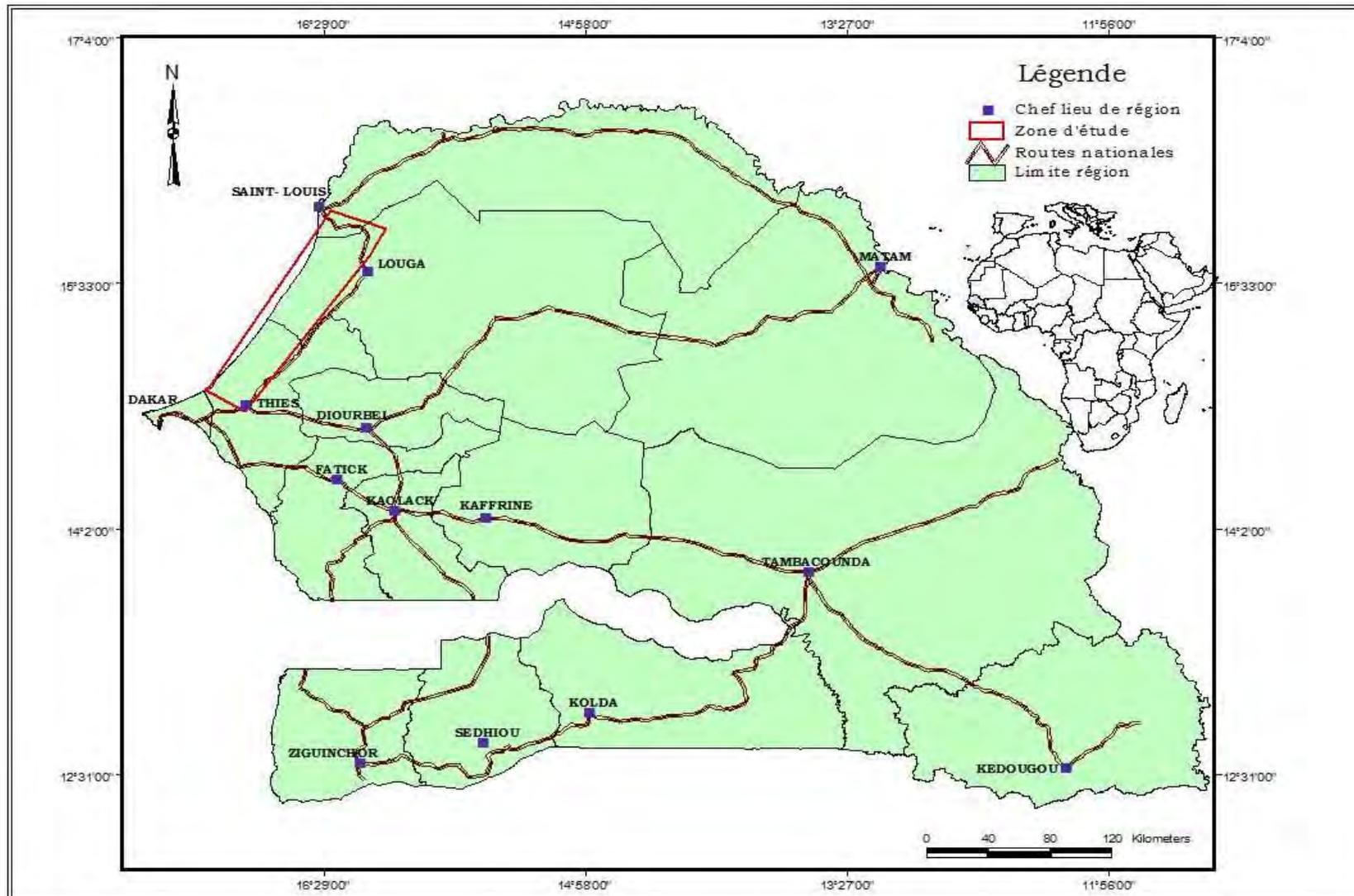


Figure 1: Carte de localisation de la zone d'étude

1.1.2 Démographie

Du point de vue démographique, 53% de la population du Sénégal vit dans la zone côtière. Cette concentration de la population dans les grandes villes du Littoral (Dakar, Thiès, Louga et Saint-Louis) est le résultat d'un exode rural permanent et d'un taux de croissance démographique élevé atteignant 3.5% dans les zones urbaines alors que celui-ci est de 2.5% pour l'ensemble du pays entre 2002 et 2013 (ANSD, 2013). Dans la zone d'étude du Littoral Nord, la densité moyenne de la population dans la partie Sud, appartenant essentiellement au département de Tivaouane est de 149 hbs /km² tandis que dans la partie Nord située dans le département de Kébémér, elle est la même que la moyenne nationale qui est de 69 habitants au km². La plus forte densité, observée dans le secteur Sud de la région, peut s'expliquer par la forte concentration de l'activité maraîchère mais surtout par l'essor du tissu industriel piloté par les ICS et GCO.

1.2 Situation socio-économique de la zone d'étude

La zone d'étude connaît un développement économique très intense par la coexistence d'activités économiques variées et importantes en termes de richesses engendrées. Elles sont essentiellement l'agriculture, la pêche et l'exploitation minière.

1.1.3 Agriculture et pêche

L'agriculture demeure la principale activité de la zone d'étude qui constitue depuis plus d'un siècle la principale zone d'approvisionnement en produits maraichers du pays. La région est le deuxième pôle de production maraîchère du Sénégal avec 1/3 des superficies exploitées et une production estimée à 30.25% de la production nationale (DPS THIES, 2004). Les conditions bioclimatiques et hydriques qui y prédominent sont particulièrement favorables à la culture maraîchère. Sur les marges des dépressions se pratiquent des cultures telles que l'oignon, la pomme de terre, la carotte, le navet, l'aubergine, le chou et de plus en plus du piment du fait de sa grande valeur ajoutée. L'irrigation des plants se fait à partir des « céanes », puits traditionnels qui varient entre 1 et 10 mètres de profondeur. La production maraîchère de la zone des Niayes approvisionne en partie la capitale Dakar et les marchés des villes telles que Saint Louis, Thiès, Louga, Diourbel et même Touba. Dans la zone d'étude, presque toutes les couches de la population s'investissent dans l'agriculture. Les maraîchers représentent 65% de la population (TROPICA, 2005).

L'élevage occupe environ 15% de la population active. Il est pratiqué dans la zone où il y a une forte concentration de la population peulh. Cette activité est favorisée par l'existence de sous-produits agricoles issus des produits maraîchers servant à l'alimentation du bétail.

La pêche artisanale est exercée par 10% de la population qui dispose d'une façade de 65 km. Ce contexte stratégique lui confère une position confortable dans le développement de la pêche au Sénégal avec les centres comme Kayar, Mboro, Fass Boye, Lompoul et Saint Louis.

1.1.4 Exploitation minière

La zone comporte deux grandes sociétés minières : les Industries Chimiques du Sénégal (ICS) créées en 1957 et tout récemment, depuis 2010, la compagnie Grande Côte Operations (GCO).

1.2.2.1 Industries Chimiques du Sénégal

Elle est composée de la mine de phosphate et de l'usine d'acide phosphorique. Le gisement de phosphate a été découvert en 1880, par le géologue H. Hubert qui a constaté au cours des fouilles, la présence de phosphate de chaux très chargé en anhydride phosphorique (Bourrelie & Lespine, 2008). En 1957, avec des réserves estimées à 100 millions de tonnes, la Compagnie Sénégalaise des Phosphates de Taïba (CSPT) a été créée. A partir de 1985, le Sénégal avec les ICS était devenu exportateur d'acide phosphorique en destination essentiellement du marché indien. La capacité de production de la mine, calculée en tonnes de concentré marchand, fluctuait durant ces années entre 1.5 et 2 millions de tonnes. Depuis, cette société ne cesse de jouer un rôle prépondérant dans l'échiquier économique du Sénégal. En 2008, les ICS occupait la 6^e place du TOP100 avec une hausse du chiffre d'affaire de 120 milliards.

1.2.2.2 Grande Côte Operations

Le projet Zircon devenu la société Grande Côte Operations (GCO), constituée avec Tyssedal (qui est une société métallurgique basée au Norvège), les filiales de TiZir. La compagnie GCO a consenti un montant d'environ 400 milliards de FCFA d'investissement et compte devenir dans quelques années le 3^e producteur de zircon avec 7% de la production mondiale. La production a démarré au mois de Mai 2014 et la durée de vie prévisionnelle de la mine est de 25 ans. Elle emploie plus de 1600 personnes dont la moitié exercent par le biais des sociétés contractuelles qui assurent la restauration, la surveillance des sites et une partie de la maintenance.

1.2.2.2.1 Aperçu sur le gisement

Une étude des réserves en sable titanifère de la zone des Niayes a été menée en 1990 par la société américaine DuPont Chemicals qui s'intéressait à l'extraction de l'ilménite. Les estimations effectuées par DuPont ont été approfondies par un programme, d'exploration assez soutenue, effectué par la société MDL entre 2004 et 2010.

Dans l'ensemble de la zone explorée, la réserve prouvée de minerais à une profondeur de 6 mètres sous la nappe phréatique est de à 800 millions de tonnes à 1.8% de minéraux lourds ; soit 14.4 millions de tonnes de minéraux lourds dont la composition moyenne est la suivante :

- 85% d'ilménite ;
- 12% de zircon ;
- 1,6% de leucoxene ;
- 0.9% de rutile ;

Au début, les réserves étaient estimées à 1000 millions de tonnes à 1.7% de minéraux lourds « Heavy Mineral » (HM). La quantité moyenne annuelle extraite par dragage est de 55 millions de tonnes de sables minéralisés à un débit nominal de 7000 t/h ; soit une durée d'exploitation de 14 ans.

Aujourd'hui, les ressources réévaluées à 1.9 milliards de tonnes avec 1.4% de minéraux lourds étendent la durée de vie de la mine à 25 ans.

Chapitre II. Contexte climatique

II.1 Contexte climatique de la zone d'étude

Les facteurs climatologiques jouent, par rapport à la nappe, un rôle fondamental en ce qui concerne aussi bien les possibilités d'alimentation que les pertes par évaporation. La totalité de l'eau transitant dans l'aquifère provient en effet de la faible part des eaux de pluie qui échappe au phénomène d'évapotranspiration et peut ainsi percoler jusqu'à la nappe (Noel, 1978).

II.1.1 Conditions climatiques

Le bassin du Sénégal s'étend entre 10° 30' et 17° 30' de latitude Nord. Cette position géographique lui confère son appartenance à la région sahélienne d'où un climat semi-aride chaud. Néanmoins le Sahel, au sens strict, est habituellement défini comme la zone tropicale comprise entre les domaines saharien et soudanien, où se produit une alternance marquée entre une courte saison humide estivale de 2 à 4 mois et une très longue saison sèche « hivernale » de 8 à 10 mois. Le climat se définit ainsi :

- chaud, tropical parce que la température annuelle moyenne la moins chaude est supérieure ou égale à 18°C ;
- semi-aride parce que les précipitations annuelles moyennes sont assez basses, entre 250 mm et 450 mm (et supérieures à 100-150 mm) caractérisées par une très courte saison de pluies intenses, irrégulières et imprévisibles.

Ce contexte climatique particulier s'explique par un dynamisme des courants anticycloniques et par conséquent des saisons.

II.1.1.1 Saisons

La zone de convergence entre les masses d'air, l'alizé continental et la mousson, constitue la zone intertropicale de convergence (ZITC) dont la trace au sol représente le front intertropical (FIT). La position et les déplacements de la ZITC essentiellement liés aux températures de surface conditionnent l'alternance régulière des deux saisons bien distinctes.

II.1.1.2 Saison sèche

Dès le mois de Novembre, le F.I.T. se déplace vers la zone équatoriale. Il ne franchit les côtes septentrionales du Sénégal qu'au mois de Juin. Ainsi, de Novembre à Mai, la sécheresse s'installe sur le Littoral Nord qui au demeurant devient la zone d'influence des alizés maritimes de direction NW à SE.

L'Harmattan, ainsi que les alizés continentaux, soufflent à l'intérieur du pays, atteignant très rarement la bordure occidentale Nord du Sénégal, ce qui lui confère des températures douces se situant en moyenne entre 20 et 27 °C et des écarts thermiques journaliers faibles de l'ordre de 10°C.

II.1.1.3 Saison des pluies ou hivernage

En saison des pluies, les alizés associés au régime anticyclonique s'interrompent provisoirement et laissent place à la mousson, flux d'air chaud et humide associé au régime dépressionnaire de la ZITC, qui apporte son lot de nuages, de pluies et d'humidité. Cette saison pluvieuse s'installe de Juin à Octobre avec un optimum centré en général sur le mois d'Août lorsque le F.I.T. atteint sa position septentrionale extrême (Leroux, 1979). Les pluies associées au F.I.T. sont orageuses (pluies de lignes de grains) et décroissantes vers le Nord (500 mm à Dakar, 400 mm à Mboro et 350 mm à Saint Louis). Pendant la saison des pluies, l'humidité atmosphérique est supérieure à 80%.

II.1.2 Pluviométrie à différentes échelles du temps

II.1.2.1 Evolution pluviométrique dans la zone d'étude

Les données climatiques de la zone d'étude sont répertoriées au niveau de l'Agence Nationale de l'Aviation Civile et de la Météorologie du Sénégal (ANACIM). Elles concernent plusieurs stations mais avec des séries chronologiques de longueurs différentes. Ainsi, l'analyse de l'évolution pluviométrique est basée sur les données des quatre stations synoptiques les plus utilisées. Il s'agit des stations de Saint-Louis, Louga, Thiès et Dakar.

Dans la zone du Littoral Nord, les précipitations annuelles varient de 200 à 500 mm du Sud au Nord suivant le gradient latitudinal. Les pluies maximales mensuelles sont le plus souvent obtenues soit au mois d'Août soit au mois de Septembre lorsque le front intertropical (F.I.T) atteint sa position septentrionale extrême (Kane A. , 1985).

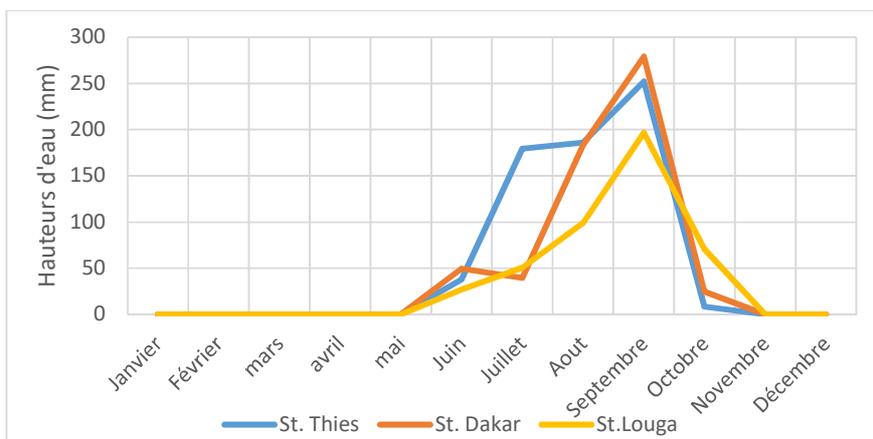


Figure 2 : Hauteur pluviométrique mensuelle des stations de Dakar, Thiès et Louga en 2010

En 2010, Les stations pluviométriques de Dakar, Thiès et Louga montrent un pic pluviométrique mensuel au mois de Septembre avec un gradient qui baisse en fonction de la latitude (FIGURE 2). Durant la saison sèche, il y a une quasi-absence des précipitations. Les quelques pluies enregistrées connues sous le nom de « pluies hors saison » ou « pluies de heug » sont dues à des advections froides modulées par la température de l'océan (Tapsoba, 1997).

II.1.2.2 Carte des isohyètes

En ce qui concerne la pluviométrie moyenne annuelle, l'intérêt porte sur l'année de référence 1975 qui suit la grande sécheresse de 1973 et marque le début d'une baisse des nappes au Sénégal. La pluviométrie moyenne ainsi que le nombre de jours de précipitation diminue régulièrement du Nord vers le Sud, partant de 300 mm le long de la latitude de Louga à 1200 mm en Casamance en passant par 500 mm à Thiès (FIGURE 3). Les isohyètes représentent les normales sur une trentaine d'années des 1931-1960, 1961-1990 et la moyenne entre 1970-1993. La tendance est la baisse pluviométrique entre les deux périodes. Cette baisse pluviométrique actuelle illustrée par les isohyètes montre nettement la migration des isohyètes vers le Sud, notamment si l'on considère la moyenne 1970-1993. L'isohyète 500 mm descend, en effet, de 180 à 200 km jusqu'au Sud de la frontière avec la Gambie (Ndong, 1995).

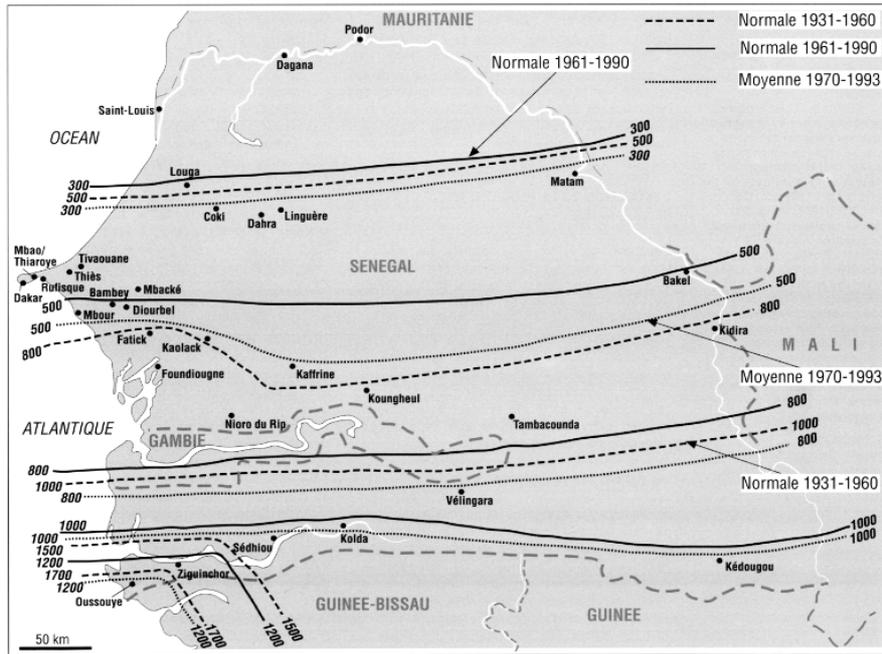


Figure 3 : Carte d'évolution des isohyètes moyennes annuelles (Ndong, 1995)

II.1.3 Autres facteurs climatiques

II.1.3.1 Température

Les températures moyennes de Saint-Louis sont inférieures à celles de Thiès et Louga. Elles sont fortement influencées par la fraîcheur des alizés maritimes en provenance de l'océan Atlantique. Cependant, une légère hausse des températures est observée durant cette période (FIGURE 4).

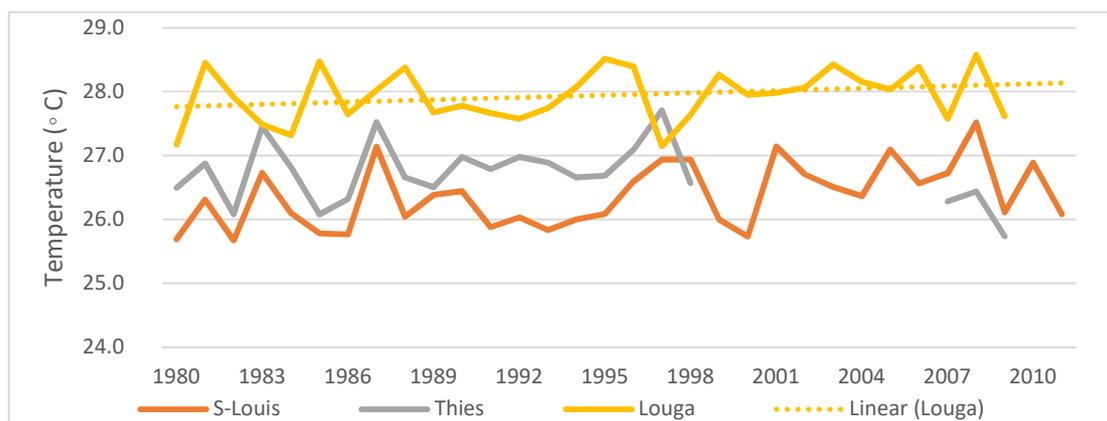


Figure 4: Evolution des températures moyennes annuelles entre 1980 et 2011 au niveau des différentes stations

Les températures moyennes mensuelles enregistrées entre 1980 et 2011 sont inférieures à 30°C à l'exception de Louga qui a connu le pic à 30.3 °C en Octobre (FIGURE 5). Les données de températures moyennes mensuelles subdivisent l'année en une saison fraîche et une saison chaude suivant la variation suivante :

- les températures les plus élevées se situent entre 29 et 30°C et se rencontrent durant la saison des pluies;
- les températures les plus basses sont rencontrées durant la saison sèche (Novembre à Mai) avec des valeurs oscillant entre 21.2 et 28.8°C.

Les périodes les plus chaudes correspondent généralement à la fin des saisons sèches et des saisons pluvieuses. Le pic est atteint pour l'ensemble des stations au mois d'Octobre. Elles augmentent globalement d'Ouest en Est et de Janvier à Octobre passant de 21°C à Dakar à 30°C à Louga (influence régulatrice de la mer) et du Sud vers le Nord contrairement aux courbes isohyètes. Les amplitudes entre les températures minimales et maximales varient de 5.8°C en Janvier et de 6.7°C en Octobre.

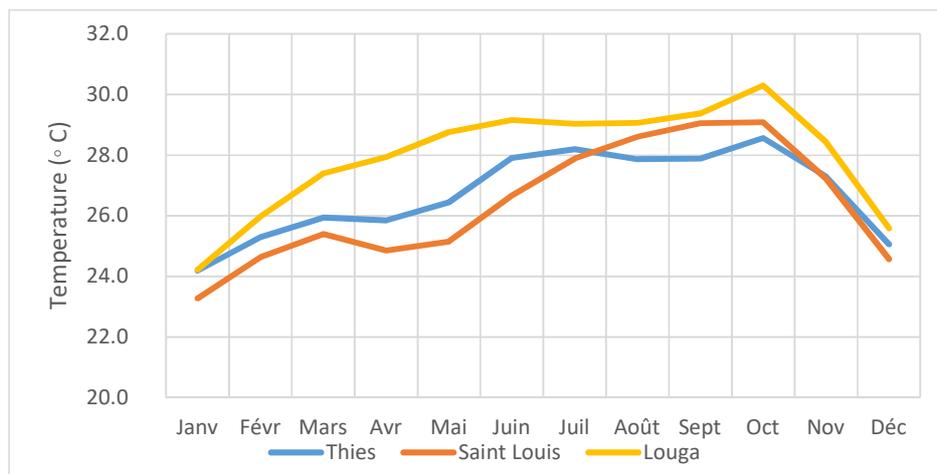


Figure 5: Evolution des températures moyennes mensuelles entre 1980 et 2011 au niveau des stations de Dakar, Louga et Saint Louis

II.1.3.2 Vents

La permanence et la vitesse des vents contribuent actuellement de façon active à la dégradation du milieu par l'ensablement progressif de la plupart du bas-fond des Niayes (BRGM, 1984).

Les moyennes mensuelles de vitesse des vents mesurées à 2 m du sol sur la période 1981- 2011, sont faibles et ne dépassent pas 5.5 m/s. Le pic est atteint à Dakar avec 5.4 m/s au mois d'Avril. Les vents sont plus intenses au niveau des villes de la Côte (Dakar et Saint Louis) que celles de l'intérieur (Thiès et Louga).

Cependant pour l'ensemble des stations, ils gardent la même allure : les maxima au mois d'Avril et les minima au mois de Septembre (FIGURE 6). L'amplitude varie de 1.25 m/s à Louga à 2.36 m/s à Dakar.

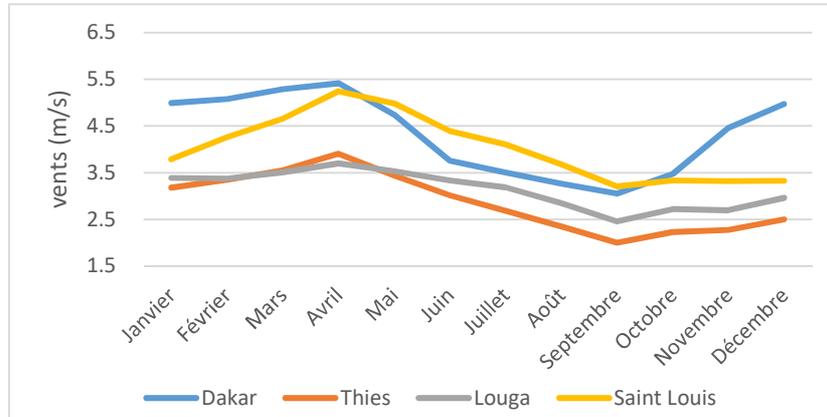


Figure 6: Vitesses moyennes mensuelles des différentes stations entre 1981 et 2011

Pour la station de Saint Louis, les données recueillies entre 1981 et 2011 montrent une direction dominante des vents suivant la période, comme suit (FIGURE 7):

- entre Octobre et Novembre, la direction est dominante N ;
- de Décembre à Janvier, les vents sont de direction NE à N ;
- entre Février et Mai, les vents sont dans leur quasi-totalité de direction N ;
- entre Juin et Septembre, les directions dominantes sont N à NW.

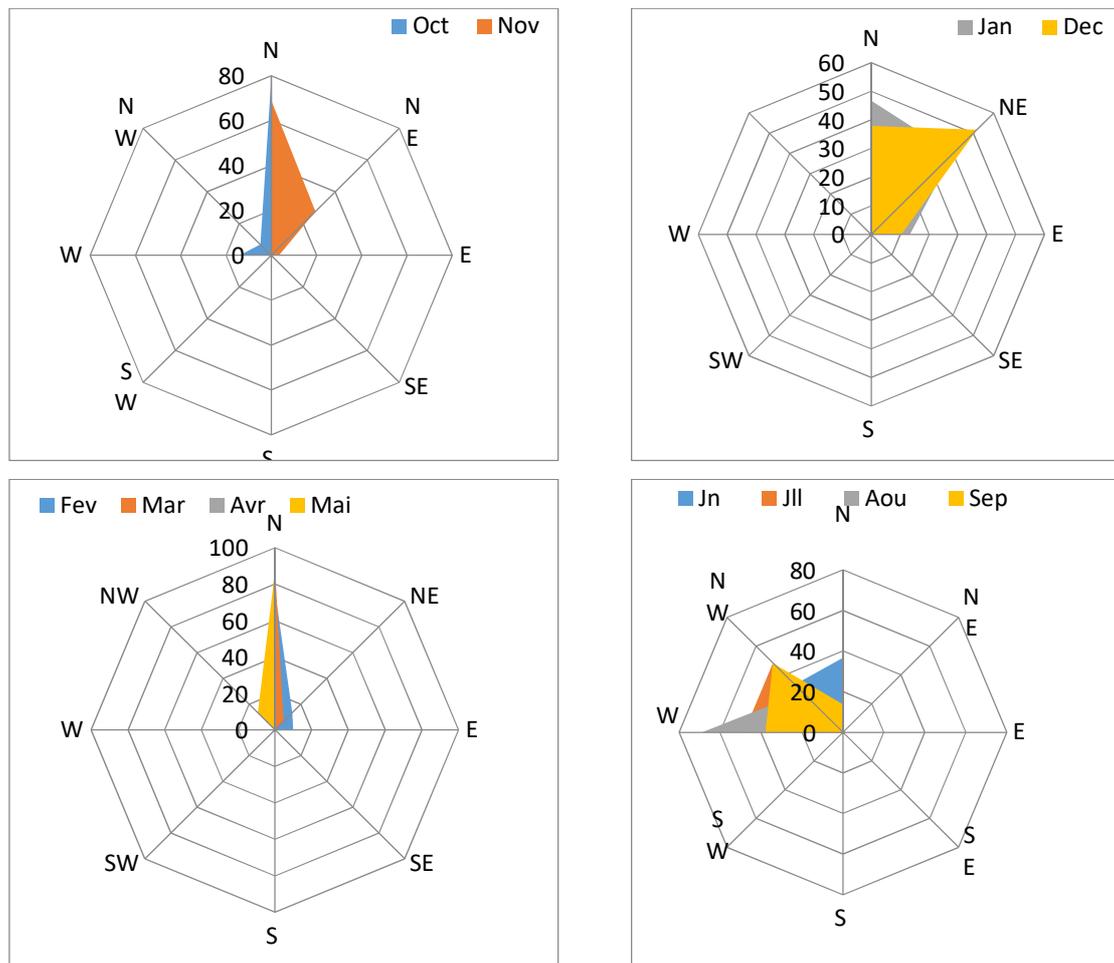


Figure 7: Direction dominante des vents de la station de Saint Louis

II.1.3.3 Humidité relative

L'humidité relative est le rapport entre le poids de la vapeur d'eau que contient l'air et celui qu'il contiendrait à saturation (Viers & Vigneau, 2001).

Les données recueillies pour les différentes stations de la zone d'étude entre 1981 et 2011 mettent en évidence les observations suivantes (Figure 8) :

- les maxima (88 à 95%) sont enregistrés en Septembre ;
- les minima (19 à 42%) en Janvier et Février ;
- l'humidité relative moyenne mensuelle de l'air varie de 40% en Janvier à 83% en Septembre.

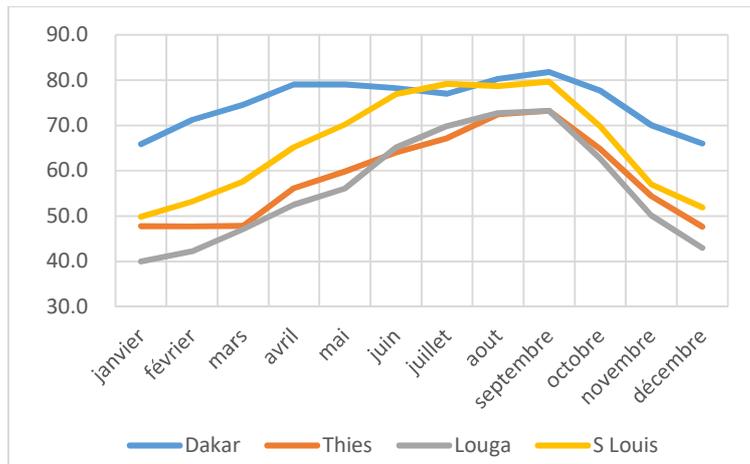


Figure 8 : L'humidité relative moyenne mensuelle pour la période 1981-2011

L'abondance des pluies en Août et Septembre est un des facteurs qui explique le maximum d'humidité relative enregistré durant le mois d'Août et de Septembre. Les valeurs d'humidité relative enregistrées dans les stations côtières sont relativement plus élevées du fait de l'influence de l'alizé maritime. L'humidité relative moyenne annuelle pour cette période, varie de 57% à Louga à 74% à Dakar.

II.1.3.4 Insolation

La durée de l'insolation dépend de plusieurs facteurs parmi lesquels les facteurs cosmiques, les précipitations, la nébulosité, la poussière, le brouillard, les durées diurne et nocturne. Les données des quatre stations Dakar, Thiès, Louga et Saint Louis recueillies pour la période 1981 – 2011, montrent que la durée moyenne de l'insolation sur l'ensemble de la zone d'étude est de 8 heures par jour. Elle varie de 7.3 heures à Saint Louis à 8.4 heures à Louga.

Le nombre d'heures d'insolation pour ces différentes stations (1981-2011) montre au cours de l'année un maximum en Avril (9.4 à Thiès) et un minimum durant la saison des pluies (selon les conditions de la nébulosité) et dans une moindre mesure en Décembre (FIGURE 9).

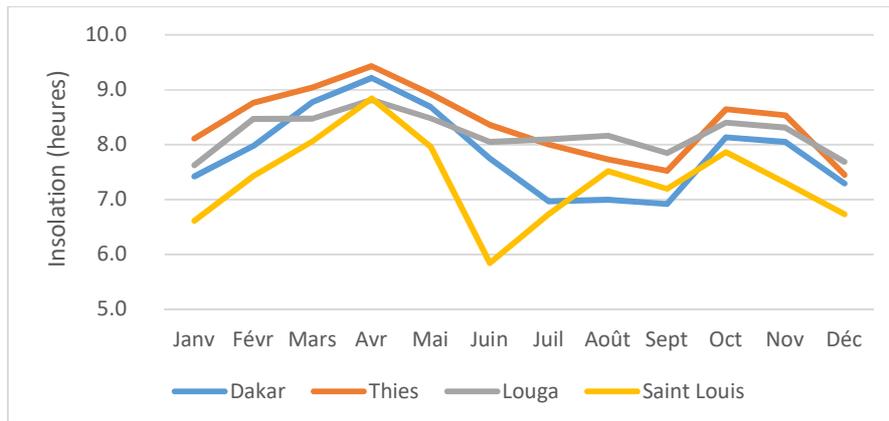


Figure 9: La durée d'insolation moyenne mensuelle au niveau des différentes stations (1981-2011)

II.1.3.5 Évapotranspiration

L'évapotranspiration désigne la quantité d'eau perdue sous forme de vapeur par unité de surface terrestre à partir des eaux de surface, des nappes phréatiques et du sol et à partir des organes aériens des végétaux. Elle est essentiellement contrôlée par le pouvoir évaporant de l'atmosphère qui fixe la limite maximale d'eau pouvant être évaporée (Gaye C. , 1980).

Ce paramètre d'évapotranspiration est utilisé aussi bien dans le calcul du bilan hydrique et donc de la recharge. Il comprend deux notions que sont l'évapotranspiration réelle (ETR) et l'évapotranspiration potentielle (ETP). L'ETP correspond principalement à la valeur maximale possible de l'ETR. Elle est obtenue quand le sol atteint sa capacité de rétention maximale.

Dès lors qu'on conçoit qu'il soit difficile d'ajuster des formules faisant intervenir tous ces facteurs, l'évapotranspiration réelle est quasi-impossible à déterminer directement du fait de la complexité du comportement biologique des végétaux et de la diversité des sols. L'évapotranspiration potentielle (ETP) constitue la valeur maximale que peut avoir l'évapotranspiration. En l'absence de méthode directe de mesure sûre d'évapotranspiration, un certain nombre de formules empiriques (Penman, 1948; Thornthwaite, 1954; Turc, 1961) permettent de la calculer.

La formule de Turc qui semble donner des résultats satisfaisants dans les zones arides à semi arides est la plus utilisée en Afrique de l'Ouest.

Elle s'écrit de la façon suivante :

$$ETP (mm) = k \left(\frac{T}{T+15} \right) * (I_g + 50) \quad \text{si } Hr > 50\% \quad (1)$$

$$ETP (mm) = k \left(\frac{T}{T+15} \right) * (I_g + 50) \left[1 + \frac{50-Hr}{70} \right], \text{ si } Hr < 50\% \quad (2)$$

avec,

- ✓ Hr : humidité relative en% ;
- ✓ T : température moyenne journalière en °C ;
- ✓ I_g : radiation solaire globale, elle s'exprime en cal/cm²/jour pendant le mois considéré et se calcule à l'aide de la formule suivante : $I_g = I_{ga} (0.18 + 0.62 (h/H))$
 - I_{ga} : radiation solaire directe moyenne en l'absence de l'atmosphère ;
 - h : durée réelle d'insolation (heure/jour) ;
 - H : durée astronomique du jour pendant le mois considéré (heure/jour) ;
- ✓ $k = 0.13 * n$ avec n = nombre de jour de la période considérée. Ainsi k prend les différentes valeurs suivantes :
 - 0.013 pour 1 jour ;
 - 0.39 pour les mois de 30 jours ;
 - 0.40 pour les mois de 31 jours ;
 - 0.36 ou 0.37 pour les mois de février.

NB : H et I_{ga} varient en fonction de la latitude et sont données par des tables.

On ne dispose pas de mesures directes de l'évapotranspiration réelle (ETR). Par contre, les données climatiques des quatre stations considérées sur la période 1981–2011, ont permis de calculer l'ETP annuelle et mensuelle par la méthode Turc (TABLEAU 1).

Tableau 1 : Valeurs de l'ETP (en mm) calculée par la méthode de Turc-stations du Littoral Nord (1981-2011)

Mois	Dakar		Thies		Louga		Saint Louis	
	P (mm)	ETP	P (mm)	ETP	P (mm)	ETP	P (mm)	ETP
Janv.	2	115	0	127	0	122	3	111
Fev.	0	118	0	134	1	132	2	119
Mars	0	142	0	155	0	152	0	143
Avril	-	145	-	157	-	154	0	148
Mai	0	143	0	153	1	152	0	139
Juin	10	133	13	143	10	142	7	114
Juil.	55	132	83	144	53	147	43	130
Aout	158	134	184	140	121	149	85	141
Sept.	130	130	134	136	87	143	94	135
Oct.	22	144	31	150	22	151	21	142
Nov.	0	128	0	135	1	134	0	122
Dec.	0	116	0	119	0	123	1	111
Annee	377	1,580	446	1,694	297	1,701	257	1,556

Les résultats montrent que :

- à l'échelle mensuelle, les valeurs d'ETP et de précipitation montrent que tous les mois sont déficitaires pour la partie septentrionale de la zone d'étude. Par contre le mois d'Août est excédentaire pour la partie Sud (Thiès et Dakar). Il se constitue alors une réserve en eau comprise entre 24 mm à Dakar et 44 mm à Thiès. A l'instar de la station de Louga (FIGURE 10), l'année présente globalement un bilan hydrique négatif, ainsi ces quantités naturellement prélevées seraient extraites des réserves de la nappe des sables caractérisée par son niveau statique très proche du sol et parfois affleurant.

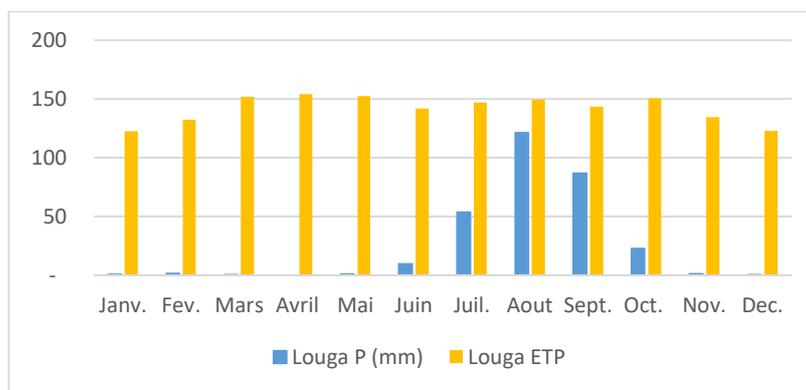


Figure 10: Comparaison entre ETP et pluviométrie de la station de Louga

- à l'échelle annuelle, les valeurs sont comprises entre 1556 et 1701 mm. Elles varient également d'une année à l'autre mais faiblement (TABLEAU 2). Elles sont plus élevées lors d'années déficitaires et plus faibles en période humide. Ces valeurs d'ET, comparées aux valeurs de quantité de précipitation annuelle, donnent un bilan hydrique négatif à l'échelle annuelle.

Tableau 2 : ETP annuelle (en mm) dans les stations de Saint-Louis et de Louga (Pernel & Gageonnet, 1992)

Année	1987	1988	1989	1990	1991
Saint-Louis	1545	1492	1534	1583	1518
Louga	1699	1748	1731	1707	1711

II.2 Variabilité interannuelle des précipitations

L'intérêt de cette étude porte essentiellement sur les deux importantes nappes de la zone du Littoral Nord que sont le Quaternaire et le Maastrichtien. Elles permettent à la mine de GCO d'assurer une bonne

récupération des eaux d'infiltration par recyclage et un approvisionnement en eau d'appoint, régulier, du bassin de dragage pour une exploitation optimale du gisement.

Vu l'importance de la pluviométrie sur la recharge de la nappe supérieure des sables, un aperçu sera d'abord consacré à la variabilité interannuelle des précipitations. Il s'en suivra une synthèse des paramètres hydrodynamiques obtenus à partir des résultats de pompage d'essai des forages de la mine et des autres structures telles que la SONES, la Direction de l'Hydraulique et les ICS. Enfin, un paragraphe sera réservé au traitement des résultats des différentes campagnes de suivi piézométriques réalisées par le Ministère en charge de l'Hydraulique et la compagnie GCO.

II.2.1 Méthodes d'analyse

Pour analyser la variabilité des précipitations annuelles, plusieurs méthodes ont été utilisées à savoir : la moyenne arithmétique, la moyenne mobile pondérée, le coefficient de variation, l'indice de variation et un certain nombre d'indices météorologiques de sécheresse :

- Indice de l'écart à la moyenne (E_m) est l'indice le plus utilisé pour estimer le déficit pluviométrique à l'échelle de l'année (Jouli & al, 2013). Il permet d'évaluer les excédents ou les déficits d'une année quelconque par rapport à la moyenne de la série. L'écart à la moyenne est la différence entre la hauteur de précipitation annuelle (P_i) et la hauteur moyenne annuelle de précipitation (P_m) :

$$E_m = P_i - P_m \quad (3)$$

L'écart est positif pour l'année humide et négatif pour les années sèches. On parle d'année déficitaire quand la pluie est inférieure à la moyenne et d'année excédentaire quand la moyenne est dépassée.

- Indice de Précipitations standardisé (IPS) ou normalisé (Mckee, Doesken, & Kleist, 1993;1995) permet tout aussi bien de vérifier les périodes/cycles humides que les périodes/cycles secs. La formule mathématique d'IPS est la suivante :

$$IPS = (P_i - P_m) / \sigma \quad (4)$$

P_i : Précipitation de l'année, i

P_m : Précipitation moyenne

σ : Déviation standard ou écart type

Les valeurs de l'IPS sont classifiées de la manière suivante :

≥ 2.0	Extrêmement humide
de 1.5 à 1.99	Très humide
de 1.0 à 1.49	Modérément humide
de -0.99 à 0.99	Proche de la normale
de -1.0 à -1.49	Modérément sec
de -1.5 à -1.99	Très sec
≤ -2	Extrêmement sec

- Indice de déficit pluviométrique (IDP) ou Indice de l'écart à la normale (En). Il permet de visualiser et de déterminer le nombre d'années déficitaires et leur succession. Une année est qualifiée d'humide si cet indice est positif et sèche lorsqu'il est négatif. Il s'exprime par la formule suivante :

$$IDP (\%) = ((P_i - P_m) / \sigma) \times 100 \quad (5)$$

Où :

IDP : Indice de déficit pluviométrique (en%).

P_i : précipitation annuelle (en mm).

P_m : précipitation moyenne (en mm).

II.2.2 Résultats et interprétation

En se basant sur les courbes d'évolution pluviométrique annuelles des quatre stations, on peut remarquer les irrégularités des précipitations annuelles et leurs tendances à la baisse en dessous de la pluviométrie moyenne. Cette précipitation moyenne annuelle est plus faible au Nord (285 mm à Saint Louis et 318 mm à Louga) et plus importante au Sud où elle est égale à 553 mm à Thiès et 439 mm à Dakar (TABLEAU 3).

Tableau 3 : Caractéristiques statistiques des données pluviométriques annuelles

Stations	Louga	St-Louis	Thiès	Dakar	Régionale
Moyenne (mm)	318.2	285.2	553.9	439.8	399.3
Médiane (mm)	310.3	283.2	537.1	415.1	386.4
Minimum (mm)	149.6	59.1	100.1	116.7	106.4
Maximum (mm)	599.0	593.6	1224.5	901.0	829.5
Ecart type	106.9	112.2	204.8	184.9	152.2
Coef, de variation (%)	33.6	39.3	36.9	42.0	38.0
Coef, d'asymétrie	0.3	0.5	0.5	0.6	0.5
Interv, Variation (mm)	449.4	534.5	1124.4	784.3	723.1

Les quantités de pluies enregistrées annuellement varient en moyenne entre 285 mm à Saint Louis et 553 mm à Thiès. Les totaux annuels pluviométriques connaissent une grande variabilité. Ceci est une des

caractéristiques des zones sahéliennes où l'essentiel de la pluviométrie est apporté par les lignes de grains dont la fréquence est très variable d'une année à l'autre. Le coefficient de variation (C.V) est le rapport entre l'écart-type divisé par la moyenne. Elle donne la dispersion des valeurs autour de la moyenne. Tandis que l'intervalle de variation (I. V), c'est la différence entre la précipitation maximale et la précipitation minimale annuelle de la série. Cette variabilité interannuelle est confirmée par l'intervalle de variation (I. V = 1124.4 mm pour Thiès et 723.15 mm pour la moyenne régionale) et le coefficient de variation interannuel qui a une valeur minimale de 0.3.

L'analyse des caractéristiques de ces séries pluviométriques montre qu'elles sont relativement dissymétriques. On note une différence significative entre paramètres de position (moyenne, médiane). L'écart entre le minimum et le maximum est très important.

La moyenne mobile pondérée permet de lisser la courbe évolutive des précipitations annuelles. Elle traduit mieux le comportement de la pluviométrie au niveau de la station sur la période étudiée. La courbe de la moyenne mobile sur 5 ans montre une légère tendance à la hausse de la pluviométrie au-dessus de la moyenne jusqu'aux années 1969 – 1970. Au-delà, elle décroît jusqu'en 1999 – 2000 avant de reprendre une légère hausse tout en restant proche de la moyenne pluviométrique (FIGURE 11).

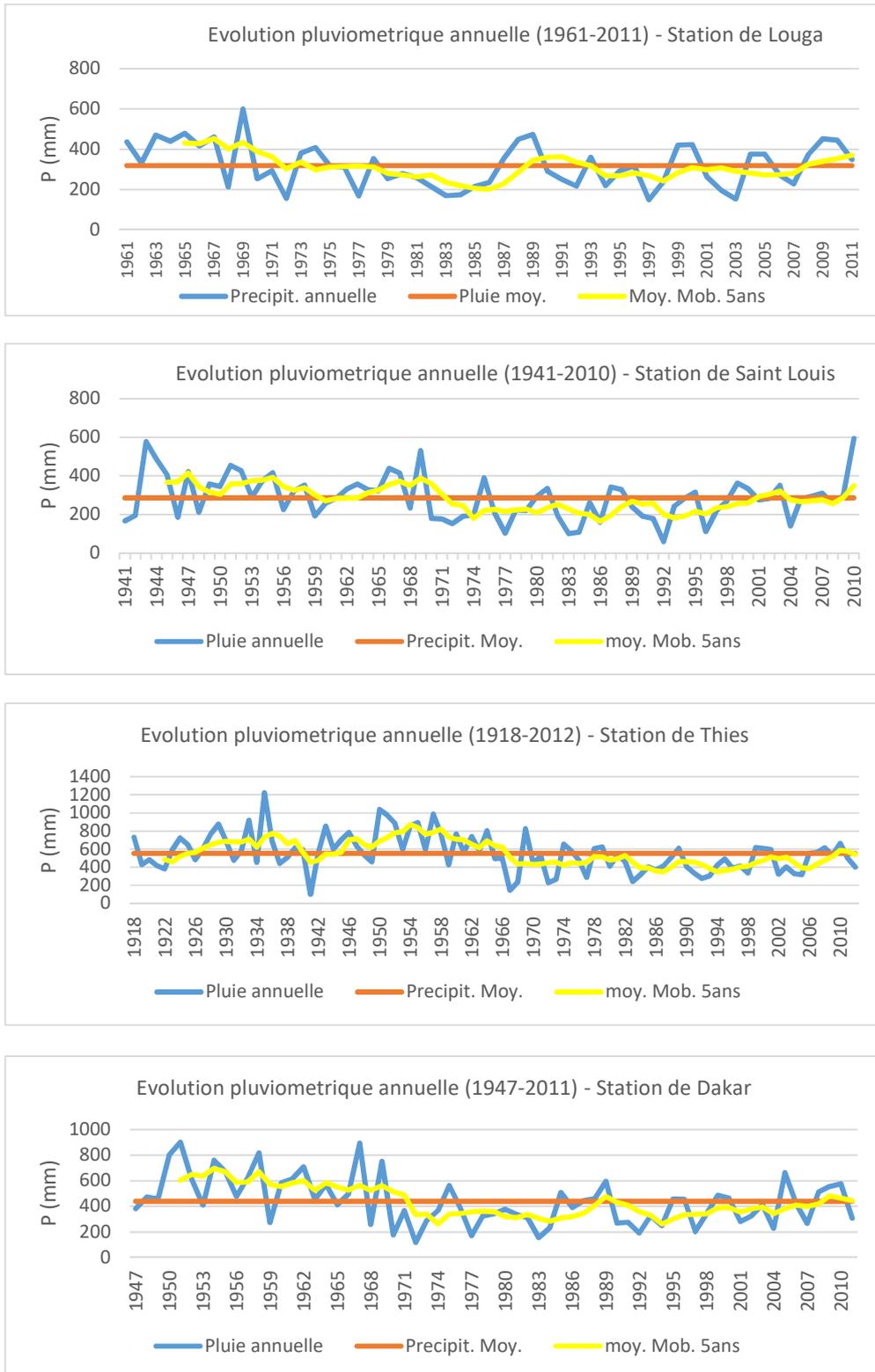


Figure 11: L'évolution pluviométrique annuelle au niveau des différentes stations

L'évolution des précipitations annuelles dans ces 4 stations met en évidence le déficit pluviométrique survenu depuis les années 1972–1973 au niveau de la zone d'étude. Elle permet de constater que la variabilité de la hauteur pluviométrique d'une année à l'autre et qu'il existe des périodes très pluvieuses dans le passé (1935 : 1225 mm et 1950 : 1039 mm à Thiès ; et 1951 : 901mm à Dakar) et des périodes très déficitaires postérieures à 1969.

Les écarts pluviométriques observés par rapport à la moyenne annuelle ou l'indice de l'écart à la moyenne au niveau des stations de Louga, Saint-Louis, Thiès et Dakar montrent également que la hauteur de pluie tombée est variable selon les années (FIGURE 12). On observe au niveau des différentes stations considérées, d'une part des pics de précipitation qui indiquent que les régions de la bordure méridionale de la zone d'étude (Thiès et Dakar) ont enregistrées des précipitations plus importantes dans le passé que celles du Nord (Saint Louis et Louga) et d'autre part, une hausse de la pluviométrie au cours de la décennie (2006 – 2010).

Suivant la « magnitude » de la sécheresse définie par le calcul de l'IPS, les sécheresses les plus persistantes, depuis 1950 sont survenues au cours des années suivantes :

- 1967- 1968 : Thiès.
- 1972-73, 1977, 1983-84 et 1992 : Louga, Saint Louis, Thiès et Dakar.
- 1996 : Saint Louis.
- 2003 : Louga.

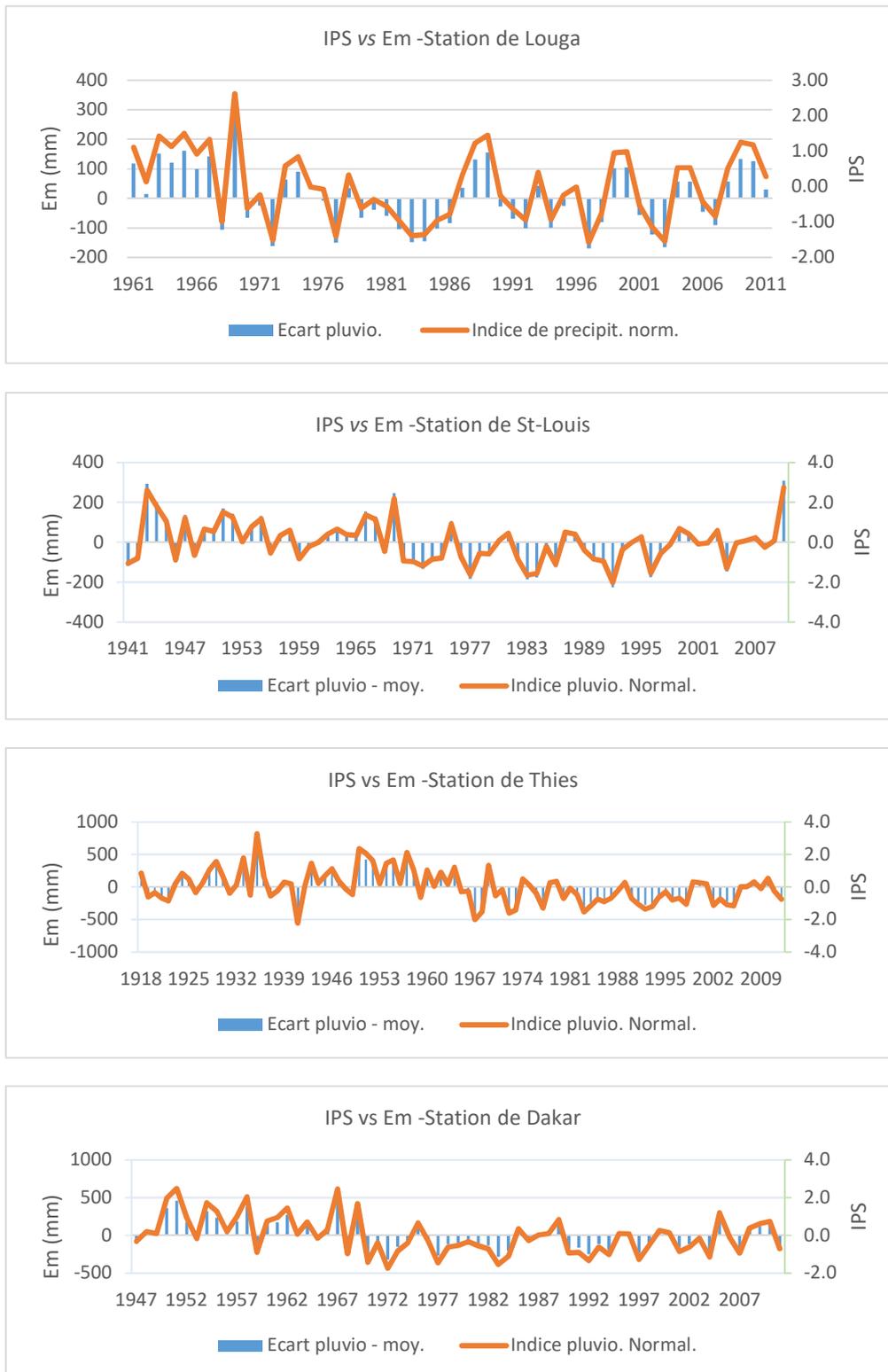


Figure 12: Evolution de l'écart pluviométrique moyenne et de l'indice pluviométrique normalise des différentes stations

Cependant beaucoup d'autres années généralement postérieures à 1970 sont déficitaires selon l'indice de déficit pluviométrique et correspondent suivant la « magnitude » de la sécheresse à des périodes modérément sèches ou proches de la normale (TABLEAU 4). Les années humides sont essentiellement antérieures à l'année 1970.

Tableau 4 : Fréquence du déficit pluviométrique

Stations	Thiès	Louga	Saint Louis	Dakar
Année humide (%)	49	45	47	48
Année déficitaire (%)	51	55	53	52

L'utilisation de la période 1963-1975 comme pluviométrie de référence introduit un biais correspondant à un déficit moyen évalué à 16% par rapport à une période de 45 ans (1931-75) préférable à la normale (1931-1960) ne tenant pas compte des grandes périodes déficitaires (Noel, 1978).

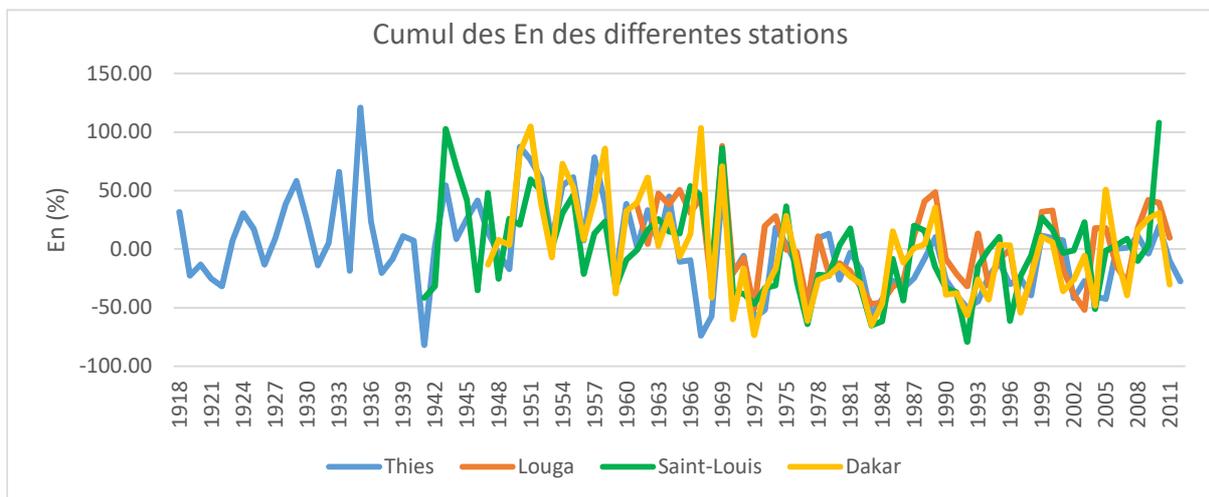


Figure 13: Évolution de l'écart cumulé des précipitations par rapport à la normale dans les quatre stations

Les indices de pluviosité (En) au niveau des stations et le graphique de cumul font apparaître deux périodes assez distinctes : une tendance humide (avant la période 1931 – 1969) et une tendance sèche (1969 à 2011). Ces séquences apparaissent dans la même période au niveau des différentes stations (FIGURE 13). L'évolution inter-annuelle de la pluviométrie au cours de la période (1931-2008) est marquée par deux séquences contrastées (TABLEAU 5) :

Tableau 5: Évolution des précipitations: 1931-1969 vs 1970-2008

Stations	Louga	St Louis	Thiès	Dakar	Régionale
P1 : Moy. (mm) 1931-1969	427.5	341.8	651.8	582.9	501.0
P2 : Moy. (mm) 1970-2008	285.6	235.0	442.9	352.3	328.9
Amplitude (mm)	141.8	106.8	208.8	230.6	172.0
Pourcentage (%)	33.2	31.3	32.0	39.6	34.3

- entre les décades 1931 -1969 et 1970-2008, la moyenne pluviométrique annuelle a chuté du Sud au Nord de : 39.6% à Dakar, 31.3% à Saint-Louis, soit une baisse moyenne régionale de plus de 34.1%;
- entre ces deux périodes, les amplitudes maximales sont enregistrées dans la limite Sud de la zone d'étude à Dakar et à Thiès.

Chapitre III. Géomorphologie, l'hydrographie, les sols et la végétation

III.1 Géomorphologie, hydrographie et sols

La zone d'étude est marquée par la présence de dunes sableuses et de dépressions (Niayes) qui s'échelonnent tout le long du Littoral Nord d'Ouest en Est. Cet enchevêtrement est limité au Sud par le plateau de Thiès dont l'altitude maximale ne dépasse guère 130 m. La description morphologique du Littoral Nord du Sénégal a été faite par de nombreux auteurs (Michel, 1973; Sall & al, 1978; Sall, 1982).

III.1.1 Morphologie du système dunaire et des dépressions sableuses (Niayes)

Plusieurs systèmes dunaire ont été individualisés dans le temps et dans l'espace (FIGURE 14) :

- le système dunaire interne, ancien, présent dans le Ferlo et plus connu sous le nom de dunes rouges fixées d'âge Ogolien (Tricart, 1965; Adams & al, 1965) ;
- le système dunaire ogolien intermédiaire qui couvre une superficie allant du Littoral vers l'intérieur des terres. Ce sont les dunes de l'erg « Ogolien », mises en place lors de la dernière période glaciaire et qui sont aujourd'hui fixées par une végétation arborescente semi-aride (Michel, 1973).
- le système dunaire externe du Littoral est caractérisé par un micro-relief très accentué qui s'aplatit au Nord vers l'embouchure du fleuve Sénégal. Il comprend trois sous-ensembles dunaire juxtaposés :
 - les dunes vives récentes forment une bande large de quelques mètres à quelques centaines de mètres. Elles continuent à se former à partir de la plage, nourries par les apports de la dérive littorale. On estime pour la côte Nord un volume charrié compris entre 200 et 450 m³/an (Barrusseau, 1980).
 - les dunes jaunes semi-fixées ont une extension variable pouvant aller jusqu'à 3 km dans certains secteurs tandis qu'elles se rétrécissent considérablement à l'aval de certaines grandes dépressions telles que Mbawane et Mboro (Michel, 1956). L'orientation des rides indique généralement une direction NNE. Ces dunes constituent la zone de concentration privilégiée des minéraux lourds tels que l'ilménite, le zircon, le rutile et le leucoxène ;
 - les dunes jaunes ravivées issues de dunes jaunes en grande partie fixées par la végétation et qui ont tendance à être remaniées et reprises en dunes vives. Elles sont situées près des Niayes et des cordons des dunes rouges. Elles sont aussi minéralisées.

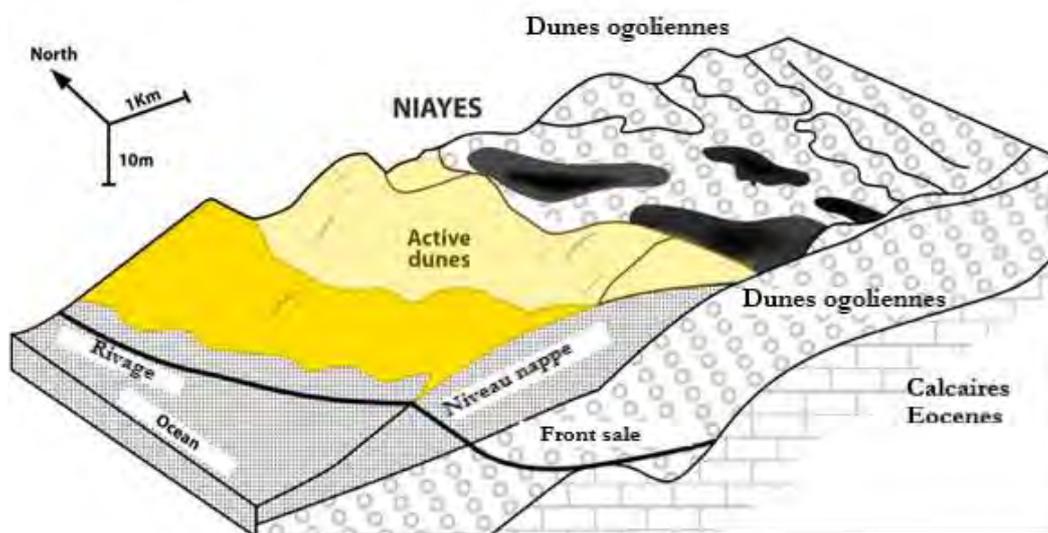


Figure 14: Coupe schématique de la zone des Niayes (Michel, 1956)

Les Niayes sont des dépressions à l'arrière des dunes vives et semi-fixées, caractérisées par une inondation permanente à semi permanente. Elles correspondent à des affleurements ou des émergences de la nappe phréatique et d'un ancien réseau hydrographique qui a été plus ou moins comblé par des sables dunaires (Puttalaz, 1962). Leurs formes et dimensions sont très variables. On distingue schématiquement deux types (FIGURE 14) (Michel, 1956):

- des Niayes de petites dimensions qui correspondent à des émergences de la nappe phréatique dans les interdunes les plus profondes. La plupart de ces dépressions sont orientées NNW-SSE, selon la direction des dunes ogoliennes remaniées ;
- des Niayes de superficie beaucoup plus vaste, qui peuvent pénétrer loin vers l'intérieur des terres, recoupant les cordons des dunes rouges.

III.1.2 Hydrographie

Concernant le réseau hydrographique, il est presque inexistant, excepté la zone des Niayes qui sont de petites dépressions localisées entre ces systèmes dunaires situés en bordure du Littoral, où la nappe phréatique affleure temporairement et par endroit en permanence, phénomène qui est de moins en moins fréquent. Leur importance et leur nombre varient du Sud vers le Nord. Ce réseau hydrographique est aujourd'hui influencé par :

- la baisse de la pluviométrie,
- un relief pas assez bien interconnecté,
- la bonne perméabilité des sables ;

- le pompage de plus en plus important de la nappe des sables.

Ces influences font disparaître le réseau hydrographique, si ce n'est l'existence de quelques petits marigots et d'une série de dépressions sableuses, à l'arrière du cordon Littoral, inondées en hivernage et dont certaines tendent à s'assécher après l'arrêt des pluies.

III.1.3 Sols

Le contraste entre les Niayes à l'Ouest et les terres agricoles situées dans la partie Est du secteur d'étude est très frappant (Michel, 1973):

- la végétation à l'Est se résume à une pseudo-steppe arbustive relativement pauvre. Cette formation découle de la nature du sol (sableux et peu fertile), du surpâturage et du déboisement ;
- les Niayes à l'Ouest constituent de véritables oasis au milieu de l'environnement sahélien typiquement semi-aride. Les espèces présentes dans ces milieux sont considérées par (Trochain, 1940) comme des vestiges d'une forêt sub-guinéenne. Les sols fertiles et humides des Niayes sont propices aux cultures maraîchères lesquelles sont pratiquées intensivement sur toute la frange littorale.

Il y existe trois types de sols qui sont : les sols ferrugineux situés à l'Ouest occupant les $\frac{3}{4}$ du secteur d'étude, les sols hydromorphes localisés dans les dépressions marécageuses et les sols minéraux peu évolués. Du point de vue géomorphologique, les dépressions communément appelées Niayes, constituent l'interzone séparant les deux sortes de dunes éoliennes et ogoliennes (Figure 15).

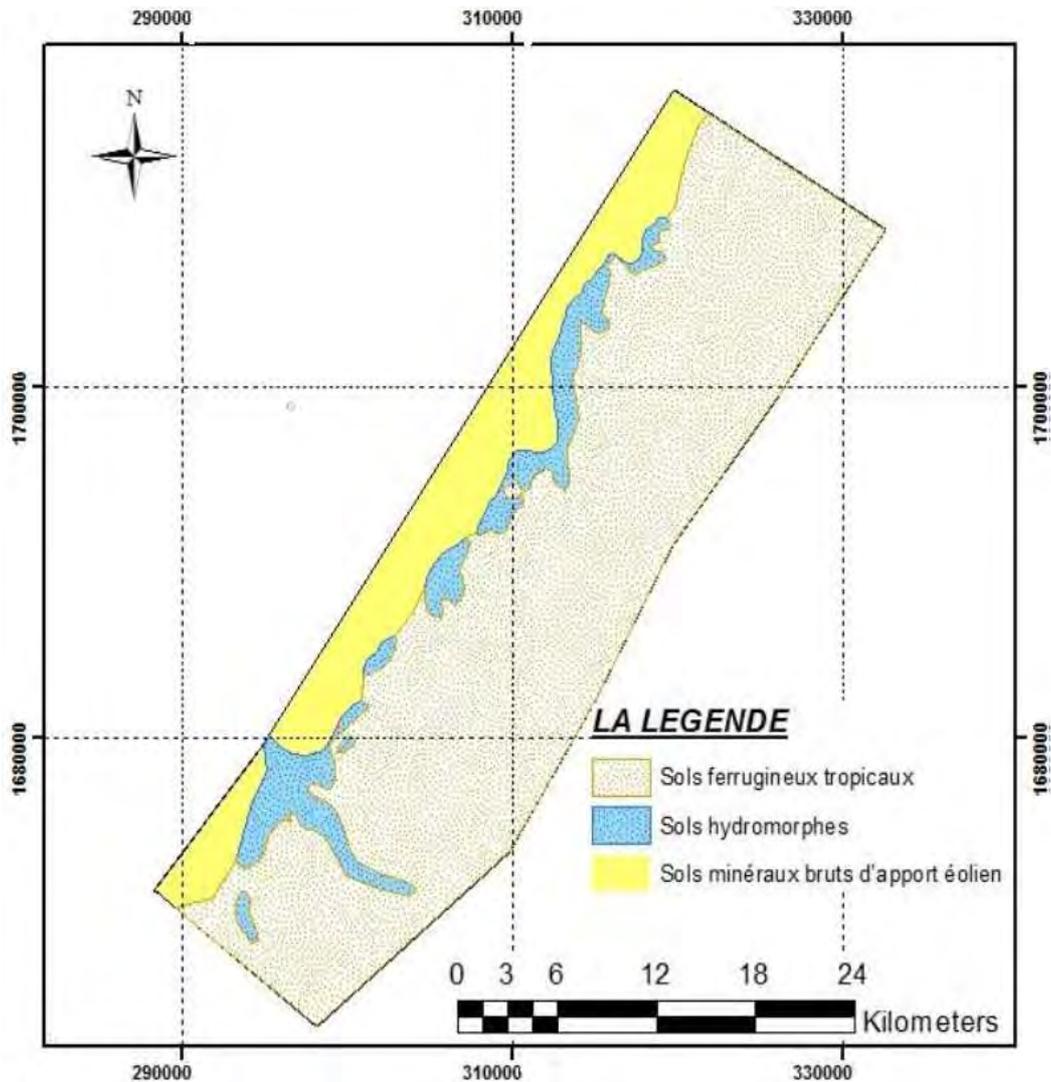


Figure 15 : Typologie des sols dans le secteur d'exploitation minière (USAID, 1986)

III.1.3.1 Sols ferrugineux tropicaux

Les sols ferrugineux tropicaux peu ou pas lessivés recouvrent les dunes ogoliennes (Perreirabarreto, 1962). Ces sols sont caractérisés par un important lessivage de fer et par la présence d'horizons rouge-vif en profondeur (Millot, 1964). Ces sols pauvres en matières organiques, connus sous le nom de sols "Dior" sont formés sur l'ancien erg des dunes rouges du Quaternaire (Adams & al, 1965; Michel, 1973). Ils sont essentiellement sableux (Maignien, 1965) et recouvrent dans la partie orientale du Littoral Nord et les niveaux gréseux et sables argileux du "Continental terminal".

III.1.3.2 Sols minéraux peu évolués

Ce sont des sols d'origine non climatique qui recouvrent les dunes vives ou semi-fixées du Littoral. Au niveau de la partie occidentale de la zone d'étude, ces sols pauvres en matières organiques sont rencontrés à Lompoul où leur sable jaune-ocre est faiblement minéralisé en ilménite (Hebrard, 1958).

III.1.3.3 Sols organiques hydromorphes

Ce sont les sols organiques semi-tourbeux ou tourbeux à hydromorphie totale, temporaire ou permanente, mal aérés et gorgés d'eau. Ils sont localisés dans les Niayes, au niveau des inter-dunes mais aussi à l'arrière des dunes vives et semi fixées du Littoral longeant la côte de Potou à Kayar.

III.2 Végétation

III.2.1 Couverture végétale

Les formations végétales naturelles occupent 44% de la superficie totale ; elles sont constituées de savanes (36%) et de pseudo-steppes (8%). A l'intérieur des formations savanicoles, des parcelles de maraîchage de petites dimensions occupent certains bas-fonds (TROPICA, 2005). Le maraîchage est pratiqué dans les cuvettes ; mais en raison de leur nombre limité, les sols "dior" (sols sableux) sont de plus en plus exploités.

La zone des Niayes présente une végétation diversifiée où des espèces reliques à affinité guinéenne coexistent avec des espèces sahéliennes steppiennes. Les formations savanicoles se rencontrent à la fois sur les dunes et dans les dépressions inter-dunaires. La végétation y est plus dense et les arbres plus hauts. Dans les dépressions, les espèces sub-guinéennes subsistent grâce à des conditions plus favorables qui favorisent leur maintien.

De par ses dimensions et ses fonctions, la bande de filao est devenue une composante importante des paysages des Niayes. Elle occupe toute la partie Ouest de la concession de GCO.

En dehors de cette bande des filaos, existent d'autres types de plantations (*Eucalyptus*, *Anacardium*, etc.) qui sont destinées à stabiliser les dunes et à servir de brise vents pour les cuvettes maraîchères, les vergers et les écosystèmes lacustres.

Les Niayes du Littoral Nord sont aussi caractérisées par la présence de tourbes (FIGURE 16). C'est principalement au niveau des Niayes qu'elles se forment.

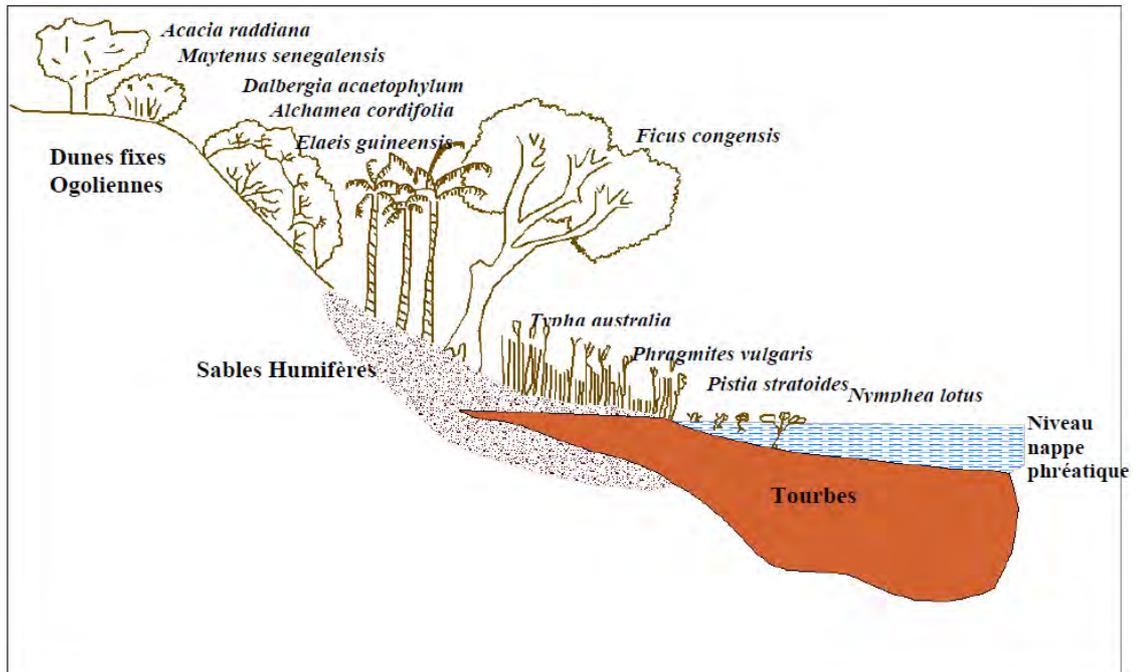


Figure 16 : Représentation schématique de la végétation d'une Niaye (Michel, 1969)

Elles enregistrent les modifications de l'environnement végétal en relation avec l'hydrologie et la pluviosité à plusieurs échelles d'espace et de temps. En fait, elles laissent apparaître des stratifications grâce auxquelles on peut en déduire les variations du niveau de la nappe : si son niveau piézométrique baisse, il y a sédimentation minérale et la tourbe est érodée (FIGURE 17). A l'inverse, la tourbière se noie et une sédimentation organique fait suite à l'accumulation minérale.



Figure 17 : Affleurement d'un banc de tourbe au plan d'eau du front de dragage de GCO

III.2.2 Déforestation

Depuis l'avènement des mini forages, on assiste à un recul des espèces naturelles au profit du maraichage qui continue sa progression vers non seulement le centre des dépressions mais également le flanc des dunes. Il faut signaler que dans les Niayes, le statut des espèces endémiques (*Cyclosurus*) a déjà été fragilisé par des facteurs plus agressifs comme la sécheresse contemporaine ou la mise en valeur agricole des cuvettes maraîchères (Fall, 1986).

L'exploitation minière est aussi une source de déforestation mais, à ce niveau l'espoir est permis avec les exigences environnementales en vigueur et l'adhésion des industriels aux principes du développement durable et des bonnes pratiques environnementales. En ce qui concerne, la société Grande Côte, le processus d'exploitation minière bien que concentré dans les dunes et non dans les dépressions maraîchères, comporte également des activités de dessouchage, de désherbage des zones à exploiter. Les produits agricoles sont ensuite gérés par le service forestier en accord avec les populations locales. Par ailleurs, la réhabilitation des sites miniers déjà exploités, conformément à la réglementation en vigueur, est en train de se dérouler au fur et à mesure que la drague avance.

Chapitre IV. Géologie et hydrogéologie

IV.1 Contexte géologique du bassin sénégal-mauritanien

Le Littoral Nord demeure la partie occidentale Nord du bassin sédimentaire du Sénégal. Ce dernier, avec son relief un peu marqué, se situe entre les latitudes 12°50 et 16° 50 N et les longitudes 17°50 et 13°30 W. Il est limité à l'Ouest par une côte sablonneuse basse où débouchent quatre estuaires relativement importants :

- l'estuaire du fleuve Sénégal ;
- l'estuaire du Sine Saloum ;
- l'estuaire de la Gambie ;
- l'estuaire de la Casamance.

C'est un sous ensemble du bassin sénégal-mauritanien qui s'étend sur environ 1400 km de la Mauritanie au Nord à la Guinée Bissau au Sud (FIGURE 18). Le bassin a pris naissance à la suite de l'ouverture de l'Atlantique Central au Trias – Lias. La série sédimentaire est connue sans interruption du Trias au Quaternaire grâce aux sondages pétroliers et d'exploitation d'eau (Castelain *et al.* 1965 ; Monciardini, 1966; Spengler *et al.*, 1966). La sédimentation débute au Trias par des dépôts salifères.

Les Faciès calcaires et marneux prédominant du Jurassique au Crétacé inférieur.

Au Sénonien (Campano-Maastrichtien), survient une grande régression qui s'est traduite par d'importants dépôts détritiques qui ont envahi le bassin d'argiles et de sables avec quelques intercalations calcaires sur la marge occidentale passant, au Cap-Vert, à des faciès marneux et argileux.

A la fin du Secondaire, se produisent la surrection du Horst de Ndiass et la mise en place du Dôme de Léona.

Le Paléocène débute par une transgression et la sédimentation est à prédominance chimique et biochimique (dépôts argilo-marneux et calcaires).

A l'Eocène inférieur, le domaine marin connaît son extension maximale vers l'Est, avec des dépôts de marnes et marno-calcaires à l'Ouest. A l'Est, les séries sont détritiques (sables, grès calcaires et grès).

A l'Eocène moyen se déposent des argiles, des marnes et calcaires à silex et phosphates de chaux sur la bordure occidentale du bassin ainsi que des calcaires à Nummulites dans la majeure partie du bassin. La fin de l'Eocène moyen est marquée par une régression consécutive à l'épisode tectonique majeur de la phase pyrénéo-atlasique (Bellion & Guiraud, 1984).

À l'Eocène supérieur et jusqu'à l'Oligocène, la mer ne persistera que dans le golfe casamançais et dans des secteurs limités de l'Ouest du bassin (Dakar, Thiès).

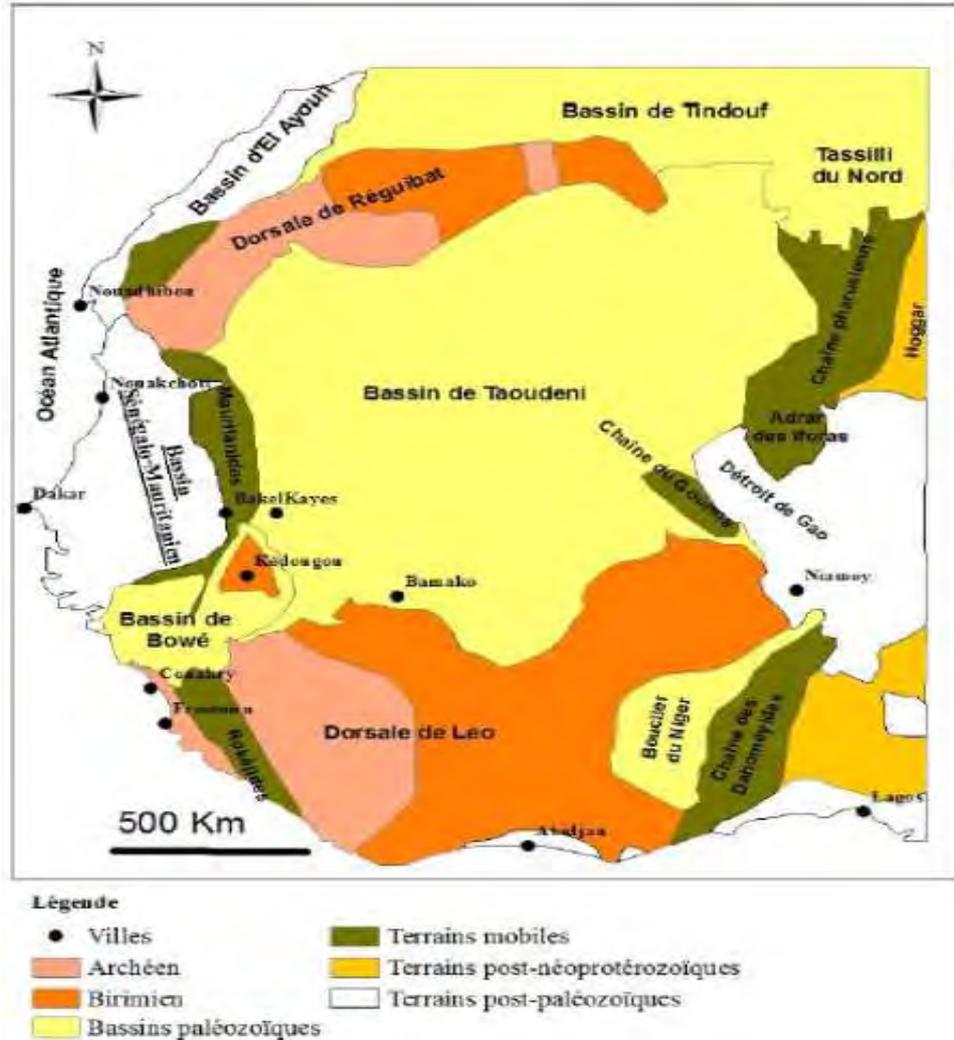


Figure 18: Carte géologique Ouest africain (Trompette, 1973)

Une brève transgression est connue en Casamance au Miocène, la mer avançant jusqu'au Ferlo à partir du Sud. Les formations marines grésio-argileuses miocènes et pliocènes sont par la suite profondément altérées sous un climat chaud et humide, ce qui aboutit à la formation du faciès d'altération appelé "Continental Terminal " (Tessier *et al*, 1975 ; Lappartient, 1985) (*in* Sarr, 1995) et de la cuirasse latéritique fini-pliocène à pléistocène.

Au Quaternaire, se produisent successivement l'étagement des terrasses alluviales dans les vallées des fleuves Sénégal et Gambie (Michel, 1973), l'installation et la désorganisation de plusieurs systèmes

dunaires, la formation de tourbe et le dépôt de plages soulevées à mollusques dans les zones littorales (Elouard, 1976).

IV.2 Lithostratigraphie régionale

Le bassin est subdivisé en trois ensembles stratigraphiques qui correspondent chacun à un système aquifère :

- "l'ensemble supérieur" qui regroupe les niveaux Oligocène, Néogène et Quaternaire. On y trouve l'aquifère du "Complexe Terminal" ;
- "l'ensemble intermédiaire" : il est constitué essentiellement de formations carbonatées (marnes, marno-calcaires, calcaires) de l'Eocène et du Paléocène ;
- "l'ensemble du Crétacé supérieur" : il regroupe les étages du Maastrichtien, du Campanien, du Sénonien inférieur et du Turonien. Ce système renferme la nappe du Maastrichtien et les niveaux aquifères du toit du Turonien.

IV.2.1 "Ensemble supérieur"

IV.2.1.1 Continental Terminal

Il s'agit d'un Faciès d'altération dénommé « Continental Terminal » (Tessier & al, 1975; Lappartient, 1978), rencontré sur un vaste étendu du bassin sénégalo-mauritanien et essentiellement dans sa partie orientale. Ce faciès est composé de formations gréseuses et sablo-argileuses. On désigne sous ce nom, l'ensemble des étages allant du Mio-Pliocène au Quaternaire. Selon (Flicoteaux & Medus, 1980), ces dépôts seraient d'origine marine.

En effet, le bassin aurait évolué en régime essentiellement continental après l'Eocène supérieur et surtout après la dernière et brève transgression du Miocène. Les formations marines gréso-argileuses miocènes sont par la suite profondément altérées par la percolation des eaux souterraines lors d'une phase d'abaissement du niveau marin. Ainsi, leur formation aurait impliqué des conditions climatiques tropicales humides, de même que la formation de la cuirasse latéritique fini-pliocène. Cette formation se rencontre particulièrement à la limite est de la zone d'étude, à l'Est de la route Thiès–St-Louis où elle surmonte les calcaires lutétiens.

Aux environs de Mboro, des grès argileux rouges de 0 à 10 m d'épaisseur caractérisent la base du CT. Légèrement indurés et solidifiés, ils renferment parfois un peu de vivianite. Précédés par une période d'érosion, ils peuvent reposer directement sur les argiles bariolées et même sur les phosphates de chaux.

Très altérés vers le sommet, ces grés passent sans discontinuité apparente aux sables meubles quaternaires (Lucas, Menor, & Prevot, 1979).

IV.2.1.2 Nappe quaternaire

Le Quaternaire constitue la majeure partie des affleurements du bassin sénégal-mauritanien. Il est constitué de dépôts sableux, sablo-argileux d'origine marine ou continentale. La succession des dépôts dans le Littoral Nord a été étudiée suivant les six (06) étages suivants (Hebrard, 1958; Elouard & Faure, 1967) :

- Inchirien I (40.000 à 37.000 ans B.P.) : sables marins coquilliers comprenant à leur base des sables à ilménite et recouverts par les sables éoliens présentant, en surface, une altération continentale : argiles à graviers de latérite. Son épaisseur maximale est de 75 m ;
- Inchirien II (33000 à 31000 ans B.P.) ou Acheulien : alluvions graveleux (max.30 m) ;
- Ogolien (20000 à 10000 ans B.P.) : sables fins dunaires, rouges, oranges, marron claires avec une épaisseur maximale de 50 m ;
- Nouakchottien (5500 à 4200 an B.P.) : sables fins marins, coquilliers, plage à Arca ;
- Tafolien (4000 à 2000 ans B.P.) ou le Quaternaire récent : sables dunaires fins, jaune orangé. Ce sont des sables provenant de la remobilisation des sables blancs littoraux en bordure de mer et repoussés dans le continent sous l'action des vents maritimes. Ils seraient plus récents ; la gradation de la couleur marque une augmentation de l'intensité des phénomènes d'oxydation du cortège de minéraux lourds qu'ils contiennent ;
- Sub-actuel et actuel : sables dunaires fins, blancs. Ce sont les sables blancs littoraux de la base, formés par suite de série de régressions marines, correspondant au substratum du gisement sur lesquels reposent les sables dunaires en surface.

Au Sud et à l'Est de la zone d'étude, les formations du Quaternaire et du "Continental Terminal" reposent essentiellement sur les marnes et calcaires marneux du Lutétien (FIGURE 19).

Dans la zone de Mboro, des sables meubles quaternaires recouvrent l'ensemble du gisement d'une couche continue dont l'épaisseur varie entre 20 et 30 m. Ces sables sont blancs dans la partie inférieure avec des stratifications entrecroisées dans la partie supérieure (Branchart & Flicoteaux, 1971).

Dans la zone du projet de Diogo, GCO a implanté 48 forages superficiels qui ont permis de mieux caractériser la lithologie du Quaternaire dans cette zone. De haut en bas on trouve la succession de couches suivantes :

- sable fin à moyen jaune : son épaisseur moyenne est de 3 m dans les Niayes et peut aller jusqu'à 12 m dans les zones dunaires ;
- sable fin à moyen beige et tourbeux par endroit ; son épaisseur maximale est de 10 m ;
- sable fin silteux : son épaisseur moyenne varie de 5 à 10 m ;
- sable moyen à grossier beige graveleux quartzeux : son épaisseur est variable entre 5 et 10 m ;
- sable fin beige d'une épaisseur moyenne de 2 à 3 m ;
- sable argileux devenant par endroit argile sableux marron : son épaisseur est faible et atteint au maximum 5 m ;
- marne argileuse ou argile marneuse : cette couche est considérée comme le mur de l'aquifère des sables du Quaternaire dans la zone minière de Diogo. Elle est atteinte entre 40 et 47 m de profondeur.

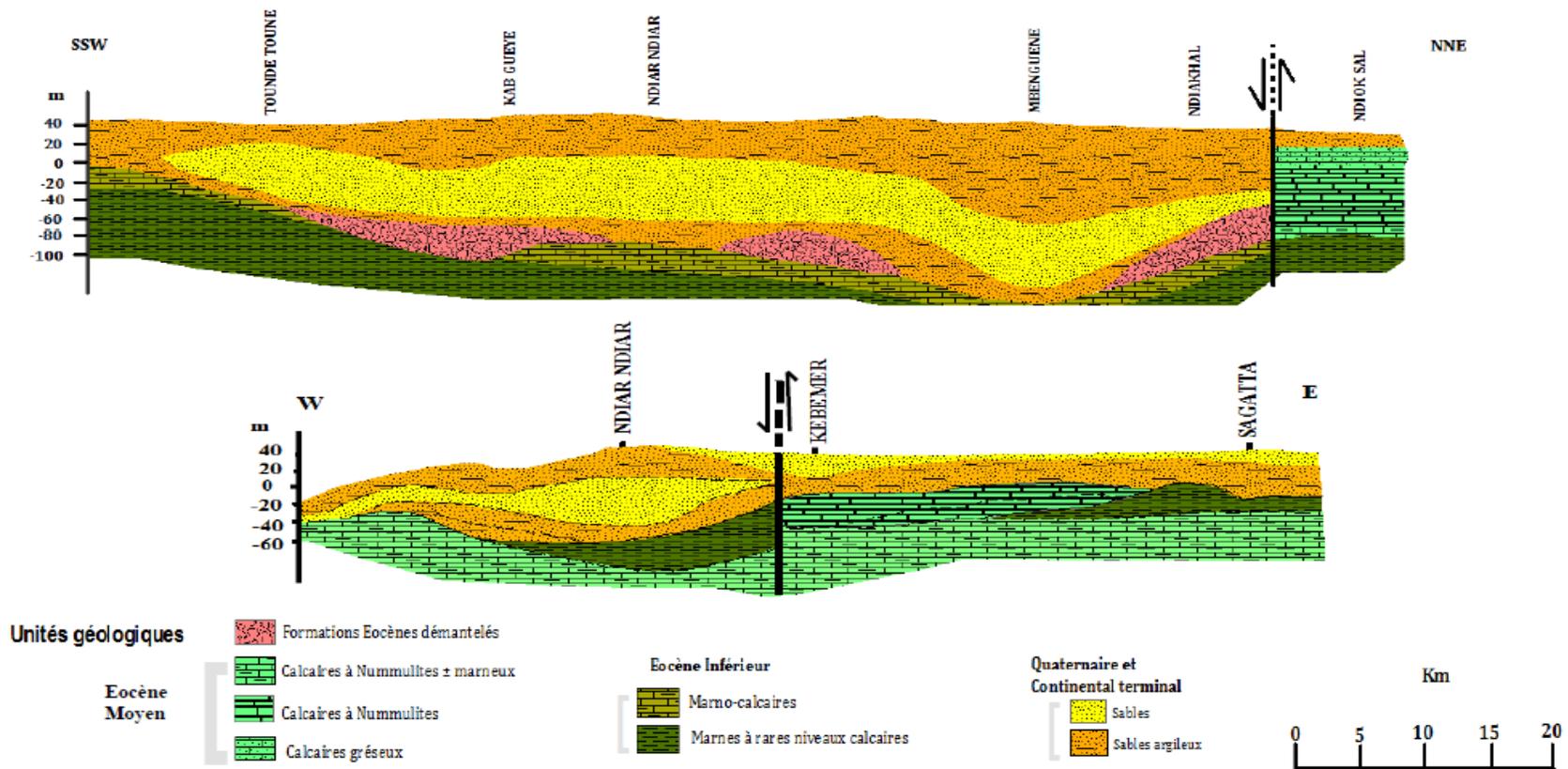


Figure 19: Coupe géologique traversant la nappe des sables du Quaternaire du Littoral Nord du Sénégal (Noel, 1978) in Kaba (2017)

IV.2.2 "Ensemble intermédiaire"

Il est constitué essentiellement de formations carbonatées (marnes, marno-calcaires, calcaires) de l'Eocène et du Paléocène.

IV.2.2.1 Paléocène

Les faciès les plus représentatifs de la lithologie du Paléocène correspondent aux marnes, marno-calcaires et calcaires. Il affleure au Sud de la zone d'étude, à l'Ouest du Horst de Ndiass. La série paléocène comprend deux unités lithostratigraphiques en continuité à la base des " marno-calcaires " ou de " calcaires argileux " devenant détritiques par endroits, surmontée de calcaires biodétritiques à tendance récifale. Dans la province occidentale, la présence de biofaciès à foraminifères pélagiques dans le calcaire marneux semble indiquer une relation avec une mer profonde (Monciardini, 1966).

Dans la zone de Diogo, le Paléocène est traversé par les treize forages maastrichtiens de GCO (DW1 à DW12 et MSP DW) et les deux piézomètres profonds (DPZ1 et DPZ2). Il est constitué par des marno-calcaires à calcaire massifs au sommet de la série. A sa base, se trouve une alternance de calcaire à intercalations de pélite.

IV.2.2.2 Eocène

IV.2.2.3 Eocène inférieur

Pendant l'Eocène inférieur ou Yprésien, les dépôts argileux et marneux prédominent. Les campagnes de géophysique (sondages électriques), de sondages mécaniques et de forages d'eau (Monciardini, 1965 ; Noel, 1978 ; Dubreuil & Fohlen, 1987 ; Pernel & Gageonnet, 1992 ; Diouf, 1995) attestent que l'Eocène inférieur est représenté par des marnes à rares niveaux calcaires et par des calcaires plus ou moins marneux.

Cependant, les dépôts marneux ou argileux dominent nettement, sauf à l'extrême base et au sommet de la série (Bellion, 1987). La succession lithologique, d'après l'échelle biostratigraphique de (Tessier R. , 1950) et de (Castelain, 1963), se présente de bas en haut comme suit:

- niveau glauconieux et phosphaté ;
- marnes papyracées à silex ;
- banc calcaire phosphaté et silicifié de pointe Sarene et Sébikotane ;
- marnes du ravin des voleurs à Oursins ;
- calcaires et marnes fossilifères de l'horizon de Ngazobil datés de l'Yprésien.

A l'Est de la zone d'étude, l'Eocène inférieur est essentiellement représenté par des faciès argilo-calcaires. Les calcaires des forages de Kaba Diak et du C.N.R.A. de Bambey, qui constituent un aquifère intéressant mais de faible extension, ont livré une microfaune (*Morozovella subbotinae* et *M. arqua* à la base, *Acarinina soldadoensis angulosa* et *M. soldadoensis* au sommet) caractéristique de la base de l'Yprésien. Il est probable que le banc calcaire de moindre épaisseur, sur la verticale de Tiaytou Gap, en soit le prolongement. Ce faciès semble passer rapidement vers des termes argileux au Nord (Ndangalma) et disparaît à l'Est (Keur Saer) après être devenu plus marneux à Bambey et au Sud, à la suite d'une érosion post Eocène (Noel, 1975).

Dans la partie occidentale de la zone d'étude, les forages de GCO ont traversé l'Eocène inférieur. Il est composé de formations marneuses et marno-calcaires.

IV.2.2.4 Eocène moyen ou Lutétien

L'Eocène moyen de la région étudiée a fait l'objet de nombreux travaux (Tessier R. , 1950; Gorodisky, 1955; Chino, 1962; Castelain, 1963; Monciardini, 1965; Monteillet, 1986). Il est représenté par des lithofaciès argilo-marneux, de calcaires organogéniques et de marnes. Il correspond à deux séries dont l'une est essentiellement calcaire avec une faune à nummulites et en dessous, l'autre est à prédominance marneuse et argileuse.

A la limite Est de la zone d'étude, à l'Est de la route Thiès-Saint-Louis, le Lutétien inférieur essentiellement marneux se différencie du Lutétien supérieur calcaire avec des Nummulites correspondant à l'aquifère des calcaires lutétiens dans les régions de Louga et Bambey (Chino, 1962).

Ces formations sont karstifiées et compartimentées par des accidents tectoniques orientés globalement suivant la direction Est-Ouest. Ils sont, à l'Est d'une ligne Thiès-Kébémér, masqués par les grès et sables argileux du "Continental Terminal".

Au Sud de Diogo, entre l'axe Mboro – Meouane et jusqu'au NW du haut fond du dôme de Diass, se trouve le gisement de Taiba. Vers le Sud, il se prolonge dans les formations de Lam Lam où la série lenticulaire est fortement altérée en phosphate d'alumine (FIGURE 20). Il est constitué d'un ensemble en auréoles dont le centre carbonaté, est entouré d'une bande phosphatée, elle-même entourée d'un domaine sablo-argileux. Cet ensemble forme un vaste synclinal dissymétrique dont l'axe SW-NE, est marqué par un fossé d'effondrement probablement limité par des cassures ayant pu rejouer à des époques récentes, favorisant ainsi la mise en place d'émissions basaltiques associées à des tufs, signalés dans certains forages. Cette gouttière d'effondrement caractérise la zone de Ndomor Diop et sépare celle de Keur Mor Fall au Nord de celle de Tobène au Sud (Lucas, Menor, & Prevot, 1979) .

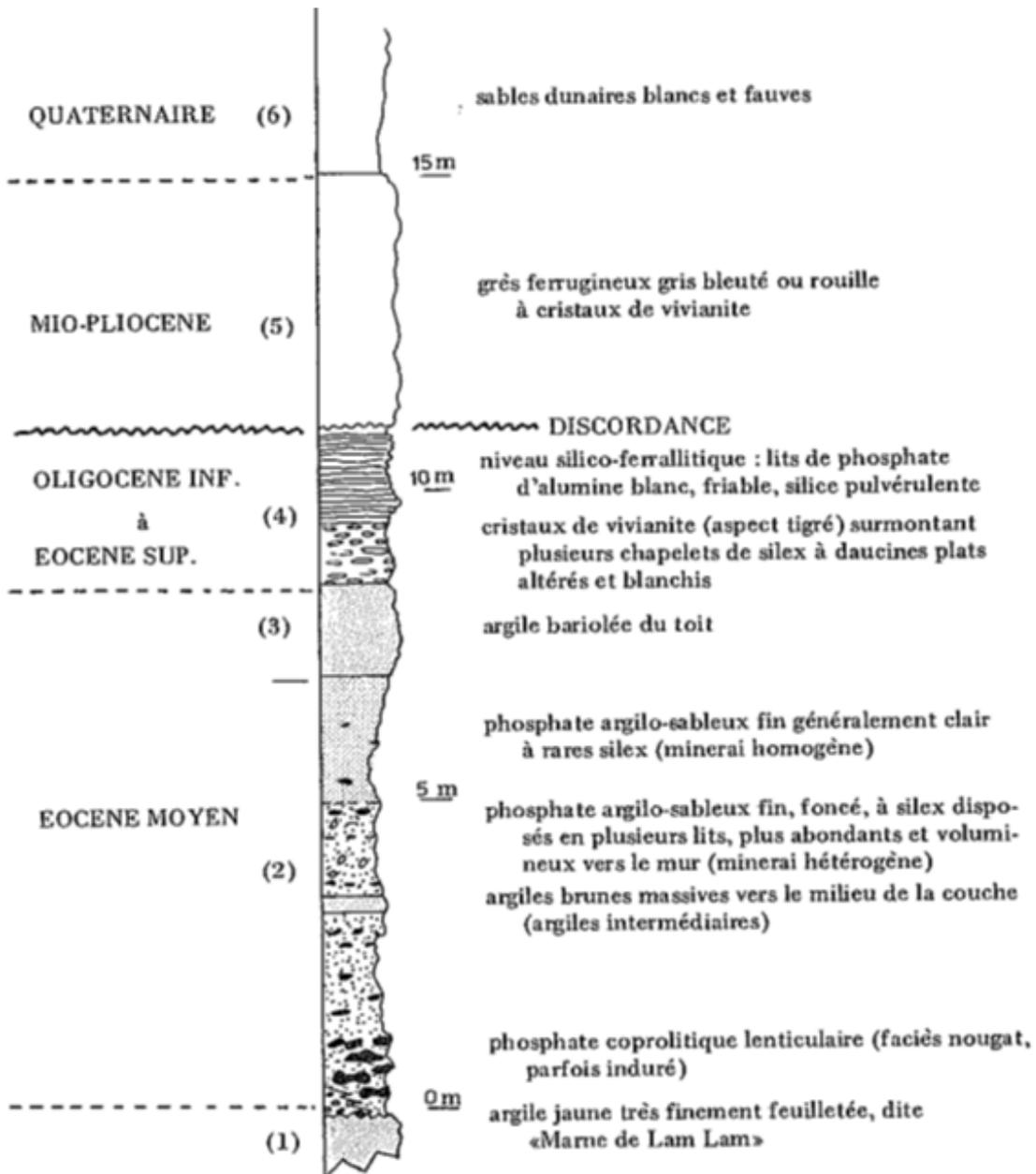


Figure 20 : Coupe type de la série phosphatée de Taïba (Boujo, 1972)

IV.2.2.5 Eocène supérieur

L'Eocène supérieur est marqué par une sédimentation marine. Il est représenté par des marnes et des marno-calcaires qui sont souvent phosphatés. Dans la partie Sud de la zone d'étude, les niveaux de phosphates d'alumine de Lam Lam sont attribués à cette époque (Tessier & al, 1975).

Généralement érodé, l'Eocène supérieur est inconnu à l'affleurement. Il est représenté par des dépôts argileux et marneux recoupés par forage dans la presqu'île de Dakar (argiles de Yoff). Sa limite inférieure a été définie par la disparition des calcaires à Nummulites et l'apparition de *Globorotalia rex* trouvés dans les sédiments surmontant directement la zone à *Globorotalia velascoensis* (Sarr, 1995).

Sa limite supérieure coïncide avec l'apparition des niveaux sableux de l'Oligo-Miocène et du Continental terminal.

IV.2.3 "Ensemble du Crétacé supérieur"

Il regroupe les étages du Maastrichtien, du Campanien, du Sénonien inférieur et du Turonien.

IV.2.3.1 Crétacé

Le Crétacé est représenté par des sables continentaux, des calcaires détritiques alternant avec des sables gréseux argileux (Tessier R. , 1950; Castelain, 1963; Monciardini, 1966).

Le crétacé supérieur est constitué de sables parfois argileux, de grés, d'argiles sableuses et à la base par des argiles noires du Turonien. Il a une épaisseur variant de 200 à 400 mètres d'après la coupe du piézomètre P1 de Taiba identifié sous le N°IRH 05.7X01 (DGPRES, 2015).

Le Maastrichtien est connu sur l'ensemble du bassin sénégalais. A l'Ouest du bassin, sa seule zone d'affleurement est le Horst de Ndiass. A cet endroit, le Maastrichtien connaît des variations d'épaisseur notoires. Au Nord, à Pout et au Lac Tanma, il atteint une puissance de 750 m (forage Pt2) ; au centre il n'est recoupé que sur 212 m par le forage DS1. Dans la partie Sud de ce secteur, l'épaisseur peut atteindre 304 m (forage de Popenguine Pp1) (Faye A. , 1983).

Dans l'Est du bassin, il repose directement sur le socle cristallin et est peu épais. Son épaisseur augmente vers l'Ouest assez rapidement: de 60 m à Oendoudi, elle atteint 85 m à Dioumanan, 310 m à Sagata, 405 m à Mbour et plus de 2000 m à la longitude de Dakar (Audibert, 1966).

Dans la zone du projet, le Maastrichtien est représenté par des sables siliceux azoïques très hétérogènes. Son toit plonge vers l'Ouest et atteint des profondeurs avoisinant 400 m. La carte isobathe du toit du Maastrichtien montre un enfoncement progressif vers l'Ouest et par conséquent un épaissement des

couches intermédiaires et supérieures telles que illustrées par les logs des 14 forages de la compagnie GCO. Le piézomètre P1 de Taïba réalisé en 1980 et profonde de 1001 m a permis d'atteindre le toit du Maastrichtien à 408 m. Près de la côte, entre Mboro et St-Louis, la couche des sables grossiers devient de plus en plus argileuse.

Dans le secteur de Diogo, le Maastrichtien est atteint par le forage DW1 à 448 mètres sous forme de sable moyen à grossier avec des intercalations de pélite, calcarénite et de lignite. A 501 mètres, il devient argileux et passe à des pélites jusqu'à 508 mètres.

Dans le cadre du projet GCO, les coupes lithologiques des 13 forages profonds (DW1 à DW12 plus MSP DW) et 2 piézomètres maastrichtiens (DPZ1 et DPZ2) renseignent sur la profondeur du toit du Maastrichtien (TABLEAU 6).

Tableau 6 : Profondeur de l'aquifère du Maastrichtien dans la zone minière de Diogo

DESIGNATION	X (UTM)	Y (UTM)	CÔTE TN	PROFONDEUR (m)	TOIT AQUIFERE (m)	NIVEAU STATIQUE (m)
DPZ1	305695	1693123	16.5	480	430	18.0
DPZ2	308767	1692422	15.0	490.0	438	20.2
MSP DW	310150	1689065	32.2	508.0	458	39.6
DW#01	308015	1690822	12	553.0	445	21.7
DW#02	309109	1690009	26	525.0	421	35.5
DW#03	309212	1691230	20	525.0	450	27.9
DW#04	309052	1692532	17	555.0	460	26.0
DW#05	309659	1693443	22	530.0	438	25.4
DW#06	311316	1694903	16	530.0	445	29.0
DW#07	310828	1696108	14	514.0	439	21.9
DW#08	312115	1696403	12	529.0	447	20.6
DW#09	311752	1697684	17	539.0	447	25.0
DW#10	312950	1698264	13	536.0	446	24.0
DW#11	311854	1699007	11	528.0	450	19.0
DW#12	309964	1694395	19.7	503.0	455	25.4

IV.2.4 Tectonique

Dans la région considérée, les structures tectoniques peuvent être décrites comme suit (Kane C. , 1995):

- un bombement appelé dôme de Léona allongé NE-SW qui se prolonge vers la Mauritanie ;
- une fosse subsidente établie entre Kelle et Léona. Elle affecte tous les niveaux d'âge tertiaire et bute vers le Nord sur le dôme de Léona ;
- une remontée des formations tertiaires le long de la bordure orientale du secteur d'étude qui va du massif de Diass au Nord de Louga ;
- un accident majeur entre Louga et Gnit, d'orientation SW-NE qui sépare la nappe des sables de celui des calcaires lutétiens.

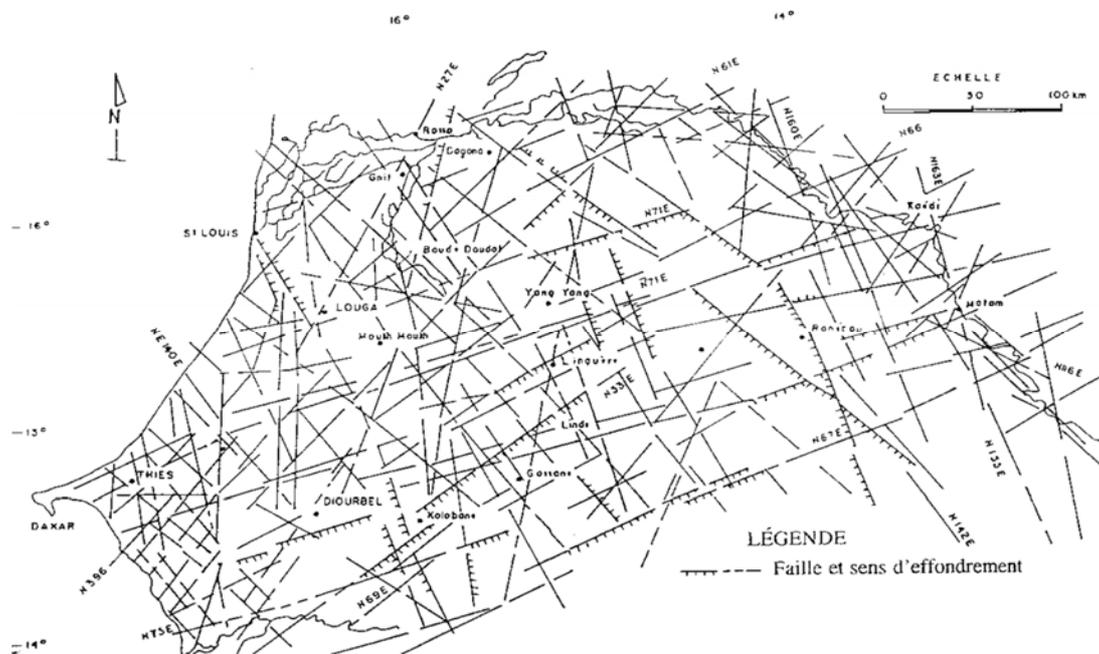


Figure 21: Carte tectonique interprétative du Sénégal (Lepriol & Dieng, 1985)

D'après la carte de Lepriol et Dieng (1985), on observe des linéaments qui ont des directions très variées. La plupart de ces linéaments seraient des failles ou de groupe d'accidents majeurs (FIGURE 21). Les principales directions pour celles de la zone d'étude sont les suivantes :

- NNE-SSW à rejets importants (accident Rosso-Gnit-Sakal-Kébémér) ;
- NE-SW ;
- SSE-NNW qui recoupe orthogonalement les fractures de direction ENE-WSW.

IV.3 Contexte hydrogéologique du bassin sénégal-mauritanien

Le bassin sédimentaire du Sénégal est caractérisé par deux grands ensembles hydrogéologiques. L'ensemble supérieur hétérogène carbonaté ou détritique, constitué d'aquifères superficiels et semi-profonds, regroupe la nappe des sables quaternaires et la nappe des calcaires Lutétien. L'ensemble inférieur, profond et homogène, renferme la nappe captive maastrichtienne contenue dans les niveaux gréseux et argile-sableux du Maastrichtien et du Sénonien. Il s'étend sur la quasi-totalité de la partie sédimentaire du Sénégal.

L'aquifère du maastrichtien se présente en une couche d'épaisseur variable, recouverte par les formations du Plio-Quaternaire de l'Eocène et du Paléocène. Il plonge à la faveur de mouvement tectonique et de subsidence vers l'Ouest (Travi, 1988) (FIGURE 22).

IV.3.1 Système des aquifères dans la zone d'étude

Le Littoral Nord a fait l'objet de plusieurs investigations hydrogéologiques avec l'appui de l'OMS, du PNUD, de la Banque Mondiale, etc.

En 1956, Degallier *in* (Puttalaz, 1962) a fait apparaître la complexité de l'écoulement de la nappe phréatique de Taïba et a montré ses relations avec les Niayes. Durant la même année, (Michel, 1956), en s'appuyant sur les campagnes de forages et de sondages réalisés notamment à Louga, fit une première synthèse des connaissances générales sur la région.

Au cours des années 1960, une étude du BRGM, a réussi à délimiter dans la nappe des sables quaternaires, les différents faciès hydrochimiques et à localiser quelques secteurs fortement minéralisés, donc probablement contaminés par l'eau de mer.

En 1962, Putallaz fait une synthèse des données antérieures. A la fin de la première phase du projet PNUD/OMS, il y'eut une seconde phase qui a abouti en 1974 à la rédaction d'un rapport détaillé sur le contexte hydrogéologique de la région. C'est durant cette période que la connaissance hydrogéologique du secteur connut un essor avec la mise en place d'un réseau de piézomètres par l'OMS.

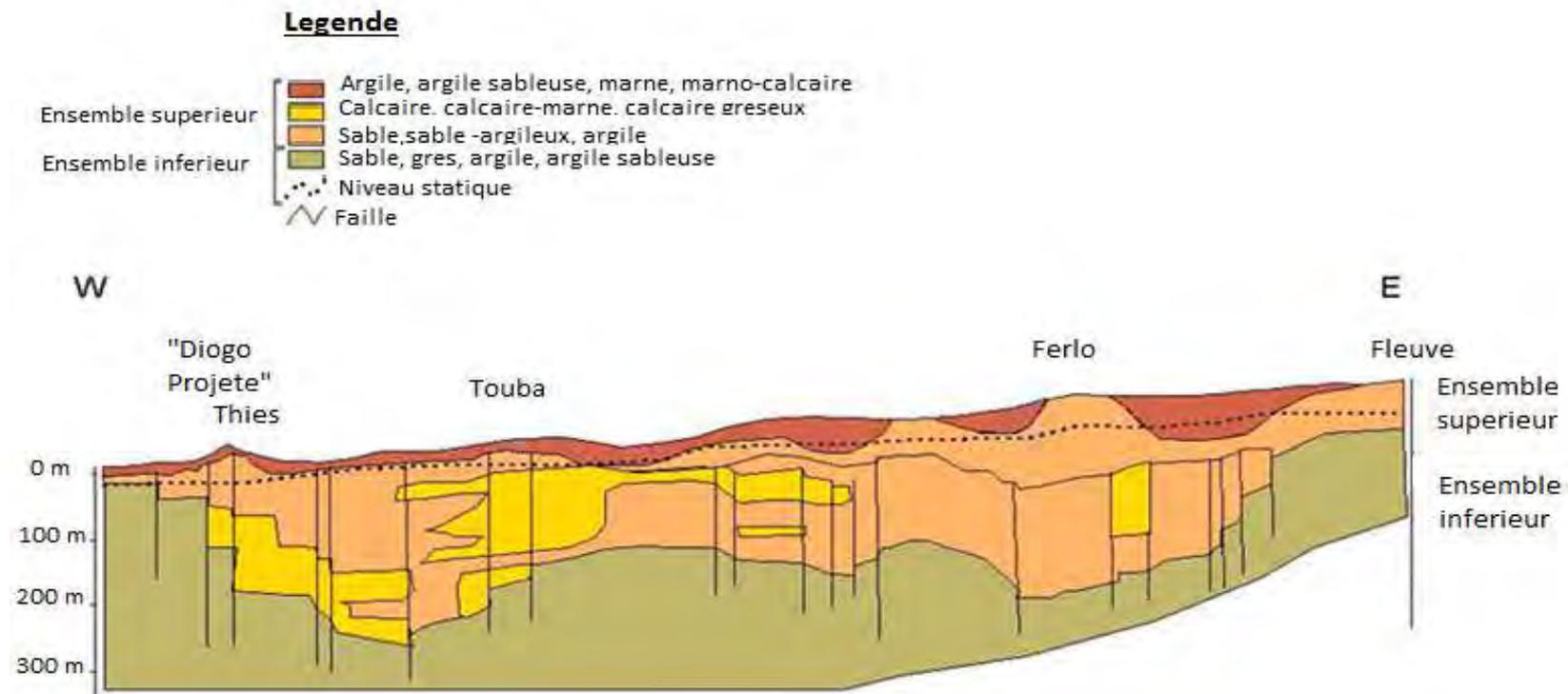


Figure 22 : Coupe hydrogéologique schématique à travers le bassin du Sénégal, (Travi, 1988) modifié in Seck (2011)

Juste après les années de la grande sécheresse au Sahel, (Noel, 1975; Noel, 1978; Diouf, 1995) ont mené des études hydrogéologiques sur le Littoral Nord qui ont dévoilé la présence des formations suivantes superposées de bas en haut :

- le Maastrichtien : formation principalement sableuse avec des niveaux gréseux, grés - calcaires et argileux. Sa profondeur est de 250 à 1000 m et la nappe, continue dans cette formation, est captive.
- le Paléocène : très souvent séparé de l'éocène par une fine couche de silex imperméable. Cette formation est marneuse et gréseuse. La nappe est chargée de matières en suspension et par conséquent elle est non exploitable.
- l'Eocène : c'est une formation calcaire ou marno-calcaire. Elle peut atteindre une profondeur de 150 à 200 m et ne contient pas de nappe continue.
- Le Continental Terminal (CT) et le Quaternaire : situé entre 0 et 120 m de profondeur, cette formation est constituée par des dépôts de sable en surface et de sable-argile en profondeur.

En 1992, Pernel et Gageonnet, ont fait une synthèse hydrogéologique du Littoral Nord qui a abouti à un modèle hydrogéologique de la nappe des sables et des calcaires du Lutétien. Un modèle similaire a été repris par Faye (1995) avec l'utilisation des outils géostatistiques pour une meilleure appréciation des paramètres hydrodynamiques et de leur distribution spatiale.

Kane (1995) et Diouf (1995) ont permis de disposer respectivement d'une meilleure connaissance de l'hydrochimie de la nappe des sables du Littoral Nord et d'une bonne appréciation de la profondeur du mur de l'aquifère des sables grâce à l'interprétation des résultats des investigations géophysiques (FIGURE 23).

Ces dernières années entre 2000 et 2008, le Ministère de l'Hydraulique, par le biais de deux importants projets (Projet Sectoriel Eau (PSE) et Projet Eau Long Terme (PELT)), a fait réaliser des études de synthèse hydrogéologiques des aquifères du Maastrichtien dans toute l'étendue du territoire mais également des nappes de Dakar et du Littoral Nord. Ces études ont comporté chacune un volet de modélisation hydrogéologique (DGP/RE/COWI-POLYCONSULT, 2002; GWK, 2009) dont l'analyse sera abordée plus tard.

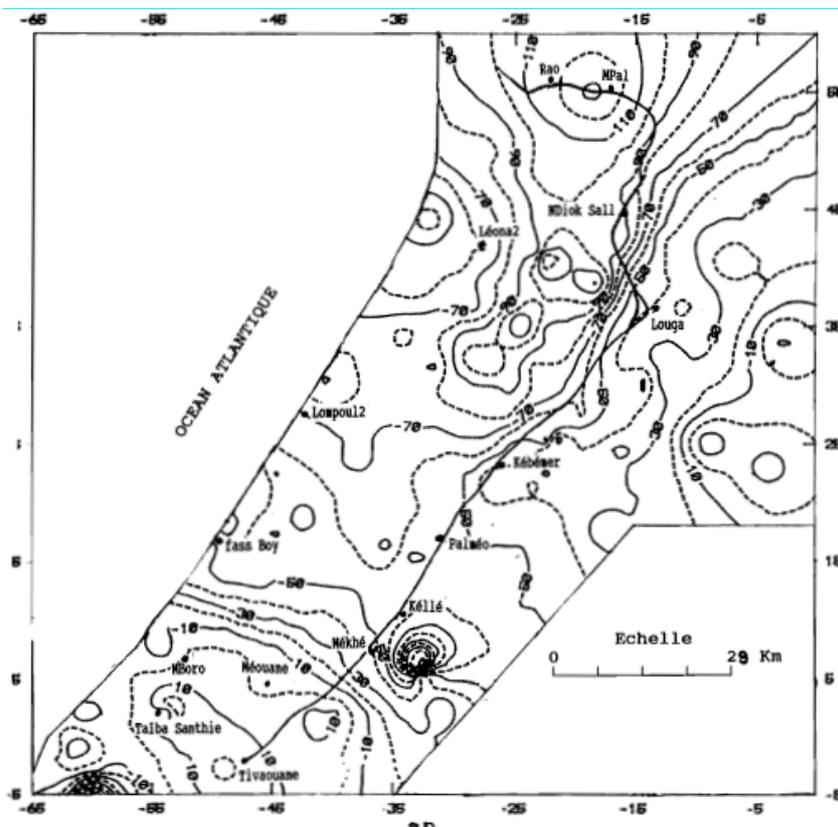


Figure 23 : Carte du mur de l'aquifère des sables (Diouf S. , 1995)

IV.3.2 Aquifère des sables du Quaternaire

L'hydrogéologie du Littoral Nord est essentiellement caractérisée par l'aquifère des sables du Quaternaire qui demeure le plus connu et le plus exploité. Ces sables reposent sur des formations sédimentaires plus anciennes datant du Tertiaire. Les formations de l'Éocène (marnes et calcaires), du Paléocène (argiles et sables surmontés de calcaires) et les plus anciennes remontant au Maastrichtien (grès et sables) se succèdent sous ces dépôts sableux. Les aquifères du Littoral Nord du Sénégal correspondent en profondeur à ces différentes formations (Fohlen & Lemordant, 1983).

Le réservoir étudié fait partie des unités aquifères exploitables du Sénégal (FIGURE 24). Cet aquifère est situé au niveau du cordon dunaire du Littoral Nord entre Kayar et Saint-Louis. Il est constitué par des dépôts sableux et sablo-argileux qui reposent directement sur le substratum marneux et marno-calcaire de l'Eocène. Il renferme d'importantes réserves d'eau avec des ressources exploitables estimées à plus de 115000 m³/j (Travi, 1988). Le substratum marneux de l'aquifère est affecté d'une pente du Sud vers le Nord et l'épaisseur des sables aquifères atteint son maximum à l'aplomb du rivage (Fall, 1986).

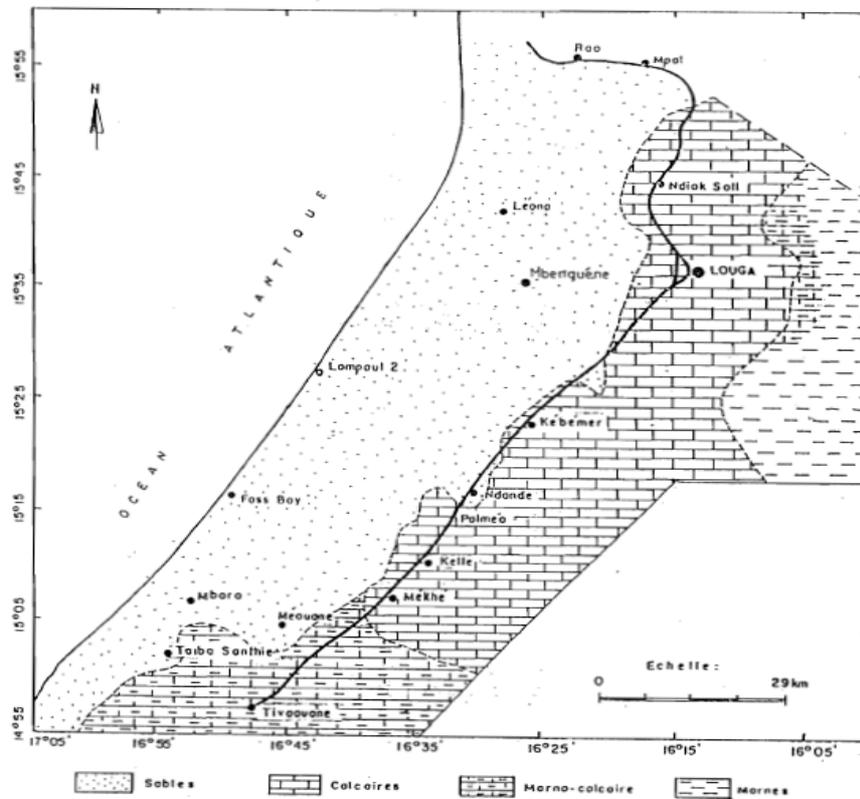


Figure 24 : Limites d'extension latérale de l'aquifère des sables du Littoral Nord (Diouf S. , 1995)

Dans la zone d'étude, cet aquifère des sables surmonte celui du "système d'aquifère intermédiaire" qui regroupe les nappes Paléocène et Eocène qui sont surtout productives dans la partie Sud. Cet ensemble est capté par la plupart des forages de rabattement des ICS.

IV.3.3 Aquifère du Maastrichtien

En ce qui concerne le Maastrichtien dans la zone du projet et des régions environnantes, le toit de l'aquifère se situe environ entre - 400 et - 500 m IGN et le mur est en dessous de la côte -800 m. La nappe qui est captive sur presque l'ensemble du bassin à l'exception de la bordure sédimentaire avec le socle, et au niveau du Horst de Diass, présente un écoulement globalement orienté SE-NW avec des isopièzes allant de + 30 m au niveau de la bordure orientale à environ + 2m dans la zone du projet GCO. Cet écoulement est bloqué au méridien 17°15' passant par Sébikotane.

Cette nappe représente un immense réservoir d'eau douce qui est sous une forte pression hydrostatique dans la zone du projet.

En effet, les forages implantés par GCO et ceux existants dans la région montrent une remontée de la colonne d'eau variant entre 400 et 430 m. Ces forages de profondeur variant entre 490 et 555 m sont crépinés sur une épaisseur moyenne 60 m à des profondeurs dépassant généralement 430 m. Ils produisent tous une eau douce.

Les valeurs de transmissivité (T) de l'aquifère, très bonnes de l'ordre de 10^{-3} à 10^{-2} m²/s, permettent d'extraire des débits de plus de 200 m³/h avec de très faibles rabattements. Les tests de pompage effectués sur quelques ouvrages montrent des rabattements de 2 à 4 m à un rayon de 1 km des puits. Le rayon d'influence est en moyenne de 3 km.

Du point de vu de la qualité chimique des eaux de la nappe profonde, il a été mis en évidence la présence d'une bande centrale salée à eau saumâtre (résidu sec = 1 à 3.5 g/l), située à 30 km à l'Est de la zone de Diogo, suivant un axe Nord-Sud partant de l'embouchure du Sine Saloum jusqu'au lac de Guiers. Ces eaux sont chlorurées sodiques avec des teneurs en fluor supérieures à 1.5 mg/l.

Egalement, les forages pétroliers implantés dans la région Ouest du bassin ont signalé la présence d'un " matelas " sursalé de saumure gisant en profondeur en dessous de la nappe à eau douce. L'origine de ces saumures n'est pas encore élucidée mais elle semble provenir de piège d'eau salée lors des phases de transgression et de régression marines qui ont caractérisé la mise en place du bassin sédimentaire.

IV.3.4 Piézométrie du système hydraulique de la nappe des sables quaternaires

La piézométrie de la nappe des sables du Quaternaire connaît une baisse bien avant 1975. En fait, la carte piézométrique de Juillet 1975 établie par (Noel, 1978) avait une assez bonne précision. Ce dernier avait même fait une projection sur son évolution à la baisse jusqu'en 1985 (FIGURE 25). Elle se caractérise par :

- un bombement piézométrique, assez bien marqué au Sud-Ouest du secteur, qui s'allonge parallèlement au Littoral. Il est axé sur le réservoir des sables quaternaires et s'affaisse progressivement vers le Nord suivant un gradient décroissant pour approcher le niveau 0 IGN de la mer. Les forts, gradients (1.7 à 3%) observés sur les flancs du bombement correspondent à une diminution de la perméabilité de l'aquifère liée à des terrains plus argileux (Faye S. , 1995);
- une piézométrie très plane, dans la partie Est de la limite des sables, couvrant l'aquifère calcaire. Cette configuration pourrait s'expliquer par leur forte perméabilité.
- entre 1975 et 1985, le modèle de Noel avait prédit une importante baisse du dôme de 4 à 5 m au Sud et une beaucoup moins importante au Nord de la zone.

Cependant les forages de recyclage de GCO allongés parallèlement aux dunes semi fixées et distantes de l'océan d'environ quatre (04) Km ont capté le réservoir sableux qui dispose d'assez bonnes perméabilités estimées entre $1.6 \cdot 10^{-4}$ m/s et $3 \cdot 10^{-4}$ m/s et des débits spécifiques allant jusqu'à $9.6 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$ de rabattement. Les forages ont des débits d'exploitation variant entre 90 à $120 \text{ m}^3/\text{h}$.

Les données du suivi piézométrique de la nappe supérieure de GCO et celles de la DGPRE pour le mois d'aout 2014 (FIGURE 26) ont permis de construire la carte piézométrique d'aout 2014 (FIGURE 27).

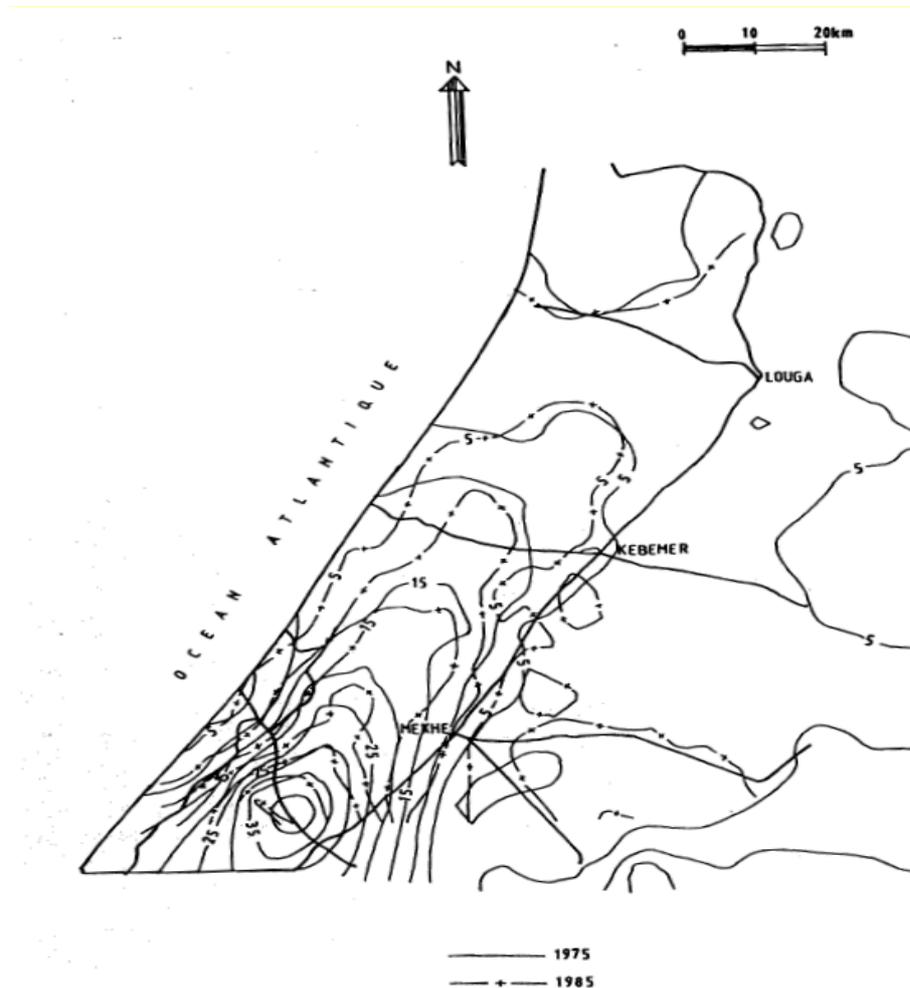


Figure 25 : Evolution de la piézométrie du système hydrogéologique de 1975 à 1985 (Noel, 1978)

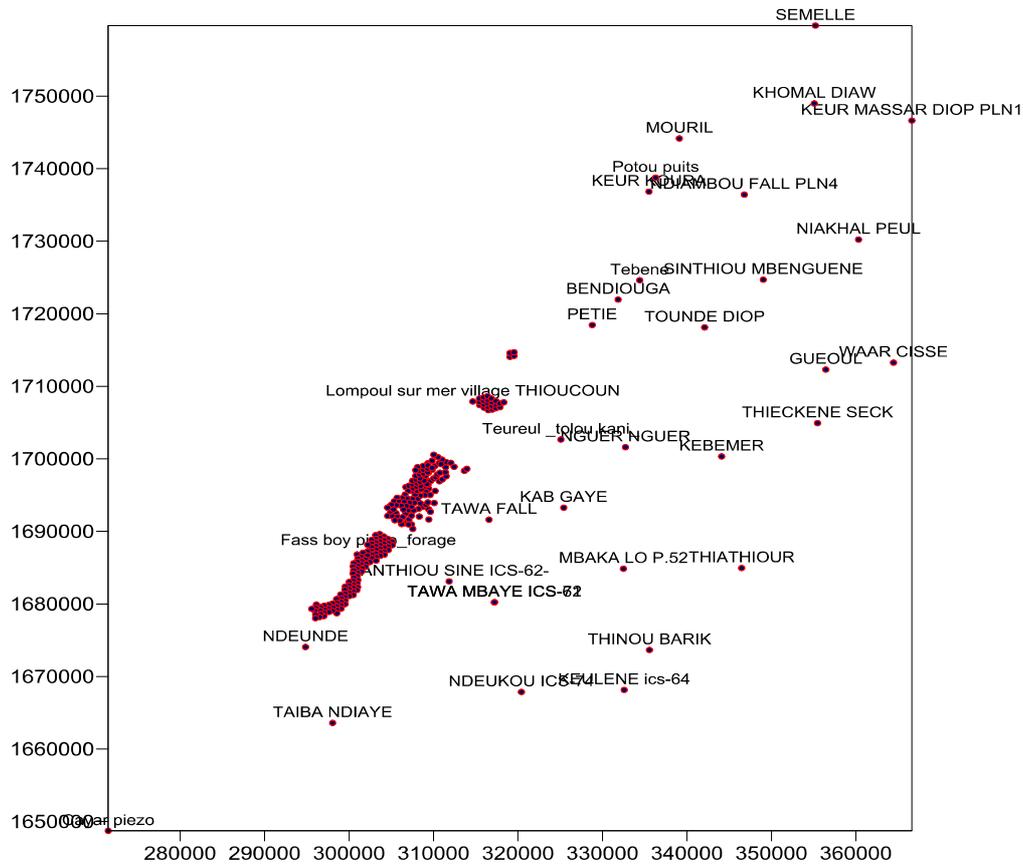


Figure 26 : Carte de localisation des piézomètres de la DGPRE et de GCO

Cette piézométrie de 2014 confirme la baisse piézométrique tantôt annoncée par Noel (1978). La crête du dôme de Taiba Ndiaye (ou de Meouane) a une côte piézométrique + 25 m IGN. Ceci dénote une baisse entre 1975 et 2014 de 15 m. Elle reste cependant toujours parallèle au Littoral avec un gradient décroissant vers le Nord à l'image d'un anticlinal.

La nouveauté pas assez réconfortante est l'exposition des fortes dépressions à la côte négative qui pourraient témoigner :

- à l'Ouest dans la zone de Mboro, de l'avancée de l'intrusion saline et ;
- à l'Est aux environs de Kelle, du sur pompage des forages de la SONES.

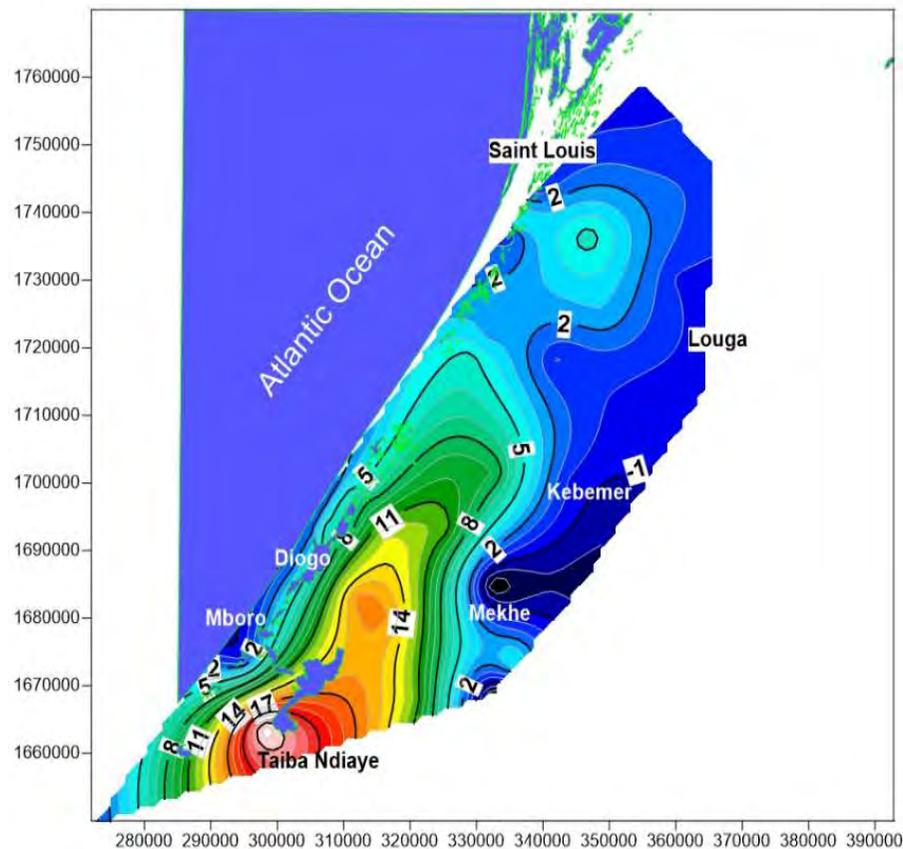


Figure 27 : Carte piézométrique de l'aquifère des sables du Littoral Nord (Novembre 2014)

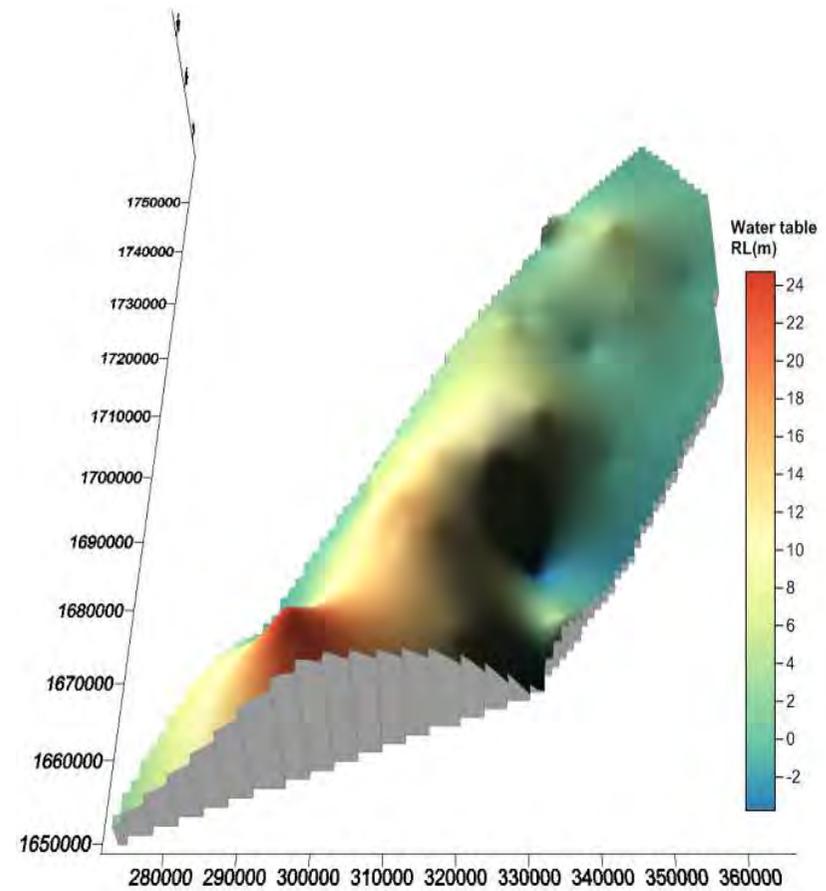


Figure 28 : Vue en 3D de la piézométrie de la nappe des sables du Littoral Nord en forme « d'anticlinal »

Par contre, la configuration du dôme avec bombement allongé jusqu'à hauteur de Tounde Diop, pourrait préserver la partie Est de l'invasion saline mais aussi ralentir celle qui a déjà commencé dans l'Ouest si l'exploitation des ressources en eau souterraine superficielle est assez bien contrôlée.

An Nord de Leona, vers Potou, la nappe serait plus vulnérable à la progression d'eau salée en provenance du delta du fleuve Sénégal.

IV.3.5 Continuité hydraulique des aquifères

Plusieurs auteurs ont étudié l'interface entre la nappe des sables du Littoral et celle des calcaires du Lutétien notamment celles de Puttalaz (1962) et du BRGM (Noel, 1975; Noel, 1978; Pernel & Gageonnet, 1992; Gaye C. , 1990). Tous ces auteurs ont conclu que la nappe des sables du Littoral Nord se prolonge à l'Est dans les calcaires lutétiens et dans les sables argileux du Continental terminal. Ces derniers ont admis que le contact entre l'aquifère des sables quaternaires à l'Ouest et l'aquifère des calcaires lutétiens à l'Est de la route Dakar-Saint-Louis, se fait à la faveur d'un accident tectonique qui permet une bonne continuité hydraulique (Puttalaz, 1962; Noel, 1978; Pernel & Gageonnet, 1992). Cette découverte semble être confirmée par les études ultérieures sur l'hydrodynamisme et l'hydrochimie des deux systèmes aquifères (Gaye C. , 1990; Kane C. , 1995; Faye S. , 1995). Ces nappes peuvent être considérées comme constituant un même système hydraulique.

L'écoulement d'Ouest en Est à partir du dôme piézométrique vers les calcaires lutétiens et les caractéristiques lithologiques et structurales des réservoirs du système permettent de conclure une continuité hydraulique entre les nappes des sables quaternaires et des calcaires lutétiens.

IV.3.6 Hydrochimie

Les caractéristiques hydrochimiques de la nappe des sables quaternaires du Littoral Nord ont fait l'objet de plusieurs études. Parmi celles-ci, on peut citer les travaux de Noël (1978) qui ont montré que la minéralisation des eaux varie dans de fortes proportions suivant les deux aquifères sableux et calcaire. Une classification des eaux a pu être faite sur la base de la minéralisation des eaux, on observe ainsi des eaux avec un TDS :

- égal à 220 mg/l en 1975 dans les sables quaternaires avec des minimas sur la zone axiale et un faciès, chloruré sodique ;
- égal à 370 mg/l avec un faciès bicarbonaté calcique dominant dans les calcaires lutétiens ;
- supérieur à 500 mg/l avec un faciès soit bicarbonaté calcique et magnésien, soit chloruré calcique et magnésien dans les formations calcaires du Sud ;

- compris entre 1.2 et 2 g/l avec un faciès de type mixte chloruré et sulfaté calcique et sodique ou franchement chloruré sodique rencontré autour de Mboro ou à Potou. Ces eaux pourraient témoigner de l'intrusion saline.

Les valeurs de conductivité qui indiquent la minéralisation de l'eau de la nappe sont comprises entre 180 et 3010 $\mu\text{S}/\text{cm}$ avec les plus fortes valeurs qui sont observées dans les secteurs Sud et Nord de la zone. D'autre part, les valeurs en sels dissous sont faibles, inférieures à 1g/l à l'exception des eaux se trouvant dans la zone Nord-Ouest de Louga (Kane C. , 1995).

Dans la zone environnante de Diogo, les analyses chimiques montrent une eau légèrement acide, avec des pH variant entre 5.59 et 6.82 alors que la minéralisation est généralement inférieure à 800 ($\mu\text{S}/\text{cm}$) (FIGURE 29).

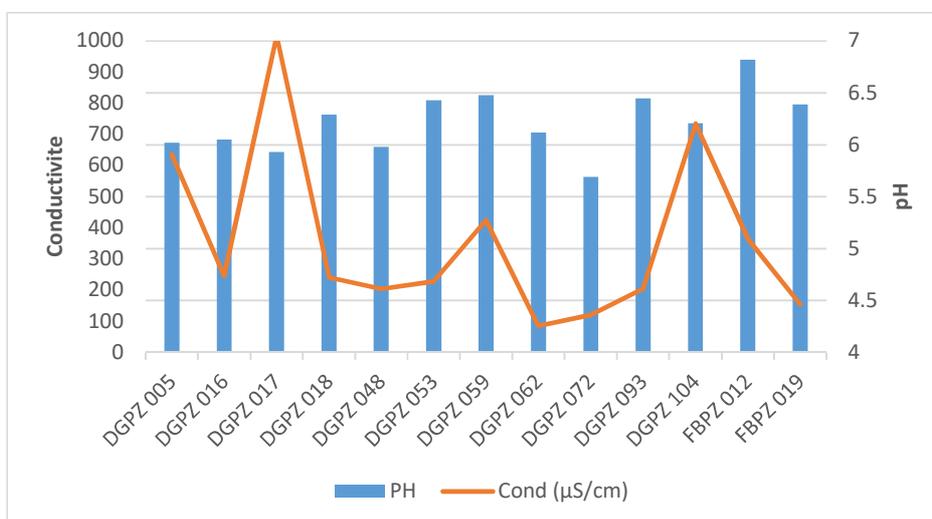


Figure 29 : Les valeurs de conductivité électrique et de pH de la nappe des sables dans la zone de Diogo

Quant aux aptitudes des eaux souterraines aux usages domestiques et agricoles, il convient de souligner que les eaux de la nappe des sables quaternaires, dans la zone du projet à Diogo, ne sont pas globalement potables. Les ions nitrates qui représentent le degré d'oxydation le plus élevé dans le cycle de l'azote varient dans la nappe entre 10.97 mg/l et 135.2 mg/l. Sur un total de 9 échantillons 6 ont des teneurs largement supérieures à la concentration maximale admissible de 50 mg/l définie par l'OMS. Ceci montre des signes de pollution anthropique qui peuvent s'expliquer par les effets combinés suivants :

- la forte pression anthropique dont la zone de Diogo fait l'objet, (un des principaux pôles de production et de commercialisation des produits maraîchers) ;
- l'inexistence de système d'assainissement adapté au contexte hydrogéologique caractérisé par une nappe sub-affleurante ;
- la faible profondeur de la nappe ;

- La forte perméabilité de la zone non saturée, essentiellement constituée de sables.

L'aptitude des eaux à l'irrigation a été définie en se basant sur le diagramme de WILCOX. Ce diagramme permet d'indiquer l'aptitude des eaux à l'irrigation selon un critère fondé sur la conductivité et sur le taux d'absorption du sodium (Sodium Absorption Ratio ou SAR). Le SAR d'une eau exprime le rapport entre la concentration du sodium et celle des alcalino-terreux.

$$SAR = \frac{(K^+ + Na^+)}{\sqrt{(Ca^{2+} + Mg^{2+})/2}} \quad \text{tous les ions sont exprimés en méq/l.} \quad (6)$$

C'est une donnée importante dans la définition des propriétés d'aptitude d'une eau, notamment pour l'irrigation. La valeur de ce paramètre est d'autant plus élevée que l'eau est impropre à l'agriculture.

Dans le cadre de l'étude de faisabilité du projet GCO, neuf échantillons d'eau de puits ont été collectés. Au total, 3 classes ont été définies dans la zone de Diogo (TROPICA, 2005): C1S1, C2S1 et C3S1.

- Sur les neuf puits échantillonnés, deux contiennent des eaux appartenant à la classe C1S1. Ces eaux sont d'excellente qualité et sont utilisables sans danger pour l'irrigation de la plupart des cultures.
- La moitié des eaux des puits échantillonnés appartiennent à la classe C2S1. Ces eaux sont bonnes et moyennement tolérantes au sel sur des sols ayant une bonne perméabilité.
- Deux échantillons appartenant à la classe C3S1 sont plus ou moins admissibles et conviennent à l'irrigation des cultures tolérantes au sel, sur des sols bien drainés. L'évolution de la salinité doit cependant être contrôlée. Ces puits sont localisés au niveau des zones à fortes concentrations de périmètres maraîchers. De ce point de vue, la dégradation de la qualité des eaux peut être liée à deux facteurs : l'infiltration des résidus des intrants chimiques dans les eaux souterraines ou bien la remontée de la langue salée.

IV.4 Etat des connaissances – analyses critiques des modèles hydrogéologiques antérieurs

La nappe des sables du Littoral Nord a fait l'objet de plusieurs études de modélisation hydrogéologique. La première date de 1975 avec l'OMS. Il s'en est suivi les études du BRGM (Pernel & Gageonnet, 1992), (Faye S. , 1995) et (GKW , 2009).

IV.4.1 Modèle OMS (1975)

Ce modèle, commandité par l'OMS et réalisé par le BRGM en 1975 constitue le premier qui s'est intéressé à l'aquifère supérieur du Littoral Nord. Il entre dans le cadre de l'étude du projet PIP-01. Ce modèle avait pour objectif de déterminer le débit maximal exploitable en régime permanent dans les endroits les plus propices pour étudier en régime transitoire les conséquences en moyen terme. Il a été développé par la

méthode des différences finies. Le domaine d'étude est discrétisé en réseaux de mailles carrés de 3 km de côté. Il couvre une superficie de 6000 km² suivant un rectangle de 27 sur 39 mailles. Le calage de ce modèle est obtenu après 22 calculs de réglage successifs. Le régime permanent est considéré sur la période de 1963 à 1973.

L'intérêt majeur de cette étude est que son modèle conceptuel reste toujours valable pour l'étude de cette nappe raison pour laquelle il est toujours utilisé par l'essentiel des modèles hydrogéologiques postérieurs. Les éléments constitutifs sont :

- la géométrie de l'aquifère des sables du Littoral Nord ;
- les conditions limites (conditions d'alimentation, d'écoulement et d'exutoire de cette nappe)
- des données assez importantes relatives aux paramètres hydrodynamiques. La transmissivité moyenne pour les sables est estimée à $3 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ tandis que celle des calcaires lutétiens est 3 à 7 fois supérieure.

Les simulations ont porté sur 8 cas d'exploitation en régime transitoire sur deux périodes dont l'une allait jusqu'à 11 ans et l'autre jusqu'à 50 ans. La simulation de pompage de $2.8 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ en régime transitoire dans les zones de prélèvement actuel (axe Kelle – Gueoul), avait déjà prédit une baisse lente de la piézométrie de 2.5 m en moyenne après 11 ans et une baisse plus accentuée de 9 m en moyenne après 50 ans. Toutefois les pompages au voisinage des puits conduiraient à des rabattements de l'ordre de 20 à 25 m.

La fiabilité de ce modèle réside dans l'incertitude sur les modalités d'intervention de l'ETP : réserve utile et coefficient d'évaporation. La valeur de l'évaporation de $5.2 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ exprimée dans le résultat du bilan semble être excessive.

Les programmes de modélisation hydrogéologique de l'époque n'étaient pas assez développés par rapport à ceux d'aujourd'hui. En effet, cette étude est basée sur des programmes parcellaires et non sur un code capable de faire la modélisation de façon globale et simultanée.

Les prélèvements actuels n'ont pas été bien prises en compte dans cette étude ; ce qui reflète un manque de planification à long terme tant du point de vue de la localisation des ouvrages que de leur pompage.

Durant la phase de calage du régime transitoire, la piézométrie montre une baisse très lente ; ce qui ne reflète pas exactement la réalité. Ce résultat mitigé découlerait d'un manque de précision sur l'évapotranspiration réelle et sur les coefficients d'emmagasinement. En effet, une bonne appréciation des pertes par évaporation devrait passer par l'intégration de la profondeur de la nappe par rapport au sol dans le calcul de ce dernier.

D'autre part, il demeure difficile d'estimer la recharge et la perméabilité surtout dans la partie occidentale de la nappe des sables du fait d'un manque de données.

Malgré ces difficultés, cette étude avait confirmé l'importance du réservoir des sables dotés d'une bonne transmissivité moyenne de l'ordre de 3.10^{-2} m²/s mais aussi prédit les rabattements excessifs de l'ordre d'une vingtaine de mètres observés dans la zone de captage Kelle – Gueoul.

IV.4.2 Modèle de Pernel et Gageonnet (1992)

Ce modèle est basé sur une actualisation du modèle hydrogéologique de la nappe du Littoral Nord réalisé par l'OMS en 1975. L'objectif de ce modèle est d'évaluer les ressources en eau encore mobilisables dans la nappe du Littoral Nord. Ce modèle par différences finies a gardé la même structure que la première. Il s'agit d'un aquifère monocouche discrétisé en mailles carrées de 3 km de côté (1252 mailles) et limité à l'Ouest par l'océan, au Nord, au Sud et à l'Ouest par des potentiels imposés. Ce modèle est développé en utilisant un logiciel dénommé MARTHE¹, plus performant que le premier et développé par le BRGM en 1987.

Le calage a été effectué aussi bien en régime permanent (1975) qu'en régime transitoire (1975-1991). L'année 1975 est considérée comme celle de piézométrie de référence stable. Les piézométries restituées lors du calage en ces différentes périodes sont proches de celle observée. L'un des résultats majeurs obtenus par ce modèle demeure les conclusions rassurantes par rapport aux prévisions de pompage de la SONES à Kelle et Kebemer. Les différents scénarii de pompage étaient 25000, 30000 et 50000 m³/j pour combler le déficit d'alimentation en eau potable de la ville de Dakar en 1992.

Le modèle avait conclu que les rabattements supplémentaires dus aux futurs pompages prévisionnels n'atteindraient pas la zone côtière. Par conséquent il n'y aurait pas de progression de l'intrusion saline.

Les points faibles de ce modèle demeurent :

- une absence de précision sur la recharge directe dans les résultats du bilan ;
- une sous-estimation des prélèvements agricoles ;
- un manque de précision de la piézométrie restituée dans la zone Nord du Littoral ;
- un manque de détails sur l'estimation de la valeur de la reprise évaporatoire.

Par ailleurs, l'analyse des termes du bilan en régime transitoire pour les années 1975, 1986 et 1991 suscite un certain nombre de questions, même s'il y'a eu ajustement du modèle sur les piézométries

¹ Modèle d'Aquifère pour un maillage Rectangulaire en régime Transitoire pour le calcul Hydrodynamique des Ecoulements

correspondantes. En effet, l'emménagement n'apparaît pas dans les termes du bilan. En plus de cela, les quantités attribuées à la reprise évaporatoire passent de 12800 m³/j en 1975 à 311900 m³/j en 1991 alors qu'avec l'augmentation des abstractions et la persistance du déficit piézométrique, l'évapotranspiration devrait diminuer puisqu'il y a augmentation de la profondeur de la nappe par rapport au sol. Ce problème découlerait du fait que les pertes par évaporation ne sont pas calculées en fonction de la profondeur de cette dernière par rapport au sol. L'emménagement devrait aussi être affecté et ainsi figurer dans les termes du bilan.

IV.4.3 Modèle de Faye (1995)

Le modèle de Faye (1995) a gardé la même structure que celui de (Pernel & Gageonnet, 1992). Il s'agit là aussi d'un modèle monocouche où la nappe a été discrétisée par différences finies en mailles carrées de 2 Km de côté. Le domaine du modèle reste le même ainsi que les conditions limites. Il est soumis à un régime transitoire avec comme état initial la piézométrie de l'année 1975. Sa calibration est faite en régime permanent (1975) et en régime transitoire (1975 - 1994) et les piézométries restituées de 1975, 1985 et 1991 étaient satisfaisantes.

L'objectif de ce modèle était d'apprécier les impacts des futurs prélèvements de la SONES. Ce modèle, contrairement à celui de Pernet et Gageonnet a utilisé, en ce qui concerne le taux de recharge, les données récentes des études hydrochimiques de Tandia (1990), isotopiques de Gaye (1990) et celles résultantes du calcul du bilan hydrique par la fonction de production expérimentée par Dieng (1987). Notons que la recharge demeure un des facteurs clés dans le développement des modèles hydrogéologiques.

L'un des résultats obtenus à partir de ce modèle est la construction de variogrammes pour une meilleure appréciation des paramètres d'entrée tel que la conductivité hydraulique (K), la charge hydraulique (h) et la profondeur du mur de l'aquifère. En fait, l'utilisation de cette technique s'est justifiée par l'insuffisance et la variabilité spatiale des paramètres hydrodynamiques. La construction de ces variogrammes est basée sur la méthode d'interpolation par krigeage qui a donné des résultats satisfaisants.

Les résultats du modèle obtenu, suite à la simulation des prélèvements supplémentaires d'environ 50000 m³/j vers l'horizon 2020, à partir des zones de pompage de Ndande et Gueoul pour réduire le déficit d'alimentation en eau potable de la région de Dakar, avaient montré un rabattement de l'ordre de 10 m au droit des nouveaux forages, un couloir de rabattement sur l'axe routier Mékhé-Louga et l'affaissement du dôme piézométrique.

Les points faibles de ce modèle pouvant être considérés sont les suivants :

- problème de géo-référencement cartographique de la zone d'étude ;

- conditions limites non entièrement respectées par le fait du choix d'un potentiel imposé non nul au Nord de la zone du projet alors que toute la limite occidentale est bordée par l'océan ;
- pas assez de détails sur l'importance de l'emmagasinement et des infiltrations dans les différents scenarii du bilan d'eau ;
- sous-estimation des prélèvements maraichers ;
- manque de précision sur les proportions d'eau infiltrée ;

Concernant la paramétrisation du modèle lui-même, vu l'étendu de la zone d'étude, la pluviométrie part d'une moyenne annuelle de 500 mm au Sud à environ 300 mm au Nord. Ainsi il serait plus pertinent de différencier les valeurs de recharge en deux zones.

Le bilan en régime transitoire est presque équilibre (une différence de 200 m³/j), alors on devrait s'attendre à un retour au régime permanent ce qui n'est pas le cas puisque la nappe continue de baisser. Dans un cas pareil, tracer la courbe de variation de l'emmagasinement allait pouvoir montrer s'il s'agit réellement d'un nouvel état d'équilibre.

Il est également constaté pour les différents scenarii projetés que le bilan montre une même valeur de la décharge ce qui semblerait ne pas être le cas dans la réalité. En effet avec une baisse pluviométrique, essentiellement due à une augmentation des prélèvements, la surface piézométrique devient plus profonde. Par conséquent l'évapotranspiration devrait baisser.

En ce qui concerne les conclusions sur l'avancée de l'intrusion saline, elle n'a pas été illustrée par la carte piézométrique. Un puits d'observations proche du rivage n'a pas été installé et représenté aussi dans le modèle. Un tel piézomètre allait permettre de pouvoir tracer des « break-through curves » qui renseigneraient mieux sur l'avancée de la langue saline. Dans les termes du bilan, on note des apports par rapport aux limites mais on ne peut pas affirmer pour le moment qu'il s'agit exactement d'intrusion saline. Il n'a pas été élucidé.

En l'an 2014, avec des prélèvements journaliers de la SONES d'environ 90000 m³, les rabattements au niveau des forages dans la zone de pompage de Kelle sont de l'ordre de 17 m.

IV.4.4 Modèle GWK (2008)

Ce modèle développé par le cabinet GWK en 2008, fait partie du projet « Etudes Hydrogéologiques Complémentaires » réalisées dans le cadre du Projet Eau à Long Terme (PLT). Cette étude a intégré la modélisation des aquifères du Littoral Nord et de Dakar.

Les objectifs de ce modèle sont de :

- faire le point sur les connaissances des nappes alimentant la ville de Dakar et ses environs, notamment sur les aspects du fonctionnement hydraulique et de l'intrusion saline ;
- maîtriser les impacts liés à la surexploitation de ces nappes et les risques de pollution.

Il s'agit d'un modèle multicouche superposé comme suit :

- couche supérieure (nappe libre des sables quaternaires, CT et formations éocènes) ;
- couche intermédiaire (formation aquitard du Danien) ;
- couche inférieure (nappe maastrichtienne) ;
- couche intermédiaire (formations aquitards du Tertiaire supérieur et Eocène) ;
- couche intermédiaire (nappe des calcaires paléocènes).

Ce modèle a utilisé comme code, le logiciel FeFLOW 5.3 basé sur la méthode des éléments finis, développé par DHI (Berlin).

Parmi les résultats obtenus, on peut citer :

- une meilleure connaissance de la géométrie des aquifères ;
- un complément d'informations sur les données d'exploitation des nappes du Littoral Nord ;
- une meilleure connaissance des zones affectées par l'intrusion saline ;
- une confirmation des rabattements observés à Kelle et Pekesse par la piézométrie restituée.

Cependant, un certain nombre d'ambiguïtés sont notées :

- le modèle conceptuel définissant un système multicouche où, la nappe supérieure serait drainée par les nappes intermédiaires à travers un aquitard. Ceci ne se justifierait pas du fait de la puissance de la couche marneuse à marno-calcaire qui sépare l'aquifère supérieur du système intermédiaire et ou inférieur.
- la limite Sud de la nappe du Littoral Nord semble confuse. En fait la zone de Mbeubeuss – Keur Massar ne devrait pas être intégrée dans la nappe du Littoral Nord mais plutôt dans celle de Dakar uniquement puisque la limite Sud de l'aquifère du Littoral Nord serait plutôt définie par le contact des marnes qui s'étendent au Sud de Méouane.
- la considération de l'ensemble des aquifères potentiels dans ce modèle alors que le Paléocène n'est pas productif dans la partie occidentale du Littoral Nord ;
- absence de la reprise évaporatoire dans le bilan du modèle ;
- l'existence d'une drainance descendante qui ne semble pas être tout vraisemblable.

Pour le modèle, un bilan hydraulique cumulé de la période de 1968-2007 de la nappe supérieure (sables quaternaires, calcaires éocènes) est présenté ci-dessous (TABLEAU 7):

Tableau 7 : Bilan hydraulique de la nappe supérieure pour la période 1968 -2007

Élément du bilan hydraulique	Débit [m ³ /jour]
Recharge par des pluies	136468
Recharge par écoulements	33579
<i>Total débits entrants</i>	<i>170047</i>
Perte par écoulements	-55631
Perte par percolation descendante	-91156
Perte par prélèvements	-128063
<i>Total débits sortants</i>	<i>-274850</i>
Bilan	-104803

- les débits entrants dans le bilan cumulé de la nappe supérieure (pluies efficaces, écoulements à partir des secteurs hors de la zone du modèle et l'océan) sont de l'ordre de 170000 m³/jour.
- les débits sortants du bilan cumulé (percolation descendante, prélèvements et pertes vers l'océan) sont de l'ordre de 275000 m³/jour.
- le bilan cumulé de la nappe supérieure est donc négatif de l'ordre de -105000 m³/jour.
- la percolation descendante à partir de la nappe supérieure vers les aquifères sous-jacents est d'environ 91000 m³/jour.
- les prélèvements à partir des ouvrages hydrauliques sont estimés à 128000 m³/jour.

On observe, qu'à la date d'établissement de ce bilan, les sorties sont supérieures aux entrées, pour l'ensemble de l'aquifère, du fait d'une exploitation croissante et d'une pluviométrie déficitaire pendant la période modélisée.

Cependant, on constate l'absence de l'emménagement et de l'évapotranspiration dans les termes du bilan. D'une part, avec la baisse piézométrique, la nappe continue d'enregistrer des entrées en provenance de l'emménagement ; c'est ce qui explique l'exploitation de ressources en eau non renouvelables. D'autre part, vu la faible profondeur de la nappe supérieure (0 à 30 m), les pertes par évapotranspiration se perpétuent ; ce qui signifie que le bilan devrait tenir compte non seulement de la déduction de la réserve utile sur l'infiltration mais aussi des pertes par évapotranspiration continue.

Conclusion partielle

Cette première partie de l'étude a montré l'importance de la zone d'étude du point de vue socio-économique et démographique. L'essentiel de la production horticole du Sénégal vient de cette zone et la densité de la population y est assez forte. Il a été mis en exergue le rôle primordial des ressources en eaux souterraines que regorge la région. Cependant, elles font face à une demande croissante en eau agricole et industrielle mais également aux défis du changement climatique, par la baisse pluviométrique. D'autre part, la qualité de la nappe superficielle est en train de se détériorer progressivement du fait de l'intrusion saline et l'utilisation excessive des pesticides et des engrais.

Sur le plan géologique, le système hydrogéologique supérieur du Littoral Nord est composé de deux aquifères. L'un situe à l'Ouest de la route nationale Dakar – Saint Louis est sableux à sablo-argileux et l'autre est constitué de calcaires du Lutétien. Cet ensemble repose directement sur un substratum marneux imperméable d'allure irrégulière. Dans la partie Ouest, le substratum se matérialise par une couche argileuse marron quasi permanente tout le long de la bande dunaire, en dessous d'un niveau silteux grisâtre. Les nappes des sables quaternaires et des calcaires lutétiens se particularisent par une continuité hydraulique malgré un léger décrochement vertical dextre le long de la route nationale (RN2) relaté par Noel (1978).

Par ailleurs l'examen des longues séries chronologiques de la pluviométrie qui remontent à la moitié du siècle dernier, montre une baisse persistante des précipitations. La pression anthropique a aussi engendré l'augmentation exponentielle des prélèvements d'eau pour le maraichage et pour l'alimentation en eau de Dakar à partir des forages éocènes de Mékhé par la SDE. Cette situation s'est traduite par une baisse généralisée de la nappe depuis 1975 et une contamination par invasion saline déjà observée sur la façade maritime, au Nord (Potou) et au Sud (Mboro).

Dans ce contexte, l'importance des deux grandes industries minières de la zone, ICS et GCO, a été soulignée. La première exploite le phosphate par voie sèche et la seconde, les minéraux lourds des sables dunaires par dragage (voie humide). Cette dernière méthode repose essentiellement sur l'hydrodynamisme des eaux souterraines. Ainsi, une analyse approfondie mérite d'être effectuée pour une meilleure connaissance des ressources en eau dans la zone, particulièrement autour de la mine de Grande Côte Operations (GCO).

L'analyse critique des modèles hydrogéologiques antérieurs utilisant différents types de code (MARTH, MODFLOW et FEFLOW), a montré des différences dans la conception du modèle et dans les résultats obtenus. Certains ont eu des difficultés dans l'élaboration du modèle conceptuel ou dans la connaissance géométrique de l'aquifère. D'autres ont eu des limites dans l'appréciation des paramètres hydrodynamiques. Les travaux anciens de modélisation n'avaient pas tenu compte de l'individualisation de

la couche de sables moyens à grossiers qui gît dans la partie occidentale du Littoral Nord. Egalement, aucun d'eux, même le modèle de GWK qui date de 2009, n'avait pris en compte le système d'exploitation minière de GCO alors que la mine avait déjà été planifiée en 2007 pour un démarrage en 2012. Le modèle hydrogéologique réalisé dans le cadre de cette étude tentera d'apporter des réponses à ces imprécisions, du moins dans la partie Ouest du dôme piézométrique de la NSQ.

DEUXIEME PARTIE

METHODOLOGIE D'INVESTIGATION ET OUTILS D'ANALYSE

Introduction

Les processus hydrogéologiques diffèrent selon les échelles spatiales et temporelles. A chaque échelle correspondent des paramètres hydrodynamiques, physico-chimiques et isotopiques ainsi que des mécanismes prédominants. Il s'y ajoute des effets spécifiques tels que les conditions particulières ou les états initiaux. Pour identifier les différents termes du bilan des processus, il faut comprendre les directions d'écoulement des eaux de surface et souterraines et les relations existantes entre elles, l'atmosphère, le système de pompage et celui du drainage des eaux d'infiltration. Pour ce faire, nous adopterons aussi bien les méthodes expérimentales telles que le suivi piézométrique et les pompages d'essai, les méthodes chimiques et isotopiques et la modélisation hydrodynamique. La définition du domaine d'étude et des différents mouvements et relations qui s'y passent, permettra de définir le modèle conceptuel alors que la modélisation permettra de vérifier les hypothèses de base et d'intégrer les variabilités spatiales et temporelles. Dans cette partie, on présentera les différentes méthodes et outils utilisés dans le cadre de cette étude.

Chapitre V. Données de base

V.1 Sites de collecte des données de la mine de GCO

La collecte des données existantes est composée :

- d'une synthèse des données socioéconomiques, climatologiques, géologiques, hydrogéologiques, hydrodynamiques et hydrochimiques ;
- d'un inventaire des ouvrages hydrauliques et de l'estimation des prélèvements ;
- de l'identification des besoins en eau et de leur évolution sur une période de 5 à 10 ans avec un accent particulier sur les pompages de recyclage prévus par les activités minières de GCO.

Les informations collectées dans la partie bibliographique proviennent de différentes sources, telles que des thèses (Fall (1986), Gaye (1990), Faye (1995), Kane (1995) et Diouf (2012)), des rapports de projets d'étude du Ministère de l'Hydraulique et de l'Assainissement (DGPRE / COWI-POLYCONSULT, 2002), de l'Agence Nationale de l'Aviation Civile et de la Météorologie (ANACIM), de la Direction Nationale de la Prévision et de la Statistique (ANSD, 2013), des bases de données des services et sociétés suivantes : DGPRE, DEM, SONES, SDE, ICS et GCO.

La compagnie GCO repose son système d'exploitation sur l'utilisation des eaux souterraines. Les nappes profondes du Maastrichtien et superficielle du Quaternaire ont fait l'objet de suivi par le service hydrogéologique de GCO depuis 2007.

V.2 Nappe maastrichtienne et forages profonds

Cette nappe est captée par une douzaine de forages profonds qui ont chacun un débit d'exploitation moyen de 180 à 200 m³/h. Ces forages pompent alternativement pour satisfaire un débit max journalier de 1200 m³/j pour l'apport en eau additionnel du bassin de dragage.

V.3 Nappe superficielle et forages de régulation ou de recyclage

La nappe des sables du Quaternaire dans laquelle se déplace le bassin d'extraction compte actuellement soixante-quinze forages de régulation appelés « containment bores (CB) ». Ces forages de rabattement, au débit d'exploitation moyen de 80 à 108 m³/h chacun, sont implantés le long des passes minières et sont mis en marche dès qu'il y'a un rehaussement local du niveau piézométrique. Ce programme de réalisation de forages de régulation se poursuivra toute la durée de la mine.

V.4 Bassin de dragage : la drague et l'usine de concentration

C'est un bassin mobile qui se déplace le long de la passe minière par dragage. La drague a une capacité moyenne d'extraction de sable de 7000 t/h. Le bassin nécessite un suivi scrupuleux de son niveau d'eau. En fait, le maintien du plan d'eau au niveau optimal est imposé par la surface piézométrique de l'aquifère supérieur, la profondeur du gisement et le tirant d'eau requis pour la drague et l'usine flottante.

Le processus hydraulique du couple drague/usine flottante comporte des spécificités dues au fait que la drague pompe de la pulpe : mixture d'eau et de sable. La compréhension de ce processus de transfert de matière est nécessaire pour la modélisation des écoulements.

En effet, pour ce type d'usine, le processus réside sur le principe de transport de la masse de sable sous forme de pulpe par pompage. L'eau demeure le moyen de transport le plus approprié. Le processus exige que la pulpe pompée ait une certaine densité.

Pour les calculs de bilan massique, en plus des équations générales de l'hydraulique, le processus industriel nécessite la connaissance des formules ci-dessous (Grzina & al., 2002) :

- Débit massique de l'eau en (t/h ou m³/h) $Q_W = \left(\frac{M \times 100}{C_W} \right) - M$ (7)

- Débit volumique de de la pulpe en m³/h $Q = \frac{M}{S} + M \left(\frac{M - C_W}{C_W \times S_L} \right)$ (8)

- Densité de la pulpe en t/m³ $S_M = \frac{S \times S_L}{S - \left(C_W \times \frac{S}{100} \right) + \left(C_W \times \frac{S_L}{100} \right)}$ (9)

- Pourcentage volumique solide (%) de la pulpe $C_V = 100 \times \frac{S_M - S_L}{S - S_L}$ (10)

Avec :

- Le débit massique de matière sèche à pomper, M (tph)
- Pourcentage solide de la pulpe en poids, C_w (%)
- Densité solide, S (T/m^3)
- Densité liquide, S_L (T/m^3)

A partir des essais faits au laboratoire minéralogique, la densité du sable retenue S est égale à 2.65. Celle de l'eau à la température ambiante est estimée égale à 1.

L'exploitation de ces formules suivant les différents débits massiques solides envisageables et suivant la variation de la densité de la pulpe, ont permis d'établir le diagramme de flux (FIGURE 30).

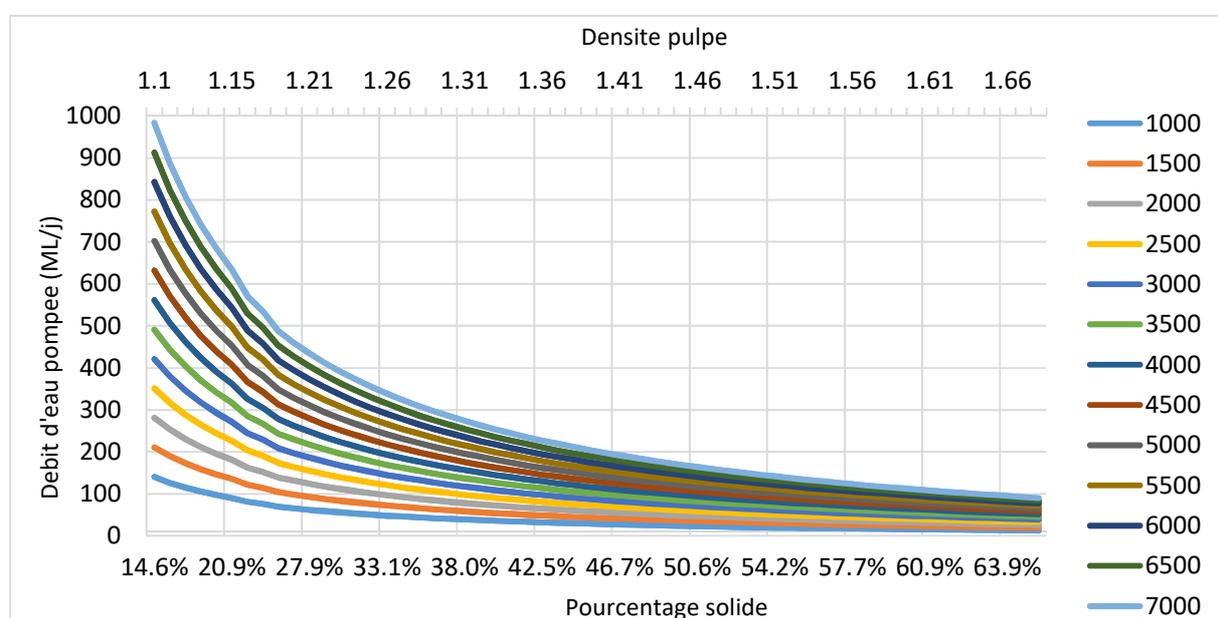


Figure 30 : Diagramme de détermination des débits d'eau pompés

V.5 Rejets de sables ou terrils

Les terrils sont rejetés à l'arrière du bassin par la flèche gerbeuse « boom stacker » de l'usine flottante de concentration et également par les conduites en PEHD sous forme de pulpe. Les paramètres mesurés sont le débit massique, la densité et la durée de production.

Chapitre VI. Travaux de terrain

VI.1 Enquêtes

Les données climatiques, les précipitations ainsi que les volumes d'eau prélevés ont fait l'objet d'enquêtes au niveau des structures de l'Etat notamment la DGPRES, la SDE, la DH, la DTGC, l'ASECNA, la CSE, les Agences Régionales de Développement de Thiès et Louga, les projets d'hydraulique villageoise tel que le PADEN mais aussi au niveau des maraichers eux-mêmes.

VI.2 Réalisation de forages et piézomètres

Grace à la réalisation des 12 forages maastrichtiens, 75 forages superficiels et plus de 300 piézomètres, beaucoup d'information ont été collectées sur la géologie et l'hydrogéologie de la zone d'étude. Des diagraphies ont été aussi réalisées au niveau des forages profonds de GCO pour une meilleure détermination des niveaux de captage.

VI.3 Pompages d'essai

Plusieurs essais de pompage ont été effectués sur les forages profonds et superficiels. Ils sont de deux types :

- des essais de puits (pompage par paliers) systématiquement effectués sur l'ensemble des ouvrages afin de déterminer les caractéristiques du complexe aquifère/ouvrage de captage ;
- des essais de nappe réalisés sur les forages maastrichtiens et quaternaires afin de déterminer d'une part, les paramètres hydrodynamiques de la nappe (transmissivité et coefficient d'emménagement) et d'autre part, de simuler les pompages prévisionnels en « vraie grandeur ».

VI.3.1 Essais de pompage par paliers de débit

Le type d'essai réalisé est celui d'essai par paliers enchaînés. Dans ce cas, les pompages sont enchaînés sans interruption avec une seule remontée en fin d'essai. L'interprétation est faite de la même façon que celle des essais par paliers de débits séparés, mais en utilisant les rabattements corrigés.

VI.3.2 Pompage de longue durée

Des essais de longue durée de 100 heures de pompage à débit constant ont été opérés au niveau des forages profonds de GCO. La remontée a été observée sur 24 heures. Les résultats d'essai ont été interprétés et analysés afin de disposer d'une assez bonne précision des paramètres hydrodynamiques (T, S) des aquifères du Maastrichtien et des sables du Quaternaires dans la zone du projet.

En régime transitoire, le rabattement en tout point de la nappe, est donné par la formule de Theis :

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u); u = \frac{r^2 S}{4Tt} \quad (11)$$

Avec :

Q : le débit (m³/s)

T : la transmissivité (m²/s)

r : la distance du point considéré à l'axe du puits de pompage (m)

S : le coefficient d'emmagasinement (adimensionnel)

T : la durée du pompage (s)

W(u) une fonction connue et tabulée

Lorsque t devient suffisamment grand ($t > \frac{100r^2 S}{4T}$), cette équation admet une approximation logarithmique appelée approximation de Jacob :

$$s = \frac{0,183Q}{T} \log \frac{2.25Tt}{r^2 S} \quad (12)$$

Les couples expérimentaux (s, t) portés sur un papier semi-logarithmique, permettent de déterminer T et S selon que le suivi a lieu dans le puits de pompage ou un piézomètre.

VI.4 Suivi piézométrique

Le suivi piézométrique des aquifères profond et superficiel se fait régulièrement au niveau des piézomètres de GCO, des puits villageois mais aussi périodiquement à travers les ouvrages implantés par le Ministère de l'Hydraulique. En dehors de la concession de GCO, les données sont recueillies lors des campagnes de suivi piézométrique réalisées par la DGPPE.

Au niveau de GCO, le suivi de la nappe profonde se fait selon deux méthodes :

- l'utilisation de sonde manuelle lumineuse KL010 avec signal sonore ;
- le téléchargement des données des enregistreurs automatiques multiparamétriques installés sur les deux piézomètres profonds de 500 m (DPZ1 et DPZ2). Ils mesurent le niveau de la nappe, la salinité, la conductivité électrique, la résistivité, la température, etc...

Au même titre que la nappe profonde, la nappe superficielle fait l'objet de deux types de suivi :

- un suivi journalier dans la zone environnante de la mine ;
- un suivi mensuel à l'aide de plus de 300 piézomètres implantés entre Mboro et Lompoul dont 120 sont localisés dans la zone de Diogo et font l'objet d'un suivi régulier depuis 2012.

En plus des suivis piézométriques, les eaux des nappes quaternaire et maastrichtienne font l'objet d'échantillonnage et d'analyse chimique.

VI.5 Echantillonnage

VI.5.1 Eau de pluie

Des échantillons d'eau de pluie ont été collectés au niveau de la station pluviométrique de Diogo où est installé un pluviomètre de "type Wallingford". Les hauteurs de pluie journalière ont été également mesurées. Ces données seront utilisées lors de l'estimation de la recharge par la méthode des chlorures.

VI.5.2 Eau de nappe

Les échantillons ont été prélevés au niveau des forages et piézomètres de GCO grâce aux robinets de prise pour les forages et à l'aide d'une pompe à vide pour les piézomètres. Des échantillons d'eau de la nappe ont été aussi prélevés au niveau de quelques puits villageois repartis dans la zone d'étude. Le pH, la température et la conductivité électrique ont été mesurés *in situ*. Ces échantillonnages sont utilisés pour les différentes analyses hydrochimiques et isotopiques.

VI.5.3 Zone non saturée

La campagne d'échantillonnage de la zone non saturée a été effectuée sur huit (08) sites différents, choisis selon le type de sol, son occupation et sa distribution dans la zone d'étude. Les résultats obtenus ont été utilisés dans l'estimation qualitative et quantitative de la recharge. L'échantillonnage des profils de sol a été effectué avec une tarière à main de type australien (avec des tubes de rajout de 1 à 1.5 m).

Les sites d'échantillonnage sont ciblés dans les trois (03) ensembles morphologiques que compte le secteur d'étude (FIGURE 31). Il s'agit des dunes vives, des dépressions inter-dunaires (Niayes) et des dunes rouges Ogoliennes.

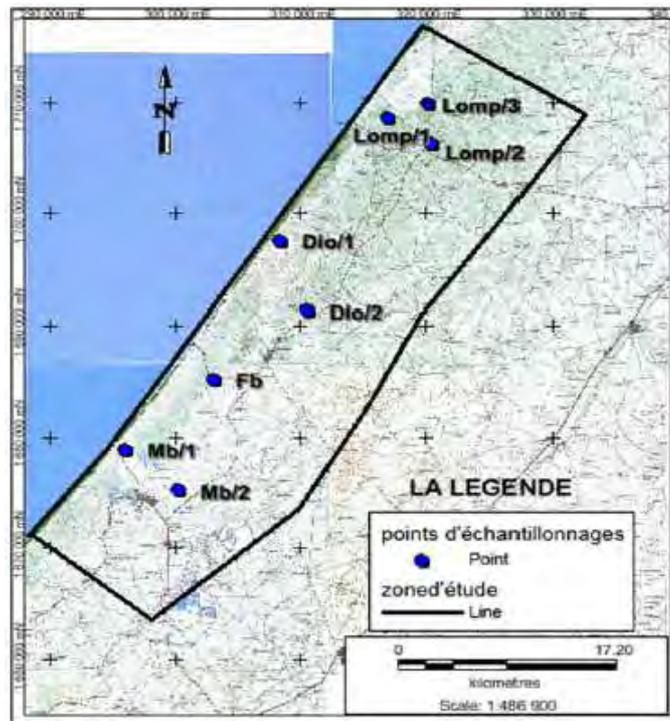


Figure 31 : Carte de localisation des différentes stations d'échantillonnage (Djigo, 2017)

Le pas d'échantillonnage est de 0.5 m jusqu'à 3 mètres maximum de profondeur. Il est porté à 1 m pour la suite. Les échantillons sont collectés puis conservés dans des sachets en plastique soigneusement fermés puis introduits dans une glacière pour minimiser l'évaporation. Chaque échantillon est divisé en 3 parts :

- le 1^{er} pour la description lithologique ;
- le 2nd est amené au laboratoire de GCO pour la détermination du taux d'humidité et la granulométrie ;
- le troisième est acheminé au laboratoire d'hydrologie et hydrogéologie de L'UCAD pour la détermination des concentrations en chlorure des lixiviats.

Chapitre VII. Travaux de laboratoire

Les analyses ont été réalisées dans différents laboratoires sis à l'intérieur comme à l'extérieur du pays. Elles sont réparties ci-dessous suivant les laboratoires :

1. Laboratoire d'hydrologie et d'hydrochimie du département de géologie à L'UCAD :
 - analyse chimique des eaux de la nappe ;
 - analyse chimique globale des eaux interstitielles ;
 - analyse chimique sur le lixiviat des sols.
2. Laboratoire d'Hydrochimie ALS Group de la République tchèque :
 - analyse chimique des eaux de pluie ;
 - analyse chimique des eaux de la nappe.
3. Laboratoire de l'Institut Pasteur de Dakar :
 - analyse chimique des eaux de la nappe
4. Laboratoire minéralogique de GCO :
 - analyse granulométrique ;
 - mesure de l'humidité pondérale du sol.
5. Laboratoire du Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) d'Orléans, France :
 - analyse isotopique

VII.1 Détermination de l'humidité du sol

VII.1.1 Humidité pondérale (ou teneur en eau pondérale)

La teneur en eau pondérale des échantillons de sols ($\omega(\%)$) est déterminée par la méthode gravimétrique classique. Elle est donnée par la relation suivante :

$$\omega(\%) = \frac{\text{Poids de sol humide} - \text{Poids de sol sec}}{\text{Poids de sol sec}} \quad (13)$$

VII.1.2 Humidité volumique (ou teneur en eau volumique)

La teneur en eau volumique est nécessaire pour les calculs des variations de stock d'eau du sol. Elle est obtenue à partir des mesures d'humidité pondérale et de densité volumique sèche du sol. La densité apparente sèche varie de 1.1 à 1.6 g.cm⁻³, respectivement des argiles aux sables (Aranyossy.J.F., 1978). Pour le calcul de l'humidité volumique, nous avons considéré la densité apparente sèche (γ_d) de l'ordre de 1.5 g.cm⁻³ (Edmunds & al, 1992).

VII.2 Lixiviation

La lixiviation est la méthode la plus couramment utilisée pour extraire les sels solubles du sol. Les teneurs chimiques obtenues sur le filtrat sont corrigées par rapport à l'humidité pondérale de l'échantillon (w) en considérant le facteur de dilution (df) :

$$df = \frac{100}{\frac{50 \times \omega(\%)}{100 + \omega(\%)}} + 1 \quad (14)$$

La concentration C_i de la solution initiale du sol s'exprime par :

$$C_i = C_{filtrat} \times df \quad (15)$$

La méthode a été réalisée en prélevant 50 g de sol (pour chaque échantillon) auquel on a ajouté 100 ml d'eau distillée et un barreau aimanté. Le mélange est ainsi introduit dans un bécher et placé sur un agitateur magnétique pour une durée le plus souvent égale à 3 heures (durée suffisante à la dissolution des sels, déterminée par des mesures de la conductivité faites tous les 30 minutes jusqu'à stabilisation). Les filtrats de l'eau du sol sont ainsi obtenus, après décantation, puis filtration à l'aide d'une pompe et de filtre millipore de 0.20 ou 0.45 μm en fonction de la turbidité des filtrats due à la fraction argileuse. La principale limitation de la lixiviation provient de la non-extraction de tous les sels solubles contenus dans l'échantillon du sol. Pour vérifier la fiabilité des résultats, on procède au dosage de quelques éléments chimiques contenus dans les filtrats (essentiellement les chlorures) et on compare leur évolution à celle de la conductivité (Diop, 1993).

VII.3 Dosage des ions chlorures

Le titrage est réalisé par ajout progressif (goutte à goutte) de la solution de nitrate d'argent (AgNO_3) contenue dans la burette graduée à la solution maintenue en agitation dans le bécher.

La fin de la réaction de précipitation est caractérisée par l'apparition d'une couleur rouge brique persistante. Les réactions chimiques qui se déroulent lors du dosage sont résumées ci-dessous :



La détermination de la concentration des ions chlorures passe par celle de la quantité de nitrate d'argent ajoutée à la solution contenant les chlorures déterminés. La première équation s'écrit :

$$[Ag^+] \times V_{Ag} = [Cl^-] \times V_{Cl} \quad (16)$$

La concentration massique des ions chlorures en mg/l sera donnée par :

$$[Cl] = \frac{[Ag] \times V_{Ag}}{V_{Cl}} \times 35,5 \quad (17)$$

VII.4 Analyse granulométrique

Suite à la description sommaire de chaque profil pédologique, des échantillons de sols prélevés (200 g) ont d'abord été lavés à l'eau du robinet sur un tamis de 50 μm pour enlever les particules fines, puis séchés pendant 3h dans une étuve à 105 °C. Les échantillons secs ont été pesés. Le pourcentage des éléments très fins (< 50 μm) est ainsi déterminé par différence de poids P1 avant lavage et poids P2 après lavage ramené à 100 g de sédiment.

La fraction > 50 μm ainsi isolée, a fait l'objet d'un tamisage à sec sur une série de 16 tamis (dont les diamètres sont compris entre 50 et 1600 μm) de norme AFNOR. Les refus de chaque tamis ont été pesés avec une balance de précision (au milligramme près). Cette analyse granulométrique permet une meilleure compréhension de la variation de l'humidité le long des profils de la ZNS.

VII.5 Analyses chimiques

Les analyses physico-chimiques ont été effectuées sur plusieurs piézomètres et puits villageois qui captent la nappe des sables quaternaires du Littoral Nord depuis Kayar jusqu'au Nord de Potou, à l'approche de l'embouchure du fleuve Sénégal. Au total, elles ont été effectuées sur 45 échantillons d'eau dont les 15 se trouvent dans la zone minière actuelle (Diogo).

D'autres analyses effectuées dans le cadre des programmes RAF/08/022/SEN entre l'Etat du Sénégal et l'AIEA ont également été récupérées et exploitées dans le cadre de cette étude. Lors de l'échantillonnage, les mesures *in situ* suivantes ont été réalisées :

- niveau de l'eau dans les ouvrages hydrauliques ;
- caractéristiques physico-chimiques de l'eau (température, pH, conductivité).

Le déroulement des campagnes de suivi de GCO est continu et se fait de façon mensuelle ou bimensuelle. Les analyses chimiques ont porté sur les éléments majeurs suivants :

- Ca^{2+} , Na^+ , Mg^{2+} , K^+ pour les cations ;
- SO_4^{2-} , HCO_3^- , CO_3^{2-} , et NO_3^- , pour les anions et sur la silice.

Le contrôle de la fiabilité des analyses chimiques a été réalisé par le calcul de la balance ionique dont la formule s'établit comme suit :

$$\text{Balance ionique} = \frac{\sum \text{cations} - \sum \text{anions}}{\sum \text{cations} + \sum \text{anions}} * 100 \quad (18)$$

Les analyses chimiques sont fiables lorsque la balance ionique est inférieure à 5%.

VII.6 Analyses isotopiques

Dans le cadre de ce travail, des analyses isotopiques ont été réalisées sur des échantillons d'eau des nappes du Maastrichtien et du Quaternaire en plus du bassin de dragage de GCO. En ce qui concerne la pluie, les résultats des analyses isotopiques que nous avons utilisés ont été réalisés dans le cadre de d'autres programmes menés par l'Etat du Sénégal et l'AIEA (RAF/08/22/SEN) ou tirés du site internet de l'AIEA.

L'oxygène 18 (^{18}O) et le deutérium (^2H) ont été analysés en utilisant la méthode de la spectrométrie de masse (IRMS, Isotope Ratio Mass Spectrometry). L'analyse du rapport isotopique par spectrométrie de masse permet la détermination exacte de l'abondance isotopique d'un atome (C, N, O, H). Les résultats sont exprimés sous la forme delta (δ) en part pour mille (‰) qui traduit la déviation par rapport au standard international V-SMOW (Vienna – Standard Mean Ocean Water) (Craig H, 1961). Les incertitudes sur les mesures isotopiques sont de $\pm 0.1\text{‰}$ pour l'oxygène 18 et de 1.0 (‰) pour le deutérium (^2H).

$$\delta(\text{‰}) = \left(\frac{R_{\text{echantillon}} - R_{\text{standard}}}{R_{\text{standard}}} - 1 \right) * 1000 \quad (19)$$

Où $R = \frac{\text{Isotope rare}}{\text{Isotope standard}}$ par exemple $^2\text{H}/^1\text{H}$ ou $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$.

En ce qui concerne le tritium, les valeurs isotopiques ont été réalisées par comptage à scintillation liquide après enrichissement électrolyte de l'eau. Les résultats obtenus sont exprimés en unité de tritium (UT). Une UT correspond à un atome tritium pour 10^{18} atome d'hydrogène soit 3.193 pCi /l ou 0.118 Bq/l. L'incertitude sur les mesures des teneurs isotopiques du tritium est de ± 0.7 UT.

Pour le carbone 14, l'activité de celui-ci est déterminée sur du benzène synthétisé à partir du CO_2 issu de l'attaque acide des carbonates de l'eau précipitée, avec une incertitude expérimentale ne dépassant pas $\pm 3.5\%$ de carbone moderne. Le ^{14}C est naturellement produit dans l'atmosphère avant de s'intégrer dans le cycle hydrologique (FIGURE 32).

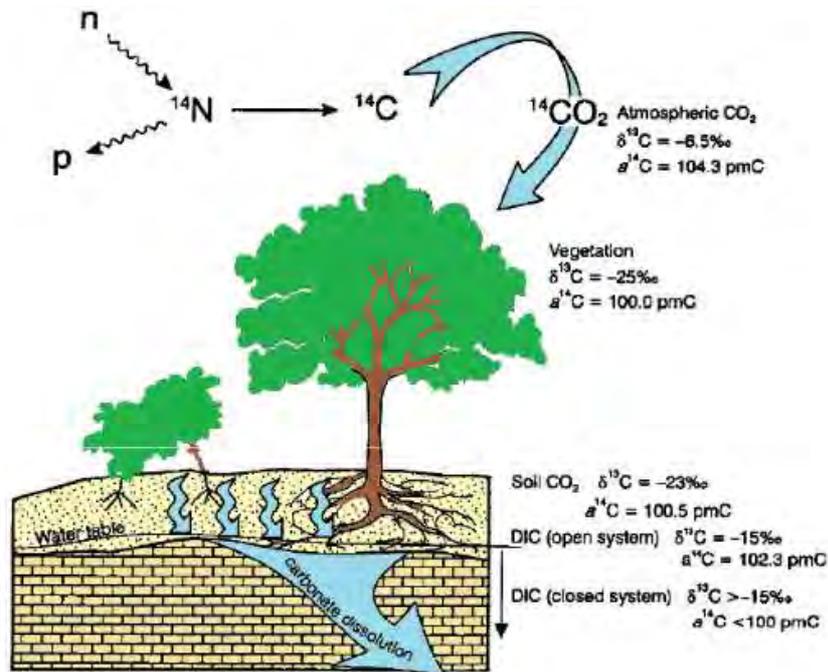


Figure 32 : Cycle du carbone 14 naturel dissous, (Clark & Fritz, 1999)

Dans les eaux souterraines, l'unité de mesure du ^{14}C est le pcm (pourcentage par rapport au carbone moderne). Ce « carbone moderne » représente l'activité en ^{14}C du CO_2 de l'atmosphère à la fin du 19^e siècle, avant les essais nucléaires et avant le déroulement des processus de dilution par du carbone mort. L'activité du carbone moderne est évaluée à $13.56 \pm 0.07 \text{ dpm/g}$ de carbone (0.23 Bq/gC). Elle représente l'activité spécifique de la référence internationale qui est un acide oxalique préparé par rapport à un arbre ayant poussé en 1880 par le National Bureau of Standards qui se trouve à Washington, D.C (USA).

Chapitre VIII. Outils et pertinence des outils

VIII.1 Pompage d'essai

Les pompages d'essai sont effectués sur les forages de GCO pour la détermination des paramètres hydrodynamique tels que la perméabilité et l'emmagasinement. Grâce à ces données obtenues, la caractérisation hydrodynamique a été faite. Les différentes méthodes d'interprétation applicables aux nappes libre ou captive ont été utilisées selon les cas. Les résultats ont permis d'analyser le potentiel de la nappe et appréhender ses limites. Ils constituent des paramètres d'entrée essentiels à la modélisation. L'étape de l'analyse de la sensibilité est aussi basée sur ces paramètres hydrodynamiques.

Le logiciel AQTESOLV Pro développé par HydroSOLVE (Glenn, 1989) a été utilisé pour l'interprétation des données. AQTESOLV est un logiciel qui permet l'interprétation semi-automatique des pompages d'essai et la simulation prévisionnelle de pompages dans des contextes hydrogéologiques variés.

VIII.2 Suivi piézométrique

Les variations piézométriques ont été mesurées en utilisant le réseau de piézomètres de GCO mais également celui de la DGRPE. Des traitements graphiques et une interpolation par la méthode de krigeage ont permis d'établir des cartes piézométriques et de suivre l'évolution de la nappe quaternaire. Ces résultats ont été utilisés comme donnée d'entrée au modèle hydrodynamique et ont aussi servi aux phases de calibration et de validation.

VIII.3 Hydrochimie et analyses isotopiques

Cette étape a démarré par des échantillonnages d'eau le long de transects préalablement définis. Elle comporte aussi les analyses chimiques et isotopiques faites dans différents laboratoires. Les applications Phreeq-C et Diagrammes ont été utilisées pour le traitement des données chimiques et l'élaboration des diagrammes de Piper pour la détermination des différents faciès. Les résultats ont permis la caractérisation chimique de la nappe des sables du Quaternaire mais aussi la mise en évidence de l'évolution chimique de l'aquifère suivant le sens d'écoulement des eaux.

L'interprétation des résultats des analyses isotopiques a reposé sur le traitement graphique et les calculs de temps de résidence d'eau basés sur différentes méthodes.

Par ailleurs, les analyses ont porté sur les isotopes radioactifs du tritium et du carbone 14 pour une estimation du taux de mélange entre les eaux du bassin et les eaux profondes et superficielles. Le choix de ces isotopes se justifie par leurs temps de désintégration. En effet, leurs temps de demi-vie (temps nécessaire à la désintégration de 50% de la masse initiale) sont respectivement de 12.35 ans et 5730 ans, permettant de dater des eaux dont l'âge est postérieur (^3H) et antérieur (^{14}C) à la période des essais thermonucléaires (1952).

Le principe de mesure est basé sur la radioactivité des éléments :

- le tritium émet un rayonnement β^- lors de sa désintégration : $^3\text{H} \rightarrow ^3\text{He} + \beta^-$
- le radiocarbone se désintègre en émettant des rayons β^- : $^{14}\text{C} \rightarrow \beta^- + ^{14}\text{N}$.

Pour le tritium, le dosage est effectué après enrichissement électrolytique (entre x10 et x15) de l'eau du fait des teneurs de plus en plus faibles du tritium dans les eaux naturelles ; la précision varie pour chaque échantillon, en fonction du temps de comptage et du bruit de fond analytique ; pour les teneurs inférieures à 10 UT, la précision varie entre ± 0.3 à ± 2 UT.

Pour le carbone 14, l'activité de celui-ci est déterminée sur du benzène synthétisé à partir du CO_2 issu de l'attaque acide des carbonates de l'eau précipitée, avec une incertitude expérimentale ne dépassant pas $\pm 3.5\%$ de carbone moderne.

VIII.4 Recharge

La réalimentation naturelle des nappes est un processus par lequel le surplus de l'infiltration sur l'évapotranspiration s'écoule vers la nappe à travers la zone non saturée. Elle permet d'évaluer les quantités d'eau renouvelables qui constituent en principe le potentiel exploitable de l'aquifère. Elle demeure cependant un paramètre à la fois pertinent, difficile à estimer et nécessaire dans les études de modélisation hydrogéologique. Plusieurs travaux antérieurs (Edmunds & al, 1992; Allison, et al., 1994; Edmunds & Gaye, 1994; Clark & Fritz, 1999) ont utilisé ou développé des méthodes permettant d'estimer le taux de recharge des aquifères et d'identifier l'origine et les zones potentielles de recharge.

Dans le cadre de cette étude, la recharge a été estimée en utilisant différentes méthodes parmi lesquelles le bilan hydrique, la fluctuation des nappes et le bilan des chlorures.

VIII.4.1 Principaux facteurs de la recharge

L'infiltration est conditionnée par les principaux facteurs ci-dessous :

- le type de sol : il est défini par les caractéristiques de la matrice du sol que sont sa structure, sa texture et sa porosité. Ces dernières influencent les forces de capillarité et d'adsorption dont résultent les forces de succion, qui elles-mêmes, régissent en partie l'infiltration.
- le couvert végétal influence positivement l'infiltration en ralentissant le ruissellement, lui donnant ainsi plus de temps pour pénétrer dans le sol. D'un autre côté, le feuillage protège le sol en diminuant l'effet de battance pendant que le système racinaire améliore la perméabilité du sol.
- la pente agit à l'opposé de la végétation. En effet, une forte pente favorise les écoulements au dépend de l'infiltration.
- l'humidité du sol est un facteur essentiel du régime d'infiltration, car les forces de succion sont aussi fonction du taux d'humidité du sol.

VIII.4.2 Estimation de la recharge

L'estimation de la recharge demeure toujours un exercice difficile et indispensable pour une gestion rationnelle des ressources en eaux souterraines surtout dans les régions arides à semi-arides. Dans le cadre de cette étude, nous tenterons d'estimer la recharge en utilisant différentes méthodes telles que le bilan hydrique, les fluctuations piézométriques et les méthodes chimiques en l'occurrence celle du bilan des chlorures.

VIII.4.2.1 La méthode du bilan hydrique

La recharge via les précipitations s'appuie sur un bilan hydrologique qui vise à établir la relation entre les entrées et les sorties en eau d'une unité hydrologique définie pendant un temps donné. L'équation du bilan se définit comme suit :

$$P = I + R + ETR + \Delta S \quad (20)$$

Avec :

P : précipitation (mm)

I : infiltration (mm)

R : ruissellement (mm)

ETR : évapotranspiration réelle (mm)

ΔS : variation de stock

VIII.4.2.2 Méthodes des fluctuations piézométriques

La méthode consiste à identifier l'infiltration par l'analyse des variations piézométriques des nappes. On considère qu'à un régime permanent de pluie, correspond un régime permanent du niveau de la nappe et de son débit, et que toute variation du régime pluviométrique entraîne une variation du régime de la nappe (Degallier R. et Joseph C., 1970). Cet indicateur de la recharge signifie que la remontée du niveau d'une nappe est sous la dépendance unique de la pluviosité annuelle. Plusieurs auteurs ont eu à travailler sur l'élaboration de cette méthode. C'est ainsi que certaines formules furent établies. Nous verrons plus en détail les différentes formules utilisées ((Healy & Cook, 2002), (Hubert.M, 1922) et (Gaget, 1957)).

La nappe des sables du quaternaire, dans sa bande dunaire entre Mboro et Lompoul, a fait l'objet d'un suivi piézométrique mensuel par GCO depuis 2007.

VIII.4.2.2.1 La méthode de Healy et Cook (2002)

La hauteur d'eau dans les piézomètres de la zone d'étude est mesurée à des intervalles de temps réguliers. L'analyse des données permet de suivre l'évolution du niveau de la nappe. Elle permet aussi de distinguer la période de recharge par rapport à la période pluvieuse. La recharge est donnée par la formule suivante :

$$r = n_{eff} \times \Delta h \quad (21)$$

Avec :

r = la recharge entre les instants t_i et t_f

n_{eff} =porosité efficace des formations

$\Delta h = |h_i - h_f|$, correspond à la variation du niveau piézométrique

Les difficultés de la méthode se situent dans la détermination d'une valeur représentative de la porosité efficace ou de drainage, dans l'hypothèse que les fluctuations de niveau ne sont causées que par la recharge. La formation de la nappe du Quaternaire est sableuse et sa porosité efficace varie entre 20 et 28% (Meynink, 2007). La valeur moyenne de 24% pour la porosité de drainage a été choisie.

VIII.4.2.2.2 La méthode d'Hubert (1922)

Elle a été appliquée, pour la première fois, au Sénégal par l'auteur lui-même sur la nappe des sables infra basaltiques de la région de Dakar. Son analyse avait porté sur l'observation des amplitudes de crue de la nappe, pendant une dizaine d'années (entre 1912 et 1922), qu'il a plotées sur un graphique arithmétique avec en abscisses les hauteurs annuelles de précipitations et en ordonnées les amplitudes de crue de la nappe. Il obtint une droite qui coupe l'axe des abscisses au point 250 mm (Gaye C.B., 1990) : c'est le seuil d'Hubert (S_H).

La même démarche a été suivie pour déterminer le seuil d'Hubert dans la zone d'étude.

VIII.4.2.2.3 La méthode de Gaget (1957)

Cette méthode de Gaget (1957) peut être considérée comme une suite de celle d'Hubert. En effet, pour l'estimation de la recharge, Gaget a établi, comme suit, une corrélation entre la fluctuation des niveaux de la nappe (ΔH), la pluie en saison humide et les prélèvements de la nappe en saison sèche :

- En période humide (mi-juillet - fin Septembre), c'est la remontée (ΔH) :

$$\Delta H = \frac{1}{n_e} \times \left[\left(P - \frac{Q}{S} \right) - E \right] \quad (22)$$

- En période sèche (octobre – mi-juillet), $P = 0$; c'est la baisse de la nappe (ΔH) :

$$\Delta H = -\frac{1}{n_e} \times \left(\frac{Q}{S} + E \right) \quad (23)$$

Avec :

ΔH = variation du niveau moyen de la nappe ;

P = hauteur de pluie moyenne sur le bassin versant ;

n_e = porosité efficace ;

Q = débit d'exploitation ;

S = surface du bassin versant ;

E = lame d'eau évaporée.

A chaque saison est associée sa courbe correspondante :

- En saison sèche la droite ΔH en fonction de Q/S aura pour pente la porosité et l'ordonnée à l'origine représentera la reprise évaporatoire.
- En saison des pluies, la droite obtenue sera tracée à partir du système d'axe, ΔH comme l'ordonnée et $P-Q/S$ l'abscisse. La pente restera toujours la porosité et l'ordonnée à l'origine représentera la reprise évaporatoire.
- Le « Seuil », correspondra à la valeur de l'abscisse quand l'ordonnée est nulle (Degallier, 1960). C'est la valeur de la hauteur des pluies en dessous de laquelle la remontée du niveau des nappes est nulle.

Cette approche de Gaget (1957) peut être grossièrement estimée dans notre zone d'étude qui est aussi bien minière qu'agricole. En effet même si les prélèvements industriels sont assez précis, ceux de l'irrigation sont par contre estimés sur la base moyenne de 6 litres d'eau /m²/ jour de surface emblavée (CDH, 1983).

VIII.4.2.3 La méthode du bilan des chlorures

L'utilisation de cette méthode est très répandue pour l'estimation de la recharge en zone aride et semi-aride. Plusieurs auteurs l'ont approuvé (Allison & Hughes, 1983; Gaye C.B., 1990; Tandia, 1990; Edmunds & Gaye, 1994).

L'importance de cette méthode réside dans la grande solubilité des chlorures. Puisqu'ils sont déposés au sol principalement par les pluies, ils sont alors facilement transportés en profondeur par le biais de l'infiltration. Ils sont ainsi considérés comme d'excellents traceurs conservatifs du mouvement de l'eau. En supposant que la quantité de chlorure issue des précipitations est égale à celle de la zone non saturée, nous aboutissons à la relation suivante :

$$P \times C_P = r \times C_R \quad (24)$$

Avec :

P = hauteur moyenne de précipitation (mm)

C_P = teneur moyenne en chlorure dans les pluies (mg/l)

r = recharge moyenne (mm)

C_R = teneur moyenne en chlorure de la zone stationnaire des profils de zone non saturée (mg/l).

En effet la concentration en chlorure de la zone racinaire (jusqu'à 3 à 4 m de profondeur) est très variable à cause de l'influence du système racinaire des plantes. C'est la raison pour laquelle seule, la teneur moyenne de la zone stationnaire est considérée. La recharge sera donnée par la formule ci-dessous :

$$r = \frac{C_P}{C_R} \times P \quad (25)$$

Cette méthode d'estimation est applicable si un certain nombre de conditions sont réunies :

- la première est que les chlorures doivent exclusivement provenir des pluies, et que cette dernière aussi constitue la seule source de recharge de la nappe ;
- les apports provenant des diverses activités humaines doivent être négligés (Dettinger, 1989);
- la courbe profondeur en fonction de la teneur en chlorure doit montrer une certaine stationnarité ce qui permettra de déterminer C_R ;
- le ruissellement négligé.

VIII.5 Modélisation

VIII.5.1 Principe de la modélisation

La modélisation peut être définie par une représentation simplifiée d'un système ou d'un processus réel. Cette représentation est faite par l'utilisation d'un outil informatique de simulation appelé code. Depuis les années 1980, ces modèles informatiques de simulation déterministes se développent et sont utilisés pour l'analyse des écoulements et des transports de masse dans les systèmes aquifères. Ce sont des modèles mathématiques abstraits qui assimilent les processus à des équations, les propriétés physiques à des constantes ou des coefficients intervenant dans ces équations, et les mesures de l'état du système à des variables (Konikow L.F., 2008).

Les modèles hydrogéologiques sont aujourd'hui des outils courants de gestion et de planification des ressources en eau, d'autant plus efficaces que les données disponibles sur la géométrie du réservoir, les conditions aux limites et les paramètres structuraux du système aquifère, sont nombreux (Zammouri & Besbes, 1994). Leur avantage consiste à intégrer toutes les données disponibles, d'approximer de façon logique et fiable les données manquantes et de fournir une réponse globale montrant les tendances de la nappe en régime transitoire (Dassargues, 1995). Ils sont basés sur des lois d'écoulement en milieu poreux utilisant comme paramètres, la perméabilité, le coefficient d'emménagement et des coefficients d'infiltration. Les relations phénoménologiques définissant cet écoulement peuvent être décrites par quatre équations (De Marsily, 1986):

- Equation de la continuité : $div(\rho U) + \frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \rho q = 0$ (26)

- La loi de Darcy : $U = -\frac{k}{\mu} [grad p + \rho g \cdot grad z]$ (27)

- L'équation d'état isotherme du fluide : $\rho = \rho_0 e^{\beta(p-p_0)}$ (28)

- L'équation de compaction de la matrice poreuse : $w = w_0 e^{\frac{\alpha}{\omega}(p-p_0)}$ (29)

Avec :

ρ : masse volumique de l'eau (ML^{-3})

U : vitesse de filtration de l'eau (LT^{-1})

ω : porosité totale (%)

q : débit prélevé ou apporté

k : tenseur de perméabilité intrinsèque (L^2)

μ : viscosité dynamique ($ML^{-1} T^{-1}$)

p : pression de l'eau ($ML^{-1} T^{-2}$)

$grad z$: vecteur de composantes (0, 0, 1)

h : charge piézométrique (L)

P_0 : pression à l'origine de l'axe z ($ML^{-1} T^{-2}$)

β : coefficient de compressibilité de l'eau ($M^{-1} LT^2$)

α : coefficient de compressibilité de la matrice poreuse

VIII.5.2 Equations de base de la modélisation

Les équations fondamentales permettant la modélisation des écoulements d'eau souterraine résultent de :

1. La loi de conservation du moment, dont la loi de Darcy pour un milieu poreux s'exprime ainsi :

$$q = -K \frac{\partial h}{\partial x} \quad (30)$$

Avec :

q : Flux volumique ;
 K : Perméabilité de Darcy ;
 h : Charge hydraulique.

2. L'équation de diffusivité qui exprime la conservation de la masse :

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} = S_s \frac{\partial h}{\partial t} + w(x, y, t) \quad (31)$$

Avec :

- q_x, q_y, q_z : Flux entrant ou sortant à travers la maille ;
- h : Charge hydraulique ;
- S_s : Coefficient d'emmagasinement spécifique ;
- t : Temps ;
- W : Terme d'échange infiltration/drainance.

La combinaison des expressions (30) et (31) $q = -K \frac{\partial h}{\partial x}$ conduit à l'équation d'écoulement tridimensionnel aux dérivées partielles dans un milieu poreux. C'est l'équation fondamentale du mouvement qui s'écrit comme suit :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (32)$$

Avec :

K_{xx}, K_{yy}, K_{zz} : Perméabilités selon les trois directions de l'espace (x, y, z) ;
 h : Charge hydraulique ;
 S_s : Coefficient d'emmagasinement spécifique du milieu poreux ;
 t : Temps ;
 W : Flux d'échanges verticaux par unité de volume.

Cette équation de diffusivité est l'expression de l'équation de continuité qui traduit le bilan hydrique dans un système.

Deux régimes sont déterminés à partir de l'expression de la variation de la charge hydraulique en fonction du temps $\left(\frac{\partial h}{\partial t} \right)$

- un régime permanent si $(\frac{\partial h}{\partial t}) = 0$ (h est considéré constante)
- un régime transitoire si $(\frac{\partial h}{\partial t}) \neq 0$ (h varie en fonction du temps).

La résolution de l'équation, qui n'est valable qu'à l'intérieur du domaine d'écoulement, nécessite la connaissance des conditions aux limites de la zone d'étude. C'est ainsi qu'on distingue :

- les conditions de Dirichlet où la charge constante h est imposée ;
- les conditions de Neumann où le flux constant imposé est $(\frac{\partial h}{\partial n})$;
- les conditions de Fourier ou Mixte portant sur h et $\frac{\partial h}{\partial n} h + \alpha \frac{\partial h}{\partial n}$ imposés.

VIII.5.3 Discrétisation de l'équation d'écoulement

L'équation aux dérivées partielles régit l'écoulement et sa solution exacte est une fonction continue. Par contre, les ordinateurs eux, ne connaissent que le fini et le discret (valeur approchée). Alors pour passer d'un problème exact au problème approché, on fait appel aux méthodes et techniques numériques concurrentes de différences finies (ex : Modflow) ou d'éléments finis (ex : Feflow). Les équations aux dérivées partielles sont transformées en un système d'équations algébriques dont les inconnues sont les charges hydrauliques.

VIII.5.3.1 Comparaison des méthodes de différences finies et d'éléments finis

Chacune de ces méthodes correspond à une formulation différente des équations de la physique :

- équilibre des forces en chaque point pour les différences finies ;
- minimisation de l'énergie ou principe des travaux virtuels pour les éléments finis (Saiac J.H., 2006).

La méthode des différences finies consiste à remplacer les dérivées apparaissant dans le problème continu par des différences divisées (quotient de différence pour le temps et pour l'espace). Son avantage, c'est sa grande simplicité d'écriture et son faible coût de calcul. Ses inconvénients sont la limitation de la géométrie des domaines de calculs et les difficultés de prise en compte des conditions aux limites. Le code le plus utilisé pour l'application de cette méthode est MODFLOW. La plupart des modèles hydrogéologiques antérieurs ont été réalisés en utilisant ce code à l'exception du modèle de Pernel et Gageonnet (1992). Ses inconvénients sont la complexité de mise en œuvre, le temps de calcul et de mémoire nécessaires. Dans beaucoup d'exploitations minières, le code MODFLOW utilise pour la modélisation donne d'excellents résultats. C'est le cas surtout des mines souterraines ou des mines à ciel ouvert tel que la mine de charbon de Godavari Valley en Inde, exploitée par Singareni Collieries Company (Surinaidu et al, 2017). La calibration de ce modèle avait donné des erreurs quadratiques normalisées de moins de 5%.

Pour la méthode des éléments finis (MEF), les équations aux dérivées partielles se retrouvent transformées en équations algébriques alors que le domaine géométrique est discrétisé (subdivisé) en un assemblage d'éléments de géométrie simple (éléments finis) interconnectés en des points (nœuds). Les avantages de cette méthode sont le traitement possible de géométries complexes et une prise en compte simple et systématique des conditions aux limites quelle que soit la forme du domaine.

Dans le cadre de cette étude, la modélisation va comporter une partie fondamentale et qui est la zone d'exploitation minière de GCO. Au vu de la complexité du domaine et du processus minier de GCO à modéliser, de la tortuosité des passes minières, des quantités importantes de données et variables à intégrer, un code basé sur la méthode des éléments finis semble le plus approprié. Ainsi, le code Feflow qui est un modèle mathématique numérique développé sur la base de cette technique a été choisi. Ce code devient de plus en plus utilisé dans le domaine des exploitations minières et particulièrement dans le cas des sables minéralisés. On peut citer en exemple la mine de Cuivre de l'Arizona aux USA qui révisé périodiquement le modèle d'exploitation de la mine élaboré sous le code Feflow qui donne une bonne restitution de la piézométrie (Sinton, Wingle, & Bartlett, 2015). C'est aussi le cas d'exploitation de sables minéralisés de Stradbroke Island en Australie (Consolidated Rulite Limited, 2010).

VIII.5.3.2 Approximation de l'équation d'écoulement par le code FeFlow

La coupe longitudinale ci-dessous, illustre les deux cas de figure qui peuvent se présenter suivant une nappe libre ou captive (FIGURE 33):

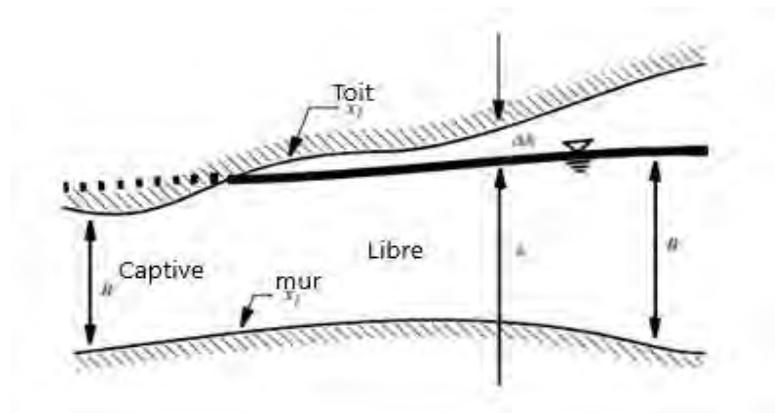


Figure 33 : Coupe longitudinale d'un aquifère en condition libre et captive (Diersch H.-J.G., 2005)

En nappe libre, l'algorithme utilisé par Feflow est le suivant (Diersch H.-J.G., 2005) :

$$(S_0B + \varepsilon_e) \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial \bar{q}_i^f}{\partial x_i} = \bar{Q}_p \quad (33)$$

$$\bar{q}_i^f = -BK_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j} \quad (34)$$

Où $S = S_0B + \varepsilon_e$ est le coefficient d'emménagement effectif

avec :

S_0 est le coefficient d'emménagement spécifique ;

$B = h - x_l^{bottom}$, épaisseur de l'aquifère

$\varepsilon_e = \varepsilon\xi$, $0 \leq \xi \leq 1$, est la porosité effective (de remplissage ou de drainage)

Pour un aquifère captif, $\xi = 0$, ces équations précédentes deviennent alors approximativement :

$$(S_0B) \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial \bar{q}_i^f}{\partial x_i} = \bar{Q}_P \quad (35)$$

$$\bar{q}_i^f = -T_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j} \quad (36)$$

L'épaisseur de l'aquifère B pour la nappe captive est :

$$B = x_l^{top} - x_l^{bottom}$$

La transition entre aquifère libre et captif est automatiquement réalisée en fonction du niveau piézométrique qui est fonction du toit et du mur de l'aquifère.

Le calcul du coefficient d'emménagement effectif S dans la zone de transition (entre la partie libre et captive) est donné par la relation :

$$S = S_0B + \varepsilon_e(1 - \tau) \quad (37)$$

$$\tau = \frac{1}{\pi} \operatorname{atan}\left(\frac{-\Delta h}{\sigma}\right) + 1/2$$

Où $\Delta h = x_l^{top} - h$ est la différence entre le toit de l'aquifère et le niveau de l'eau et $\sigma \approx 10^{-3}$ représente un paramètre de lissage donné.

Les équations des conditions limites se présentent comme suit :

- 1ere condition limite (type Dirichlet) :

$$h(x_i, t) = h_1^R(T) \text{ sur } \tau_1 \times t [0, \infty) \quad (38)$$

- 2° condition limite (type Neumann) pour 2D horizontal en nappe libre :

$$q_{n_h}(x_i, t) = q_h^R(t) = -K_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j} n_i, \text{ sur } \tau_2 \times t [0, \infty) \quad (39)$$

- 3^e condition limite (type Cauchy) pour 3D et 2D vertical en nappe libre :

$$q_{nh}(x_i, t) = \Phi_h(h_2^R - h) \text{ sur } \tau_3 \text{ x } t[0, \infty) \quad (40)$$

- 4^e condition limite (type puits unique)

$$Q_p^W(x_i, t) = \sum_m Q_m \prod_i \{ \delta(x_i - x_i^m) \} \text{ pour } \forall (x_i, x_i^m) \in \Omega \quad (41)$$

Pour que les conditions de surface libre soient satisfaites en même temps, il faut :

$$(P_0 - \varepsilon_e \frac{\partial h}{\partial t}) n_l = -q_{nh} \text{ Et } h = x_l \text{ sur } \tau_4 \text{ x } t[0, \infty) \quad (42)$$

Avec :

Dimensions de l'aquifère

B = Epaisseur de l'aquifère (m)

x = élévation

Propriétés du Solide

K_{ij} = perméabilité horizontale et verticale (m/j)

T_{ij} = Transmissivité Horizontale et verticale

ε = Porosité efficace

Propriétés du fluide

h_1^r, h_2^r = valeurs de niveau hydraulique présentent aux limites (toit et mur)

q_{nh} = flux de Darcy normal du fluide (positive sortant)

\bar{q}_{nh} = flux de Darcy normal moyen verticalement (positive sortant)

q_h^R, \bar{q}_h^R = flux normal prescrit aux limites (3D ou 2D horizontal)

$\phi_h, \bar{\phi}_h$ = coefficient de transfert du fluide (paramètre de fuite) (3D ou 2D)

$\phi_h^{in}, \phi_h^{out}$ = coefficient directionnel du transfert interne et externe (3D)

$\bar{\phi}_h^{in}, \bar{\phi}_h^{out}$ = coefficient directionnel du transfert interne et externe (2D horizontal)

Q_p^w = fonction du puits

Q_m^w = débit de pompage/d'injection du puits m

x_i^m = coordonnée du puits m

P_0 = recharge de la nappe (débit d'infiltration)

N_i = vecteur unité normal.

VIII.5.4 Calage et la validation du modèle

Le calage ou la calibration du modèle est une procédure consistant à ajuster les données d'entrée dans le but de minimiser la différence entre les mesures de terrain et les résultats du modèle. Dans le cas des modèles d'écoulement tel notre cas d'étude, la vérification de la fiabilité du modèle porte généralement sur la comparaison entre la piézométrie observée d'un état de référence et celle calculée par le modèle. Une fois le modèle « calé », on va l'utiliser avec les paramètres issus du calage à une autre situation avec d'autres données d'observation. La comparaison entre le modèle et la réalité du terrain permet alors de valider ou non le modèle. Pour cette étude, le calage est obtenu par méthode manuelle et aussi par l'utilisation de FePEST, un module de calibration automatique intégré dans les dernières versions de FeFLOW (7.0 et 7.1).

L'évaluation du calage du modèle s'est faite à partir des paramètres suivants :

- **Residual Mean** ou moyenne des écarts (\bar{R}) qui est une mesure de la valeur moyenne des erreurs de calibration définie par l'équation :

$$\bar{R} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_i \quad , \text{ avec} \quad (43)$$

- n = le nombre de piézomètres observés
- R_i = Ecart de calibration définie par $(X_{\text{model},i} - X_{\text{obs},i})$, représentant la différence entre le niveau d'eau calculé (X_{model}) par le modèle et le niveau d'eau observé (X_{obs}) sur le terrain.

- **Standard Error of the Estimate (SEE)** ou écart-type des erreurs (m) estimées ; il est exprimé par l'équation :

$$SEE = S_y \sqrt{1 - r_{yx}^2} \quad , \text{ avec} \quad (44)$$

- S_y = écart type des valeurs calculées
- r_{yx}^2 = carré du coefficient de corrélation de Pearson entre les valeurs calculées (y) et les valeurs observées (x).

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (45)$$

- **Absolute Residual Mean ($|\bar{R}|$)** ou moyenne de la valeur absolue des écarts (m). Sa formule s'écrit comme suit :

$$|\bar{R}| = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |R_i| \quad (46)$$

- **Root Mean Squared Error (RMSE)** ou Racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (m) est exprimée par l'équation :

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n R_i^2}{n}} \quad (47)$$

- **Normalized Root Mean Squared Error (NRMSE)** ou Racine carrée de l'erreur quadratique moyenne normalisée (%) est définie par l'équation :

$$NRMSE = \frac{RMSE}{(X_{obs})_{max} - (X_{obs})_{min}} \quad (48)$$

La NRMSE est le paramètre le plus représentatif de l'ajustement du modèle et sa valeur doit être inférieure à 10% pour un bon calage (Leblanc, 1999).

VIII.5.5 Sensibilité du modèle

L'analyse de la sensibilité des paramètres d'un modèle est une opération indispensable. Cette analyse a pour but de montrer l'influence des variations de chacun des éléments du calage sur la piézométrie.

Conclusion partielle

Dans cette partie les différentes méthodes et outils utilisés ont été présentés et justifiés. La collecte de données et d'informations qui a constitué la première étape de cette phase d'étude a permis de faire l'état des lieux, de mieux cerner la problématique et de concevoir la méthodologie et les outils appropriés pour répondre aux questionnements.

Les travaux de terrain ont concerné l'implantation de piézomètres, la réalisation de sondages à la tarière dans la zone non saturée, le suivi piézométrique et les pompages d'essai. L'ensemble des informations obtenues ont été soit interprétées directement ou analysées aux différents laboratoires d'hydrochimie et d'isotopie. Le résultat obtenu des travaux de terrain et des analyses au laboratoire a permis une meilleure compréhension des variations piézométrique, l'estimation de la recharge et les caractérisations hydrochimique et hydrodynamique des nappes du Quaternaire et du Maastrichtien de la zone d'étude.

Le modèle hydrogéologique de la zone d'exploitation minière a été construit à l'aide du logiciel FEFLOW pour mieux comprendre le comportement hydrodynamique de la nappe face aux variations climatiques et surtout aux conditions d'exploitation des sables minéralisés par la compagnie Grande Côte Operations. L'essentiel des informations obtenues des investigations piézométriques, hydrodynamiques et des paramètres miniers ont constitué de données d'entrée ou des conditions aux limites au modèle hydrogéologique d'exploitation des sables minéralisés du Littoral Nord. Les prévisions à l'horizon 2025 du comportement de la nappe du LN et son bilan hydrique sera basé sur les résultats du modèle.

TROISIEME PARTIE

HYDROGEOLOGIE AUTOUR DE LA MINE DE GCO

Introduction

Le système d'exploitation des ressources en eau souterraine par la compagnie Grande Côte Operations (GCO) dans la zone du Littoral continue de susciter de nombreuses questions parmi lesquelles :

- les ressources en eaux souterraines seraient-elles en mesure d'assurer la durabilité de l'exploitation minière ?
- quelle serait la future piézométrie de la NSQ du Littoral Nord ?
- quelles seront les conséquences de l'exploitation minière sur les ressources en eau d'irrigation ?
- les périmètres maraichers qui jalonnent la mine risquent-ils d'être inondés par les eaux d'infiltration des terrils ?

A celles-ci, s'ajoute le questionnement exprimé par les populations par rapport à la qualité future des eaux de la nappe supérieure.

En effet, le système d'exploitation des ressources minérales de la grande côte, repose d'une part, sur un recyclage des infiltrations des eaux des terrils vers le bassin et d'autre part, sur un appoint assuré par des prélèvements sur la nappe profonde maastrichtienne. Au vu des grandes quantités d'eaux de plusieurs milliers de mètres cubes mobilisés, un lien étroit et très important existe entre la mine de GCO et l'aquifère quaternaire lui-même. Cette nouvelle situation n'a pas été prise en compte dans les modèles hydrogéologiques existants car l'exploitation n'était pas planifiée ou la méthode d'extraction méconnue, à l'époque, par les planificateurs nationaux.

Dans cette partie, on identifiera de l'essentiel des ouvrages hydrauliques qui existent autour de la zone minière ainsi que leurs caractéristiques et celles des nappes Quaternaire et profonde, obtenues à partir des essais de pompage.

L'hydrodynamisme de la nappe face aux conditions d'exploitation minière, l'estimation de la recharge, la caractérisation chimique et l'estimation, par les isotopes lourds de l'eau, des taux d'évaporation ou des mélanges seront aussi abordés.

Chapitre IX. Mine de GCO

La compagnie GCO dispose d'un permis d'exploitation 445 km² le long de la bordure du Littoral Nord entre Kayar et Saint Louis. Elle exploite les sables riches en ilménite, zircon, rutile et leucoxène par la méthode de dragage qui nécessite des flux très importants d'eaux des nappes superficielle et profonde.

Le zircon est utilisé principalement comme réfractaire dans la fonderie et comme abrasif, mais aussi pour polir, émailler ou vitrifier du fait de sa faible réactivité et de son point de fusion élevé. Il est utilisé dans l'industrie électronique et dans l'industrie des réfractaires comme sable de fonderie et pour la fabrication de briques réfractaires. Il est aussi utilisé dans les industries chimiques (peinture), de textile et pharmaceutiques mais aussi dans la production de zirconium entrant dans les alliages spéciaux en substitution partielle du titane (alliage à haute performance anticorrosive).

L'ilménite est utilisée dans l'alimentation des usines en blanc de titane destiné à la peinture (49%), papier (13%), plastique (9.8%), caoutchouc (14%), mais aussi dans les hauts fourneaux pour renforcer les réfractaires. Ce minerai, quand il est broyé, peut servir de boue de forage. Par ailleurs, une très faible partie de l'ilménite peut être utilisée pour produire du titane métal.

La particularité de cette exploitation est qu'elle repose sur une méthode conventionnelle de dragage (une première au Sénégal) qui, en outre, entraîne une mobilisation assez importante des ressources en eau souterraine. Ce chapitre traitera de la méthode d'exploitation et ses interactions avec les eaux souterraines.

IX.1 Processus d'exploitation des sables de dunes

L'exploitation des sables minéralisés du Littoral comprend essentiellement les activités suivantes :

- l'extraction du minerai par dragage et la concentration des minéraux lourds par l'usine flottante ;
- la séparation ou l'enrichissement qui se fait à l'usine de séparation des différents minéraux : le zircon, l'ilménite, le leucoxène et le rutile.

La compagnie GCO a adopté la méthode de dragage pour l'exploitation des sables minéralisés de la grande Côte. Ce choix est principalement basé sur la disponibilité de l'eau sur les sites où la nappe permet de mettre en place un étang d'extraction en équilibre hydrostatique avec le niveau statique. Dans les dunes du Littoral Nord, en plus de ces conditions favorables, il existe une nappe profonde en mesure d'assurer la demande supplémentaire du bassin de dragage.

IX.1.1 Extraction et la concentration

Elle est assurée par une drague flottante d'une capacité nominale de 7000 t/h couplée à une usine flottante de pré-concentration, équipée d'un circuit de séparation par voie humide adjacent. La capacité nominale de traitement de ce dispositif est de 200 t/h de concentré de minéraux lourds. Un bassin de dragage de 500 mètres de long sur 250 mètres de large est creusé, ce qui crée un étang sur lequel flottent la drague et l'usine flottante. Le lac ainsi créé se déplace au fur et à mesure que le front d'extraction avance et les terrils déposés à l'arrière. La vitesse de déplacement de l'étang est de 4 à 5 km par an. La drague arrache le minerai du front d'extraction du bassin à l'aide d'un outil de coupe d'environ 3 m de diamètre, l'aspire sous forme de pulpe et le refoule vers l'usine de concentration à travers une conduite en caoutchouc de 1200 mm de diamètre (FIGURE 34). L'extraction se fait à une profondeur moyenne de 6 mètres en dessous de l'eau.



Figure 34 : Vue arrière de la drague (gauche) et vue connexion conduite usine flottante (droite)

La méthode d'extraction choisie par GCO est couramment utilisée dans des gisements similaires en Australie, en Afrique du Sud et ailleurs lorsque les conditions hydrogéologiques le permettent. Citons à titre d'exemple, Murray Bassin en Nouvelles Galles du Sud (Australie), Kwale Titanium Mineral Project au Kenya et la mine Richard's Bay Minerals (Afrique du Sud).

IX.1.2 Enrichissement

L'enrichissement est composé de deux étapes de séparation magnétique et électrostatique. Le procédé magnétique se passe à l'usine de séparation humide. Celui-ci est suivi d'une étape de filtration et de récupération d'eau à partir du produit magnétique riche en ilménite, avant sa mise en dépôt. C'est ainsi que l'ilménite sera séparée et récupérée pour être mis en dépôt pour futur enrichissement ou pour être traité en vue d'une valorisation commerciale.

Le procédé électrostatique se passe à l'usine de séparation par voie sèche, dans un circuit non magnétique. Il consiste à produire un concentré final riche en zircon. Il s'agit, dans un premier temps, de faire une seconde séparation qui permet de raffiner le concentré à 95% de minéraux lourds.

Les étapes de séparation magnétique et électrostatique donnent les produits marchands : ilménite, zircon, rutile et leucoxène.

IX.2 Flux d'eaux engendrés par le type d'extraction par voie humide

Elle consiste à extraire le minerai par aspiration et refoulement. Ce procédé nécessite l'utilisation d'une drague équipée d'une pompe capable d'aspirer le minerai sous forme de pulpe et le rejeter vers une usine flottante de concentration. Il s'y passe un important échange de flux d'eau (FIGURE 35).

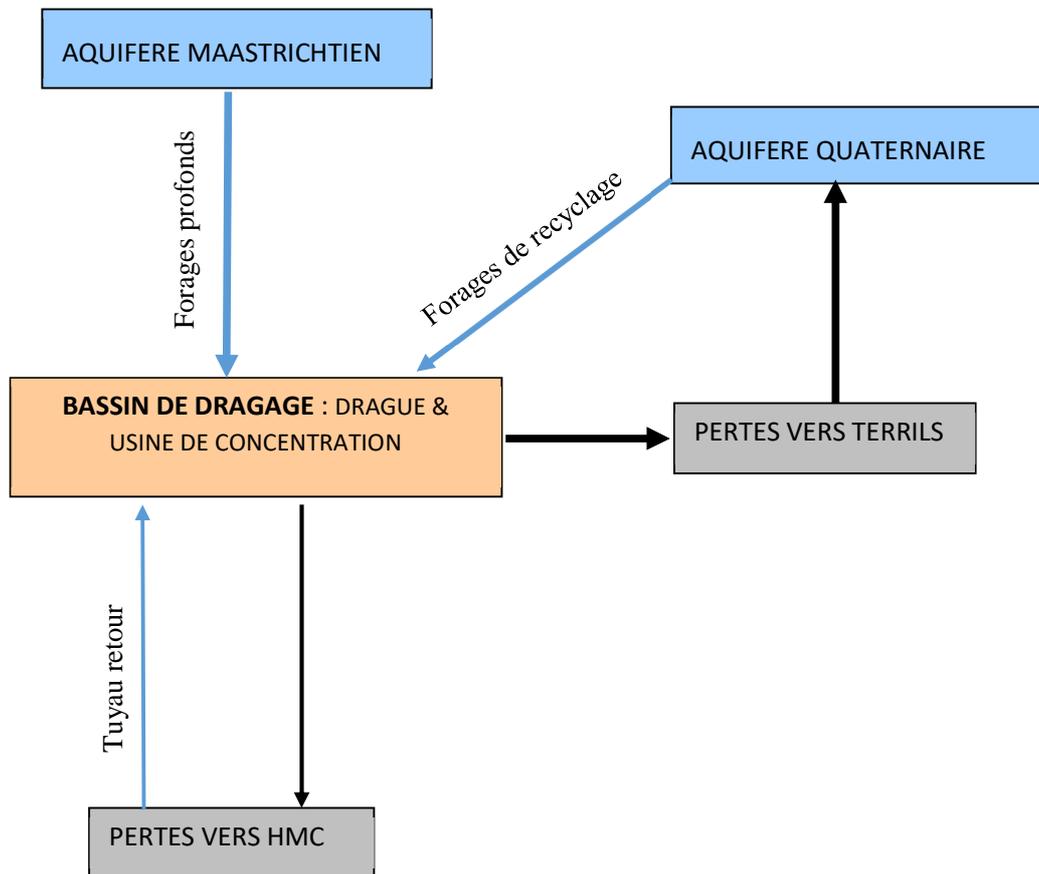


Figure 35 : Diagramme de flux d'eau à la mine (méthode voie humide)

L'extraction par voie humide a été choisie par la société GCO pour plusieurs raisons parmi lesquelles :

1. l'importance des volumes de minerai à exploiter ;
2. la localisation d'une bonne partie du gisement dans l'aquifère superficielle ;
3. le coût compétitif de l'extraction par dragage humide ;
4. la remise en état plus rapide et plus facile ;
5. la grande expérience de la société mère MDL dans le dragage.

A côté de ce type d'extraction, celle par voie sèche, en utilisant des camions et chargeuses, pourrait constituer une méthode alternative avec toutefois la contrainte de pompage à l'avance en vue de dénoyer le minerai comme le fait les ICS. Les eaux de pompage de la nappe serviraient aux besoins de traitement en humide sur les sites d'extraction mais du fait de la proximité de l'océan ; celle-ci constituerait un risque majeur d'accélération de l'intrusion marine.

IX.3 Dragage

La drague a une capacité nominale de pompage de 25000 m³/h. Elle flotte dans un bassin de dragage artificiel de 500 mètres de long sur 200 mètres de large. La drague aspire du sable minéralisé mélangé à de l'eau. Elle est reliée à l'usine de concentration par une conduite d'alimentation en pulpe dont le mélange est composé de 22% sable 78% d'eau en moyenne (FIGURE 36).

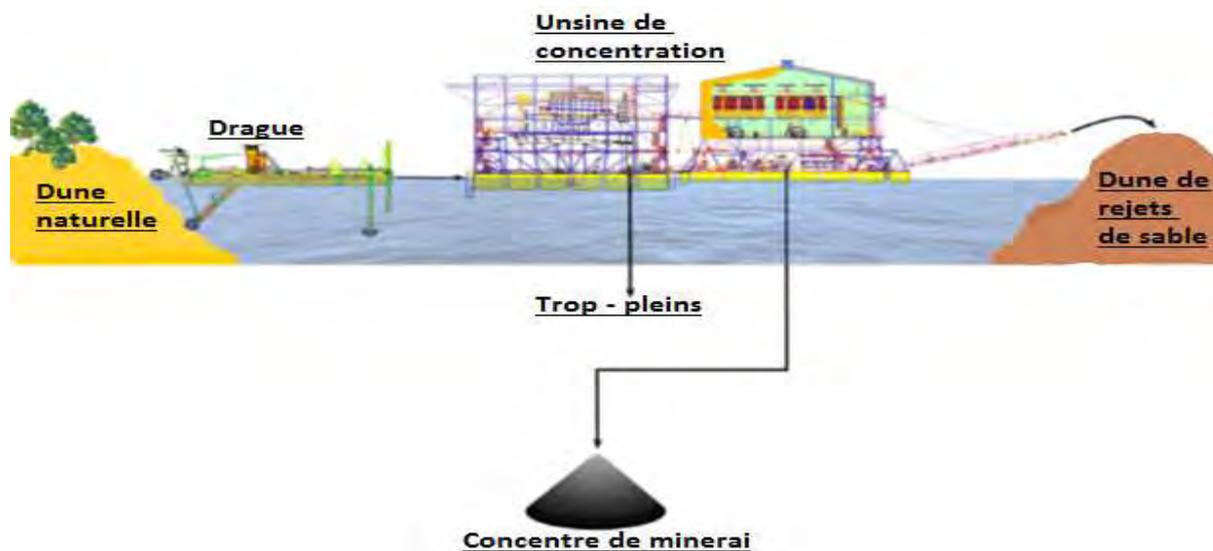


Figure 36 : Schéma type d'une exploitation de minéraux lourds par dragage, modifié (W. Herchenhorn et al, 2006)

IX.4 Bassin de dragage

Durant la première année, le niveau d'eau du bassin de dragage correspond au niveau statique (FIGURE 37). Les pertes du bassin sont essentiellement le volume aspire par la drague et l'évaporation. Par contre, durant les années suivantes, lorsque le niveau du bassin sera entre NS + 2 et + 3 m par rapport au niveau statique, les pertes du bassin deviendront plus importantes à travers ses parois. Dans tous les cas, il s'y ajoute le flux de transfert (entrant ou sortant « IN or OUT ») dépendant sensiblement du dépôt des fines dans le bassin qui résultent du processus de concentration et de densification.



Figure 37 : Vue aérienne du bassin de dragage de la mine de GCO

IX.5 Rejets de sable

L'usine concentre les minéraux lourds et les dépose en stocks par le biais d'une conduite. Les terrils ou rejets de sable sont déposés à l'arrière du bassin au fur et à mesure qu'il avance par une flèche gerbeuse sur une distance maximale de 120 m. Au-delà, ils sont transportés par des conduites de refoulement. Ils servent à la reconstruction progressive de la morphologie des dunes. Ces terrils, par leur saturation en eau, créent un dôme piézométrique mobile suivant derrière le bassin dans son cheminement. La crête varie suivant la hauteur des dépôts. Son gradient hydraulique est représenté par la pente qui existe entre le niveau statique et la cote du dôme. Tout naturellement, ce dôme a tendance à s'abaisser par le biais d'un écoulement latéral mais il est continuellement recréé par les dépôts d'autant plus que les opérations d'extraction du minerai et de dépôts des terrils se déroulent 7j/7j et 24h/24h. Les seuls arrêts sont justifiés par une panne ou une maintenance préventive. Les terrils sont rejetés à l'arrière du bassin après la concentration de minerais lourds, sous forme de pulpe composée de 65% solide et 35% d'eau.

IX.6 Forages de recyclage

Les forages superficiels de recyclage ont été réalisés pour parer au risque environnemental d'inondation des Niayes qui bordent la mine sous l'action d'importantes infiltrations en provenance des rejets de sables mais également pour recycler le maximum d'eau infiltrée. La première série composée de 48 forages de recyclage a été implantée parallèle et distante des dunes minéralisées de 100 m. La bande de 100 m constitue la zone tampon qui sépare le chemin minier des périmètres maraichers. Dans cette bande, l'aquifère est composé de sables fin à moyens qui se superposent sur des sables moyens à grossiers (Figure 38). Les forages sont très productifs avec un débit d'exploitation moyen de 100 m³/h. D'autres ont été ensuite implantés dans la bordure Ouest des deux premières passes minières. Ces forages de recyclage ou de régulation appelés « Containment bores » assurent un recyclage continu de l'eau dans le bassin de dragage. Ils permettent de maîtriser, entre autre le risque d'inondation des périmètres maraichers. Ainsi ils pompent à tour de rôle suivant un plan déterminé résultant de la simulation du modèle hydrodynamique.

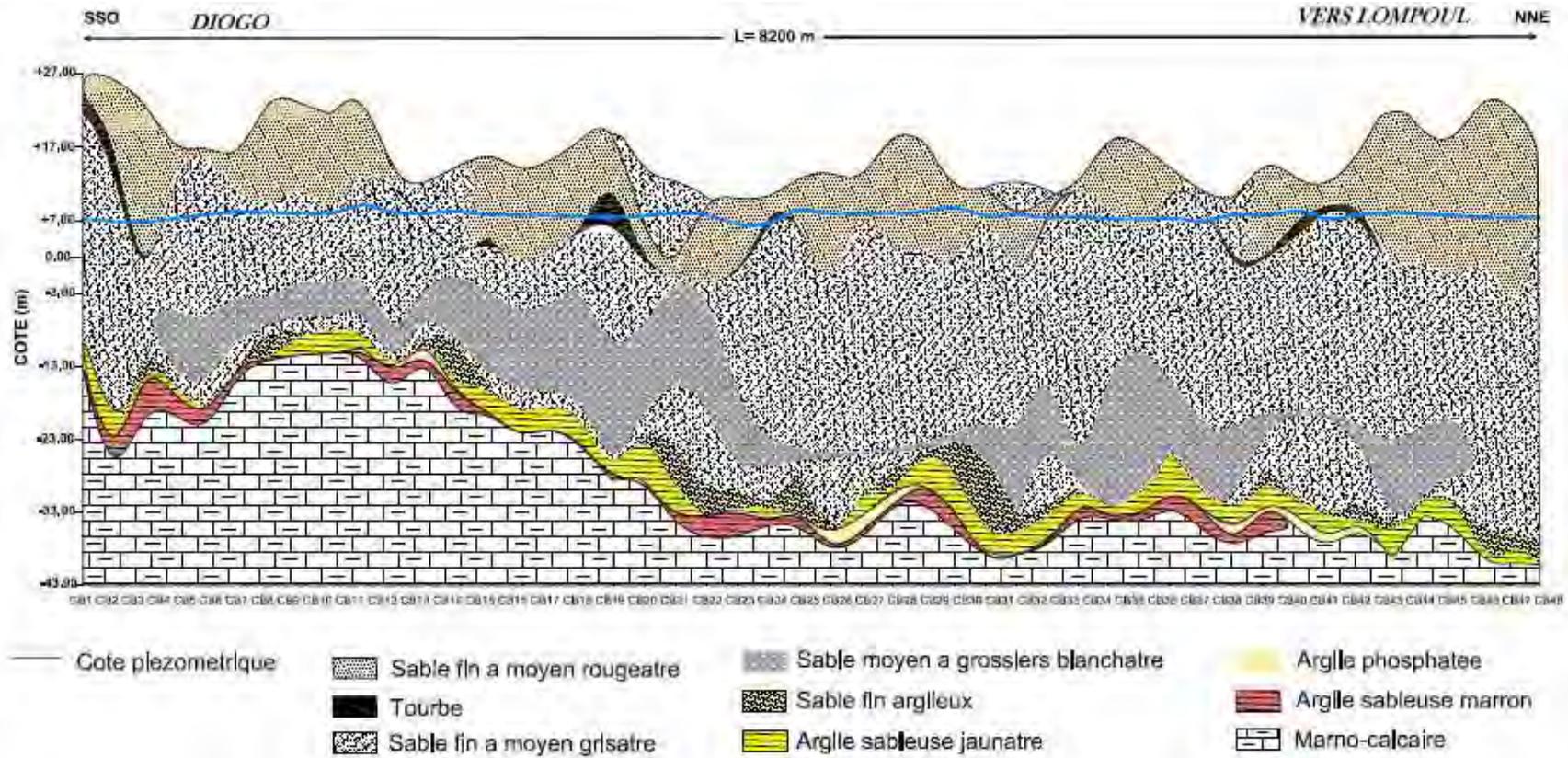


Figure 38 : Coupe hydrogéologique SSO – NNE du secteur de Diogo à la lisière des dunes de sables minéralisés

IX.7 Forages d'approvisionnement

Les forages d'approvisionnement au nombre de 11 pour la zone minière de Diogo, permettent de combler les différentes pertes d'eau du bassin de dragage dues à l'évapotranspiration et aux infiltrations. Ils captent la nappe profonde du Maastrichtien. Ils ont un espacement moyen de 1500 m et produisent un débit moyen de 200 m³/h chacun.

IX.8 Les grandes questions soulevées

Le procédé d'exploitation minière de GCO décrit ci-dessus, soulève un certain nombre de questions, à savoir :

- la prise en compte adéquate des nouveaux besoins de GCO les dix prochaines années ;
- les variations piézométriques futures prévues de la nappe des sables du Littoral Nord ;
- le système d'exploitation des ressources en eau profonde de la nappe maastrichtienne ;
- le système de drainage des eaux d'infiltration par les forages superficiels et leur réinjection dans le bassin de dragage ;
- l'estimation de l'évaporation résultante de l'ouverture du bassin de dragage ;
- l'exploitation de la nappe profonde dans une zone circonscrite ;
- le pompage du Littoral Nord dans le flanc Ouest du dôme piézométrique de la NQS ;
- le risque d'inondation des Niayes jouxtant les dunes minéralisées ;
- la problématique du risque de progression du biseau salé ;
- la question de la recharge.

Cette étude tentera de donner une réponse à toutes ces questions posées. Mais auparavant, une caractérisation hydrodynamique, hydrochimique et isotopique plus détaillée est nécessaire afin d'étoffer les données d'entrée du modèle hydrogéologique pour l'obtention de meilleurs résultats.

Chapitre X. Ouvrages et caractéristiques hydrauliques

X.1 Ouvrages captant la nappe des sables du quaternaire

X.1.1 Ouvrages de la phase test

X.1.1.1 Localisation des forages test

Les forages test ont été réalisés sur les passes minières 1 et 2 (PSB#). Chaque forage a été doté de trois piézomètres (PSB #-1, PSB #- 2, PSB #- 3). Ces piézomètres 1, 2 et 3 sont respectivement distants du forage de pompage concerné (PSB#) de 5, 10 et 15 m (FIGURE 39). L'architecture de ces forages est une coupe monolithique. Le diamètre est de 225 mm et la profondeur moyenne de 25 m.

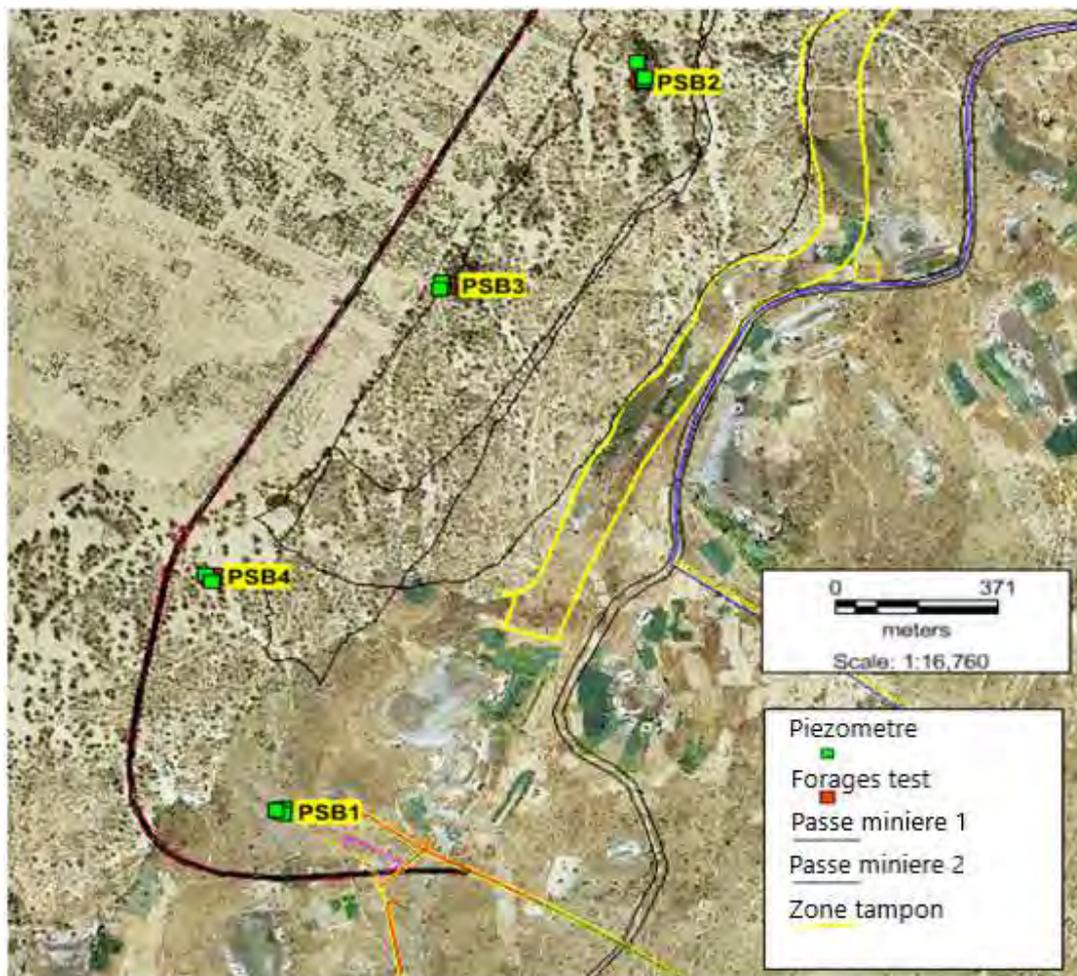


Figure 39 : Carte de localisation des forages et piézomètres de la zone pilote

Les forages/piézomètres tests sont tous implantés au niveau de la 1^{re} passe minière. Les niveaux statiques sont faibles variant entre 4 et 13 m par rapport au sol. Les niveaux piézométriques se trouvent entre 5.7 et 6.7 m (TABLEAU 8).

Tableau 8 : Données d'implantation des forages et piézomètres test

Forage/Piezo	X_UTM	Y_UTM	Côte TN (m)	Niveau d'eau / sol (m)	Côte d'eau (m)
PSB1	307726	1691112	11.17	4.44	6.73
PSB1-1	307727	1691117	11.16	4.43	6.73
PSB1-2	307729	1691102	11.21	4.48	6.73
PSB1-3	307711	1691114	11.17	4.44	6.73
PSB2	308542	1693035	16.54	10.79	5.75
PSB2-1	308544	1693039	16.44	10.60	5.84
PSB2-2	308533	1693088	16.52	10.60	5.92
PSB2-3	308549	1693048	16.28	10.46	5.82
PSB3	308095	1692497	14.52	8.51	6.01
PSB3-1	308094	1692493	14.64	8.60	6.04
PSB3-2	308088	1692504	14.71	8.69	6.02
PSB3-3	308085	1692486	15.03	8.95	6.08
PSB4	307563	1691731	18.37	12.49	5.88
PSB4-1	307562	1691726	18.39	12.35	6.04
PSB4-2	307552	1691731	18.05	12.03	6.02
PSB4-3	307563	1691716	19.02	12.95	6.07

X.1.1.2 Résultats des pompages d'essai

Le tableau ci-dessous (TABLEAU 9) affiche toutes les valeurs de paramètres hydrodynamiques obtenues à l'issu des pompages d'essai exercés dans la zone test de Diogo. Elles montrent une certaine homogénéité par groupe. Les forages PSB1 et PSB4 implantés au Sud, donnent des valeurs moyennes similaires de transmissivité de l'ordre 10^{-3} m²/s et de coefficient de perméabilité de l'ordre de 10^{-4} m/s ($T_{moy} = 5.4 \cdot 10^{-3}$ m²/s, $K_{moy} = 1.4 \cdot 10^{-4}$ m/s et $S_{moy} = 8 \cdot 10^{-4}$).

Les forages situés un peu plus au Nord PSB3 et PSB4 génèrent, eux aussi, des valeurs très proches avec une transmissivité $T_{moy} = 1.16 \cdot 10^{-2}$ m²/s et $K_{moy} = 2.5 \cdot 10^{-4}$ m/s. Le coefficient d'emmagasinement (S) varie dans les ordres de 10^{-2} à 10^{-4} avec une valeur moyenne de l'ordre de 10^{-3} .

Tableau 9: Les paramètres hydrodynamiques obtenus à l'issu des pompages d'essais

Forages test	Puits d'observation	Debit de pompage 'Q'	Rabattement max	Debit spécifique	Transmissivite 'T'	Permeabilite 'K'	Coefficient d'emmagasinement 'S'	Methode d'Analysis
		(m3/h)	(m)	(m3/h/m)	(m2/s)	(m/s)		
PSB1	-	73	7.99	9.1	6.06E-03	1.68E-04		Theis Recovery
	PSB1-1		2		6.03E-03	1.59E-04	2.44E-04	Cooper-Jacob
					4.55E-03	1.26E-04	5.04E-04	Neuman
					6.75E-03	1.88E-04		Theis Recovery
	PSB1-2		1.38		4.26E-03	1.18E-04	1.63E-03	Cooper-Jacob
					2.28E-03	6.37E-05	1.94E-03	Neuman
					4.34E-03	1.20E-04		Theis Recovery
	PSB1-3		1.21		6.41E-03	1.78E-04	4.84E-04	Cooper-Jacob
					4.55E-03	1.26E-04	4.33E-04	Neuman
					6.17E-03	1.71E-04		Theis Recovery
	Min				2.28E-03	6.37E-05	2.44E-04	
	Max				6.75E-03	1.88E-04	1.94E-03	
	Moy				5.14E-03	1.42E-04	8.73E-04	
PSB2	-	50	16.16	3.1	1.59E-02	3.97E-04	-	Theis Recovery
	PSB2-1		0.75		7.62E-03	1.90E-04	5.57E-04	Cooper-Jacob
					7.82E-03	1.96E-04	3.93E-03	Neuman
					6.98E-03	1.74E-04		Theis Recovery
	PSB2-2		0.74		1.64E-02	4.11E-04	3.91E-04	Cooper-Jacob
					7.82E-03	1.96E-04	5.73E-06	Neuman
					1.35E-02	3.39E-04		Theis Recovery
	PSB2-3		0.53		6.31E-03	1.57E-04	1.51E-03	Cooper-Jacob
					3.91E-03	9.80E-05	1.47E-03	Neuman
					1.15E-02	2.87E-04		Theis Recovery
	Min				3.91E-03	9.80E-05	5.73E-06	
	Max				1.64E-02	4.11E-04	3.93E-03	
	Moy				9.78E-03	2.44E-04	1.31E-03	
PSB3	-	40	15.5	2.6	1.29E-02	3.17E-04		Theis Recovery
	PSB3-1		0.51		6.78E-03	1.66E-04	1.44E-02	Cooper-Jacob
					3.52E-03	8.58E-05	1.57E-02	Neuman
					9.16E-03	2.23E-04		Theis Recovery
	PSB3-2		0.2		1.88E-02	4.59E-04		Cooper-Jacob
					1.24E-02	3.04E-04	1.08E-04	Neuman
					3.07E-02	7.49E-04		Theis Recovery
	PSB3-3		0.54		1.03E-02	2.51E-04	2.18E-04	Cooper-Jacob
					5.58E-03	1.35E-04	7.47E-04	Neuman
					6.41E-03	1.56E-04		Theis Recovery
	Min				3.52E-03	8.58E-05	1.08E-04	
	Max				3.07E-02	7.49E-04	1.57E-02	
	Moy				1.16E-02	2.85E-04	6.23E-03	
PSB4	-	45	9.2	4.9	5.74E-03	2.05E-04		Theis Recovery
	PSB4-1		1.24		4.51E-03	1.61E-04		Cooper-Jacob
					3.96E-03	1.41E-04	2.13E-03	Neuman
					3.06E-03	1.09E-04		Theis Recovery
	PSB4-2		0.77		8.76E-03	3.13E-04		Cooper-Jacob
					7.04E-03	2.51E-04	3.20E-04	Neuman
					9.29E-03	3.31E-04		Theis Recovery
	PSB4-3		0.84		4.79E-03	1.71E-04		Cooper-Jacob
					3.14E-03	1.12E-04	4.31E-05	Neuman
					4.32E-03	1.54E-04		Theis Recovery
	Min				3.06E-03	1.09E-04	4.31E-05	
	Max				9.29E-03	3.31E-04	2.13E-03	
	Moy				5.46E-03	1.95E-04	8.31E-04	

Cette distribution des paramètres hydrodynamique (T, K) met en exergue une légère variabilité géologique. Néanmoins les valeurs montrent une bonne perméabilité de la nappe qui est un paramètre d'entrée déterminant dans la modélisation. Par contre une bonne partie des valeurs d'emmagasinement inférieures à 10^{-3} ne reflètent pas celles

d'une nappe libre mais plutôt celles d'une nappe semi-captive. Ces difficultés d'estimation de valeurs du coefficient d'emmagasinement seraient dues aux nombreuses intercalations discontinues, silteuses et tourbeuses observées dans certains logs géologiques donnant ainsi à la nappe une configuration semi captive en certains endroits, le long de la bande juxtaposant les Niayes. En s'éloignant des dépressions marécageuses, vers l'Ouest, les couches argileuses et tourbeuse s'amincissent ou disparaissent.

L'interprétation des résultats de pompage du forage PSB1 avec observation sur PSB1-1 montre des transmissivités de l'ordre de 6.10^{-3} m²/s et un emmagasinement de 2.10^{-4} (FIGURE 40).

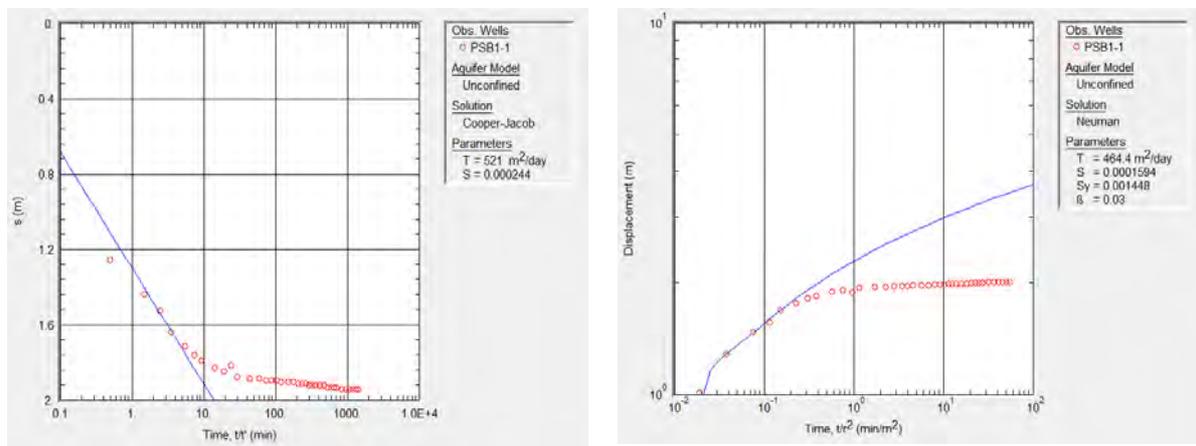


Figure 40 : Graph de de la courbe de remontée du piézomètre PSB1-1 interprétée selon Jacob-Cooper (gauche) et Neuman (droite)

X.1.2 Forages de recyclage de la mine

X.1.2.1 Implantation des forages de recyclage (« containment bores »)

La compagnie GCO a réalisé durant les deux 1^{ères} années d'exploitation, 48 forages superficiels de recyclage (CB) implantés 100 m à l'Est de la zone minière de DIOGO. A l'Ouest, 25 nouveaux forages sont ensuite réalisés pour la 3^{ème} passe minière. Les « containment bores » de la 1^{ère} cohorte ont permis de recycler une partie des eaux d'infiltration des rejets lors de l'exploitation des trois (03) premières passes minières. Ceux de l'Est ont commencé à fonctionner à l'entame de l'exploitation de cette dernière, partant du Sud vers le Nord (FIGURE 41).

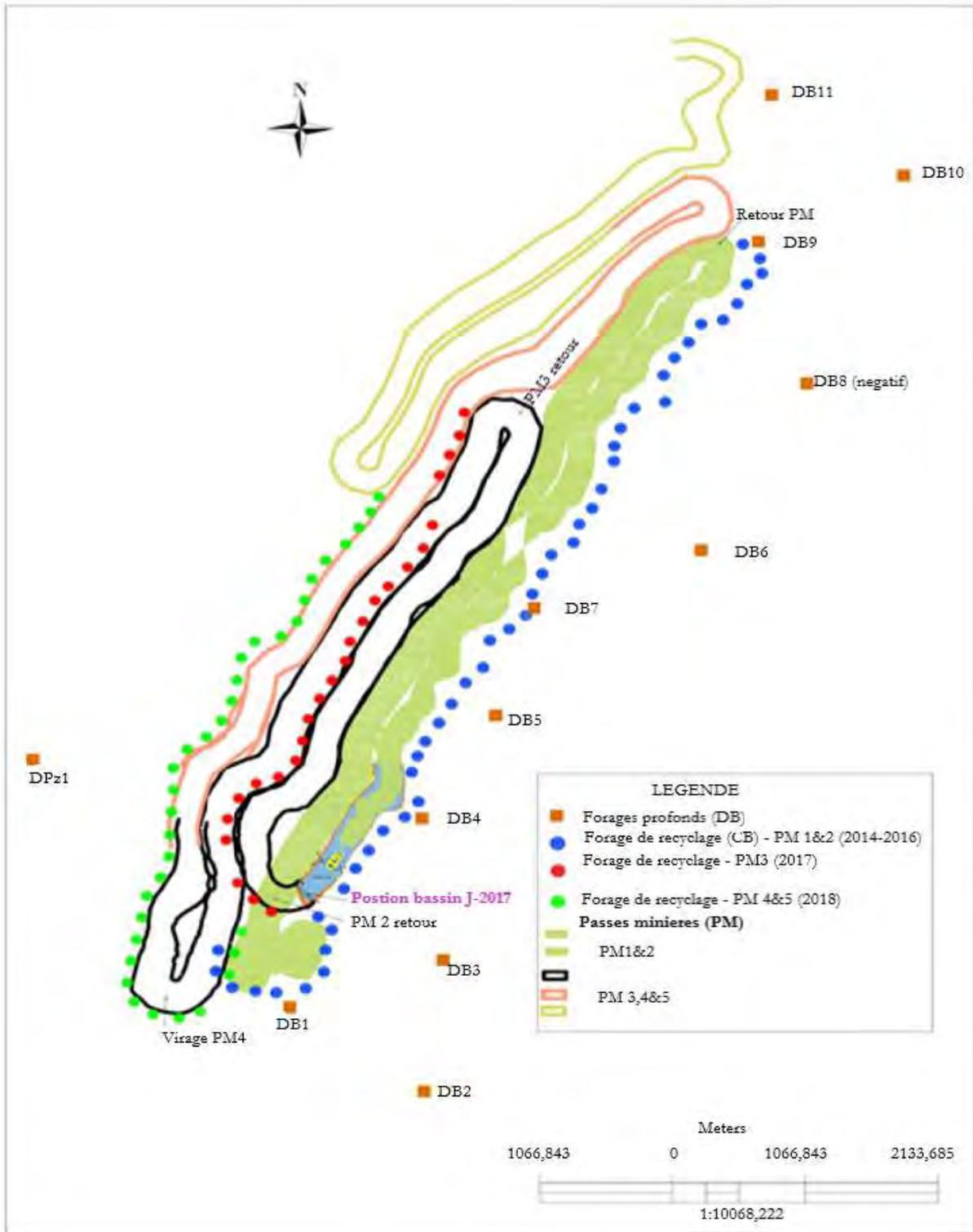


Figure 41 : Carte de localisation des forages de recyclages réalisés (ligne Est) et prévus (ligne Ouest)

X.1.2.2 Profil technique des forages de recyclage

Les forages de recyclage sont de type monolithique équipé en tube PVC de 10''. Les crépines de type fente continue ont une longueur de 9 m et une fente (slot) de 0.75 mm. En exemple, ci-dessous est illustrée la coupe technique et lithologique du forage CB05 (FIGURE 42).

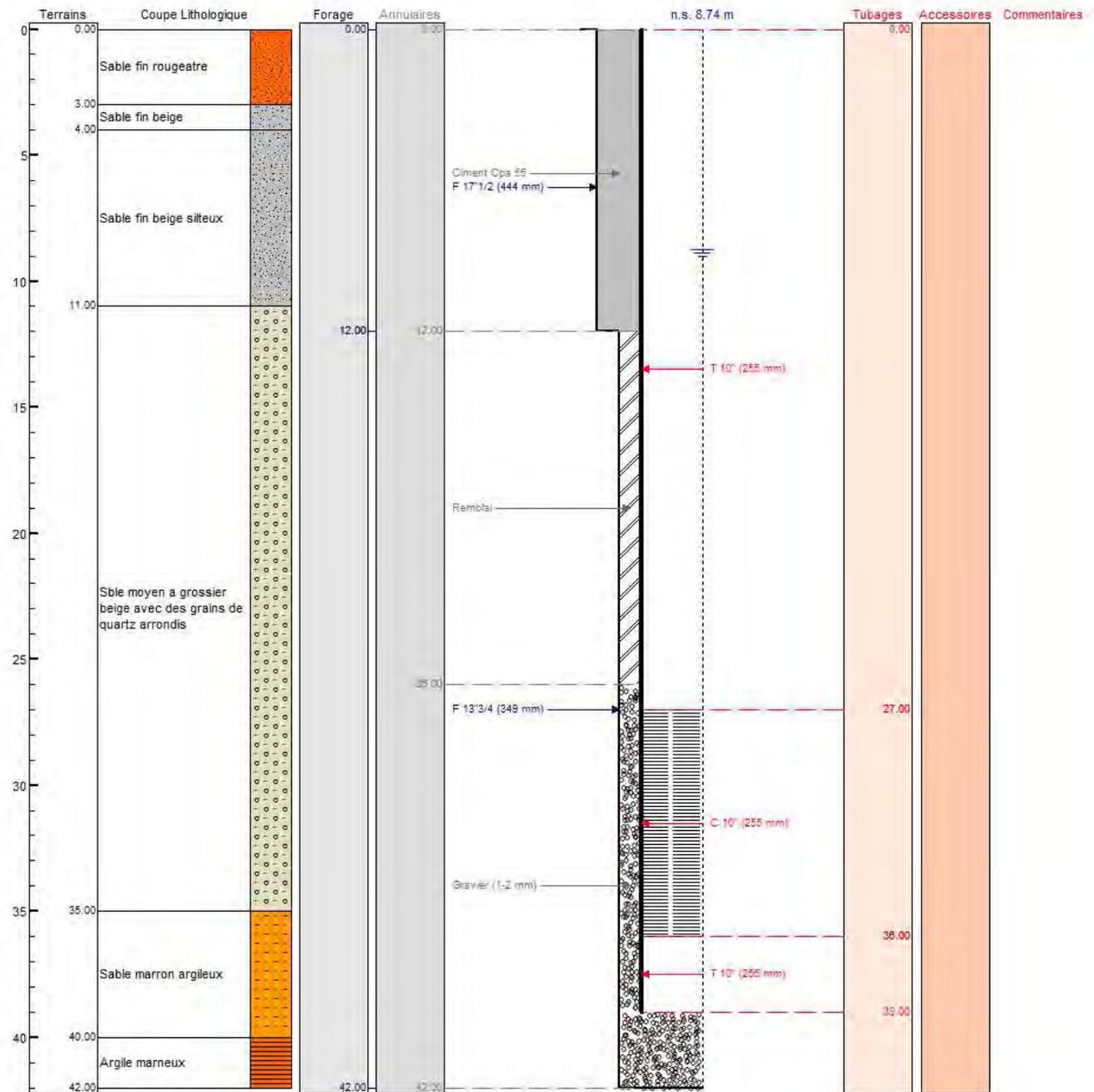


Figure 42 : Coupe lithologique et technique du forage de recyclage CB5

X.1.2.3 Débit spécifique des forages

Tous les forages de la première phase du programme ont été testés et leurs débits spécifiques calculés. Les résultats sont récapitulés dans le tableau ci-dessous (TABLEAU 10) :

Tableau 10 : Résultats d'implantation et de performance des forages de recyclage

ID Forage	Niveau Piezo.	Mur Aquifère	Epaisseur Aquifère	Débit test	Niveau Dynamique	Rabat. max	Débit Spécifique
	m. IGN	m. IGN	(m)	m ³ /h	m. IGN	(m)	m ³ /h/m
CB1	5.50	-27.67	33	64.66	-8.05	13.55	4.77
CB2	5.10	-24.62	30	92.82	-12.17	17.27	5.37
CB3	5.06	-24.86	30	44.30	-17.15	22.21	1.99
CB4	5.60	-22.29	28	120.60	-12.01	17.61	6.85
CB5	6.02	-19.39	25	127.58	-9.10	15.12	8.44
CB6	6.42	-20.38	27	126.00	-7.73	14.15	8.90
CB7	6.35	-20.24	27	136.80	-6.72	13.07	10.47
CB8	6.26	-19.31	26	144.00	-3.31	9.57	15.05
CB9	6.17	-18.53	25	108.00	-6.69	12.86	8.40
CB10	7.29	-17.61	25	135.00	-4.62	11.91	11.34
CB11	6.30	-19.60	26	129.60	-7.34	13.64	9.50
CB12	6.16	-20.50	27	118.80	-6.61	12.77	9.30
CB13	6.48	-26.22	33	144.00	-8.39	14.87	9.68
CB14	5.95	-22.66	29	111.60	-9.54	15.49	7.20
CB15	6.03	-26.37	32	144.00	-8.82	14.85	9.70
CB16	5.93	-24.92	31	144.00	-10.21	16.13	8.93
CB17	5.84	-26.16	32	138.24	-15.78	21.62	6.39
CB18	5.70	-21.19	27	133.20	-8.71	14.41	9.24
CB19	5.59	-37.66	43	120.60	-21.21	26.8	4.50
CB20	5.61	-38.09	44	117.00	-4.74	10.35	11.30
CB21	5.01	-34.02	39	104.04	-22.08	27.09	3.84
CB22	6.12	-32.89	39	160.20	-1.23	7.35	21.80
CB23	5.52	-34.90	40	165.60	-8.29	13.81	11.99
CB24	6.94	-32.77	40	81.72	-19.24	26.18	3.12
CB25	6.09	-37.88	44	104.40	-23.47	29.56	3.53
CB26	5.70	-26.25	32	90.00	-19.99	25.69	3.50
CB27	6.17	-21.20	27	105.84	-16.58	22.75	4.65
CB28	6.41	-29.24	36	76.00	-13.08	19.49	3.90
CB30	5.89	-40.31	46	39.60	-8.11	14	2.83
CB31	6.00	-38.88	45	64.80	1.85	4.15	15.61
CB32	5.64	-38.21	44	101.66	-21.66	27.3	3.72
CB33	5.79	-33.44	39	100.80	-20.62	26.41	3.82
CB34	5.34	-34.37	40	108.00	-14.66	20	5.40
CB35	5.39	-34.85	40	72.00	-9.98	15.37	4.68
CB36	5.32	-32.20	38	138.46	-13.72	19.04	7.27
CB37	5.65	-36.15	42	112.32	-15.73	21.38	5.25
CB38	6.12	-38.28	44	93.60	-3.88	10	9.36
CB39	5.93	-35.56	41	106.16	-10.53	16.46	6.45
CB40	6.50	-35.82	42	131.36	-7.88	14.38	9.14
CB41	5.39	-38.39	44	128.52	-13.74	19.13	6.72
CB42	5.85	-38.92	45	116.10	-14.34	20.19	5.75
CB43	5.73	-37.72	43	115.34	-8.67	14.4	8.01
CB44	5.69	-37.73	43	120.06	-8.69	14.38	8.35
CB45	5.61	-39.99	46	125.39	-11.67	17.28	7.26
CB46	5.46	-38.36	44	125.46	-8.53	13.99	8.97
CB47	5.47	-40.05	46	126.22	-12.86	18.33	6.89

Pour l'appréciation des forages captant la nappe supérieure dans la zone d'étude, tous ceux qui ont un débit spécifique supérieur $2 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$ sont jugés bons. Cette indication justifie la limitation habituelle des autorisations de forages communautaires captant le Quaternaire au débit de $40 \text{ m}^3/\text{h}$ en exploitation. Les critères suivants ont été définis pour une classification plus détaillée de la qualité des forages de recyclage de GCO :

- $Q/s < 2$: médiocre ;
- $2 \leq Q/s < 4$: bon ;
- $4 \leq Q/s < 6$: Très bon ;
- $Q/s \geq 6$: Excellent.

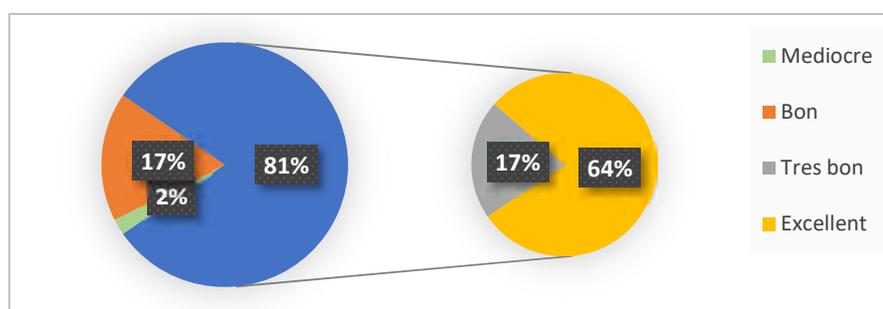


Figure 43 : Le graphe de rendement des forages de recyclage de GCO à la réception

Cette graphe montre qu'il y'a eu un taux de réussite des forages de recyclage de 98% dont les 64% sont excellents (FIGURE 43). Ce résultat est surtout justifié par la nature très perméable de l'aquifère dans cette bande côtière des dunes du Littoral Nord. En effet, les forages de la limite Est des dunes minéralisées de Diogo, ont capté une couche de sable moyen à grossier ayant permis l'obtention de gros débits pouvant aller jusqu'à $165 \text{ m}^3/\text{h}$. Le débit moyen est de $113 \text{ m}^3/\text{h}$ pour un débit spécifique de $7 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$ (TABLEAU 11). Les résultats auraient été plus intéressants si l'épaisseur des sables était plus importante.

Tableau 11: Récapitulatif de la performance des forages de recyclage

ID Forage	Niv. Piezo	Mur Aquifère	Epaisseur Aquifère (m)	Débit test m^3/h	Niveau Dynamique m. IGN	Rabat. max (m)	Débit Spécifique $\text{m}^3/\text{h}/\text{m}$
Min	5.01	-44.50	24.70	39.60	-23.47	4.15	1.99
Moy	5.87	-30.66	36.53	113.50	-11.26	17.13	7.56
max	7.29	-17.61	50.39	165.60	1.85	29.56	21.80

X.1.2.4 Résultat des essais de nappe

Des essais de longue durée de 24 heures ont été réalisés sur un certain nombre de forages de recyclage. Les résultats obtenus sur certains d'entre eux sont récapitulés ci-dessous (FIGURE 44) :

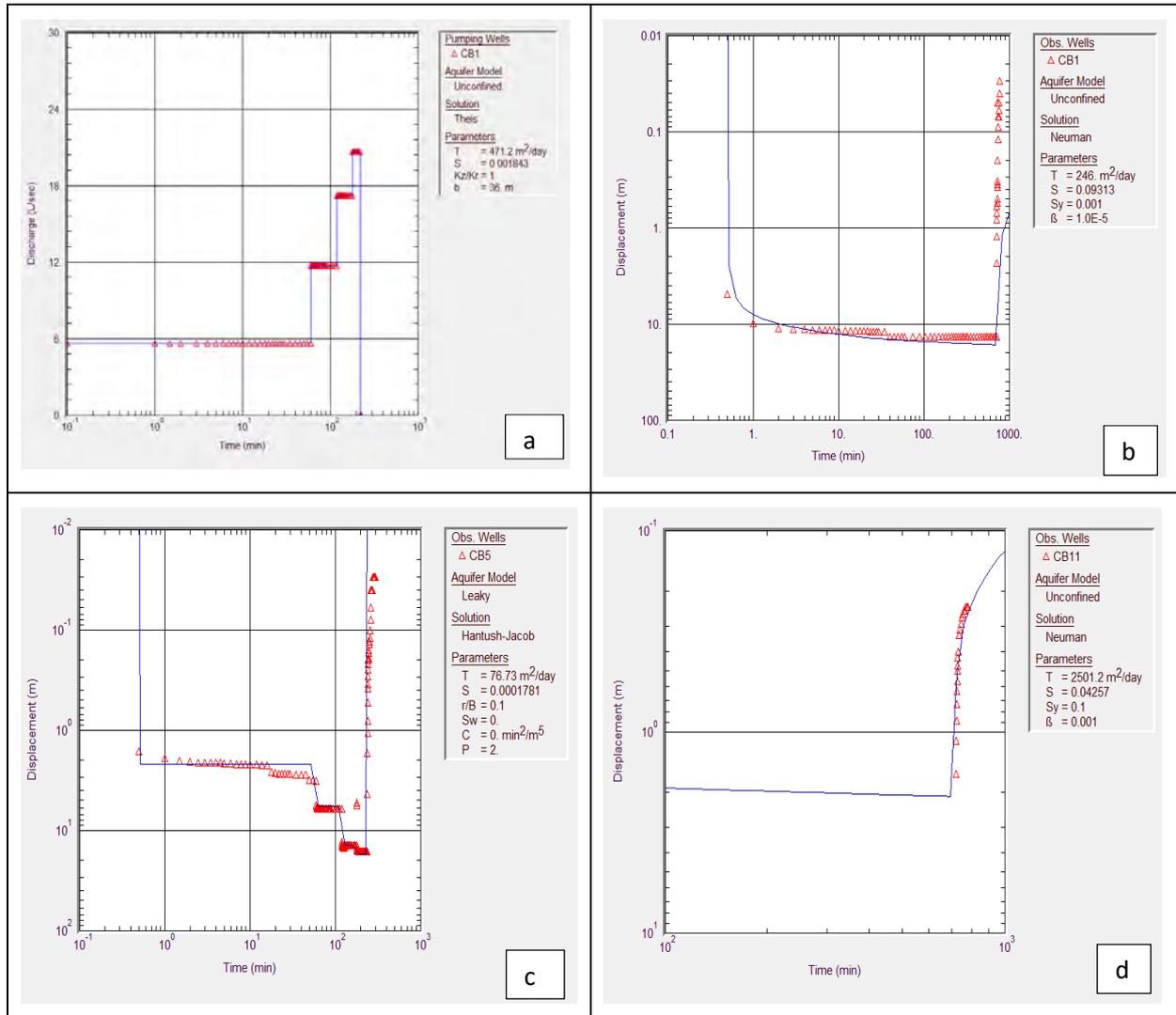


Figure 44 : Les graphes de résultats de pompage d'essai de CB1 : a / courbe débit-temps, b/ longue durée rabattement temps par la méthode de Neuman, CB5 : c/ rabattement –temps par méthode de Hantush-Jacob, d/ Méthode de Neuman sur la courbe de remontée de CB11.

Les résultats des tests des forages de recyclage entre CB1 et CB48, montrent que les valeurs de transmissivité et de perméabilité, expriment les mêmes ordres de grandeurs. La transmissivité variant de 100 à 1000 de m^2/jour (10^{-3} à $10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$) alors que la perméabilité les forages test PSB varie de 10^{-5} à 10^{-4} m/s .

X.2 Ouvrages captant la nappe profonde maastrichtienne

X.2.1 Localisation des forages profonds de la mine

Les 12 forages profonds ont été localisés à l'Est des dunes minéralisées de Diogo avec un espacement d'environ 1.2 km et suivant deux axes parallèles Nord –Sud (FIGURE 45).

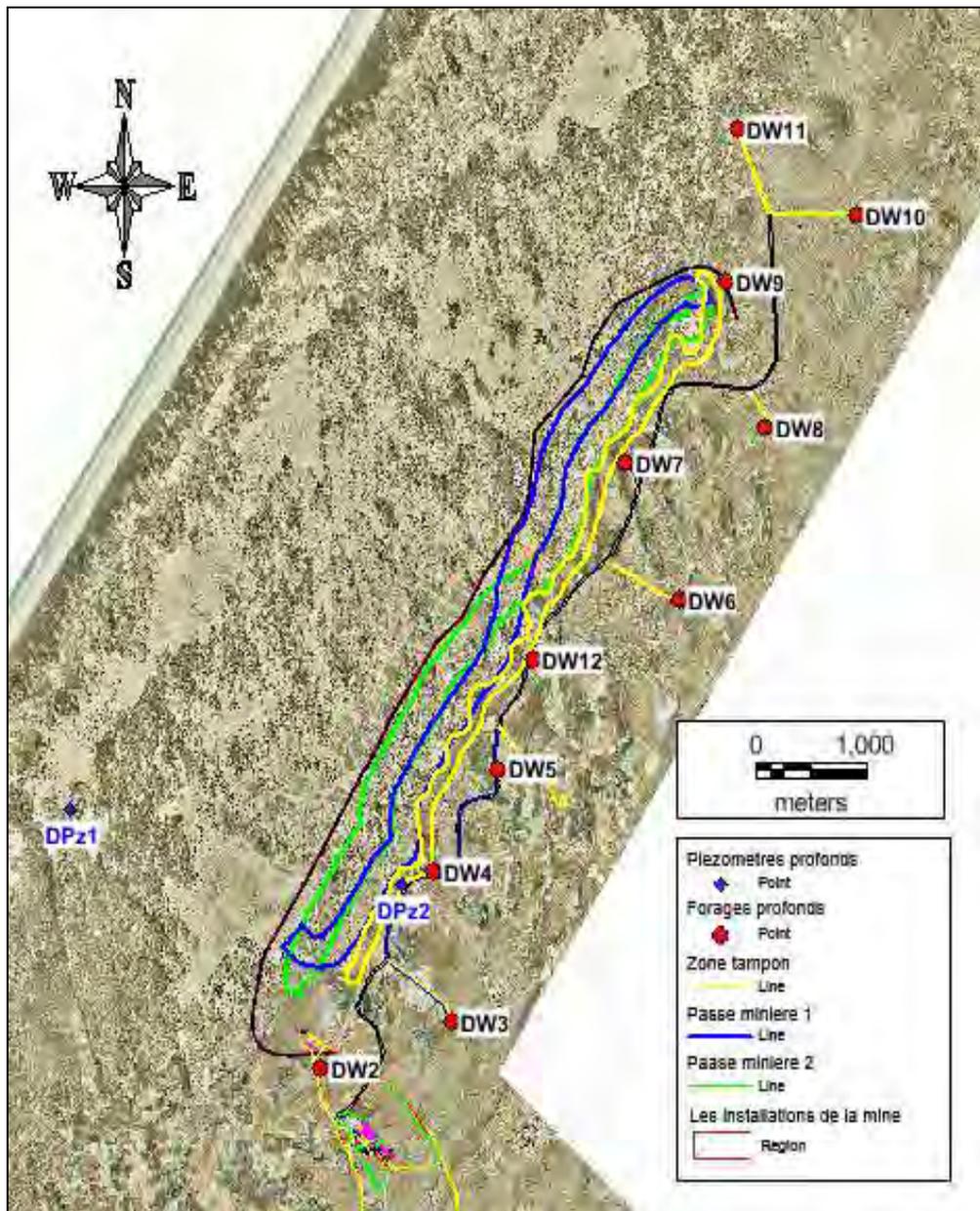


Figure 45 : Carte de localisation des forages et piézomètres captant la nappe maastrichtienne

X.2.2 Caractéristiques des ouvrages

Les forages maastrichtiens de la mine sont de type télescopique. Le tubage d'exhaure, de diamètre 6 5/8'', est crépiné sur une longueur de 60 m. La chambre de pompage est un casing de diamètre 13 3/8'' (FIGURE 46).

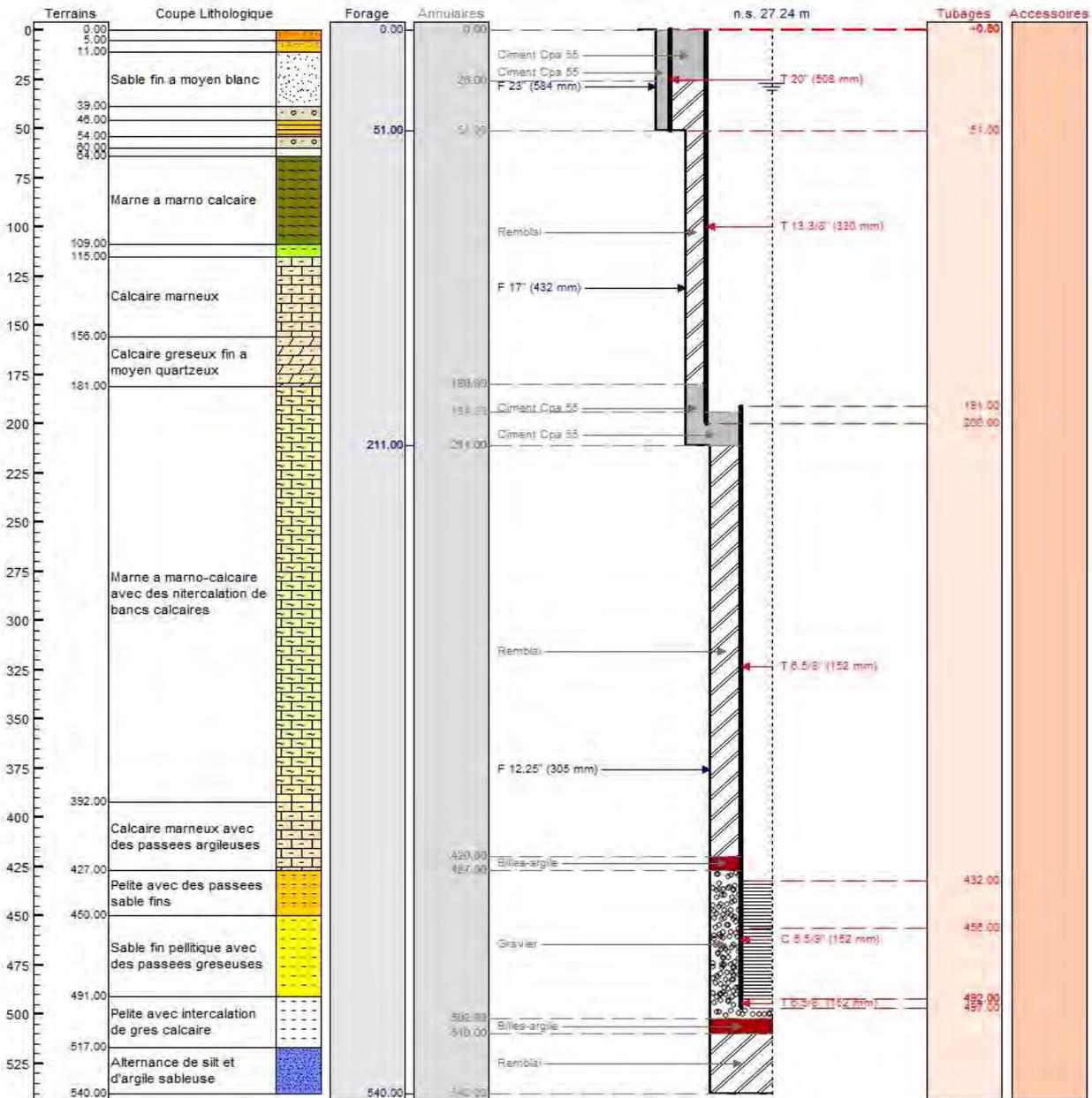


Figure 46: Coupe technique et lithologique du forage maastrichtien DW4

Les données des profils techniques liées à l'implantation de ces ouvrages profonds sont récapitulées ci-dessous (TABLEAU 12):

Tableau 12: Données des profils techniques des forages profonds

Identification	Coordonnées		Profondeur totale (m)	Côte Margelle m.IGN	Niveau Statique/margelle (m)	Chambre de pompage		Tubage d'exhaure		Crépine Slot 1,5mm		
	X_ UTM	Y_ UTM				Base	DN	Longueur	DN	DN	Sommet	Base
	(m)	(m)				(m)	mm	(m)	(mm)	mm	(m)	(m)
DW1	308015	1690822	553	12	22.4	195	320	250	150	150	445	505
DW2	309109	1690009	522	26	36.2	195	320	256	150	150	451	517
DW3	309212	1691230	525	20	28.7	191	320	266	150	150	457	517
DW4	309052	1692532	555	17	27.2	191	320	241	150	150	432	492
DW5	309659	1693443	530	22	26.2	192	320	270	150	150	462	522
DW6	311316	1694903	530	16	24.2	190	320	270	150	150	460	522
DW7	310828	1696108	514	14	21.9	192	320	254	150	150	446	506
DW8	312115	1696403	529	12	20.6	185	320	275	150	150	460	520
DW9	311752	1697684	539	17	23.6	192	320	278	150	150	470	530
DW10	312950	1698264	536	13	22.8	190	320	275	150	150	465	525
DW11	311854	1699007	528	11	20.1	194	320	268	150	150	462	520
DW12	309964	1694395	527	19	27.4	178	320	277	150	150	455	518

Le niveau statique se trouve à moins de 30 mètres de profondeur sur presque la totalité des forages à l'exception de DW2 qui est par ailleurs implanté sur un point plus élevé. Les formations sableuses du maastrichtien sont rencontrées au-delà de 400 m de profondeur.

X.2.3 Résultats des pompages d'essai des forages de GCO

Des essais de pompage ont été réalisés sur presque l'ensemble des forages profonds en dehors forage DW8 qui avait montré de très faibles performances dues à des problèmes survenus au cours de la construction. Depuis, il a été exclu du système d'exploitation et un programme de réhabilitation est envisagé. Les essais de pompage ont été organisés comme suit :

- des essais de trois palier de débit d'une heure chacun ;
- un pompage de longue durée de 100 heures suivi d'une remontée de 24 heures.

X.2.3.1 Débit spécifique des forages

L'analyse des résultats des essais doit mener à la détermination d'une relation débits/rabattements de l'ouvrage permettant ainsi dévaluer pour un débit donné les pertes de charge dues à l'ouvrage de captage et leur importance par rapport à celles dues à la formation aquifère. A l'issue des essais de pompage, le débit spécifique de chaque forage a été déterminé ainsi que les pertes de charge engendrées par le tubage d'exhaure (TABLEAU 13).

Tableau 13: La performance des forages profonds

Identification	Coordonnées		Tubage d'exhaure		Essai de pompage				
	X UTM	Y UTM	Longueur	DN	Débit (Q)	Rabatement(s)	Pertes de charge dans le tube exhaure 150mm		Débit spécifique
	(m)	(m)	(m)	(mm)	m ³ /h	(m)	m	% / s	m ³ /h/m
DW1	308015	1690822	250	150	160	125	12.59	10%	1.28
DW2	309109	1690009	256	150	150	143.4	11.33	8%	1.05
DW3	309212	1691230	266	150	170	148.5	15.13	10%	1.14
DW4	309052	1692532	241	150	250	82.5	29.64	36%	3.03
DW5	309659	1693443	270	150	255	87.5	34.55	39%	2.91
DW6	311316	1694903	270	150	225	134	26.90	20%	1.68
DW7	310828	1696108	254	150	265	71.9	35.10	49%	3.69
DW9	311752	1697684	278	150	225	105.4	27.69	26%	2.13
DW10	312950	1698264	275	150	253	85.5	34.64	41%	2.96
DW11	311854	1699007	268	150	255	78.1	34.29	44%	3.27
DW12	309964	1694395	277	150	160	96	13.95	15%	1.67

Les forages les plus productifs ont les meilleurs débits spécifiques, supérieurs à 2 m³/h/m. Il s'agit des forages DW4, DW5, DW7, DW10 et DW11. Mais, ils ont tous des pertes de charges induites par le tubage d'exhaure très élevées à l'exception de DW4 qui est à la limite du débit critique (FIGURE 47). Ainsi, ils devraient être exploités à 200m³/h environ.

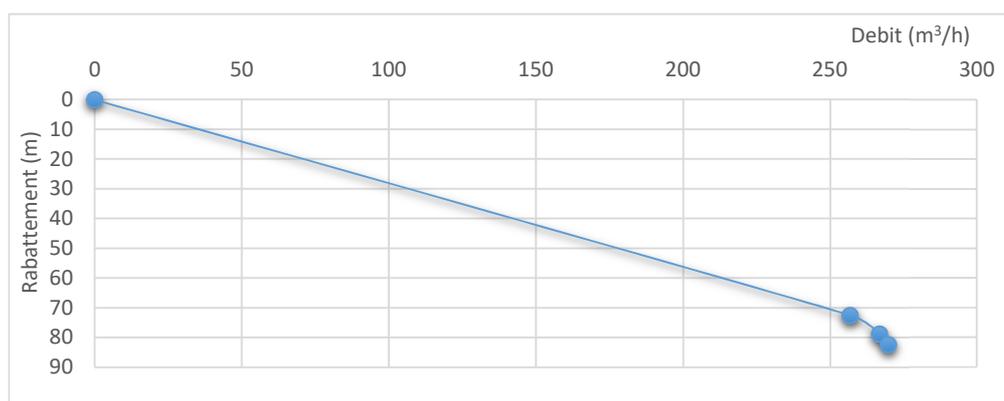


Figure 47: Courbe caractéristique du forage DW4

X.2.3.2 Paramètres hydrodynamiques

Les paramètres hydrodynamiques tels que la transmissivité, la perméabilité et le coefficient d'emmagasinement, obtenus des essais de nappe, sont présentés ci-dessous (TABLEAU 14).

Tableau 14 : Récapitulatif des résultats des pompages d'essai de longue durée

ID Forage	Q (m3/h)	Distance (m)	Rabattement (m)	Transmissivité (m ² /s)	Perméabilité _K (m/s)	Coef. Emmag. _S	Méthode
DW01	210		125	5.38E-04	5.38E-06		Theis remontee
DW02	182		143	1.36E-04	1.36E-06		Theis remontee
DW1		1310	2.10	1.84E-03	1.84E-05	2.65E-04	Theis
				2.14E-03	2.14E-05	1.83E-04	Cooper/Jacob
DW03	166		148.5	7.52E-04	7.52E-06		Theis remontee
DW2		1190	2.25	1.83E-03	1.83E-05	3.57E-04	Theis
				2.29E-03	2.29E-05	2.52E-04	Cooper/Jacob
DW4		1290	2.10	2.59E-03	2.59E-05	3.81E-04	Theis
				3.13E-03	3.13E-05	2.63E-04	Cooper/Jacob
DW04	250		82.5	1.49E-03	1.49E-05		Theis remontee
DW03		1290	3.10	3.91E-03	3.91E-05	5.38E-04	Theis
				2.94E-03	2.94E-05	6.14E-04	Cooper/Jacob
DPz2		310	5.00	1.74E-03	1.74E-05	3.17E-04	Theis
				2.60E-03	2.60E-05	2.16E-04	Cooper/Jacob
DW05	255		87.5	1.99E-03	1.99E-05		Theis remontee
DW04		1100	3.81	4.47E-03	4.47E-05	5.17E-04	Theis
				5.08E-03	5.08E-05	4.09E-04	Cooper/Jacob
DW12		1020		3.16E-03	3.16E-05	3.15E-04	Theis
		1020	2.61	3.52E-03	3.52E-05	2.32E-04	Cooper/Jacob
DW06	225		134	1.03E-03	1.03E-05		Theis remontee
DW12		1440	2.10	3.14E-03	3.14E-05	4.23E-04	Theis
				4.35E-03	4.35E-05	3.06E-04	Cooper/Jacob
DW7		1300	4.60	2.49E-03	2.49E-05	1.06E-04	Theis
				2.63E-03	2.63E-05	8.67E-04	Cooper/Jacob
DW07	265		71.5	2.07E-03	2.07E-05		Theis remontee
DW6		1300	5.80	2.33E-03	2.33E-05	1.13E-04	Theis
				2.65E-03	2.65E-05	9.37E-04	Cooper/Jacob
DW8		1330	4.70	2.07E-03	2.07E-05	2.27E-04	Theis
				2.64E-03	2.64E-05	1.52E-04	Cooper/Jacob
DW09	225		105.4	1.13E-03	1.13E-05		Theis remontee
DW7		1840	2.80	4.42E-03	4.42E-05	1.68E-04	Theis

ID Forage	Q (m3/h)	Distance (m)	Rabattement (m)	Transmissivité (m ² /s)	Perméabilité _K (m/s)	Coef. Emmag._S	Méthode
				5.05E-03	5.05E-05	1.32E-04	Cooper/Jacob
DW11		1320	3.19	2.49E-03	2.49E-05	2.38E-04	Theis
				3.43E-03	3.43E-05	1.77E-04	Cooper/Jacob
DW10	253			1.79E-03	1.79E-05		Theis remontee
DW9		1320	4.17	2.22E-03	2.22E-05	1.98E-04	Theis
				3.16E-03	3.16E-05	2.81E-04	Cooper/Jacob
DW11		1270	3.55	8.85E-03	8.85E-05	1.09E-04	Theis
				1.24E-02	1.24E-04	1.93E-04	Cooper/Jacob
DW11	255			1.83E-03	1.83E-05		Theis remontee
DW9		1320	4.35	2.82E-03	2.82E-05	2.18E-04	Theis
				3.25E-03	3.25E-05	1.47E-04	Cooper/Jacob
DW10		1270	4.48	3.52E-03	3.52E-05	1.46E-04	Theis
				3.55E-03	3.55E-05	1.73E-04	Cooper/Jacob
DW12	160		96	8.17E-04	8.17E-06		Theis remontee

La valeur moyenne obtenue pour chaque paramètre hydraulique est la suivante :

- La transmissivité, $T = 2.94 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$
- La perméabilité $K = 2.94 \cdot 10^{-5} \text{ ms}^{-1}$
- Le coefficient d'emmagasinement $S = 2.99 \cdot 10^{-4}$

La transmissivité (T) et la perméabilité (K) respectivement de l'ordre de $3 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ et $3 \cdot 10^{-5} \text{ ms}^{-1}$ ont permis d'extraire des débits de plus de 200 m³/h avec un rabattement relativement faible de 2 m sur un rayon d'1 km du forage d'exploitation. Ces valeurs de transmissivité obtenues pour la nappe maastrichtienne sont du même ordre de grandeur que celles de la nappe libre sableuse du Quaternaire. Ci-dessous sont représentées les courbes d'interprétation de la remontée des forages DW1 et DW2 suite à l'arrêt des pompes par la méthode de Theis en utilisant le logiciel Aquifer Test version 2013.1 (Schlumberger, 2013) (FIGURE 48) :

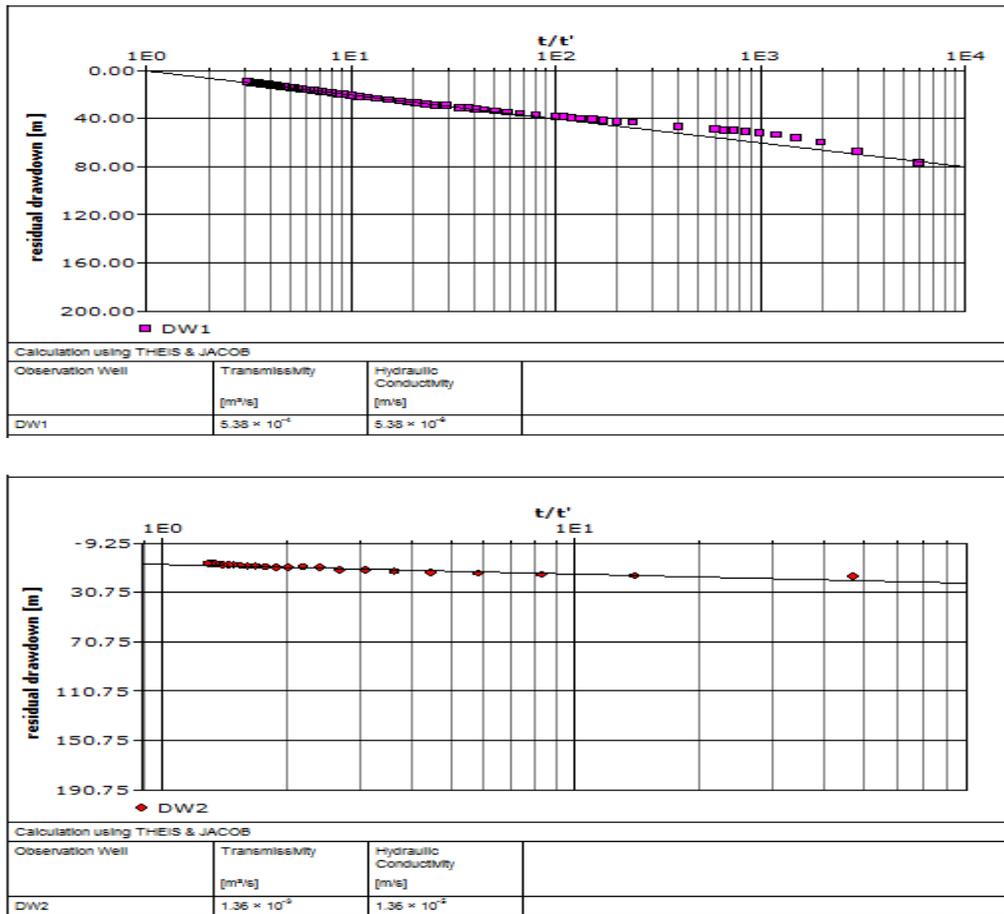


Figure 48 : Détermination de la transmissivité par la méthode de Theis : DW1 et DW2

Par contre, le coefficient d'emmagasinement représente, dans ce présent cas, 10^{-4} m³ d'eau pouvant être relâché ou emmagasiné par 100 m³ de volume d'aquifère lorsque la charge hydraulique varie d'un mètre. Cette valeur relativement faible reste caractéristique des nappes captives. En effet cette quantité d'eau emmagasinée ou relâchée dépend de la variation de charge qui va engendrer une variation de pression interstitielle alors que pour une nappe libre, l'eau est simplement mobilisée par drainage gravitaire.

X.2.3.3 Rayons d'influence

Les rayons d'influence et les interférences possibles lors de la phase exploitation sont déterminés à partir du suivi piézométrique effectué aussi bien à la verticale des forages d'exploitation que sur les autres forages au repos plus ou moins proches servant de piézomètres (TABLEAU 15).

Tableau 15 : Récapitulait des rayons d'influence

Forage	Rabatement (m)	Q (m ³ /h)	Transmis. (m ² /h)	Distance/forage(m)	Rayon (m)
DW02		182	1.96		
DW1	2.10		6.79	1310	2145
DW03		166	2.71		
DW1	5.00		3.33	1300	2445
DW2	2.25		6.58	1190	2086
DW4	2.10		9.33	1290	2711
DW04		250	5.38		
DW03	3.1		6.25	1290	2100
DPz2	5.00		10.58	310	1174
DW05		255	7.17		
DW04	3.81		11.38	1100	3204
DW12	2.61		16.08	1020	2873
DW06		225	3.71		
DW12	2.10		11.29	1440	2794
DW7	4.60		8.96	1300	4114
DW8	4.80		4.46	1700	3092
DW07		265	7.46		
DW6	5.80		8.38	1300	4118
DW8	4.70		7.46	1330	3056
DW9	2.60		10.54	1840	3527
DW09		225	4.08		
DW7	2.80		15.92	1840	6396
DW11	3.19		8.96	1320	2935
DW10		253	3.19		
DW8	0.89		10.08	2050	2562
DW9	4.17		8.00	1320	3025
DW11		255	3.58		
DW9	4.35		10.17	1320	3930
DW10	4.48		12.67	1270	5149

On peut résumer à partir du tableau ci-dessus que le rayon d'influence observé lors du pompage d'un forage profond est de 3 km en moyenne avec un max de 6 km. De ce résultat, découle une recommandation d'implanter les forages d'exploitation selon une distance moyenne de 3 km entre eux afin d'éviter les interférences.

Chapitre XI. Hydrodynamisme des eaux souterraines

XI.1 Nappe superficielle du Littoral Nord

La caractérisation de la nappe superficielle des sables du Quaternaire est faite sur la base de l'exploitation de plusieurs données dont celles de GCO et de la DGPRE. En ce qui concerne les ouvrages de GCO captant la nappe superficielle, il y'a ceux de la phase de l'étude de faisabilité du projet codés GCO –PSB et ceux réalisés au fur et mesure de l'avancement de l'exploitation pour assurer le recyclage partiel des infiltrations provenant des terrils.

XI.1.1 Répartition spatiale des paramètres hydrodynamiques à l'échelle de nappe supérieure du Littoral Nord

L'ensemble des résultats obtenus à partir des pompages des forages de GCO et d'autres collectés, ont permis l'évaluation de la productivité de l'aquifère supérieur dans la zone d'étude étendue jusqu'à la partie Est des calcaires de l'Eocène (TABLEAU 16).

Tableau 16 : Récapitulatifs des paramètres hydrodynamiques de la nappe supérieure du Littoral Nord

Désignation	X_ UTM	Y_ UTM	T(m ² /s)	K(m/s)	Nappe	Ouvrage
Baba Garage	339448	1652196	1.40E-02	2.20E-03	Calcaire	F
Bangoye	361766	1701506	2.40E-02	1.20E-03	Calcaire	F
Battel	367363	1684325	2.00E-05	2.50E-06	Calcaire	F
Darou Diop	341154	1704983	1.20E-03	2.50E-04	Sable	P
Diemoul	356025	1684392	2.90E-01	6.40E-03	Calcaire	F
Gueoul	356467	1712326	3.50E-02	3.00E-03	Calcaire	F
Kab Gaye	325335	1693030	2.70E-02	5.90E-04	Sable	F
Kawal Diaw (Talene Gaye)	332144	1694251	4.00E-02	7.00E-04	Sable	F
KEBEMER	344106	1700328	2.00E-02	5.70E-04	Calcaire	F
Louga	362093	1721265	1.20E-02	5.00E-04	Calcaire	F
Massar diop	366631	1746598	2.50E-02	8.30E-04	Calcaire	F
Mbediene	371293	1714973	1.00E-03	1.00E-04	Calcaire	F
Mbenguene	348673	1696456	1.00E-02	2.40E-04	Sable	F
Medina Dakhar	333447	1670464	3.90E-02	1.60E-03	Calcaire	F
Merina Ndiegue	312362	1665764	5.60E-04	2.80E-05	Sable	P
Ndande	336144	1689423	2.70E-04	1.80E-04	Sable	P
ndiaga ndiaye	353051	1670591	5.50E-02	6.50E-03	Calcaire	F
Ndiakhal	360331	1728550	6.50E-04	3.80E-05	Sable	P
Ndiar Ndiar	333835	1701631	3.50E-02	8.50E-04	Sable	F
ndiengue diaw	371277	1727942	3.50E-02	2.90E-03	Calcaire	F
Ndiok Sall	364955	1741686	6.50E-02	8.70E-04	Calcaire	F
Ndiourki	359806	1687934	4.00E-02	9.10E-04	Calcaire	F
Ngeune Sarr	363351	1737270	9.00E-02	1.20E-03	Calcaire	F
Ngourane	361269	1708055	3.00E-02	9.00E-04	Calcaire	F
Palmeo	333245	1686879	3.00E-02	5.00E-04	Calcaire	F
Pekess	347706	1671355	1.00E-02	3.30E-04	Calcaire	F
GCO - PSB1	307726	1691112	6.06E-03	1.68E-04	Sable	P
GCO - PSB2	308542	1693035	1.59E-02	3.97E-04	Sable	P
GCO - PSB3	308095	1692497	1.29E-02	3.17E-04	Sable	P
GCO - PSB4	307563	1691731	5.74E-03	2.05E-04	Sable	P
GCO RAIL WB#1	316139	1683289	6.10E-03	2.03E-04	Sable	F
GCO RAIL WB#2	319035	1679482	5.20E-03	1.73E-04	Sable	F
GCO RAIL WB#3	312623	1685547	1.00E-04	3.33E-06	Sable	F
GCO RAIL WB#5	314721	1684871	4.00E-04	1.33E-05	Sable	F
Sam Ndiaye	321909	1660640	8.00E-02	8.90E-04	Sable	F
Seal	323999	1687546	9.70E-04	3.00E-05	Sable	P
Tawa Fall	316443	1691252	2.90E-03	1.20E-04	Sable	P
Thiam Bam	330832	1670931	5.70E-04	4.10E-05	Sable	P
THIATHIOUR	346477	1684950	8.00E-04	2.00E-05	Calcaire	F
Toundou Diop	342229	1717951	2.90E-02	6.40E-04	Sable	F
Toundou Thioune	320628	1675908	3.00E-02	6.00E-04	Sable	F
War Cissé	364459	1713261	7.70E-03	2.00E-04	Calcaire	F
GCO - CB1	307394	1691333	5.45E-03	1.51E-04	Sable	F
GCO - CB5	307903	1690943	2.70E-03	7.49E-05	Sable	F
GCO - CB8	308345	1691437	1.91E-03	5.30E-05	Sable	F
GCO - CB11	308264	1691864	2.89E-02	8.04E-04	Sable	F

D'une manière globale cet aquifère qui est sableux à l'Ouest et calcaire à l'Est de la zone d'étude, présente une assez bonne productivité. Pour plus de détail dans l'analyse, les cartes de distribution des valeurs de transmissivité et de perméabilité ont été élaborées (FIGURE 49):

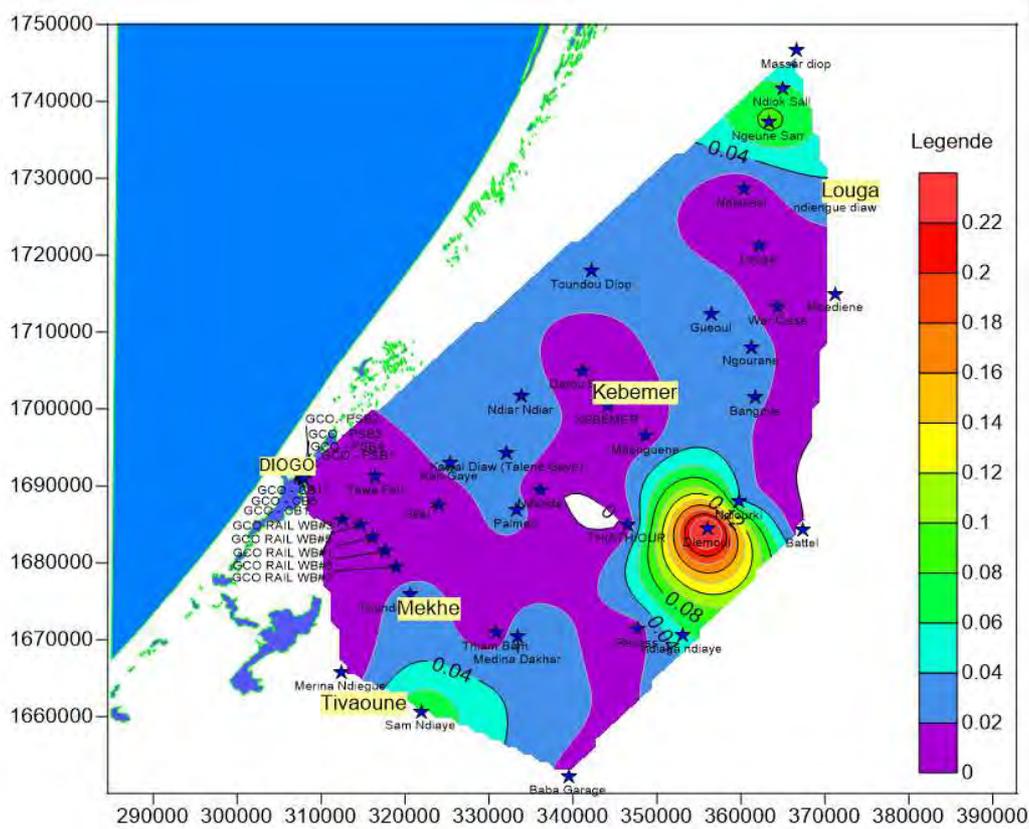


Figure 49 : Carte de distribution de la transmissivité (m^2/s) des aquifères supérieurs du Littoral Nord

Les valeurs de transmissivité sont de l'ordre de $10^{-1} m^2/s$ dans la partie Est du domaine correspondant aux calcaires du Lutétien (Eocène) et varient entre 10^{-4} et $10^{-2} m^2/s$ dans la partie Ouest. L'aquifère sableux est par conséquent moins productif que l'aquifère calcaire.

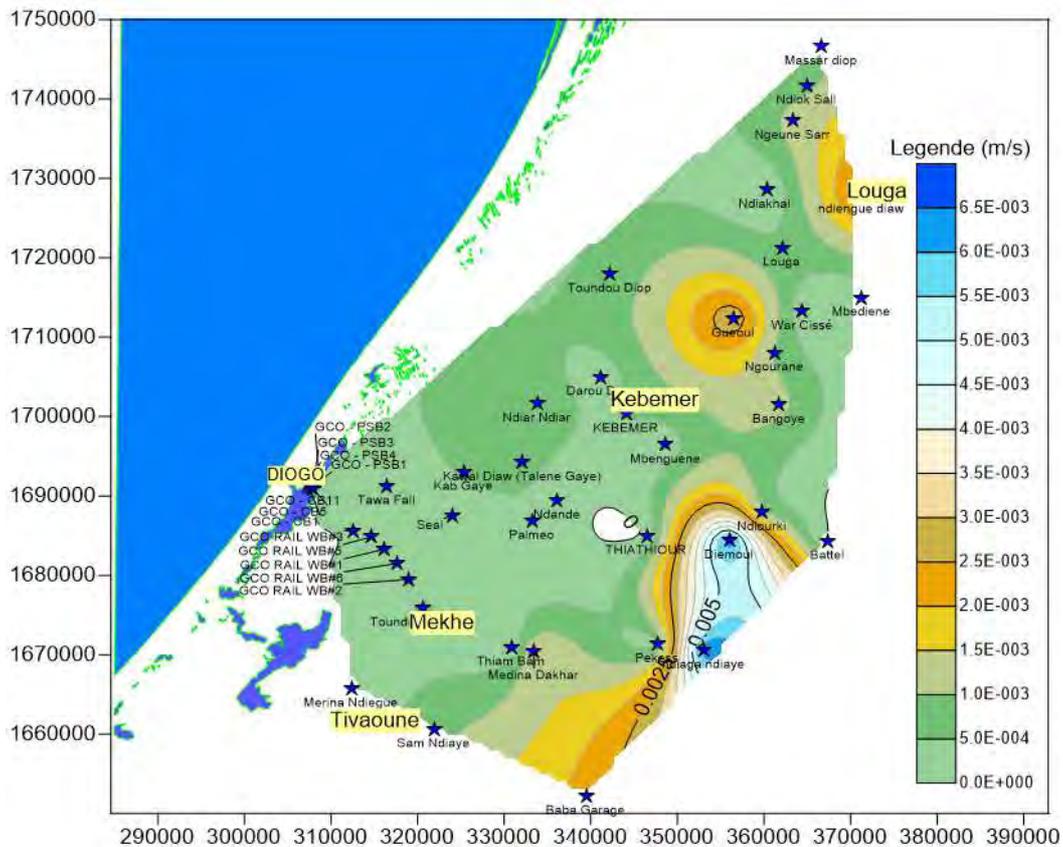


Figure 50 : Carte de distribution de la perméabilité (m/s) des aquifères supérieurs du Littoral Nord

La carte ci-dessus montre la distribution de la perméabilité. La tendance reste très proche de celle de la transmissivité. Dans les calcaires du Lutétien, les valeurs de perméabilité sont très bonnes de l'ordre de 10^{-3} m/s alors que dans la partie Ouest elles sont en général de 10^{-5} m/s (FIGURE 50). Les forages de GCO sont localisés dans la zone où les perméabilités sont de 10^{-4} à 10^{-5} m/s.

XI.1.2 Suivi piézométrique

Dans le cadre de cette étude, le suivi piézométrique de la nappe des sables a été effectué à différentes échelles géographiques : régionale et locale limitée à la zone minière de Diogo.

XI.1.2.1 Localisation des ouvrages de suivi

Les ouvrages de suivi sont de plusieurs types (FIGURE 51):

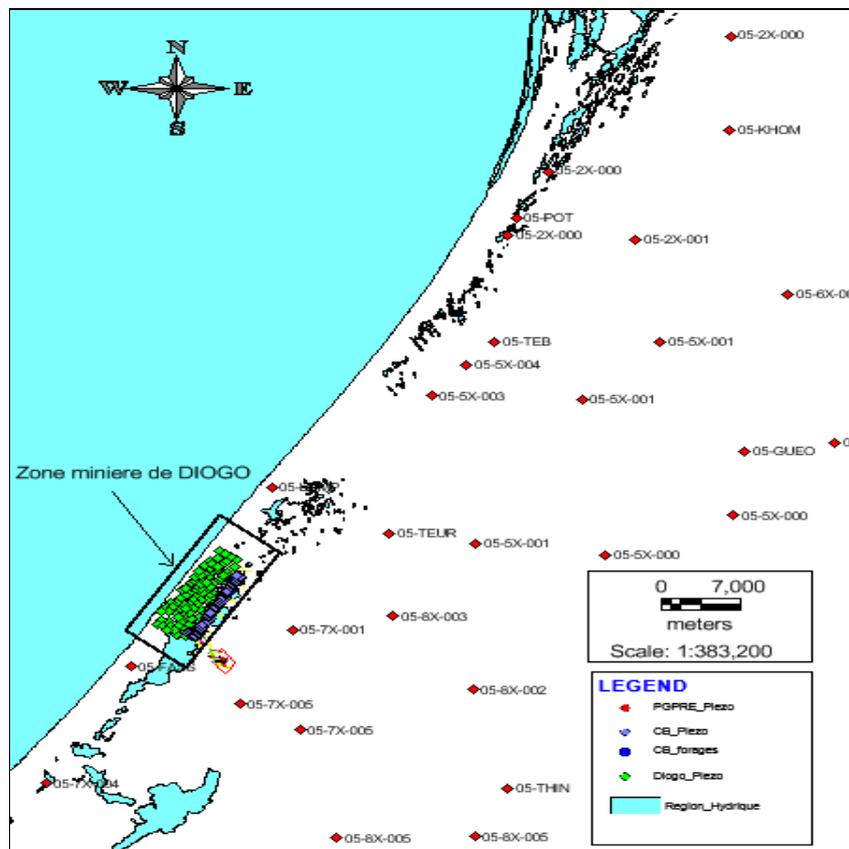


Figure 51 : Carte de localisation des différents types d'ouvrages de suivi de la nappe du Quaternaire

- Les piézomètres de suivi du Littoral implantés par l'Etat et qui font l'objet d'un suivi trimestriel ;
- Les ouvrages de suivi implantés par la compagnie GCO comprennent (FIGURE 52):
 - les piézomètres de la zone minière de Diogo, dénommés DGPZ qui sont au nombre de 120 et font l'objet d'un suivi piézométrique mensuel ;
 - les piézomètres de contrôle des forages de recyclage (PzCB), situés entre deux forage successifs et décalés d'environ 50 m, et qui font l'objet d'un suivi journalier ;
 - les forages de recyclage, équipés de compteurs volumétriques et de sonde de niveau, relevés suivant un pas de temps journalier.

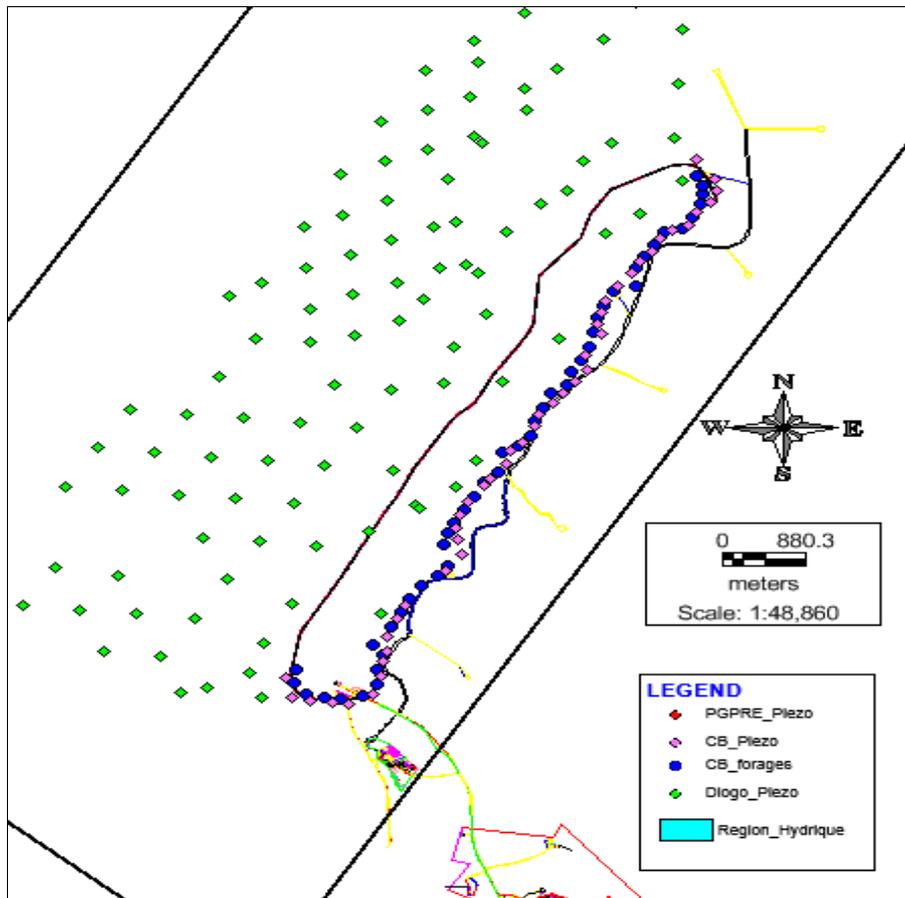


Figure 52 : Carte des ouvrages de suivi de la zone minière de Diogo implantés par GCO

XI.1.2.2 Evolution piézométrique depuis la grande sécheresse de 1973

Le graphe ci-dessous présente les courbes du suivi piézométrique de la nappe superficielle du Littoral Nord et de la pluviométrie (FIGURE 53). Différents piézomètres ont été reportés suivant leur localisation :

- du Sud de la crête piézométrique de Taïba Ndiaye (NP = 25 m) à Bendiouga (NP = 3m) au Nord ;
- du dôme à la latitude de Mékhé, passant Tawa Fall (NP = 14m) jusqu'à Fass Boye (NP = 9.5 m) ;
- au Sud, quelques piézomètres situés dans la zone des ICS (Keulène) et à l'Est des forages de la SDE (Kébémér).

Les piézomètres de Keulène et Kébémér mettent en exergue les dépressions piézométriques occasionnées par les pompages des deux compagnies, ICS et SDE. Les forages de la SDE ne présentent pas de risque à court et moyen terme pour GCO du fait qu'ils sont situés sur le côté opposé du dôme piézométrique, à une distance d'environ 40 km de la mine.

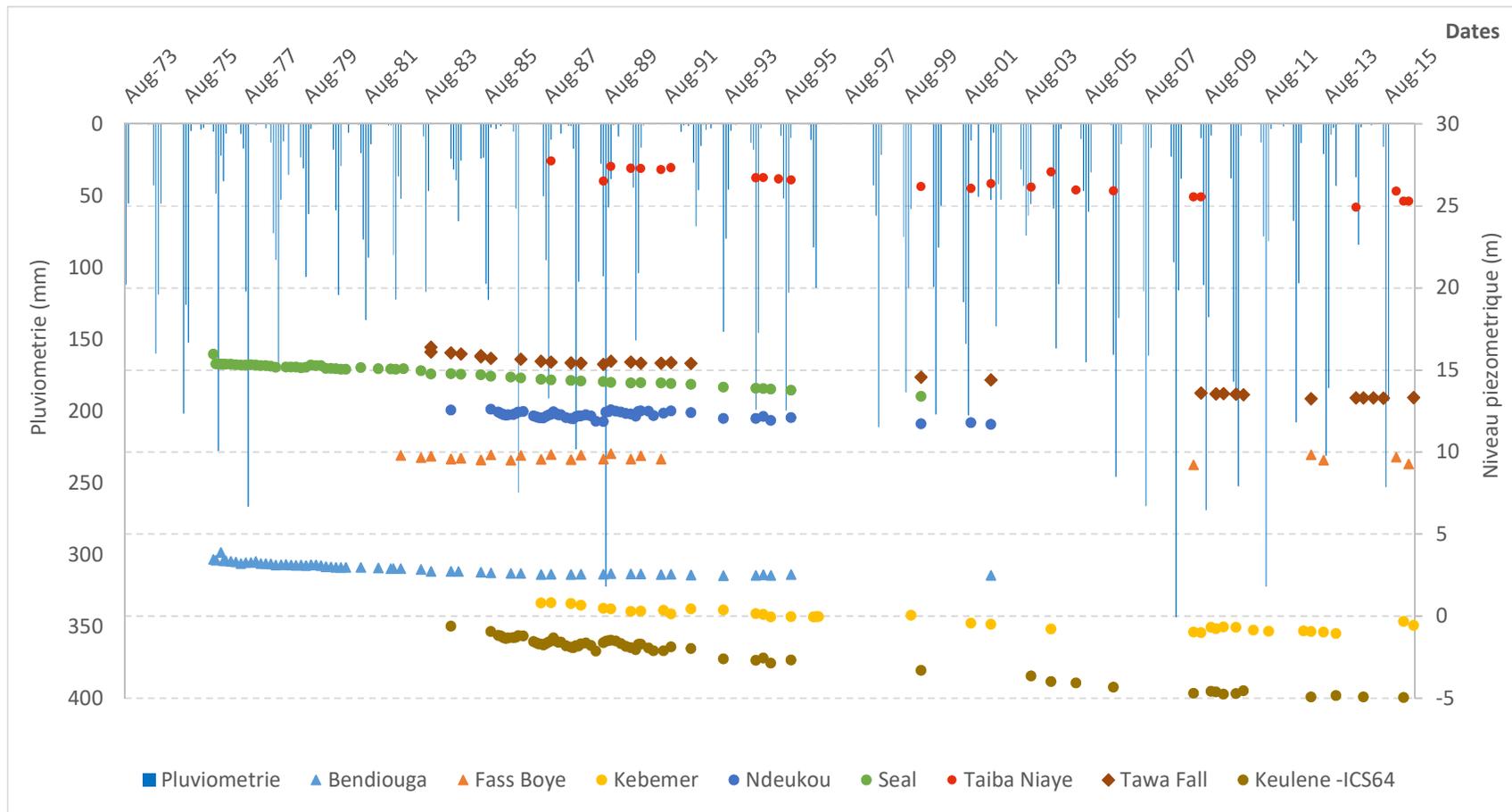


Figure 53 : Graphe bi-chronologique des pluies mensuelles et des évolutions piézométriques

Tous les piézomètres montrent une baisse depuis la période sèche des années 70 à nos jours. Depuis 1987, le dôme piézométrique a connu une baisse de 2.5 mètres à Taïba et à Tawa Fall. Durant les trente dernières années, Fass Boye et Ndeukou situés sur le flanc Ouest du dôme montrent une relative stabilité du niveau piézométrique. Le piézomètre de Fass Boye est celui du MHA le plus proche de l'exploitation de la mine de Diogo, à environ 5 km.

En dehors des piézomètres situés aux alentours du dôme (Taïba Ndiaye et Tawa Fall), le graphe témoigne dans l'ensemble, d'une relative stabilité des niveaux piézométriques de la nappe des sables depuis 2007. Ceci s'explique en grande partie par la reprise pluviométrique observée depuis 2009.

Par ailleurs, une baisse généralisée est observée sur les courbes de 1975 à 2009. Cette situation confirme ainsi l'existence d'un régime transitoire de la nappe durant cette période.

XI.1.2.3 Variations saisonnières et mensuelles

Les données de suivi mensuel piézométrique de la zone minière de Diogo ont permis de tracer les courbes de variations piézométriques entre 2011 et 2016 (FIGURE 54). Les piézomètres représentatifs ont été reportés en fonction des zones et de la progression de la drague :

- zone Sud-est de la zone minière, également site de démarrage de l'exploitation : DGPZ01 à DGPZ016 ;
- zone Centre : DGPZ059 à DGPZ068 ;
- zone Nord-Centre à Nord-Ouest : DGPZ099 à DGPZ0108.

Ces zones permettront d'apprécier l'effet de la recharge artificielle induite par les terrils par rapport à celle d'origine pluviale.

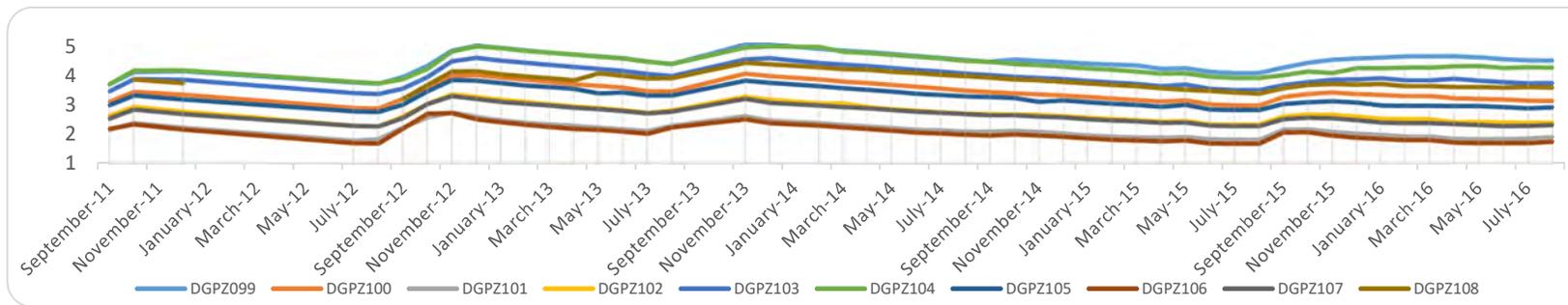
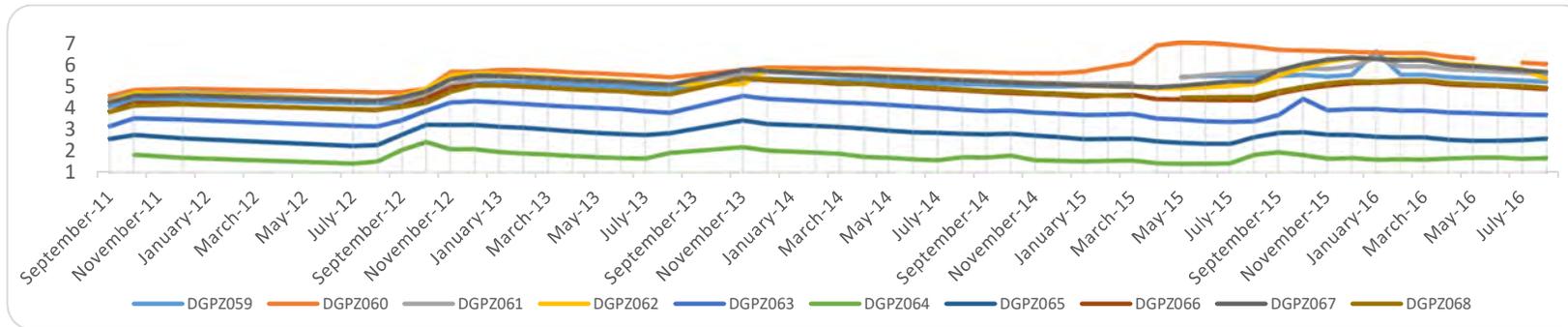
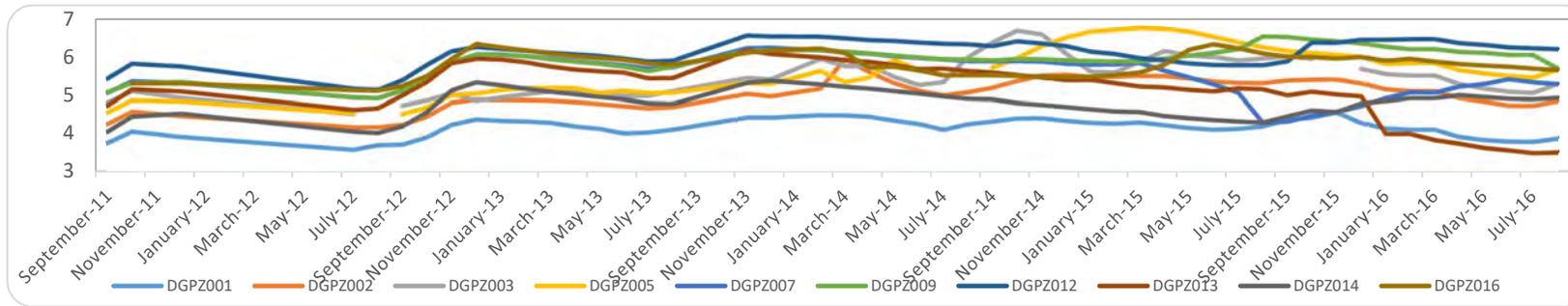


Figure 54 : Variation piézométrique de la nappe superficielle dans la zone minière de Diogo

Les courbes de la zone de démarrage de la mine montrent une tendance saisonnière assez précise. Les eaux d'infiltration efficace atteignent la nappe dès le mois d'Août et les niveaux de hautes eaux sont enregistrés en Novembre. Ce court délai d'infiltration s'explique par la proximité de la nappe par rapport à la surface du sol et aussi par la bonne perméabilité des sables dunaires. On peut aussi noter d'une manière générale, la remontée des eaux de la nappe durant ces cinq dernières années. Autour de la zone d'exploitation, les eaux fluctuent tout en gardant une certaine augmentation de niveau allant jusqu'à une hausse de 1.8 mètres. Les sections en cloche des courbes expriment l'effet des infiltrations en provenance des terrils alors que les creux sont engendrés par les pompages des forages recyclage.

La zone centre affiche la même tendance saisonnière enregistrée par les piézomètres de la zone Sud- Est entre 2011 et mars 2014. Au-delà de cette période, ces courbes continuent leur baisse jusqu'en Juillet 2015 avant de remonter légèrement avec quelques pics pas trop importants. Elles confirment la faiblesse de la pluviométrie annuelle de 2014 d'où l'absence de la remontée habituelle des eaux de la nappe au mois de Novembre. En plus, ces courbes montrent l'effet de la recharge à partir des terrils de façon timide avec très peu de fluctuations. Ceci est dû à leur position plus éloignée de la passe minière.

La zone Nord Centre - NO montre des variations saisonnières de la piézométrie avec un bombement périodique en Novembre. Les piézomètres plus à l'Ouest (DGPZ105 – DGPZ108), proches du rivage, donc plus éloignés de la passe minière semblent conserver la tendance saisonnière. Ils n'enregistrent pas encore l'effet des flux d'infiltration induits par la mise en dépôt des terrils. Par contre, les piézomètres plus proches (DGPZ099, DGPZ100, DGPZ103 et DGPZ104) montrent un maintien ou une augmentation continue du niveau piézométrique au-delà du mois de Novembre habituel. Cette allure piézométrique en augmentation progressive de Septembre 2015 à Juillet 2016, est le reflet de la propagation des flux d'infiltration en provenance du bassin et des terrils : il s'agit d'une recharge artificielle de la nappe supérieure.

XI.1.2.4 Variation journalière et les pompages superficiels

Les graphes des chroniques journalières des débits pompés par les forages de recyclage (CB) et celles des niveaux piézométriques correspondants (PzCB) donnent une représentation assez complète du processus de récupération des flux d'infiltration issus de la mise en dépôt des terrils (FIGURE 55):

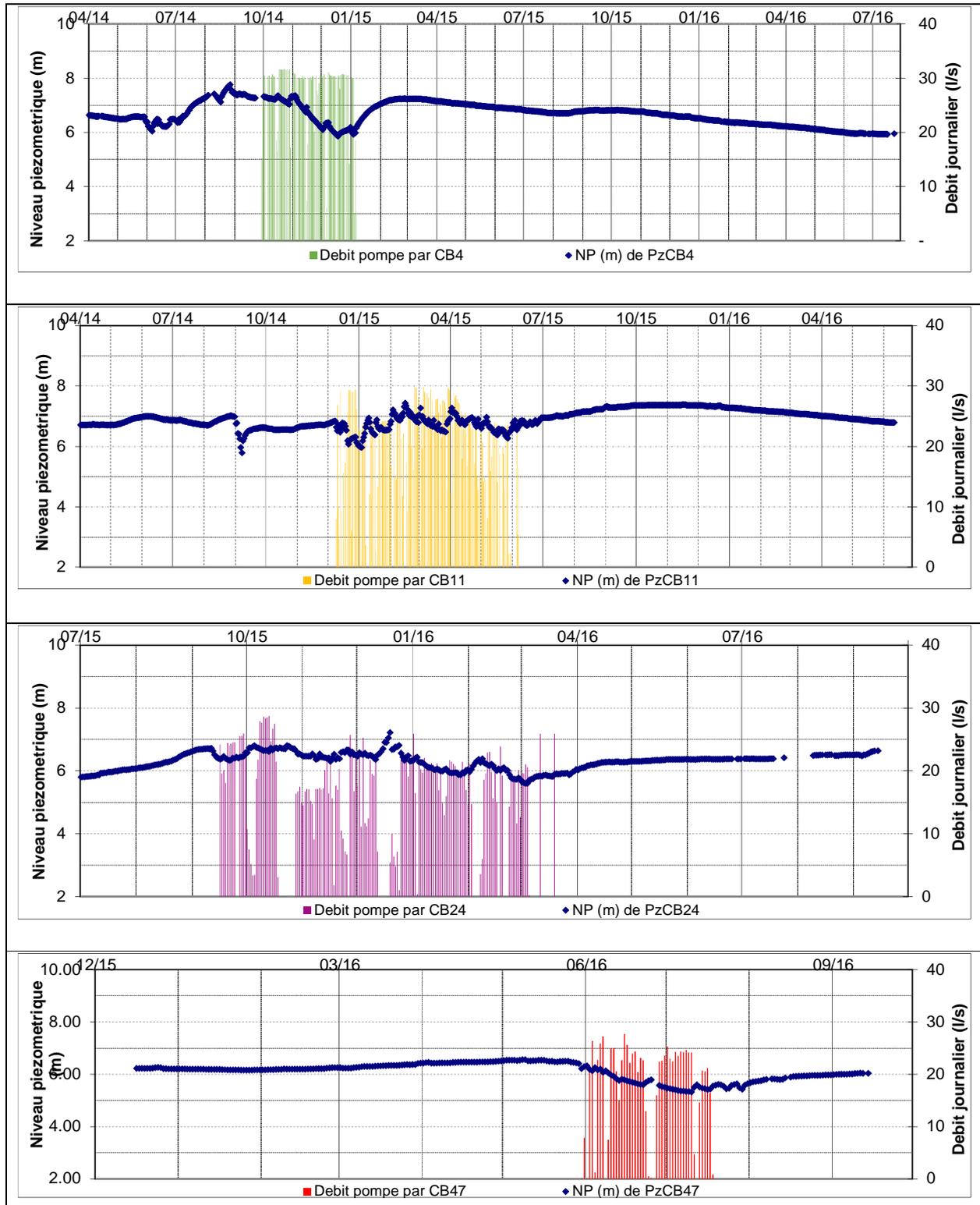


Figure 55 : Chroniques journalières des débits pompés (CB) et des niveaux piézométriques (PzCB)

Les courbes piézométriques, en plus de matérialiser l'avancement du bassin d'extraction et des dépôts de terrils, montrent la remontée très importante de la nappe aux environs immédiats de la passe minière, suivie d'une baisse. Le processus peut être décrit comme suit :

- Mise en dépôt des terrils ;
- Propagation des flux d'infiltration provenant des terrils sur une longueur moyenne de 1 km ;
- Rehaussement du niveau de la nappe supérieure au voisinage de la mine jusqu'à environ +0.5 m (seuil de rabattement autorisé par les licences d'exploitations des forages de recyclage) et allant parfois jusqu'à + 1.20 mètres ;
- Déclenchement des pompages de recyclage ;
- Baisse du niveau de la nappe jusqu'en -0,5 m du niveau statique initial des piézomètres ;
- Arrêt des pompages de recyclage ;
- Remontée du niveau dynamique vers le niveau statique.

Il faut noter, par ailleurs, le bénéfice de recyclage qui permet de décongestionner les extractions de la nappe maastrichtienne en récupérant jusqu'à 700000 m³ d'eau par mois (FIGURE 56). L'autre avantage est la maîtrise du risque environnemental et économique qui surviendrait en cas d'inondation de la zone juxtaposée des Niayes, occupée par les maraichers.

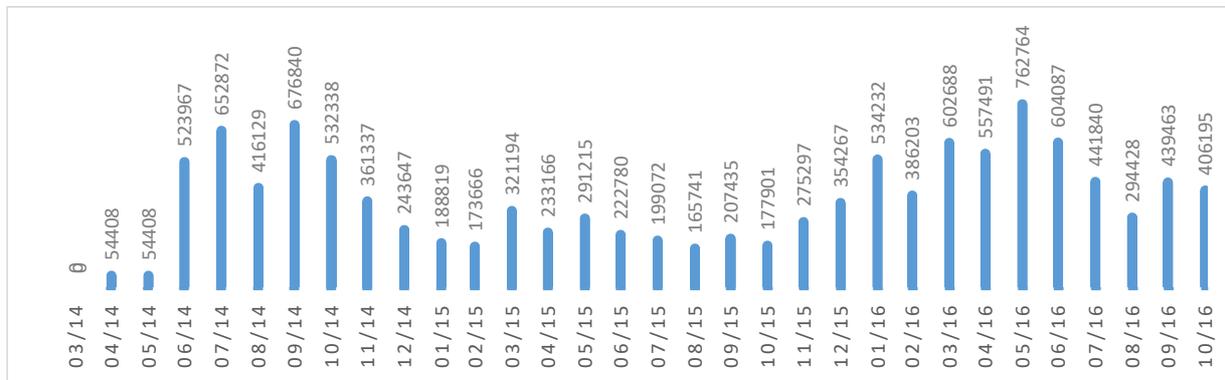


Figure 56 : Volumes mensuels d'eau recyclés par les forages superficiels (1000 m³)

XI.1.2.5 Evolution journalière du bassin de dragage

Le niveau du bassin de dragage reste un facteur clé de la production. Ainsi, il fait l'objet d'un suivi journalier. En effet, le niveau piézométrique optimal du bassin de dragage est variable le long de la passe minière. Il dépend des facteurs exogènes liés à la production et à la localisation des meilleurs teneurs en minéraux lourds.

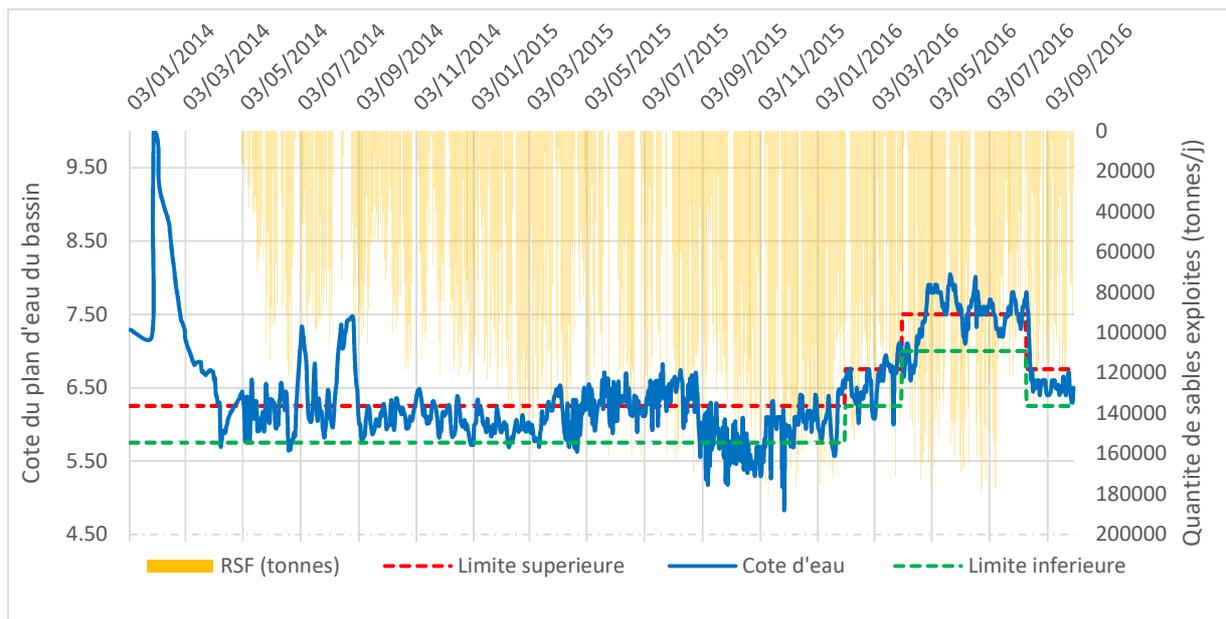


Figure 57 : Evolution du niveau piézométrique du bassin par rapport à la production

La courbe de niveau du bassin montre quatre tendances (FIGURE 57):

- **De janvier à Mars 2014**, le niveau monte très haut jusqu'à atteindre la côte + 10 m. IGN et redescend assez rapidement à la côte + 6 m après deux mois. Un volume de 500000 m³ d'eau stockée dans une cuvette imperméabilisée a été déchargé dans le bassin en l'espace de 48 heures pour permettre à l'usine de concentration de flotter. C'est la phase de mise en eau du bassin de dragage.
- **De Mai 2014 à Décembre 2015**, c'est la phase de démarrage et d'accélération de la production. Les niveaux d'eau du bassin variaient entre la côte + 5.75 m et la côte + 6.25 m. Selon le rythme de la production, accéléré ou ralenti par des pannes, le niveau du bassin connaît parfois des variations de presque 1 m.
- **Entre Janvier et Août 2016**, c'est le chemin retour de la drague, 2^{ème} passe minière jouxtant la 1^{ère} par l'Ouest. Dans la partie Nord, le niveau du bassin est resté très élevé variant généralement autour de la Côte + 7.5 m. Ceci, malgré le fait que seul un forage profond était en train d'être pompé alors que la production était à son maximum. Ce paradoxe est justifié par le flux très important d'eau en provenance du dôme des terrils adjacents.
- **A partir de fin Août 2016**, le niveau du bassin redescend à la côte + 6.5 m du fait de l'éloignement du bassin du dôme et sa déviation vers la partie adjacente aux Niayes où le niveau piézométrique est de + 6.5 m.

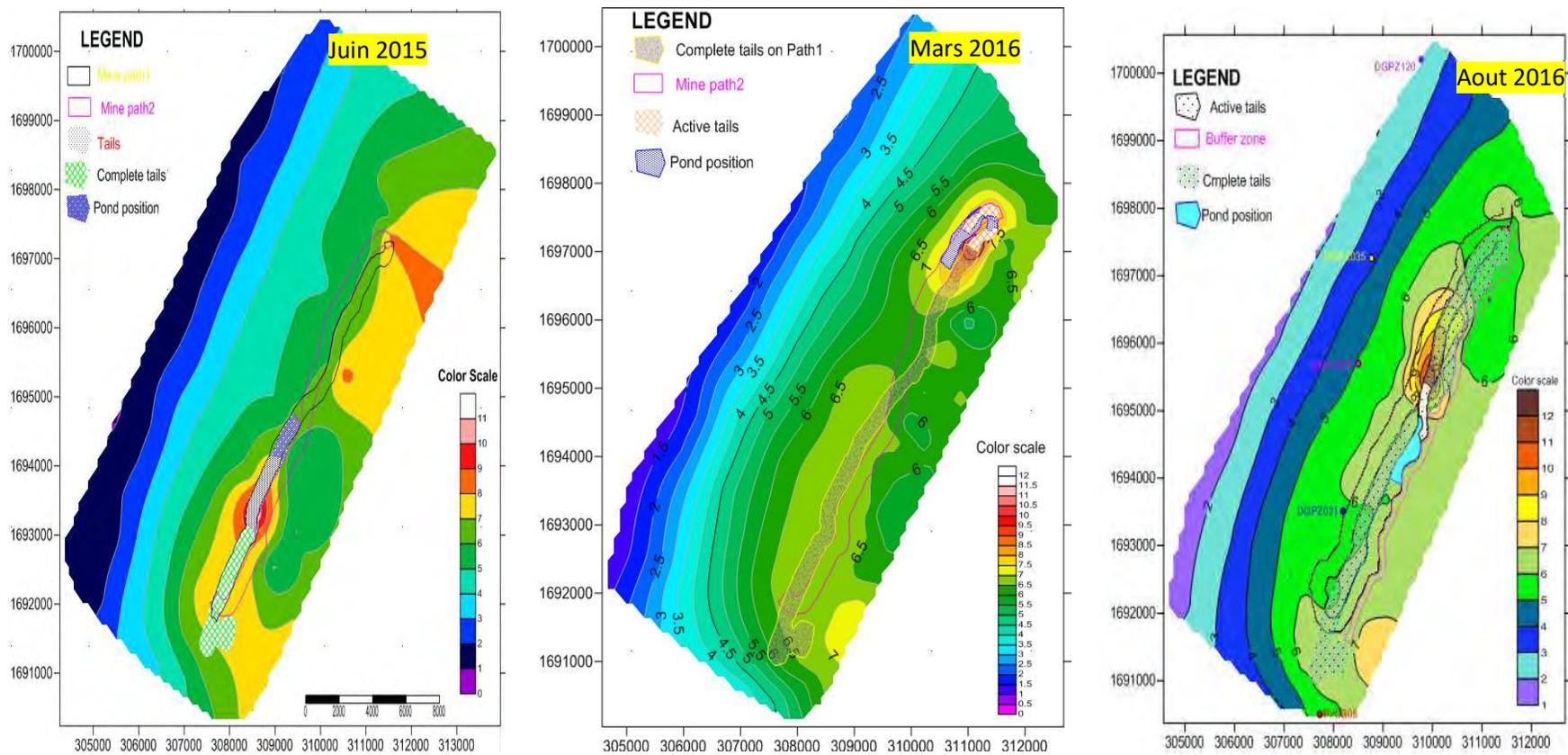


Figure 58 : La piézométrie locale de la zone minière de Diogo suivant l'évolution du bassin de dragage

XI.2 Nappe du Maastrichtien

XI.2.1 Simulation des pompages profonds

Différents scénarii de pompage pour l'approvisionnement en eau du bassin de dragage ont été simulés en utilisant l'application AQTESOLV. La simulation a consisté à importer dans le logiciel les données des pompages d'essai de longue durée (débit, rabattement) effectués sur chaque forage et les faire démarrer en au même moment. Le nombre de forages simulés s'est fait selon les combinaisons opérées au niveau de GCO. Les résultats de ces simulations vont permettre de prévoir la typologie du rabattement global de la zone de captage après 4 jours de pompage continu. Pour l'appréciation des résultats, le piézomètre profond DPz1 (X = 305695, Y = 1693124) situé à l'Ouest de la mine servira de repère. Il est distant du forage le plus proche DW4 de 3400 mètres.

XI.2.1.1 Scenario1 : tous les 11 forages en exploitation pendant quatre jours

Cette simulation consiste à pomper simultanément l'ensemble des forages pendant quatre (04) jours ; ce serait le cas extrême de pompage qui n'est pas envisageable dans la programmation de la mine. La distribution des rabattements du Maastrichtien dans la zone de Diogo montre un rabattement est de 55 m en moyenne à la verticale des forages.

Le rayon d'influence correspondant dépasse les 5 km (FIGURE 59).

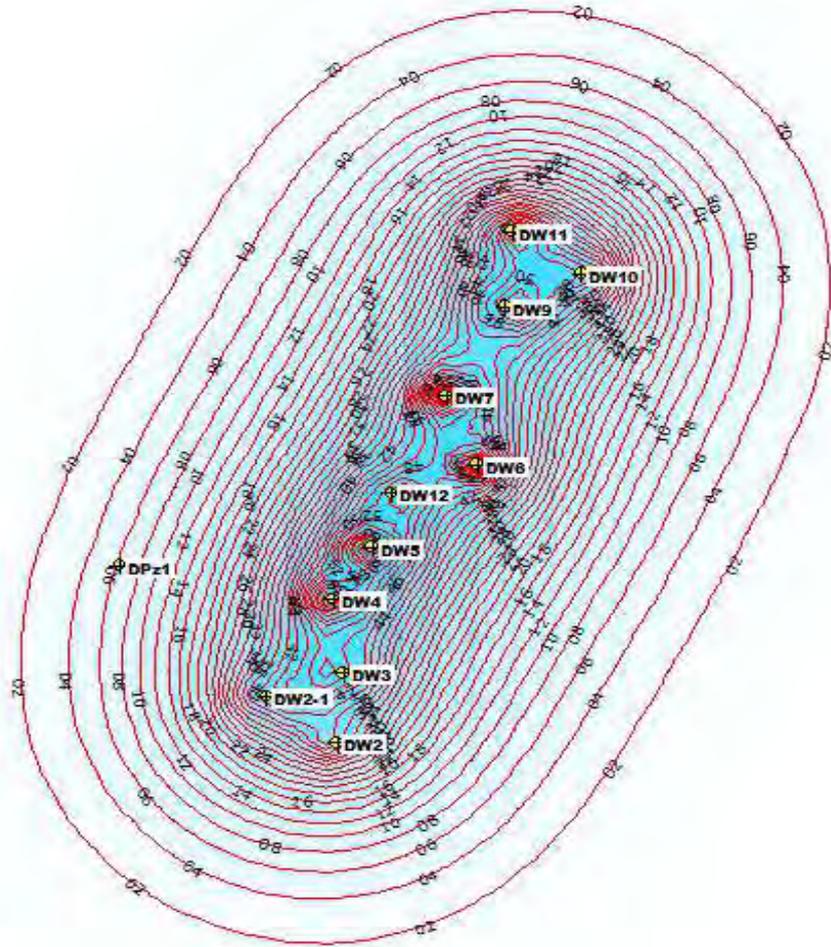


Figure 59 : Carte de rabattement des 11 forages en exploitation du scénario 1

Ce scénario montre un rabattement de 6 m au niveau de DPz1 qui est à 1500 m de l'océan. Le rayon d'influence se propagerait vers l'intérieur du domaine maritime. En plus de cela, les pentes de rabattement sont trop fortes créant ainsi un véritable couloir de dépression long de 7 km, large de plus de 6 km de pente 6/50.

Les deux scénarii suivants représentent les situations planifiées.

XI.2.1.2 Scénario 2 : 5 forages sont en production

Ce cas de figure est le plus fréquent. Conformément aux exigences de la licence d'exploitation, les forages de production sont alternés et pas consécutifs. Les courbes des forages simulés pour ce scénario sont représentées ci-dessous avec la carte des rabattements induits (FIGURE 60) :

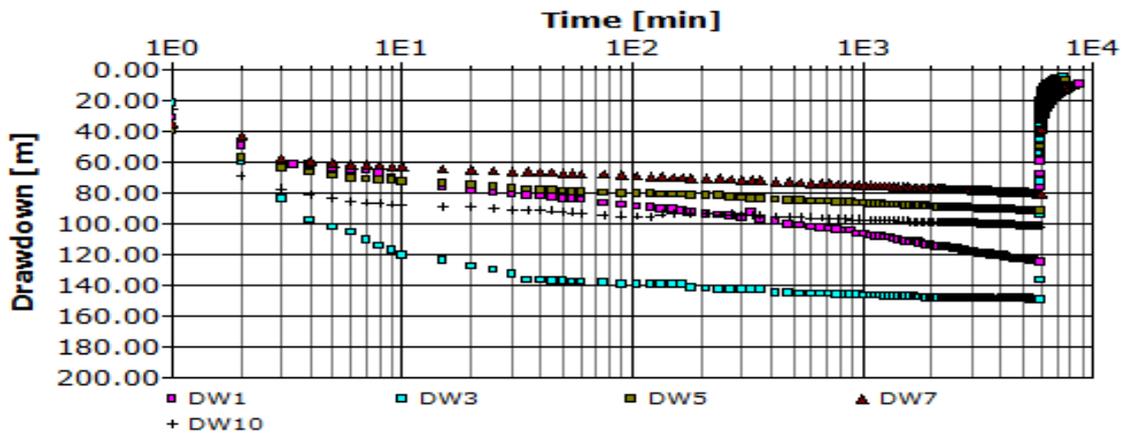


Figure 60 : Courbes de rabattement des forages du scenario 2

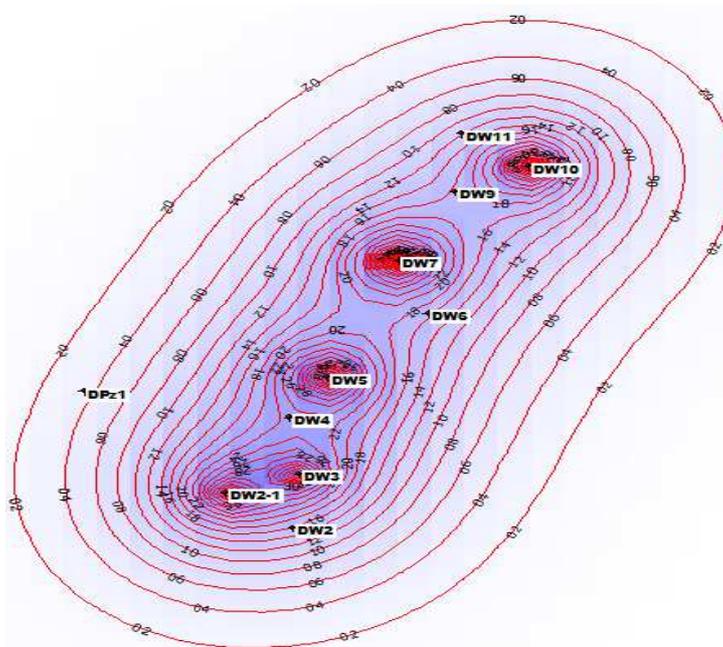


Figure 61 : Carte de rabattement des 5 forages du scenario 2

Pour ce cas-ci, on observe un rabattement 3.5 m au niveau de DPz1 et les pentes des flancs du couloir de dépression sont moins marquées. Le rayon d'influence est plus réduit (FIGURE 61).

XI.2.1.3 Scenario 3 : 6 forages en exploitation conformément à la limite autorisée

Ce scenario se réalise dans 40% des cas de la vie de la mine. Il constitue aussi la limite autorisée de 6 forages en production.

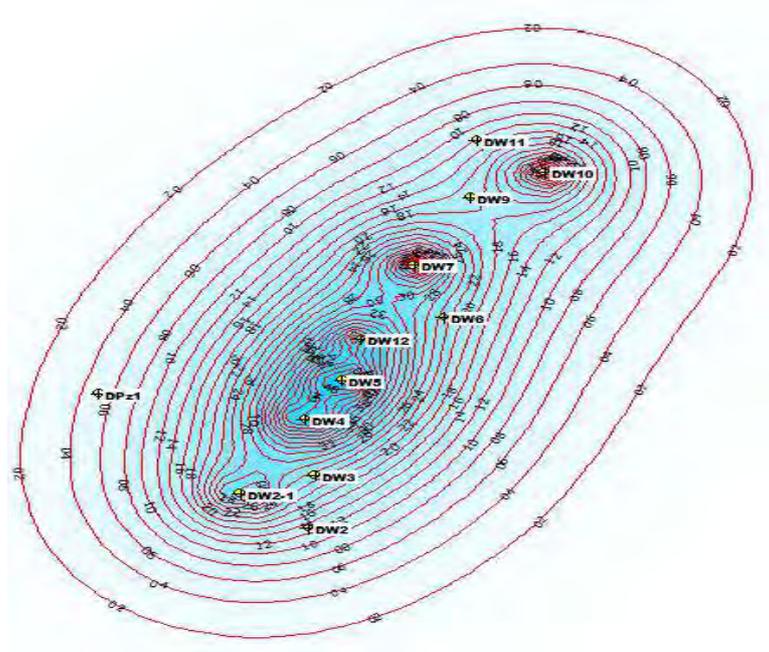


Figure 62 : Carte de rabattement des 6 forages du scenario 3

Le scenario 3 montre un rabattement de 5 m au niveau de DPz1 et les des flancs du couloir de dépression se trouvent plus raides que ceux du scenario 2 (FIGURE 62).

XI.2.2 Suivi de la nappe profonde dans la zone minière

XI.2.2.1 Suivi qualitatif

Au niveau de la zone minière de Diogo, deux piézomètres profonds ont été installés DPz1 et DPz2. Ils sont équipés d'enregistreurs multiparamétriques automatiques qui mesurent la piézométrie, la pression, la température, la conductivité électrique et la salinité. Ces enregistreurs de modèle AquaTroll 200 ont 200 m de câble. Cependant, il est arrivé des périodes d'absence de données suite à des problèmes d'ordre matériels.

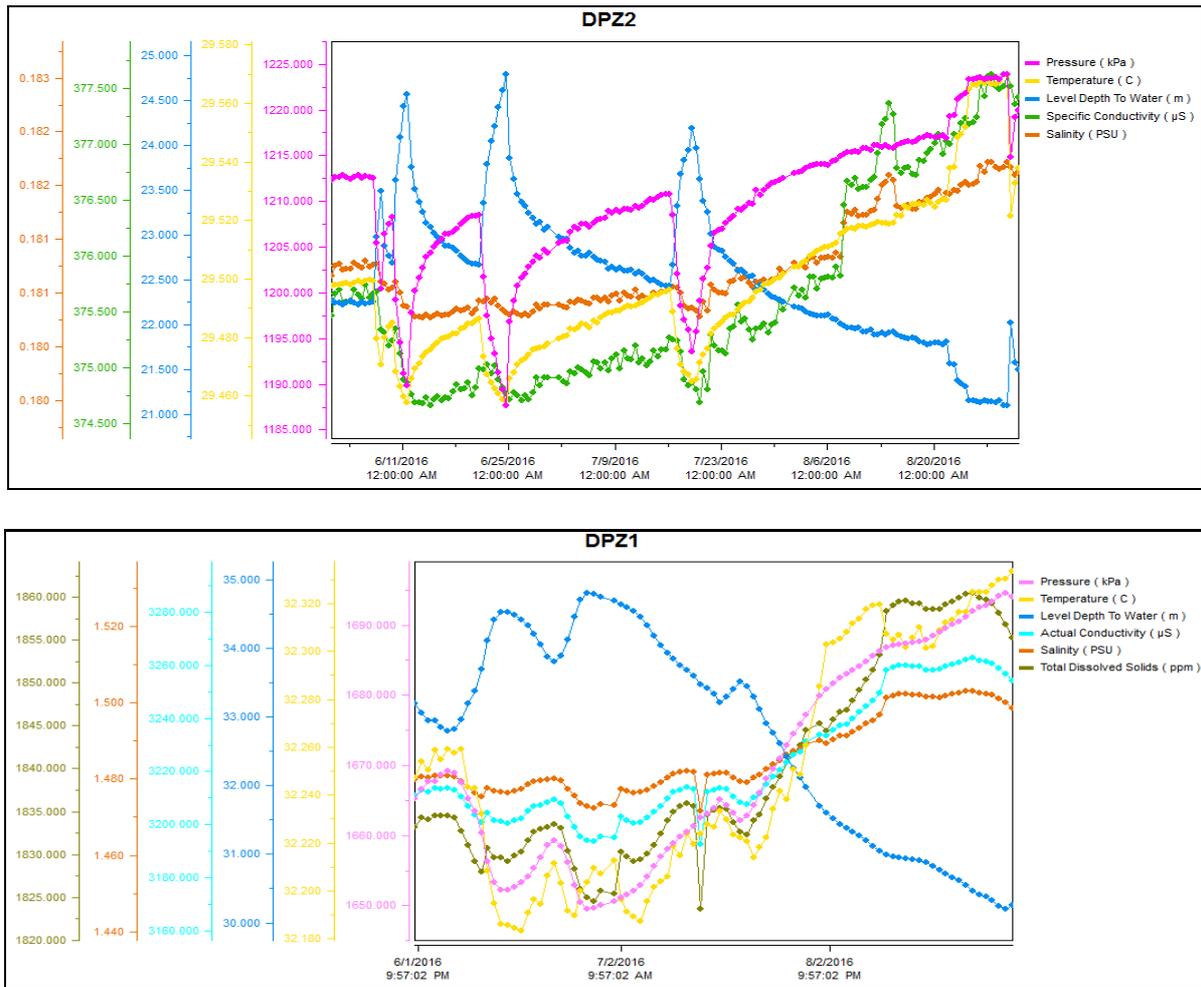


Figure 63 : Impacts qualitatifs des débits des pompages sur les piézomètres DPz1 et DPz2

*NB: 1PSU (Practical Salinity Unit) # 1 g/l

Les trois paramètres que sont la salinité, la minéralisation et la conductivité montrent une nette similitude et dénotent une certaine correspondance sur la période de Juin à Aout 2016 (FIGURE 63). Ils ont tous pratiquement la même allure avec la température et la pression mais restent opposés à la variation du niveau d'eau. Ainsi, il est noté que lors des pompages, la qualité de l'eau s'améliore par renouvellement. Pendant les arrêts, la température et la minéralisation augmentent légèrement soit par dissolution ou évaporation partielle de l'eau de la colonne. La courbe de niveau d'eau du piézomètre DPz2 proche du forage DW4 montre très clairement le rythme de pompage de DW4 avec les phases de descente très brutale et de remontée très lente.

Les courbes d'évolution piézométrique et de minéralisation au niveau de DPz1 et DPz2 sur une plus grande période de 2014 à 2016 gardent approximativement la même allure (FIGURE 64). Corrélativement, les

valeurs mesurées de TDS montrent également une tendance globalement constante entre 1800 et 1850 ppm caractéristique d'une eau s'approchant du pôle saumâtre.

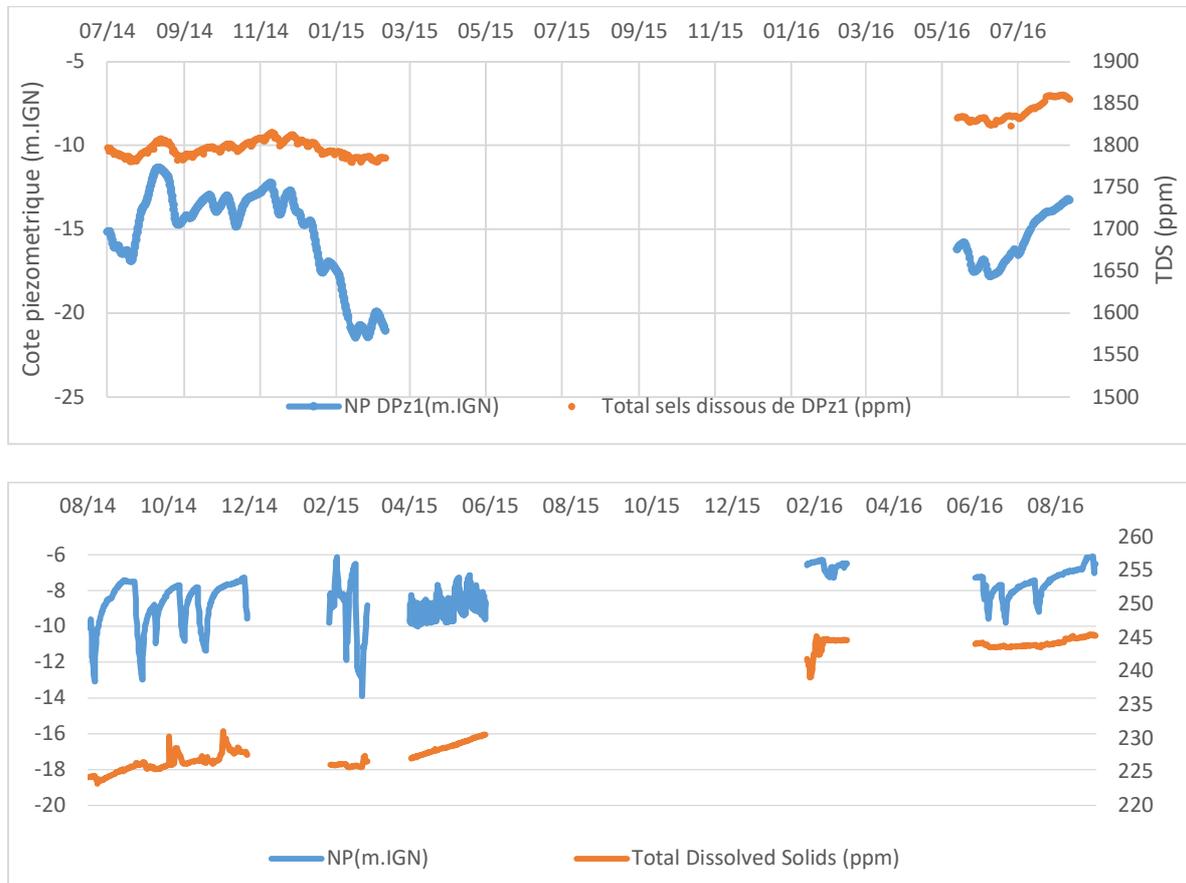


Figure 64 : Variations piézométriques (haut) et de minéralisation (bas) de DPZ1 et DPZ2

XI.2.2.2 Suivi quantitatif

Le système de suivi de la nappe profonde du Maastrichtien dans la zone minière de Diogo intègre, en plus des deux piézomètres profonds, les forages d'exploitation eux-mêmes. Ces derniers sont équipés de débitmètres et de sondes de niveau. Comparée aux données des chroniques de débits du forage DW4, l'allure de la courbe piézométrique de DPZ2 semble épouser assez nettement le rythme de pompage de ce dernier (FIGURE 65). Le débit de pompage moyen est de 5500 m³/j. L'influence y est évidente due à leur proximité. Bien que présentant des variations (pics et creux alternés), on observe une tendance vers un régime plus stabilisé entre Mars et Juin 2015. La courbe de DPz1 suit également l'allure de DW4 de façon un peu moins marquée.

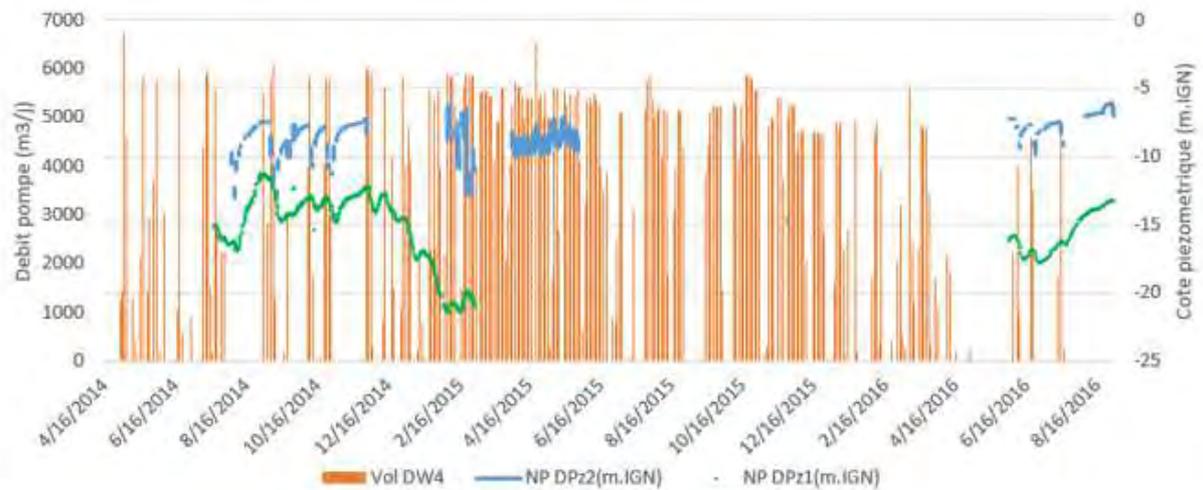


Figure 65 : Variation piézométrique (DPZ1 et DPZ2) par rapport au régime de pompage du forage DW4

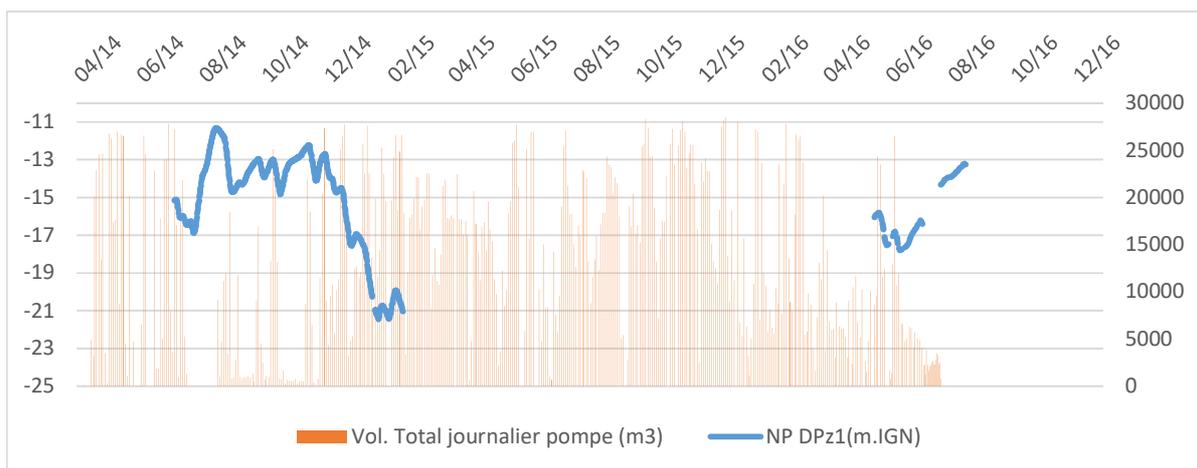


Figure 66 : Chronique des pompages globaux par rapport à la piézométrie observée sur DPz1

La chronique de DPZ1 distant d'environ 4 km à l'Ouest de la zone de la passe minière actuelle montre une allure qui épouse parfaitement le régime de pompage global (FIGURE 66). Tout d'abord, il y'a eu une période de fluctuation du niveau piézométrique entre le début de l'exploitation et la fin du mois de Décembre 2014 due à des arrêts fréquents liés à la phase de démarrage de la mine. Il s'en est suivie une baisse jusqu'en Mars 2016 correspondant à la période de montée progressive de la capacité d'exploitation qui a vu l'accélération des pompages pour l'approvisionnement en eau du bassin. Le rabattement engendré est de 8 m passant de la côte -15 à la côte -21 m. L'ampleur de ce rabattement de 6 m a dépassé les prévisions de la simulation des pompages profonds vus précédemment qui sont de 2 à 3 m. Ceci peut s'expliquer soit par une légère surestimation des paramètres hydrodynamiques ou bien témoigner tout simplement d'une certaine anisotropie de l'aquifère.

Les pompages maintiennent leur rythme jusqu'en Avril 2016 avec un volume journalier moyen variant entre 20000 et 29000 m³ d'eau avant de diminuer jusqu'en 5000 m³/j ; ce qui a permis à la nappe de remonter jusqu'à la côte -13 m. IGN en Août 2016.

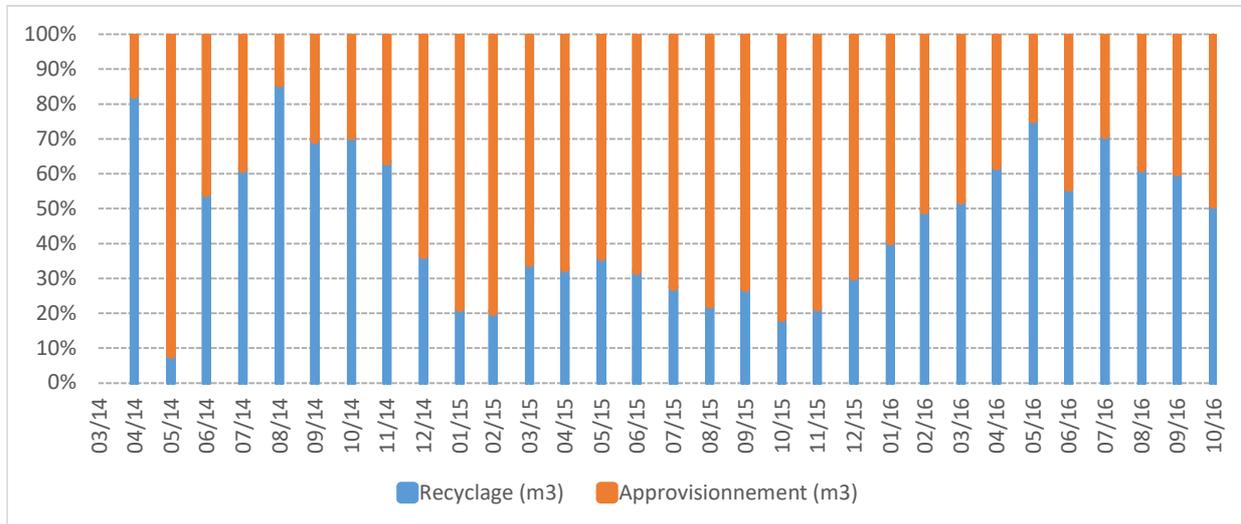


Figure 67 : Evolution du ratio mensuel entre les pompages profonds et superficiels

En termes de conclusion partielle, on peut retenir que tous les deux systèmes de pompage sont capitaux pour la survie de la mine. Les eaux d'infiltration récupérées par les forages superficiels, en termes de recyclage, ne suffisent pas pour le maintien de l'équilibre du bassin à cause, essentiellement, des pertes par évaporation et des infiltrations non récupérées. Ainsi, les forages profonds assurent un approvisionnement en eau permettant de combler le déficit du bassin. Ces eaux d'approvisionnement en provenance de la nappe maastrichtienne peuvent aller jusqu'à 80% lorsqu'il y'a un manque de productivité des forages de recyclage (FIGURE 67).

Chapitre XII. Recharge de la nappe superficielle

Cette partie est consacrée à la synthèse des résultats de recharge obtenus par les différentes méthodes appliquées aux quatre sous zones minières du domaine : Mboro, Fass Boye, Diogo et Lompoul.

XII.1 Estimation qualitative de la recharge

Les courbes d'humidité pondérale et de fraction fine des profils réalisés dans la zone non saturée montrent globalement une faible teneur en eau dans les premiers 6 mètres de sol à l'exception du site de Mboro où la zone capillaire est atteinte à partir de 3 m de profondeur (FIGURE 68).

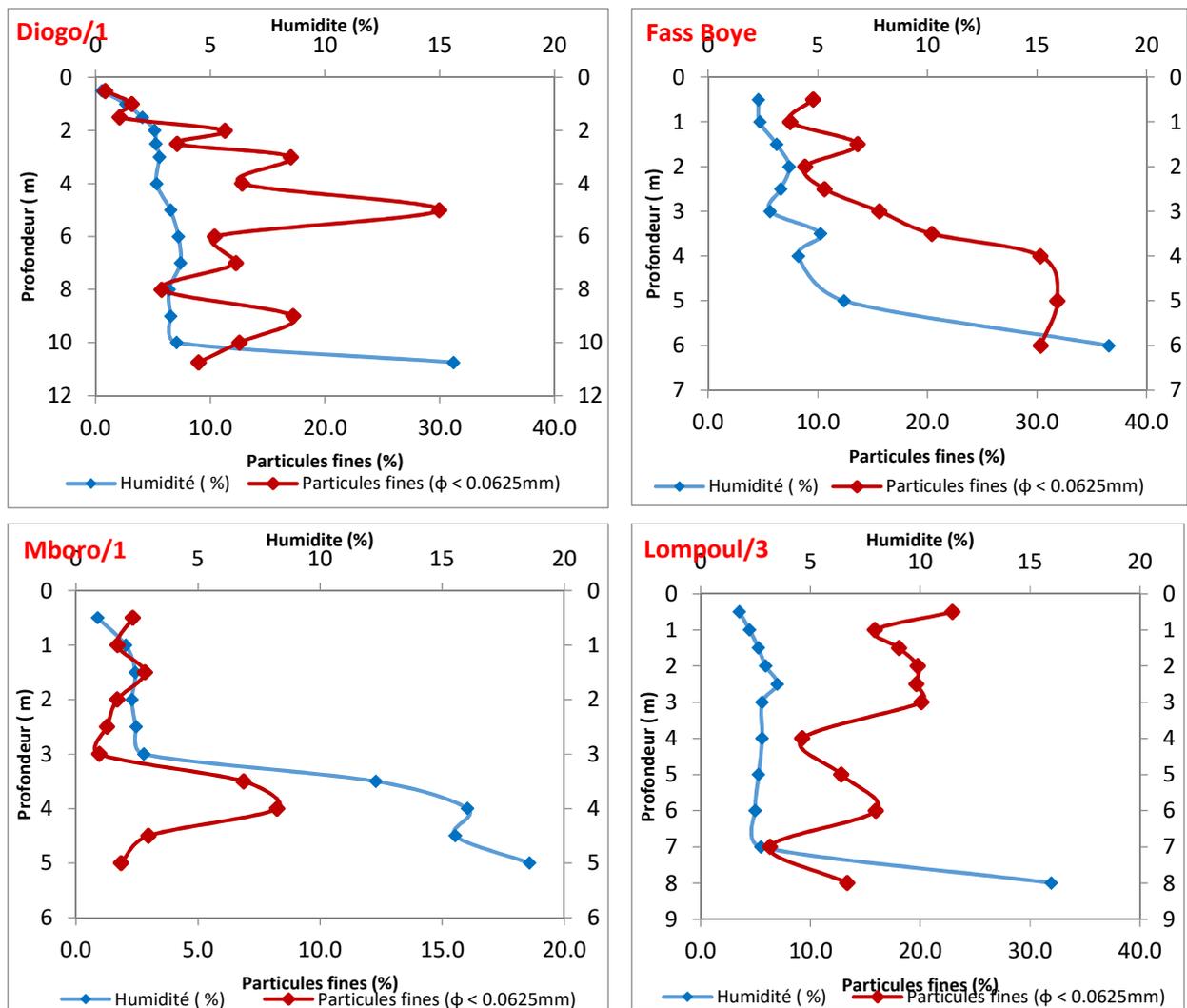


Figure 68 : Evolution de l'humidité et de la fraction fine en fonction de la profondeur

Ces faibles valeurs d'humidité peuvent s'expliquer par l'effet de la reprise évaporatoire. Dans la partie non saturée, les courbes d'humidité et de fraction fine gardent des allures un peu similaires. On observe une

relation entre le pourcentage de fines et l'humidité. Cependant, cette influence reste dominée par l'effet de l'évaporation.

XII.2 Estimation quantitative de la recharge

XII.2.1 Méthode du bilan hydrique par Turc et Thornthwaite

La recharge via les précipitations s'appuie sur un bilan hydrologique qui vise à établir la relation entre les entrées et les sorties en eau d'une unité hydrologique définie pendant un temps donné. Rappelons l'équation du bilan se définit comme suit :

$$P = I + R + ETR + \Delta S$$

L'évapotranspiration réelle (ETR) représente la perte réelle en eau d'un sol par évaporation directe et par transpiration de son couvert végétal. Quand il y'a suffisamment d'eau dans le sol, elle atteint sa valeur maximale qui correspond à l'évaporation potentielle (ETP). Sa valeur réelle est très difficile voire impossible à déterminer directement du fait de la complexité du comportement biologique des végétaux et de la diversité des sols (Michel, 1973). On l'évalue par la méthode de Thornthwaite, en faisant la différence entre la pluie (P) et l'ETP. Deux cas de figures se présentent :

- $ETP \leq P$, alors $ETR = ETP$. Cette limite est atteinte lorsque les végétaux et l'évaporation peuvent puiser sans contrainte dans les réserves en eau du sol. Dans ce cas la réserve utile du sol (RU) se reconstitue et si la hauteur de pluie est suffisamment importante, la nappe est réalimentée, on parle alors d'infiltration efficace (Ie). La RU est la quantité d'eau retenue dans les premières tranches du sol qui permet de couvrir l'évapotranspiration en saison sèche. Elle varie en fonction du type de sol (Castany, 1982).
- $ETP > P$, il y'a déficit pluviométrique. La précipitation (P) est insuffisante pour satisfaire l'ETR. Le déficit sera totalement ou partiellement comblé par le stock d'humidité initial du sol. Il est calculé à partir de l'humidité volumique en fonction de la profondeur.

Chaque type de sol a une capacité de stockage en eau maximale (CSE). Elle détermine le volume maximal d'eau retenue contre les forces de gravité dans un sol, sur la profondeur utilisable maximale. La CSE doit être satisfaite avant toute infiltration. On formule ainsi l'équation :

$$CSE = RU + \text{Point de flétrissement permanent} \quad (49)$$

Le point de flétrissement permanent correspond à la quantité minimale d'eau encore compatible avec la vie des végétaux (Gaye C.B., 1990). Au Sénégal, le CNRA (Centre national de Recherches Agricoles) a estimé les valeurs de RU du sol entre 57 et 96 mm (Dieng, 1987). Dieng (1990) a estimé que la réserve utile peut atteindre 350 mm pour les sols sableux des dunes du Quaternaire.

Dans le secteur d'étude, les trois types de sol identifiés ont les valeurs en CSE suivantes (USAID, 1986):

- Sols minéraux bruts, peu évolués se trouvant dans la bande occidentales, CSE = 100 mm ;
- Sols ferrugineux tropicaux plus ou moins drainés occupant la partie est, CSE = 150 mm ;
- Sols hydromorphes localises dans les dépressions inondables, CSE = 200 mm.

Pour le calcul de l'ETP, au Sénégal et sur toute la zone aride à semi-aride, la formule de Turc décrite dans la première partie de cette étude, est reconnue par différents auteurs (Dieng, 1987; Gaye C.B., 1990; Tandia, 1990) comme donnant de bons résultats dans le calcul de l'ETP.

Le ruissellement (R), dans le secteur d'étude, peut être négligé car le sol est sableux et le réseau hydrographique presque inexistant. La quantité d'eau en ruissellement va finir par être infiltrée ou évaporée. Alors, l'équation du bilan devient :

$$Ie = P - (ETR + \Delta S) \quad (50)$$

Les deux principales méthodes du bilan hydrique ont été appliquées : méthodes de Turc (équation 1) et de Thornthwaite. L'estimation de la recharge est faite en tenant compte de ces différents types de sols (TABLEAU 18).

Tableau 17 : Le récapitulatif de la recharge annuelle par les méthodes de Turc et Thornthwaite

METHODE		TURC		THORNTHTHWAITE	
Annee	Termes	Mboro-Diogo	Lompoul	Mboro-Diogo	Lompoul
2010	P (mm)	555	444	555	444
	ETP (mm)	1553	1732	1054	1081
	ETR150	498	445	473	445
	STOCK100	174	54	203	165
	STOCK150	274	54	303	190
	STOCK200	374	54	427	190
	le100 (mm)	106	0	131	13
	le150 (mm)	56	0	81	0
le200 (mm)	6	0	31	0	
2011	P (mm)	528	349	528	349
	ETP (mm)	2002	1732	1037	1065
	ETR150	529	350	500	350
	STOCK100	182	64	247	149
	STOCK150	234	64	411	157
	STOCK200	234	64	511	157
	le100 (mm)	26	0	79	4
	le150 (mm)	0	0	29	0
le200 (mm)	0	0	0	0	
2012	P (mm)	643	371	643	371
	ETP (mm)	2009	1812	1058	1079
	ETR150	462	371	374	371
	STOCK100	200	18	251	139
	STOCK150	336	18	401	145
	STOCK200	486	18	584	145
	le100 (mm)	231	0	319	5
	le150 (mm)	181	0	269	0
le200 (mm)	131	0	219	0	
2013	P (mm)	436	312	436	312
	ETP (mm)	1991	1771	1058	1082
	ETR150	436	311	378	311
	STOCK100	188	0	200	116
	STOCK150	222	0	306	116
	STOCK200	222	0	424	116
	le100 (mm)	34	0	108	0
	le150 (mm)	0	0	58	0
le200 (mm)	0	0	8	0	
2014	P (mm)	124	209	124	209
	ETP (mm)	2025	1783	1051	1075
	ETR150	123	209	123	209
	STOCK100	0	0	0	10
	STOCK150	0	0	0	10
	STOCK200	0	0	0	10
	le100 (mm)	0	0	0	0
	le150 (mm)	0	0	0	0
le200 (mm)	0	0	0	0	
2015	P (mm)	465	411	465	411
	ETP (mm)	1889	1836	1050	1078
	ETR150	451	411	366	364
	STOCK100	200	157	200	210
	STOCK150	257	157	344	310
	STOCK200	268	157	446	413
	le100 (mm)	61	0	146	97
	le150 (mm)	11	0	96	47
le200 (mm)	0	0	46	0	

Les résultats du bilan hydrique par les deux méthodes de Turc et de Thornthwaite montrent des valeurs de recharge qui passent du simple (par la méthode de Turc) au triple (par la méthode de Thornthwaite). Les valeurs de recharge mensuelle pour les deux méthodes sont récapitulées dans les annexes 1&2. Dans la

partie Sud de la zone d'étude, entre Mboro et Diogo, il y'a eu de l'infiltration selon les deux méthodes. Par contre, à quelques exceptions près, la recharge dans la partie Nord, aux environs de Lompoul, est négligeable. L'année 2012 constitue une exception avec une pluviométrie annuelle de 643 mm dans la zone Sud, ce qui a engendré une recharge variant entre 131 mm dans les sols hydromorphes à 231 mm dans les sols minéraux bruts peu évolués des dunes de sables éoliens. Cependant, les valeurs semblent excessives.

En dehors du pic de 2012, la valeur moyenne de la recharge dans la zone Sud, est de 17 mm dans les sols hydromorphes, 53 mm dans les sols tropicaux ferrugineux drainés de la zone est et 93 mm dans les sols minéraux éoliens. Toutefois, la recharge est en général très négligeable dans les sols ferrugineux lessivés dont la capacité au champ est estimée à 150 mm/mois. L'essentiel de cette recharge se passe entre les mois d'Août et Septembre. Il s'agit effectivement de la recharge saisonnière. Au-delà de cette période hivernale, les stocks se vident au profit de l'ETR ; il n'y a ni pluie ni infiltration. Ces résultats montrent aussi l'existence d'une variabilité climatique locale entre les zones Sud et Nord tant du point de vue de la pluviométrie que de l'infiltration.

Le tableau 17 montre aussi l'importance du type de sol et par conséquent de sa capacité au champ. Par exemple, pour l'année 2015, dans la partie Sud, l'infiltration varie de 0 pour les sols hydromorphes à 61 mm pour les sols bruts peu évolués.

Les valeurs moyennes annuelles de l'ETP calculées par la méthode de Thornthwaite sur toute la zone d'étude sont comprises entre 1050 et 1082 mm/an tandis que celles calculées par la méthode de Turc varient entre 1553 à 2032 mm. Cette méthode de Thornthwaite donne des valeurs de recharge beaucoup plus importantes que celles de Turc allant jusqu'à 319 mm en 2012, dans la zone de Mboro-Diogo ; ce qui semble élevée. Pour la zone de Lompoul, elle affiche des valeurs de recharge non nulle pour les sols minéraux bruts pouvant atteindre 93 mm en 2015. Par contre l'infiltration reste toujours nulle dans la zone Nord pour les sols hydromorphes.

Pour les sols tropicaux ferrugineux qui se trouvent dans la partie centrale et à l'est, occupant les 3/4 de la zone d'étude, les valeurs de recharge selon la méthode de Turc varient entre 0 et 6 mm, à l'exception de l'année 2012. Selon Thornthwaite, les valeurs tournent autour de 0 mm, 8 mm, 29 mm, 31 mm et 45 mm. Kaba (2017) a trouvé une valeur moyenne d'infiltration de 44mm dans ce secteur avec la même méthode. La valeur de la RU pour ces types de sols est de 100 mm, considérant la relation $\phi = 2RU \text{ max}$. Plusieurs auteurs dont Gaye (1990), Tandia (1990) ont fait des calculs d'infiltration sur des sols dont la RU= 100 mm. D'une manière générale, leurs résultats d'infiltration obtenus par la méthode de Turc restent dans les mêmes proportions. Ceux de Thornthwaite semblent être excessive surtout pour les sols de type minéraux bruts peu évolués. Ceci pourrait découler principalement des valeurs relativement faibles de l'ETP. En effet la formule de Thornthwaite est basée sur la température moyenne mensuelle et l'indice de température.

La durée d'insolation, l'indice des vents et l'humidité relative sont approchées par une valeur variant suivant l'ordre des mois. Ainsi, cette formule ne tient pas trop bien compte des variabilité et évolutions climatiques.

Considérant la période entre 2010 et 2015, les figures ci-dessous montrent un pic d'infiltration moyenne au mois d'août de 20 mm dans le secteur Sud et nulle pour la zone Nord. Partout, l'ETP est supérieur à l'ETR mais s'en rapprochent durant les mois d'Août et de Septembre. Le stock d'eau des sols atteint des valeurs maximales à partir du mois d'Août et se maintiennent durant le mois de Septembre. Dans la partie Sud, la pluie dépasse l'ETP aux mois d'Août et de Septembre, les stocks se constituent après la satisfaction de l'ETR dès le mois de juillet d'où un excédent qui commence déjà à contribuer à l'infiltration (FIGURE 69). Par contre, dans la zone Nord, la pluie moyenne atteignant à peine l'ETP qu'au au mois d'Août, est reprise par l'ETR et les réserves en eau du sol restent très en dessous de la capacité au champ. Ainsi, il n' y a aucune possibilité d'infiltration (FIGURE 70).

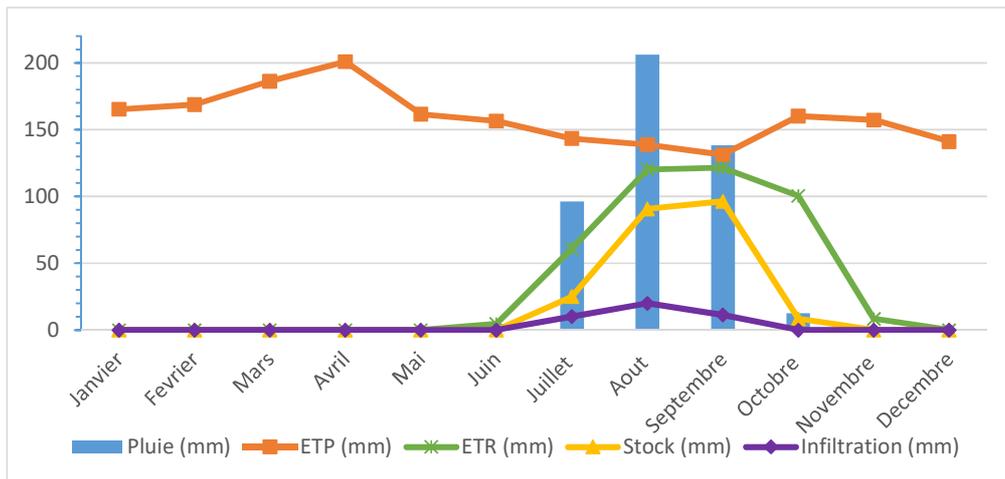


Figure 69 : Bilan hydrologique mensuel de la zone Sud par la méthode de Turc pour la période 2010 - 2015

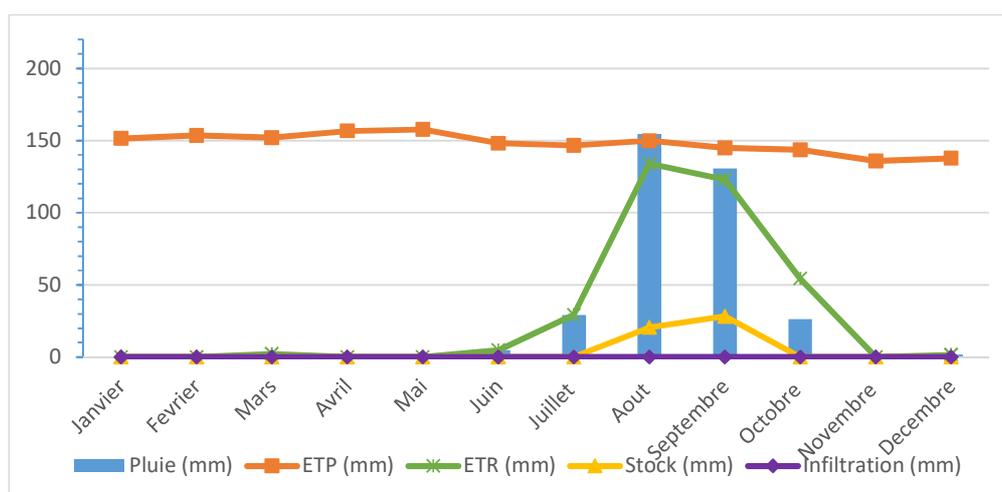


Figure 70 : Bilan hydrologique mensuel de la zone Lompoul par la méthode de Turc pour la période 2010 - 2015

Au vu de l'analyse comparative entre ces deux méthodes, celle de Turc semble fournir des estimations de recharge plus réalistes variant annuellement entre 0 mm, 11 mm et 56 mm maximum pour les sols ferrugineux tropicaux drainés. A l'échelle de la période quinquennale entre 2010 et 2015, la valeur de recharge moyenne est de 20 mm.

XII.2.2 Méthode des fluctuations piézométriques

XII.2.2.1 Méthode d'Hubert (1922)

Cette méthode a été appliquée pour la première fois au Sénégal par l'auteur lui-même sur la nappe des sables infra basaltiques de la région de Dakar. Son analyse avait porté sur l'observation des amplitudes de crue de la nappe, pendant une dizaine d'années (1912 et 1922), qu'il a reportées sur un graphique arithmétique en abscisses les hauteurs annuelles de pluie et en ordonnées les amplitudes de crue de la nappe. Il obtint une droite qui coupe l'axe des abscisses au point 250 mm (Gaye C.B., 1990) : c'est le seuil d'Hubert (S_H).

La même démarche a été suivie pour déterminer le seuil d'Hubert dans la zone d'étude.

Cette méthode repose sur un graphique arithmétique ayant en abscisse la hauteur de pluie annuelle et en ordonnée l'amplitude de la crue piézométrique. Cette dernière est obtenue tous les ans par l'utilisation du logiciel géostatistique Surfer 12 qui a intégré une option permettant de faire directement la différence entre deux piézométries (TABLEAU 18).

Tableau 18 : Récapitulatif des pluies et des amplitudes de crue annuelles

Zone	Diogo											Mboro			
Année	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2008	2009	2010	2011
Δh en mm	50	130	170	120	160	350	1040	470	20	300	120	80	170	30	390
Pan (mm)	378	452	489	514	535	520	651	436	126	447	315	489	514	535	520

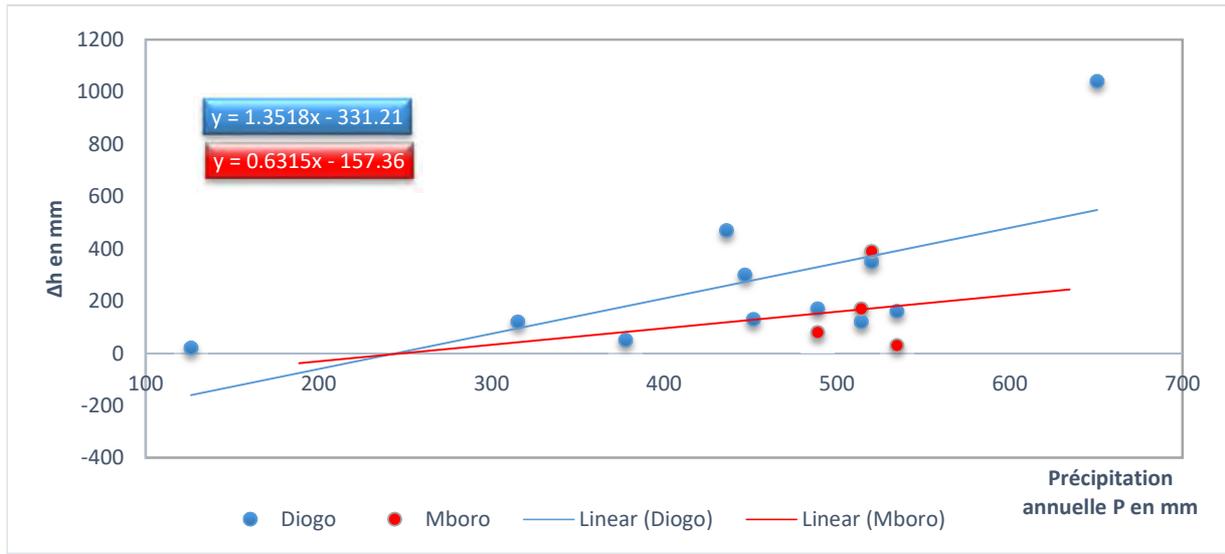


Figure 71: Détermination graphique du seuil d'Hubert

Le seuil d'Hubert est de 245 mm pour Diogo – Fass Boye et 249 mm pour Mboro (FIGURE 71). Ces valeurs de l'abscisse à l'origine correspondent à la hauteur pluviométrique pour une remontée nulle. En d'autres termes, pour qu'il y ait recharge, il faudrait que la pluie annuelle dépasse cette valeur.

XII.2.2.Méthode de Gaget (1957)

La méthode de Gaget (1957) également graphique garde le même principe que celle d'Hubert avec la seule différence qu'en abscisse, on plote la différence entre la pluviométrie annuelle et les prélèvements (Tableau 19) qui sont extraits de la base de données du service hydraulique régional de Thiès.

Tableau 19: Les pompages max des forages communautaires captant le Quaternaire de la zone d'étude

Sites	No_IRH	Y Coord	X Coord	Exploitation (m ³ /h)
DAROU KHOUDOSS	05-7X-0039	1670218	301771	30.0
DAROU NDOYE	05-7X-0026	1687391	306691	78.0
DAROU NDOYE F2	05-7X-0027	1686777	306686	83.3
DAROU NDOYE F4	05-7X-0029	1686777	306686	49.8
DAROU SALAM DIOUF	05-7X-0506	1682344	303754	30.0
DIAMAGUENE	05-7X-0040	1675233	297633	31.0
FASS BOYE	05-7X-0024	1688295	301625	12.2
FASS BOYE	05-7X-0504	1687460	302125	15.0
KEUR KHAR MBAYE	05-7X-0081	1684276	315619	45.0
KEUR LEMOU 1	05-7X-0058	1673347	295377	72.0
KEUR LEMOU 2	05-7X-0059	1673346	295526	56.6
MBORO F2	05-7X-0061	1675948	296743	47.0
MBORO KHONDIO	05-7X-0021	1676786	295855	26.7
MBORO KHONDIO	05-7X-0022	1676786	295855	22.5
MBORO KHONDIO	05-7X-0023	1676786	295855	51.4
MBORO MBAYE MBAYE	05-7X-0004	1674563	296881	25.0
MBORO MBAYE MBAYE	05-7X-0038	1673751	298367	37.5
MBORO MBAYE MBAYE	05-7X-0041	1671351	298735	33.0
MBORO OUOLOF	05-7X-0019	1675489	296441	15.0
MBORO OUOLOF	05-7X-0020	1675787	297638	36.0

La détermination des volumes annuels prélevés aussi bien pour la consommation que pour l'irrigation est détaillée ci-dessous (TABLEAU 20) :

Tableau 20 : L'estimation des prélèvements

Termes des besoins en eau d'irrigation	Valeurs
Surface de cultures irriguées en m ²	35661622
Besoin en eau des cultures m ³ /m ² /jr	0.006
Période d'arrosage en Mois	9
Période d'arrosage en Jours dans l'année	270
Prélèvement pour culture irriguée m ³ /an	57771828
Prélèvement max (mai) pour les besoins humains m ³ /an = 2468 x 365	900820
TOTAL	58672648

Le rapport Q/s devient 70.5mm/ an.

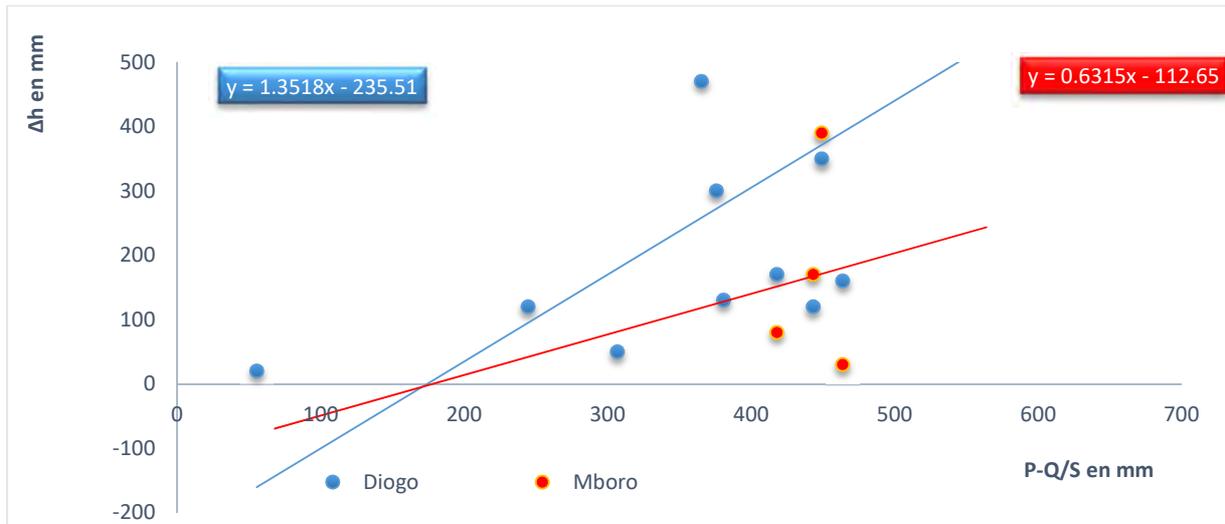


Figure 72: Seuil de Gaget pour les secteurs de Diogo et de Mboro

Le seuil selon la méthode de Gaget est de 174 mm pour la zone de Diogo et 178mm pour Mboro (FIGURE 72).

XII.2.2.3 Méthode de Healy et Cook

La recharge mensuelle a été calculée à partir de la porosité efficace moyenne de 24%. Rappelons que cette valeur varie entre 20 et 28% d'après les résultats de (Meynink, 2007) dans le cadre de l'étude de faisabilité du projet d'exploitation minière de GCO. Les amplitudes piézométriques saisonnières étant obtenues à partir du traitement sous Surfer des données piézométriques.

Tableau 21: Récapitulatif des recharges saisonnières dans la zone d'étude

Zone	Diogo											Fass Boué				Lompoul		Mboro			
	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2007	2008	2009	2011	2010	2011	2008	2009	2010	2011
Année	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2007	2008	2009	2011	2010	2011	2008	2009	2010	2011
Δh (mm)	50	131	173	119	162	353	1043	471	20	297	124	43	151	121	312	100	387	85	166	31	389
neff	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
Pan en mm	378	452	489	514	535	520	651	436	126	447	315	452	489	514	520	444	349	489	514	535	520
Recharge en mm	12.5	32.8	43.3	29.8	40.5	88.3	261	118	5.1	74.2	30.9	10.7	37.9	30.3	78.1	25	96.8	21.2	41.6	7.8	97.4
Ie (%)	3.3	7.3	8.9	5.8	7.6	17	40.1	27	4	16.6	9.8	2.4	7.7	5.9	15	5.6	27.8	4.3	8.1	1.4	18.7

Les résultats obtenus montrent une recharge saisonnière moyenne variant entre 42 et 60 mm avec toujours la singularisation du pic de recharge de 2012 de Diogo devenu plus modeste avec une valeur de 260 mm (TABLEAU 21). La figure ci – dessous présente l'évolution de cette recharge dans le temps et suivant les

zones. Celle de Diogo enregistre d'une manière générale les plus importantes valeurs de recharge (FIGURE 73).

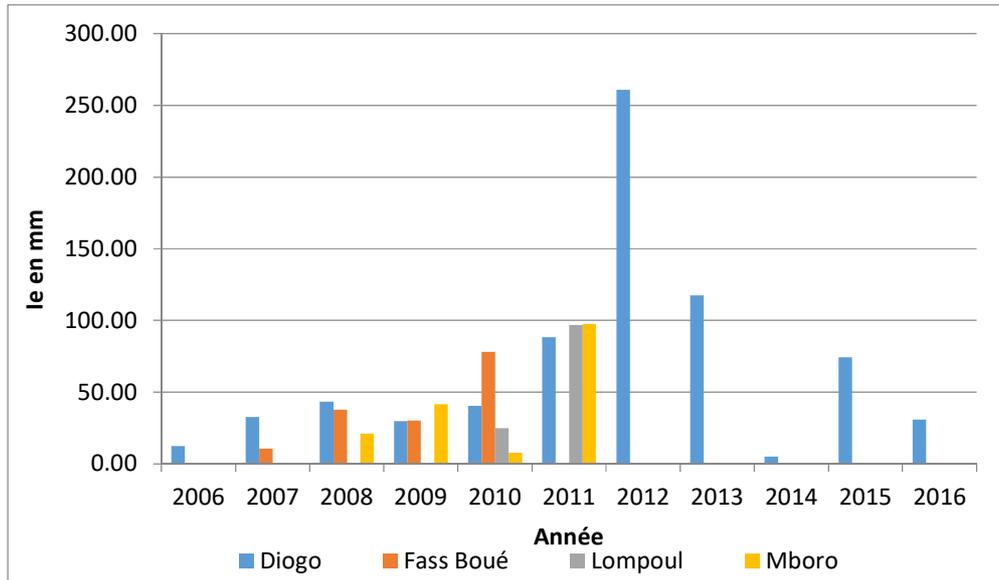


Figure 73: Histogramme des recharges saisonnières

XII.2.3 Méthode du bilan des chlorures

La méthode est basée sur les transferts d'eau et de soluté dans la zone non saturée. Elle a été réalisée suite aux sondages à la tarière réalisés dans les différents secteurs de la zone d'étude. Les profils sont souvent inférieurs à 10 m à l'exception de celui de Diogo (10.75m).

Globalement, les deux courbes d'humidité et des teneurs en chlorures varient différemment en fonction de la profondeur (FIGURE 74). Les teneurs en chlorures plus élevées en surface diminuent en profondeur avant de se stabiliser autour de faibles valeurs de l'ordre de 50 à 80 mg/L. L'humidité augmente progressivement dans les premiers cinq mètres avant de croître de façon brusque selon les sites, entre 5 et 8 mètres ; c'est l'atteinte de la zone saturée.

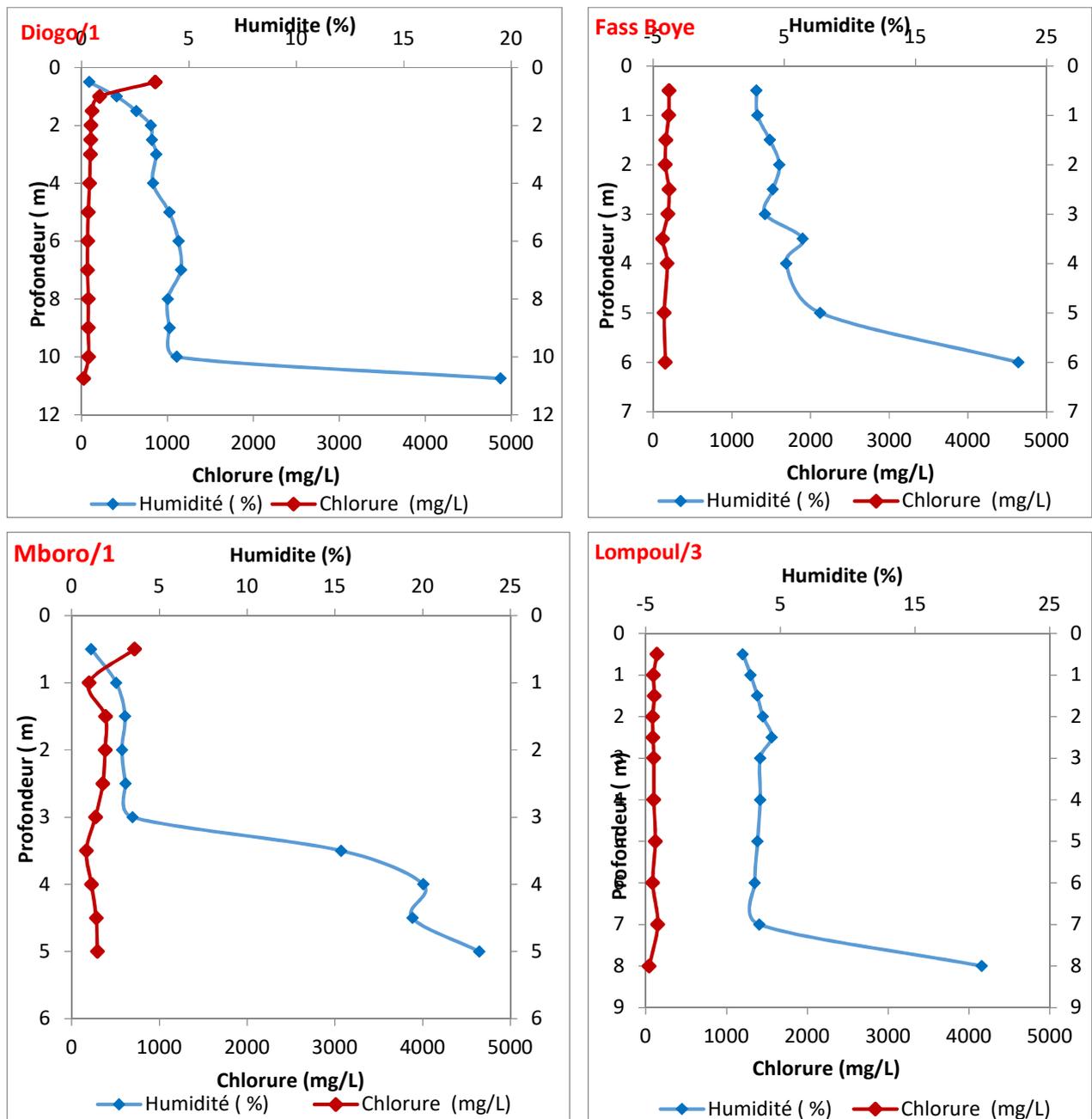


Figure 74 : Variation de l'humidité et des teneurs en chlorures en fonction de la profondeur

Les valeurs de recharge obtenues pour l'année 2016 sont modestes. Elles varient entre 6 et 24 mm à Diogo (TABLEAU 22); ce qui prouve encore une fois que Diogo enregistre les meilleures taux de recharge. Cependant, les valeurs restent très faibles par rapport à celles obtenues par les méthodes de bilan hydrique et de fluctuations piézométriques.

Tableau 22 : Le taux de recharge par le bilan des chlorures sur les différents secteurs de la zone d'étude

Année	Profil	Intervalle considéré en m	Teneur en chlorure des sondages (Cs) (mg/L)	Teneur en chlorure des pluies (C _p) en mg/L	Pan (mm)	Recharge 2016 (mm)	R/P en%
2016	Lomp/3	7 à 11	100	4.4	322.5	14	4.40
	Dio/1	7 à 14	66	4.4	315.4	21	6.64
	Dio/2	6 à 12	59	4.4	315.4	24	7.52
	Fb	7 à 10	149	4.4	315.4	9	2.95
	Mb/1	7 à 10	242	4.4	336.9	6	1.82

XII.3 Récapitulatif des valeurs de recharge obtenues

Les valeurs d'ETP calculées par la méthode de Turc sont toujours plus importantes que celles de la méthode de Thornthwaite. Celles de Lompoul obtenues par Turc sont proches des valeurs calculées par Gaye (1990) dans la région de Louga. A l'issue des différentes méthodes d'estimation de la recharge, considérant toute la période d'enregistrements disponible dans la zone, on peut récapituler les résultats comme suit (TABLEAU 23):

Tableau 23 : Synthèse des valeurs de recharges obtenues par les différentes méthodes

Méthode	Healy	Gaget	Turc		Thornthwaite		CMB
	Ouest	Ouest	STK100	STK150	STK100	STK150	Ouest
Moyenne (mm/an)	56.32	130.73	38.27	20.76	75.22	48.38	14.80

Dans la partie Ouest des dunes minéralisées, les méthodes de Turc et de fluctuation piézométrique de Healy et Cook donnent respectivement une recharge moyenne sur la période de 38 et 56 mm/an qui sont plus réalistes que celles de Thornthwaite et Gaget qui seraient surestimées. Pour l'année 2016, la recharge est estimée à 14 mm par la méthode du bilan des chlorures.

Dans la partie Est, où sont localisés les sables ferrugineux, les méthodes de Turc et Thornthwaite donnent respectivement une recharge moyenne sur la période de 20 et 75 mm/an. La remarque générale est que les valeurs de recharge obtenues par les méthodes de Turc, de fluctuation de Healy et du bilan des chlorures semblent beaucoup plus plausibles comparées aux résultats précédemment obtenus non loin de la zone d'étude :

- Pernel et Gageonnet (1992) l'ont estimé à 34 mm ;
- pour Gaye (1990), elle varie entre 6 et 80.6 mm/an à Louga, frontière Nord est du domaine d'étude ;

- Tandia (1990) a obtenu des valeurs oscillant entre 13 et 40 mm/an pour une pluviométrie annuelle de 254 mm correspondant à un coefficient d'infiltration maximale de 16% ;

La dispersion constatée dans les valeurs de recharge obtenues témoigne une fois de plus la difficulté qui entoure l'estimation de la recharge qui demeure cependant un paramètre clé dans l'élaboration des modèles hydrodynamiques.

Chapitre XIII. Hydrochimie et Isotopie

Les caractéristiques chimiques et isotopiques des eaux des nappes souterraines sont tributaires de celles des eaux de pluie mais également des processus biologiques, géochimiques et physiques interdépendants qui se produisent dans les milieux aquifères. L'eau souterraine contient des substances solides, liquides et gazeuses dont les concentrations et la stabilité dépendent de beaucoup de facteurs tels que le pH, la température, la pression partielle des gaz, les minéraux de l'encaissant, la texture des sols, les substances organiques et inorganiques dissoutes, etc.

XIII.1 Hydrochimie

Les données hydrochimiques proviennent des forages et piézomètres du Ministère en charge de l'Hydraulique, de GCO et de quelques puits villageois. Les analyses concernent les deux nappes : Quaternaire et Maastrichtien.

XIII.1.1 Eaux de la nappe du Quaternaire

XIII.1.1.1 pH

Les valeurs de pH enregistrées durant la campagne de Décembre 2013 varient entre 4.09 et 7.94. Elles proviennent de 30 échantillons dispersés sur tout l'étendu de l'aquifère supérieur. L'histogramme de fréquence montre que 63% des eaux échantillonnées ont des valeurs de pH comprises en 5 et 6 (FIGURE 75).

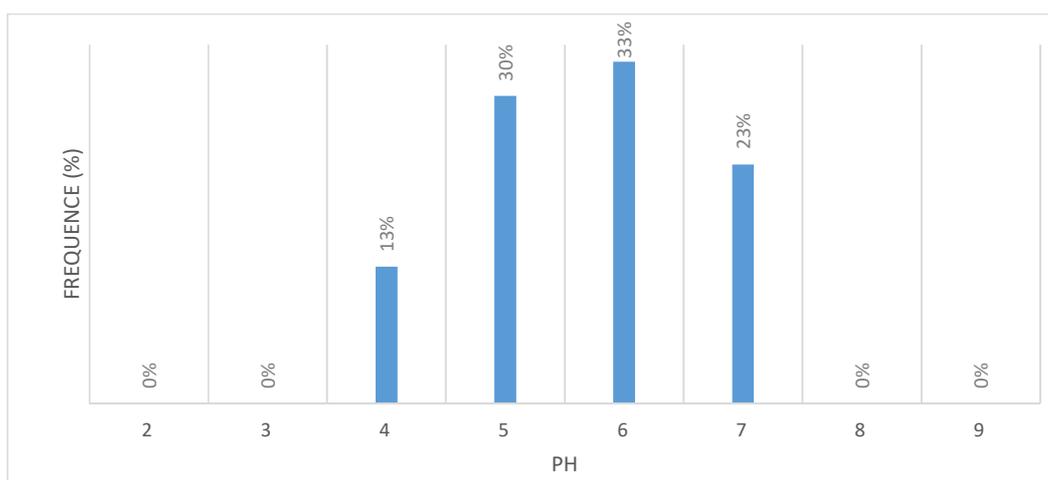


Figure 75: Histogramme de fréquence du pH

Par ailleurs, toutes les mesures réalisées lors des différentes campagnes dans certains piézomètres proches du Littoral montrent une acidité comprise généralement entre 3 et 5.3 (FIGURE 76). Cette acidité serait liée à

la stagnation et à la rétention d'eau dans la tourbe (Fohlen & Lemordant, 1983). En effet le fond des dépressions communément appelées Niayes et qui longent le Littoral de Kayar à Lompoul, est constitué de formations tourbeuses compactes indurées ou meubles et molles avec des incorporations de tiges ou branches d'arbres parfois peu évoluées.

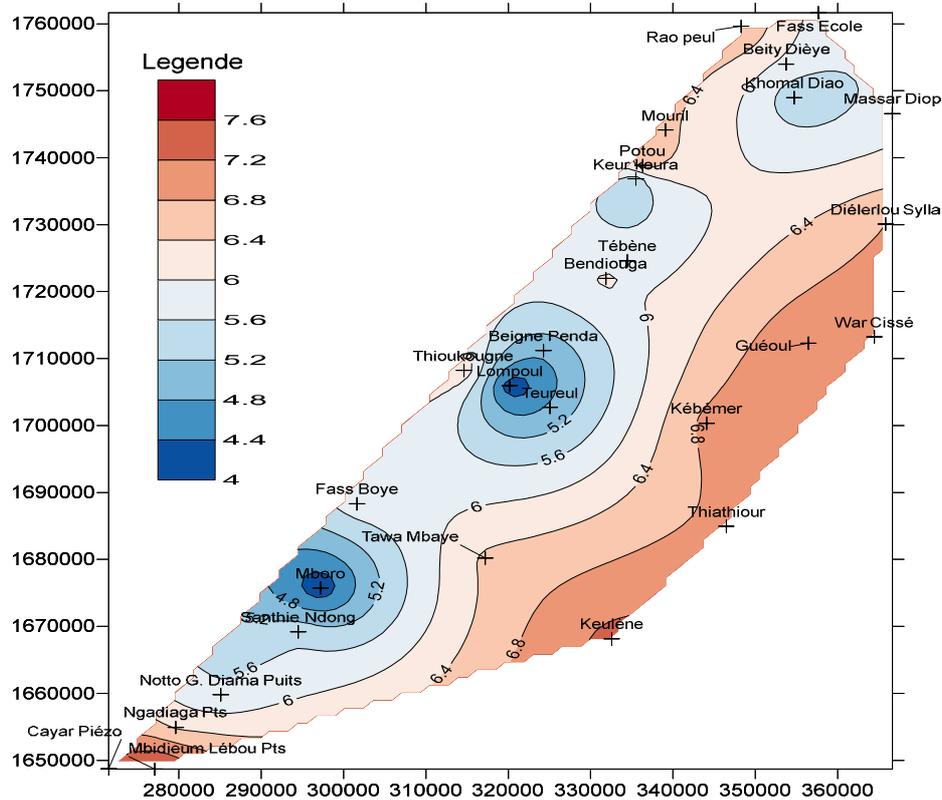


Figure 76: Carte iso-pH de la nappe des sables quaternaires du Littoral Nord

Le pH est par définition une mesure de l'activité des ions H^+ contenus dans une eau. Les valeurs de pH obtenues, varient entre 4 et 7.6 respectivement d'Ouest vers l'est. Dans la zone Ouest, dans les Niayes, le pH est acide, légèrement acide au centre et faiblement basique à l'est. A l'Ouest, l'aquifère est sableux, pauvre en carbonates avec une présence de tourbes dans les dépressions marécageuses (Niayes) où la nappe est très peu profonde. C'est dans cette zone que se développe une forte activité agricole. Cette configuration pourrait justifier la nature acide des eaux de la nappe dans cet endroit. La proximité de la nappe par rapport à la surface du sol facilite une oxydation de la matière organique, notamment des tourbes. Il peut s'y passer aussi une influence des acides organiques, la recharge saisonnière des eaux météoriques chargées en acides carboniques.

Dans la partie Est, l'alcalinité des eaux de la nappe peut se justifier par la mise en solution des carbonates de calcium de l'aquifère en contact avec les eaux d'infiltration chargées en acides carboniques.

XIII.1.1.2 Conductivité et les chlorures

La conductivité électrique est une mesure classique qui permet un contrôle simple et rapide de la minéralisation des solutions. La conductivité augmente en fonction de la teneur en ions dissous et de la nature des sels dissous (Castany, 1982). Pour les différentes campagnes, les valeurs de conductivité mesurées varient habituellement entre 29 et 8530 $\mu\text{S}/\text{cm}$ avec un coefficient de variation égal à 120%. Cette valeur élevée du coefficient de variation montre une grande variabilité des valeurs de conductivité par rapport à la moyenne.

La salinité représentée par le résidu sec (RS) augmente d'Est vers l'Ouest (FIGURE 77). Dans les parties centrale et Nord, elle varie autour de 200 à 400 mg/l. C'est le cas à Khomal Diao, à Thiathieur et environs. Ces valeurs témoignent de la nature calcaire de l'aquifère dans ces endroits. Dans la partie Sud et Nord-Ouest elle passe à 2000 mg/l à Mboro et Potou.

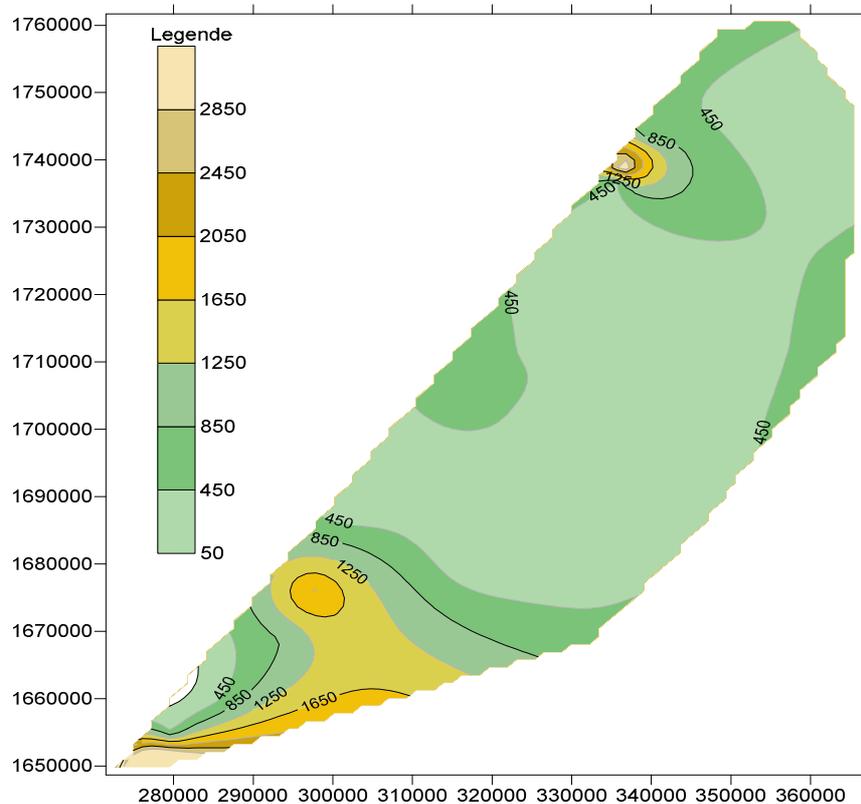


Figure 77: Carte de variabilité spatiale de la minéralisation (mg/L)

Les valeurs de résidu sec varient entre 108 et 2860 mg/l à Potou. Cette distribution spatiale de la minéralisation, corrobore parfaitement les résultats de la piézométrie qui reste en dessous du niveau 0 IGN au niveau de ces deux communes :

- au Sud, à Mbidieum et à Mboro, la forte minéralisation peut s'expliquer par l'intrusion saline. Ce phénomène serait accéléré par l'importance des prélèvements opérés par la forte activité maraichère

et par l'exploitation des phosphates. En effet, cette zone concentre les excavations minières des ICS qui exploite le gisement de phosphate par un pompage de dénoyage des couches ;

- à Potou, la nappe se trouve déjà à la côte 0 m. IGN. Rappelons que le dôme piézométrique de la nappe des sables part de Taïba Ndiaye au Sud et plonge vers le Nord aux périphéries de Potou qui se situe à proximité de l'océan. Cette zone constitue aussi une zone à forte activité de maraichage.

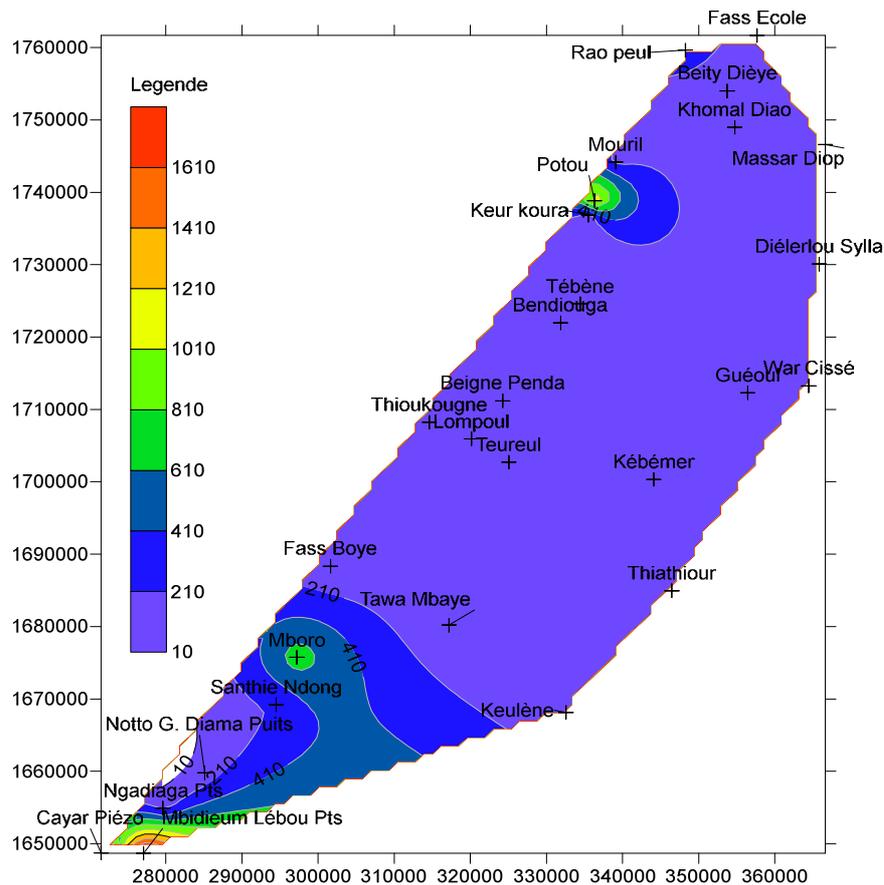


Figure 78: Carte de distribution des ions chlorure de la nappe des sables quaternaires du Littoral Nord

Les chlorures varient entre 21 et 2143 mg/l à Mbidieum, au Sud en bordure de la mer. La distribution spatiale des chlorures montre une bonne similitude avec la distribution de la conductivité (FIGURE 78). Les localités de Mbidieum, Mboro et Potou sont encore mises en exergue.

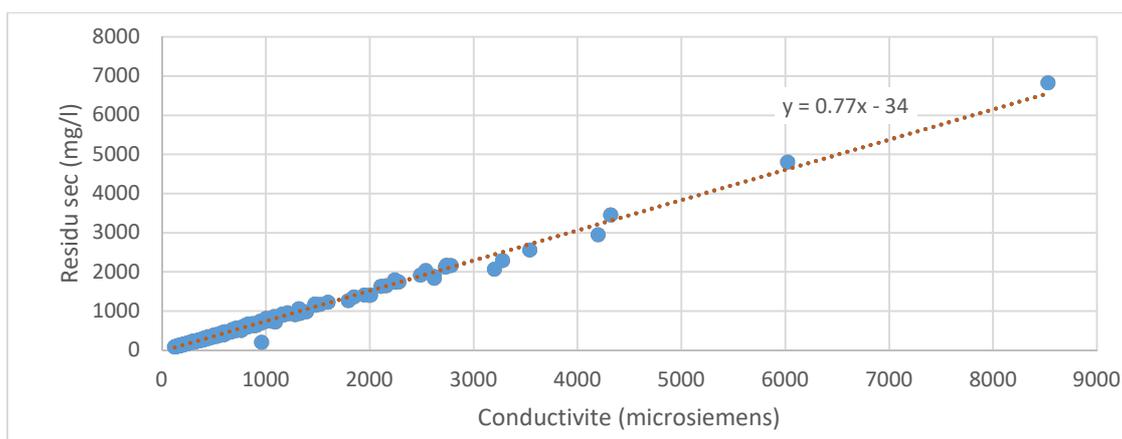


Figure 79: Corrélation entre la minéralisation et la conductivité des eaux souterraines du Littoral Nord

Par ailleurs, la comparaison entre la minéralisation totale ou résidu sec et la conductivité sur l'ensemble des résultats des différentes campagnes, montre une bonne corrélation de ces derniers avec une droite : $RS = 0.77CE - 34$ (FIGURE 79).

XIII.1.1.3 Alcalinité

C'est une caractéristique très importante des eaux naturelles qui représente la capacité de neutralisation des acides forts. Les ions bicarbonates et carbonates sont analysés au laboratoire sur l'ensemble des échantillons collectés durant les différentes campagnes. Pour l'ensemble des campagnes, c'est seulement sur 5 échantillons collectés que les ions carbonates ont fourni des valeurs mesurables. Elles varient entre 3 et 9 mg/L au niveau des piézomètres de Teureul et Tawa Mbaye avec des pH respectifs de 8.01 et 9.45.

Ce constat corrobore les principes d'équilibre des espèces en fonction du pH dans le cas de la dissolution du dioxyde de carbone dans l'eau où pour des valeurs de pH inférieures à 8.3, l'alcalinité est pour l'essentiel constituée par les bicarbonates ((Stumm & Morgan, 1981) et (Drever, 1988)).

XIII.1.1.4 Faciès chimiques

Les représentations des teneurs des éléments majeurs des eaux dans le diagramme de Piper ont été faites pour l'ensemble des échantillons avant (FIGURE 80) et après la saison des pluies (FIGURE 81). D'une manière générale, il en ressort les faciès dominants suivants selon leur abondance décroissante en termes de nombre d'échantillons représentatifs :

- **le faciès chloruré sodique** qui constitue la majorité des eaux échantillonnées, rencontrées dans les zones proches ou peu éloignées de la côte tel que Mboro, Teubene, Santhie Ndong, Bendiouga, Mouril, Rao. Les eaux du site minier de Diogo appartiennent à ce faciès.

- **le faciès bicarbonaté calcique et magnésien** se rencontre à l'Est suivant l'axe Tivaoune – Louga, passant par Thiatiour, Mékhé, Kebemer, Gueoul, War Cisse, Dielerlou Sylla. Ce faciès est conforme à la lithologie des formations calcaires à marno-calcaires traversées. Noel (1978) avait signalé que des bancs calcaires avaient été atteints par les forages de l'OMS et c'est certainement ces formations qui seraient à l'origine de l'évolution de ces eaux vers un pôle carbonaté.
- **Le faciès chloruré et sulfaté calcique** prédomine sur les points de prélèvement qui sont concentrés autour de Lompoul, très proche de la mer.
- **Le faciès carbonaté sodique** est rencontré à Fass Boye. En effet lors Des autres campagnes ces échantillons glissent dans la famille des chlorurées sodiques et sulfatées sodiques.

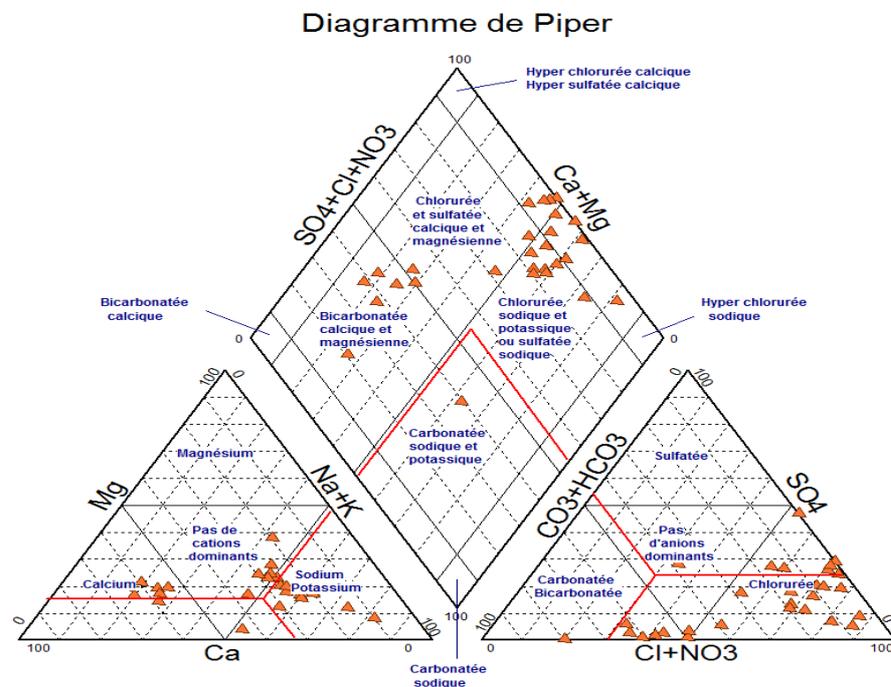


Figure 80 : Faciès chimique des eaux de la NQLN, campagne Juillet 2013

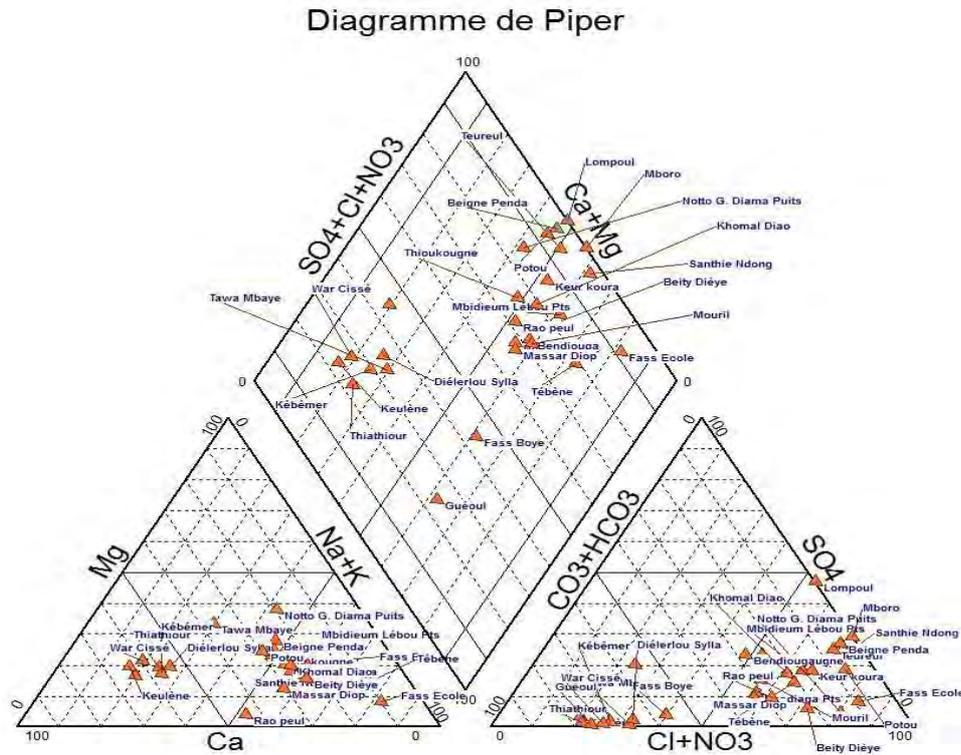


Figure 81 : Faciès chimique des eaux de la NQLN, campagne Décembre 2013

Le diagramme de synthèse permet de montrer que les eaux proches des formations calcaires situées le long de l'axe Tivaouane - Louga sont caractérisées par un faciès carbonaté alors que celles de l'Ouest sont caractérisées par un faciès chloruré (FIGURE 82). Cette typologie des faciès, souligne la complexité des processus hydrogéochimiques qui gouvernent la salinisation lente et progressive de cette nappe. La présence de formations calcaires fissurées et karstifiées sur les limites Est, suggère une infiltration des eaux de précipitation où elles acquièrent leur minéralisation originelle bicarbonatée calcique et magnésienne. En général, une augmentation progressive de la minéralisation de l'eau souterraine permet de passer du faciès carbonaté à un faciès chloruré. C'est le processus observé dans les eaux se déplaçant d'une manière plus ou moins horizontale d'Est en Ouest.

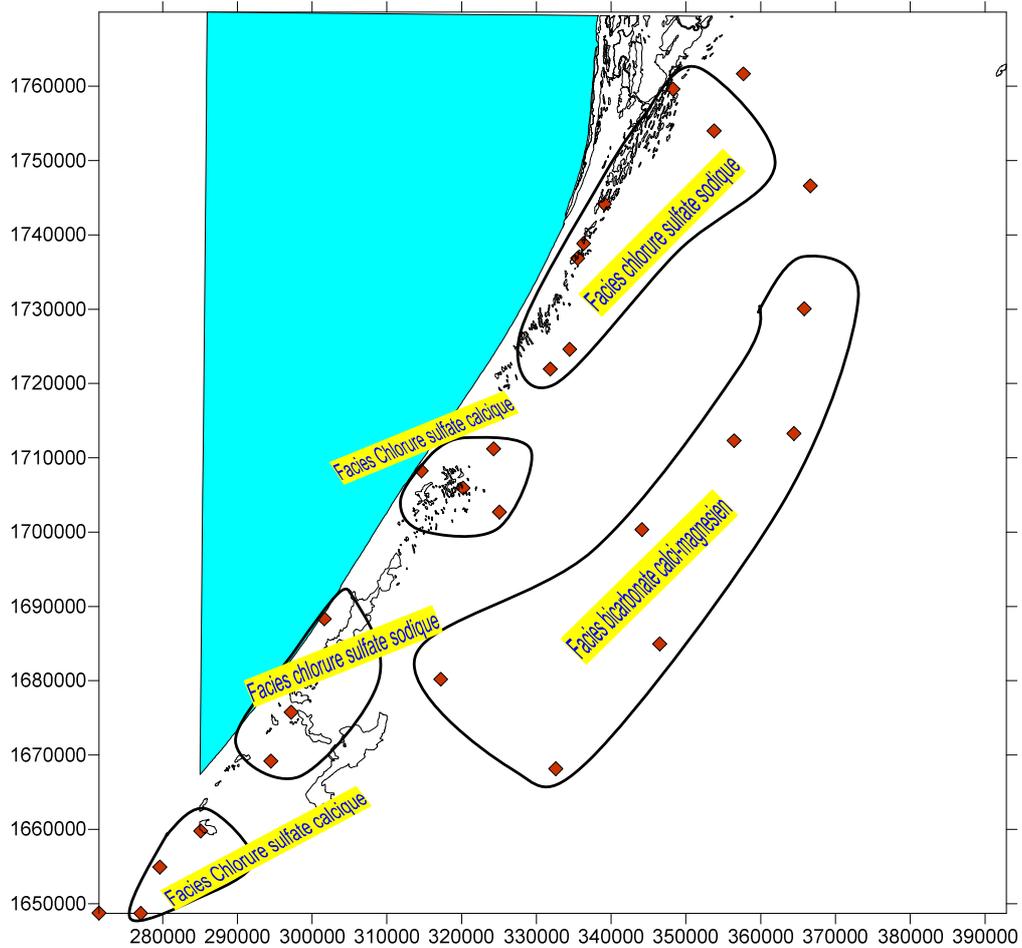


Figure 82 : Zonation des Faciès chimique de la Nappe Quaternaire du Littoral Nord

XIII.1.1.5 Evolution de la composition chimique de la nappe

Durant la campagne de Décembre 2013, sur les 30 échantillons retenus, seules deux stations Tereul et Fass Ecole ont eu une balance ionique atteignant -5%. Tous les autres ont une balance ionique supérieure à -5% et inférieure à 3% ; la moyenne étant 2%. Ceci atteste de la fiabilité des analyses.

Pour la réalisation de cette partie relative à l'évolution de la composition chimique des eaux de la nappe des sables quaternaires, un certain nombre de profils ont été identifiés parmi les données de la campagne de 2013 (FIGURE 83).



Figure 83: Carte de localisation des transects

Les résultats des analyses chimiques des différentes stations, situées le long de chaque profil, sont récapitulés dans l'Annexe 3.

XVII.3.2.1.1 Sodium et chlorure

Le chlorure de sodium (NaCl) est un indicateur essentiel de la progression du biseau salé marin. Les stations proches de l'océan telles que Mboro, Fass Boye, Bendiouga, Thioucougne, Keur Coura ou Mouril, présentent tous, respectivement à leur transect, les plus fortes valeurs en sodium et chlorure. Ces valeurs de chlorure et sodium varient de la même manière que la minéralisation. Elles présentent des teneurs qui décroissent progressivement du voisinage de l'océan vers l'intérieur du continent.

XVII.3.2.1.2 Magnésium et calcium

A partir de l'étude de la variation spatiale des teneurs en magnésium et calcium, on peut observer (FIGURE 84):

- sur tous les transects, une légère prédominance des ions calcium sur les ions magnésium ;
- sur tous les transects, les eaux des sites proches des côtes ont des concentrations en magnésium et calcium plus élevées que celles de la partie centrale du domaine d'étude. Par contre, plus à l'Est tel que Keulene, Thiathour, Geoul, les valeurs des ions Ca et Mg sont beaucoup plus importants ;

- au niveau du transect 2, on constate une augmentation des teneurs en Ca à Sinthiou Sine ICS62. Cette augmentation pourrait être mise en relation avec les formations marno-calcaires présentes dans cet ouvrage ;
- le magnésium est très présent dans les profils aussi bien dans les sites avoisinant la mer que ceux tout à fait à l'Est. Ceci pourrait s'expliquer par ses origines possibles : marine pour les sites tels que Mboro et Lompoul et par dissolution des calcaires dolomitiques à Thiathour, Keulene ou Gueoul.

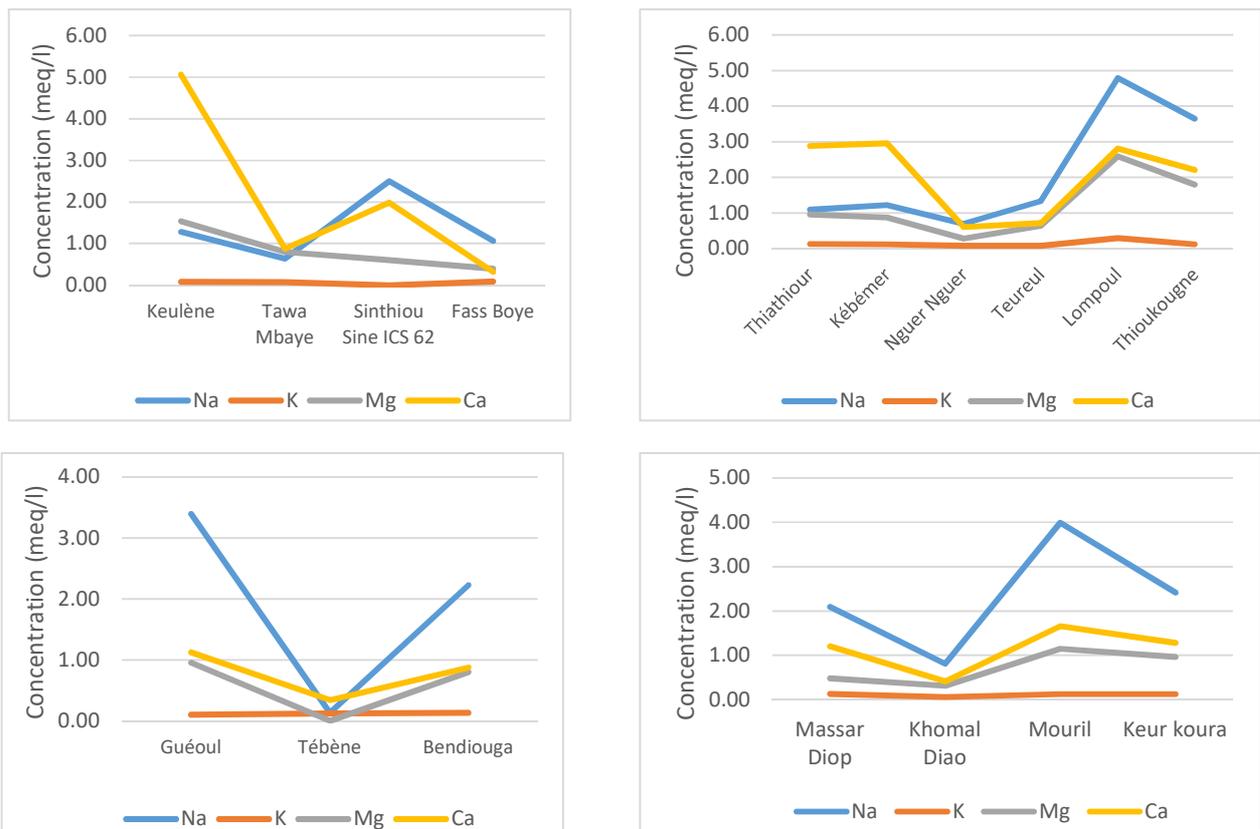


Figure 84 : Les courbes d'évolution des cations majeurs

XVII.3.2.1.3 Rapports hydrochimiques

Les résultats des différents rapports hydrochimiques sont présentés à l'annexe 4.

XIII.1.1.5.1.1 Rapport rMg/rCa

Le rapport rMg/rCa est, pour la plupart des échantillons, inférieur 1, à l'exception de Mbidieum, Notto, Fass Boye. Ceci dénote une prédominance des ions Ca par rapport aux ions Mg. Les ions Mg sont d'origine marine ou proviennent de la dissolution des roches dolomitiques ou ferromagnésiens présents dans l'aquifère.

XIII.1.1.5.1.2 Rapport $r_{Na/rK}$

Ce rapport est partout largement supérieur à 1. Ceci confirme le comportement en général du potassium dans les eaux souterraines. Cependant les plus grands écarts se rencontrent à Mboro, Mbidieum, Thioukougne, Tebene. Ainsi, cette augmentation des teneurs en sodium semble être liée à des phénomènes d'intrusion saline.

XVII.3.2.1.4 Indice d'échange de base

Le calcul de l'indice d'échange de base (IEB) permet de mettre en évidence les modifications du chimisme de l'eau au cours de son trajet souterrain. Sur les 30 échantillons, 11 ont eu un indice d'échange de base négatif. Un IEB négatif s'explique par un taux élevé des alcalins (Na^+ et K^+). Les principaux sites concernés sont Lompoul, Teurel, Geoul et Sinthiou Sine. Cela signifie que les ions Ca^{2+} et Mg^{2+} de l'eau sont échangés essentiellement contre les ions Na^+ et en moindre mesure les ions K^+ des argiles ou des substances organiques. Le lessivage de ces substances provoquerait alors une augmentation de la concentration des ions Na^+ et K^+ dans les eaux.

Les 19 autres échantillons présentent un indice positif qui est l'opposé du cas précédent. Pour ce cas-ci, ce sont les ions Na^+ et K^+ de l'eau qui seraient remplacés par les ions Mg^{2+} et Ca^{2+} des formations encaissantes. Ceci peut être le cas pour les eaux situées à l'Est des dunes minéralisées. L'autre explication serait que ces eaux ont migré dans des encaissant pauvres en argiles ou bien dont les argiles seraient constituées plus de kaolinite ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$) que d'albite ($NaAlSi_3O_8$).

XIII.1.1.6 Interprétations thermodynamiques

L'approche thermodynamique permet de déterminer l'évolution chimique de l'eau en fonction de son état d'équilibre ou de déséquilibre vis à vis des minéraux primaires et néoformés de la roche réservoir.

Pour une meilleure compréhension du mécanisme de cette évolution, on a étudié l'activité des espèces aqueuses dans l'eau ; les indices de saturation de quelques minéraux évaporitiques, carbonatés ; les produits d'activité ionique (Q) ; la pression partielle du gaz carbonique dissous (PCO_2). Ces données ont été acquises grâce à l'utilisation de l'application « Diagrammes » qui incorpore un programme thermodynamique "Phreeq C" (Simler, 2004).

XVII.3.2.1.5 Etat de saturation de différents minéraux

Sur la base des équilibres thermodynamiques, il est possible de définir une évolution chimique dans l'aquifère des sables du Quaternaire du Littoral Nord. Ainsi, la tendance des formes chimiques entre la phase dissoute et la phase minérale a été examinée.

En tenant compte de l'activité des ions Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} et du pH, le programme Phreeq C a permis de calculer les indices de saturation (IS) des solutions vis à vis de la calcite (CaCO_3), du gypse ($\text{CaSO}_4, \text{H}_2\text{O}$), et de la dolomite ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) (annexe 5).

Compte tenu des incertitudes d'une part sur les valeurs des constantes thermodynamiques utilisées dans les calculs (Drever, 1988) et d'autre part sur la précision des mesures de pH, de l'alcalinité et de la température sur le terrain, on a considéré comme saturée une eau ayant un indice de saturation compris dans les limites ± 0.4 .

D'après les indices de saturation vis à vis des minéraux considérés, on constate que :

- sur 30 échantillons d'eau traités, cinq seulement sont saturés vis à vis de la calcite et trois par rapport à la dolomite. Ils se trouvent tous dans les eaux à faciès carbonaté calcique.
- l'IS Dolomite est le plus souvent égal ou double de celui de la calcite et parfois plus ;
- toutes les eaux traitées montrent une sous saturation vis à vis du gypse ($\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$) à l'exception d'un seul échantillon (Is = -0.47) ;
- tous les 30 échantillons retenus sont sous saturés vis à vis de l'anhydrite.

Tableau 24 : Synthèse des indices de saturation

Paramètres	Max	Moy	Min
LogP _{CO2}	-0.9	-1.6	-3.4
H ₂ CO ₃ éq.[mmol/L]	4.2	1.2	0.0
FI (mol/L)	0.113	0.013	0.002
IsCalcite	1.2	-1.8	-4.6
IsDolomite	2.1	-4.2	-9.6
IsGypse	-0.5	-2.4	-4.1
IsAnhydrite	-0.7	-2.7	-4.3

Les indices de saturation de la calcite, de la dolomite, du gypse et de l'anhydrite augmentent régulièrement avec l'alcalinité produite par la dissolution des bicarbonates (TABLEAU 24). Les IS de ces minéraux suivent une tendance linéaire positive ce qui peut permettrait d'en déduire que les phases minérales changent suivant une tendance similaire suite au même processus hydrogéochimique. (FIGURE 85).

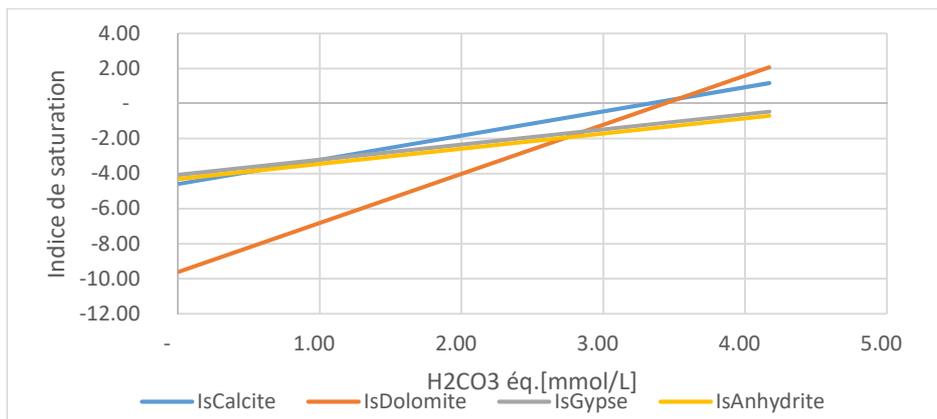


Figure 85 : Variation de l'indice de saturation des minéraux carbonatés selon l'alcalinité d'équilibre

L'utilisation de la pression partielle du gaz carbonique (P_{CO_2}) associé à l'IScalcite et l'ISdolomite, permet d'apporter des précisions sur le processus hydrochimique de la nappe du Littoral Nord. Il est connu que la P_{CO_2} atmosphérique est de l'ordre de $10^{-3.5}$ atm. Ainsi, la P_{CO_2} des eaux de surface qui sont en équilibre avec la pression atmosphérique aura des valeurs proches de celle de l'atmosphère. A l'opposé, une P_{CO_2} plus élevée ($\text{Log}P_{CO_2} > -1.5$) est le résultat d'une circulation profonde des eaux souterraines, ayant eu une interaction avec les bicarbonates. Concernant la zone d'étude, à l'exception de Nguer Nguer dont le $\text{Log}P_{CO_2} = -3.44$, tous les autres sites ont $P_{CO_2} > 10^{-3.5}$ atm ; ce qui prouve par ailleurs leur origine souterraine plus profond. Par contre, certains d'entre eux, avec des valeurs $< 10^{-1.5}$, semblent provenir d'une recharge récente.

Les relations $\text{Log}(P_{CO_2})$ vs IScalcite et $\text{Log}(P_{CO_2})$ vs ISdolomite montrent que seulement cinq (05) et trois (03) échantillons sont respectivement en équilibre vis-à-vis de la calcite et de la dolomite (FIGURE 86).

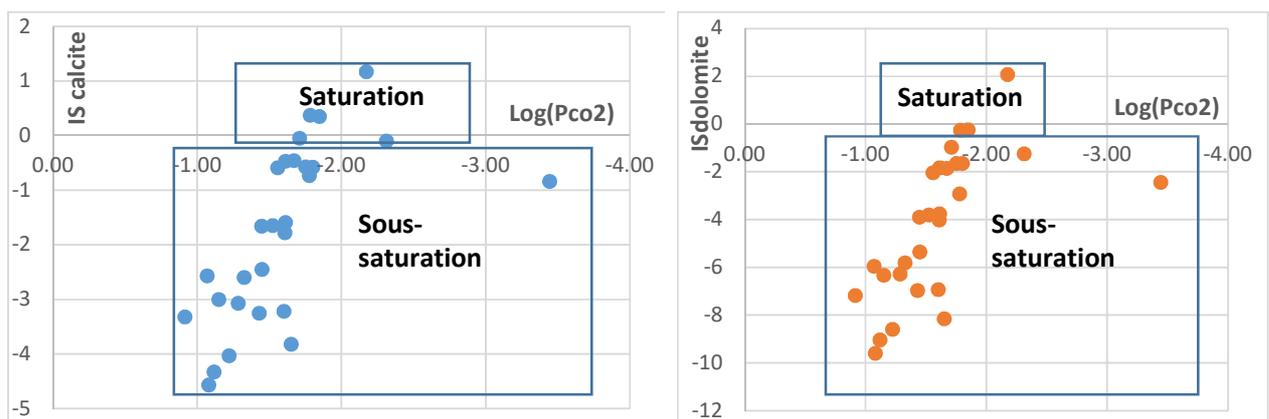


Figure 86 : Relation $\text{Log}(P_{CO_2})$ vs IScalcite et $\text{Log}(P_{CO_2})$ vs ISdolomite des eaux de la nappe des Sables du Littoral Nord

XIII.1.2 Eaux du bassin de dragage de la mine et de la nappe superficielle

Dans cette partie, nous allons traiter le cas spécifique des eaux de l'aquifère des sables dans la zone minière de Diogo.

XIII.1.2.1 Zone d'investigation

En Mai 2015, 15 échantillons d'eaux de la nappe supérieure du Quaternaire a été collectés dans la zone à proximité de la mine. Le choix des points est justifié par la logique ci-dessous (FIGURE 87) :

- le bassin lui-même.
- la zone active : il s'agit des piézomètres DPZ02, DPZ053 et la série de PCB1 à PCB11 qui décrit un demi-cercle autour de la première zone de dépôt des terrils, donc directement influencés par le dôme piézométrique artificiel ;
- la zone aval : ce sont les piézomètres DPZ090 à DPZ092 définissant une ligne d'écoulement des eaux d'infiltration partant des terrils vers l'océan ;
- la zone amont : il s'agit des points DPZ021 (piézomètre) et P11 (puits) qui se trouvent à la latitude du bassin de dragage au moment de l'échantillonnage et des points P20 (puits) et DPZ044 (piézomètre) se trouvant respectivement à 1 km en amont des terrils et 3 km devant le bassin pratiquement sur la même Côte piézométrique. Ces points, selon la situation piézométrique sont supposés ne pas subir l'influences des flux d'eaux en provenance du bassin ou des terrils.

Les analyses chimiques ont porté sur les ions majeurs en plus de la silice tandis que celles isotopiques réalisées par le laboratoire BRGM d'Orléans, ont concerné le deutérium, l'oxygène -18, le tritium et le carbone 14.

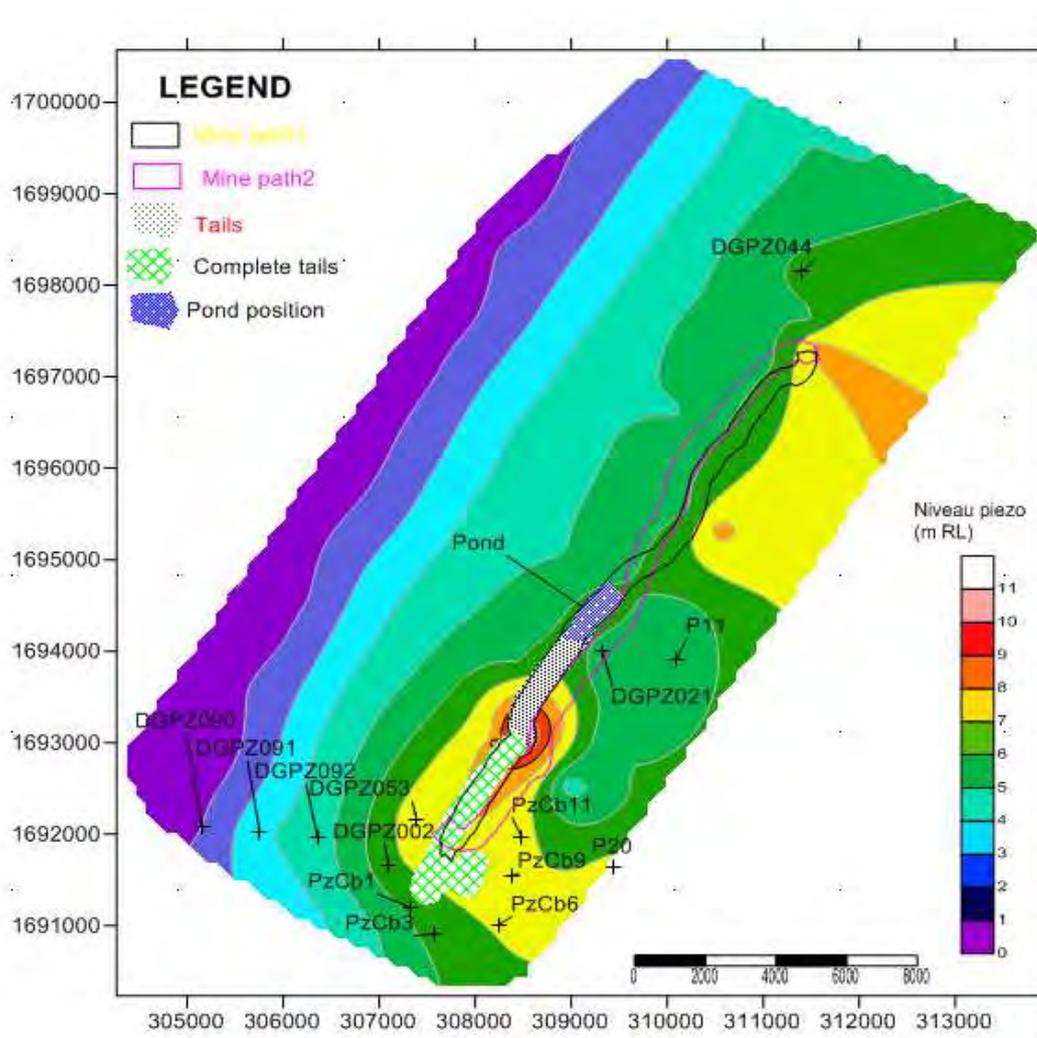


Figure 87 : Localisation des points choisis et échantillons sur base la piézométrie de la zone minière active de GCO (mai 2015)

L'objectif de cette partie est :

- de déterminer le faciès des eaux de la nappe autour de la mine de Diogo ;
- d'apprécier les changements qui auraient survenu sur la composition chimique des eaux après un an d'exploitation de la mine ;
- d'estimer les impacts du mélange des eaux au niveau du bassin et surtout la vitesse d'infiltration ou d'écoulement par le biais de la chimie ou des isotopes.

XIII.1.2.2 Faciès des eaux dans la zone minière de Diogo

Les eaux de la zone minière de GCO peuvent être définies suivant la classification suivante (FIGURE 88):

- les eaux du bassin et de la majorité de la zone active sont de faciès chloruré sodique ou sulfaté calcico-magnésien ;

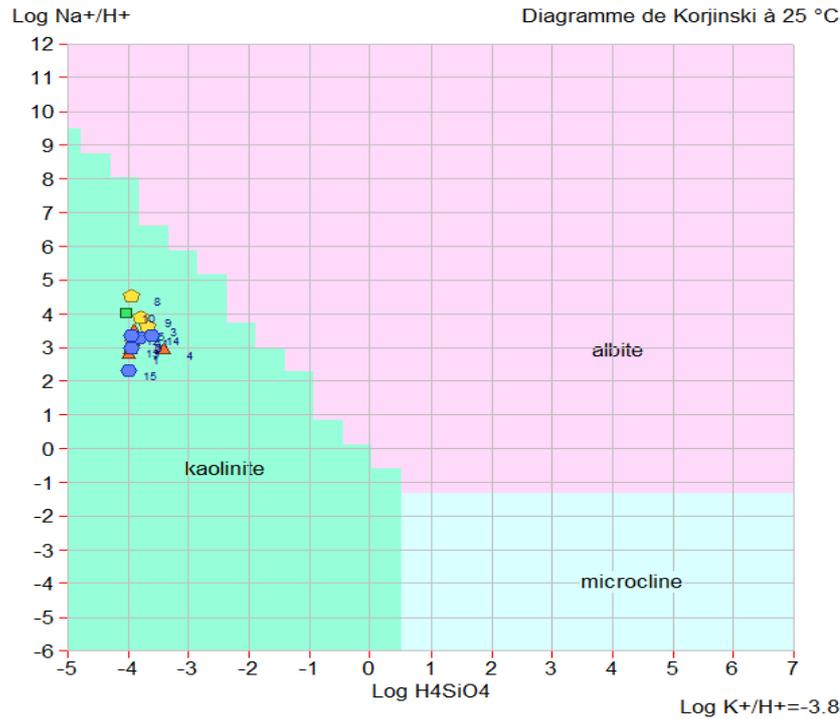
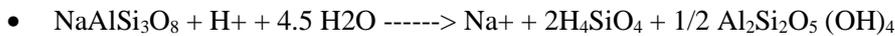
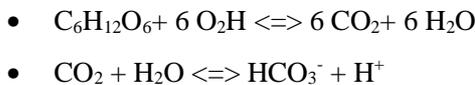


Figure 89 : Diagramme d'équilibre du système Kaolinite - albite – microcline

Ce processus se fait par la dissolution du feldspath sodique – albite avec la formation de la kaolinite suivant la réaction suivante :



Cette réaction consomme des protons et libère des cations (Na^+), produisant ainsi de l'alcalinité. Ce processus est surtout favorisé par la faible profondeur de la nappe dans la zone qui est affleurante à subaffleurante. Le milieu, étant ouvert avec une forte couverture végétale de la zone des Niayes, confère aux eaux de la recharge un enrichissement en CO_2 . Il se passe un processus d'oxydation de la matière organique, produisant du CO_2 , lui-même impliqué dans des réactions de mise en solution :



L'hydrogène libéré participe à l'altération des minéraux silicatés tel que l'albite ; pour notre cas avec libération du cation Na^+ et formation de la kaolinite vue précédemment. La forte activité biologique impulse ainsi le processus d'enrichissement des eaux en CO_2 , leur permettant alors d'avoir la capacité de s'attaquer assez facilement aux minéraux alumino-silicates des couches aquifères composées de sable, de silts et de sables argileux. Ce processus s'accompagne de la libération dans l'eau des cations, de bicarbonates et de silice.

L'albite se dissout sous l'influence du CO_2 suivant la réaction suivante :

- $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8 + \text{CO}_2 + 5/2\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{Na}^+ + \text{HCO}_3^- + 2\text{H}_4\text{SiO}_4 + 1/2 \text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$

Les principales espèces formées en solution sont le HCO_3^- , le Na^+ et l'acide silicique H_4SiO_4 . Dans ce cas, le bicarbonate augmente, entraînant aussi un accroissement du pH variant entre 7 et 8.

Par ailleurs, selon (Fritz & Tardy, 1976) si les teneurs en cations sont élevées, ceci entraînerait la transformation de la kaolinite en montmorillonite ce qui n'est pas encore le cas des eaux de la nappe des sables quaternaires du Littoral Nord.

XIII.1.3 Eaux de la nappe profonde

Les eaux de la nappe maastrichtienne dans la zone d'exploitation de GCO appartiennent aux deux familles suivantes (FIGURE 90) :

- faciès bicarbonaté sodique ;
- faciès chloruré sodique.

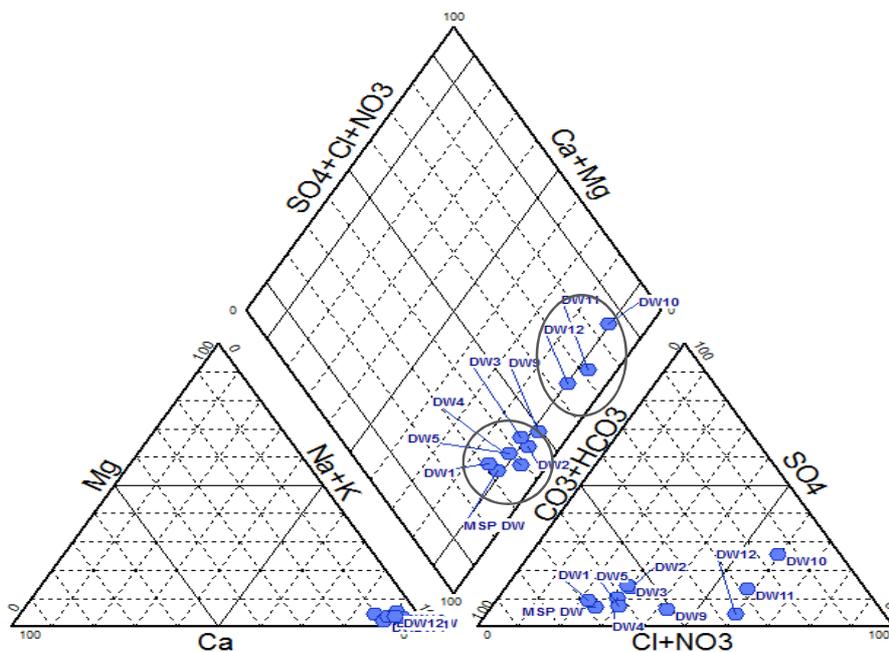


Figure 90 : Faciès chimiques des eaux de la nappe profonde dans la zone minière de GCO

Ces deux faciès montrent une nette zonation entre les forages du Sud de la mine (MSDW, DW1 à DW5) et ceux du Nord entre DW6 et DW11.

XIII.2 Isotopes environnementaux

Dans cette partie nous allons explorer l'outil de traçage isotopique pour contribuer d'abord, à la caractérisation isotopique des nappes du Quaternaire et du Maastrichtien dans la zone minière de GCO et ensuite analyser les processus de mélange qui interagissent entre l'aquifère supérieur des sables du Littoral Nord et la mine proprement dite (bassin de dragage et terrils).

La technique isotopique utilisée dans le cadre de ce travail est celle de la méthode directe basée sur les isotopes de la molécule d'eau (^2H , ^3H , ^{18}O) et ceux de certaines espèces dissoutes (^{13}C , ^{14}C) du carbone inorganique CITD. L'objectif de l'utilisation des isotopes radioactifs, tels que ^3H et ^{14}C est de reconstituer l'âge moyen de la recharge des eaux du Quaternaire et si possible d'estimer les vitesses d'écoulement des eaux du bassin de dragage ou d'infiltration des terrils.

Les résultats des analyses isotopiques spécifiques à la zone minière de GCO sont présentés dans le tableau ci-dessous (TABLEAU 25).

XIII.2.1 Composition isotopique des eaux de pluie de la zone d'étude

La recharge des nappes trouvant leur origine à partir des eaux d'infiltration des pluies efficaces, la connaissance des variations temporelles et spatiales de ces dernières devient indispensable pour l'étude des systèmes aquifères.

L'évaporation de la pluie qui tombe a pour conséquence son enrichissement en isotope lourd. La relation établie entre les isotopes stables des précipitations à l'échelle mondiale a été utilisée pour définir la droite météorologique mondiale (DMM) d'équation (Craig H, 1961) :

$$\delta^2\text{H} = 8 * \delta^{18}\text{O} + 10 \quad (51)$$

- L'ordonnée à l'origine de cette droite qui caractérise l'excès en deutérium varie en fonction de l'origine des précipitations. Elle est proche de 10 dans les régions sous influence directe des précipitations océaniques. Quand elle est supérieure à 10 ; ceci caractérise un recyclage de la vapeur locale.
- Une eau évaporée présente une droite de corrélation dont la pente est plus faible que celle de la droite météorologique mondiale (DMM).

La droite météorologique mondiale constitue la référence à partir de laquelle les eaux de pluie, de surface et souterraine sont comparées pour déduire les processus majeurs qui affectent la composition isotopique de ces eaux (évaporation, mélange, géothermie).

Tableau 25 : Synthèse des résultats des analyses chimiques et isotopique de la zone minière

Nom	X (UTM)	Y (UTM)	2H	18O	± 2 σ 2H	± 2 σ 18O	13C	delta 13C	A14C	± 2 σ A14C	3H	± 2 σ 3H	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	SiO2	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Fe(III)	pH	T	EC lab
DGPZ002	307096	1691648	-37.1	-5.4	0.8	0.1	-10.4						6.4	3.36	16.95	2	6.38	46.15	26.84	0	<0.9	18.8		5.9	30.1	191.1
DGPZ053	307387	1692166	-35.6	-5.1	0.8	0.1	-7.8				1.7	0.9	8	4.8	9.14	2	23.68	10.65	4.88	0	<0.9	80.6		6.32	27.5	302.5
PzCb1	307327	1691201	-37.2	-5.5	0.8	0.1	-11	-16.3	94.4	0.4	0.7	0.7	40	33.6	49.19	6.08	9.58	81.65	0	0	<0.9	292		5.93	28.6	854
PzCb3	307579	1690910	-32	-4.6	0.8	0.1	-17.9				0.6		16	14.4	79.77	3.38	6.68	134.9	0	0	<0.9	135.8		5.83	28.5	705
PzCb6	308245	1691012	-37.3	-5.5	0.8	0.1	-10.5						16	14.4	52.25	3.38	6.78	81.65	2.44	0	<0.9	113.3		5.65	30	585
PzCb9	308387	1691546	-35.2	-5.1	0.8	0.1	-14				1.5	1	16	19.2	79.77	8.78	14.28	152.65	0	0	<0.9	130.6		5.82	29.2	807
PzCb11	308483	1691971	-37.9	-5.7	0.8	0.1	-13.7				0.6		1.6	4.8	30.84	2	6.08	63.9	0	0	<0.9	6.2		5.17	30.2	250.6
DGPZ021	309323	1693998	-33.6	-4.8	0.8	0.1	-16.7						3.2	5.28	9.14	2	7.28	28.4	12.2	0	<0.9	2.2		6.56	28.2	110.7
DGPZ044	311405	1698148	-37.4	-5.6	0.8	0.1	-14.1				0.6		40	31.2	20.01	8.78	12.48	28.4	63.44	0	<0.9	154		6.66	29.6	592
P11	310091	1693912	-28.1	-3.9	0.8	0.1	-6.5				1.9	1.3	152	72	141.2	12.84	6.68	241.4	34.16	0	124	545		6.73	26.8	2039
P20	309439	1691643	-37.3	-5.4	0.8	0.1	-12.6				2.4	1	20	12	30.84	3.38	9.78	46.15	24.4	0	20.9	48.5		6.76	27.5	375.1
DGPZ090	305158	1692073	-34.9	-5.3	0.8	0.1	-9.5				0.8	0.5	12.8	9.12	33.9	2	7.78	28.4	48.8	0	<0.9	24.2		6.3	27.7	319
DGPZ091	305757	1692021	-36.1	-5.4	0.8	0.1	-5.4				2	1.2	9.6	3.84	7.58	2	7.28	10.65	48.8	0	<0.9	0.7		6.64	28.7	169.5
DGPZ092	306356	1691969	-34.8	-5	0.8	0.1	-14.2				2.8	0.9	0	0.96	6.01	2	6.58	1.775	2.44	0	<0.9	1.2		6.49	29.3	115
Pond			-28.9	-4	0.8	0.1	-15.9	-17.5	59.7	0.2	1.5	1	7.2	5.28	104.5	3.38	5.58	117	9.74	0	28.4	52.1		6.35	28.9	635
MSP DW	310150	1689065	-31.9	-5.06									10.2	2.8	126.6	9.1	11.3	58.9	278.2		0.9	22.7	37.7	8.2	31	691
DW1	308015	1690822	-31.4	-4.45									10.9	2.9	100.2	8.2	10.8	42.2	231.8		0.9	24.9	13.4	7.4	24	581
DW2	309109	1690009	-31.5	-5.14									10.0	3.2	192.7	9.4	13.7	96.7	322.1		4.7	62.3	11.8	7.3	25	977
DW3	309212	1691230	-30.4	-5.02									20.6	2.7	217.8	8.5	13.2	113.6	383.1		0.9	78.4	573.4	7.6	24	1140
DW4	309052	1692532	-29.2	-4.36									9.3	2.7	229.4	8.7	12.7	103.9	399.0		9.0	52.9	44.3	7.9	24.5	1089
DW5	309659	1693443	-30.4	-4.74									11.2	3.2	148.1	7.2	11.6	78.9	277.0		1.7	26.2	23.3	7.7	27	771
DW9	311752	1697684	-31.0	-4.99									10.8	3.9	204.4	9.4	12.2	147.7	314.8		8.9	28.6	32.3	8.3	25.5	1050
DW10	312950	1698264	-28.7	-4.66									36.2	21.7	706.8	21.5	9.2	750.0	328.2		17.7	441.6	140.1	7.9	31	3780
DW11	311854	1699007	-31.3	-4.47									15.9	6.8	381.0	12.6	13.1	369.0	314.8		11.9	117.1	11.3	7.3	29	1982
DW12	309964	1694395	-30.2	-4.95									14.7	5.4	250.4	10.3	11.3	274.3	278.2		0.9	29.0	49.9	7.1	30	1369

Les données de pluies ont été mesurées sur la presqu'île du Cap-Vert, à Pout et Louga respectivement dans le cadre du RAF/08/022/SEN pour les pluies de 1995 et par (IAEA/WMO, 2016) qui publie périodiquement les données isotopiques des précipitations de plusieurs pays dans son site web (GNIP). Ces dernières concernent les stations pluviométriques de Dakar, Louga et Pout en 2013. Ces échantillons d'eau de pluie analysés sont reportés sur le diagramme $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$ (FIGURE 91). Les teneurs isotopiques sont comprises entre -73.4 et 11.06 ‰ pour le deutérium et entre -10.4 et -2.2 ‰ pour l'oxygène 18. Le graphe montre que la plupart des points sont situés sur la DMM ou très proche de celle-ci avec une droite de régression linéaire d'équation :

$$\delta^2\text{H} = 6.53 * \delta^{18}\text{O} + 2.44 \quad (r = 0.93 \text{ et } n = 31) \quad (52)$$

Les points situés en dessous de la DMM indiquent un léger enrichissement en isotopes lourds résultant d'une évaporation partielle des eaux de pluie au cours de leur chute. Ceux qui sont situés sur la DMM ou très proches concernent des précipitations qui n'ont pas subi de modification de leur composition isotopique.

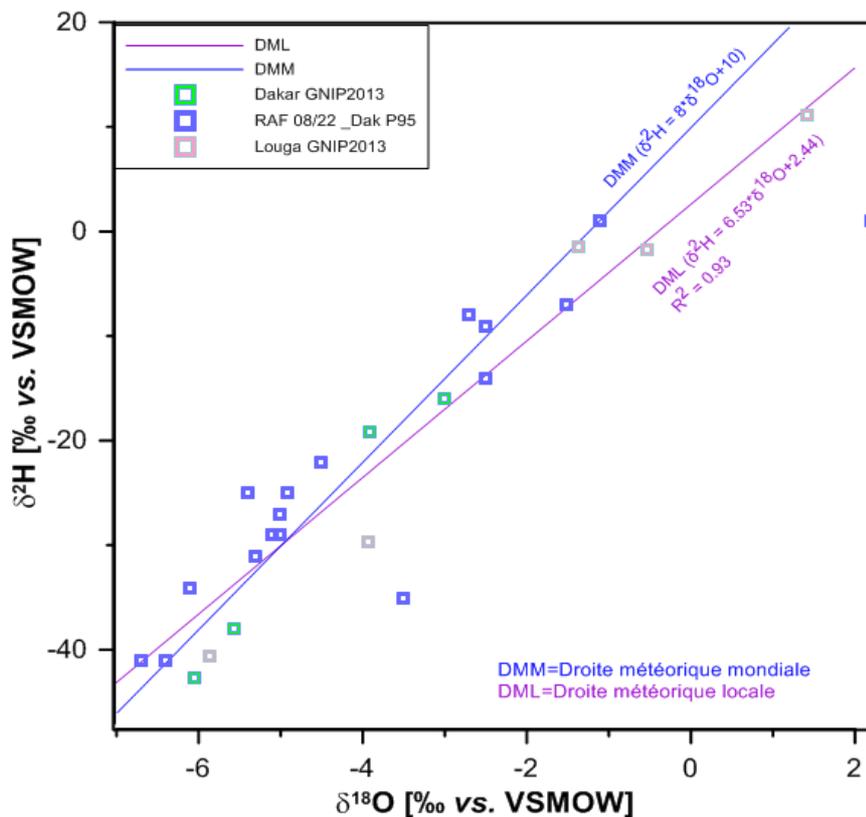


Figure 91: Diagramme $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$, droite météorologique locale de cette étude

Auparavant (Gaye C.B., 1990) et (Travi et al, 1987) avaient réalisé chacun une campagne d'échantillonnage d'eau de pluie au Sénégal. Gaye (1990) avait fait des analyses isotopiques des eaux de pluies qui tombaient à Dakar (1986) et à Louga (1989). Les teneurs de ces eaux avaient permis de déterminer la droite météorique locale des eaux de pluies. Cette dernière avait comme équation :

$$\delta^2\text{H} = 7.64 * \delta^{18}\text{O} + 5.51, R^2 = 0.96 \quad (53)$$

La pente de cette droite est très proche de la pente des eaux météoriques mondiale égale à 8, établie par (Craig H, 1961). Travi (1987) avait fait une étude isotopique sur les eaux de pluies de 1981 et 1984 à l'échelle du territoire sénégalais. La droite météorique locale qui s'en était dégagée a comme équation (Travi et al, 1987):

$$\delta^2\text{H} = 7.93 * \delta^{18}\text{O} + 10.09, R^2 = 0.972 \quad (54)$$

Ces droites météoriques locales de (Gaye C.B., 1990) et de (Travi Y, 1988) montrent que les précipitations qui tombaient sur le territoire du Sénégal n'avaient pas subi d'évaporation au cours de leur chute. Ce résultat diffère un peu de celui obtenu avec les données actuelles des campagnes du Raf 22/08 et des données du GNIP qui montrent une évaporation des gouttes d'eau au cours de leur chute.

Pour la suite des analyses dans le cadre de ce travail, nous considérerons la droite météorique locale de Gaye (1990), comme la référence du fait qu'elle a été longuement approuvée et demeure aujourd'hui la référence la plus utilisée au Sénégal.

XIII.2.2 Composition isotopique des eaux de la nappe

Dans le cadre de ce travail, les teneurs isotopiques des eaux de la nappe superficielle dans la zone minière ont été mesurées en Mai 2015. Auparavant en 2014, les forages profonds de la mine ont fait partie des sites collectés dans le cadre du programme RAF 7/011/SEN/AIEA. Dans ce qui suit, nous allons nous intéresser davantage de la caractérisation isotopique de la nappe supérieure sans occulter la nappe profonde maastrichtienne.

XIII.2.2.1 Isotopes stables (18O, 2H)

L'abondance des isotopes stables lourds de l'oxygène (¹⁸O) et de l'hydrogène (²H) donnent des signatures qui renseignent sur des environnements spécifiques. Les signatures en isotopes stables des eaux des nappes sont contrôlées par les trois phénomènes suivants : les précipitations qui ont rechargé l'aquifère, l'évaporation et les mélanges d'eau.

XVII.3.2.1.6 Eaux de la mine

Du point de vue géochimique, les isotopes stables de la molécule d'eau sont mesurés par spectrométrie de masse à source gazeuse avec une précision de ± 0.1 ‰ pour l'oxygène, et de ± 0.8 ‰ pour l'hydrogène.

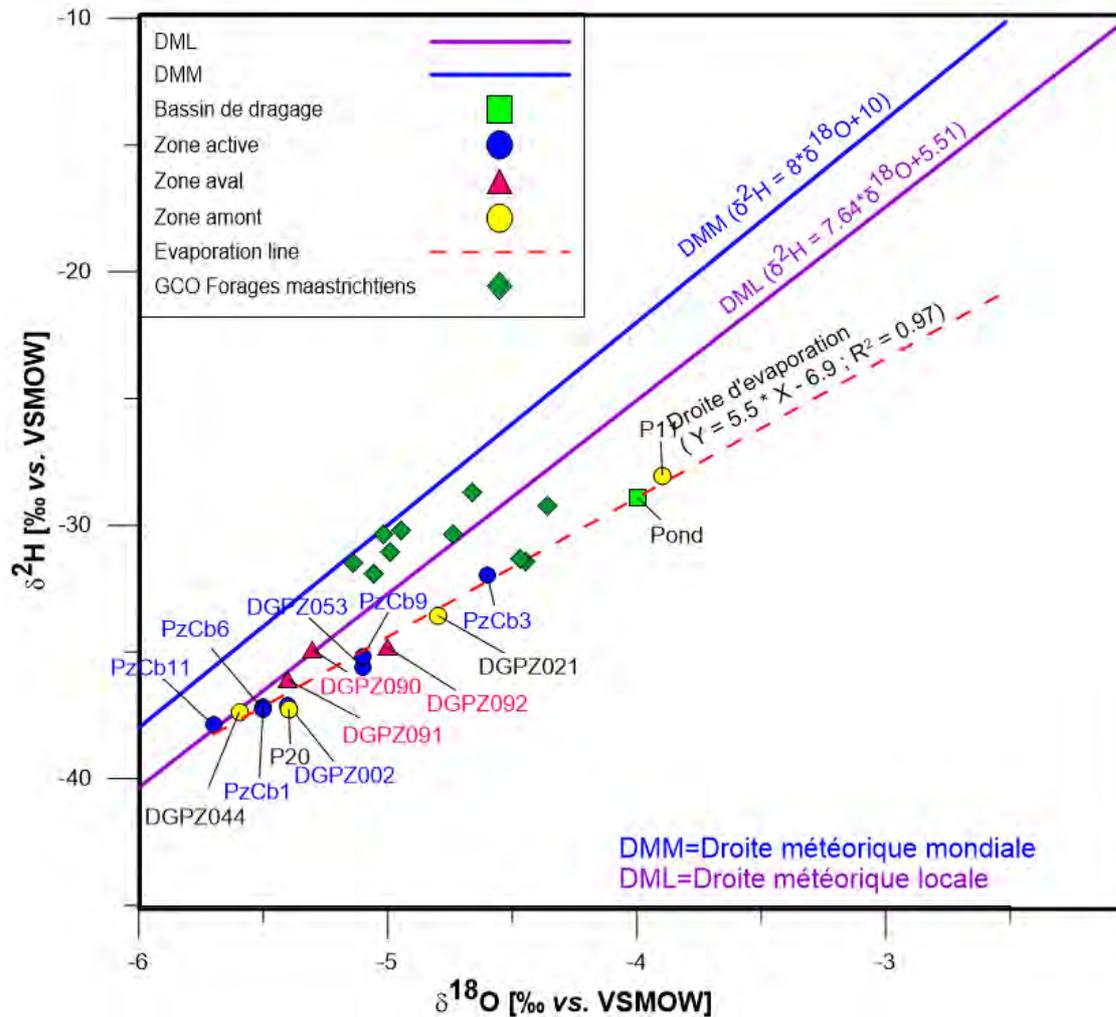


Figure 92 : Diagramme deuterium-Oxygène18 des eaux de la mine

Le diagramme $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$ des eaux de la nappe quaternaire dans la zone minière montre une dispersion des points en dessous de la droite météorologique locale sur une droite d'évaporation d'équation (FIGURE 92):

$$\delta^2\text{H} = 5.5 * \delta^{18}\text{O} - 6.91, R^2 = 0.97 (n=15) \quad (55)$$

La pente de la droite montre que les eaux de la nappe ont subi l'évaporation. Les teneurs isotopiques des eaux de la nappe sont comprises entre -37.9 ‰ et -28.1 ‰ avec une valeur moyenne de -34.9 ‰ pour le deutérium et entre -5.7 ‰ et -3.9 ‰ avec une moyenne de -5.08 ‰ pour l'oxygène 18. Cependant, les points

localisés dans la zone aval éloignée DPZ090, DPZ091, DPZ044 et PzCB11 sont les moins évaporés. Ce phénomène n'est pas surprenant car les premiers gardent une bonne couverture sableuse et n'ont pas encore subi vraisemblablement l'effet des terrils. Par contre le dernier (PzCB11) est localisé au niveau d'un thalweg entièrement surplombé par les hautes dunes des deux côtés ; ce qui lui confère un milieu humide la plupart du temps.

D'autre part, le bassin et le puits P11 dont le niveau dynamique est à 3 m du sol, sont les plus évaporés du fait de leurs plans d'eau fortement exposés aux rayons solaires. Les autres échantillons de l'amont immédiat du bassin de dragage ou de la zone active qui enregistrent une surélévation du niveau statique occupent le niveau intermédiaire en termes d'importance d'évaporation. D'une manière assez nette, le constat est que les échantillons dont le niveau dynamique (ou statique) est plus profond sont moins enrichis en isotopes lourds de la molécule d'eau.

Par ailleurs, les eaux échantillonnées de la nappe profonde montrent qu'elles ont été fortement évaporées. Ceci découle certainement de leur état de conditionnement ou durant leur transport vers le laboratoire de l'AIEA. Cela n'exclue également pas qu'il y ait une contamination avec la nappe supérieure.

XIII.2.2.2 Isotopes radioactifs

XVII.3.2.1.7 Tritium

Les teneurs en tritium des eaux de la NSQ du Littoral Nord, mesurées en 2015 dans la zone minière de Diogo, varient entre 0.6 (DGPZ044) et 2.8 UT (DGPZ092). La moyenne est de 1.42 UT. Ces teneurs sont en partie proches de celles des eaux de pluie mesurées dans la zone du Horst en 2008 qui varient entre 1.3 et 4.8 (Madioune D.H, 2014) et de celles mesurées à Dakar qui varient entre 1.5 et 2.8 (Diedhiou M, 2011). Deux groupes s'identifient : les eaux à très faibles valeur d'UT et les autres aux teneurs faibles à moyennes (FIGURE 93).

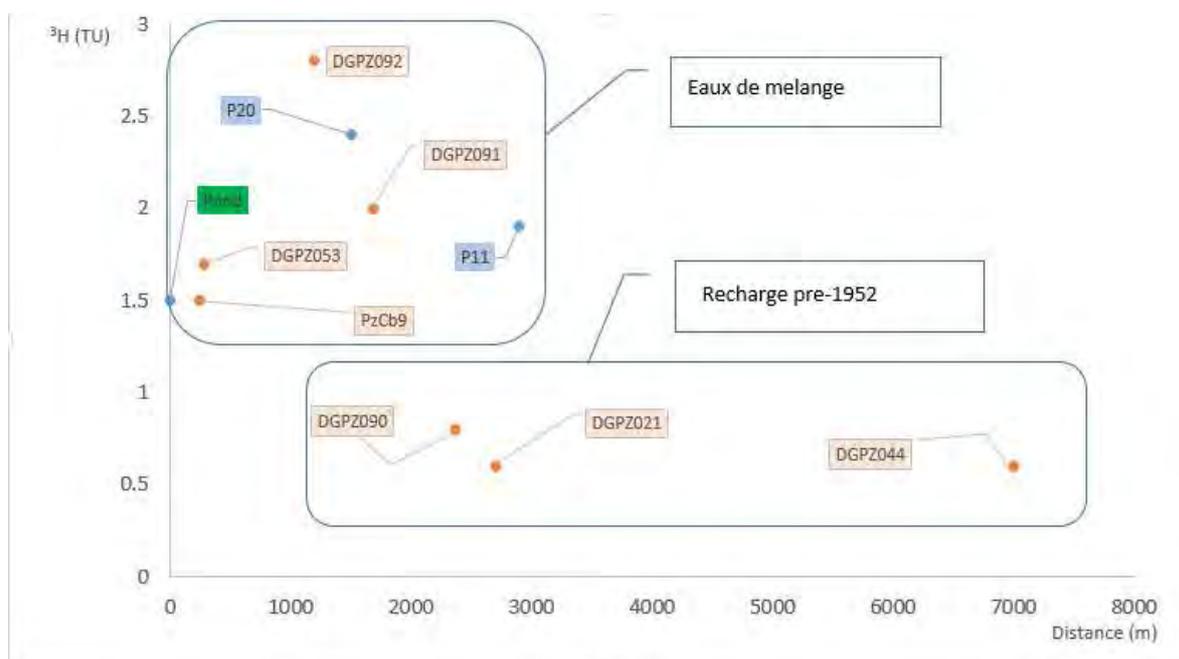


Figure 93 : Répartition des teneurs en tritium eaux de la mine en fonction de leur distance /bassin

En ce qui concerne le premier groupe, il s'agit des eaux dont les valeurs sont très faibles et restent inférieures à 0.8 UT, témoignant leur origine d'une recharge antérieure à 1952.

Différents cas de figure pourraient être envisagés :

- les eaux n'ont pas été renouvelées ;
- la recharge est reprise par l'évaporation ou par les écoulements vers l'océan ;
- elles sont piégées dans des horizons très silteux ne facilitant pas le mélange avec des eaux récentes.

En dehors du piézomètre DGPZ090 située à 2 km de la première zone de dépôts des terrils, les autres points de ce groupe ne se trouvaient pas dans la zone d'écoulement des infiltrations en provenance des terrils.

Les échantillons du second groupe ont enregistré des valeurs comprises entre 1.5 et 2.8. Ces eaux sont donc soit récentes soit issues d'un mélange avec des eaux antérieures aux essais thermonucléaires.

Cependant, le bassin constitue inéluctablement un pôle de mélange dès lors qu'il reçoit chaque jour une quantité approximative de 20 000 m³ d'eau du Maastrichtien. Le volume d'eau contenue dans le bassin est d'environ 700 000 m³. A ce pôle de mélange, par excellence d'eau maastrichtienne et quaternaire, on peut associer les points les plus proches de la zone d'influence des terrils tels que DGPZ053 et PzCB09 dont les teneurs en tritium sont très proches de celle du bassin. Ces trois échantillons ont les valeurs les plus faibles en terme d'UT parmi ceux du second groupe et restent alors à la frontière entre la recharge antérieure et celle récente.

Selon la variation piézométrique, l'effet de la recharge est observé jusqu'au DGPZ091 qui se trouve à environ 1.6 Km de la première zone de dépôt des terrils.

XIII.2.2.2.1.1 Les eaux tritiées de la mine à l'échelle du bassin

Pour une meilleure lecture des échantillons isotopiques de GCO par rapport à l'ensemble du bassin, ils ont été reportés avec les eaux du bassin du fleuve et celles de la nappe maastrichtienne obtenues dans le cadre du programme de l'AIEA/RAF 07/11. Le graphe montre une différenciation assez nette de trois groupes (FIGURE 94):

- les eaux du bassin du fleuve ont des teneurs relativement élevées en tritium, supérieures à 3 UT ;
- les eaux du mélange avec des valeurs comprises entre 1 et 3 UT ; on y trouve toutes les eaux, superficielles et anciennes. Les eaux maastrichtiennes montrent soit une contamination venant des eaux superficielles ou bien une recharge récente. Ceci peut être le cas à l'Ouest à Ndiass, à l'Est vers Matam ou bien au Sud vers Vélingara ;
- Le troisième groupe est constitué essentiellement des eaux du maastrichtien dont la plupart ont enregistré 0 UT et quelques eaux de la nappe superficielle dans la zone de GCO issues très probablement d'un mélange ou de recharge antérieure à 1952.

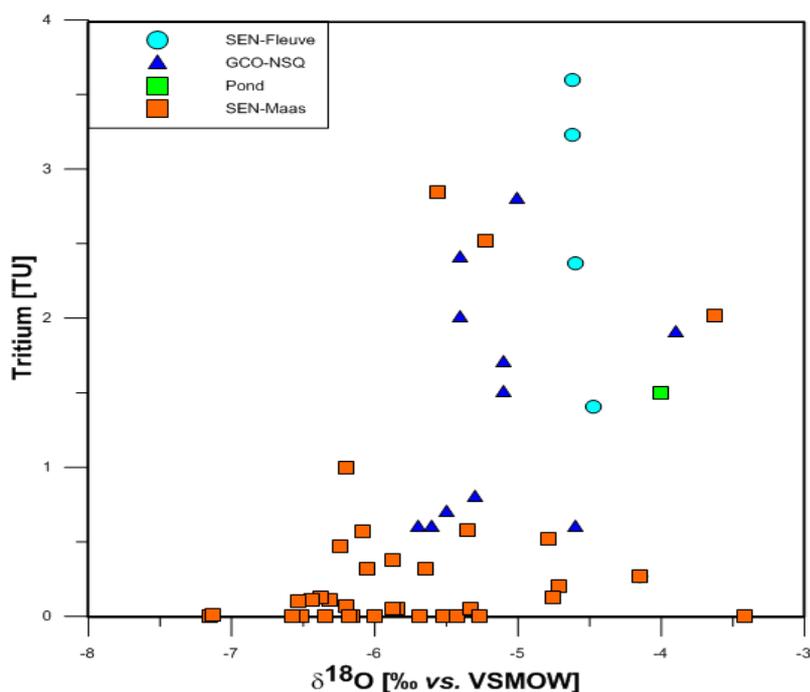


Figure 94 : Relation entre le tritium et l'oxygène 18 des eaux de la mine et du bassin sénégalais

XVII.3.2.1.8 Radiocarbone (¹⁴C)

XIII.2.2.2.1.2 Le temps de séjour

Comme on l'a tantôt expliqué, la datation est basée sur la décroissance radioactive de la teneur en ¹⁴C du carbone inorganique total dissous (CITD). Le temps de séjour moyen *t* de l'eau entre la zone de recharge et le lieu échantillonné est :

$$t = 8267 \ln \frac{A_0}{A_t}, \quad (t \text{ en années}) \quad (56)$$

Où A_0 = activité initiale du ¹⁴C et A_t = activité en ¹⁴C de l'échantillon

$8267 = \ln 2 / \lambda$ (λ = constante de désintégration du ¹⁴C)

Il existe plusieurs méthodes de calcul de l'activité initiale A_0 . Ces modèles sont basés principalement sur deux approches différentes dans la dilution de l'activité initiale depuis la fermeture du système : modèle de dilution chimique et modèle d'échanges isotopiques.

- Les modèles de mélange chimique (Tamers, 1976) et isotopique du CITD (Ingerson & Pearson, 1964) entre le CO₂ du sol et les carbonates de la matrice aquifère ;
- Les modèles de mélange chimique avec phénomène d'échange isotopique entre le CITD de la phase gazeuse et la matrice carbonatée (Fontes JC. et Garnier J.M, 1979).

Les analyses en ¹⁴C sont effectuées seulement sur les deux échantillons les plus représentatifs : il s'agit du bassin de dragage et du piézomètre PzCb1 qui ont respectivement les résultats suivants : 59.7 ± 0.2 pmc ($\delta^{13}\text{C} = -17.5$ ‰) et 94.4 ± 0.4 pmc ($\delta^{13}\text{C} = -16.3$ ‰).

Les âges bruts sont de 476 et 4264 ans BP respectivement pour les eaux du piézomètre PzCb1 et du bassin de dragage (TABLEAU 26).

Tableau 26 : Les âges apparents des eaux du bassin et de la nappe selon différents modèles d'estimation

Echantillon Prélèvement	Eau prélevée			Température °C	pH pH	TAC(mel) mesuré	âge									
	A ¹⁴ C	Erreur	δ ¹³ C				Tamers	Pearson	Mook	F & G	F & G eq	AIEA	Evans	Eichinger	Olive	âge brut
Pond	59.7	0.2	-17.5	28.9	6.35	0.16	1822	3585	5464	4561	12942	7739	3541	3782	actuel	4264
PzCB1	94.4	0.4	-16.3	28.6	5.93	0.002	actuel	actuel	162	actuel	10557	3387	actuel	actuel	actuel	476

Les âges corrigés expriment suivant la plupart des modèles de correction, un âge actuel pour l'échantillon de PzCB1. Pour le bassin aussi, les âges sont relativement proches avec un âge moyen 3800 ans BP à l'exception de l'estimation par le modèle de Fontes et Garnier équilibré qui s'est trop écarté des autres. Ces âges jugés moyens peuvent avoir différentes explications :

- mélange d'eaux anciennes et récentes ; corroborant ainsi le résultat obtenu avec l'utilisation du tritium ;
- un temps de séjour relativement ancien des eaux du bassin mais montrant ainsi l'existence d'une recharge postérieure au dépôt ;
- les eaux du bassin dont environ 90% proviennent de l'aquifère des sables n'ont pas bénéficié d'une recharge récente ou qu'elles soient affectées par la reprise évaporatoire, prélevées ou tout simplement écoulées vers la mer.

Seul le modèle d' (Olive P, 1996) a estimé un temps de séjour récent des eaux du bassin, postérieur à 1952.

XIII.2.2.2.1.3 *Le sens et les vitesses d'écoulement*

Pour une meilleure compréhension de la dynamique d'écoulement des infiltrations entre le système bassin/dépôt et la nappe, le transect entre Bassin/Dépôt et PzCB1 a été choisi. La première zone de dépôt des terrils est supposée avoir la même composition que les eaux du bassin actuel. Les résultats devront permettre d'infirmer ou de confirmer les directions d'écoulement et comparer les vitesses moyennes de l'eau obtenues par la loi de Darcy et celles déduites des activités en carbone 14.

En effet, sur une ligne de courant, on peut calculer la vitesse du filet d'eau entre deux points par la relation suivante en supposant que l'écoulement est majoritairement horizontal :

$$v = \frac{d_{MN}}{t_M - t_N} \quad (57)$$

Avec

- d_{MN} = distance entre les points M et N
- la différence $t_M - t_N$ représente le temps de séjour de l'eau entre les points M et N.
- t_M et t_N découlent de la loi de décroissance radioactive du ^{14}C .

$$t_s = \frac{T_{1/2}}{\ln 2} \times \ln \frac{a_M}{a_N} \quad (58)$$

Avec $T_{1/2}$ la période de demi-vie du carbone 14 = 5730 ans.

De cette façon, on s'affranchit de la difficulté d'estimation de A_0 . On doit au préalable vérifier que l'alcalinité de même que le ^{13}C n'ont pas évolué. La vitesse sera alors :

$$V_{^{14}\text{C}} = \frac{d_{MN}}{t_s} \quad (59)$$

L'incertitude liée à cette méthode dépend évidemment de celle sur les activités en carbone 14 des eaux ; celle-ci reste inférieure à 10% à l'exception des faibles activités (< 10 pcm) où elle peut atteindre 20%.

En ce qui concerne les vitesses hydrauliques, celles-ci sont déterminées à partir des données piézométriques et hydrodynamiques. En effet par application de la loi de Darcy, on a :

$$V_H = \frac{K}{n} i \quad (60)$$

Avec,

- V_H la vitesse hydraulique,
- K la perméabilité du milieu, n la porosité cinématique
- et i le gradient hydraulique.

L'aquifère des sables est composé essentiellement de formation de sables fins à moyens parfois grossiers. La porosité peut être estimée à 28%, la conductivité hydraulique est de l'ordre de 14 m/jour. L'épaisseur moyenne est de 30 m. La vitesse hydraulique obtenue est de 548 m par an (TABLEAU 27).

Tableau 27 : Les éléments de la vitesse hydraulique

Profil	d_{MN} m	A_M %	A_N %	t_s an	V_{14C} m/an	i	n	K m/an	V_H m/an
Pond/Depot - PzCB1	200	59.7	94.4	-3788	-0.053	0.03	0.28	5110	548

Ce résultat montre une vitesse radiométrique négative (à cause du non-respect de la loi de la décroissance radioactive) contrairement à la vitesse hydraulique qui reflète bien la réalité hydrodynamique observée sur le terrain. Ceci montre que l'effet des eaux du mélange au niveau du bassin est largement inhibé par les apports naturels d'eau en provenance de la nappe. L'effet du mélange, bien que ressenti au niveau du bassin, est vite dissipé par les flux d'eaux très importants en provenance de la nappe des sables du Quaternaire (NSQ). Ainsi la NSQ du Littoral Nord continue de garder sa signature isotopique.

Conclusion partielle

La recharge estimée par différentes méthodes et sur différents types de sol montre une différence entre les résultats obtenus. Dans la zone Nord toutes les méthodes confondues estiment qu'il n'y a pratiquement pas de recharge. Par contre, au Sud, les méthodes de Turc et de fluctuation piézométrique donnent sur la période 2010-2015, des valeurs de recharge moyenne de 20, 38 et 56 mm/an. La méthode chimique donne pour l'année 2016 une recharge de 14 mm.

L'analyse des essais de pompage met en évidence une différenciation entre deux zones : la bande sableuse Ouest et la bande calcaire Est. La nappe supérieure présente des valeurs de perméabilité de l'ordre de 10^{-5} et 10^{-4} m/s avec des transmissivité entre 10^{-4} et 10^{-2} m²/s alors qu'à l'Est les conductivités hydrauliques sont

de l'ordre de 10^{-3} m/s et la transmissivité 10^{-2} m²/s. La perméabilité de l'aquifère calcaire est au moins 10 fois plus intéressante que celle de la partie sableuse de l'aquifère.

Les pompages d'essai des forages profonds montrent une bonne productivité de la nappe maastrichtienne qui affiche des perméabilités de l'ordre de 10^{-5} m/s et des valeurs de transmissivité de l'ordre de 10^{-3} m²/s. La simulation des pompages des forages profonds de GCO, les résultats de suivi piézométrique donnent des limites du rayon d'influence qui s'étendent sur 5 km.

En ce qui concerne les variations piézométriques, bien qu'il y ait eu une baisse lente et générale de la NSQ, au niveau de la zone minière, c'est plutôt l'opposé avec une remontée des niveaux d'eau, dans la zone adjacente, pouvant atteindre 2 m au-dessus du niveau statique. Ce phénomène risquerait d'occasionner des inondations s'il n'y avait pas le pompage des forages de recyclage qui jouent le second rôle de régulation de niveau. Ils pompent continuellement entre 5 à 6 mois pour maintenir la remontée au maximum + 0.5m au-dessus du niveau initial. Cependant, même après leur arrêt, il arrive qu'il y ait une légère reprise de la remontée avant le retour vers le niveau d'équilibre.

La partie hydrochimique de cette étude a mis en évidence l'existence des familles suivantes dans les eaux de la nappe quaternaire :

- Le faciès bicarbonaté mixte à l'Est de la zone d'étude qui témoigne probablement de l'influence de la nappe des calcaires lutétiens ;
- Le faciès chloruré sodique à l'Ouest de la zone du Littoral Nord dont le site de Diogo ;
- Le faciès chloruré mixte particulièrement dans les environs de la mine de GCO.

Par ailleurs, les eaux de la nappe maastrichtienne restent subdivisées en deux familles chloruré sodique et bicarbonaté sodique.

Après un an d'exploitation, Mai 2014 – Mai 2015, l'étude isotopique du mélange des eaux du bassin a porté sur une quinzaine d'échantillons de la zone minière de GCO. D'autres échantillonnages effectués à travers tout le bassin par l'Etat du Sénégal et par l'AIEA, ont été mis en contribution dans l'interprétation des résultats. Les résultats des isotopes stables de l'eau (²H et ¹⁸O) ont mis en évidence une augmentation de l'évaporation au niveau du bassin et des zones de dépôt des terrils.

Du point de vue chimique, les faciès restent identiques à ceux rencontrés généralement dans la nappe des sables. A l'instar des eaux de la nappe, le long de la bande côtière, celles de la mine sont caractérisées par une dissolution congruente par rapport à la calcite. Aucun phénomène de salinisation n'a encore été observé dans les environs immédiats de la mine. Par ailleurs un phénomène de drainage acide, très faible et très localisé dans les terrils, est suspecté. Ceci serait dû aux phénomènes d'oxydation des sulfures associée aux

tourbes. Aussi, le remaniement des tourbes mélangées au sable et rejetées dans les terrils sous forme de pulpe, semble modifier les teneurs en Carbone 13 des eaux dans la partie active de la mine. Cette hypothèse, aussi solide soit elle, nécessite d'être confirmée par d'autres analyses aussi bien sur les eaux que sur le matériau tourbeux.

La datation des eaux par les isotopes radioactifs a permis de mettre en exergue leur âge moyen (milliers d'années) à récent (< 1952). Ceci pourrait expliquer la faiblesse de la recharge durant ces 50 dernières années en dehors de la recharge artificielle effectuée par le processus d'exploitation de GCO. Tout au moins, cette datation a permis de conclure qu'il y'a un très faible renouvellement des eaux de la nappe supérieure ou bien qu'elle est reprise par l'évapotranspiration durant la longue saison sèche de 9 mois qui suit l'hivernage.

Les résultats d'analyse du carbone 14 ont mis en exergue l'effet très minime du mélange entre les eaux quaternaires et maastrichtiennes dans le bassin. En effet, les importants flux naturels de la nappe dissipent très rapidement la signature isotopique du mélange.

QUATRIEME PARTIE

MODELISATION

Introduction

Dans le cadre de ce travail, le code FeFLOW a été utilisé pour concevoir, construire, évaluer et simuler les relations entre la mine et la nappe. Cependant, en accord avec les plans de production disponibles que sur les 12 premières années, les simulations vont se limiter à l'an 2025.

En plus des données de la mine, d'autres informations ont pu être collectées sur le système aquifère du Quaternaire. La compréhension et la synthèse de ces informations vont guider, dans ce qui suit, notre démarche de modélisation de la NSQ du Littoral Nord dans la zone minière de GCO.

Le présent modèle hydrogéologique a été réalisé suivant différentes étapes illustrées par le diagramme des flux (FIGURE 95).

La démarche de conception de la géométrie à l'aide du logiciel FeFLOW (Diersch H.-J.G., 2005) jusqu'à l'obtention des résultats s'est articulée autour de 6 étapes majeures qui sont :

- définition du modèle conceptuel ;
- sélection du code ;
- construction du modèle ;
- calibration du modèle ;
- analyse de la sensibilité ;
- validation de l'ajustement ;
- simulations.

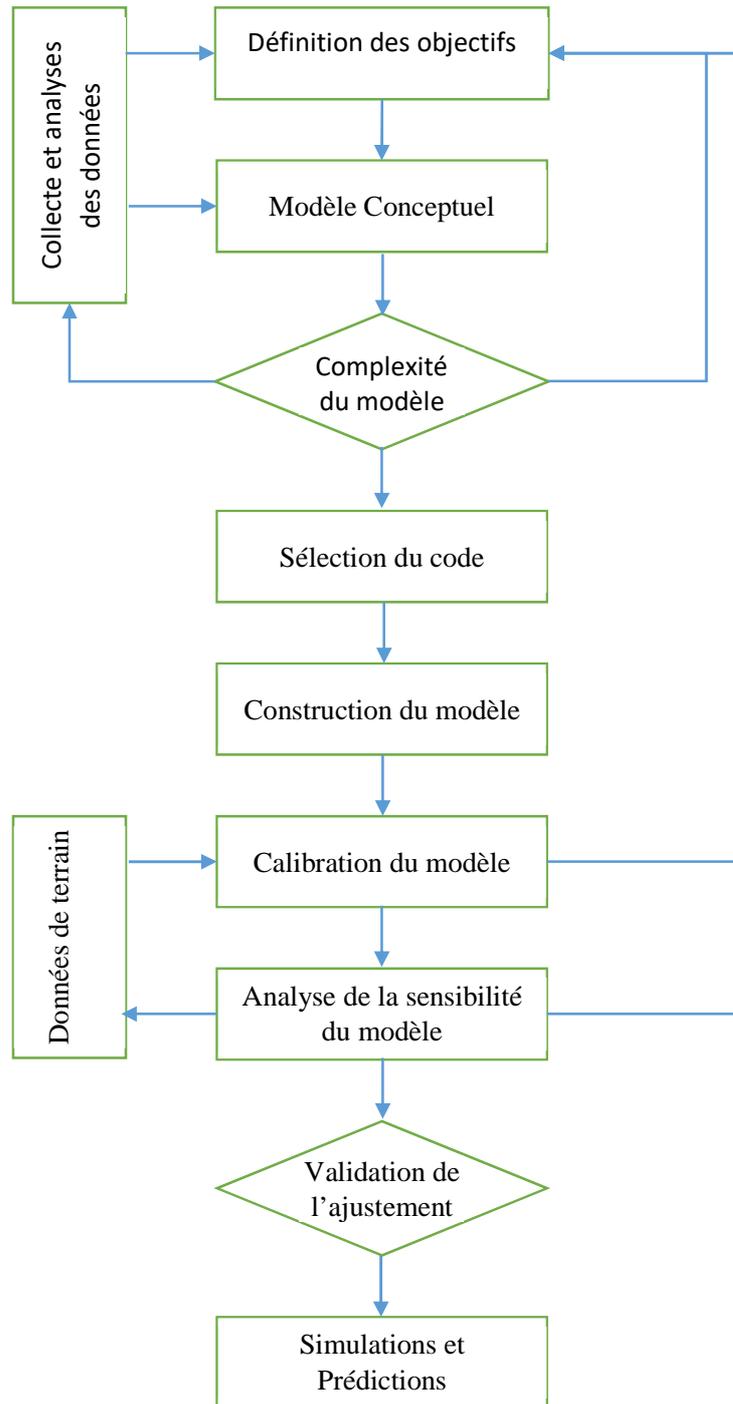


Figure 95 : Diagrammes des flux de la modélisation hydrogéologique de la NSQ du Littoral Nord

Chapitre XIV. Modèle conceptuel et discrétisation

La définition du modèle conceptuel est la première étape de la phase effective de la modélisation. Le présent concept est constitué de deux parties : les éléments ayant trait aux aspects hydrogéologiques de la nappe des sables du Littoral Nord d'une part et ceux exclusivement liés au processus du bilan matière de la mine par dragage de GCO.

XIV.1 Modèle conceptuel de l'aquifère à l'échelle du domaine

La synthèse hydrogéologique locale de la zone et le processus d'exploitation minière de GCO ont permis, de façon succincte, la conception du modèle hydrodynamique.

XIV.1.1 Limite de la zone à modéliser

La géométrie du domaine représente le périmètre du modèle. La délimitation du domaine modélisé s'est faite sur la base naturelle de l'hydrodynamisme de l'aquifère. Elle correspond à un polygone quasi-rectangulaire. La frontière Est est irrégulière, défini par l'allure de la crête piézométrique de la nappe supérieure (FIGURE 96).



Figure 96 : Domaine du modèle hydrodynamique

Il s'étend parallèlement à l'océan sur une longueur de 55.5 Km et une largeur moyenne de 15 km. La superficie du domaine est de 848 km². Il est défini par les points de coordonnées suivantes (TABLEAU 28) :

Tableau 28 : Périmètre du domaine modélisé

ID	X Utm	Y Utm	ID	X Utm	Y Utm
A	288 660	1 671 680	E	319 505	1 690 993
B	298 053	1 663 594	F	326 159	1 699 505
C	309 691	1 673 686	G	332 488	1 708 914
D	315 031	1 682 199	H	319 839	1 717 183

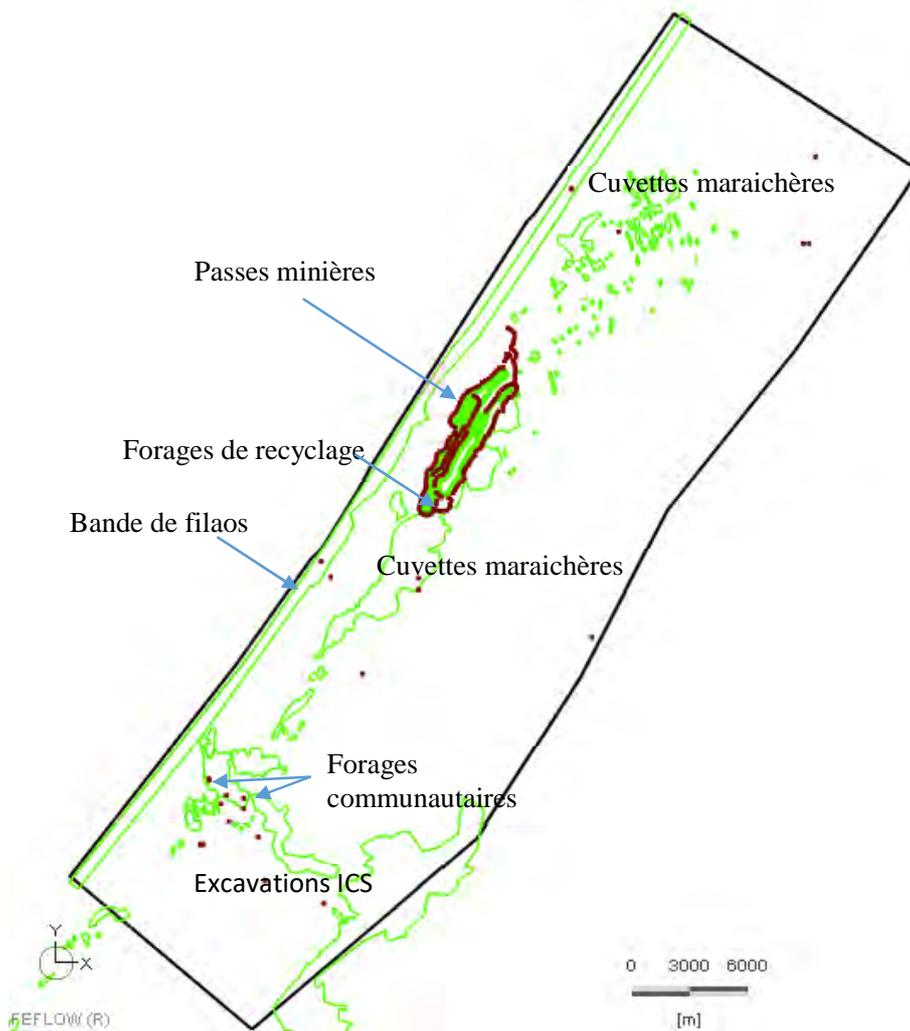


Figure 97: Domaine modélisé avec ses différentes composantes

Il englobe les cuvettes maraichères, les zones exondées, les excavations minières des ICS, les passes minières de GCO, les forages communautaires et les forages de recyclage.

Le domaine est limité :

- à l'Ouest par l'océan Atlantique ($h = 0$).
- au Sud par la ligne de crête piézométrique d'orientation Ouest – est allant jusqu'au Nord de Tivaouane, constitue une limite imperméable ($Q = 0$). Les formations marno-calcaires et calcaires éocènes du Sud-Est de la zone ne montrent pas une continuité hydrodynamique avec les sables quaternaires. En effet, du fait de la faible profondeur des marnes, la faible épaisseur mouillée conduirait rapidement à un assèchement en cas de baisse de niveau, maintenant ainsi la condition de limite à flux nul.
- à l'Est par l'axe du dôme piézométrique, la ligne de crête des eaux, partant de Taïba Ndiaye au Sud, passant par Tawa Mbaye et Teureul jusqu'à Bendiouga au Nord, divise l'écoulement vers deux zones. Au niveau du flanc Ouest, les eaux s'écoulent du dôme en direction de la mer alors que dans la partie Est, les calcaires du Lutétien bénéficient des écoulements du flanc droit.
- au Nord, la limite du domaine part de l'océan en passant au-dessus de Lompoul. Le flux est supposé nul d'autant plus que les gradients sont d'est –Ouest.

Ce domaine inclut naturellement les zones d'exploitation minières de GCO limitées aux dunes de sables éoliens.

XIV.1.2 Conditions aux limites

Les conditions limites sont définies ci-dessous (FIGURE 97) :

- la limite l'Ouest est bordée par l'océan Atlantique ($h = 0$). Il s'agit de la condition limite de Dirichlet.
- la frontière Est, est la ligne naturelle de partage des eaux, décrite ci-dessus. Elle sera considérée comme une condition limite à potentiel constant, c'est une condition de Dirichlet. Le gradient de cette ligne piézométrique passe de la Côte piézométrique + 25 m à Taïba Ndiaye à la côte 5 m à Bendiouga.
- au Sud, la remontée des marnes à marno-calcaires confère à cette limite Sud un flux nul.
- au Nord par un potentiel différencié de zéro.

XIV.1.3 Conditions intérieures

Il s'agit essentiellement des forages de recyclage, du bassin de dragage et des dépôts de terrils sur la partie arrière du bassin (« on-path tailings ») qui constituent le centre des transferts de flux (FIGURE 98).

- L'ensemble Bassin/terrils, long d'un kilomètre en moyenne, fonctionne comme une condition limite de type Cauchy. En effet, des dépôts de particules fines (« slimes ») et de tourbes ou d'argile tapissent le fond du bassin constituant ainsi une couche de résistance de très faible conductivité

hydraulique. En plus du niveau d'eau, cette couche semi-perméable possède un coefficient de transfert qui participe à la régulation des flux d'eau entre le bassin et l'aquifère.

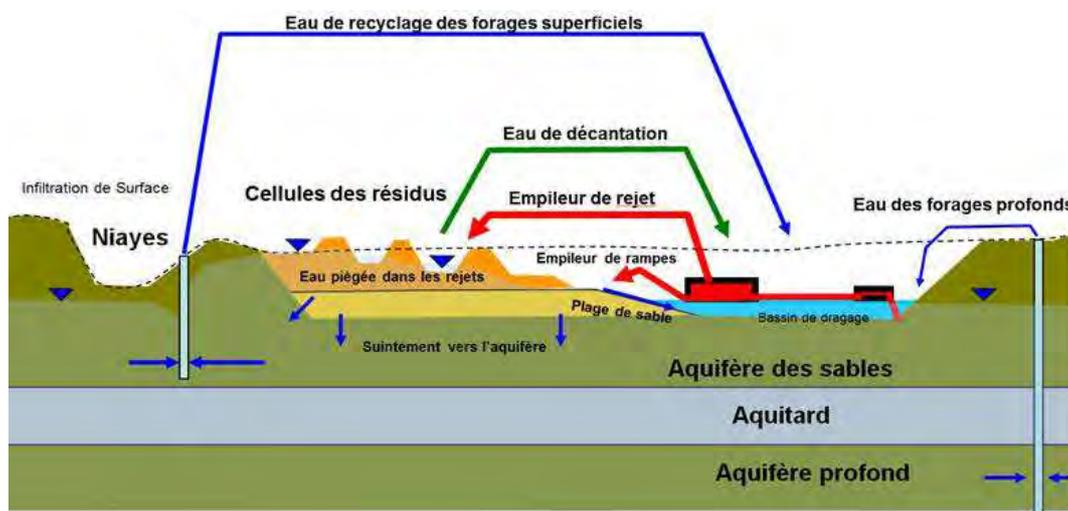


Figure 98 : Schéma du processus des flux d'eau à la mine

- la batterie de forages superficiels de recyclage de GCO est assimilée à la condition de puits d'extraction (4^e condition limite) doublée d'une contrainte de niveau d'eau auquel le forage arrête automatiquement de pomper. La contrainte appliquée répond à la condition de Dirichlet (1^{re} condition limite). En effet, le régime de pompage est soumis à un seuil de niveau d'eau qui est égal au niveau statique $NS \pm 0.5$ m. Quand le niveau d'eau remonte au-dessus du $NS + 0.5$ m, le pompage se déclenche ($Q = - 100 \text{ m}^3/\text{h}$; le signe est négatif car il s'agit d'une extraction). Quand le niveau descend jusqu'au $NS - 0.5$ m, le pompage s'arrête automatiquement ($Q = 0$).
- les 22 forages villageois répertoriés dans le domaine modélisé et captant la nappe quaternaire répondent à la 4^e condition limite qui est celle d'un point d'extraction. Ces forages sont appelés forages communautaires.

XIV.1.4 Les ouvrages et structures géomorphologiques

XIV.1.4.1 Zones cultivées et boisées

Les cuvettes maraichères sont des zones cultivées correspondant généralement aux dépressions interdunaires ou à celles situées entre les dunes éoliennes et les dépôts continentaux. Ce sont d'anciennes reliques de vallées. Aujourd'hui c'est le domaine privilégié du maraichage. Elles se répartissent tout au long du Littoral Nord. Aux points les plus bas la nappe y affleure souvent et parfois tout au long de l'année. C'est aussi la zone par excellence de l'irrigation dans les Niayes.

Il y'a aussi d'autres zones cultivées le long de la ligne de rivage, sur le flanc des dunes vives telles que Mboro Khondio, Fass Boye et Diogo sur Mer etc.

En dehors de ces terres, la partie Est du domaine représente les zones dunaires du continent. Ce sont des sols sableux lessivés et secs de l'erg du Cayor qui sont partiellement cultivés en saison pluviale pour la consommation vivrière : mil, maïs et un peu d'arachide.

XIV.1.4.2 Passe minière de GCO et les forages de recyclage

Il s'agit du chemin minier de la drague. C'est aussi le lieu de dépôt des terrils à l'arrière du bassin tout au long de l'avancement de celui-ci. L'ensemble bassin/terrils évolue sur les dunes minéralisées suivant une orientation SO - NE. La vitesse d'avancement est conditionnée par la topographie, le niveau d'eau du bassin, les contraintes mécaniques ou techniques des infrastructures de production et la dureté du matériau à extraire.

Les forages de recyclage bordent la passe minière de part et d'autre pour la régulation des niveaux d'eau et la récupération des infiltrations au profit du bassin.

XIV.1.4.3 Excavations des ICS

Au Sud du domaine se trouvent les excavations minières des ICS. Elles correspondent aux carrières de phosphates de Ndomor Diop, Tobene et Keur Mor Fall. Ces terres ne sont pas cultivées et la nappe y affleure avec des profondeurs de 30 mètres en moyenne (FIGURE 99).

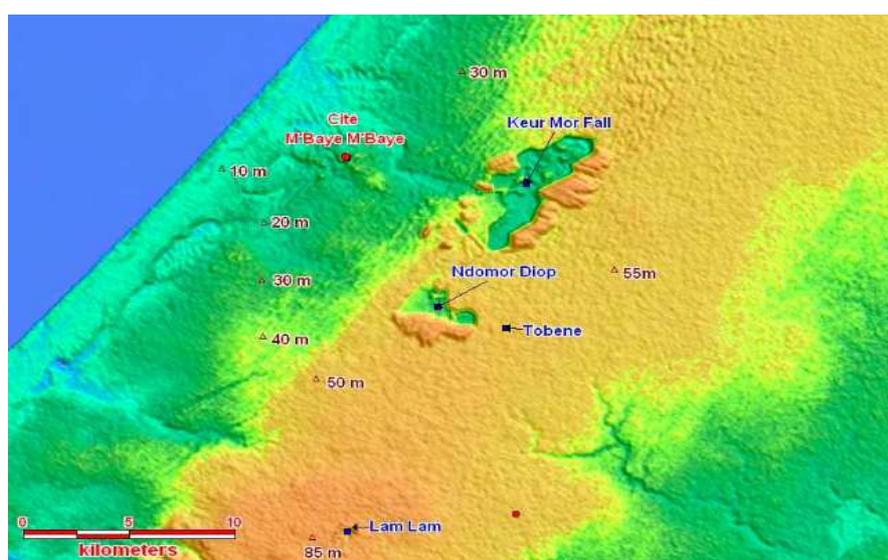


Figure 99 : SRTM 3D des Mines de Taiba (Gachet A, 2012)

XIV.1.4.4 Forages communautaires

Ils sont au nombre de 25 et sont repartis du Sud au Nord. La plus grande concentration se trouve autour de Mboro et Darou Khoudoss. Ces forages du Quaternaire n'alimentent pas les villes comme Mboro et Darou Khodoss qui possèdent des forages captant le Maastrichtien en plus de la conduite d'AEP des ICS.

XIV.1.5 Couches

La lithologie locale, généralement traversée par les forages de recyclage, montre une certaine anisotropie. En effet, l'aquifère sableux, dans les zones dunaires et dans les Niayes se différencie comme suit :

- sable fin à moyen marron, partant de la surface piézométrique à la côte 0 m. IGN
- sable fin à moyen blanchâtre avec des intercalations de formations silteuses ;
- sable beige grossier quartzique parfois graveleux.

Cette particularité lithologique est à tenir en compte dans la configuration des différentes couches du modèle afin d'avoir une meilleure estimation de l'effet des pompes de régulation.

XIV.2 Discrétisation

XIV.2.1 Définition de la supermaille

Cette étape consiste à générer des super-éléments 2-D plan de surface au sein de la zone d'étude afin de mettre l'accent sur les zones de recharge naturelle, d'irrigation, d'infiltration, de dragage, des pompes et d'évaporation. Dans ces zones, le maillage y est davantage raffiné afin que le modèle puisse restituer de façon plus précise la piézométrie. Les super – éléments sont soit dessinés directement dans le logiciel soit importés sous forme de table ou de dessins préétablis à partir de logiciels tels que MapInfo ou Notepad. La passe minière est un bloc modèle représenté en 2D sous forme de filon curviligne subdivisé en intervalles d'un pas de temps de 2 jours (FIGURE 100).

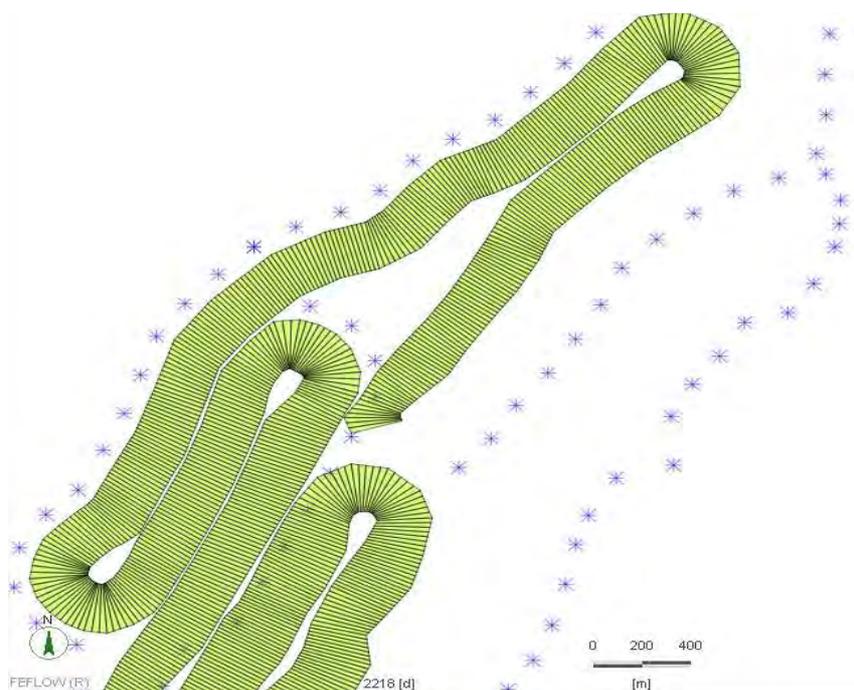


Figure 100 : Les forages de recyclage et la passe minière découpée en tranches de 2 jours d'avancement

XIV.2.2 Maillage 2-D plan de surface

Après importation de la super-maille dans FeFLOW, le réseau 2-D de surface est généré automatiquement à l'aide d'un algorithme nommé T-mesh développé par Tacher L (1999). Ensuite un raffinement a été appliqué le long de la passe minière, des forages de recyclage et de cuvettes maraichères. Il s'agit d'une subdivision des éléments se trouvant dans ces zones en plus petits éléments. Cette opération s'effectue interactivement jusqu'à l'obtention du degré d'affinage désiré (FIGURE 100). Cette maille est constituée d'éléments triangulaires linéaires et de nœuds.

XIV.2.3 Maillage 3-D

L'étape suivante consiste à générer le réseau 3-D en définissant le nombre de couches à ajouter parallèlement au réseau d'éléments 2-D de surface. Puis, on ajoute les différentes surfaces structurales sous forme de fichiers ASCII. FeFLOW attribue à chaque nœud de la maille une côte z. La surface topographique a été régionalisée à partir du MNT de la mine du fichier SRTM et des points cotés où se situent les forages et piézomètres puis implémenté dans FeFLOW. La maille 3-D est constituée de 248 441 éléments prismatiques linéaires à base triangulaire et de 162 776 nœuds (FIGURE 101).

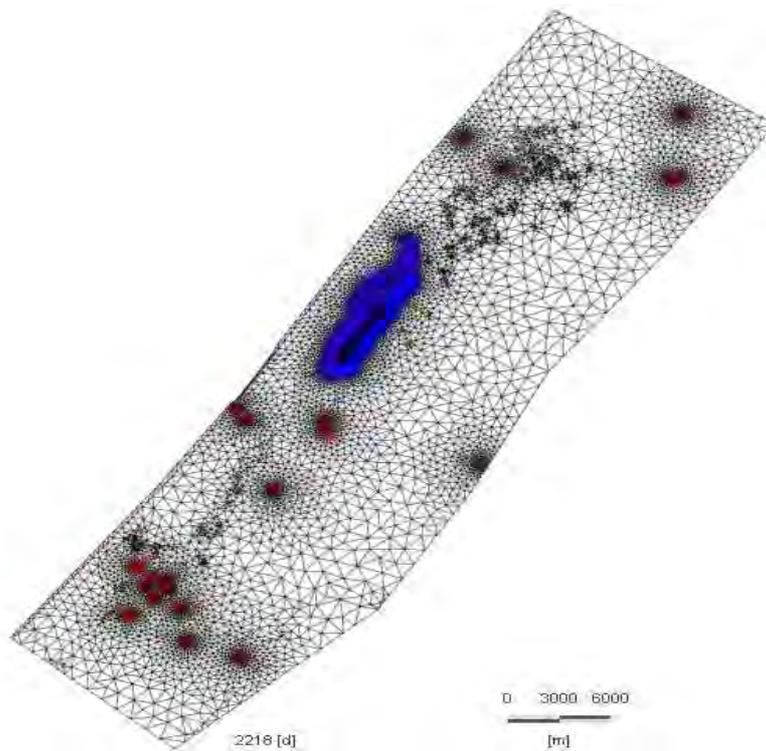


Figure 101 : Carte de génération de la maille du modèle

Pour une meilleure prise en compte de l'anisotropie, la couche aquifère a été subdivisée verticalement en 3 couches et 4 surfaces structurales :

1. surface 1 : la surface piézométrique ;
2. surface 2 : côte 0 ; niveau de la mer
3. surface 3 : côte -15 ; top crépine
4. surface 4 : mur de l'aquifère.

Chapitre XV. Données d'entrée et paramétrisation

En conformité avec le niveau de précision souhaitée, relative à la prise en compte de l'anisotropie, le modèle 3D devient tacitement celui choisi pour notre cas d'étude. Il est celui d'une nappe libre, d'écoulement en milieu saturé à surface libre. Des contraintes de charge au toit et au mur de l'aquifère sont appliquées. Suite à la délimitation de la zone à modéliser, on implémente les données topographiques, géomorphologiques, climatiques, végétative et les ouvrages industriels et domestiques ; mais également les paramètres hydrodynamiques de la nappe et ceux spécifique au processus d'exploitation minière.

XV.1 Entrée des données

XV.1.1 Topographie

La topographie a été obtenue à partir des fichiers MNT réalisés par GCO sur toute sa concession minière et complétée par des données fournies par les fichiers SRTM.

XV.1.2 Piézométrie initiale

La piézométrie initiale appliquée à ce modèle est celle de 2012. Elle couvre toute la zone du Littoral Nord dont nous avons fait un extrait correspondant aux limites du domaine (FIGURE 102).

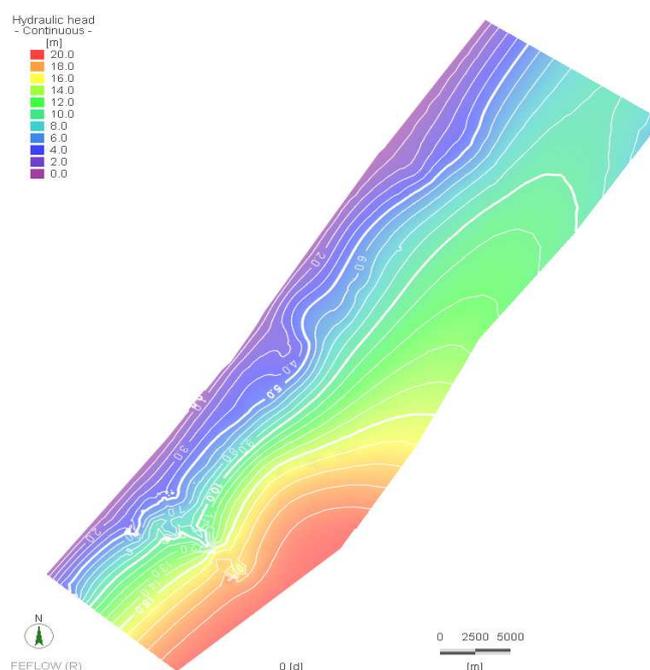


Figure 102 : La piézométrie initiale de référence - 2012

Cette carte de la piézométrie est générée à partir de la table des côtes piézométriques nommée 501Init.dat qui concerne tous les nœuds, tous les éléments, toutes les couches et toutes les surfaces du modèle 3-D.

XV.1.3 Recharge

Elle constitue en général l'un des paramètres les plus importants des modèles. Dans ce présent cas d'étude, son estimation a fait l'objet d'un croisement de différentes méthodes dont le bilan hydrique, la fluctuation piézométrique et le bilan des chlorures. Cette recharge moyenne varie entre 0 et 20 mm. Cependant, elle reste saisonnière, et se concentre durant les deux à trois mois de l'hivernage. A travers FeFLOW les valeurs de recharge ont été introduites via le menu « Material properties\Flow>> et le sous menu << in/out on top/bottom>>. Elles sont affectées à l'ensemble du domaine à travers les mailles (les éléments). Elles sont simulées comme des débits d'injections à travers l'ensemble des mailles.

XV.1.4 Prélèvements

Les prélèvements dans le domaine sont de trois types : les prélèvements communautaires, les prélèvements agricoles et les prélèvements industriels (GCO et ICS) (FIGURE 103).

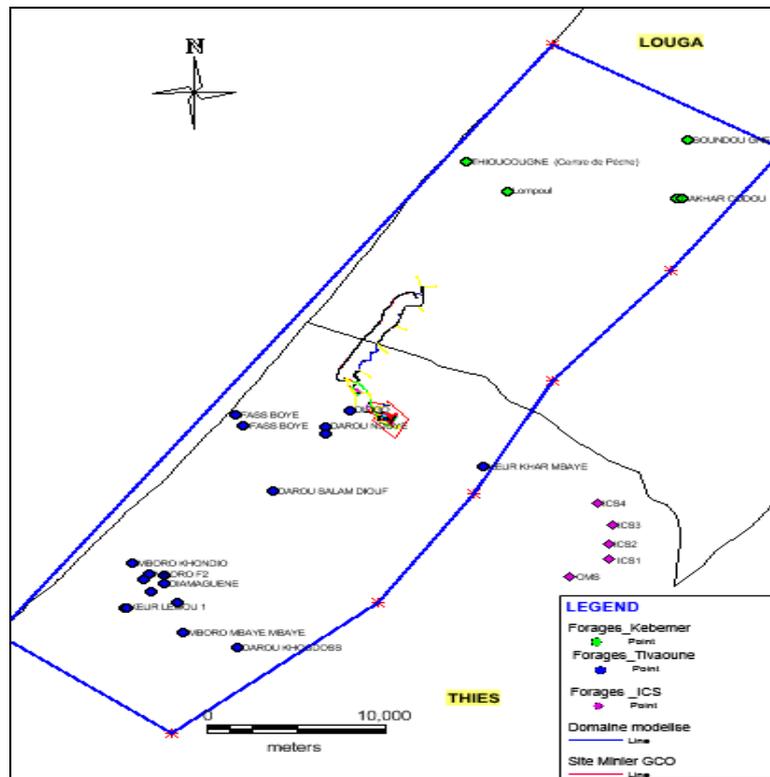


Figure 103 : Les différents points de prélèvements

Les prélèvements agricoles sont assimilés à des pertes à partir de la couche supérieure. Les prélèvements industriels de GCO correspondent aux quantités d'eau recyclées qui sont assimilées à deux conditions limites : celle de débit de pompage imposé au forage et celle de potentiel imposé de Dirichlet.

XV.1.5 Données d'entrée de la production minière

La donnée d'entrée principale de la production minière demeure l'avancement prévisionnel de la drague suivant un pas de temps mensuel. Il s'agit des coordonnées du front de taille du bassin de dragage. Elle est déduite de la capacité nominale d'exploitation de 7000 t/h. Cet avancement est conditionné par la hauteur des dunes, le niveau d'eau du bassin, et la rhéologie des sables dunaires.

XV.1.5.1 Niveau d'eau dans le bassin

Ce niveau d'eau correspond à l'objectif fixé pour une meilleure exploitation du minerai. Il repose sur la profondeur des fortes concentrations du minerai et sur une hauteur d'eau de 6 m requis pour un bon fonctionnement de la drague.

XV.1.5.2 Progression de la mine

Cette progression de la mine, comme on l'a tantôt expliquée dépend essentiellement des paramètres suivants : la hauteur des dunes, la dureté des terrains et le niveau du bassin. Pour son entrée dans le code FeFLOW, une macro prenant en compte les positions mensuelles du front d'exploitation a permis la génération d'un polygone de type de fichier (. ply). Ce polygone est subdivisé en plusieurs sous polygones qui représentent chacun une période et une zone donnée. Ce fichier est le support d'application des flux de transfert IN et OUT entre l'aquifère et la mine.

XV.1.5.3 Hauteur des dunes

Cette donnée est prise en compte par le modèle numérique de terrain (MNT) dans l'ensemble de la zone minière avec une précision de ± 0.5 m. En dehors des dunes, les côtes topographiques ont été obtenues à partir du traitement du fichier SRTM téléchargé de l'internet.

XV.1.5.4 Flux échangés entre la mine (bassin + terrils) et la nappe

Ces flux d'eau échangés entre la mine et la nappe sont définis par la condition de Cauchy. La mine est assimilée à une rivière. La hauteur d'eau varie dans le temps. La passe minière est tapissée par une couche semi-perméable constituée de particules fines argileuses ou tourbeuses qui se sont décantées. Cette couche résistante a une épaisseur variable d'environ 7 cm et une perméabilité très faible. Ainsi deux paramètres appelés taux de transfert « IN ou OUT » ($\phi = k/d$) expriment les coefficients de flux échangés dépendant de la hauteur d'eau dans le bassin. La différence de potentiels induit le flux défini par :

$$Q = Ax\phi (H_{ref} - H) ; \text{ Avec} \quad (61)$$

- A = surface mouillée
- $\varphi = k/d$, k et d sont respectivement la perméabilité et l'épaisseur de la couche semi perméable
- H_{ref} = potentiel de référence à un temps, t_0
- H = potentiel a un temps t

La condition de Cauchy est assignée à l'ensemble des nœuds du domaine de la mine (bassin de dragage et la zone de dépôt des terrils).

XV.2 Paramétrisation du modèle

XV.2.1 Assignment des conditions aux limites

Pour réaliser des calculs, il est nécessaire d'imposer des conditions aux limites qui sont au nombre de quatre pour notre étude : Conditions de potentiel, conditions de flux, les conditions de potentiel dépendant du flux (mixte) et les conditions de forages d'extraction (FIGURE 104).

- Les nœuds auxquels une valeur de potentiel a été assignée. Ils se trouvent le long des frontières, aval (océan $h=0$) et amont du domaine (ligne de crête du dôme piézométrique $h=x$, $x \neq 0$). Les potentiels imposés correspondent à la carte piézométrique de 2012.
- Les lignes (2D) ou aires (3D) auxquelles une valeur de potentiel dépendant du flux a été assignée (couleur verte) ; c'est la passe minière au centre.
- Les nœuds auxquels une valeur de débit a été assignée. Il s'agit des nœuds (2D) ou des lignes de jonction entre deux extrémités représentant les forages de recyclage et les forages communautaires dont les crépines se trouvent à la 3^e couche.

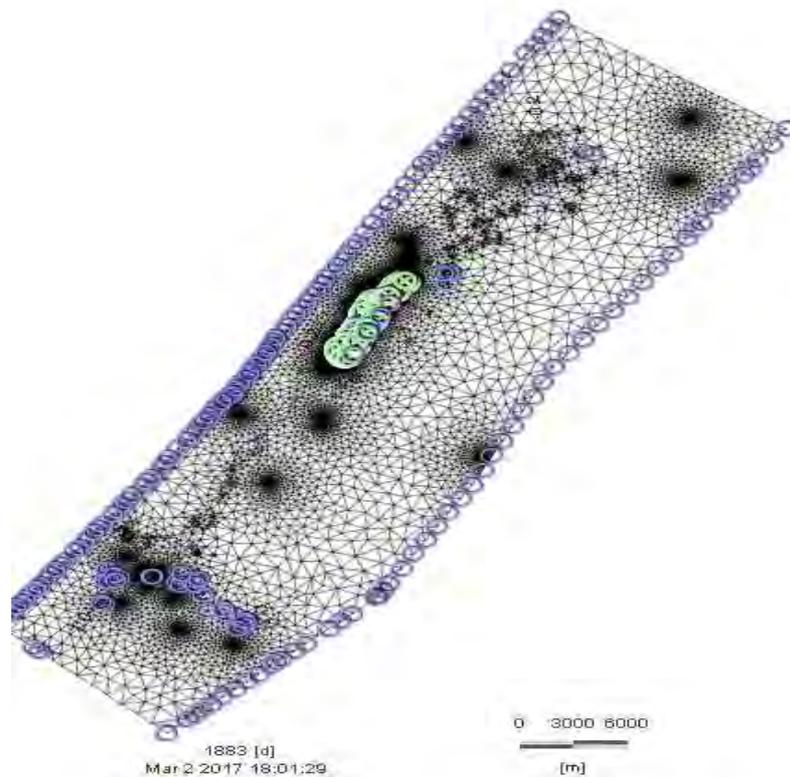


Figure 104 : Interface 1 de l'assignation des conditions aux limites du modèle

XV.2.2 Paramètres hydrodynamiques

Dans cette partie, il s'agit de l'assignation des propriétés intrinsèques du domaine modélisé à savoir la perméabilité (transmissivité en 2-D) et le coefficient d'emmagasinement. Les valeurs sont assignées à l'ensemble des éléments suivant les 3 couches superposées. Le coefficient d'emmagasinement déduit des essais de pompage n'est utilisé que pour les calculs en régime transitoire.

Chapitre XVI. Calage et sensibilité du modèle

XVI.1 Calage du modèle

XVI.1.1 Définition des points de contrôle des débits et des potentiels hydrauliques

Préalablement au calage proprement dit, la construction du modèle étant pratiquement terminée, un certain nombre de points de contrôle ont été reportés en vue de la calibration et de la validation des résultats. Il s'agit des piézomètres disponibles pour l'appréciation de la précision du calage.

XVI.1.2 Calage de la piézométrie en régime permanent

XVI.1.2.1 Choix de la piézométrie de 2007-2009, état de référence stationnaire

La simulation du comportement du réservoir dans des conditions de régime permanent implique l'existence d'un état connu du système dans lequel il y aurait à la fois une stabilité des débits entrants et sortants et des hauteurs piézométriques (Faye S. , 1995). Le modèle a été calibré à partir des données piézométriques observées durant la période pré-exploitation de la mine entre 2007 et 2009. La piézométrie du Quaternaire a été quasi-stable durant cette période.

XVI.1.2.2 Piézométrie de 2007 – 2009

La piézométrie est établie à partir d'un réseau de 350 piézomètres installés par GCO et repartis tout le long de la bande dunaire entre Mboro et Lompoul, de 21 piézomètres du MHA et de quelques puits villageois (FIGURE 105). Elle montre un écoulement d'Est vers l'Ouest. La zone minière de GCO est située le long des dunes côtières, sur le flanc Ouest du dôme piézométrique. Les isopièzes sont resserrées plus au Sud qu'au Nord partant de la Côte + 20 m à 0 m et décrivant un demi-cercle centré sur les excavations minières des ICS. Sur l'axe central, à la latitude de Diogo, elles varient de + 18 m à 0 m tout en restant parallèles à l'océan. Au Nord, vers Biendiouga, elles passent de + 6 m à 0 m.

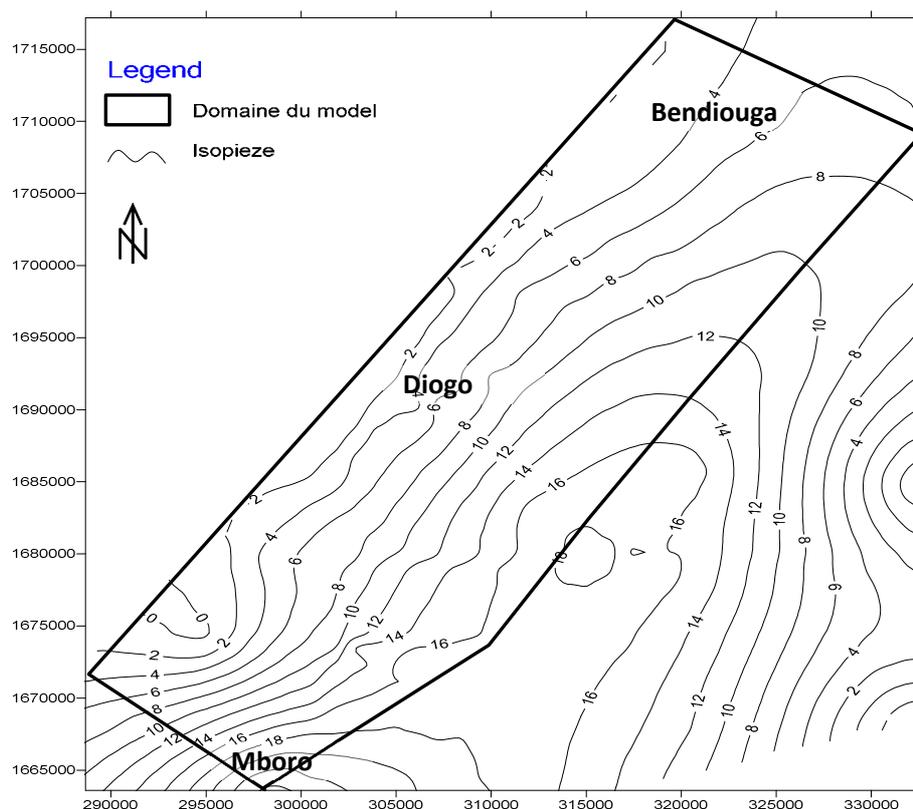


Figure 105 : Piézométrie de de référence du régime permanent _ 2007-2009

XVI.1.2.3 Ajustement du modèle avant démarrage de l'exploitation minière de GCO

La calibration a porté aussi bien sur les conductivités hydrauliques que sur la recharge. Elle a été réalisée par l'utilisation combinée des méthodes automatique et manuelle. La méthode automatique s'est appuyée sur l'utilisation du module Fepest du logiciel FeFLOW. En effet les informations sur les valeurs de perméabilités et de recharge sont insuffisantes et pas constantes pour procéder à une calibration uniquement manuelle.

Le code FeFLOW comprend une interface (FePEST) qui calcule rapidement les paramètres en utilisant la méthode inverse de résolution des problèmes. La résolution du problème inverse est réalisée par le code d'inversion PEST (programme d'estimation des paramètres) dont l'approche dérive de l'estimation par le maximum de vraisemblance (Doherty, 2005).

A la fin de la calibration, on procède à des méthodes d'évaluation du résultat obtenu. Elles sont différentes fonctions objectives dont le coefficient de corrélation (R), la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) ou la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne normalisée (NMRSE). Pour ce dernier

indicateur, la calibration est jugée satisfaisante lorsque la NMRSE est inférieure ou égale au seuil de 10% (Lalot, 2014). Le résultat de la calibration est obtenu après plusieurs essais pour son optimisation.

XVII.3.2.1.9 Conductivités hydrauliques

Les valeurs de conductivités connus sont de l'ordre $2 \cdot 10^{-4}$ m/s au niveau des dunes ogoliennes de Diogo augmentant jusqu'à $6 \cdot 10^{-4}$ voire $8 \cdot 10^{-4}$ m/s dans les Niayes. Ces valeurs sont aussi observées dans la zone de captage de Toundou Thioune exploitée par les forages superficiels des ICS. Dans la partie continentale, les perméabilités diminuent légèrement vers des valeurs moyennes de 10^{-5} m/s.

La calibration a abouti, au bout d'une trentaine d'itérations en modifiant principalement les valeurs de perméabilité horizontales K_{yy} et verticales K_{zz} dépendantes de celles K_{xx} calculées par l'application Fe-Pest. Les résultats obtenus lors de la calibration par rapport à la conductivité hydraulique montrent trois champs : un 1^{er} champ de bonne perméabilité suivant l'axe d'écoulement principal de l'ordre de 26 m/j au centre du domaine, une zone de perméabilité un peu faible de 9 à 10 m/j entre Mboro et Fass Boye et une 3^e zone de perméabilité moyenne de 14 m/j ($1.6 \cdot 10^{-4}$ m/s) observée autour de Diogo et au Nord jusqu'à Bendiouga (FIGURE 106).

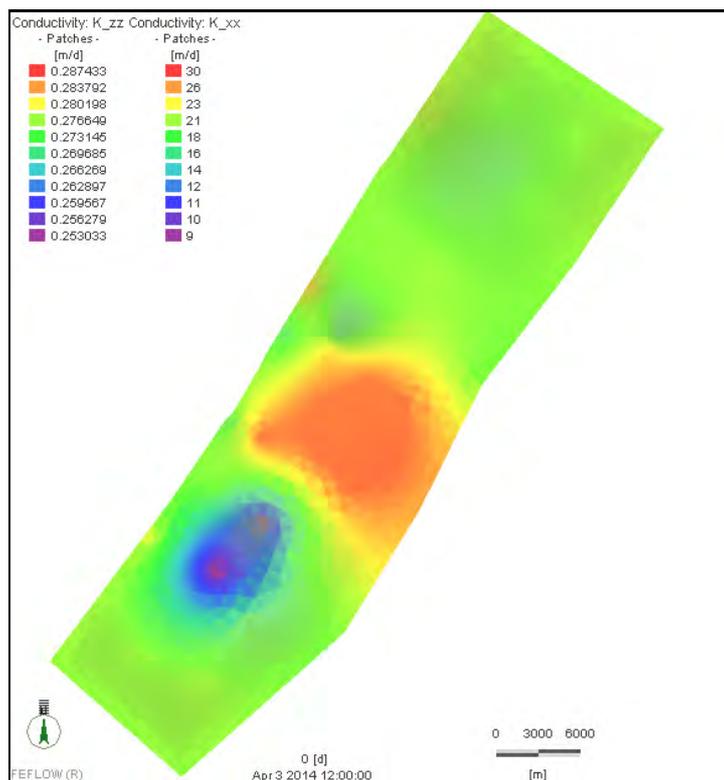


Figure 106 : Distribution des conductivités hydrauliques (m/j) calibrées

XVII.3.2.1.10 La recharge

Les données pluviométriques et celles de l'évapotranspiration sont introduites dans le modèle. La fonction « In/Out flow » effectue automatiquement la différence pour générer la partie de l'infiltration efficace qui participe à la recharge. A la première simulation, le domaine a été considéré en une zone unique. Les résultats avaient montré une piézométrie surestimée en saison pluviale et sous-estimée en saison sèche. Le domaine est subdivisé en trois zones :

- le long de la côte, il y'a des dépressions cultivées et des dunes parsemées de filaos ;
- dans les Niayes, la topographie est basse avec des cultures maraichères sur les flancs et la nappe proche du sol souvent entre 0 et 10 m ;
- les dunes du continent sont hautes avec des profondeurs de la nappe supérieure à 20 mètres.

L'estimation de la recharge automatique donne le résultat représenté par la carte ci-dessous (FIGURE 107) :

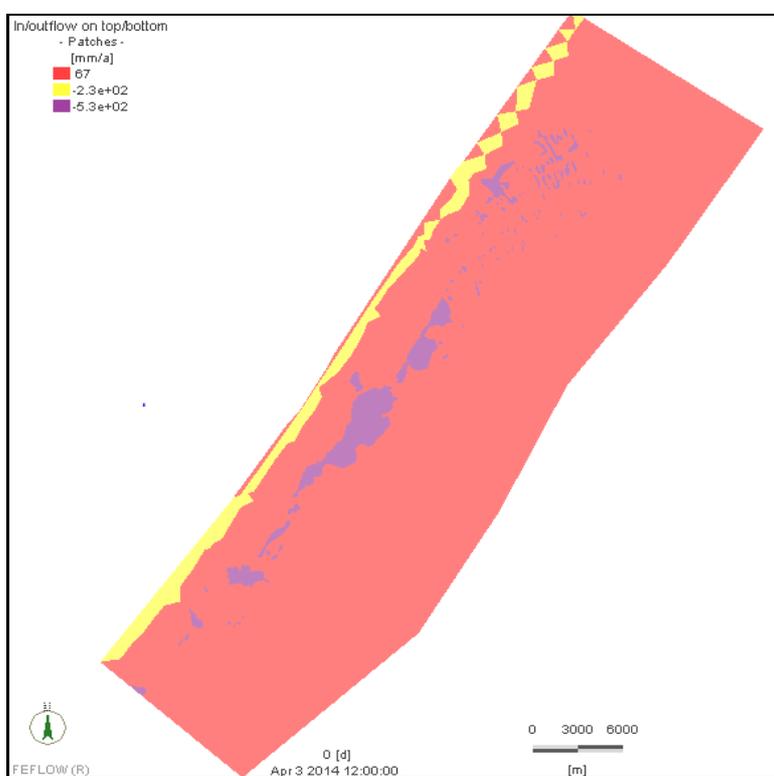


Figure 107c: Carte de distribution de la recharge sur le domaine du modèle

Il ressort de cette calibration automatique que la recharge était d'environ 67 mm/an et n'intéresserait que les dunes continentales et costales hautes. La bande de filao et les Niayes localisées entre les dunes éoliennes et continentales font l'objet d'une reprise évaporatoire de l'ordre de 200 à 500 mm/an. Les valeurs de pertes par reprise évaporatoire semblent difficiles à vérifier mais elles justifient la tendance de la disparition

progressive des vallées inondées et des affleurements de plan d'eau dans les Niayes. Cette recharge automatiquement générée pourrait justifier aussi la période de piézométrie stable de 2007 à 2009. Cependant elle montre quelques faiblesses car tenant beaucoup plus compte de la couverture végétale et des zones hydromorphes que de la différence entre les types de sols minéraux bruts et ferrugineux.

XVI.1.2.4 Validité de l'ajustement

L'étape de validation de l'ajustement consiste à confronter les résultats du modèle soit les potentiels calculés avec les mesures de terrain. Le résultat de l'ajustement est basé sur la comparaison des potentiels mesurés et calculés au niveau des 352 points de contrôle.

XVII.3.2.1.11 Comparaison des charges piézométriques observées et calculées de 2007-2009

La piézométrie simulée en comparaison avec les résultats aux points de contrôle sous forme de barre d'erreur est illustrée ci-dessous (FIGURE 108). On remarque une bonne concordance entre les valeurs calculées aux points de contrôle et les valeurs mesurées. Seuls les 15 piézomètres signalés en rouge sont hors de l'intervalle de confiance fixée à ± 1 m.

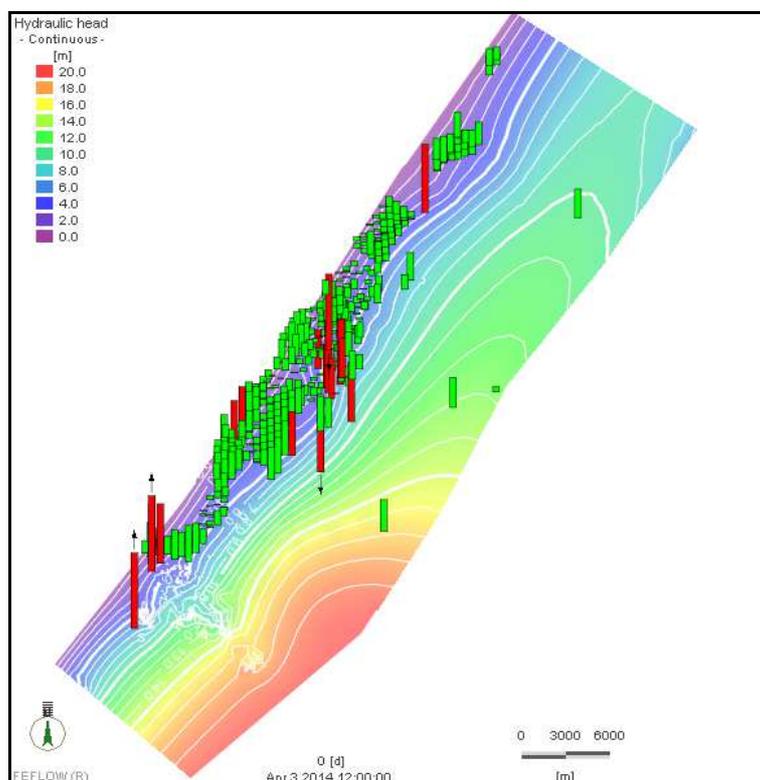


Figure 108 : Analyse de la piézométrie simulée lors du calage du modèle (Avril 2014)

Suivant toujours la démarche d'appréciation du calage, la méthode cartographique permet de comparer la piézométrie mesurée et interpolée par krigeage sous l'application Surfer et celle simulée par le modèle FeFLOW. Il ressort de cette comparaison que les deux séries de courbes piézométriques ont sensiblement la même allure dans la partie occidentale, le long des dunes côtières, dans les parties centrales et Nord du domaine (FIGURE 109).

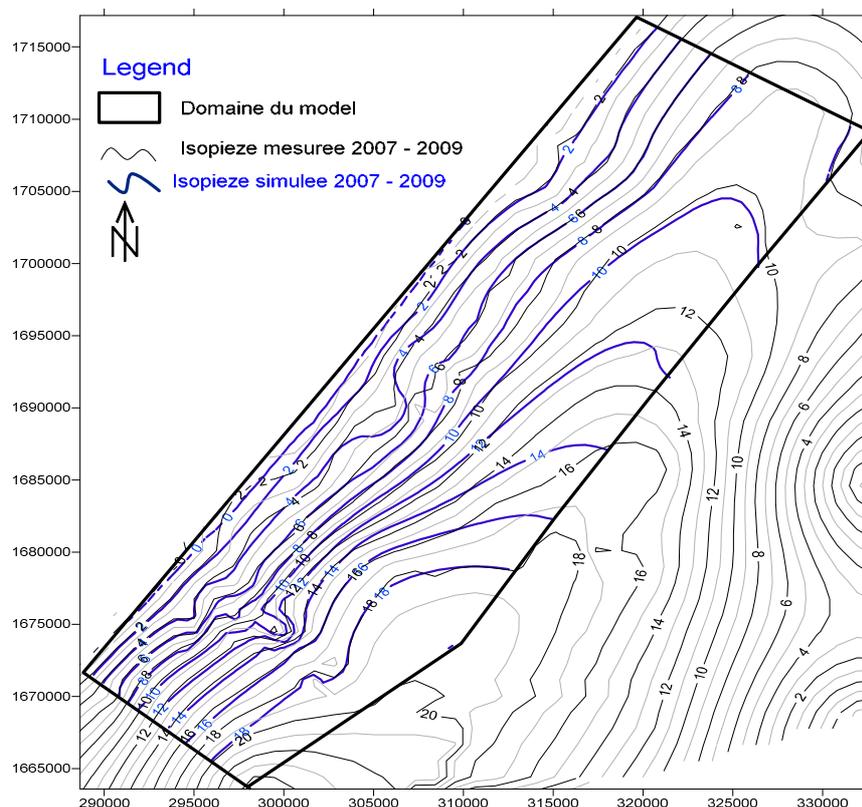


Figure 109 : Superposition de la piézométrie observée et celle simulée de 2007-2009

XVII.3.2.1.12 Analyse statistique

Du point de vue statistique plus détaillé, le tableau ci – dessous (TABLEAU 29) récapitule les résultats de l'analyse des données statistiques permettant ainsi d'apprécier la précision du calage.

Tableau 29 : Analyse statistique de la précision du résultat du calage

Erreurs	Symbole	Valeurs
Moyenne des écarts (m)	\bar{R}	0.06
Moyenne de la valeur absolue des écarts (m)	$ \bar{R} $	0.40
Ecart-type des erreurs (m)	SEE	0.55
Racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (m)	RMSE	0.62
Racine carrée de la moyenne des carrés des écarts normalisée (%)	NRMSE	4.05

La racine carrée de l'erreur quadratique moyenne normalisée (NRMSE) représente le paramètre le plus significatif en terme de précision. Sa valeur de 4.05% demeure très bonne comparée au seuil de précision indicative de 10%. Elle confirme ainsi le bon résultat de calage du modèle. Toutefois, de petits écarts entre les charges observées et calculées ont été observés sur quelques piézomètres localisés le plus souvent dans les zones dépressionnaires à la lisière des dunes communément appelées Niayes. Le graphique ci-dessous montre la droite de corrélation entre valeurs mesurées et celles calculées (FIGURE 110).

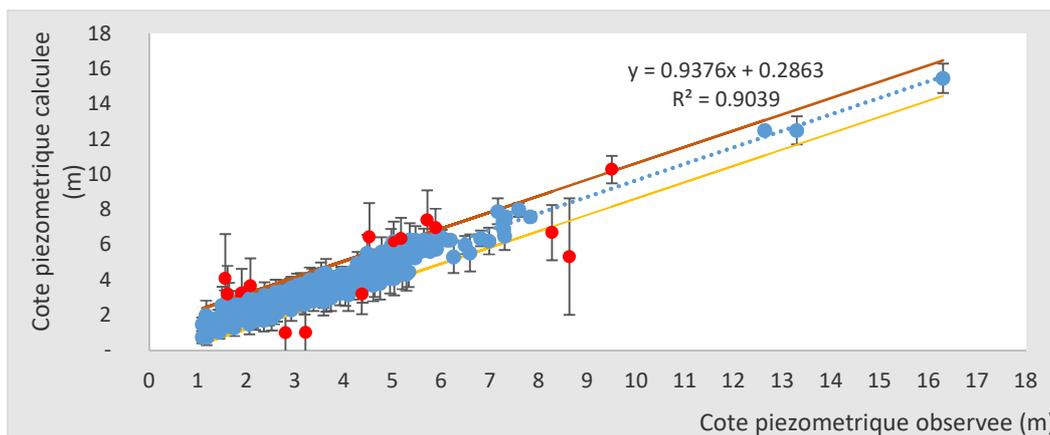


Figure 110 : Corrélation des entre les valeurs mesurées et celles calculées

On remarque que la dispersion des résultats sous forme de régression associée à un intervalle de confiance de 1m des potentiels est relativement faible. Le carré du coefficient de corrélation est égal à 0.90.

XVI.1.2.5 Bilan de la nappe en régime permanent

Le bilan du domaine modélisé de la nappe pour la période du régime d'équilibre 2007-2009 est présenté ci-dessous (TABLEAU 30):

Tableau 30 : Bilan du régime permanent

TERMES DU BILAN	DEBITS (m3/j)
Débits entrants	
Flux entrant par la limite est	+48276
Recharge	+133866
Total Entrant	+182142
Débits sortants	
Flux sortant vers l'océan	-135766
Prélèvements	-2396
Évapotranspiration	-43995
Total Sortant	-182157
Différence	-15

Les sorties et les entrées s'équilibrent pratiquement avec seulement un déficit de 16 m³/j. L'apport principal provient des infiltrations qui représentent 133866 m³/j. L'autre flux d'eau entrant venant de la limite Est du domaine est de 48276 m³/j. Les pertes par flux sortant vers la mer sont très importantes à hauteur de 135766 m³/j. Ceci dépasse légèrement la résultante positive de l'échange entre évapotranspiration et infiltration. La résultante négative de 43995 m³/j concerne les dépressions maraichères qui expriment plus de pertes du fait de la transpiration. Les prélèvements des forages communautaires ne font que 2396 m³/j.

XVI.1.3 Calage de la piézométrie en régime transitoire de 2007 à 2014

XVI.1.3.1 Conductivité hydraulique et le coefficient d'emmagasinement

La conductivité hydraulique (Kh et Kv) et le coefficient d'emmagasinement de la première couche ont été calibré en régime transitoire par utilisation de FePest avec 50 points pilotes. Le résultat obtenu n'a pas montré de grandes différences concernant l'emmagasinement (FIGURE 111). Les seules petites variations sont obtenues pour la conductivité au niveau de la limite Ouest condition limite de potentiel imposé, h = 0.

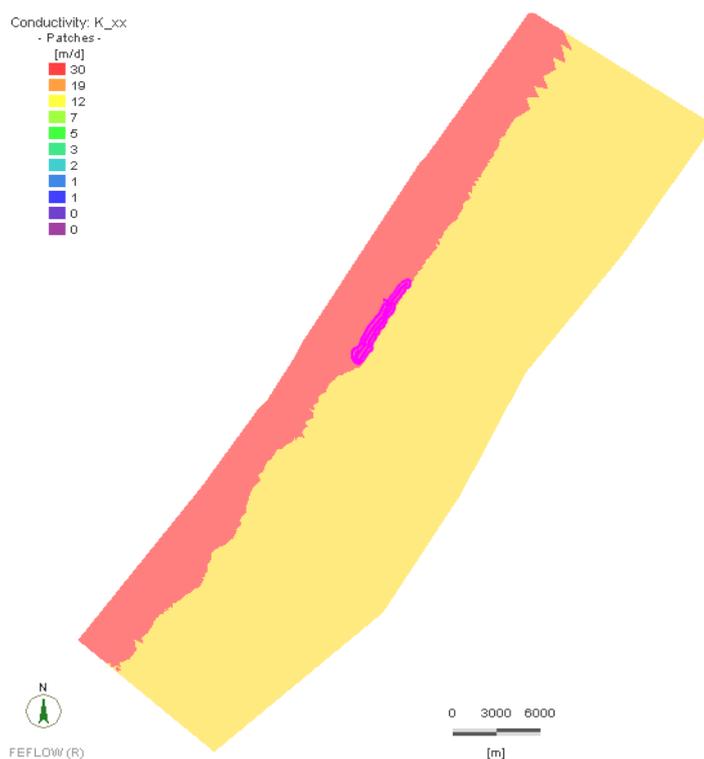


Figure 111 : La variabilité de la conductivité hydraulique

En plus de la calibration automatique proposée par FePest, des ajustements manuels ont été apportés. Les paramètres du modèle sont récapitulés dans le tableau ci-dessous (TABLEAU 31) :

Tableau 31 : Les paramètres calibrés du modèle

Paramètres	Couche 1		Couche 2		Couche 3	
	Ouest	Est	Ouest	Est	Ouest	Est
Kx (m/j)	1.00	1.00	17.00	13.80	20.00	1.00
Ky (m/j)	1.00	5.53	16.69	12.00	20.00	1.33
Kz (m/j)	0.14	11.72	0.36	3.00	0.0005	1.58
SY	0.28	0.28				

Le tableau des résultats de la calibration montre différentes valeurs de conductivités hydrauliques pour chaque sous couche et selon chaque zone, Ouest. La première couche représente la zone non saturée. La perméabilité verticale demeure plus importante et se justifie par la prépondérance de l'infiltration. Le facteur dominant pour cette couche est la porosité efficace qui est de 28% selon le modèle et 24% dans les mesures effectuées. Les couches 2 et 3 représentent l'aquifère proprement dit. La perméabilité d'entrée est de 14 m/j alors que le modèle donne des perméabilités horizontales variant entre 16 et 20 m/j dans la partie Ouest des sables qui sont plus grossiers. Vers le mur de l'aquifère, la perméabilité verticale décroît progressivement tout en demeurant toujours plus faible dans la bande est. Cette différenciation est confirmée par la lithologie décrite à partir des forages de recyclage situés dans la bande Ouest qui rencontrent des sables grossiers avant d'atteindre les argiles sableuses ou les marnes de l'Eocène supérieur. A l'Ouest, la partie inférieure de l'aquifère est constituée de sables argileux ce qui serait la raison pour laquelle les forages de cette zone donnent des débits moyens 30 à 50 m³/h.

XVI.1.3.2 Recharge

Le domaine est subdivisé en 9 zones de recharge : les dunes vives, les dunes ogoliennes continentales et les Niayes qui sont subdivisées en sept (07) sous zones entre Mboro et Lompoul selon l'importance des cuvettes maraîchères irriguées. Cette différenciation a permis une meilleure estimation lors de la calibration des valeurs d'évapotranspiration et d'infiltration. Les pluies enregistrées de 2007 à 2015 sont des paramètres d'entrée suivant un pas de temps mensuel (FIGURE 112).

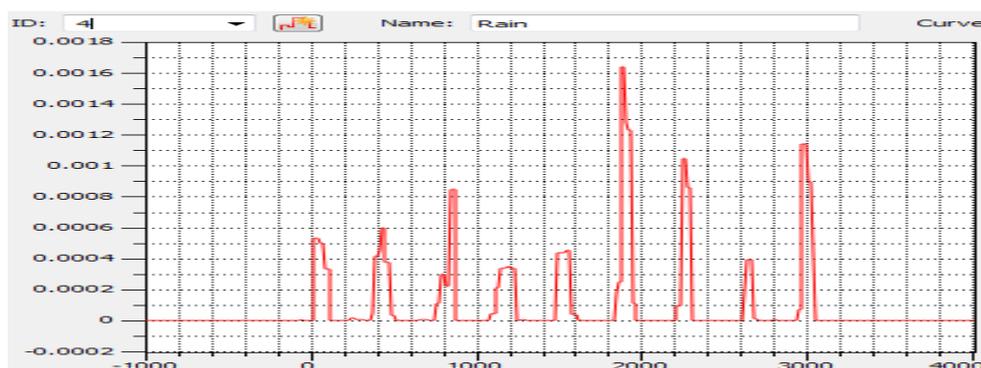


Figure 112 : Courbe de variation pluviométrique en fonction hauteur (m) – temps (j)

Les données d'entrée pour l'évapotranspiration sont celles de Thiès que nous avons calculées dans la première partie par les méthodes de Turc. Ces valeurs restent proches de celles de Diouf (2016) (FIGURE 113):

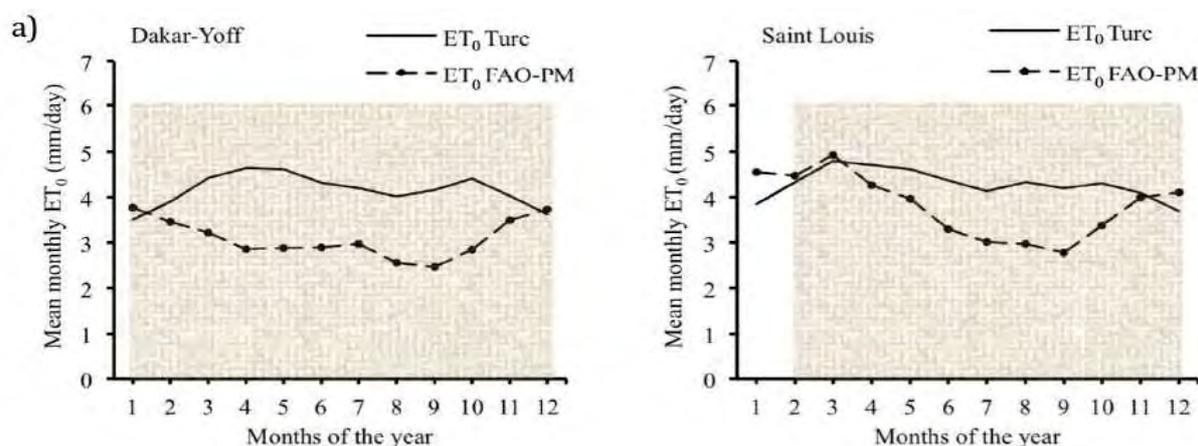


Figure 113 : Comparaison entre les ET_0 calculées par les méthodes de Turc et Penman ((Diouf C. e., 2016)

Le modèle montre à la fin de la calibration l'existence d'une courte période de recharge entre Juillet et Septembre de chaque année durant laquelle les Niayes et une partie des dunes reboisées continuent d'enregistrer une évapotranspiration dominante. En dehors de cette période, l'évapotranspiration prédomine.

XVI.1.3.3 Validité de l'ajustement par rapport à la piézométrie de 2014

Elle est basée sur la comparaison des potentiels mesurés aux 263 points de contrôle.

XVII.3.2.1.13 Comparaison des charges piézométriques observées et calculées de 2014

Il ressort de la comparaison entre les deux séries de courbes piézométriques observée et modélisée de 2014 que leur allure reste la même dans les parties Ouest, centre et Nord du domaine (FIGURE 114). Dans la partie Ouest où l'on dispose de presque la totalité des points d'observation, on note une superposition presque parfaite des isopièzes. Le long de la frontière est, la piézométrie simulée conserve une hauteur piézométrique de plus d'un (01) m sur celle observée. Toutefois, la simulation montre une baisse piézométrique dans les environs du dôme piézométrique témoignant ainsi de l'existence d'un régime transitoire relativement lent.

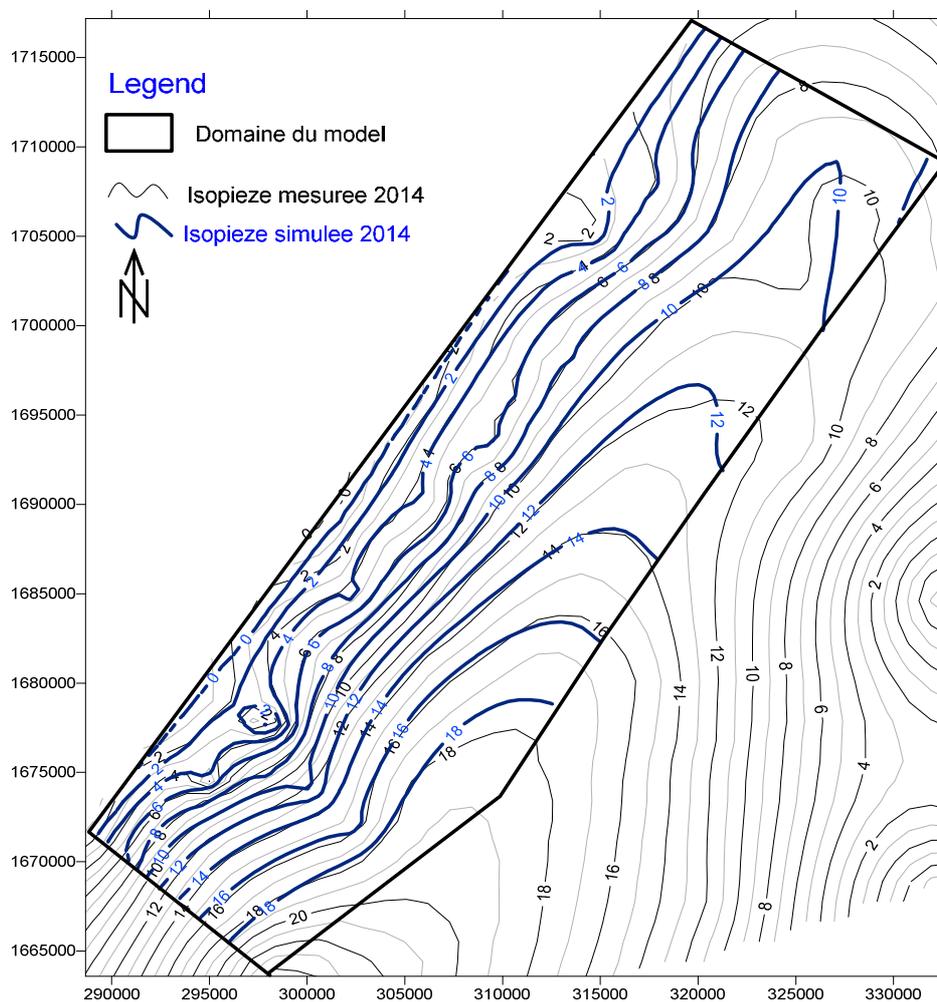


Figure 114 : Comparaison entre la piézométrie observée et celle simulée de 2014 en régime transitoire

L'analyse de la piézométrie montre une bonne corrélation entre les valeurs calculées aux points de contrôle et les valeurs mesurées (FIGURE 115). Seuls les 12 piézomètres en surbrillance rouge sont hors de l'intervalle de confiance fixée à ± 1 m.

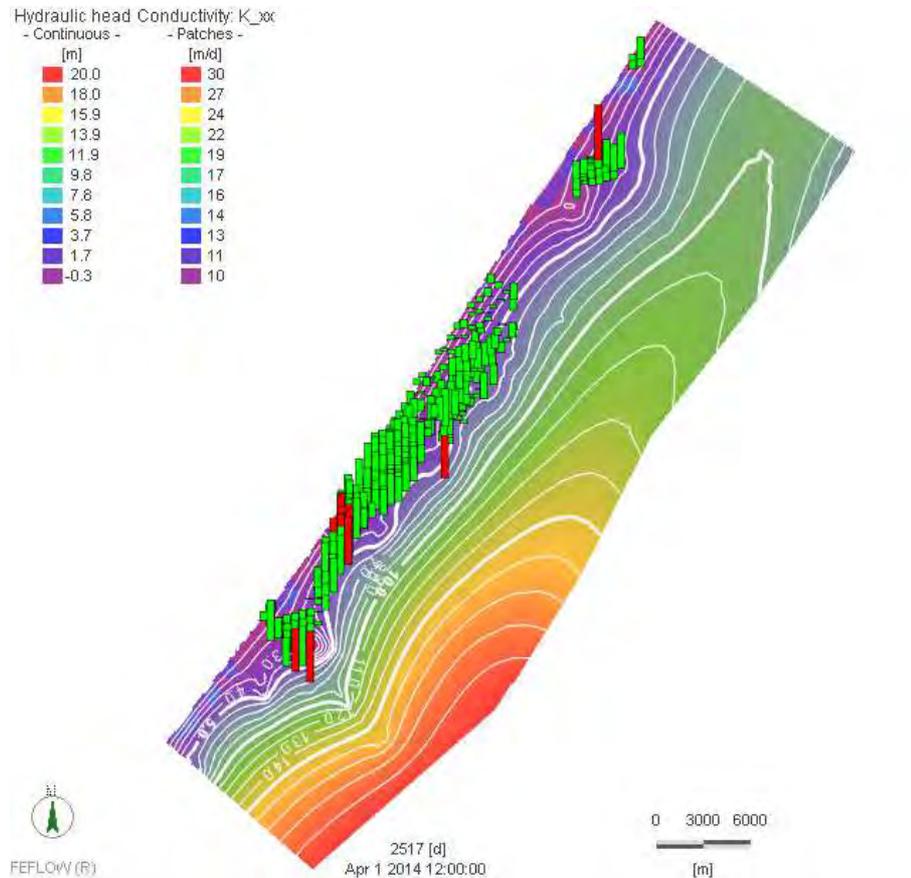


Figure 115 : Analyse de la piézométrie simulée lors du calage du modèle de régime transitoire

XVII.3.2.1.14 Analyse statistique

Les résultats de l'analyse des données statistiques permettent d'apprécier la précision du calage (TABLEAU 32).

Tableau 32 : Analyse de la précision du résultat du calage du modèle en régime transitoire

Erreurs	Symbole	Valeurs
Moyenne des écarts (m)	\bar{R}	0.14
Moyenne de la valeur absolue des écarts (m)	$ \bar{R} $	0.44
Ecart-type des erreurs (m)	SEE	0.50
Racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (m)	RMSE	0.52
Racine carrée de l'erreur quadratique moyenne normalisée (%)	NRMSE	6.93

La racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) est de 0.52 ; ce qui est inférieur à la RMSE obtenue en régime permanent et témoignant ainsi d'une meilleure précision du modèle dans la bande dunaire. Cependant, la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne normalisée (NRMSE) de 6.93% est bonne mais reste plus élevée que celle de la calibration en régime permanent. Cette augmentation relative

de la NRMSE est liée à la concentration spatiale des piézomètres réduisant ainsi l'écart de charge piézométrique observée entre les valeurs max (6.8 m) et min (1.01 m).

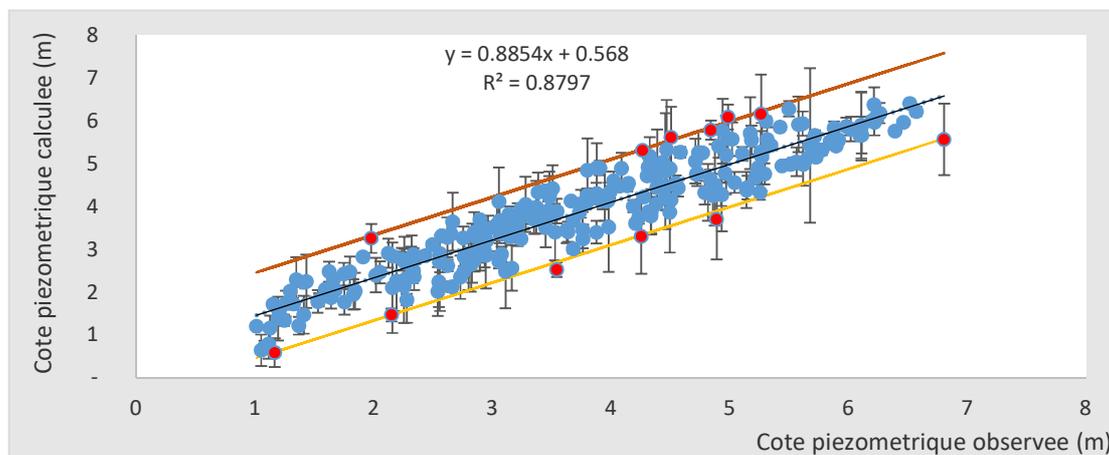


Figure 116 : Corrélation des entre les valeurs mesurées et celles calculées

On note que la dispersion des potentiels est relativement faible et est à 94% inférieure à 1m (FIGURE 116). Le carré du coefficient de corrélation de Pearson est égal à 0.88.

XVI.1.3.4 Bilan de la nappe en régime transitoire

Le bilan de la nappe à la fin de l'année 2014 se présente comme suit (TABLEAU 33):

Tableau 33 : Bilan de la nappe en régime transitoire

TERMES DU BILAN	DEBITS (m ³ /j)
Débits entrants	
Flux entrant par la limite est	+7036
Emmagasinement	+72534
Total Entrant	+79570
Débits sortants	
Flux sortant vers l'océan	-29107
Prélèvements	-5988
Évapotranspiration	-45261
Emmagasinement	-88
Total Sortant	-80444
Différence	-874

- une entrée d'eau à partir de la limite Est du domaine assez modeste de 7036 m³/j ;
- des sorties d'eau vers la mer, 4 fois plus importantes que les entrées par la limite Est ;
- une pluviométrie déficitaire occasionnant des pertes par évapotranspiration très importantes de 45261 m³/j ;

- les prélèvements des forages communautaires sont faibles dans la zone car la plupart d'entre eux captent les calcaires qui se trouvent à l'Est de la limite du domaine ;
- pour compenser ces pertes importantes d'eau, l'emménagement de l'aquifère fournit la plus grande part d'environ 72500 m³. Ceci dénote une importante mise à contribution des réserves non renouvelables de l'aquifère d'où une baisse continue de la piézométrie.

XVI.2 Sensibilité et validation du modèle

Cette étape a deux principaux intérêts : connaître la précision nécessaire pour l'introduction de chaque paramètre et distinguer les processus qui vont influencer fortement le résultat de ceux qui auront une incidence faible. Pour ce test de sensibilité, la période de janvier 2012 (démarrage de la mine) au mois de juillet 2015 a été considérée. Ce test couvre ainsi deux périodes :

- de Janvier 2012 à Avril 2014 correspondant à une période d'avant exploitation de GCO
- et la période suivante allant du mois d'Avril 2014 au mois de Juillet 2015 intégrant les paramètres et le bilan matière de la production minière qui gouvernent l'avancement du bassin dont les positions successives sont récapitulées en [annexe 6](#).

La validation a porté sur le secteur de Diogo qui constitue la première zone d'exploitation de la mine. Pour le calage 95 piézomètres sont utilisés. Etant donné que le niveau de précision requis pour les exploitations minières par dragage est plus élevé, l'intervalle de confiance considéré est de ± 0.5 m.

XVI.2.1 Validation du modèle dans le domaine de Diogo

Le modèle calibré en régime transitoire a été utilisé avec une intégration des nouvelles données d'entrée tels que la production journalière, des rejets de sables, la variation de niveau du bassin, les pompages de recyclage et les pompages complémentaires en eau profonde. A la fin de cette opération, le modèle a restitué la piézométrie ci-dessous ([FIGURE 117](#)):

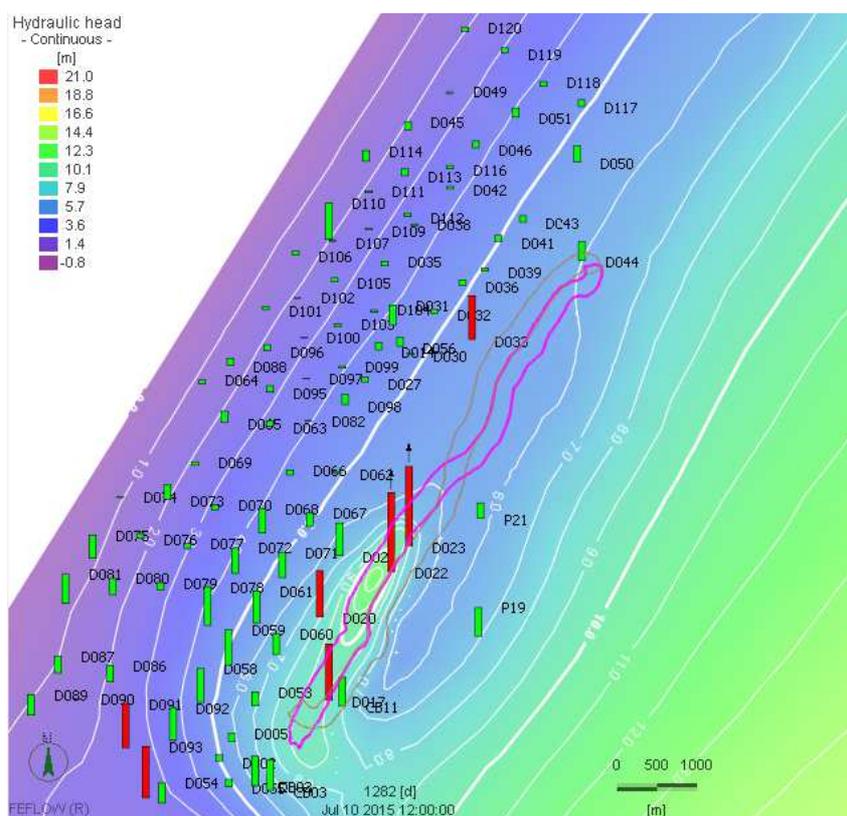


Figure 117 : La piézométrie de validation un an après le démarrage de la production (Juillet 2015)

On observe une assez bonne corrélation entre la piézométrie simulée et celle mesurée aux différents piézomètres. Seuls 7 piézomètres sur 95 montrent des écarts. Les deux piézomètres D022 et D023 montrent respectivement une exagération de 1.25 et 1.11 m correspondant dôme piézométrique engendrée par le dépôt des terrils.

XVI.2.2 Analyse statistique

Du point de vue statistique plus détaillé, les résultats de précision sont présentés ci – dessous (TABLEAU 34).

Tableau 34 : Analyse de la précision du résultat du calage du modèle en phase production

Erreurs	Symbole	Valeurs
Moyenne des écarts (m)	\bar{R}	0.004
Moyenne de la valeur absolue des écarts (m)	$ \bar{R} $	0.20
Ecart-type des erreurs (m)	SEE	0.26
Racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (m)	RMSE	0.29
Racine carrée de l'erreur quadratique moyenne normalisée (%)	NRMSE	4.17

La RMSE est de 0.29, demeurant ainsi la plus petite valeur de RMSE obtenue. Ceci témoigne d'une meilleure précision du modèle considérant uniquement la zone de Diogo. La Racine carrée de l'erreur quadratique moyenne normalisée (NRMSE) est de 4.17%, restant aussi très en dessous du seuil de précision indicative de 10% (Seck, Faye, Robertson, & Rose, 2018). Le graphique ci-dessous montre la droite de corrélation entre valeurs mesurées et celles calculées.

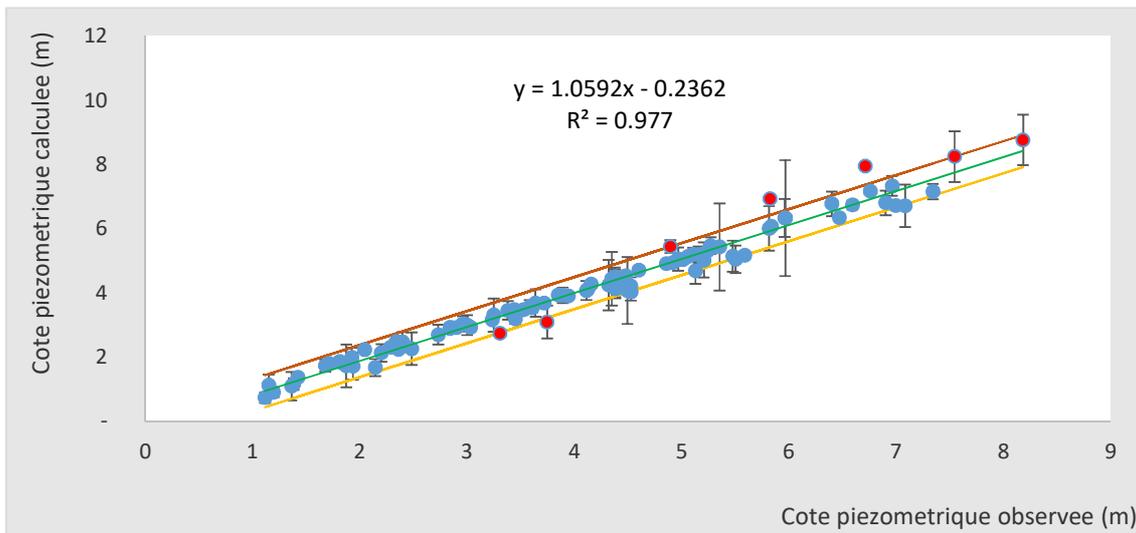


Figure 118 : Corrélation des entre les valeurs mesurées et celles calculées en phase production

La dispersion des résultats est représentée sous forme de régression associée à un intervalle de confiance de ± 0.5 m (FIGURE 118). Le carré du coefficient de corrélation de Pearson est égal à 0.98.

XVI.2.3 Analyse de la sensibilité

La sensibilité est testée par l'application des incertitudes de $\pm 25\%$ sur les valeurs de conductivité hydrauliques, de recharge, d'évapotranspiration et de porosité efficace. L'emmagasinement spécifique (S_s) restant par défaut 10^{-4} (1/m) est très négligeable devant la porosité efficace qui varie entre 20 et 28% d'après les essais laboratoires réalisés lors de l'étude de faisabilité du projet GCO qui ont trouvé une porosité totale variant entre 32 et 43% (Meynink, 2007). Ainsi, l'emmagasinement peut être assimilé à la porosité efficace (η_e).

Tableau 35 : Récapitulatif des résultats de l'analyse de la sensibilité

ID	Nom	NP mesur e	NP calcule	- 25%K		+25%K		-25%Rech		+25%Rech		- 25%Emmagas.		+25%Emmagas.	
				NP	Ecart	NP	Ecart	NP	Ecart	NP	Ecart	NP	Ecart	NP	Ecart
1	DGPZ001	4.13	3.93	3.84	-0.09	4.06	0.13	4.14	0.21	3.78	-0.15	3.90	-0.03	4.01	0.08
2	DGPZ003	5.96	6.34	6.71	0.37	6.15	-0.19	6.52	0.18	6.20	-0.14	6.05	-0.29	6.36	0.02
3	DGPZ014	4.35	4.45	4.67	0.22	4.29	-0.16	4.29	-0.16	4.73	0.28	4.40	-0.05	4.44	-0.01
4	DGPZ023	5.83	6.94	6.75	-0.19	7.13	0.19	6.93	-0.01	7.05	0.11	7.29	0.35	6.93	-0.01
5	DGPZ027	4.48	4.54	4.76	0.22	4.39	-0.16	4.37	-0.18	4.82	0.28	4.50	-0.04	4.53	-0.01
6	DGPZ030	4.92	4.95	5.17	0.22	4.79	-0.16	4.78	-0.17	5.26	0.31	4.89	-0.06	4.93	-0.02
7	DGPZ033	4.89	5.45	5.65	0.20	5.30	-0.15	5.29	-0.16	5.75	0.30	5.39	-0.06	5.41	-0.03
8	DGPZ036	4.96	5.04	5.27	0.23	4.87	-0.17	4.86	-0.17	5.34	0.30	4.96	-0.08	5.01	-0.02
9	DGPZ039	5.16	5.20	5.43	0.23	5.03	-0.17	5.02	-0.18	5.51	0.31	5.12	-0.08	5.17	-0.03
10	DGPZ041	5.06	5.14	5.38	0.23	4.97	-0.17	4.96	-0.19	5.45	0.31	5.06	-0.08	5.12	-0.03
11	DGPZ043	5.25	5.34	5.58	0.24	5.16	-0.18	5.13	-0.20	5.65	0.32	5.26	-0.08	5.31	-0.03
12	DGPZ045	2.36	2.25	2.33	0.08	2.16	-0.09	2.15	-0.09	2.26	0.02	2.16	-0.08	2.24	0.00
13	DGPZ050	5.27	5.48	5.71	0.23	5.31	-0.17	5.27	-0.21	5.81	0.33	5.42	-0.06	5.44	-0.04
14	DGPZ051	4.16	4.28	4.48	0.21	4.11	-0.17	4.11	-0.17	4.52	0.24	4.18	-0.10	4.26	-0.02
15	DGPZ054	3.45	3.19	3.08	-0.11	3.34	0.15	3.45	0.26	3.00	-0.19	3.07	-0.12	3.27	0.08
16	DGPZ056	4.60	4.72	4.93	0.22	4.55	-0.16	4.55	-0.16	5.01	0.30	4.66	-0.06	4.70	-0.02
17	DGPZ059	5.50	5.05	5.12	0.06	5.04	-0.01	4.88	-0.17	5.24	0.19	5.31	0.26	5.06	0.01
18	DGPZ062	5.01	5.04	5.24	0.20	4.91	-0.14	4.82	-0.22	5.30	0.26	5.11	0.06	5.03	-0.01
19	DGPZ066	4.38	4.31	4.52	0.21	4.16	-0.15	4.08	-0.23	4.52	0.21	4.33	0.02	4.30	-0.01
20	DGPZ076	1.92	1.99	2.06	0.06	1.94	-0.05	1.88	-0.11	1.95	-0.04	1.93	-0.06	1.99	0.00
21	DGPZ087	1.38	1.16	1.13	-0.03	1.18	0.02	1.25	0.09	1.09	-0.08	1.01	-0.16	1.17	0.00
22	DGPZ092	4.49	4.08	4.12	0.04	4.11	0.03	4.09	0.01	4.18	0.10	4.15	0.07	4.11	0.03
23	DGPZ100	3.00	3.00	3.15	0.15	2.88	-0.12	2.87	-0.13	3.15	0.16	2.95	-0.05	2.99	-0.01
24	CB02	5.96	6.34	6.71	0.37	6.15	-0.19	6.51	0.18	6.20	-0.14	6.05	-0.29	6.36	0.02
25	CB01	6.59	6.74	7.26	0.52	6.46	-0.28	6.84	0.09	6.69	-0.05	6.38	-0.36	6.76	0.02

Le tableau des tests de sensibilités permet de dégager les conclusions suivantes (TABLEAU 35):

- le modèle est plus sensible aux variations de la recharge et de la conductivité hydraulique. Une baisse de perméabilité de 25% entraine généralement une augmentation approximative de 20 cm. Cette valeur atteint même 50 cm aux alentours du dôme piézométrique des terrils. L'augmentation de la conductivité hydraulique de 25% entraine souvent une baisse piézométrique moyenne de 15 cm. La moyenne de l'écart est de 10 cm.

- la recharge entraîne plus d'impact sur la piézométrie avec des variations moyennes de 20 cm de baisse lors d'une diminution de 25% de la recharge et de 30 cm en hausse lors d'une augmentation de la recharge de 25%.
- le modèle est beaucoup moins sensible à l'emmagasinement avec des variations de niveau inférieures à 10 cm. Ceci pourrait signifier qu'en phase transitoire la sollicitation de l'emmagasinement est assez vite relayée par les flux de transfert en provenance du dôme des terrils. Ces derniers résorbent ainsi l'impact de l'emmagasinement vu la Côte (+ 12 m IGN) et l'étendu approximatif du dôme piézométrique (4000 m x 1000 m). On peut ainsi dire que le système n'est pas très réactif à l'emmagasinement.

Chapitre XVII. Prédiction

XVII.1 Simulations prédictives

Cette phase de simulation est l'étape ultime de l'étude de modélisation hydrogéologique. Elle synthétise l'ensemble des données acquises ou estimées et les projette dans l'avenir pour prédire le comportement de la nappe des sables du Quaternaire essentiellement dans les zones minières de GCO durant les prochaines dizaines d'années. Il s'agira de faire des prédictions sur les variations piézométriques mais également sur les bilans d'eau correspondants.

Deux périodes de simulation ont été réalisées :

- la première phase plus détaillée qui constitue le soubassement des plans actuels pour les 5 années d'exploitation en cours ;
- la deuxième partira de fin 2020 à 2025. La passe minière projetée pour cette durée est moins certaine car pourrait faire l'objet de changement compte tenu des fluctuations du marché ou des contraintes sociales et environnementales futures.

XVII.1.1 Scenario1 : Progression de la mine dans les 5 prochaines années avec maintien des prélèvements domestiques actuels

Les paramètres hydrodynamiques obtenus lors de la calibration en régime transitoire, ont été conduits dans la phase de simulations en même temps que l'ensemble des données d'entrée liées à la production prévisionnelle.

La seule et très importante variable est l'exploitation prévisionnelle de la mine. Elle se matérialise par une progression de la passe minière qui s'effectue par une exploitation de blocs de terre d'environ 25 à 30 m de hauteur et 220 mètres de large (largeur au fond du bassin de dragage). Durant cette période, le niveau d'eau optimal correspond au niveau statique (+ 6 m IGN) jusqu'en fin mars 2017. Ensuite il sera relevé à la côte + 8 m jusqu'en fin 2018 avant d'être rabaissé d'un mètre et maintenu jusqu'en fin 2020. Ces variations de niveau d'eau dans le bassin de dragage sont dictées par la nature du gisement. Il permet d'obtenir les meilleurs rendements en minerai et d'éviter ainsi la dilution.

La simulation hydrogéologique des quatre années (2017-2020) qui ont suivi les deux ans d'exploitation ayant servi à la validation du modèle, a donné l'état piézométrique ci-dessous d'où on observe (FIGURE 119):

- une réduction de la taille et de la crête du dôme de Taiba ;
- un bombement dans le zone centre Ouest du domaine correspondant à la zone minière de Diogo ;

- toujours dans cette zone de Diogo, on remarque un resserrement des isopièzes vers l'Ouest donnant ainsi un important gradient permettant de repousser les intrusions salines : il s'agit là d'un phénomène de recharge artificielle.

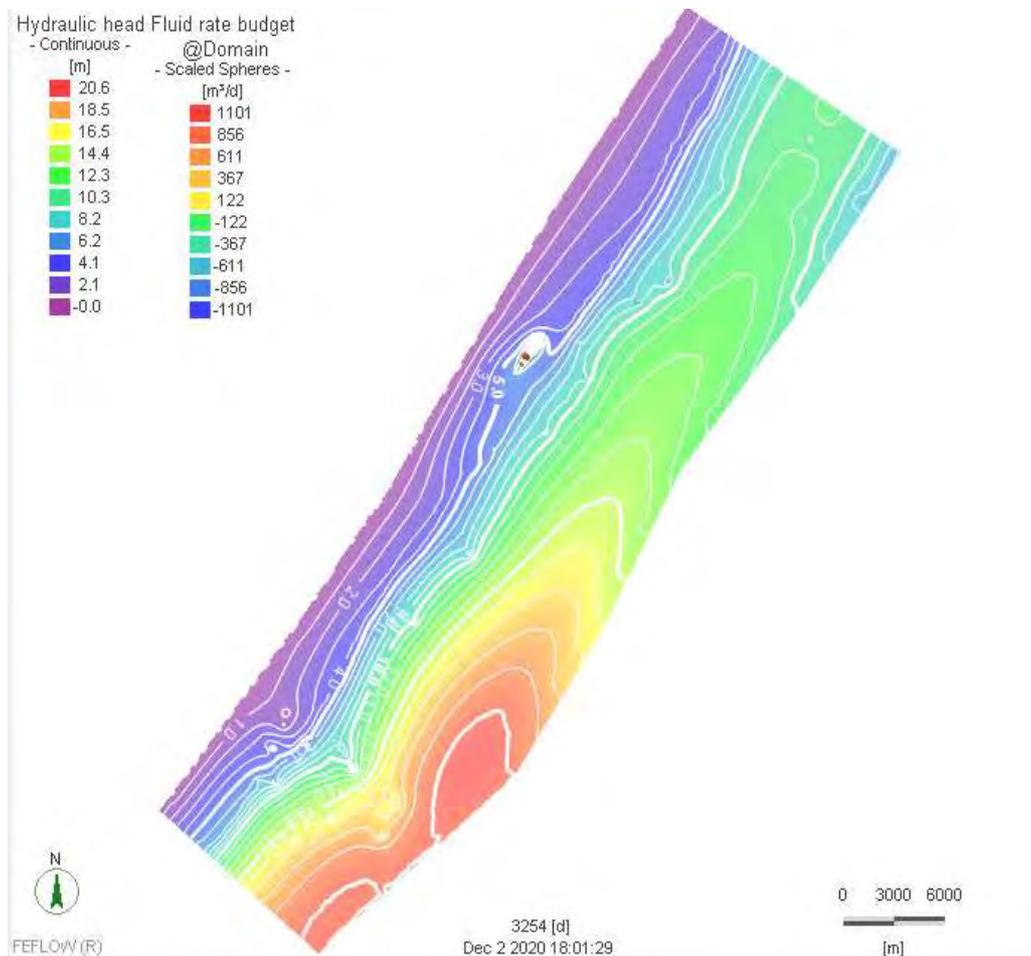


Figure 119 : La piézométrie simulée de 2020

A une échelle plus réduite, le bilan d'eau du domaine minier est représenté par le graphe suivant (FIGURE 120). Cette période d'exploitation traverse deux types de zones dunaires. La zone des dunes hautes d'altitude moyenne de 26 m et la zone des dunes basses dont les altitudes varient entre 14 et 16 m.

Les dunes hautes seront traversées par le bassin entre Février et Mars 2017 et plus tard entre Mai 2018 et Mai 2019. Au niveau des dunes hautes, l'avancement est lent avec une moyenne de 16 m par jour. Les pertes en eau du système d'exploitation (bassin et terrils) varient entre 18000 m³/j et 37000 m³/j. Pour le maintien du niveau d'eau du bassin, elles sont compensées par les pompages de recyclage et les apports de la nappe maastrichtienne par les forages profonds.

Les pompages de recyclage connaissent un régime plus équilibré autour de 18000 m³/j. Ceci s'explique la longueur de la zone de dépôt des terrils derrière le bassin qui est plus ou moins constant autour de 1000 m occasionnant ainsi un nombre régulier de forages de recyclage en activité. Par contre les apports de la nappe maastrichtienne sont très variables et suivent pratiquement l'allure des pertes totales en eau. Leurs pics s'observent aux mêmes périodes que les pertes globales en atteignant 31000 m³/j entre Juin et Août 2017, Mai 2019 et vers la fin de la période. A partir de Janvier 2019, malgré une baisse de niveau du bassin, la demande en eau d'appoint augmente et se maintient autour de 30000 m³/j durant les 6 derniers mois. Cette forte demande en eau, à la fin de cette période, s'explique par l'avancée de la drague vers la sortie du panneau minier de Diogo. En effet, durant toute la phase d'exploitation du panneau de Diogo, les passes minières (1 à 7) se juxtaposent en faisant plusieurs aller-retours entraînant ainsi un drainage d'eau important des précédents dépôts de terril au profit du bassin dragage.

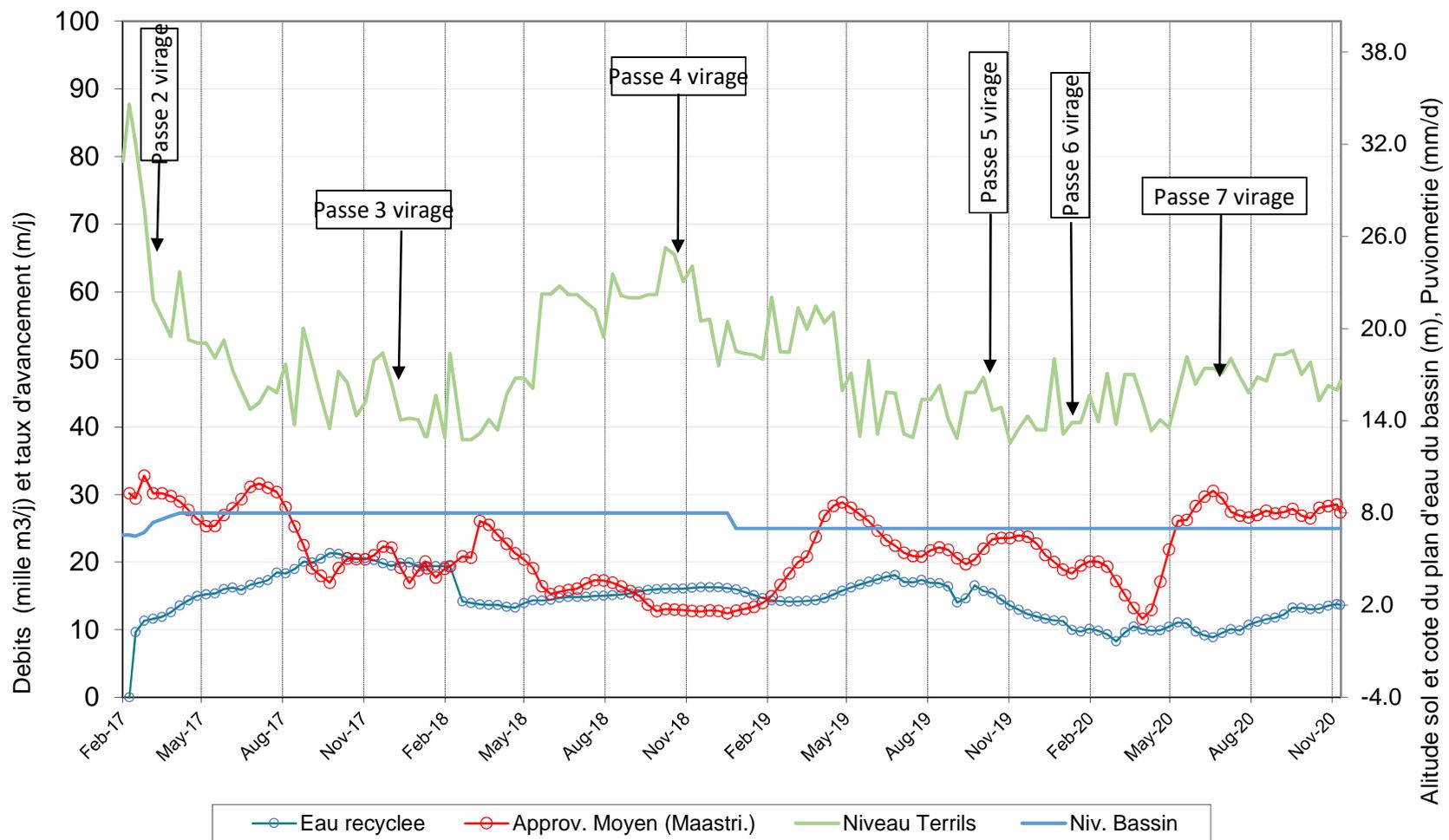


Figure 120 : Balance d'eau simulée des 4 premières années suivantes de la phase de calibration (2017-2020)

Au plan régional, d'ici 2020, les pompages communautaires auront une moyenne de 14000 m³/j (puits et forages) (TABLEAU 36). Les pertes par évapotranspiration et les flux sortants vers la mer demeurent importants. La nappe, de par son emmagasinement, apporte la plus grande contribution de 130704 m³/j. Pendant ce temps, les pompages de recyclage et les forages profonds permettent de satisfaire la condition de Cauchy par un apport de 85572 m³/j. Ceci s'explique par le niveau haut du bassin dans des zones où la piézométrie initiale est basse : c'est la zone Nord du domaine. Cependant d'autres stratégies pourraient être implémentées pour augmenter la récupération des pertes vers l'océan.

Tableau 36 : Bilan d'eau moyen en fin d'année 2020

TERMES DU BILAN	DEBITS (m3/j)
Débits entrants	
Flux entrant par la limite est	+2809
Drainage du bassin au profit de la nappe	+85572
Emmagasinement	+130704
Total Entrant	+219085
Débits sortants	
Flux sortant vers l'océan	-92577
Drainage de la nappe par le bassin	-137
Prélèvements domestiques	-14025
Évapotranspiration	-69316
Emmagasinement	-43038
Total Sortant	-219093
Différence	-8

XVII.1.2 Scénario 2 : Poursuite des opérations minières jusqu'en 2025 avec une légère augmentation des pompages communautaires

Durant cette période, la passe minière évolue plus à l'Ouest dans les zones à faible charge piézométrique variant essentiellement entre + 1 m et + 3 m. Cette phase d'exploitation est marquée par de courtes passes en 2022 et des zones d'exploitation en spirale occasionnant le maintien du dôme sur presque toute l'année 2023. En dehors du dôme, la ligne de niveau piézométrique +1 m se déplace vers l'intérieur des terres montrant ainsi une légère baisse au Nord et au Sud du dôme (FIGURE 121).

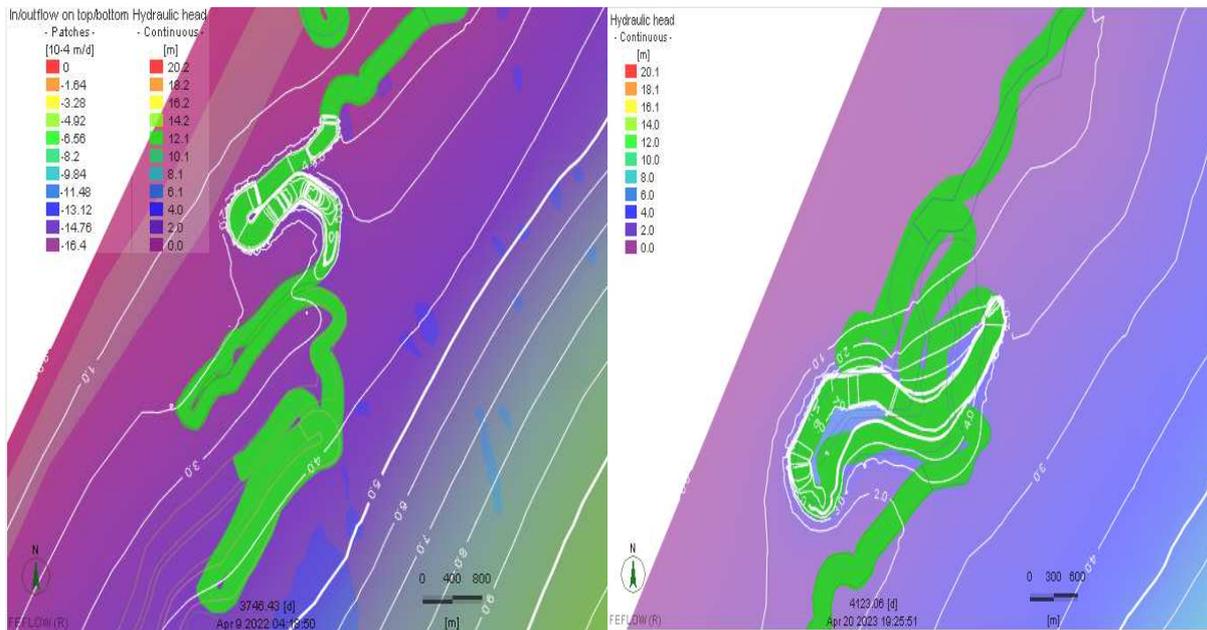


Figure 121 : Carte piézométrique de 2022 (a) et 2023 (b)

D'un point de vue plus général, la simulation du modèle hydrogéologique génère la piézométrie de la nappe des sables du Littoral Nord en fin de l'année 2025 qui mettrait en évidence les remarques suivantes (FIGURE 122):

1. Dans la partie côtière :
 - au Nord et au centre, le dôme piézométrique repousse les lignes de charge vers l'océan constituant ainsi un frein à la progression de l'intrusion saline.
 - au Sud-Ouest, l'isopièze 0 m IGN s'incurve vers l'intérieur des terres de Mboro entraînant ainsi une progression de l'intrusion saline (FIGURE 123).
2. au Sud-est du domaine, on observe une confirmation de la baisse piézométrique en dessous de 20 m IGN.

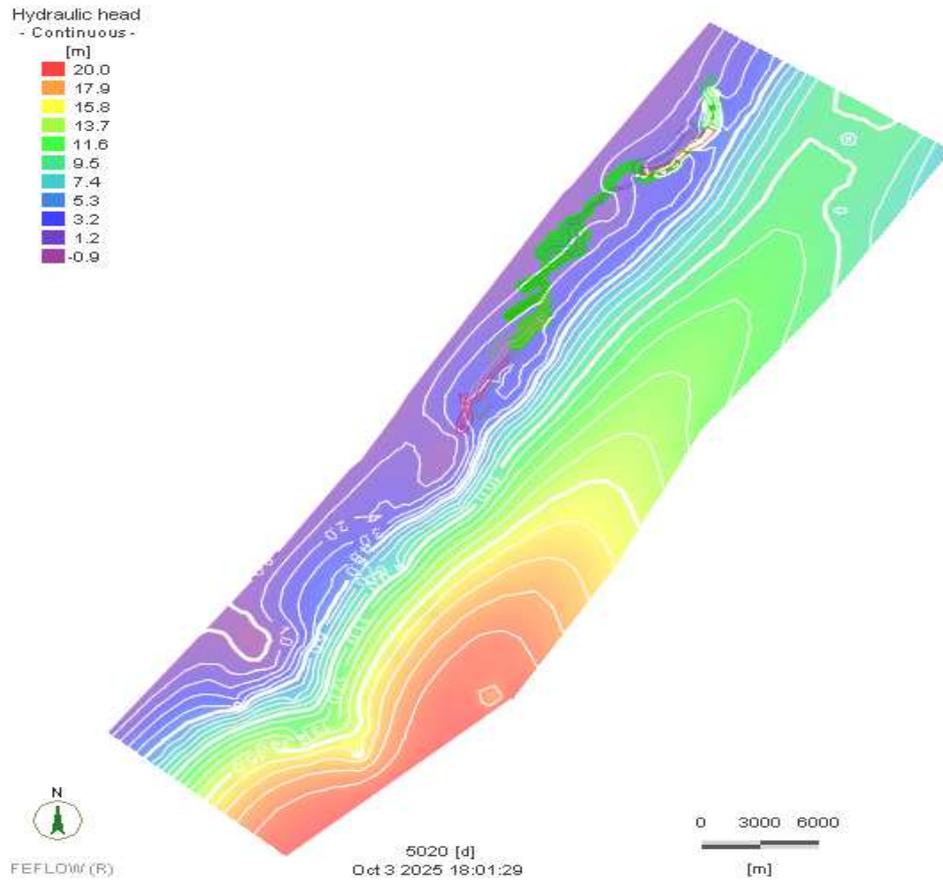


Figure 122 : La piézométrie simulée de 2025

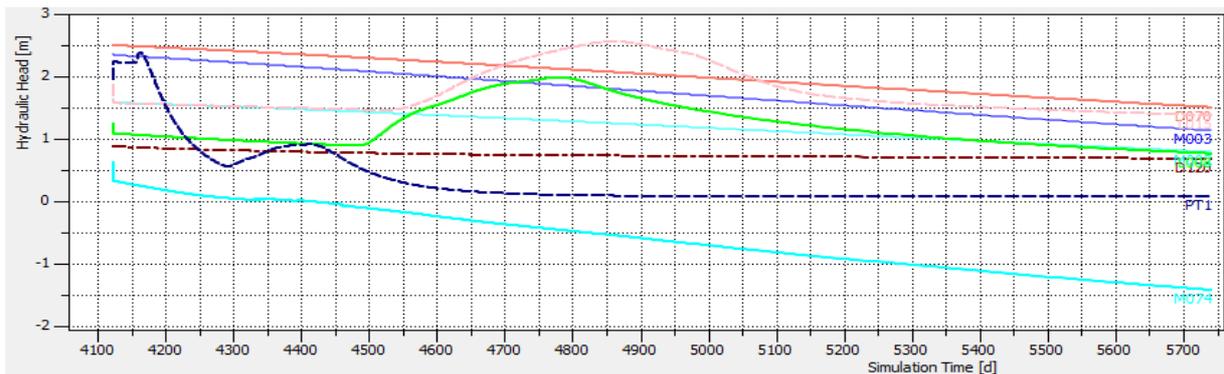


Figure 123 : Variation simulée de la piézométrie entre 2023 et 2025 observée sur différents points d'observation en des différentes zones : Lompoul (L) Diogo (D), Fass Boy (F) et Mboro (M)

En ce qui concerne le bilan d'eau, la balance du domaine se présente comme suit (TABLEAU 37) :

Tableau 37 : Bilan d'eau moyen en fin d'année 2025

TERMES DU BILAN	DEBITS (m ³ /j)
Débites entrants	
Flux entrant par la limite est	+2050
Drainage du bassin au profit de la nappe	+36060
Emmagasinement	+160500
Total Entrant	+198610
Débites sortants	
Flux sortant vers l'océan	-88258
Drainage de la nappe par le bassin	-30
Prélèvements domestiques	-20580
Évapotranspiration	-69316
Emmagasinement	-20427
Total Sortant	-198611
Différence	-1

L'apport principal provient de l'emmagasinement qui est de 160500 m³/j. Les principales pertes sont l'évaporation et l'irrigation qui cumulent 69316 m³/j. Les pertes vers l'océan sont de 88258 m³/j. La nappe continue de drainer le bassin. En d'autres termes les pompes profonds vont augmenter pour le maintien du niveau d'eau optimal dans le bassin. Une partie de ce pompage retourne à l'aquifère supérieur mais une autre va s'écouler vers la mer. Ce bilan d'eau, bien qu'équilibré, met en exergue l'épuisement des réserves en eau souterraine du Littoral Nord.

A une échelle locale limitée au domaine minier de GCO le bilan se présente comme suit (FIGURE 124) :

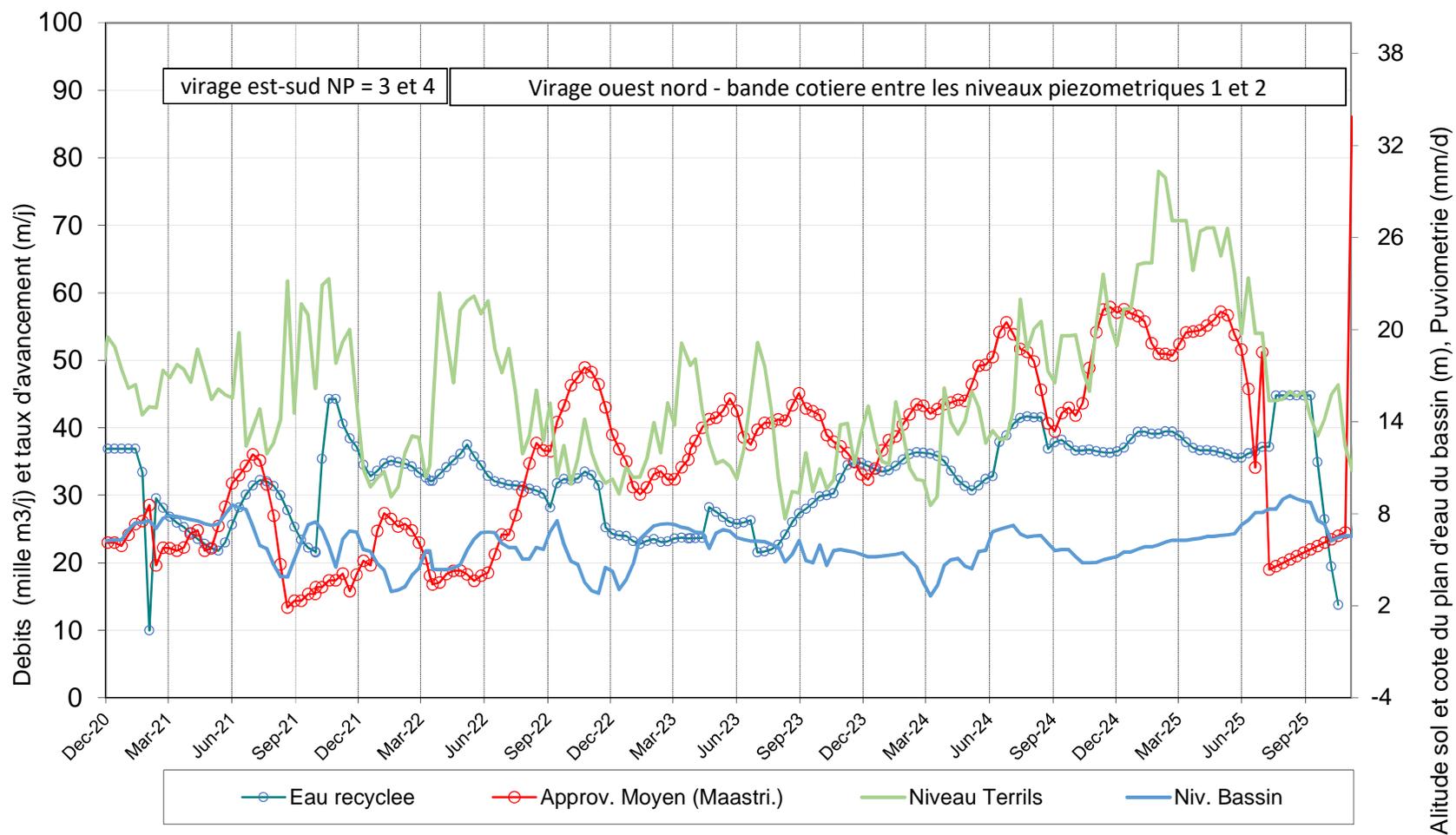


Figure 124: Balance d'eau quinquennale simulée entre 2020 et 2025

Durant ces cinq années d'exploitation entre 2020 et 2025, le niveau optimal du plan d'eau dans le bassin varie + 2 et + 8 m IGN. Par contre, les niveaux statiques de la zone se trouvant dans la bordure occidentale, varient entre + 1 et + 4 m IGN. Ainsi, on observe une augmentation significative des pertes par infiltration qui atteindraient le seuil des 80000m³/j au mois de Juin 2024 (Figure 124). Cette perte importante d'eau par infiltration augmente progressivement à partir de Septembre 2022. Elle est accentuée par l'épaisseur très importante de la zone non saturée. Elle a entraîné à son tour une augmentation progressive des pompages de recyclage et d'appoint en provenance de la nappe maastrichtienne. Les pics respectifs sont 50000 m³/j au 3^e trimestre de l'année 2025 pour les forages de recyclage et 60000 m³/j pour les forages profonds pendant plus de 8 mois (Octobre 2024 – Juin 2025). Ces valeurs prévisionnelles sont très importantes et représentent le double du pompage actuel qui fait au total 50 à 55000 m³/j.

Ce bilan identifie déjà une forte augmentation des besoins en pompage d'eau profonde maastrichtienne pour la réalisation du plan de production décennale. Alors, d'autres options telles que renforcer le recyclage et réduire les pertes vers la mer devront être observées. Au cas échéant, d'autres alternatives seraient d'exploiter le gisement à un niveau faisable et durable.

Conclusion partielle

Au terme de cette partie de l'étude, le modèle hydrogéologique de la nappe quaternaire dans la zone d'exploitation minière de GCO est réalisé. Ce modèle a pris en compte les paramètres hydrogéologique, climatique, pédologique et végétatif mais également les aspects spécifiques à l'exploitation minière par dragage. Les éléments de production clés sont le niveau optimal du bassin de dragage, la profondeur du gisement et le débit d'exploitation du mènèrai. Ce modèle a montré d'excellents résultats de calage en régime permanent et en régime transitoire avec une moyenne des écarts de 0.14 m et une racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) de 0.52 m. En plus de cela, il a fait l'objet d'une validation satisfaisante sur une période de 14 mois d'où son utilisation actuelle par la mine de GCO.

Le modèle a été utilisé pour faire des simulations allant jusqu'à 2025. Les bilans hydrauliques montrent des différences, entre les débits entrant et sortant, très faibles voire négligeable à l'échelle des grandeurs. Cependant les prévisions montrent une augmentation très significative des besoins en pompage d'approvisionnement pour le maintien du plan d'eau à son niveau optimal pour la période allant de 2022 à 2025. Le résultat de ces scénarii donne ainsi une bonne idée sur les prévisions et impacts probables de l'exploitation des sables minéralisés sur les ressources en eau souterraine du Littoral Nord. Le niveau piézométrique de la NSQ serait faiblement impacté sauf dans la zone de Mboro car dans la plupart du temps, la nappe draine le bassin et rejette d'énormes quantités d'eau vers la mer. Ainsi, l'intrusion marine ne

s'accroît aussi que dans la zone de Mboro, au-delà elle ne progresserait pas vers le continent. Ces flux d'eau vers la mer atteindraient environ $90000 \text{ m}^3/\text{j}$ ce qui montre déjà quel serait l'impact alors sur la nappe profonde maastrichtienne.

En conclusion, ce modèle demeure un outil important pour les prévisions de la mine mais aussi pour les gestionnaires des ressources en eau souterraine du Sénégal. Il permettra, aux décideurs et exploitants miniers de réfléchir ensemble pour mettre en place les stratégies nécessaires pour la maîtrise des risques prédits sans compromettre la rentabilité de l'exploitation minière durant les prochaines années.

SYNTHESE ET DISCUSSIONS

7. Piézométrie et paramètres hydrodynamiques des nappes

La nappe libre des sables du Littoral Nord s'écoule d'Est vers l'Ouest à partir du dôme piézométrique dont l'axe traverse la zone de captage des forages superficiels des ICS (Toundou Thioune). Vers l'Est, elle s'écoule à travers les calcaires lutétiens et dans les sables argileux du Continental Terminal. Son substratum marneux est affecté d'une pente du Sud vers le Nord. La puissance moyenne est de 40 m mais les plus grandes épaisseurs de sables sont identifiées vers le rivage.

Le dôme piézométrique sous forme d'anticlinal avec une pente du Sud vers le Nord, subdivise la nappe en deux sous bassins hydrogéologiques exploités à l'Ouest par la compagnie GCO avec son système d'injection et de recyclage et à l'Est, par la SDE dont les prélèvements d'environ 100000 m³/j se concentrent sur l'aquifère des calcaires de l'Eocène. Ce dôme piézométrique connaît une baisse depuis les années 1975. Sa côte de + 25 m de l'époque se trouve aujourd'hui autour de 19 à 20 m IGN. Cette baisse générale est surtout engendrée par la baisse pluviométrique et l'accroissement des pompages des ICS et de la SDE. Cependant, un ralentissement de cette baisse est observé depuis 2007 dans la zone d'étude à cause d'une reprise assez timide de la pluviométrie mais aussi du processus de « recharge artificielle » par les forages profonds de la mine de GCO.

Du point de vue hydrodynamique, les forages de GCO ont renseigné sur la particularité lithologique de l'aquifère dans la bande Ouest où les perméabilités sont très bonnes de l'ordre de 10⁻³ m/s, assimilables aux valeurs de l'aquifère des calcaires. Toutefois, malgré le rehaussement observé autour de Diogo, une dépression piézométrique est observée dans les zones de Fass Boye et Mboro. A Mboro, ce phénomène pourrait s'expliquer par l'importance des prélèvements d'eau agricole mais aussi des pompages de rabattement effectués par les ICS pour le dénoyage de la mine. A Fass Boye, cette dépression s'observe depuis longtemps. Elle pourrait s'expliquer par les formations plus argileuses riches en tourbes mais aussi par les grandes surfaces irriguées. Cette situation, dans ces deux principales zones, interpelle à juste titre les planificateurs et hydrogéologues de la compagnie minière de GCO. En effet, le choix de la côte d'exploitation du bassin de dragage mérite d'être étudié assez profondément pour éviter tout risque de baisse de rendement ou d'exploitation de couches pauvres en minéralisation.

Avec le développement de la mine de GCO, le réseau de plus de 300 piézomètres localisés dans la bande côtière a permis de disposer d'un suivi piézométrique plus régulier permettant, à l'occasion, de constater de façon nette les variations saisonnières de la piézométrie variant entre 42 et 60 mm et atteignant 26 cm en 2012. Ces fluctuations piézométriques résultent principalement de la pluviométrie et de la faible

épaisseur de la zone non saturée. Cependant, un retard a été observé entre la période hivernale et l'atteinte des côtes max qui survient généralement au mois de Novembre. Il demeure un réel avantage pour la gestion des ressources en eaux souterraines de cette zone de disposer d'une telle piézométrie assez favorable de la nappe libre des sables du Quaternaire.

Cette étude a permis de mieux connaître les réserves et les paramètres hydrodynamiques intéressants de la nappe du Maastrichtien par l'exploitation des résultats de pompages d'essai des onze forages profonds en exploitation de GCO. La perméabilité, de l'ordre $2 \cdot 10^{-5}$ m/s, reflète la nature sableuse de cet aquifère.

8. Recharge

L'appréciation des valeurs de recharge a toujours été un paramètre d'entrée très délicat pour la modélisation hydrodynamique. Les différents auteurs et modèles antérieurs l'ont estimé d'une manière générale entre 29 et 34 mm/an (Gaye & Edmunds, 1996). Ainsi, la plupart des études reprennent une valeur moyenne de 30 mm/an. Cependant, force est de constater que le contexte lithologique et climatique de cette valeur est celui de la zone Nord, autour de Louga. Dans le cadre de cette étude, il a été prouvé que la recharge n'est pas identique entre les dunes côtières à minéraux bruts peu évoluées et celles continentales ferrugineuses lessivées. Elle varie également selon la latitude.

D'une manière globale, les valeurs de recharge trouvées dans le cadre de cette étude par les méthodes de fluctuation piézométrique et de Turc sont respectivement de 56 et 20 mm/an. La méthode du bilan des chlorures a donné une moyenne de 14 mm/an. Par contre celles trouvées par les méthodes de Thornthwaite et Gaget variant entre 75 à 130 mm/an, semblent être surestimées.

On peut retenir que les valeurs de recharge de Turc et de la méthode du bilan des chlorures semblent plus vraisemblables.

9. Hydrochimie

L'étude a montré le caractère relativement acide des eaux de la nappe des sables du Quaternaire qui ont des pH souvent inférieurs à 6. La minéralisation est très bonne et généralement inférieure à 400 mg/L sauf dans certains sites tels que Mboro et Potou, du fait de l'intrusion saline.

Les eaux sont souvent de faciès chloruré sodique. C'est le cas de la zone minière de Diogo. Mais il y'a aussi des eaux de faciès bicarbonaté qu'on trouve dans la partie est de la nappe reflétant ainsi l'influence des calcaires du Lutétien. Quelques poches comme Lompoul sont chlorurées sulfatées – calci magnésiennes.

L'analyse des équilibres a permis de constater que les eaux sont sous saturées par rapport à la calcite et à la dolomite et que la pression partielle en CO_2 des eaux superficielles en équilibre avec la pression atmosphérique témoigne d'une faible recharge récente.

Les eaux maastrichtiennes quant à elles, sont soit carbonatées sodi-potassiques ou chlorurées sodi-potassiques avec des pH entre 8 et 8.3.

Les fortes teneurs en chlorures des eaux de mélange du bassin montrent l'effet combiné de l'évaporation et d'ajout d'eau profonde. La première hypothèse est prouvée par le diagramme des isotopes stables de l'eau qui a confirmé la position des échantillons de la zone minière en dessous de la droite météorique locale. Ce résultat est pour l'instant plus ou moins rassurant mais cela n'empêche que des investigations soient reconduites après deux années de production de la mine. Ce délai s'explique par la vitesse hydraulique d'écoulement théorique qui est de 548 m/an. Cette valeur qui semble néanmoins forte n'est pas spécifique à la nappe mais se justifie par le fort gradient hydraulique occasionné par le dôme piézométrique des terrils à l'arrière du bassin de dragage.

10. Influence des pompages de GCO actuels et futurs modélisés

La partie de l'étude consacrée au système de gestion des ressources en eaux dans la mine, a permis de constater la relation d'interdépendance qui existe entre les pompages de recyclage et la piézométrie locale. Des débits d'eau de $90000 \text{ m}^3/\text{j}$ en moyenne sont déversés à l'arrière du bassin de dragage alors que les pompages de recyclage et d'approvisionnement n'apportent ensemble qu'environ la moitié. Néanmoins, le bassin maintient son niveau qui peut s'élever lors des conditions piézométriques favorables. Ceci démontre que d'importantes quantités d'eau se déchargent dans le bassin à travers les parois d'une part et d'autre part, en provenance des terrils par drainage gravitaire. On peut conclure que le système actuel de gestion des eaux souterraines, qui vient de faire trois ans de production, montre une certaine durabilité.

Par ailleurs, pour les futures passes minières, où l'option est de relever le niveau du bassin de 2 à 3 m au-dessus du niveau statique, le modèle hydrogéologique testé avec satisfaction, prédit des besoins en eau très importants pour le maintien du bassin à un niveau d'eau optimal. D'importantes quantités d'eau seraient déversées dans l'océan. Alors, un suivi piézométrique et des mises à jours régulières du modèle seront recommandés. Une telle précaution se justifierait par la variabilité de la perméabilité, de la recharge et de la porosité de drainage de l'aquifère.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

1. Conclusion générale

Au terme de cette étude, portant sur l'actualisation des connaissances sur les eaux souterraines dans les conditions d'exploitation des dunes minéralisées du Littoral Nord sénégalais, un certain nombre de résultats innovants ont été obtenus suivant les différentes problématiques abordées.

L'analyse de la variabilité climatique a permis d'identifier deux périodes situées de part et d'autre de l'année 1970. Les indices de pluviosité ont montré une tendance humide qui subsistait d'avant 1931 à 1969.

L'analyse des essais de pompage a mis en évidence une différenciation entre deux zones : la bande sableuse Ouest et la bande calcaire Est. La nappe supérieure présente des valeurs de perméabilité de l'ordre de 10^{-5} et 10^{-4} m/s avec des transmissivités entre 10^{-4} et 10^{-2} m²/s alors qu'à l'Est les conductivités hydrauliques sont de l'ordre de 10^{-3} m/s et la transmissivité 10^{-2} m²/s. La perméabilité de l'aquifère calcaire est au moins 10 fois plus intéressante que celle de la partie sableuse de l'aquifère.

Les résultats du suivi piézométrique ont aussi confirmé la baisse piézométrique de la nappe des sables tantôt décrite dans les anciennes études. Entre 1987 et 2015, le dôme de Taiba a connu une baisse de 2.5 mètres. Toutefois, une légère stabilité piézométrique est observée dans la bande dunaire entre Fass Boye et Diogo depuis 2007 résultant d'une reprise pluviométrique durant ces dernières années. Dans la zone minière, ce régime est complètement bouleversé par le système d'exploitation de GCO qui a entraîné une hausse des niveaux piézométriques de plus d'1m suivant un ajout moyen des eaux profondes de 500000 m³/mois.

Les pompages d'essai des forages profonds montrent une bonne productivité de la nappe maastrichtienne qui affiche des perméabilités de l'ordre de 10^{-5} m/s et des valeurs de transmissivité de l'ordre de 10^{-3} m²/s. La simulation de pompage des forages profonds de GCO, les résultats de suivi piézométrique et qualitatif donnent des limites du rayon d'influence qui s'étendent sur 5 km mais aussi montre une certaine efficacité du système de pompage en rotation des forages profonds. Pour l'instant, un changement significatif n'est pas observé sur la qualité des eaux de la nappe maastrichtienne.

L'analyse des résultats de suivi piézométrique et de pompage des forages superficiels montre l'efficacité du système de recyclage. Ce procédé a permis la maîtrise des risques d'inondation des périmètres ou de dessèchement des puits maraîchers aux alentours de la mine. Cependant, elle pourrait être améliorée surtout lorsque la mine avancera vers le Nord où la piézométrie est relativement basse.

Les résultats de recharge obtenus dans le cadre de cette étude par les méthodes d'estimation de Turc et de fluctuations piézométriques donnent une recharge annuelle moyenne de 20 mm/an.

Les analyses hydrochimiques ont montré la prédominance de deux faciès pour la nappe supérieure. Il s'agit du faciès carbonaté calcique rencontré dans la partie calcaire de l'aquifère à l'Est du domaine d'étude et du faciès chloruré sodique qui caractérisent les eaux de l'aquifère sableux situé dans la bande occidentale. C'est dans ce groupe que se situent les eaux du domaine minier de GCO. L'étude de l'évolution chimique des eaux a montré également cette même différenciation des eaux. D'Est vers l'Ouest, la minéralisation augmente et l'alcalinité diminue. Les eaux de l'Ouest sont fortement minéralisées et présentent un caractère acide. Cette minéralisation grandissante s'accompagne d'une perte des ions Ca^{2+} et Mg^{2+} au profit de Na^+ et K^+ . Ces eaux de la partie Ouest sont sous saturées en calcite et en dolomite. Leurs pressions partielles en CO_2 proches de celle de l'atmosphère montre leur caractère relativement jeune.

L'analyse des isotopes stables montre que les eaux de la nappe superficielle ont subi l'évaporation. Elle est plus marquée dans les eaux du bassin et des terrils qui sont soit exposées au soleil ou très faiblement recouvertes par les sables.

La nappe profonde, quant à elle, présente les faciès carbonaté-sodique et chloruré-sodique. Ce dernier regroupe les eaux de la nappe superficielle zone de Diogo et environs. Ceci montre que les eaux de la nappe profonde ont subi l'évaporation ou bien que les échantillons seraient évaporés lors du conditionnement ou durant le transport. Au cas contraire, cela pourrait se justifier par la proximité des forages de GCO par rapport à la zone de recharge de Diass. Cette question mérite d'être élucidée par d'autres études.

Les analyses du tritium ont confirmé l'origine récente des eaux de la nappe avec une valeur moyenne de 1.42 UT. Toutefois, quelques poches d'eau seraient piégées dans des silts ou ne bénéficieraient pas de recharge qui serait tout simplement ré-évaporée.

L'un des résultats importants de cette étude d'évolution chimico-isotopique est la mise en évidence de la présence d'eaux d'origine récente mais également du drainage acide faible des eaux du mélange résultant du remaniement des tourbes et de la fluctuation du niveau de l'eau à l'affleurement des bancs tourbeux.

L'analyse du carbone 14 donne pour les eaux superficielles un temps de résidence de 476 ans à l'actuel. Les eaux du bassin donnent un âge corrigé approximatif 3800 ans pouvant ainsi refléter l'effet du mélange avec les eaux de la nappe profonde. Ceci montre la faiblesse de la recharge durant ces 50 dernières années en dehors des injections d'eau profonde effectuées par le processus d'exploitation de GCO.

La dernière partie de cette étude a été consacrée à la modélisation hydrodynamique. Ce modèle a tenu en compte les conditions hydrogéologiques du système aquifère supérieur/mine. Il a intégré les conditions aux limites de l'aquifère et celles spécifiques à la mine. Les données d'entrée ont été actualisées et complétées

par celles de la production minière. La particularité de ce modèle est la mobilité de la position géographique du bassin et de la zone de stockage des terrils qui enregistrent les plus importants transferts de flux d'eau.

Le calage du modèle a donné d'excellents résultats qui ont été confirmés par la phase de validation effectuée sur la période entre Mai 2014 et Janvier 2017. Les simulations prédictives de la première période entre 2017 et 2020 montrent une piézométrie de la zone minière toujours haute avec un bilan d'eau exigeant un apport externe dont le pic se trouverait au mois de Novembre 2018. Cette forte demande s'explique par la traversée de la zone Sud du panneau de Diogo dont la piézométrie reste encore naturelle n'ayant pas encore été influencée par les effets de recharge artificielle de la mine.

La seconde période d'exploitation minière entre 2020 et 2025 ne serait pas aisée d'autant plus qu'il s'agit de l'évolution de la mine vers Lompoul où la piézométrie est basse alors que le niveau optimal est élevé. La simulation montre aussi une forte demande en eau d'appoint dont la moyenne est de 40000 m³/j avec des pics pouvant atteindre 55000m³/j.

2. Perspectives

En terme de perspectives, le réseau de suivi piézométrique qui permet d'obtenir les données d'entrée du modèle les plus importantes devrait être renforcé surtout dans la partie Est du domaine et aussi faire l'objet d'un suivi régulier.

Aussi, l'étude hydrochimique et isotopique pourrait être élargie à une seconde phase, après quelques années d'exploitation, lorsque les flux d'infiltration en provenance des terrils atteindraient l'océan.

Du point de vue amélioration de la connaissance sur le mélange et la radioactivité de la zone minière sur les eaux, il serait aussi intéressant d'intégrer :

- le strontium pour le calcul des proportions de mélange des eaux souterraines dans le bassin.
- le bore qui est un indicateur sensible des mécanismes de salinisation ou de diminution des aquifères côtiers.
- les radioéléments ²²⁶Ra, ²²⁸Ra, ⁴⁰K et ²²⁸Th permettront l'évaluation du degré et des mécanismes de mobilisation des radioéléments à partir des sables enrichis en minéraux lourds.

Par ailleurs, il serait aussi intéressant de procéder à l'approfondissement de l'estimation de la recharge par la méthode du bilan des chlorures et par une analyse des eaux de pluies et de la zone non saturée sur une période de 5 années. Quant à la modélisation hydrodynamique de la période 2020-2025, les simulations prédictives pourraient être améliorées par une campagne de détermination des paramètres hydrodynamiques de la nappe des sables dans la zone de Lompoul tel que cela avait été fait pour la zone de Diogo.

Références bibliographiques

- Adams, J., & al. (1965). *Connaissance du Sénégal. Climat. Sols. végétations. Etudes sénégalaises, n° 9, Fascicule 3.*
- Aguiar, L. (2009). *Impact de la variabilité climatique récente sur les écosystèmes des Niayes du Sénégal entre 1950 et 2004-Thèse de Doctorat.* Montreal: Univ. du Québec, 185p.
- Allison, G., & Hughes, M. (1983). *The use of natural tracers as indicators of soil-water movement in a temperate semi-arid region.* J. Hydrol.
- Allison, G.B, Gee, G.W., Tyler, & S.W. (1994). *Vadose-zone techniques for estimating groundwater recharge in arid and semi-arid regions.* Soil Science Society of America Journal 58.
- ANSD. (2013). *Recensement Général de la Population et de l'Habitat.* Dakar, Senegal: Ministère de l'Economie et des Finances.
- Aranyossy.J.F. (1978). *Contribution à l'étude des transferts d'eau et solutés dans la zone non saturée par traçage cationique et isotopique.* Thèse 3e cycle, Univ. Paris VI, 132 p.
- Audibert, M. (1966). *Etude hydrogéologique de la nappe profonde du Sénégal « Nappe maastrichtienne » .Thèse 3ème cycle, Univ. Montpellier, 1963 ; Mem. B.R.G.M. , 41, 84 p.*
- Barrusseau, J. P. (1980). *Essai d'évaluation des transports littoraux sableux sous l'action des houles entre St. Louis et Joal. Ass. Sénégal, Et. Quatern. Afr. Bull. Liaison, Dakar, p. 34-39.*
- Bellion, Y. (1987). *Histoire géodynamique post paléozoïque de l'Afrique de l'Ouest d'après l'étude de quelques bassins sédimentaires (Sénégal, Taoudéni, Tullemeden, Tchad).* Thèse es Sciences, Univ. d'Avignon et des pays du Vaucluse, 296p.
- Bellion, Y., & Guiraud, R. (1984). *"Le bassin sédimentaire du Sénégal. Synthèse des connaissances actuelles" in Plan minéral du Sénégal, B.R.G.M et D.M.G., 4-63.*
- Blavoux B. (1995). *Apport des techniques isotopiques à la connaissance des eaux souterraines. Géochronique, N° 54, 12-15. .*
- Bonfils, P., & al. (1961). *Etudes lysimétriques au Sénégal.* Senegal: Institut de Recherches Agronomiques Tropicales et des Cultures Vivrières. (C.N.R.A. de Bambey).
- Boujo, A. (1972). *Gisement de Ndomor Diop . Dakar Cie Sen. Phosphate de Taiba. Rapp 72/BO/01, 10p.*
- Bourrelier, P., & Lespine, J. (2008). *Les opérations minières outre-mer Le BRGM, acteur central de la politique publique. Realites Industrielles, 7-19.*
- Branchart, R., & Flicoteaux, R. (1971). *Age des formations phosphatées de Lam-Lam et Taiba (Senegal occidental). Données micropaléontologiques, conséquences stratigraphiques et paléogéographiques. Bull. Sci. Geol., p 399-408.*
- BRGM. (1984). *Projet d'exploitation des tourbes des Niayes. Rapport de synthèse géologique. Prospection générale et certification des réserves.* BRGM, 195p.

- Castany, G. (1982). *Principes et methodes d'hydrogeologie*. . Paris: Ed. Dunod.
- Castelain, J. (1963). *Aperçu stratigraphique et micropaléontologique du bassin du sénégal. Historique de la découverte paléontologique*. Coll. Int. de micropaléontologie. Dakar et mémoire BRGM, n°32, 136-150,5 pl.
- Castelain, J., Jardine, S., & Monciardini, C. (1965). *Excursions géologiques dans le Sénégal occidental*. In « Coll. int. Micropal. (Dakar, 6-11 mai 1963). ». Mém. BRGM n 32, p . 257-365.
- CDH, C. p. (1983). *Fiches Techniques culturales des principaux legumes*. Dakar, Senegal: Institut Senegalais des Recherches Agricoles.
- Chino, A. (1962). *Sédimentation phosphatée au Sénégal. Première campagne. Etablissement d'une échelle stratigraphique*. Rapp.inéd. B.R.G.M., DAK 62-A-I, Dakar.
- Clark, I., & Fritz, P. (1999). *Environmental isotopes in hydrogeology*.
- Coly, O. (2012). *Apport des outils cartographiques et géochimiques à la validation des paramètres d'entrée du modèle hydrogéologique de la nappe des sables quaternaires de Dakar : implication sur les inondations en zone péri-urbaine*. Dakar: THESE Faculte des Sc.etTech. -UCAD.
- Consolidated Rulite Limited . (2010). *How are Mineral Sand Mined on North of Stradebroke Island*. Australia.
- Craig H. (1961). Isotopic variations in meteoric water. *Sciences* 133, 1702–1703.
- Dassargues, A. (1995). *Modeles Mathematiques en Hydrogeologie*. Bucarest: Prohramme Tempus-Sciences de l'Eau et Environnement.
- De Marsily, G. (1986). *Quantitative Hydrogeology* (Vol. 440p). New York: Academic Press.
- Degallier R. et Joseph C. (1970). Evaluation des ressources des nappes peu profondes au moyen d'un indice de sensibilité aux pluies. Coll. bilan hydrique mondial. *Publ. AIHS*, 92, 84-99.
- Degallier, R. (1960). *Hydrogéologie de la feuille de Louga au 11200.000*. Rapp.inéd. Arch. Serv. Géol. et Prosp. Minières AüF; Dakar.
- Deines et al. (1974). Stable isotope ratios and the existence of a gas phase in the evolution of carbonate groundwaters. *Geochim Cosmochim Acta* 38, 1147 - 1164.
- Dettinger, M. (1989). *Reconnaissance estimates of natural recharge to desert basin in Nevada, by using chloride balance calculations*. USA: Journal of hydrology,.
- DGPRE / COWI-POLYCONSULT. (2002). *Modèle hydrogéologique du système aquifère Maastrichtien du Sénégal. Rapport n 6, Min des Mines, Energie et Hydr.,SGPRE. 206p*. Dakar - Senegal : Ministere de l'Hydraulique et de l'Assainissement - DGPRE.
- DGPRE. (2015). *Repertoire des forages du Senegal* .

- Diedhiou M. (2011). *Approche multitraceur géochimique et isotopique à l'identification des sources de la pollution nitratée et des processus de nitrification et dénitrification dans la nappe de Thiaroye*. Daka: Thèse de doctorat unique, Université Cheikh Anta Diop, 210p.
- Dieng, B. (1987). *Paleohydrogeologie et Hydrogeologie Quantitatives du Bassin Sedimentaire Senegalais du Senegal - Essai d'Explication des Anomaies Piezometriques Observees*. Paris - France: Ecole Nationale des Mines de Paris.
- Diersch H.-J.G. (2005). *FEFLOW Software - Finite Element Subsurface flow and Transport Simulation System - Reference Manual*. Berlin: WASY GmbH.
- Diop, F. (1993). *Extraction de l'eau interstitielle des sédiments par la méthode de lixiviation en vue de la détermination de sa teneur en éléments dissous. Application pour l'estimation de la recharge de la nappe des environs de Dakar*. Mémoire DEA, Univ. Dakar, 64 p.
- Diouf, C. e. (2016). *Estimation of Turc reference evapotranspiration with limited data against the Penman-Monteith Formula in Senegal*. Journal of Agriculture and Environment for International Development.
- Diouf, S. (1995). *Application de la géophysique (électrique et sismique) à l'étude de la géométrie du réservoir de l'aquifère du littoral Nord du Sénégal (de Taiba à Rao)*. Mém. D.E.A, Univ. de Dakar. 105p + annexes.
- Djigo, I. B. (2017). *Estimation qualitative et quantitative de la recharge de la nappe des sables du Quaternaire dans la zone minière de GCO (bordure occidentale du Littoral Nord)*. Université Cheikh Anta Diop. Dakar- Sénégal: Institut des Sciences de la Terre.
- Doherty, J. (2005). *Pest Model-Independent Parameter Estimation*. User manual: 5th Edition. . Brisbane, Australia: Watermark Numerical Computing.
- DPS THIES. (2004). *Situation économique et sociale*. Serv. Reg. de Thies, 85p.
- Drever, J. (1988). *The geochemistry of natural waters*. New Jersey: 2nd ed. Prentice Hall. Englewood cliffs.
- Dryade. (1990). *Inventaire Biophysique de la région des Niayes Synthèse, document de recherche dans le cadre du Project Conservation des Terroirs du Littoral, Ministère du Développement Rural et de l'Hydraulique, DFCCS*. Dakar: République du Senegal, 262 p.
- Dubreuil, G., & Fohlen, D. (1987). *Etude des ressources en eau souterraine du Sénégal. Campagne de Prospection géophysique. Rap. B.R.G.M, 87 DAK 04 EAU*.
- Edmunds, W., & al, D. W. (1992). *Sources of recharge at Abu Delaig, Sudan*. Journal of hydrology.
- Edmunds, W., & Gaye, C. (1994). *Estimating the spatial variability of groundwater recharge in the Sahel using chloride*. Journal of hydrology, 156.
- Elouard, P. (1976). *Oscillations climatiques de l'Holocène à nos jours en Mauritanie atlantique et dans la vallée du Sénégal*. In NEA Edit, *la désertification au Sud du Sahara* .: Colloque de Nouakchott, 17-19 décembre 1973.

- Elouard, P., & Faure, H. (1967). *Schéma de variation du niveau de l'Océan atlantique sur la côte de l'Ouest de l'Afrique depuis 40.000 ans*. C. R. Acad. Sc. Paris, série D, tome 265.
- Fall, M. (1986). *Environnements sédimentaires quaternaires et actuels des tourbières des Niayes de la grande côte du Sénégal*. Thèse Sciences, Univ. Dakar, 196p. + annexes.
- Faye, A. (1983). *Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique du horst de Ndiass et de ses environs (Sénégal occidental)*. Thèse 3eme cycle Univ. Dakar. 160 p., 74fig., 10 tab.
- Faye, S. (1995). *Modélisation hydrodynamique des nappes du littoral nord entre Cayar et St-Louis. Impact des futurs prelevements envisages dans le cadre de l'approvisionnement en eau de Dakar et de ses environs*. These de 3e cycle. Dakar: UCAD, 167p.
- Flicoteaux, R., & Medus, J. (1980). *Existence d'une lacune entre les termes marins du Paléogène et du Néogène du Sénégal Méridional démontrée par les microfaunes et les microflores*. Trav. Lab. Sci. Terre, St Jérôme, Marseille (A), n12, Oct 80, 30p.
- Fohlen, D., & Lemordant, Y. (1983). *Suivi hydrogéologique du chantier pilote d'exploitation du secteur Mboro-Lompoul*. Rapport BRGM 83/AGE/034, 80p.
- Fontes JC. et Garnier J.M. (1979). Determination of the initial ^{14}C activity of the dissolved carbon: a review of existing models and a new approach. . *Water Resources. Res*, 15, 2, 399 - 413.
- Fritz, & Tardy. (1976). *Séquences des minéraux secondaires dans l'altération des granites et roches basiques, modèles thermodynamiques*. France: Bull. Soc. Géol.France. 7-12.
- Gachet A. (2012). *Groundwater Explorations in Senegal, Phosphate Mines of Taiba*. Tarascon, France: RTI.
- Gaget, E. (1957). *Alimentation en eau de Dakar. Etude sur la nappe de Thiaroye*. Rapport de stage. Afrique Occidentale Française: Haut Commissariat de la rép. .
- Gaillard B. (1976). *Méthode de traceurs pour la détermination des paramètres de transfert des substances en solution dans l'eau des aquifères*. Grenoble: These Université Scientifique et Médicale.
- Gal et al. (2010). Surface gas geochemistry above the natural CO_2 reservoir of Montmiral (Drôme, France), source tracking and gas exchange between the soil, biosphere and atmosphere. *Oil Gas Sci Technol – R*, 635 -652.
- Garnier, R. (1976). *L'Équateur météorologique*. La Météo, VI série,p. 113-136.
- Gaye C.B. (1990). *Etude isotopique et géochimique du mode de recharge par les pluies et de décharge évaporatoire des aquifères libres sous climat semi-aride au nord du Sénégal*. . Dakar: Doctorat ès Sciences.Univ. Cheikh Anta Diop de Dakar. 281 pp. .
- Gaye, C. (1980). *Etude Hydrogéologique, hydrochimique et isotopique de la nappe infrabasaltique de la presqu'île du Cap Vert*. These de Doctorat 3eme cycle. Dakar: UCAD, 131p.
- Gaye, C. (1990). *Etude isotopique et géochimique du mode de recharge par les pluies et de décharge évapotranspiratoire des aquifères libres sous climat semi-aride au Nord du Sénégal*. These es Sciences. Dakar: Univ. de Dakar, 245p.

- Gaye, C., & Edmunds, W. (1996). Groundwater recharge estimation using chloride, stable isotopes and tritium in the sands of northwestern Senegal Environment. *Geol*, 27: 246-251.
- GKW . (2009). *Modélisation numérique - Littoral Nord. Projet PELT - Rapport phase IV lot 1B, DGPRES- MHA. Dakar, 109p.*
- Glenn, D. (1989). *AQTESOLV Pro software support and education and training*. Récupéré sur www.aqtesolv.com: http://www.aqtesolv.com/hydrosolve/glenn_m_duffield.htm
- Gorodisky, A. (1955). *Note sur les gisements de calcaire lacustre de la feuille Louga au 1/200000. Rapp.inéd Arch. Dir. Féd. Mines et Géol. A.O.F., Dakar.*
- Grzina, A., & al. (2002). *Slurry pumping manual. A technical application guide for users of centrifugal slurry pumping systems*. Warman International LTD.
- Hallaire M. (1960). Le problème du potentiel de l'eau dans le sol et de la disponibilité de l'eau pour la végétation. . *Ann. Physiol. vég.*, 119 -134.
- Healy, R., & Cook, P. (2002). Using groundwater levels to estimate recharge. *Hydrogeology journal* 10, 91-109.
- Hebrard, L. (1958). *Aperçu sur les dépôts de minéraux lourds: ilmènite, rutile, zircon, ... des sables des plages et anciennes vallées du littoral d'Afrique occidentale française. Doc. Dir. , fed. Mines Géol. Mr. occid. fr. Dakar 210p.*
- Hilel, D. (1984). *L'eau et le sol: Principes et processus physiques*. Ed. Cabay, Louvain.
- Hubert.M. (1922). Etude hydrologique en vue de l'alimentation en eau des villes de Dakar et Rufisque. *Etude, Histoire et Sciences, IFAN*, 61-218.
- IAEA/WMO. (2016). *The GNIP Database, Global Network of Isotopes in Precipitation*. Récupéré sur <http://www.iaea.org/water>.
- Ingerson, E., & Pearson, F. J. (1964). *Estimation of age and rate of motion of ground-water by the 14C method In Miyake, Y. and Koyama, T. Tokyo: Recent Research in the Field of Hydrosphere, Atmosphere, and Nuclear Geochemistry.* .
- ISRA. (1996). *Rapport annuel*. DAKAR.
- Joullil, I., & al. (2013). *La secheresse meteorologique au bassin hydraulique OUM ER RBIA (Maroc) durant les dernieres decenies. Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, n° 12, Janvier 2013, pp. 109-127.*
- Kaba, M., & al. (2016). Spatial and seasonal variability of groundwater hydrochemistry in the Senegal North Littoral aquifer using multivariate approach. *Environment Earth Sciences*, 1-20.
- Kane, A. (1985). *Le bassin du Sénégal à l'embouchure Flux continentaux dissous et particuliers. Invasion marine dans les vallées du Fleuve. Thèse doct. 3ème cycle. Trav. Lab. geogr. Phy. Dakar: Univ. de Nancy II, 186p.*
- Kane, C. (1995). *Contribution à l'étude hydrochimique de la nappe des sables quaternaires du Littoral Nord du Sénégal, entre Kayar et Saint-Louis. Thèse de 3ème cycle.Univ.C.A.Diop de Dakar. 131p.*

- Konikow L.F. (2008). Utilisation des modèles numériques pour simuler les processus d'écoulement et de transport dans les eaux souterraines. Dans AIEA, *Isotopes de l'environnement dans le cycle hydrologique- Collection cours de formation 32* (pp. 174-220). Vienne, Autriche: International Atomic Energy Agency.
- Lalot, E. (2014). *Analyse des signaux piézométriques et modélisation pour l'évaluation quantitative et la caractérisation des échanges hydrauliques entre les aquifères alluviaux et rivières - Cas du Rhône*. France: Ecole Nat. Supérieure des Mines de Saint Etienne.
- Lappartient, J. (1978). *Extension vers le nord du Golfe miocène casamançais (Sénégal)*. 6^{ème} réunion . Sc.Ter.25-25 avril 1978, Orsay, P, 232.
- Le Priol, J. (1985). *Synthèse hydrogéologique du Sénégal. Etude géologique structurale par photo-interprétation. Géométrie et limite des aquifères souterraines. Rapp. D.E.H., Min., Hydr. Sénégal*. 77p.
- Leblanc, Y. (1999). *Prédiction de l'effet du décapage d'une mine à ciel ouvert sur l'hydrogéologie locale à l'aide de la modélisation numérique*, 23p. Québec, Canada: Systèmes Geost. International.
- Lepriol, J., & Dieng, B. (1985). *Synthèse hydrogéologique du Sénégal. Etude géologique structurale par photo-interprétation. Géométrie et limite des aquifères souterraines. Rapp. D.E.H., Min.Hydr. Sénégal*, 77p.
- Leroux, M. (1979). Le climat du Sénégal. *Atlas du Sénégal*, 12-17.
- Lezine, A. M. (1986). *Environnement et paléo-environnement des Niayes depuis 12000 ans B.P. In INQUA-ASEQUA Symposium International. Changements globaux en Afrique durant le Quaternaire Passé-Présent-Futur - Dakar 21-28Avril 1986. Ed. ORSTOM*.
- Lions J et al. (2013). Tracking leakage from a natural CO₂ reservoir (Montmiral, France) through the chemistry and isotope signatures of shallow groundwater. *Greenhouse Gases*, 236 - 237.
- Lucas, J., Menor, E., & Prevot, L. (1979). *Le gisement de phosphate de chaux de Taïba (Sénégal). Un exemple d'enrichissement de par alteration*. *Sci. Geol., Bull.*, 32, 1-2. p 32-57, Strasbourg.
- Madioune D.H. (2014). Application of isotopic tracers as a tool for understanding hydrodynamic behavior of the highly exploited Diass aquifer system (Senegal). *Journal of Hydrology* 511, 443-459.
- Maignien, R. (1965). *Notice explicative. Carte pédologique du Sénégal au 1/1.000 000*. ORSTOM. Centre Dakar-Hann. 63p.
- Mariotti A. (1991). Le carbone 13 en abondance naturelle, traceur de la dynamique de la matière organique des sols et de l'évolution des paléoenvironnements continentaux. *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, vol. XXVI, no 4, 299-313.
- Martin, A. (1970). *Les nappes de la presqu'île du Cap Vert. Leur utilisation pour l'alimentation en eau de Dakar. Rapport B.R.G.M* 56p.

- Mckee, T., Doesken, N., & Kleist, J. (1993;1995). *The relationship of drought frequency and duration times scales. American Meteorological Society. 8th conference on Applied Climatology, 17-22 Janvier, Anaheim, CA, pp.179-184.*
- McKee, T., Doesken, N., & Kleist, J. (1995). *Drought monitoring with multiple timescales. In: Proceedings of the Ninth Conference on Applied Climatology, Dallas, Texas, du 15 au 20 janvier 1995. Boston American Meteorological Society, 233-236.*
- MDL. (2010). *Grande Côte Project Definitive Feasibility Study. vol 2. P.15.*
- Mermoud, A. (2006). *Cours de Physique du sol: Etat de l'eau du sol. Suisse: EPFL, .*
- Meynink, W. (2007). *Dredge pond make-up water requirements- Roprt N# 304.01. Australia: Mineral Deposits Limited.*
- Michel, P. (1956). *Rapport préliminaire sur la géologie de la région des Niayes, de Kayar à l'embouchure du Sénégal. Rapport inédit MAS.*
- Michel, P. (1969). *Chronologie du Quaternaire des bassins des fleuves Sénégal et Gambie. Essai de synthèse. In : Etudes sur le Quaternaire dans le monde. VIIIè Congrès de l'INQUA, vol. 1, p. 49-61. Ed. CNRS, Paris.*
- Michel, P. (1973). *Les bassins des fleuves Sénégal et Gambie. Etude géomorphologique. Mém. ORSTOM. Paris: N63, 3 tomes, 752 p.*
- Millot, G. (1964). *Géologie des argiles. Manson éd., Paris, 489p.*
- Monciardini, C. (1965). *Etude de 19 échantillons du permis Louga-Lac de guiers. In Etude N°1, Lab. Micrpal. BRGM, Paris.*
- Monciardini, C. (1966). *La sédimentation Eocène au Sénégal. Mémoire BRGM., N°43, 65p., 16pl.h.t.*
- Monteillet, J. (1986). *Evolution quaternaire d'un écosystème fluviomarin tropical de marge passive. Environnements sédimentaires et paléocologie du delta et de la basse vallée du Sénégal depuis environ 100000 ans. Thèse es Sciences, Univ. Perpignan, 264.*
- Musy, A., & Soutter, M. (1991). *Physiques du sol. Suisse: PPUR Presses Polytechniques Universitaires.*
- Ndong, J. (1995). *L'évolution de la pluviométrie au Sénégal et les incidences de la sécheresse récente sur l'environnement. Revue de Géographie de Lyon, 70, 193-198 .*
- Noel, Y. (1975). *Etude hydrogéologie des calcaires lutétiens entre Bambey (1ère phase). Rapport BRGM 75 Dak 01, 47p.*
- Noel, Y. (1978). *Etude hydrogéologie des calcaires lutétiens entre Bambey et Louga (2ème phase). Orleans: BRGM, 100p.*
- Olive P. (1996). *Introduction a la géochimie continentale. Bucarest: Tempus.*
- OMS. (1974). *Etude des ressources en eau du littoral Nord entre Kayar et Saint-Louis. Rapport Projet SEN.PIP.01. 70p + annexes.*

- PADEN. (2014). Fiche technique des bonnes pratiques de production de chou au Senegal.
- Penman, H. L. (1948). *Natural evaporation from open water, bare soil and grass*. London: Proceed. Of the Royal Soc. ,series A, 193, 120-145.
- Pernel, F., & Gageonnet, M. (1992). *Réévaluation de la source en eau du littoral nord : synthèse des données ; modélisation hydrodynamique et simulations prévisionnelles*. BRGM R35 030.
- Perreirabarreto, S. (1962). *Etude pédologique des "Niayes" méridionales (entre Kayar et Mboro)*. Rapp. Off. Rech. Sci. Tech. O.Mer, Dakar, 120p + annexes.
- Puttalaz, J. (1962). *Hydrogéologie de la région des Niayes*. Rapport DAK 62-A12. 37p.
- Puttalaz, J. (1962). *Hydrogéologie de la région des Niayes*. Rapport DAK 62-A12. 37p.
- RAYNAL, A. (1962). *Flore et végétation des environs de Kayar de la côte au lac Tanma Tanma (Sénégal)*. Dipl. Et. Sup. Fac. Sci. Dakar, Ann.. Fac. Sci., Série Sci.végét., t.9, n° 2, p.121-231, 24 fig., 12 pl. phot.
- Riad et al. (2011). Application of the overlay weighted model and Boolean logic to determine the best locations for artificial recharge of groundwater. *Journal of Urban and Environmental Engineering*, 57-66.
- Robertson, M. (2013). *Groundwater assessment. Path 1-4 Tailings and water management*. Grande. GEO-ENG. Grande Cote Operations (GCO).
- Saiac J.H. (2006). *Analyse numerique des equations aux derivees partielles -polycopie*. Cnam.fr.
- Sall, M. (1982). *Dynamique et morphogenèse actuelles au Sénégal occidental*. Thèse Lettres: U.L.P. Strasbourg.
- Sall, M., & al. (1978). *Application de quelques méthodes de statistique descriptive à l'étude des sédiments des ensembles dunaires du Sénégal occidental*. Ann. Fac. Lettr. Sci. Hum., Dakar n08, p. 197-217.
- Sarr, R. (1995). *Etude biostratigraphique et paléoenvironnementale des séries d'âge Crétacé terminal à Eocène moyen du Sénégal occidental*. Systématique et migration des Ostracodes. Thèse Sciences, Uni. Dakar, 335p.
- Sauty, J. (1974). *Etude sur les modeles mathematiques de la nappe des sables quaternaires et calcaires lutetiens entre Tivaoune et Saint Louis du Senegal*. Orleans, France: BRGM - 75 SGN 049 AME. 70p + annexes.
- Schlumberger, W. (2013). Aquifer Test 2013.1. 72 Victoria Street South, Ontario, Canada.
- SCHOELLER, H. (1955). *Les eaux souterraines*. Masson et Cie., Ed., paris, 642p.
- Seck, M. (2011). *Contribution à l'étude de la nappe maastrichtienne au Sénégal : : caractérisation hydrodynamique et hydrochimique*. (E. -L. d'edtion, Éd.) Sarrebruck, Allemagne: Editions Universitaires Europeennes. Récupéré sur ISBN-13: 978-613-1-57736-9

- Seck, M., Faye, S., Robertson, M., & Rose, M. (2018, January 31). Recycling Tailings Seepage Water for Diogo Heavy Minerals Mine Sustainability (Northern Senegal). *Journal of Water Resource and Protection*, 10, pp. 121-144. doi:<https://doi.org/10.4236/jwarp.2018.101008>
- Simler, R. (2004). Logiciel d'hydrochimie multilingage en distribution libre. Avignon, France: Laboratoire d'Hydrogéologie d'Avignon (LHA).
- Sinton, P., Wingle, B., & Bartlett, D. (2015). *Fefelow Model of a Copper Mine, Arizona, USA*. Berlin : DHI Group.
- Stumm, W., & Morgan, J. (1981). *Aquatic chemistry, an introduction emphasizing chemical equilibria in natural waters*. John Wiley & Sons ed.
- Surinaidu et al. (2017, October 7). Hydrogeological and Groundwater modeling studies to estimate the groundwater inflows into the coal Mines at different mine development stages using MODFLOW . *Elsvier - Water Resources and Industry*, pp. 49-65.
- Tacher L. (1999). *Norme d'exploitation de l'aquifère phréatique du Rhône par doublets géothermiques eau-eau*. Etude n°9903, GEOLEP.
- Tall, S., & Fall, A. S. (2001). *Cités horticoles en sursis? L'agriculture urbaine dans les grandes Niayes au Sénégal*. Ottawa(Canada): Centre de Reeh. pour le Dév. Internat. (CRDI), 138 p.
- Tamers, M. (1976). Validity of Radiocarbon dates on terrestrial snail shells,. *AM, Antiquity* 35, 94-100.
- Tandia, A. (1990). *Revue critique des méthodes d'évaluation de la recharge des nappes.Contribution de l'approche géochimique et isotopique. Louga - Nord Sénégal*. Thèse 3e cycle, , Univ. Dakar.
- Tapsoba, D. (1997). *Caractérisation événementielle des régimes pluviométriques Ouest Africains et de leur récent changement*. Thèse de doctorat,. Paris: Université Paris XI, 145 p.
- Tessier, F., & al. (1975). *Réforme du concept du continental terminal dans les bassins sédimentaires côtiers de l'Ouest africain, IX Congr. Inter. Sedim., Nice, 207-212*.
- Tessier, R. (1950). *Contribution à la stratigraphie et à la paléontologie de la partie Ouest du Sénégal (Crétacé et Tertiaire)- Thèse es Sciences. Marseille et Bull.Dir.Fed.Mines Géol.AOF, N°14 (1952), 267p*.
- Tornthwaite, C. (1954). *The measurement of potentiel évapotranspiration*. Seabrook, New Jersey: John P.Mather Ed., 225p.
- Travi et al. (1987). *Reconnaissance chimique et isotopique des eaux de pluie au Sénégal*. Paris,: Géodynamique. ORSTOM, vol. 2. no 1 : 1-11.
- Travi Y. (1988). *Hydrogéochimie et hydrologie isotopique des aquifères fluores du bassin du Senegal. Origine et conditions de transport du fluor dans les eaux souterraines*. Paris-Sud: Theses Sciences, Univ.216 p.

- Travi, Y. (1988). *Hydrogéochimie et hydrologie isotopique des aquifères fluorurés du bassin du Sénégal. Origine des conditions de transport du Fluor dans les eaux souterraines. Thèse Sciences, Univ. Paris- sud, 216 p.*
- Travi, Y. (1988). *Hydrogéochimie et hydrologie isotopique des aquifères fluorurés du bassin du Sénégal. Origine des conditions de transport du Fluor dans les eaux souterraines. Thèse Sciences, Univ. Paris- sud, 216 p.*
- Tricart, J. (1965). *Principes et méthodes de la géomorphologie. Manson éd., Paris, 496p.*
- Trochain, J. (1940). *Contribution à l'étude de la végétation au Sénégal. Mém.Tnst.Fond. Afr. Noire, Dakar, n2, 433 p., 30 fig., 45 tab., 30 pl. ph.*
- Trompette, R. (1973). *Le Précambrien supérieur et le Paléozoïque inférieur de l'Adrar de Mauritanie (Bordure occidentale du bassin de Taoudéni, Afrique de l'Ouest). Un exemple de sédimentation du craton. Etude stratigraphique et sédimentologique. 702 p. Étude stratigraphique et sédimentologique.*
- TROPICA. (2005). *Etude d'impact environnemental et social (EIES) du Projet Zircon de la Grande Cote. p.92-93.*
- Turc, L. (1961). *Evaluation des besoins en eau d'irrigation ; évapotranspiration potentielle. Ann. Agr., 12, 13-49.*
- USAID. (1986). *Cartographie et teledetection des ressources de la Republique du Senegal. Etude de la geologie, de l'hydrogeologie, des sols, de la vegetation et des potentiels d'utilisatins des sols. Direction de l'Amenagement du Territoire . Senegal : Agency for International Development.*
- Viers, G., & Vigneau, J. (2001). *Elements de climatologie. 2eme Edition. Nathan,233p.*
- W. Herchenhorn et al. (2006). *From Heavy minerals mining to a wet dredge mining operations: a successful story in Brazil. Netherlands: Papers and presentations.*
- Yousfi, M. (1984). *Etude géochimique et isotopique de l'évaporation et de l'infiltration en zone non saturée sous climat aride Béni-Abbès, Algérie. Thèse 3e cycle, Univ. Paris-sud, Orsay,.*
- Zagana, E., Obeidat, M., Kuells, C., & Udluft, P. (2007). Chloride, hydrochemical and isotope methods of groundwater recharge estimation in eastern Mediterranean areas: a case study in Jordan. *Hydrological Process., 21: 2112-2123.*
- Zammouri, M., & Besbes, M. (1994). Représentativité des modèles des grands aquifères. le Continental Intercalaire Saharien. *Hydrogéologie , n°3.*
- ZANTE, P. (1984). *Etude de reconnaissance des sols aux aptitudes forestières. Projet Louga.*

ANNEXES

Annexe 1 : Résultat du calcul de l'ETR du secteur Sud (Diogo –Mboro) avec un sol de CSE =150mm

Date	Rain	Méthode de Turc STK150				Méthode de Thornthwaite STK150			
		ETP	ETR	Stock	le	ETP	ETR	Stock	le
-----	-----								
2010-01	0	166.8	-	-	-	69.1	-	-	-
2010-02	0	129.8	-	-	-	54.8	-	-	-
2010-03	0	155.5	-	-	-	93.9	-	-	-
2010-04	0	162.4	-	-	-	74.5	-	-	-
2010-05	0	119.3	-	-	-	86.2	-	-	-
2010-06	20	117.6	20.0	-	-	101.0	20.0	-	-
2010-07	88	108.5	88.0	-	-	106.5	88.0	-	-
2010-08	181	107.4	107.4	73.6	-	98.9	98.9	82.1	-
2010-09	239	106.3	106.3	150.0	56.2	90.0	90.0	150.0	81.1
2010-10	26	125.4	125.4	50.6	-	105.0	105.0	71.0	-
2010-11	0	130.3	50.6	-	-	97.2	71.0	-	-
2010-12	0	123.1	-	-	-	76.6	-	-	-
2010	554	1553	498	274	56	1054	473	303	81
2011-01	0	164	-	-	-	65	-	-	-
2011-02	0	197	-	-	-	64	-	-	-
2011-03	0	191	-	-	-	70	-	-	-
2011-04	0	211	-	-	-	83	-	-	-
2011-05	0	162	-	-	-	85	-	-	-
2011-06	8	169	8.0	-	-	108	8.0	-	-
2011-07	91	152	91.0	-	-	110	91.0	-	-
2011-08	270	144	143.7	126.3	-	108	108.2	150.0	11.8
2011-09	113	131	131.2	108.1	-	95	95.5	150.0	17.5
2011-10	47	164	155.1	-	-	100	99.6	97.4	-
2011-11	0	168	-	-	-	83	83.4	14.0	-
2011-12	0	148	-	-	-	65	14.0	-	-
2011	529	2002	529	234	-	1037	500	411	29
2012-01	0	168	-	-	-	62	-	-	-
2012-02	0	181	-	-	-	58	-	-	-
2012-03	0	200	-	-	-	85	-	-	-
2012-04	0	205	-	-	-	72	-	-	-
2012-05	0	177	-	-	-	107	-	-	-
2012-06	0	164	-	-	-	123	-	-	-
2012-07	362	151	150.9	150.0	61.1	109	108.5	150.0	103.5
2012-08	264	144	143.7	150.0	120.3	98	98.2	150.0	165.8
2012-09	17	131	130.8	36.2	-	66	65.6	101.4	-
2012-10	0	173	36.2	-	-	119	101.4	-	-
2012-11	0	165	-	-	-	94	-	-	-
2012-12	0	152	-	-	-	66	-	-	-
2012	643	2009	462	336	181	1058	374	401	269
2013-01	0	171	-	-	-	61	-	-	-
2013-02	0	194	-	-	-	69	-	-	-
2013-03	0	189	-	-	-	81	-	-	-
2013-04	0	214	-	-	-	77	-	-	-
2013-05	0	178	-	-	-	100	-	-	-
2013-06	0	162	-	-	-	100	-	-	-
2013-07	21	147	21.0	-	-	111	21.0	-	-
2013-08	231	143	143.4	87.6	-	121	121.5	109.5	-
2013-09	184	138	137.8	133.9	0.0	85	85.4	150.0	58.1
2013-10	0	166	133.9	-	-	103	103.1	46.9	-
2013-11	0	151	-	-	-	79	46.9	-	-
2013-12	0	137	-	-	-	70	-	-	-
2013	436	1991	436	222	0	1058	378	306	58
2014-01	0	165	-	-	-	61	-	-	-
2014-02	0	201	-	-	-	64	-	-	-
2014-03	0	199	-	-	-	70	-	-	-

Date	Rain	Méthode de Turc STK150				Méthode de Thornthwaite STK150			
		ETP	ETR	Stock	le	ETP	ETR	Stock	le
2014-04	0	212	-	-	-	86	-	-	-
2014-05	0	170	-	-	-	79	-	-	-
2014-06	0	166	-	-	-	111	-	-	-
2014-07	0	154	-	-	-	113	-	-	-
2014-08	37	149	37.0	-	-	106	37.0	-	-
2014-09	84	143	84.0	-	-	96	84.0	-	-
2014-10	2	165	2.0	-	-	114	2.0	-	-
2014-11	0	160	-	-	-	87	-	-	-
2014-12	0	142	-	-	-	65	-	-	-
2014	123	2025	123	-	-	1051	123	-	-
2015-01	0	157	-	-	-	55	-	-	-
2015-02	0	111	-	-	-	52	-	-	-
2015-03	0	184	-	-	-	77	-	-	-
2015-04	0	201	-	-	-	74	-	-	-
2015-05	0	163	-	-	-	95	-	-	-
2015-06	0	159	-	-	-	101	-	-	-
2015-07	16	149	16.0	-	-	109	16.0	-	-
2015-08	253	146	146.0	107.0	-	101	101.4	150.0	1.6
2015-09	193	139	138.6	150.0	11.4	99	98.9	150.0	94.1
2015-10	0	167	150.0	-	-	106	105.8	44.2	-
2015-11	0	169	-	-	-	103	44.2	-	-
2015-12	0	145	-	-	-	80	-	-	-
2015	462	1889	451	257	11	1050	366	344	96

Annexe 2 : Résultat du calcul de l'ETR du secteur Nord (Lompoul) avec un sol de CSE = 150mm

Date	Rain	Méthode de Turc STK150				Méthode de Thornthwaite STK150			
		ETP	ETR	Stock	le	ETP	ETR	Stock	le
-----	-----								
2010-01	0	154.7		-	-	59.3		-	-
2010-02	0	134.7	-	-	-	69.1	-	-	-
2010-03	0	128.9	-	-	-	102.3	-	-	-
2010-04	0	160.9	-	-	-	84.6	-	-	-
2010-05	0	163.0	-	-	-	95.6	-	-	-
2010-06	27	144.6	27.0	-	-	105.0	27.0	-	-
2010-07	51	146.7	51.0	-	-	109.4	51.0	-	-
2010-08	99	149.6	99.0	-	-	100.5	99.0	-	-
2010-09	197	143.2	143.2	53.8	-	84.4	84.4	112.6	-
2010-10	71	144.0	124.8	-	-	105.8	105.8	77.8	-
2010-11	0	143.6	-	-	-	91.3	77.8	-	-
2010-12	0	118.2	-	-	-	73.2	-	-	-
2010	445	1732	445	54	-	1081	445	190	-
2011-01	0	131.8	-	-	-	61		-	-
2011-02	0	148.2	-	-	-	59	-	-	-
2011-03	0	153.1	-	-	-	80	-	-	-
2011-04	0	158.1	-	-	-	96	-	-	-
2011-05	0	152.1	-	-	-	94	-	-	-
2011-06	1	148.1	1.0	-	-	106	1.0	-	-
2011-07	71	135.1	71.0	-	-	82	71.0	-	-
2011-08	214	149.7	149.7	64.3	-	110	109.7	104.3	-
2011-09	55	145.6	119.3	-	-	106	106.3	53.0	-
2011-10	9	138.2	9.0	-	-	113	62.0	-	-
2011-11	0	126.7	-	-	-	92	-	-	-
2011-12	0	145.6	-	-	-	65	-	-	-
2011	350	1732	350	64	-	1065	350	157	-
2012-01	0	162.7	-	-	-	64		-	-
2012-02	0	163.4	-	-	-	56	-	-	-
2012-03	14	168.9	14.0	-	-	84	14.0	-	-
2012-04	0	157.0	-	-	-	82	-	-	-
2012-05	0	160.6	-	-	-	120	-	-	-
2012-06	0	149.2	-	-	-	110	-	-	-
2012-07	47	148.1	47.0	-	-	107	47.0	-	-
2012-08	139	149.1	139.0	-	-	100	99.6	39.4	-
2012-09	163	145.4	145.4	17.6	-	97	97.2	105.3	-
2012-10	8	145.9	25.6	-	-	117	113.3	-	-
2012-11	0	121.4	-	-	-	89	-	-	-
2012-12	0	140.5	-	-	-	54	-	-	-
2012	371	1812	371	18	-	1079	371	145	-
2013-01	0	155.9	-	-	-	56		-	-
2013-02	0	157.6	-	-	-	73	-	-	-
2013-03	0	143.7	-	-	-	67	-	-	-

2013-04	0	157.2	-	-	-	82	-	-	-
2013-05	0	157.9	-	-	-	124	-	-	-
2013-06	1	148.4	1.0	-	-	102	1.0	-	-
2013-07	5	150.1	5.0	-	-	116	5.0	-	-
2013-08	146	149.8	146.0	-	-	102	102.3	43.7	-
2013-09	131	146.5	131.0	-	-	102	101.9	72.8	-
2013-10	18	145.3	18.0	-	-	115	90.8	-	-
2013-11	0	133.0	-	-	-	83	-	-	-
2013-12	10	126.0	10.0	-	-	60	10.0	-	-
2013	311	1771	311	-	-	1082	311	116	-
2014-01	0	139.7	-	-	-	55	-	-	-
2014-02	0	171.1	-	-	-	57	-	-	-
2014-03	0	152.5	-	-	-	69	-	-	-
2014-04	0	153.5	-	-	-	104	-	-	-
2014-05	0	154.9	-	-	-	90	-	-	-
2014-06	0	149.4	-	-	-	112	-	-	-
2014-07	2	150.2	2.0	-	-	123	2.0	-	-
2014-08	119	150.2	119.0	-	-	109	109.4	9.6	-
2014-09	57	145.9	57.0	-	-	105	66.6	-	-
2014-10	31	143.8	31.0	-	-	109	31.0	-	-
2014-11	0	128.9	-	-	-	80	-	-	-
2014-12	0	142.4	-	-	-	63	-	-	-
2014	209	1783	209	-	-	1075	209	10	-
2015-01	0	164.1	-	-	-	54	-	-	-
2015-02	0	146.0	-	-	-	54	-	-	-
2015-03	0	164.6	-	-	-	77	-	-	-
2015-04	0	153.1	-	-	-	94	-	-	-
2015-05	0	157.6	-	-	-	106	-	-	-
2015-06	0	148.7	-	-	-	104	-	-	-
2015-07	0	149.6	-	-	-	115	-	-	-
2015-08	210	150.8	150.8	59.2	-	111	111.3	98.7	-
2015-09	181	142.4	142.4	97.8	-	83	82.7	150.0	47.0
2015-10	20	144.1	117.8	-	-	109	108.5	61.5	-
2015-11	0	161.1	-	-	-	100	61.5	-	-
2015-12	0	153.5	-	-	-	72	-	-	-
2015	411	1836	411	157	-	1078	364	310	47

Annexe 3 : Identification des différents transects chimiques- décembre 2013

Nom	Aquif	Profil	pH	CE	Résidu sec	Na	K	Mg	Ca	HCO3	Cl	NO3	SO4
PROFIL 1													
Santhie Ndong	SL	P1	5.50	1160	915	6.10	0.77	1.97	2.23	0.20	6.45	1.98	2.79
Mboro	SL	P1	4.09	2740	2163	15.45	0.44	5.52	6.48	0.00	20.38	0.05	8.38
PROFIL 2													
Keulène	SL	P2	7.32	796	612	1.29	0.08	1.54	5.06	5.00	2.52	0.06	0.46
Tawa Mbaye	SL	P2	6.48	236	163	0.64	0.07	0.80	0.88	1.20	1.12	0.07	0.02
Sinthiou Sine ICS 62		P2	7.50	326	212	2.50	0.00	0.60	1.99	0.03	0.84	0.05	0.48
Fass Boye	SL	P2	5.85	202	145	1.07	0.09	0.40	0.32	0.80	1.12	0.01	0.11
PROFIL 3													
Thiathiour	SL	P3	6.90	502	376	1.09	0.13	0.96	2.88	3.20	1.69	0.09	0.13
Kébémér	SL	P3	6.93	537	387	1.22	0.12	0.88	2.96	3.00	2.36	0.01	0.14
Nguer Nguer		P3	7.94	185	119	0.70	0.08	0.28	0.60	0.50	0.87	0.07	0.30
Teureul	SL	P3	4.87	310	216	1.33	0.08	0.64	0.72	0.10	1.13	1.04	0.79
Lompoul	SL	P3	4.12	1080	850	4.80	0.30	2.59	2.81	0.00	3.09	2.60	5.00
Thioukougne	SL	P3	6.34	809	632	3.65	0.13	1.80	2.20	1.10	3.51	1.30	2.15
PROFIL 4													
Guéoul	SL	P4	7.14	578	439	3.40	0.10	0.95	1.13	3.60	2.26	0.02	0.05
Tébène	SL	P5	5.75	173		0.13	0.12	0.00	0.34	0.20	0.83	0.11	0.28
Bendiouga	SL	P4	6.08	447	335	2.23	0.13	0.80	0.88	0.70	2.25	0.20	1.18
PROFIL 5													
Massar Diop	SL	P5	5.76	410	298	2.09	0.13	0.48	1.20	0.80	2.58	0.24	0.47
Khomal Diao	SL	P5	5.32	175	120	0.81	0.05	0.31	0.41	0.20	1.09	0.10	0.33
Mouril	SL	P5	6.47	721	561	4.00	0.12	1.14	1.66	1.20	4.20	0.59	1.28
Keur koura	SL	P5	5.30	513	385	2.41	0.12	0.96	1.28	0.40	2.13	1.60	1.02

Annexe 4 : Récapitulatif des rapports hydrochimiques

Nom	Mg/Ca	Na/K	Ca+Mg	Na+K
Cayar Piézo	0.261	6.203	9.584	2.34
Mbidieum Lébou Pts	1.354	39.41	33.97	54.47
Ngadiaga Pts	0.673	14.15	2.896	3.663
Notto G. Diama Puits	1.911	19.77	2.798	2.05
Keulène	0.304	16.38	6.59	1.364
Santhie Ndong	0.882	7.918	4.195	6.872
Mboro	0.853	35.11	11.99	15.89
Tawa Mbaye	0.911	9.161	1.678	0.712
Thiathiour	0.334	8.456	3.834	1.221
Fass Boye	1.231	11.83	0.719	1.161
Kébémér	0.297	10.24	3.834	1.339
Teureul	0.89	16.69	1.358	1.412
Lompoul	0.923	16.26	5.394	5.093
Thioukougne	0.816	29.14	3.995	3.778
Beigne Penda	1.096	17.1	2.637	2.352
Guéoul	0.849	34	2.078	3.501
War Cissé	0.358	9.611	5.591	1.316
Bendiouga	0.911	17.11	1.678	2.362
Tébène	0.835	28.11	0.439	1.214
Diélerlou Sylla	0.359	11.94	4.234	1.539
Keur koura	0.751	19.77	2.237	2.534
Potou	0.809	16.59	23.17	19.47
Mouril	0.691	32.9	2.796	4.118
Massar Diop	0.397	16.52	1.677	2.218
Khomal Diao	0.77	14.79	0.719	0.864
Beity Dièye	0.638	17.12	1.838	2.827
Rao peul	0.092	18.44	4.791	5.222
Fass Ecole	0.835	22.65	1.099	5.009
Sinthiou Sine ICS 62	0.242	15.74	2.461	0.895
Nguer Nguer	0.468	8.605	0.879	0.779

Annexe 5 : Les indices de saturation des échantillons par rapport à la calcite, la dolomite, le gypse et l'anhydrite

Nom	IsCalcite	IsDolomite	IsGypse	IsAnhydrite	LogPCO2	H2CO3 éq.[mmol/L]
Cayar Piézo	0.37	-0.26	-1.03	-1.25	-1.78	0.56
Mbidieum Lébou Pts	1.17	2.07	-0.47	-0.69	-2.17	0.23
Ngadiaga Pts	-1.66	-3.9	-2.14	-2.37	-1.45	1.22
Notto G. Diama Puits	-3.07	-6.28	-2.92	-3.14	-1.28	1.78
Keulène	0.35	-0.24	-2.01	-2.23	-1.85	0.49
Santhie Ndong	-3.25	-6.97	-1.62	-1.85	-1.43	1.27
Tawa Mbaye	-1.78	-4.01	-3.94	-4.16	-1.61	0.84
Thiathiour	-0.47	-1.83	-2.75	-2.97	-1.61	0.84
Fass Boye	-3	-6.33	-3.63	-3.85	-1.15	2.42
Kébémér	-0.46	-1.86	-2.7	-2.92	-1.67	0.73
Teureul	-4.57	-9.6	-2.49	-2.71	-1.08	2.85
Thioukougne	-1.65	-3.8	-1.7	-1.92	-1.52	1.02
Beigne Penda	-4.33	-9.04	-2.06	-2.28	-1.12	2.61
Guéoul	-0.58	-1.65	-3.56	-3.79	-1.80	0.54
War Cissé	-0.05	-0.97	-2.69	-2.91	-1.71	0.67
Bendiouga	-2.45	-5.35	-2.27	-2.49	-1.45	1.22
Tébène	-3.82	-8.15	-3.37	-3.59	-1.65	0.76
Diélerlou Sylla	-0.59	-2.04	-2.53	-2.75	-1.56	0.95
Keur koura	-3.32	-7.18	-2.19	-2.41	-0.91	4.17
Potou	-0.57	-1.64	-0.66	-0.88	-1.75	0.61
Mouril	-1.59	-3.75	-2.02	-2.24	-1.61	0.83
Massar Diop	-2.57	-5.95	-2.52	-2.74	-1.07	2.91
Khomal Diao	-4.03	-8.59	-3.06	-3.28	-1.22	2.05
Beity Dièye	-2.6	-5.81	-2.73	-2.95	-1.33	1.61
Rao peul	-0.73	-2.92	-1.71	-1.93	-1.78	0.57
Fass Ecole	-3.22	-6.93	-2.78	-3	-1.60	0.86
Sinthiou Sine ICS 62	-0.10	-1.24	-4.07	-4.3	-2.31	0.17
Nguer Nguer	-0.84	-2.44	-2.94	-3.16	-3.44	0.01

Annexe 6 : Coordonnées mensuelles de la position du front de taille durant la période de validation du modèle

Dates	Position du front d'exploitation			
	Bâbord		Tribord	
	X- UTM	Y- UTM	X- UTM	Y- UTM
1/05/14	307720	1691641	307885	1691553
1/06/14	307740	1691671	307886	1691609
1/07/14	307815	1691940	308026	1691831
1/08/14	307824	1691954	308035	1691845
1/09/14	307983	1692268	308199	1692143
1/11/14	308161	1692581	308377	1692460
1/12/14	308363	1692898	308605	1692762
1/02/15	308402	1693157	308668	1693125
1/03/15	308601	1693590	308819	1693468
1/04/15	308773	1693892	309002	1693753
1/05/15	308948	1694178	309169	1694074
1/06/15	309243	1694562	309431	1694409
13/07/15	309463	1694860	309654	1694699

Annexe 7 : Publication scientifique : **Recycling Tailings Seepage Water for Diogo Heavy Minerals Mine Sustainability (Northern Senegal)**



Journal of Water Resource and Protection, 2018, 10, 121-144

<http://www.scirp.org/journal/jwarp>

ISSN Online: 1945-3108

ISSN Print: 1945-3094

Recycling Tailings Seepage Water for Diogo Heavy Minerals Mine Sustainability (Northern Senegal)

Mouhamat Seck^{1,2}, Serigne Faye¹, Mark Robertson³, Michael Rose²

¹Department of Geology, University Cheikh Anta Diop, Dakar, Senegal

²Grande Cote Operations (GCO), Dakar, Senegal

³GEO-ENG, Queensland, Australia

Email: mouhamat.seck@gcosenegal.com, mouhamatseck@gmail.com

How to cite this paper: Seck, M., Faye, S., Robertson, M. and Rose, M. (2018) Recycling Tailings Seepage Water for Diogo Heavy Minerals Mine Sustainability (Northern Senegal). *Journal of Water Resource and Protection*, 10, 121-144.

<https://doi.org/10.4236/jwarp.2018.101008>

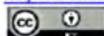
Received: November 30, 2017

Accepted: January 28, 2018

Published: January 31, 2018

Copyright © 2018 by authors and Scientific Research Publishing Inc. This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

The sandy Quaternary and the deep Maastrichtian aquifers located in the northern coastal zone of Senegal, from the locality of Kayar in the south to Saint-Louis in the north, constitute the main sources of water supply for urban and local needs as well as mining activities. The Quaternary aquifer that provides the water required for the irrigation of local farmlands, hosts a significant heavy mineral sands deposit currently being mined by the Grande Cote Operations (GCO). As a result of variable rainfall and increased water abstraction, this shallow aquifer has recorded a continuous water level decline since 1970, with potential negative effects on both the social and economic development of the region. The mining of heavy minerals (zircon, ilmenite, leucosene and rutile) at GCO is realised through conventional dredging techniques that require large volumes of water (up to 60,000 m³/d). The water pumped by the dredge to enable the extraction of the heavy minerals, infiltrates into the shallow aquifer, runs-off into the dredge pond or evaporates. The objective of this study is to evaluate a water balance that enables the provision of a permanent water supply to the dredge pond, whilst minimising the risk of flooding of the cropping depressions adjacent to the mine site or drying out of the farming wells. The hydrodynamic model implemented for this purpose was calibrated and tested during the first year of operation. The Root Mean Squared Error (RMSE) obtained for the calibration is approximately 0.52 m. The predictions indicate a requirement for the system to recover part of the tailings infiltration through dewatering boreholes. The quantity of recycled water is estimated at 16,000 m³/d on average. The model simulations show an additional water requirement, extracted from the deep Maastrichtian aquifer, varying between 23,000 and 28,000 m³/d to achieve the optimum pond water level.

Keywords

Mineral Sands, Groundwater Modelling, Dredge Pond, Grande Cote Operations, Fe Flow

1. Introduction

Water is a key factor for most mining operations as it may be utilised in both mineral treatment processes and mining operations. With respect to heavy mineral sand mining by dredging techniques, which is of concern in this present study, groundwater resource management is a key factor for success to meet planned production rates.

The Grande Cote Operations operates in a heavy mineral sand deposit along the Senegal Northern coastal sand dunes and extracts approximately 140,000 tons of sands/day through conventional dredging techniques. The process requires permanent pumping from the dredge pond of an average 85,000 m³/d of water to transport the ore and tailings. This mining system (dredge pond and tailings) is moving through the Quaternary sand aquifer which hosts a valuable water resource for human consumption, mining and industrial needs as well as for agriculture. Towards the eastern side, the sandy aquifer extends through the Eocene limestone aquifer which provides around 115,000 m³/d of water to the National Water Supply Company (SDE) for Dakar city water consumption [1].

Water management at this mine is a real challenge in that the dredge pond must be kept at a constant level for the optimal exploitation of the deposit. This requirement presents two major risks, namely a technical risk of a lower pond water level that prevents mining progress and an environmental risk of flooding/drying out of the Niayes (interdunal depressions locally named Niayes) system which provides 60% of domestic vegetable and 80% of the horticultural export trade of Senegal [2]. These risks may lead to the closure of the mine.

Prior to mining operation commencing, a detailed hydrogeological study has been carried out in order to evaluate the system dynamic with regard to mining operations and water balance. As part of this investigation, groundwater modelling using FEFLOW code was built to achieve an operational and efficient water management system that would not restrict mining progress. Specific objectives are to:

- 1) Evaluate the daily volumes of water to be injected into the dredge pond to maintain optimum water levels; and,
- 2) Predict the hydraulic head variations in the upper aquifer to prevent flooding in the Niayes zone and hence affecting crops production.

2. Study Area Description

2.1. Geography

The study area commonly known as the Northern littoral system is located in

the north-western part of the Senegal Sedimentary Basin. It extends between parallels 15°N and 16°N, over 100 km in length and 30 to 35 km in width, representing a surface area of approximately 3000 km² [3]. It is bounded to the west by the Atlantic Ocean, to the east by the Thiès-Saint-Louis national road, to the north by the Senegal River delta and to the south by the Thiès plateau (Figure 1). The heavy mineral sands exploited by GCO extend from Mboro, Fass Boye, Diogo to Lompoul.

Agriculture for market gardens remains the main economic activity in the study area. It represents one-third of the area under exploitation with 30% of domestic production and mobilizes 65% of the active population [4]. Water needs for this practice are pumped through wells from the shallow aquifer which depths vary between 1 and 10 m.

In addition to agricultural activities, two major mining companies operate in this region:

- Industries Chimiques du Senegal (ICS), created in 1957 which mines the Eocene phosphate deposit and produces phosphoric acid.
- Grande Cote Operations (GCO) which mines the heavy mineral sands deposit along the dune system.

2.2. Climate

Climatic parameters play a fundamental role both in terms of recharge rate and evaporation losses, in relation to the groundwater. The climate of this Sahelsemi-arid region, is variable and records some changes. The climate change and variability is characterized by extreme events like highly variable rainfall, floods, droughts and sharp temperature changes. In the Northern Littoral zone of Senegal, a decrease in rainfall over the last four decades, from 1970 to 2010,



Figure 1. Map of the study area, Northern coast of Senegal.

presents a decrease in the number of rainfall events. Across the country, recent studies on several aquifers (Senegal River Delta System, North Coast Littoral, Saloum Delta and the Casamance Delta) reveal high sensitivities to climate variability and climate change [5].

Rainfall Evolution

In the Northern Littoral zone, rainfall events generally occur between June and October (Figure 2). Rainfall quantity varies from 200 to 500 mm from north to south, respectively. Mean rainfall values vary from 285 mm at Saint Louis, 318 mm at Louga and 553 mm at Thiès (Table 1). Maximum monthly rainfall occurs mainly in August or September when the intertropical front (F.I.T) reaches its extreme northern position [6].

Annual rainfall is highly variable (Table 1) as evidenced by the variation interval (I.V. = 1124.4 mm for Thiès and 723.15 mm for the regional average) and the inter-annual coefficient of variation which has a minimum value of 0.3. The weighted moving average better reflects the behaviour of the rainfall regime which is characterised by a slight increase prior to 1969-1970 followed by a decrease until 1989-1990 then a slight recovery to the mean rainfall. This is characteristic of the Sahel zones where rainfall is variable from year to year.

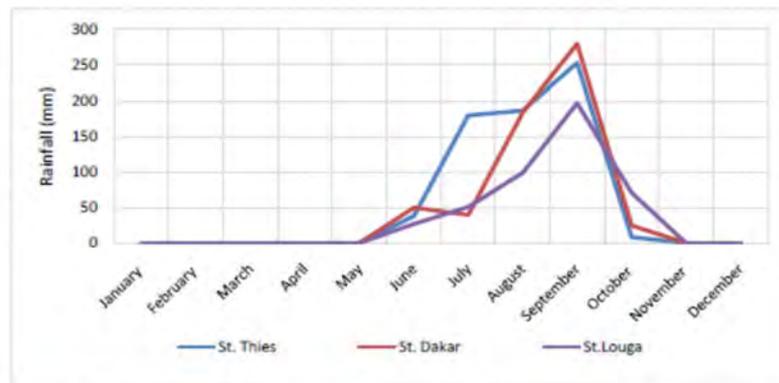


Figure 2. Monthly rainfall. Dakar, Thiès and Louga (2010).

Table 1. Statistical characteristics of annual rainfall data (1961-2011).

Stations	Louga	St-Louis	Thiès	Dakar	Regional
Average (mm)	318.26	285.24	553.88	439.78	399.29
Median (mm)	310.30	283.20	537.10	415.10	386.43
Min (mm)	149.60	59.10	100.10	116.70	106.38
Max (mm)	599.00	593.60	1224.50	901.00	829.53
Deviation	106.97	112.20	204.85	184.94	152.24
Coef. of variation (%)	33.61	39.34	36.98	42.05	38.00
Coef. of asymmetry	0.30	0.49	0.55	0.61	0.49
Interv. Variation (mm)	449.40	534.50	1124.40	784.30	723.15

The weighted moving average reflects better the behaviour of rainfall. The 5-year moving average curve shows a slight upward trend in above-average rainfall up to the years 1969-1970. Beyond this, it was decreasing until 2010 before recovering a slight increase while remaining close to the mean rainfall (Figure 3). The evolution of the chronic annual rainfall at these different hydrologic stations highlights the rainfall deficit that has occurred since 1972-1973.

2.3. Other Climatic Factors

2.3.1. Temperature

The average monthly temperatures recorded between 1980 and 2011 are below

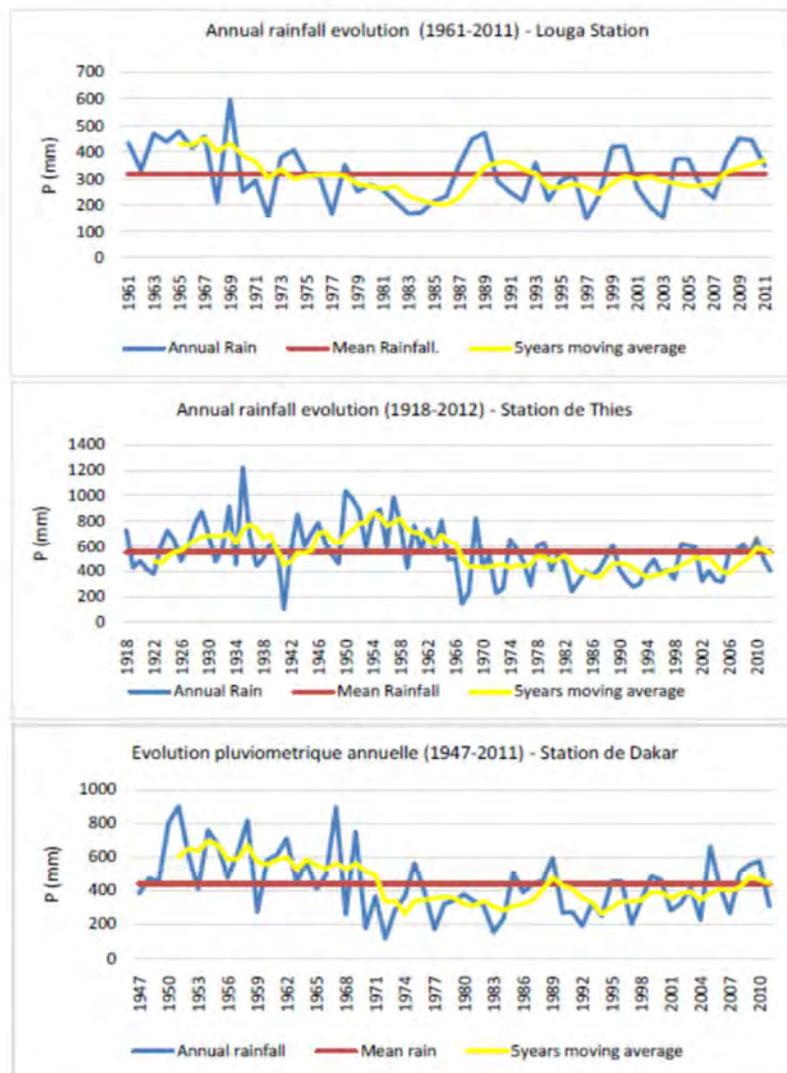


Figure 3. Annual rainfall evolution of different hydrological stations.

30°C with the exception of Louga station which peaked at 30.3°C in October. Monthly patterns evidenced:

- The highest monthly average temperature is between 29°C and 30°C occurring during the rainy season;
- The lowest monthly average temperature occurs during the dry season (November to May) with values ranging between 21.2°C and 28.8°C.

The warmest periods generally correspond to the end of the dry season and the beginning of the rainy season with a peak occurring during October. Spatial distribution pattern shows an increase from west to east and from south to north. The amplitudes between minimum and maximum temperatures range from 5.81 °C in January and 6.74 °C in October.

2.3.2. Winds

During the dry season, the region is influenced by dry and cool NNW-SSE-continental winds (continental Alize or Harmattan); while in the rainy season (from July to October), the influence of the humid monsoon dominates.

The monthly average wind speeds measured at 2 m from the ground over the period 1981-2011 do not exceed 5.5 m/s. Wind patterns are intense in coastal zone such as Dakar and Saint Louis comparing to the inland zone (Thiès and Louga) with maximum value during April and minimum value in October.

2.3.3. Relative Humidity

The data collected at the different stations between 1981 and 2011 shows the following characteristics:

- Maximum values (88% to 95%) are recorded in September and minimum values (19% to 42%) in January and February;
- The monthly relative air humidity varies from 40% in January to 83% in September.

2.3.4. Insolation

Data collected from Dakar, Thiès, Louga and Saint Louis stations for the period 1981-2011 show an average 8 hours of sunshine per day. Maximum values occur in April and minimum value in September and to a lesser extent in December.

2.4. Geomorphology and Hydrography

The Geomorphology of the Dunes and Niayes Systems

The dune system in the region comprises

- The intermediate Ogolian (corresponding to Upper Pleistocene) dune system covering an area ranging from the coastline to the interior of the land. These are dunes of the "Ogolianera", set up during the last glacial period [7].
- The outer dune system is characterized by a micro-relief which flattens towards the Senegal River mouth. It comprises three adjacent dune systems:
 - Recent dunes of few to 100 m width are formed by the coastal drift.
 - The semi-fixed yellow dunes which extent up to 3 km width are narrower in the South at Mbawane and Mboro [8]. These dunes bear the heavy minerals

(ilmenite, zircon, rutile and leucoxene) deposit;

- The orange dunes derived from the reworked yellow dunes are located near the Niayes and the red dunes also contain heavy minerals.

The Niayes are interdunal depressions characterized by the presence of permanent surface water bodies corresponding to the shallow groundwater outcrop and the ancient hydrographical network [9] (Figure 4).

2.5. Geology and Hydrogeological System

The northern littoral system belongs to the western part of the Senegalo-mauritanian sedimentary which extends about 1400 km from Mauritania in the north to Guinea Bissau in the south. In the study area, the lithology is fairly well known from the Cretaceous to the Quaternary. The followings formations lay out from bottom to top: The Maastrichtian: composed mainly of sand, sandstone with calcareous and clayey layers. Along the northern littoral the top is located between 250 to 400 m depth. The aquifer contained in this formation is confined.

- The Palaeocene: very often separated from the Eocene by a thin layer of impervious clay is mainly composed by marl.
- The Eocene: represented by limestone and marly limestone formation is at depth between 150 and 200 m.
- The Quaternary: the thickness is varying between 10 and 110 m; at the Diogo deposit, the bottom is at around 50 to 60 m. This formation consists of surface sand and deep clayey sand.

With regard to the objective of the study, we focus mainly on the Maastrichtian and Quaternary.

2.5.1. Maastrichtian Aquifer

In the study area, the top aquifer is approximately 420 to 460 m deep and the bottom is 800 m below sea level (mbsl). The new boreholes drilled by GCO are screened at variable depths between 430 to 530 m with static water levels

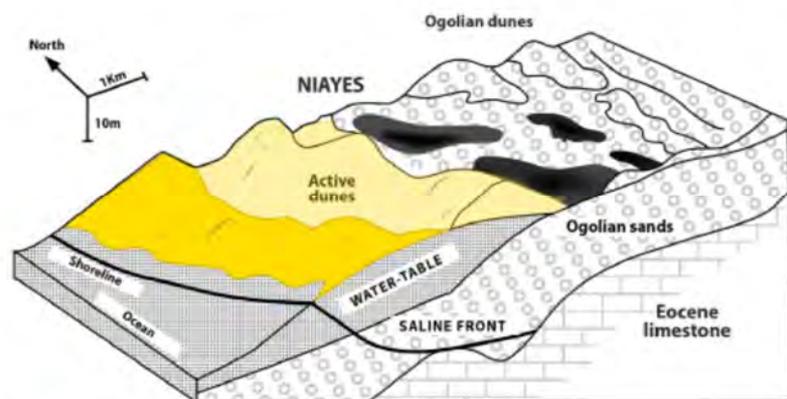


Figure 4. Schematic section of the Niayes areas modified [8].

between 20 to 36 m below ground level (mbgl). Transmissivity values range between 10^{-3} to 10^{-2} m²/s and bore yield varies from 1 to 3 m³/h/m with a pumping yield reaching more than 200 m³/h and drawdown between 70 and 120 m.

2.5.2. Quaternary Aquifer

The quaternary sediments, which consist of the two sand dune ridges, are made up of various sand textures with variable clay and silt contents with frequent occurrences of ferruginous layers and peat in the Niayes [10]. The quartz minerals are dominant; they are associated with various clays such as kaolinite, illite, montmorillonite and smectite, montmorillonite and smectite [11]. Towards the East, the karstic lutetian formation is approximately 100 m thick and is in contact with the quaternary sandstone formation through a fault (Figure 5).

At the Diogo deposit, GCO has drilled, 75 shallow boreholes which reveal the following layers:

- Fine to medium yellow sand with an average thickness of 3 m in the Niayes and up to 12 m in the dune areas;
- Fine to medium whitish sand, with peat of an average thickness of 15 m;
- Medium to coarse grey quartz sand with thickness varying between 5m and 10m;
- Clayey sand to brown sandy clay of maximum 5 m thickness;
- Clayey marl or marly clay between 40 m and 47 m deep; this is considered to be the bottom of the Quaternary sands aquifer in the Diogo mining area. It is reached.

2.5.3. Hydrodynamic Functioning of the Quaternary Aquifer

Groundwater flow in the superficial aquifer is mainly controlled by a piezometric mound located parallel to the coastal line and plunging to the north-east. Flow pattern from this mound (at + 25 m) occurs in all directions with hydraulic gradient varying between 1.7% and to 3% (Figure 6). The groundwater level of the Quaternary sand aquifer has declined since 1970s [10] due to decreasing rainfall observed in the Sahel zone and continued pumping for domestic water supply. From previous studies, the water mound located at Taïba Ndiaye was at 35 masl in 1965. Compared to the current level of 25 masl, the aquifer has dropped approximately 10 meters. From 1987 to present, the water level has decreased by 2.5 m at Taïba and Tawa Fall (Figure 7).

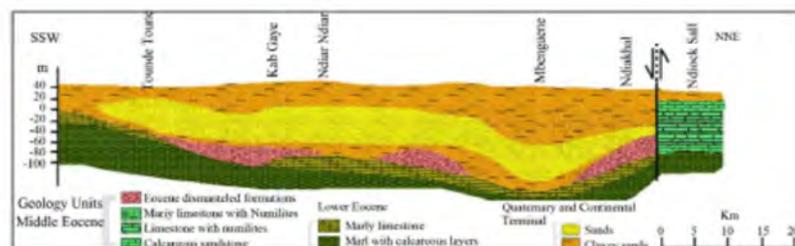


Figure 5. Geological section of the Quaternary Littoral North aquifer [9] in [10].

Monthly data recorded from September 2011 to July 2016 at 120 GCO piezo-meters exhibit seasonal fluctuations reflecting rainfall infiltration reaching the water table during November (Figure 8). Higher variations observed at all monitoring wells in 2012 correspond to the high rainfall of 630 mm of that year and minimum variations in 2014 reflecting lower rainfall event at Diogo during this year which is at 115 mm. However, variation patterns (max 1.8 m) exhibited at piezometers close to the mining pit imprint both tailing seepage outflow and pumping effects of the containment boreholes.

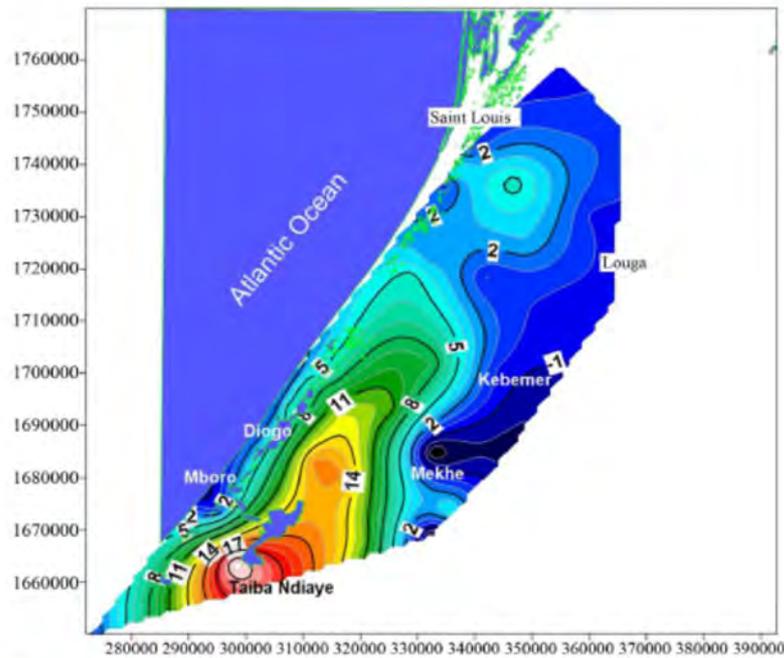


Figure 6. Contour map of the shallow aquifer in the north coast of Senegal (November 2014).

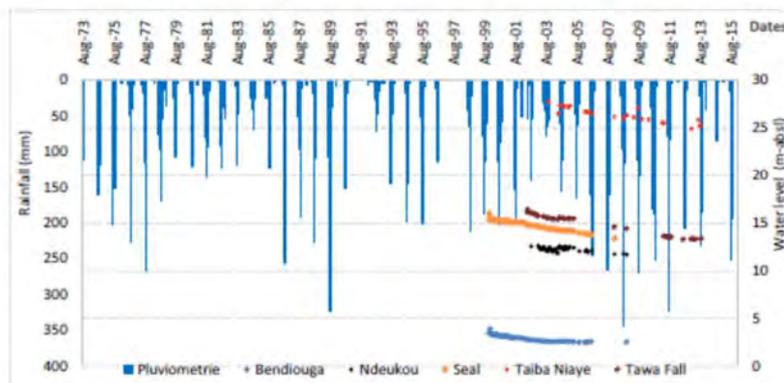


Figure 7. Piezometric level versus rainfall of the study zone between 1975 and 2015.

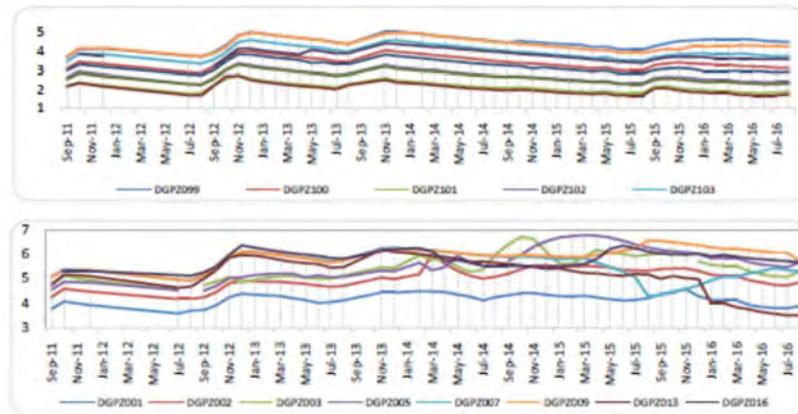


Figure 8. Piezometric variation of the Quaternary aquifer in the Diogo mining area (a North), b (South-vicinity of the dredge pond).

2.6. GCO Miningoperation

Grande Cote Operations (GCO) which is the world's third largest zircon mine with 7% of world production started mining operations in this region in May 2014 between Diogo and Lompoul. The heavy mineral sands deposit mainly composed of zircon, ilmenite, leucoxene and rutile is estimated at 800 million tonnes of 1.7% heavy minerals. Mean proportions of the heavy mineral are as followed [12]:

- 85% ilmenite;
- 12% zircon;
- 1.6% leucoxene;
- 0.9% rutile.

The GCO initial mine plan is set at 55 million tons of mineralized sand per year with an average extraction rate of 7000 t/h by dredging. This mining technique consists of dredging a continuous channel, called dredge path through the dunal orebody with the dredge and the wet concentrator plant (WCP) floated on the water table. While the dredge removes the material at the front of the mine path, the tailings generated by the mineral separation process in the WCP are stacked at the back by the boom stacker and tailings lines. The tailings represent 98% of the material mined. The suction cutter dredge and the WCP progress about 15 to 30 meters per day depending on the height of the dune and the dredge pond dimensions which range between 500 m to 550 m long and between 200 m to 220 m wide (Figure 9).

The dredge operates continuously (24 hr/day × 7 days/week) and extracts the ore with a rotating cutter feeding a suction pump. The head cutter excavates, at an average depth of 6 meters below the pond water level. The dredge pumps the slurry to the WCP, where the mineral is separated by gravity and magnetic methods. The sand tailings are pumped and deposited directly behind the WCP where the rehabilitation of the mined area proceeds. Approximately 25% to 40%



Figure 9. Aerial view of GCO dredging channel and Niayes.

of the tailings are deposited 120 m from the back of the pond by the boom stacker as the WCP advances. The remainder of the tailings, approximately 60% to 75% is discharged through the tailings lines at an average distance of 1 km behind the dredge pond.

The WCP separates the heavy mineral from the sand and pumps it to a stock pile where it is transported to the mineral separation plant (MSP) for processing into finished goods.

In order to optimize the mining rate of 7000 tph feed sand, a large quantity of water is required for ore transport in the feed line and the concentration process. The feed sand is pumped at 25% solids and the tailings are rejected at 65% solids. Water in the tailings infiltrates to the upper aquifer, evaporates, runs back to the dredge pond or seeps into the Niayes system. Prior to mining operations in 2014, the initial water level in the pond of about 6masl was raised by 1 to 2 m for optimal mining. This caused a disturbance of the flow regime of the shallow aquifer where flow increases seaward and also towards the Niayes depressions. The total makeup water is approximately 2000 m³/h pumped from deep Maastrichtian boreholes for a mining rate of 7000 tph feed sand while Millennium Inorganic Chemicals mine, located in the Paraíba State of Brazil, determines 1100 m³/h makeup water required to maintain the dredge pond level against a throughput of 1650 tph [13].

As a consequence, a long-term availability of freshwater supplies to adequately address requirements over GCO mine life of 25 years is problematic in various aspects:

- 1) An excessive and irreversible drawdown of the Maastrichtian aquifer; and,
- 2) Competing water demands from the populations and ICS (pumping around 600 to 800 m³/h).

Then, to reduce considerably the pumping from the deep aquifer, the superficial aquifer is pumped for a maximum recovery of the tailings infiltration.

2.7. Other Mineral Sand Mining Operations

The majority of the mineral sand operations are using dredging method. Some of them like Millennium Minerals in the Paraíba State of Brazil are applying both methods. The dry mining technique (Excavator and trucks) is chosen for the superficial ore bodies or very high grade areas and dredging for the low grade areas. In 2002, the dredging operations had an initial throughput of 1500 t/hr. The dredge ponds were often at only a few hundred meters from the sea and were losing lots of the water pumped into the lake. To maintain the pond at natural water level, Millennium Inorganic Chemicals makeup water was 1100 m³/h [13]. To supply this volume, a pump station was generated near a close by river. The difference with GCO process is the source of makeup water. GCO makeup water is extracted from the deep Maastrichtian aquifer while Millennium is pumping from a river.

In Australia, at the mineral sand mine on north Stradbroke, CRL Company operation is based on dredging method. The pond water management includes bores and spears which are installed alongside the mine path. This, allow CRL to prevent negative impacts such as flooding of low lying areas. The dredge pond water is maintained where necessary by pumping water from fresh water swamps on the island [14]. This system of water recovery is similar with GCO expect the fact that GCO doesn't have spears. At the beginning of the mine operation, the spears option was not approved due to some physical constraints and their inefficiency in GCO context with the dredge advancing quickly about 15 to 20 m/day.

At Ginkgo and Snapper Mines, Cristal Mining operates two mineral sands mines in the Murray Basin. The mines are located approximately 40 km west of the township of Pooncarie in western New South Wales, in Australia. The dredge pond is advancing through a saline groundwater aquifer. The process includes water dams and bores given the pond water level could be raised or lowered when needed. When the dredge pond level would be raised by 14.5 m, during the first year of mining operation, the maximum borefield water demand was around 1180 m³/h [15]. In the northern part of the deposit which is planned to be mined between Year-14 and 16, the water level would be lowered by 10 m. For that, water would be extracted directly from the dredge pond and also by the northern borefield. The extracted water would be pumped to the water disposal dam and allowed to seep through backfilled sand residues to groundwater. The pond level rising process applied by Cristal Mining using bores is currently the same applied at GCO. For the moment, GCO doesn't need lowering the pond water level. It could be the case in the future around 2040 when the south of the release would be mined. Cristal lowering process could be an option for GCO when needed.

3. Modelling Method

The basic flow equation in a porous medium is as follows [16]:

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

With:

- K_{xx}, K_{yy}, K_{zz} : Hydraulic Conductivities along x, y and z directions;
- h : hydraulic head;
- S_s : Specific Storativity;
- t : Time;
- W : Vertical flow per unit volume.

The geometry and boundary conditions are generally complex. Analytical methods are rarely applicable for determining a closed form solution of the partial differential equation [17]. The diffusivity equation was solved using a finite element approximation technique. The first step for the application of this method was the discretisation of the modelled area into small grid form using Feflow 7.0 modelling code [18]. This code is widely used in the mining industry and particularly in mineral sand dredging operations. It is able to manage and process a large amount of data and to produce a high level of accuracy requested by the mine.

For mass balance calculations, in addition to this general equation of diffusivity, the following parameters described below are requested [19]:

- Mass flow rate of water (in t/h or m³/h): $Q_w = \left(\frac{M \times 100}{C_w} \right) - M$
- Pulp volume flow (in m³/h): $Q = \frac{M}{S} + M \left(\frac{M - C_w}{C_w \times S_L} \right)$
- Pulp density (in t/m³): $S_M = \frac{S \times S_L}{S - \left(C_w \times \frac{S}{100} \right) + \left(C_w \times \frac{S_L}{100} \right)}$
- Solid volume percentage (%) of the pulp: $C_v = 100 \times \frac{S_M - S_L}{S - S_L}$

With,

- M (tph), Mass flow of dry matter to be pumped
- C_w (%), Percent solid pulp by weight
- S (T/m³), Solid density
- S_L (T/m³), Liquid density

From the tests carried out in the mineralogical laboratory, the solid density equals to 2.65.

4. Conceptual Model

The modelled domain extends along the coastal line for a length of 55.5 km and an average width of 15 km. The surface area is 848 km².

The **Figure 10** presents a 2D conceptual model focused on the dredge channel and tailings where flow patterns are synthesized.

In this model, we consider mainly the quaternary shallow aquifer since no natural flow exchange with the deep Maastrichtian aquifer occurs.

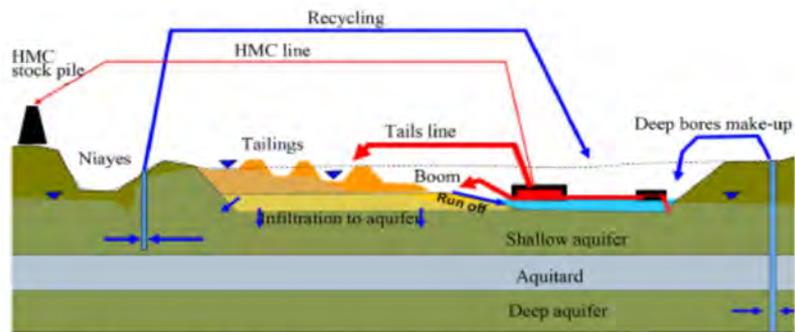


Figure 10. Schematic of the conceptual operating model of GCO mine [20], modified.

The model is limited to the upper aquifer which average thickness is 40 m in the orebody and 60 m in the continental zone. The most important flux exchanges take place between the system dredge pond/tailings and the aquifer. Inputs to the aquifer are infiltration, inflow through the edge pond, outflow to the edge pond, recycling pumping, irrigation and pumping from the deep aquifer.

The boundary conditions are defined as followed:

- A Dirichlet (constant water level) boundary condition (h zero) to the western ocean limit,
- A groundwater mound crest line to the East set as variable head boundary condition (Dirichlet type) from +25 m in the south at Taiba Ndiayeto +5 m at Bendiouga (north).
- A no flow boundary is the south representing the piezometric mound from west to east of Tivaouane and a 2nd no flow Boundary applied to the impervious bottom aquifer varying between 5 to 10 m.
- A no-flow boundary in the northern limit is applied using groundwater flow pattern parallel to this limit.
- The dredge pond and tailings are set as Cauchy type as it is functioning like a river. The dredge pond with the tailings storage is about 1.5 km long. The deposits of slimes (peat or clay) at the bottom of the pond constitute a layer with very low hydraulic conductivity. This semi-permeable layer then allows vertical flow exchange which will regulate the water flows between the pond and the aquifer. The flows exchanges depend also on the water level in the dredge pond and in the tails.

Input Data

Initial head conditions are set to be the water level recorded in Dec 2012 and to better take into account the anisotropy of the system, the one-layer aquifer was subdivided vertically into 3 sub-layers and 4 slices representing:

- the piezometric surface for slice 1;
- The sea level for slice 2;
- The top of shallow bore screens for slice 3;

- The bottom aquifer for slice 4.

In addition to the 3 layers set, the domain is divided in two zones located west and east. This spatial difference is set to account for differences between the Aeolian sand (ore) and the continental sand. Following several calibration trials manually and automatic using FePEST, the following hydraulic conductivities and effective porosity represent calibrated values (Table 2).

This variability in K values is derived from characteristics between the orebody sand at the west and the continental sand at the East while differences in Kz values reflect clayey peat and clay interlined contents occurrence in the different layers.

Other input are the pumping rates data of the 48 recycling bores (“Containment bores”) located along the active mine path (Figure 11) with average pumping flow of 30 L/s (Table 3) and the 22 shallow boreholes for local population water supply.

5. Results and Discussions

5.1. The Water Model Calibration in Transient State

Given the continuous decrease of the sand quaternary aquifer since 1970s [10] [21], the farmlands irrigation and the new stresses from GCO mining operations, the transient model simulation is required. Obviously, transient models are more important tool than models simulated under steady state conditions for groundwater management that leads sustainable utilisation of the resource [22]. The calibration period runs from 2007 to November 2014 and difference between simulated and measured head values shows a fair match (Figure 12) with the exception of 12 control points which exhibit above ± 1 m confidence interval.

Computed Mean error (\bar{R}), mean absolute error ($|\bar{R}|$), Standard Error of

Table 2. Tables of hydrodynamic parameters.

Parameters	Layer 1		Layer 2		Layer 3	
	West	East	West	East	West	East
Kx (m/d)	1.00	1.00	17.00	13.80	20.00	1.00
Ky (m/d)	1.00	5.53	16.69	12.00	20.00	1.33
Kz (m/d)	0.14	11.72	0.36	3.00	0.05	1.58
SY	0.28	0.28				

Table 3. Summary of the 48 eastern containment bores infrastructures performance.

ID Forage	SWL	Aquifer bottom	Thickness	Flow	Dynamic level	Draw down	Specific flow
	m. IGN	m. IGN	(m)	m ³ /h	m. IGN	(m)	m ³ /h/m
Min	+5.01	-44.50	24.70	39.60	-23.47	4.15	1.99
Moy	+5.87	-30.66	36.53	113.50	-11.26	17.13	7.56
max	+7.29	-17.61	50.39	165.60	+1.85	29.56	21.80



Figure 11. Localization map of the containment bores.

Estimate (SEE), Root Mean Squared Error (RMSE) and NRMSE with values of less than 1 m together with the square of the Pearson correlation coefficient of 0.88 indicate a relatively fair match (Table 4 and Figure 13).

The computed Water budget for April 2014 (Table 5) evidenced the following features:

- Inflow from the east boundary is 7,036 m³/d;
- Outflow to the sea is 4 times higher;
- An evapotranspiration loss of 45,261 m³/d;
- Low pumping from Community need of 5,988 m³/d;
- Aquifer storage of 72,534 m³/d.

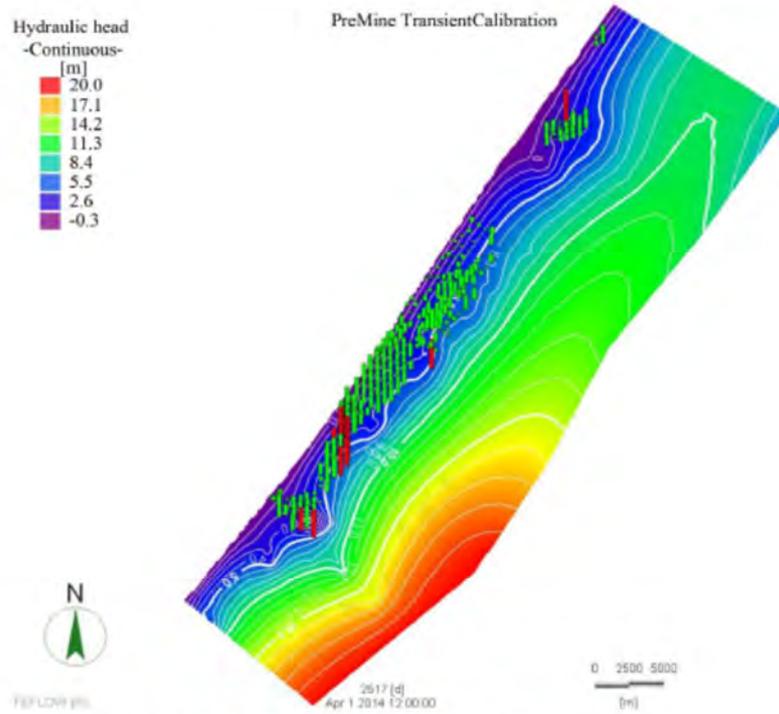


Figure 12. Analysis of the calibrated piezometric levels by transient model.

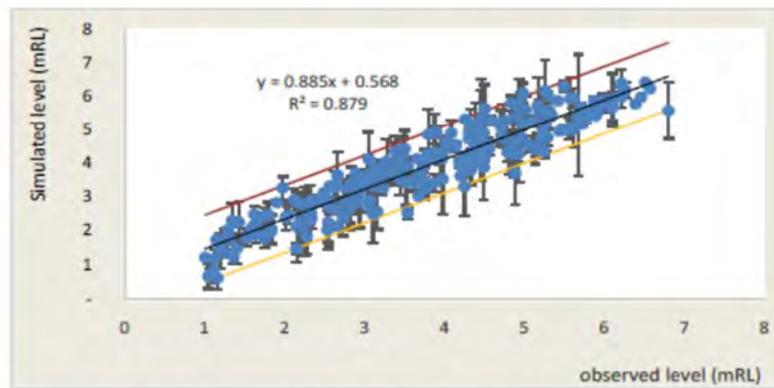


Figure 13. Correlation of measured and calculated values.

Table 4. Analysis of the differences in the calibration results of the model.

Errors	Symbol	Values
Mean error (m)	\bar{R}	0.14
Mean absolute error (m)	$ \bar{R} $	0.44
Standard error of estimate (m)	SEE	0.50
Root mean square error (m)	RMSE	0.52

Table 5. Water balance in transient state.

TERMS	FLOWS (m ³ /d)
IN FLOW	
Dirichlet BCs	7,036
Storage release	72,534
Total Inflows	79,570
OUT FLOW	
Dirichlet BCs	29,107
Wells (Community)	5,988
Evapotranspiration	45,261
Storage capture	88
Total Outflows	80,444

5.2. Water Model Update and Validation

The initial water model calibrated based on the pre-mine condition was reviewed taking account the 1 Year operational data from May 2014 to July 2015. The data include the dredge pond water level variation, the daily production and the containment bores pumping.

5.2.1. The Dredge Pond, the on-Path Tails and the Production Records

During the two first mining paths, the dredge pond was maintained at the static water table. Inflows are assumed to balance outflows. For the following years, when the pond level has been raised from + 2 to +4 m, other losses occur across the pond edges. During the process, a slime layer of 7.5 cm at the bottom of the dredge was set as semi impervious layer due to the fact that fine grains discharge directly into the dredge pond through overflow. In addition, the groundwater mound inferred by the pond is also taken into account as well as make-up water from the deep aquifer to achieve the required water level.

The pond level and the feed sand extracted are monitored on a daily basis (Figure 14). An optimal range of pond water level variation was set along the mine path with lower limit and upper limit. These levels depend on the piezometric data, the height of the dunes and the depth of the high mineral concentration.

The data were implemented in the model as well as the makeup water from the recycling bores and Maastrichtian boreholes. Figure 15 shows the impact of the recycling bores pumping on the aquifer water level in the surrounding area.

The containment bores pumping records in the vicinity of the mine path have been integrated into the water model.

5.2.2. Water Model Validation in Diogo Area

The model has generated the piezometry below that was used in the validation test (Figure 16):

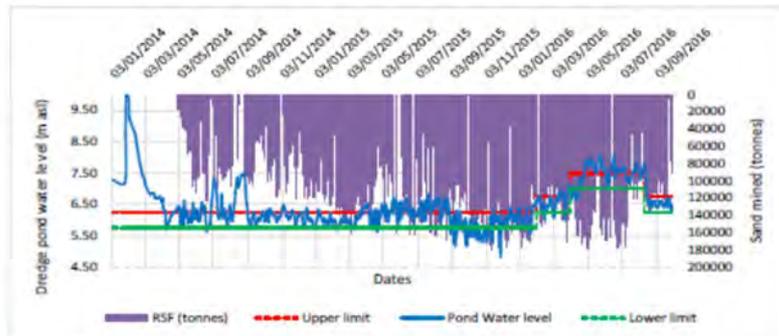


Figure 14. Variation of the pond water level versus the daily feed sand produced.

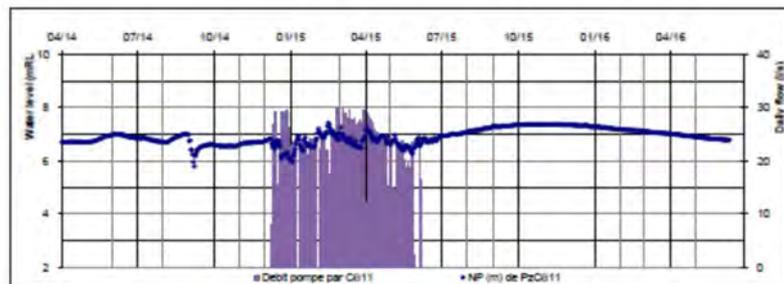


Figure 15. Daily chronicle of pumped flows (CB) and piezometric levels (PzCB11).

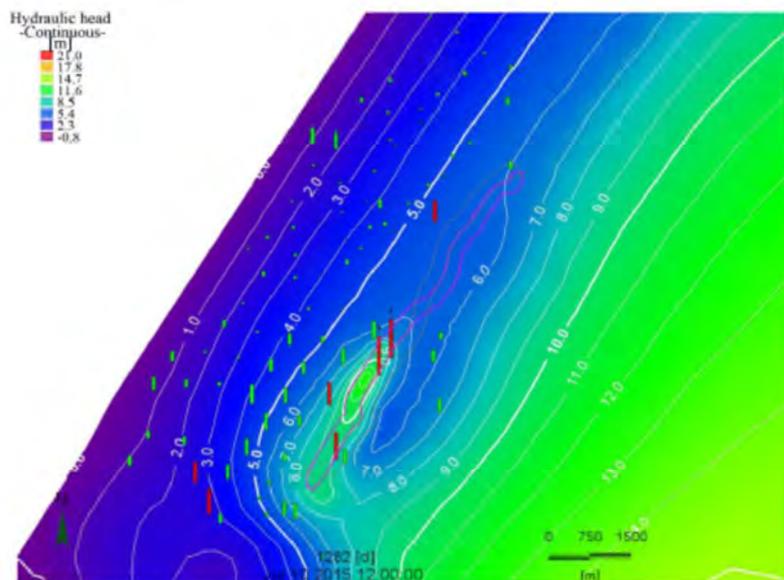


Figure 16. The computed water levels one year after the mine started (July 2015).

The results show a good match between measured and computed head values at the exception of 7 piezometers out of 95. Head computed values in piezome-

ters D022 and D023 are high computed by 1.25 and 1.11 m, respectively corresponding to a local mound inferred by tailings piles.

5.2.3. Statistical Analysis

From a detailed statistical point of view, the precision results are presented below (Table 6).

The smallest RMSE is 0.29 evidenced a better accuracy of the model considering only the Diogo area. The Normalised root mean square error (NRMSE) of 4.17%, is well below the indicative precision threshold of 10% [23]. The graph below shows the correlation line between measured and computed values.

The dispersion of the results is represented as a regression associated with a confidence interval of ± 0.5 m (Figure 17). The square of the Pearson correlation coefficient is 0.98.

5.3. The Water Model Predictions from February 2017 to November 2020

After the validation step, the model is used for simulation purposes, from February 2017 to November 2020 (Figure 18), to plan mining operation in the short and medium term and determine water need to maintain the requested pond level.

Table 6. Analysis of the accuracy of the calibration result of the model in production phase.

Errors	Symbol	Values
Mean error (m)	\bar{R}	0.004
Mean absolute error (m)	$ \bar{R} $	0.20
Standard error of estimate (m)	SEE	0.26
Root mean square error (m)	RMSE	0.29
Normalised Root mean square error (%)	NRMSE	4.17

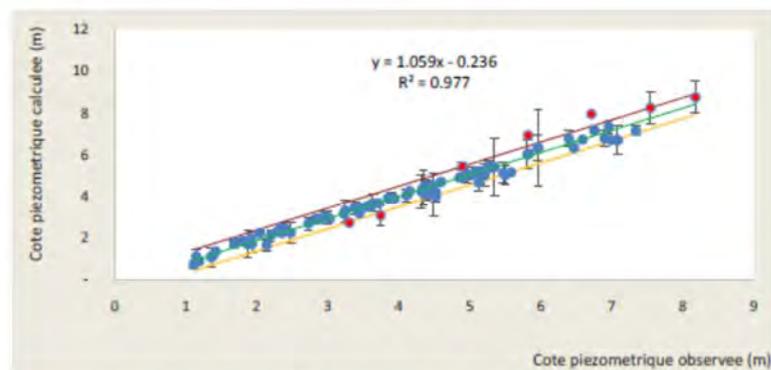


Figure 17. Correlation line between measured and calculated values during production phase.

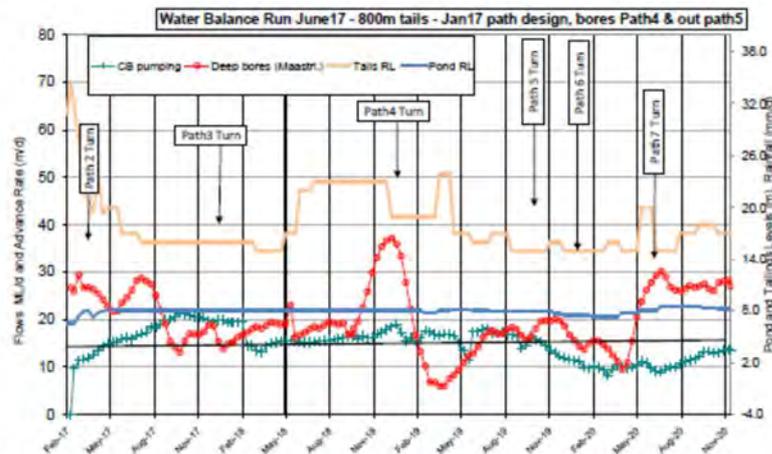


Figure 18. The variation of the forecast water balance for the coming 4 years period from February 2017.

During this operation period, the dredge will cross the dune areas at variable altitudes. The high dunes have their ground level at +26 m and the low dunes are about +14 m to +16 m.

The higher dunes are crossed by the pond from February to May 2017 and the next stages will occur from May 2018 to May 2019. At the high dunes, the dredge pond advance is low with an average of 16 meters per day.

The water losses of the operating system (pond and tails) which is the key of the mine water balance vary between 14,000 m³/d and 49,000 m³/d. To maintain the pond at the optimum water level, the water loss is compensated by the recycling pumping and the deep bores extraction. For most of the period, the recycling pumping would be around 16,000 m³/d before decreasing to 10,000 m³/d from November 2019. Thus, the contribution of the Maastrichtian aquifer will be variable and almost follow the total water losses trend. The yearly pumping trend is as follow:

- 22,000 m³/day from Feb 2017 to December 2017;
- 20,000 m³/day for 2018;
- 16,000 m³/day for 2019;
- 22,000 m³/day for 2020.

In addition, there is an increase of 6000 m³/d on the yearly demand, from 2019 to 2020, which corresponds to the mining of Diogo northern area where the groundwater level is as low as RL5 m for a requested pond level of RL8 m.

The lower requested make-up water becomes higher from July to August 2017. The peak would be reached at 43,000 m³/d in January 2019. This increase is mainly due to:

- The Fass Boye zone mining where the SWL is RL6 m;
- Dredge pond water level rise from +6 m to +8 m;
- This period dry season period;

- The dredge passing through the higher dunes.

The average recycling water for the 4 years' period is 15,000 m³/day representing a contribution varying between 40% to 48% of the total dredge pond make-up water.

5.4. Discussions and Conclusions

The water demand for the 4 years mine period modelled could be ensured by pumping from both aquifers: recycling lost water from the tails and pumping from the deep Maastrichtian aquifer. The largest yearly average makeup water for the dredge pond of 37,000 m³/day with a peak of 49,000 m³/day can be supplied from the recycling and the deep bores makeup water with the recycling contributing between 40% to 48%.

For the shallow aquifer, the water level remains +2 meters above the static water table (SWT) since the mining started despite the recycling pumping process. Therefore, climate change will cause sharp increases in temperature, which in turn, is likely to affect evapotranspiration and atmospheric water storage, thereby potentially changing the magnitudes, frequencies, and intensities of rainfall, as well as its seasonal and inter-annual variabilities [24]. Hopefully, based on the continuous makeup water from the deep aquifer, the upper aquifer water level in the vicinity of the mine will continue to be above the SWT.

Conversely, the confined deep aquifer which is ensuring the dredge pond make up water between 52% and 60% is continuing to be depleted as the system is confined and the main recharge area is located at the SE of the sedimentary basin.

Recent study by the Water Ministry [25] evidenced drawdown between 7 and 13 meters prior GCO pumping for pond makeup water. This is problematic given that the freshwater aquifer is delimited in its eastern part by the central salt water band located 30 km away. For sustainable use of the groundwater resources, continuous update of the hydraulic model and water level monitoring should be promoted to maximise recycling and reduce pumped makeup water from the Maastrichtian aquifer.

In the next few years, the mine paths will move closer to the shoreline. So, much more attentions should be paid to the piezometric monitoring and hydro chemical measurements of the coastal strip to detect any risk of saline intrusion.

References

- [1] Sane, M. (2015) Notes sur les Ressources en eaux du Senegal: Zones potentielles pour le transfert d'eau. Ministère de l'Hydraulique du Senegal, Dakar.
- [2] ISRA (1996) Rapport Annuel. DAKAR.
- [3] Dryade (1990) Inventaire Biophysique de la région des Niayes Synthèse, document de recherche dans le cadre du Project Conservation des Terroirs du Littoral, Ministère du Développement Rural et de l'Hydraulique, DFCCS. République du Senegal, Dakar, 262 p.
- [4] TROPICA (2005) Etude d'impact environnemental et social (EIES) du Projet Zircon

- de la Grande Cote. 92-93.
- [5] Faye, S., Diaw, M., Ndoye, S., Malou, R. and Faye, A. (2009) Impact of Climate Change on Groundwater Recharge and Salinisation of Groundwater Resources in Senegal. *Groundwater and Climate in Africa*, Kampala, June 2008, 163-173.
 - [6] Kane, A. (1985) Le bassin du Sénégal à l'embouchure Flux continentaux dissous et particuliers. Invasion marine dans les vallées du Fleuve. Thèse doct, 3ème cycle, Trav. Lab. geogr. Phy. Univ. de Nancy II, Dakar, 186 p.
 - [7] Michel, P. (1973) Les bassins des fleuves Sénégal et Gambie. Etude géomorphologique. Mém. ORSTOM. N63, 3 tomes, Paris, 752 p.
 - [8] Michel, P. (1956) Rapport préliminaire sur la géologie de la région des Niayes, de Kayar à l'embouchure du Sénégal. Rapport inédit MAS.
 - [9] Puttalaz, J. (1962) Hydrogéologie de la région des Niayes. Rapport DAK 62-A12, 37 p.
 - [10] Noel, Y. (1978) Etude hydrogéologie des calcaires lutétiens entre Bambey et Louga (2ème phase). BRGM, Orleans, 100 p.
 - [11] Kaba, M., *et al.* (2016) Spatial and Seasonal Variability of Groundwater Hydrochemistry in the Senegal North Littoral Aquifer using Multivariate Approach. *Environment Earth Sciences*, 75, 274. <https://doi.org/10.1007/s12665-016-5520-x>
 - [12] MDL (2010) Grande Cote Operations—Definitive Feasability Study: Engineering and Technical. GCO, Senegal.
 - [13] Herchenchorn, W., *et al.* (2006) From Heavy Minerals Mining to a Wet Dredge Mining Operations. In: Proceedings of the World Dredging Congress, *Papers and Presentations*, TIB Leibniz Information Centre for Science and Technology, 1, 129-140.
 - [14] Consolidated Rutile Limited (CRL) (2010) How Are Mineral Sands Mined on North Stradbroke Island?
 - [15] Associates, G. (2007) Snapper Mineral Sands Project Environmental Assessment—Hydrogeological Assessment. Bemax Resources Limited, Mildura.
 - [16] De Marsily, G. (1986) Quantitative Hydrogeology. Academic Press, Paris.
 - [17] Mondal, N.C., Singh, V.P. and Sankaran, S. (2011) Groundwater Flow Model for a Tannery Belt in Southern India. *Journal of Water Resource and Protection*, 3, 85-97.
 - [18] Diersch, H.-J.G. (2005) FEFLOW Software—Finite Element Subsurface Flow and Transport Simulation System—Reference Manual. WASY GmbH, Berlin.
 - [19] Grzina, A., *et al.* (2002) Slurry Pumping Manual. A Technical Application Guide for Users of Centrifugal Slurry Pumping Systems. Warman International Ltd.
 - [20] Robertson, M. (2013) Groundwater Assessment. Path 1-4 Tailings and Water Management. Grande. Grande Cote Operations (GCO).
 - [21] Faye, S. (1995) Modélisation hydrodynamique des nappes du littoral nord entre Cayar et St-Louis. Impact des futurs prelevements envisages dans le cadre de l'approvisionnement en eau de Dakar et de ses environs. Thèse de 3e cycle, UCAD, Dakar, 167 p.
 - [22] Berehanu, B., Ayenew, T. and Azagegn, T. (2017) Challenges of Groundwater Flow Model Calibration using Modflow in Ethiopia: With Particular Emphasis to the Upper Awash River Basin. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 5, 50-66. <https://doi.org/10.4236/gep.2017.53005>
 - [23] Lalot, E. (2014) Analyse des signaux piezométriques et modélisation pour l'évaluation quantitative et la caractérisation des échanges hydrauliques entre les aquifères alluviaux.

M. Seck *et al.*

- viaux et rivières—Cas du Rhone. Ecole Nat. Supérieure des Mines de Saint Etienne.
- [24] Shahid, S., Alamgir, M., Wang, X.-J. and Eslamian, S. (2017) Climate Change Impacts on and Adaptation to Groundwater. Researchgate, 107-123.
<https://doi.org/10.1201/9781315226781-7>
- [25] GKW Consult (2009) Modélisation numérique—Littoral Nord, Rapport Phase IV. Lot 1B. Projet Eau à Long Terme, République du Sénégal, Senegal.