*République du Sénégal*

*Un Peuple – Un But – Une Foi*

*******

*MINISTERE DE L'HYDRAULIQUE ET DE L'ASSAINISSEMENT*

*********

***DIRECTION DE LA GESTION ET DE LA PLANIFICATION DES RESSOURCES EN EAU***

DGPRE

**PROGRAMME EAU POTABLE ET ASSAINISSEMENT DU MILLENAIRE (PEPAM)**

**PROJET EAU ET ASSAINISSEMENT EN MILIEU URBAIN (PEAMU)**

# ETUDE HYDROGÉOLOGIQUE COMPLÉMENTAIRE DU SYSTÈME DU HORST DE DIASS

## *RAPPORT R5 : RAPPORT DE SYNTHESE* - VERSION FINALE

**Financement : Association Internationale de Développement (IDA)**

**Décembre 2018**

*Réalisé par le Groupement*

tpf-setico INGÉNIERIE (ex SETICO Ingénieurs Conseils S.A.)

anteagroup

| Version | Objet de la révision | Date | Etabli par | Vérifié et approuvé par |
|---|---|---|---|---|
| V1 | Version définitive | 13 Décembre 2018 | Dr. Babacar DIENG | Djibril DIAGNE |

## Sigles et abréviations

| | |
|---|---|
| ❐ **AEP** | ❐ Adduction d'Eau Potable |
| ❐ **BD** | ❐ Base de données |
| ❐ **BRGM** | ❐ Bureau de Recherches Géologiques et Minières |
| ❐ **DGPRE** | ❐ Direction de la Gestion et de la Planification des Ressources en Eau |
| ❐ **IDA** | ❐ International Development Association |
| ❐ **OMS** | ❐ Organisation Mondiale de la Santé |
| ❐ **PAGIRE** | ❐ Plan d'Action de Gestion Intégrée des Ressources en Eau |
| ❐ **PAGIRE-BA** | ❐ Plan d'Action de Gestion Intégrée des Ressources en Eau dans le Bassin Arachidier |
| ❐ **PEAMU** | ❐ Projet Sectoriel Eau et Assainissement en Milieu Urbain |
| ❐ **PELT** | ❐ Projet Eau à Long Terme |
| ❐ **PEPAM** | ❐ Programme Eau Potable et Assainissement pour le Millénaire |
| ❐ **SE** | ❐ Sondage Electrique |
| ❐ **SIG** | ❐ Système d'Information Géographique |
| ❐ **TDR** | ❐ Termes de référence |

# Avant propos

Le présent document est le dernier rapport de synthèse du projet intitulé « Etude hydrogéologique complémentaire du système du Horst de Diass » financé dans le cadre du Projet Sectoriel Eau et Assainissement en Milieu Urbain (PEAMU) par l'Association Internationale de Développement (IDA). Cet étude a été initiée par la Direction de la Gestion et Planification des Ressources en Eau (DGPRE) du Ministère de l'Hydraulique et de l'Assainissement.

Le premier rapport était celui de démarrage qui a entre autre fait le point sur l'étude bibliographique et documentaire, la collecte des données et l'inventaire des ouvrages hydrauliques.

Le deuxième rapport a porté sur l'analyse et la synthèse des données relatives à la géométrie des unités aquifères et des niveaux imperméables qui les séparent.

Le troisième rapport a traité de la synthèse des investigations hydrogéologiques et hydro-chimiques.

Le quatrième rapport a porté sur la construction d'un modèle de simulation hydrogéologique et l'utilisation de ce modèle pour l'étude du comportement des nappes du système aquifère du horst de Diass suite à des scénarios de pompage sur une période allant jusqu'en 2035.

La conduite de la mission a aussi été l'occasion de réaliser d'autres rapports spécifiques portant sur :

- des travaux de prospection géophysiques ;
- le suivi et le contrôle de la réalisation de 6 piézomètres ;
- la réalisation d'un outil de gestion de l'ensemble des données collectées au cours de la mission et la formation du personnel de la DGPRE à l'utilisation de cet outil.

Ce rapport final de synthèse destiné principalement aux utilisateurs des ressources en eau de la zone de l'étude et aux décideurs présente l'essentiel des résultats obtenus et les recommandations qui en découlent.

Il comprend en plus de son introduction (partie 1), les conclusions et recommandations (partie 5) 3 autres parties qui traitent respectivement de :

- Partie2 : une synthèse du contenu des rapports 1,2,3 précédents ;
- Partie 3 : construction et calage du modèle de simulation
- Partie 4 : Utilisation du modèle pour la simulation de scénarios d'exploitation.

Ces deux dernières parties constituent l'essentiel du rapport de synthèse.

# Sommaire

**CHAPITRE I : INTRODUCTION ..... 11**

I.1 CONTEXTE ET JUSTIFICATIONS DE L'ETUDE ..... 11

I.2 RAPPEL DES TDR DE LA MISSION ET DE LA PRESENTATION DE LA ZONE DE L'ETUDE ..... 12

I.2.1 Rappel des TDR de la mission ..... 12

I.2.2 Présentation de la zone d'étude ..... 13

I.3 CONTEXTE GEOLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE ..... 15

I.4 METHODOLOGIE DE REALISATION DE L'ETUDE : ..... 19

I.5 LES ACQUIS DES RAPPORTS PRECEDENTS : ..... 21

**CHAPITRE II. SYNTHESE DES CONTENUS DES RAPPORTS PRECEDENTS ..... 23**

**CHAPITRE III. CONSTRUCTION ET CALAGE DU MODELE ..... 26**

III.1 MODELISATION CONCEPTUELLE ..... 26

III.2 GEOMETRIE DU MODELE ..... 29

III.2.1 Topographe ..... 29

III.2.2 Epaisseur des couches ..... 30

III.3 DISCRETISATION TEMPORELLE ..... 34

III.4 CONDITIONS AUX LIMITES ..... 35

III.5 PRISE EN COMPTE DES PRELEVEMENTS ..... 40

III.6 METHODOLOGIE DE CALAGE DU MODELE ..... 43

III.7 DONNEES DE CALAGE ..... 44

III.8 RESULTATS DU CALAGE ..... 48

III.8.1 Calage en régime permanent ..... 48

III.8.2 Calage en régime transitoire ..... 50

III.8.3 Paramètres hydrodynamiques calés ..... 60

III.8.4 Bilan des entrées et sorties d'eau ..... 64

III.8.5 Direction d'écoulement ..... 64

III.8.6 Intrusion d'eau saline ..... 67

**CHAPITRE IV. MISE EN ŒUVRE DE SCENARIOS D'EXPLOITATION ..... 69**

IV.1 DEFINITION DE SCENARIOS INITIAUX ..... 69

IV.2 RESULTATS DES SCENARIOS INITIAUX ..... 72

IV.3 DIRECTIONS D'ECOULEMENTS SIMULEES ..... 79

IV.4 DEFINITION ET RESULTATS DE SIMULATION DU SCENARIO COMPLEMENTAIRE ..... 80

**CHAPITRE V. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS ..... 89**

V.1 CONCLUSIONS ..... 89

V.2 PRINCIPALES RECOMMANDATIONS ..... 90

**BIBLIOGRAPHIE ..... 93**

**ANNEXE ..... 94**

# Liste des tableaux

Tableau 1 : Stratigraphie et synthèse des unités aquifères de la zone nord du Sénégal ..... 16

*Tableau 2 : Correspondances entre les couches du modèle et les formations géologiques présentes dans le système du Horst de Diass* ..... 27

*Tableau 3 : Recharges annuelles des zones du modèle hydrogéologique en régime permanent.* ..... 38

Tableau 4 : Bilans hydrodynamiques du modèle du Horst de Diass pour l'année 2015. ..... 64

Tableau 5 : Volumes journaliers pompés aux champs captant de la SONES entre 2019 et 2033 pour le scénario « prospective SONES » (en m3/jour)..... 70

Tableau 6 : Présentation des scénarios 1 à 10. ..... 72

*Tableau 7 : Synthèse des résultats des scénarios initiaux.* ..... 73

Tableau 8 : Débits journaliers d'exploitation testés pour les nouveaux forages du scénario complémentaire. ..... 82

# Liste des figures

Figure 1 : Cartes de délimitation de la zone de l'étude ..... 14

Figure 2 : Contexte hydrogéologique de la zone de l'étude ..... 18

Figure 3 : Méthodologie de conduite de l'étude ..... 20

Figure 4 :Délimitation de l'extension du modèle hydrogéologique. ..... 28

Figure 5 : Cotes du toit du modèle ..... 29

Figure 6 : Epaisseurs de la première couche du modèle ..... 30

Figure 7 : Epaisseurs de la deuxième couche du modèle. ..... 31

Figure 8 : Epaisseurs de la troisième couche du modèle. ..... 32

Figure 9 : Epaisseurs de la quatrième couche du modèle. ..... 33

Figure 10 : Altitudes de la base du modèle. ..... 34

Figure 11 : Conditions aux limites en bordure du modèle (couche1) ..... 36

Figure 12 : Localisation des drains intégrés au modèle hydrogéologique ..... 37

Figure 13 : Répartition des zones de recharges du modèle hydrogéologique. ..... 38

Figure 14 : Recharges pluviométriques annuelles utilisées en entrée du modèle hydrogéologique pour les différentes zones. ..... 39

Figure 15: Evolution des pompages des forages de la SONES ..... 40

Figure 16: Répartition des prélèvements journaliers en 2016 ..... 41

Figure 17 :Localisation des prélèvements par type d'usage. ..... 42

Figure 18: Niveaux piézométriques mesurés pour la période avant 1970. ..... 45

Figure 19 : Localisation des 55 points de calage du modèle hydrogéologique ..... 47

Figure20: Cartes piézométriques observée et simulée en régime permanent pour les aquifères superficiels, en 1970 (simulation) et en 1971 (observations) ..... 49

Figure 21 : Chroniques piézométriques simulée et observée au piézomètre SE36P sur la période 1970-2015. ..... 50

Figure 22 : Chroniques piézométriques simulée et observée au piézomètre Pout Noto S3378 sur la période 1970-2015. ..... 51

Figure 23 : Chroniques piézométriques simulée et observée au piézomètre de Tasset Ouolof sur la période 1970-2015. ..... 52

Figure 24 : Chroniques piézométriques simulée et observée au piézomètre SE31 sur la période 1970-2015. ..... 53

Figure 25 : Erreurs RMSE calculées aux piézomètres du Paléocène pour la période 1970-2015..... 55

Figure 26 : Erreurs RMSE calculées aux piézomètres du Maastrichtien pour la période 1970-2015... 56

Figure 27 : Répartition des valeurs de RMSE calculées pour l'ensemble des piézomètres par classes de valeurs. ..... 57

Figure 28 : Répartition des valeurs de RMSE calculées pour les piézomètres du Maastrichtien par classes de valeurs..... 58

Figure 29 : Répartition des valeurs de RMSE calculées pour les piézomètres du Paléocène par classes de valeurs..... 58

Figure 30 : Piézométrie simulée fin 2015 en couche 1 du modèle. ..... 59

Figure 31 : Répartition des perméabilités calées en couche 1 du modèle hydrogéologique. ..... 61

Figure 32 : Répartition des perméabilités calées en couche 2 du modèle hydrogéologique. ..... 62

Figure 33 : Répartition des perméabilités calées en couche 3 du modèle hydrogéologique. ..... 63

Figure 34 : Directions d'écoulement et piézométrie calculées par le modèle hydrogéologique du Horst de Diass pour la situation piézométrique de fin 2015 ..... 65

Figure 35 : Directions d'écoulement et piézométrie calculées par le modèle hydrogéologique du Horst de Diass pour la situation piézométrique de mi-2015. ..... 66

Figure 36 : Directions d'écoulement et piézométrie calculées par le modèle à proximité du littoral. .. 68

Figure 37 : Débits de pompage pris en compte dans le modèle pour l'année 2016. ..... 71

Figure 38 : Rabattements simulés en 2035 par rapport à la situation piézométrique de fin 2015 pour le scénario 2 « de base » : recharge moyenne en couche 1 du modèle..... 74

Figure 39 : Rabattements simulés en 2035 par rapport à la situation piézométrique de fin 2015 pour le scénario 5 « évolution démographique » : recharge moyenne en couche 1 du modèle..... 75

Figure 40 : Rabattements simulés en 2035 par rapport à la situation piézométrique de fin 2015 pour le scénario 8 « prospective SONES » : recharge moyenne en couche 1 du modèle. ..... 76

Figure 41 : Chroniques piézométriques observées et simulées aux trois points de référence pour le scénario complémentaire..... 78

Figure 42 : Directions d'écoulement et piézométrie simulées en 2035 pour le scénario 8 « prospective SONES » et recharge moyenne en couche 1 du modèle. ..... 79

Figure 43 : Localisation des nouveaux forages proposés dans le cadre du scénario complémentaire. . 81

Figure 44 : Rabattements simulés en 2035 par rapport à la situation piézométrique de fin 2015 du scénario complémentaire (avec recharge moyenne)..... 84

Figure 45 : Chroniques piézométriques observées et simulées aux trois points de référence pour les scénarios complémentaire ..... 86

Figure 46 : Directions d'écoulement et piézométrie simulées en 2035 pour le scénario 11 « prospective SONES » et recharge moyenne. ..... 88

*Figure 47 : Proposition d'amélioration du réseau de suivi piézométr*ique ..... 91

*Figure 48 : Carte du réseau de drainage et de découpage en bassin versant* ..... 97

*Figure 49 : Carte du réseau hydrographique* ..... 97

*Figure 50 : Carte de répartition des points de pompage* ..... 98

*Figure 51 : Carte piézométrique fin 2015 (aquifère supérieur)*..... 98

# Chapitre I : Introduction

## I.1 Contexte et justifications de l'étude

La République du Sénégal, à travers son Ministère de l'Hydraulique et de l'Assainissement, représenté par la Direction de la Gestion et de la Planification des Ressources en Eau (DGPRE), a obtenu un appui de l'Association Internationale de Développement (IDA) pour la réalisation du Projet Sectoriel Eau et Assainissement en Milieu Urbain (PEAMU). Une partie de cet appui est affectée pour la réalisation de l'étude hydrogéologique complémentaire du système du Horst de Diass. Cette étude doit contribuer à l'amélioration des conditions d'alimentation en eau des populations de la ville de Dakar et ses environs et à la satisfaction des besoins en eau des activités industrielles et agricoles dans la zone.

En effet, la zone du horst de Diass est caractérisée par la présence de grands centres de captage de la SONES pour l'alimentation en eau de Dakar et ses environs et une intense activité agricole et industrielle dont les sources d'alimentation en eau sont en grande partie les nappes du système du horst. Les pompages intensifs auxquels le système du horst de Diass est ainsi soumis depuis plus de 35 ans et la diminution de sa recharge du fait de la dégradation des conditions climatiques ont entrainé une avancée du biseau salé dans la frange côtière. C'est dans cette optique que la SONES prévoit d'exploiter la nappe des calcaires du Paléocène dans la zone de Tassette situé toujours dans le système du Horst de Diass.

L'importance des aquifères du système du horst de Diass dans l'alimentation en eau de Dakar et la promotion des activités agricoles et industrielles justifie ainsi la nécessité d'une amélioration des connaissances hydrogéologiques de ce système en vue de mieux appréhender les réserves hydriques exploitables. C'est ainsi que le sous-programme PEAMU (Projet Eau et Assainissement en Milieu Urbain), financé par la Banque Mondiale, a intégré la réalisation de l'étude hydrogéologique complémentaire du système du Horst de Diass dans son plan d'action. Cette mission a été confiée au Groupement TPF-SETICO Ingénierie/ANTEA Group.

# I.2 Rappel des TDR de la mission et de la présentation de la zone de l'étude

## I.2.1 Rappel des TDR de la mission

L'objectif global de cette étude est d'améliorer les connaissances hydrogéologiques du système du Horst de Diass en vue de l'évaluation des potentialités des ressources en eau et de leur exploitation optimale pour l'AEP de Dakar et environs. Les objectifs spécifiques et les résultats attendus qui découlent de cet objectif global portent sur les points suivants :

- l'actualisation des études antérieures et des données disponibles et l'identification des lacunes éventuelles;
- l'amélioration des connaissances (caractéristiques et fonctionnement des nappes);
- l'amélioration des outils de gestion de la DGPRE par l'élaboration d'un modèle mathématique;
- l'élaboration d'un bilan diagnostic et l'évaluation des potentialités des ressources en eau mobilisables en vue d'un transfert.

Pour atteindre les objectifs retenus ainsi que les résultats qui en découlent, les activités à mener sont structurées comme suit :

- la synthèse bibliographique : état des connaissances disponibles et identification des lacunes, qui couvriront les aspects suivants : (géologie structurale, lithologie, géométrie du système aquifère de la zone, fonctionnement hydraulique)
- l'organisation de travaux de terrain portant sur l'inventaire complémentaire des ouvrages hydrauliques, des travaux de prospection géophysique et de nivellement, de campagnes de mesures sur le terrain et d'enquêtes sur les prélèvements,
- la synthèse hydrogéologique à partir de l'ensemble des informations ci-dessus collectées; cette synthèse devrait servir principalement à préciser la géométrie et le fonctionnement du système aquifère,
- la construction d'un modèle mathématique (outils de gestion prévisionnelle et d'analyse des interactions) qui permettra entre autre d'évaluer les potentialités des nappes du système et les possibilités d'exploitation durable y compris celles de transfert vers d'autres zones.
- L'utilisation de ce modèle une fois calé pour tester des scénarios d'exploitation dans le futur des ressources en eau souterraine du système aquifère du horst de Diass.

### I.2.2 Présentation de la zone d'étude

D'un point de vue administratif, la zone initiale retenue pour l'étude couvre la presque totalité de la région de Thiès et quelques portions des parties frontalières des régions de Dakar et Fatick. Elle couvre une superficie de l'ordre de 3700 km2 avec une population de près de 1 500 000 habitants. Au moment de la construction du modèle de simulation hydrogéologique et pour avoir des résultats pertinents dans le système aquifère du horst de Diass, la limite Est a été repoussée plus à l'Est.

La carte (figure 1) qui suit donne d'une part la délimitation initiale de la zone de l'étude (limite en noir) et celle modifiée au cours de la phase de modélisation (limite en rouge).

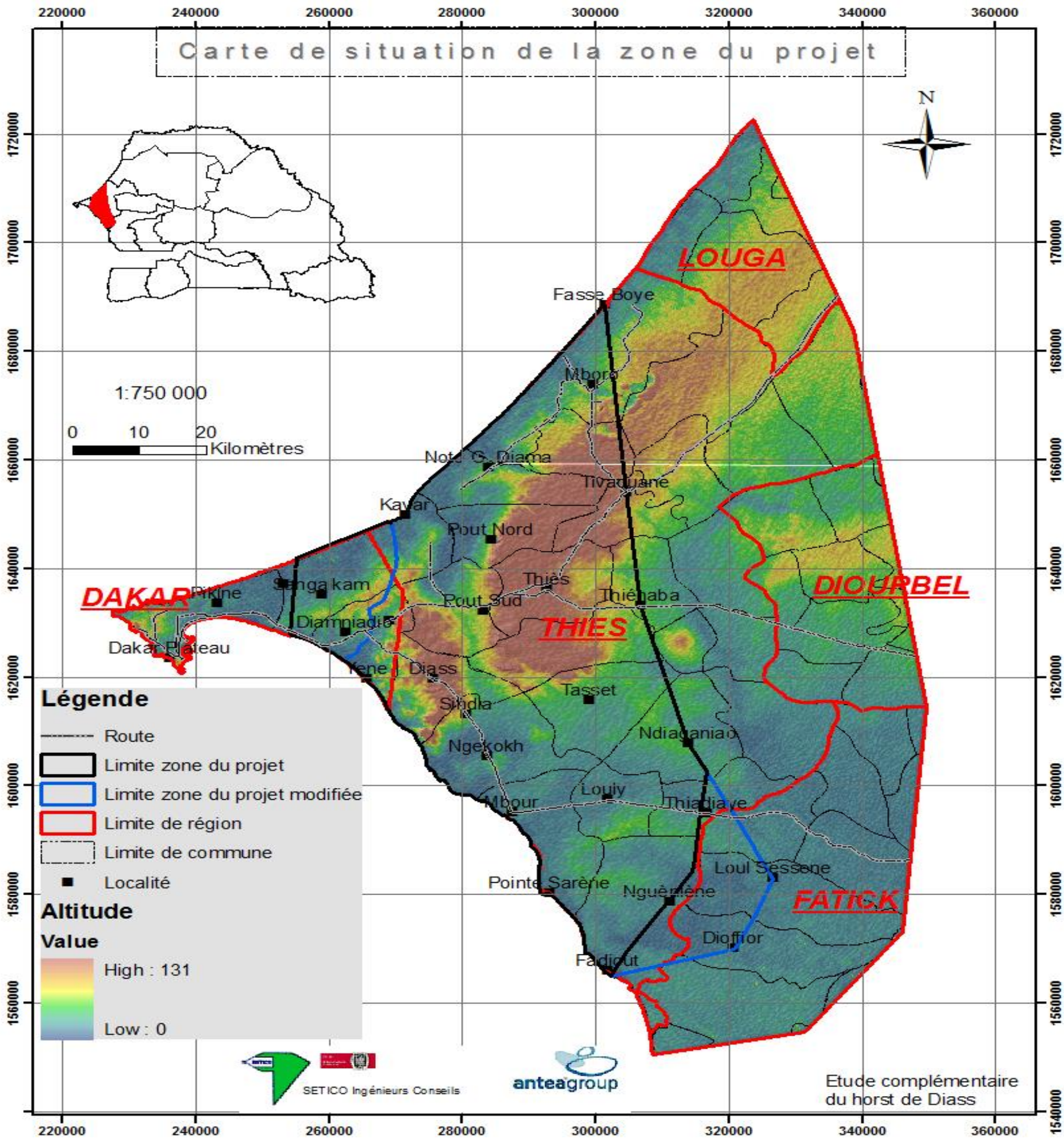



Figure 1 : Cartes de délimitation de la zone de l'étude

## I.3 Contexte géologique et hydrogéologique

Les terrains sédimentaires du Sénégal sont constitués par les formations du Trias, du Jurassique moyen à supérieur, du Crétacé, du Tertiaire et du Quaternaire, reposant sur le substratum cristallin anté-mésozoïque. Ces formations sont caractérisées par une alternance de dépôts dont les caractéristiques lithologiques (sables, argiles, calcaires..), et les extensions géographiques résultent principalement de la puissance des diverses transgressions marines ayant affecté la région au cours des temps géologiques.

La tectonique générale du bassin sénégalo-mauritanien est relativement simple, avec des couches subhorizontales, plongeant légèrement vers l'Ouest. Dans le détail cependant, la fracturation peut être très importante et compliquée localement les structures géologiques ; c'est le cas en particulier de la zone du horst de Diass où les principales fractures présentes sont : la faille de William Ponty, la faille de Sébikotane, les failles de Pout et Fouloume, la faille de Thiès.

Les travaux antérieurs menés sur le bassin sédimentaire du Sénégal ont permis d'identifier une série simplifiée, résumant les principales caractéristiques lithologiques et hydrogéologiques. Ils ont ainsi permis de définir 4 ensembles stratigraphiques et trois grands systèmes aquifères (Tableau 1) :

- l'ensemble supérieur" qui regroupe les assises géologiques du Néogène et du Quaternaire, renfermant le système aquifère du "Complexe Terminal";
- l'ensemble intermédiaire, formé du Paléocène et de l'Eocène contient le système aquifère Paléogène", productif uniquement dans les zones karstifiées ;
- l'ensemble du Crétacé supérieur", composé des étages du Maastrichtien, du Campanien, du Sénonien inférieur et du Turonien, renferme le "système aquifère Maastrichtien" qui regroupe tous les niveaux producteurs à dominante sableuse. L'aquifère Maastrichtien est limité en son mur, par les argiles noires du Turonien.
- L'ensemble inférieur » est composé essentiellement du Turonien jusqu'au socle, de sédiments argileux ou de carbonatés compacts, présentant des caractéristiques hydrogéologiques médiocres.

Tableau 1 : Stratigraphie et synthèse des unités aquifères de la zone nord du Sénégal

| ERE | Syst. | Epoque | Etage | | Regroupement stratigraphique | Lithologie dominante | Aquifère |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| QUATERNAIRE | | | | | ← *Ensemble supérieur-* → | Sables éoliens<br>Alluvions<br>tufs volcaniques | Aquifère |
| TERTIAIRE | NEOGENE | PLIOCENE | « *CONTINENTAL TERMINAL* » | | | Sables coquilliers<br>sables +/- argileux | Aquitard |
| | | MIOCENE | | | | Marno calcaire | Aquitard |
| | PALEOGENE | OLIGOCENE | | | | Marnes et agiles | Aquitard |
| | | EOCENE | moy | LUTETIEN SUP. | ← *Ensemble. intermédiaire* → | Calcaires<br>Marno-calcaires | Aquiclude |
| | | | | LUTETIEN INF. | | Sables | Aquifère |
| | | | inf | YPRESIEN | | Marnes et argiles | Aquiclude |
| | | PALEOCENE | PALEOCENE sup. à moyen | | | Marno-calcaires<br>Calcaires karstifiés<br>Marnes | Aquifère |
| | | | DANIEN | | | Marno calcaires<br>Argiles | Aquitard |
| SECONDAIRE | CRETACE | CRETACE Supérieur | SENONIEN | MAASTRICHTIEN | ← Ensemble Crétacé sup. → | Sables<br>grès, sables gréseux<br>sables argileux | Aquifère |
| | | | | CAMPANIEN | | Grès<br>Sables argileux | Aquifère |
| | | | | SENONIEN INF | | sables argileux et argiles sableuses | Aquitard |
| | | | TURONIEN | | | Argiles noires | Aquiclude |

**NB : il n'a été indiqué dans cette échelle stratigraphique que les niveaux allant du Crétacé supérieur au Quaternaire qui peuvent avoir un lien avec l'objet de cette étude.**

Le contexte hydrogéologique de la zone de l'étude est illustré par la carte de la figure 2 et montre sa division par la tectonique en quatre compartiments qui sont :

- le compartiment de Sébikotane à l'Ouest avec la présence d'un important aquifère contenu dans les formations calcaires karstifiés en relation dans sa partie nord-ouest avec l'aquifère des sables quaternaire du littoral nord ;
- la zone d'affleurement des formations maastrichtiennes au niveau du cœur du horst de Diass qui sont reconnues comme étant plus perméables à l'Est et plus ou moins imperméables à l'Ouest ;
- le compartiment de Pout et son prolongement vers le sud jusqu'après Mbour où sont à la fois présents l'aquifère des calcaires paléocènes et celui des sables du maastrichtien ;

- à l'Est du compartiment de Pout jusqu'à la limite de la zone de l'étude où le principal aquifère présent est celui des sables du maastrichtien.

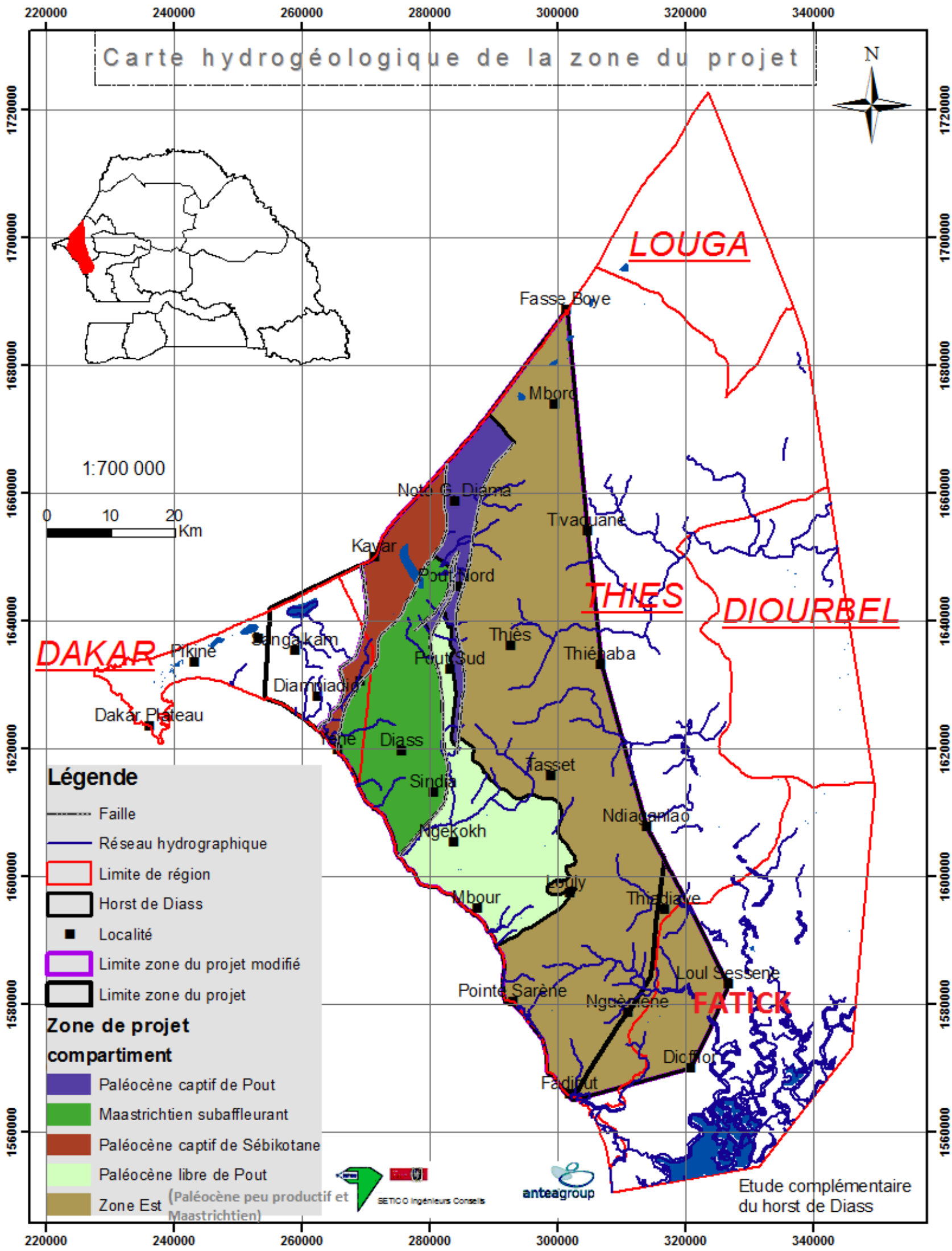



*Figure 2 : Contexte hydrogéologique de la zone de l'étude*

## I.4 Méthodologie de réalisation de l'étude :

La démarche méthodologique générale qui a servi à conduire l'étude est rappelée sur la figure 3. Elle comprend les étapes suivantes :

- Phase 1 : Activités préliminaires, revue documentaire et actualisation des connaissances ;
- Phase 2 : Etudes hydrogéologiques pour l'évaluation des potentialités en ressources en eau ;
- Phase 3 : Contrôle et suivi de la réalisation et de l'équipement des piézomètres ;
- Phase 4 : Construction et exploitation du modèle de simulation.

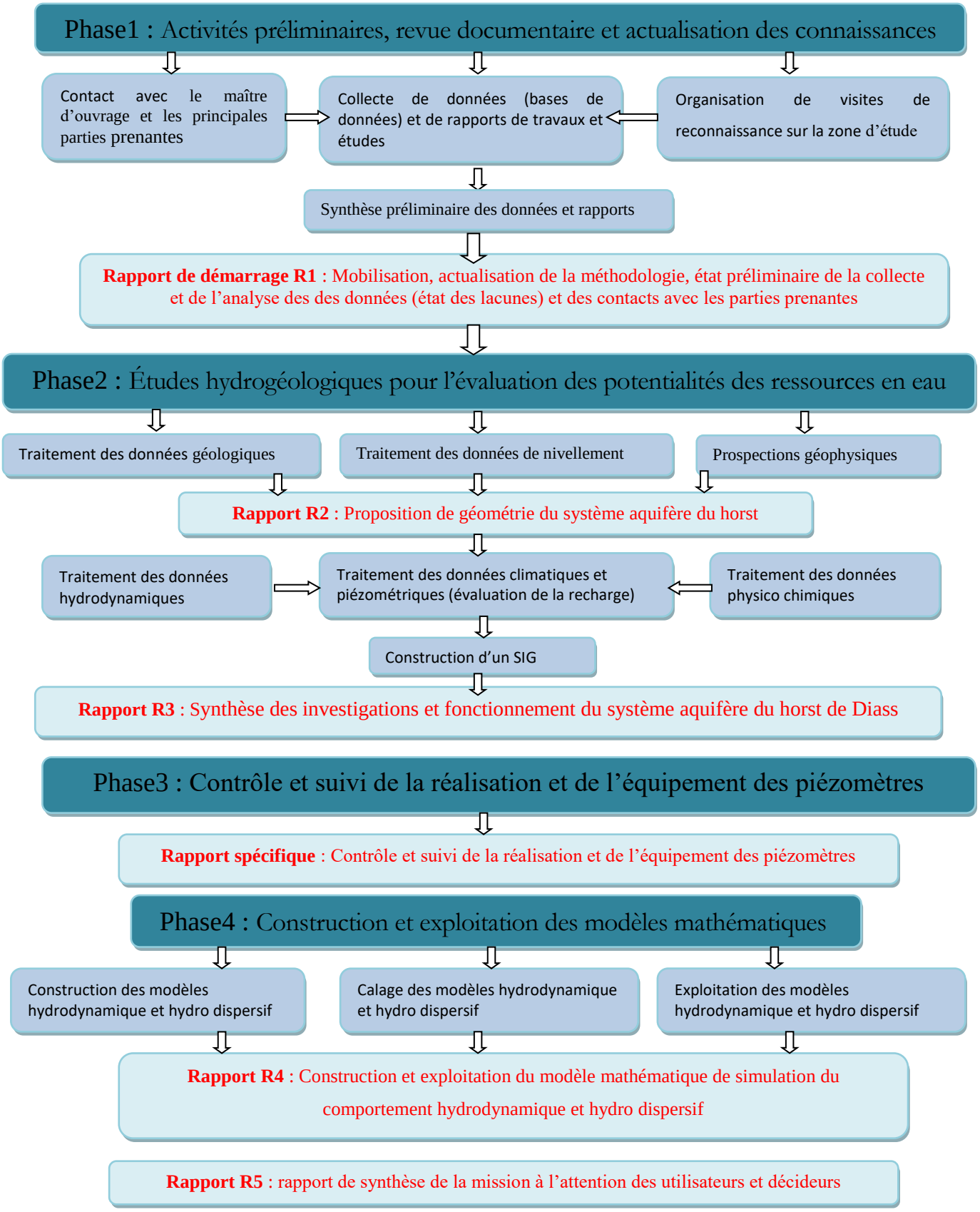



*Figure 3 : Méthodologie de conduite de l'étude*

## I.5 Les acquis des rapports précédents :

Conformément aux dispositions prévues dans les termes de référence de la mission, le premier rapport de démarrage de l'étude intitulé : « **Etat de la collecte des données et actualisation de la méthodologie »** a traité les points suivants :

- l'état de la mobilisation des experts et des moyens et contacts avec les parties prenantes ;
- l'état préliminaire de l'étude bibliographique, de la collecte et de l'analyse des données qui devrait permettre de déceler les lacunes devant contribuer à l'orientation des investigations hydrogéologiques prévues dans la phase 2 de la mission. Ces lacunes ont porté essentiellement sur :
    - les zones où les connaissances géologiques et hydrogéologiques sont insuffisantes et qui doivent être complétées par des investigations géophysiques ;
    - les ouvrages du réseau de suivi piézométrique qui n'ont pas encore fait l'objet d'un nivellement précis ;
    - l'état des connaissances sur les pompages dans les forages de la zone qui n'ont pas fait l'objet de suivi assidu pour permettre le recueil des données nécessaires à la construction du modèle de simulation des écoulements ;
- l'inventaire complémentaire des ouvrages hydrauliques (privés en particulier) existants dans la zone de l'étude ;
- l'actualisation de la méthodologie d'intervention.

Dans la même logique le deuxième rapport intitulé : «**Géométrie des aquifères du système du horst de Diass** » a traité des points suivants :

- exploitation des données géologiques des rapports des études antérieures ; il s'est agi principalement des études suivantes :
    - les nappes de la presqu'île du Cap Vert et leur utilisation pour l'alimentation en eau de Dakar,
    - l'étude hydrogéologique des calcaires paléocènes de la région de Mbour,
    - la synthèse hydrogéologique du Sénégal,
    - l'Etude hydrogéologique de la nappe profonde du Maastrichtien du Sénégal réalisée entre 1999 et 2002 qui a produit une importante série de rapports,
    - les Etudes Hydrogéologiques Complémentaires du Projet Eau à Long Terme – GKW CONSULT réalisée 2009 ;

- exploitation des données des sondages profonds qui sont les seules sources d'informations sur la géométrie des niveaux profonds du Maastrichtien ;
- la synthèse des résultats des travaux de géophysique menés dans le cadre de cette mission qui ont permis de combler le faible niveau d'informations des zones insuffisamment couvertes par des forages ;
- la réalisation de coupes géologiques sériées à partir des données des forages existants et des travaux géophysiques,
- l'élaboration de cartes de géométrie (toit, mur, épaisseurs des niveaux de séparation) des unités aquifères identifiées.

Il a ainsi contribué à préparer les données sur les caractéristiques géométriques des aquifères nécessaires à la construction du modèle de simulation des écoulements.

# CHAPITRE II. SYNTHÈSE DES CONTENUS DES RAPPORTS PRECEDENTS

Conformément aux dispositions prévues dans les termes de référence de la mission, le premier rapport de démarrage de l'étude intitulé : « **Etat de la collecte des données et actualisation de la méthodologie »** a traité les points suivants :

- l'état de la mobilisation des experts et des moyens et contacts avec les parties prenantes ;
- l'état préliminaire de l'étude bibliographique, de la collecte et de l'analyse des données qui devrait permettre de déceler les lacunes devant contribuer à l'orientation des investigations hydrogéologiques prévues dans la phase 2 de la mission. Ces lacunes ont porté essentiellement sur :
    - les zones où les connaissances géologiques et hydrogéologiques sont insuffisantes et qui doivent être complétées par des investigations géophysiques ;
    - les ouvrages du réseau de suivi piézométrique qui n'ont pas encore fait l'objet d'un nivellement précis ;
    - l'état des connaissances sur les pompages dans les forages de la zone qui n'ont pas fait l'objet de suivi assidu pour permettre le recueil des données nécessaires à la construction du modèle de simulation des écoulements ;
- l'inventaire complémentaire des ouvrages hydrauliques (privés en particulier) existants dans la zone de l'étude ;
- l'actualisation de la méthodologie d'intervention.

Ce rapport a ainsi contribué à l'atteinte de l'objectif spécifique relatif à l'actualisation des études antérieures et des données disponibles et l'identification des lacunes éventuelles,

Dans la même logique le deuxième rapport intitulé : «**Géométrie des aquifères du système du horst de Diass** » a traité des points suivants :

- exploitation des données géologiques des rapports des études antérieures ; il s'est agi principalement des études suivantes :
    - les nappes de la presqu'île du Cap Vert et leur utilisation pour l'alimentation en eau de Dakar (BRGM 1970),
    - l'étude hydrogéologique des calcaires paléocènes de la région de Mbour (DEH 1980),
    - la synthèse hydrogéologique du Sénégal (DEH 1985),

  - l'Etude hydrogéologique de la nappe profonde du Maastrichtien du Sénégal réalisée entre 1999 et 2002 qui a produit une importante série de rapports,
  - les Etudes Hydrogéologiques Complémentaires du Projet Eau à Long Terme – GKW CONSULT réalisée 2009 ;

- exploitation des données des sondages profonds qui sont les seules sources d'informations sur la géométrie des niveaux profonds du Maastrichtien ;
- la synthèse des résultats des travaux de géophysique menés dans le cadre de cette mission qui ont permis de combler le faible niveau d'informations des zones insuffisamment couvertes par des forages ;
- la réalisation de coupes géologiques sériées à partir des données des forages existants et des travaux géophysiques,
- l'élaboration de cartes de géométrie (toit, mur, épaisseurs des niveaux de séparation) des unités aquifères identifiées.

Il a ainsi contribué à préparer les données sur les caractéristiques géométriques des aquifères nécessaires à la construction du modèle de simulation des écoulements.

Ce rapport a ainsi contribué à l'atteinte de l'objectif spécifique relatif à l'amélioration des connaissances (caractéristiques et fonctionnement des nappes).

Le troisième rapport intitulé : « Synthèse des investigations hydrogéologiques et hydrochimiques » a permis de faire :

- l'état et la synthèse des données sur les prélèvements des principaux forages existants dans la zone de l'étude. Il s'agit des forages de la SONES destinés à l'alimentation en eau potable de Dakar et des principales villes de la zone de l'étude, des forages ruraux, et les forages privés (des exploitants agricoles et sociétés minières). Des chroniques de pompage (évolution des pompages dans le temps ont pu être dressées ;
- l'état des paramètres hydrodynamiques (transmissivités et coefficient emmagasinement) des nappes (paléocène et maastrichtien) ;
- l'état et l'analyse des données de suivi piézométrique et hydrochimique (état du réseau, traitement et analyse des données collectées) ;
- l'état des connaissances sur les processus d'alimentation des nappes par la pluie et les cours d'eau de surface à partir principalement de « l'Etude hydrogéologique de la nappe du Maastrichtien au Sénégal – Estimation de la recharge actuelle de la nappe du Maastrichtien au

Sénégal » réalisée en 2001 par le Groupement COWI – POLYCONSULT. Dans le cadre de la présente étude, nous avons actualisé l'approche utilisée dans cette étude en la complétant par :

- une modulation temporelle de la recharge en fonction de la variation interannuelle de la pluviométrie prenant ainsi en compte les changements climatiques ;
- une modulation spatiale prenant en compte la nature des sols de surface qui peuvent avoir une capacité d'infiltration variable et la présence de cours d'eau en relation avec les nappes.

L'ensemble des informations obtenues à travers les investigations ci-dessus décrites ont permis de proposer un mode de fonctionnement hydraulique du système aquifère du horst de Diass. Ce mode de fonctionnement a par la suite servi de support pour proposer un modèle conceptuel (identification des unités aquifères pertinentes à prendre en compte pour le travail de modélisation, des limites de ces unités et des contions aux limites du système.

Ce rapport a ainsi contribué à l'atteinte de l'objectif spécifique relatif à l'amélioration des connaissances (caractéristiques et fonctionnement des nappes).

L'étape de la construction du modèle qui a fait l'objet du quatrième rapport a eu pour objet de répondre aux objectifs spécifiques suivants définis dans les TDR de l'étude :

- l'amélioration des outils de gestion de la DGPRE par l'élaboration d'un modèle mathématique;
- l'élaboration d'un bilan diagnostic et l'évaluation des potentialités des ressources en eau mobilisables en vue d'un transfert.

La construction du modèle a consisté dans un premier temps à reprendre et mettre en cohérence l'ensemble des données collectées lors des phases précédente de la mission pour leur intégration dans le modèle hydrogéologique. Certaines données ont pu être modifiées au cours de ce processus, pour des raisons de cohérence ou de lacune de certaines informations. Cependant les modifications sont faites à la marge, et les informations présentées précédemment restent valables dans le cadre de la construction et de la validation du modèle hydrogéologique.

# CHAPITRE III. CONSTRUCTION ET CALAGE DU MODELE

## III.1 Modélisation conceptuelle

Les deux principaux aquifères identifiés dans le système hydrogéologique du Horst de Diass sont les calcaires du Paléocène et les sables gréseux du Maastrichtien à eau douce.

Les sables du Maastrichtien sont aquifères en partie est du système, et peu aquifère en partie ouest, à partir d'une ligne nord-sud passant au centre du horst de Diass.

Les calcaires du Paléocène sont présents dans les compartiments latéraux du horst (compartiments de Sébikotane et de Pout), et sont absents du compartiment de Diass qui correspond au compartiment central surélevé du horst.

Des échanges latéraux existent entre les différents compartiments, et notamment entre les sables du Maastrichtien profonds au droit du compartiment de Diass, et ceux du compartiment de Pout.

Des échanges existent également entre le Maastrichtien superficiel du horst de Diass, et les calcaires du Paléocène des compartiments adjacents (compartiments de Sébikotane et de Pout).

Dans certains secteurs de la zone d'étude, des formations peu perméables sont présentes entre les calcaires du Paléocène et le Maastrichtien sous-jacent.

La puissance du Maastrichtien est très importante dans la zone d'étude. De précédentes études ont reconnu qu'en profondeur les sables du Maastrichtien deviennent moins perméables.

Pour représenter ce système hydrogéologique, une discrétisation verticale en couches doit être adoptée. Le choix d'une discrétisation en 4 couches a été fait pour le modèle du horst de Diass :

- La première couche représente les calcaires du Paléocène sur les compartiments de Pout et de Sébikotane, et les sables du Maastrichtien superficiels sur le compartiment de Diass. Au sud du compartiment de Pout, dans le secteur de Mbour, cette couche englobe également les sables Quaternaires qui sont aquifères et en continuité hydraulique avec les calcaires du Paléocène sous-jacents.
- La seconde couche représente la formation de séparation peu perméable entre les calcaires Paléocène et les sables du Maastrichtien, là où cette formation est présente. Là où cette formation est absente, cette seconde couche est quand même définie, et représente les sables du Maastrichtien sur une épaisseur de 1 mètre environ.

- La troisième couche représente les sables du Maastrichtien dans la partie superficielle. Dans le compartiment de Diass, cette couche représente les formations du Maastrichtien également, puisque seul le Maastrichtien est représenté dans ce compartiment.
- La quatrième couche représente les sables du Maastrichtien profonds et peu aquifères.

Le tableau suivant récapitule les formations représentées par les 4 couches du modèle, pour les différents compartiments du système du Horst de Diass.

*Tableau 2 : Correspondances entre les couches du modèle et les formations géologiques présentes dans le système du Horst de Diass*

| Compartiment | Sébikotane | Diass | Pout Sud | Pout Nord | Thiès |
|---|---|---|---|---|---|
| **Couche 1** | Calcaires Paléocène | Sables Maastrichtien | Calcaires Paléocène | Calcaires Paléocène | Calcaires Paléocène |
| **Couche 2** | Formation de séparation Maastr. /Paléo. ou Maastrichtien | Sables Maastrichtien | Formation de séparation Maastr. /Paléo. ou Maastrichtien | Formation de séparation Maastr. /Paléo. ou Maastrichtien | Formation de séparation Maastr. /Paléo. ou Maastrichtien |
| **Couche 3** | Sables Maastrichtien | Sables Maastrichtien | Sables Maastrichtien | Sables Maastrichtien | Sables Maastrichtien |
| **Couche 4** | Sables Maastrichtien | Sables Maastrichtien | Sables Maastrichtien | Sables Maastrichtien | Sables Maastrichtien |

L'extension horizontale du modèle a été définie à partir des cartes piézométriques existantes, et en fonction des objectifs de modélisation.

En effet, l'objectif d'utilisation du modèle hydrogéologique étant la réalisation de scénarios d'exploitation faisant varier les prélèvements en eau souterraine, il est important que les limites du modèle ne soient pas situées trop proches des centres de pompage importants.

La figure suivante présente l'extension sélectionnée.

*Figure 4 :Délimitation de l'extension du modèle hydrogéologique.*

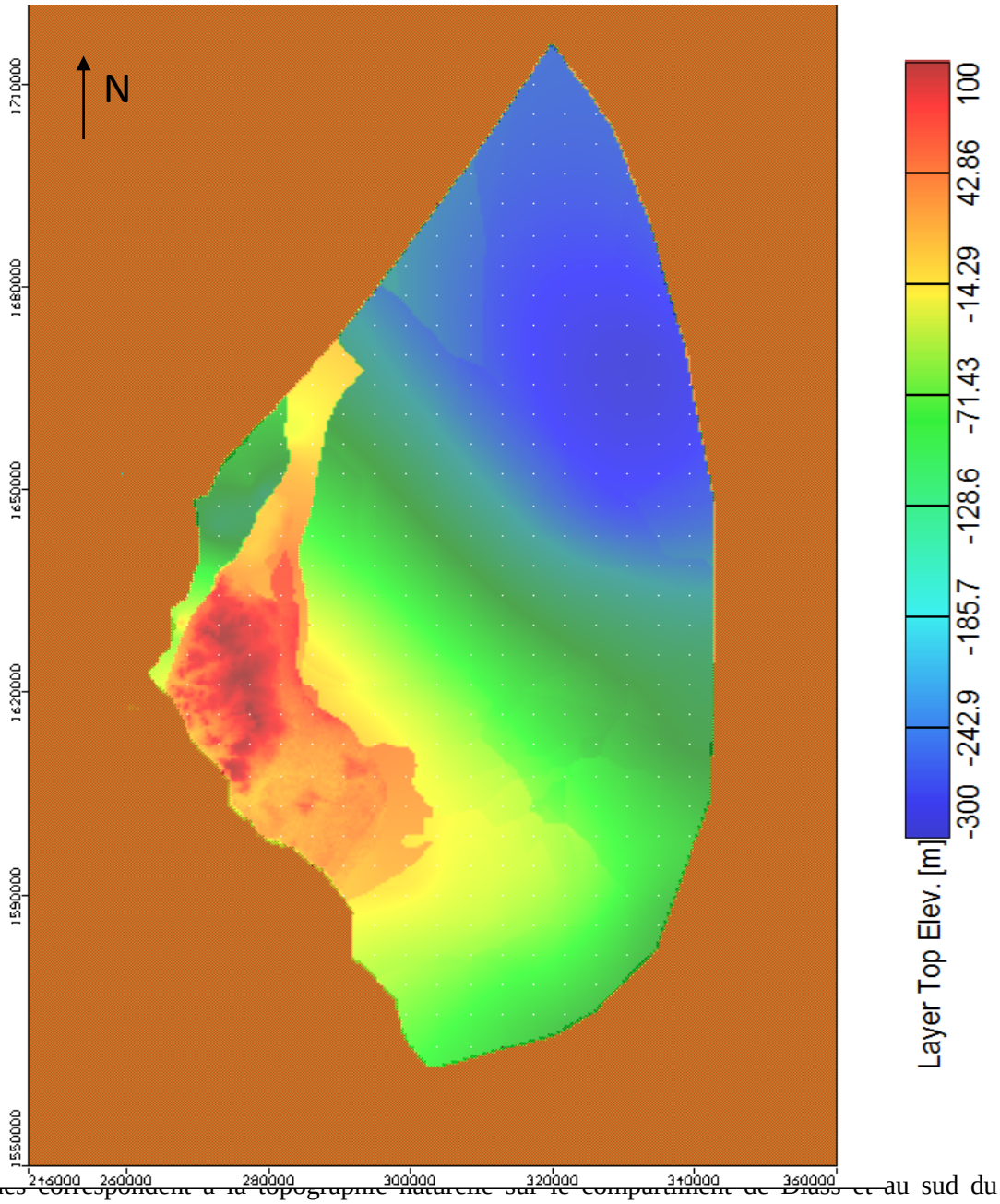
Les échanges avec l'océan sont pris en compte par des conditions aux limites spécifiques décrites plus loin.

## III.2 Géométrie du modèle

Les cotes des toits et murs des 4 couches du modèle ont été définies par interpolation des données disponibles pour les formations géologiques concernées. Elles sont :

### III.2.1 Topographe

La figure suivante présente les altitudes du toit du modèle :

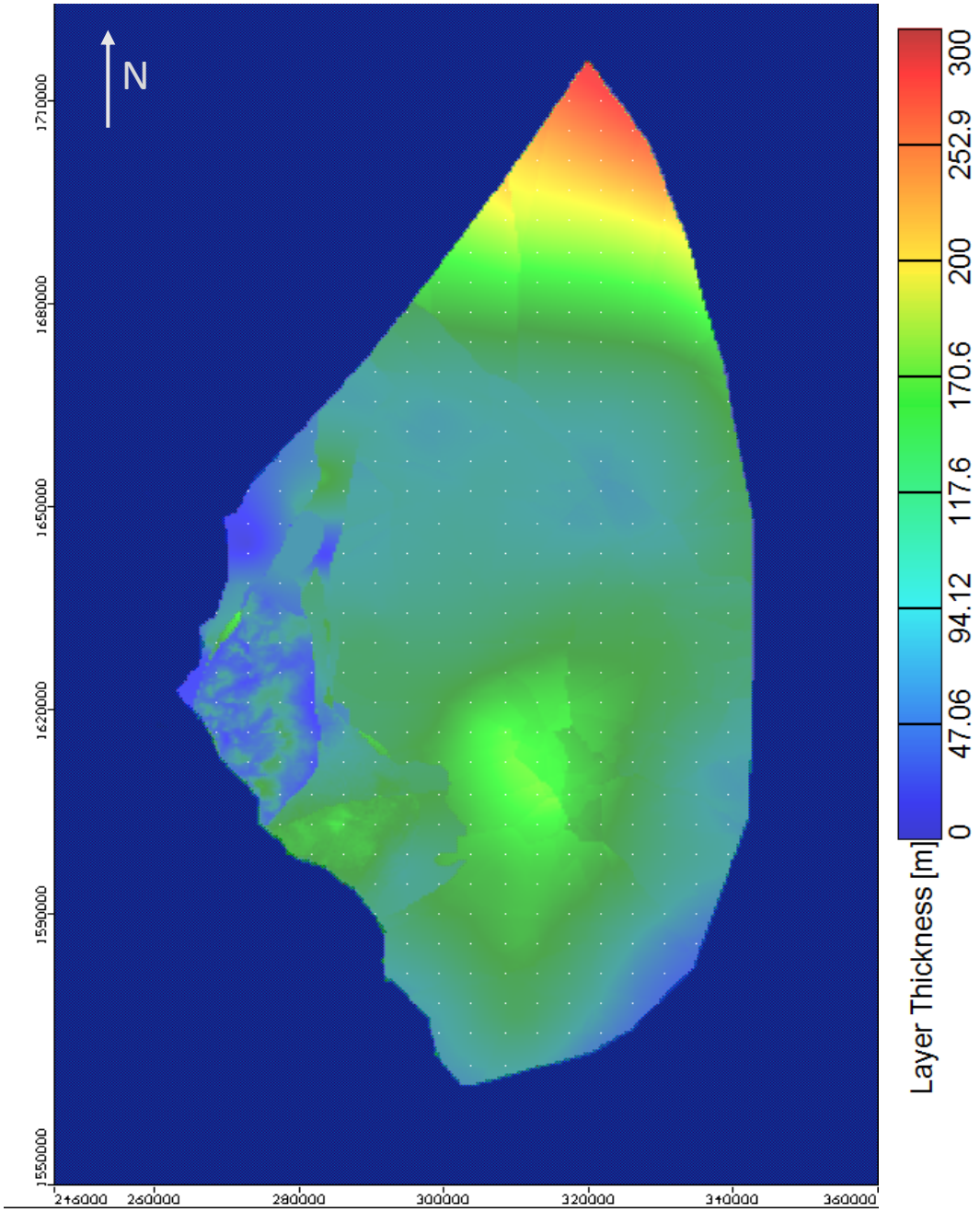


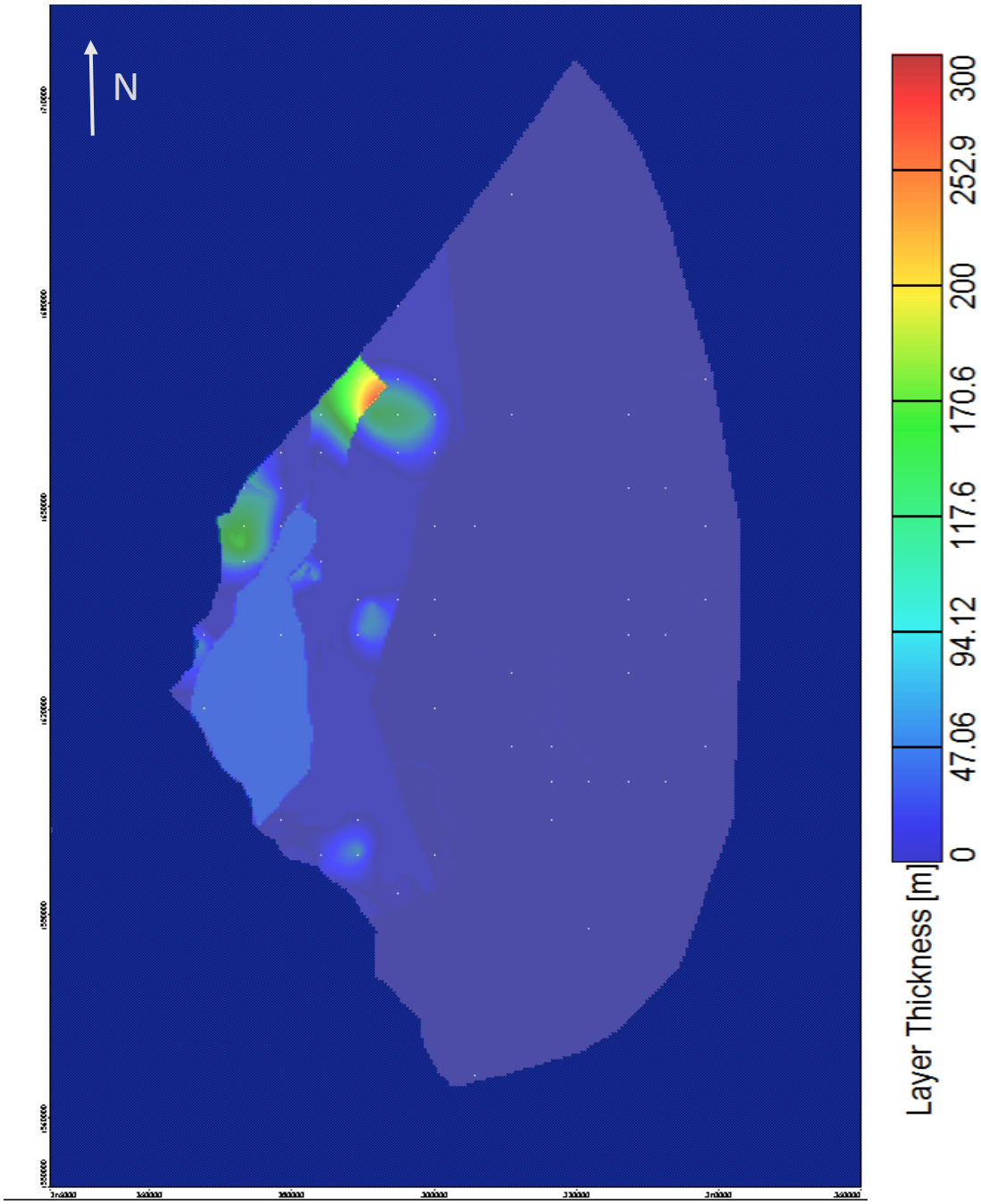

Ces altitudes correspondent à la topographie naturelle sur le compartiment de Diass et au sud du compartiment de Pout. Ailleurs, elles sont issues de l'interpolation des données géologiques.

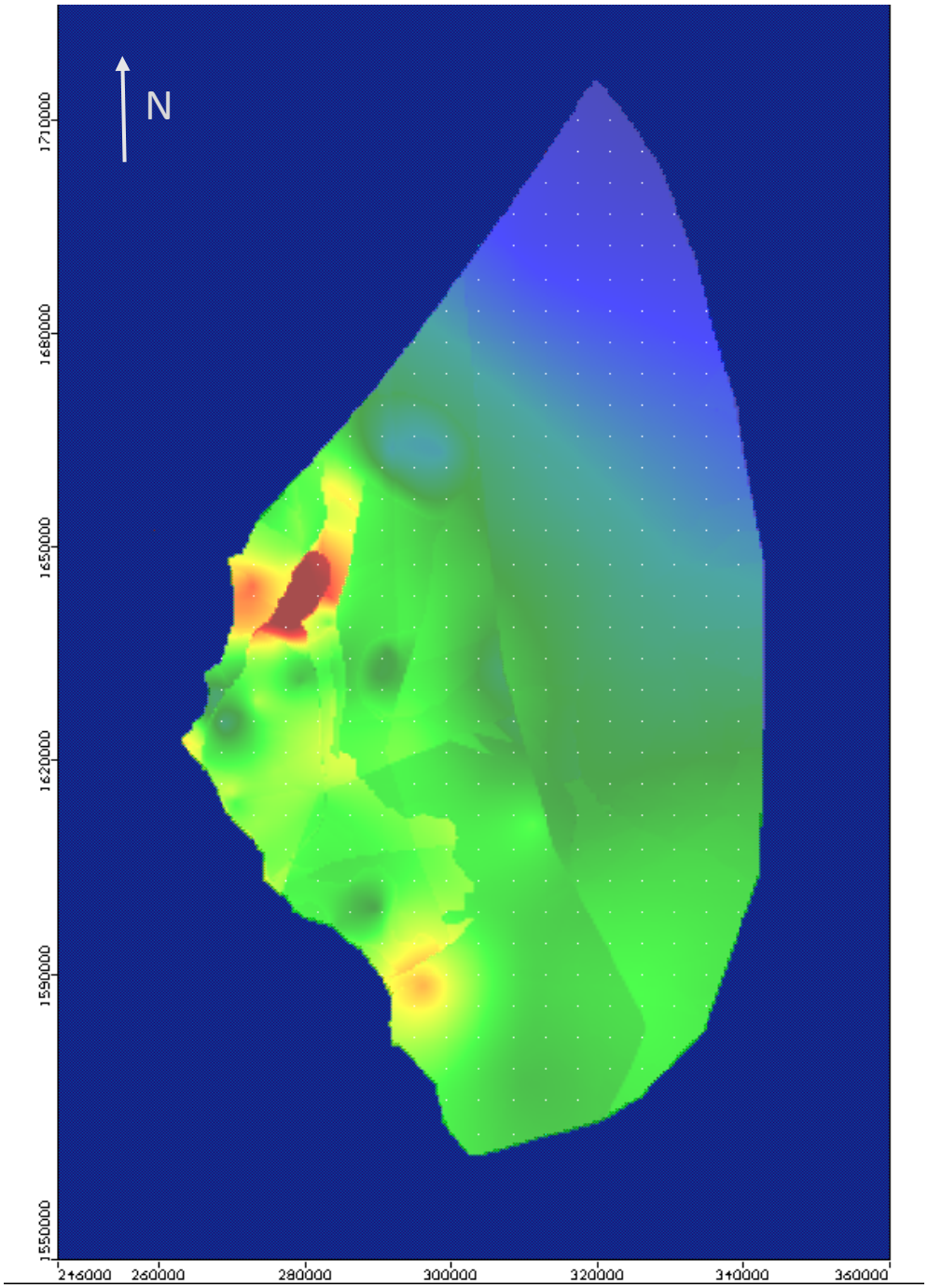
Ces altitudes varient de 100 m environ dans le compartiment de Diass, à -300 m au nord du modèle, où les calcaires du Paléocène sont sous couverture des marnes Eocènes épaisses.

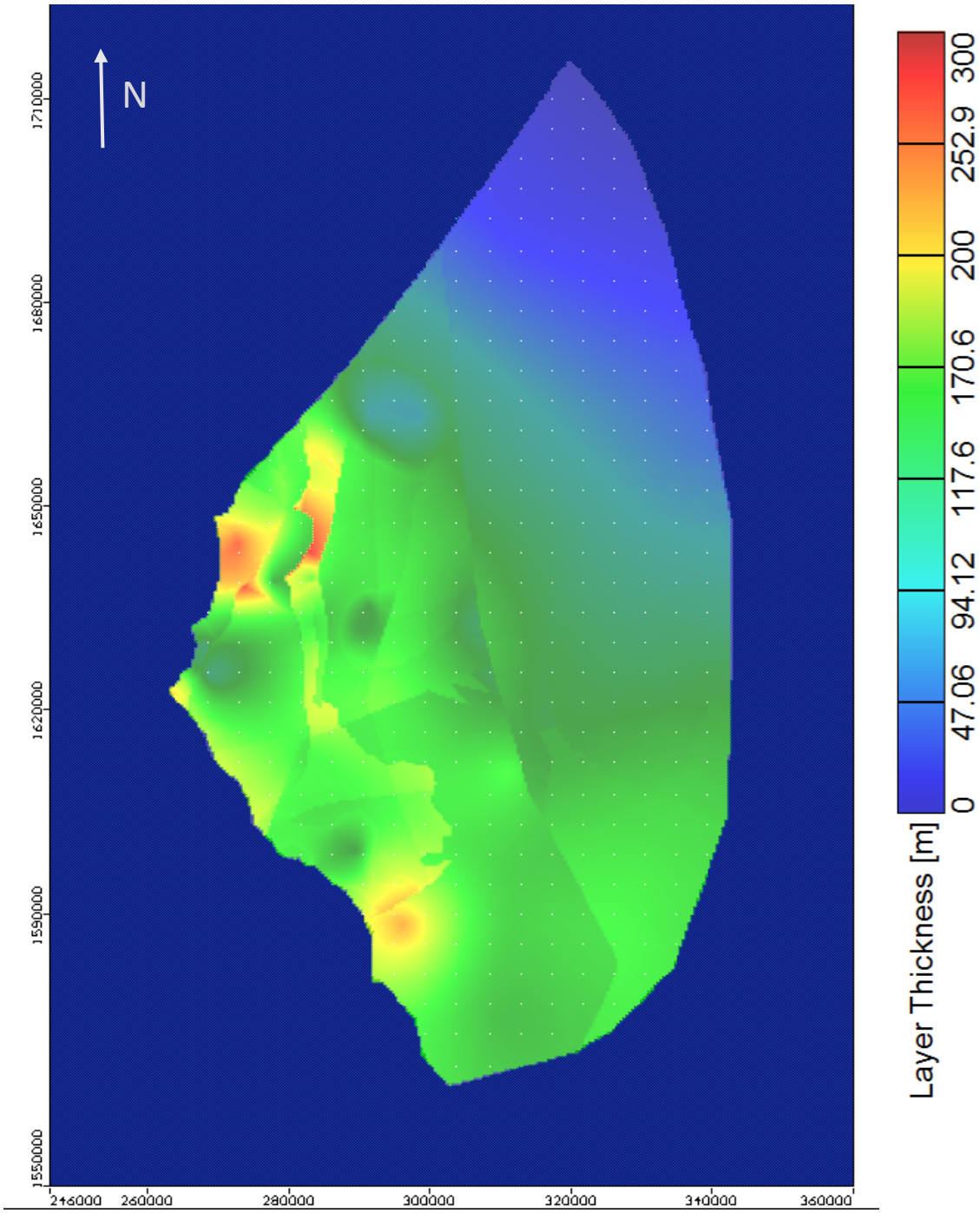
### III.2.2 Epaisseur des couches

Les figures suivantes présentent les épaisseurs des quatre couches du modèle, depuis la couche la plus superficielle à la plus profonde.

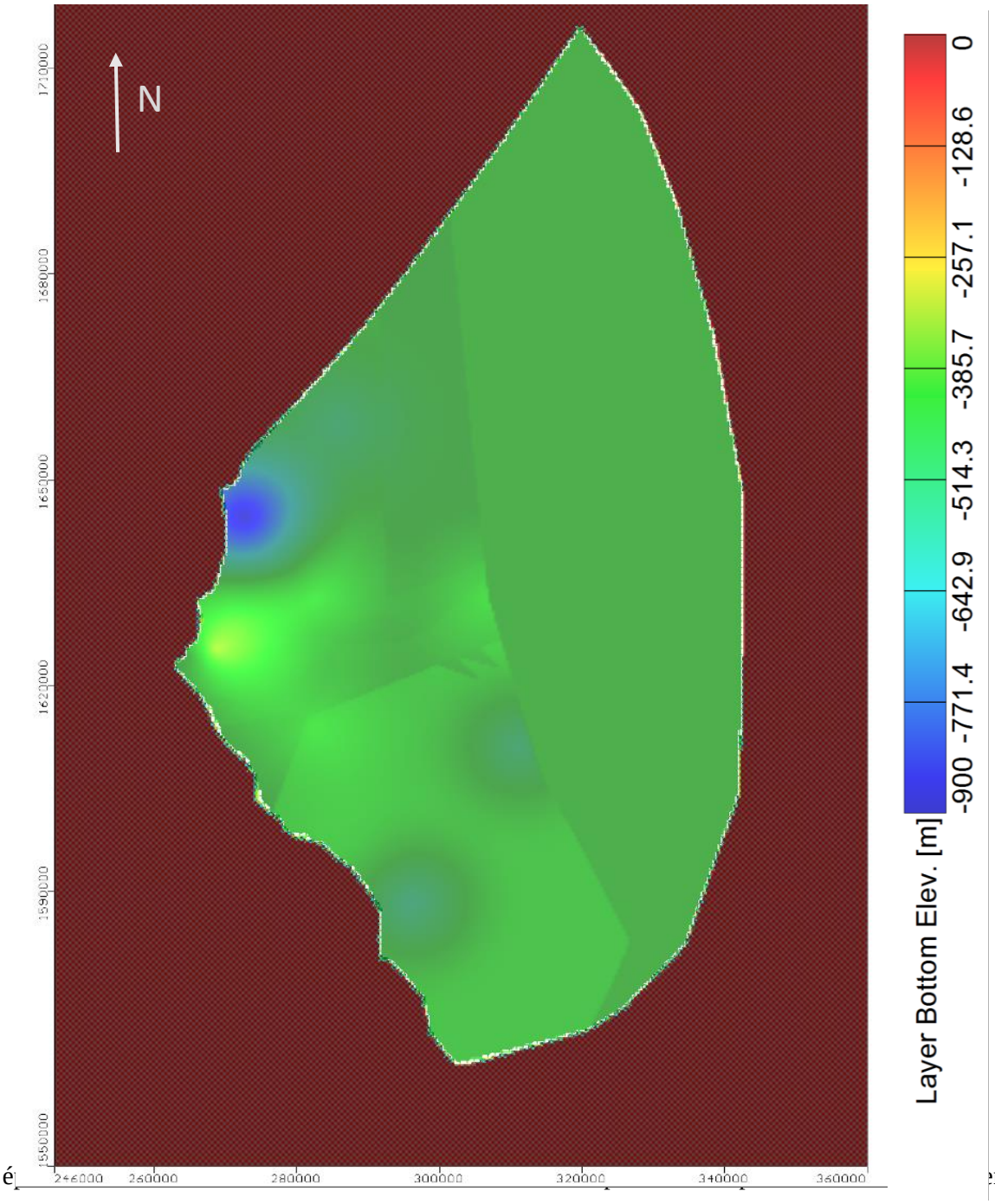



N
Layer Thickness [m]
0
47.06
94.12
117.6
170.6
200
252.9
300


N
1710000
1680000
1650000
1620000
1590000
1550000
240000
260000
280000
300000
320000
340000
360000
Layer Thickness [m]
0
47.06
94.12
117.6
170.6
200
252.9
300




La figure suivante présente les cotes de la base du modèle, c'est-à-dire du mur de la quatrième couche.




Les é[illegible]en partie nord-est de la zone modélisée, et les épaisseurs les plus importantes au droit de la partie nord du compartiment de Diass.

## III.3 **Discrétisation temporelle**

Le modèle hydrogéologique du Horst de Diass est construit pour fonctionner en régime transitoire, c'est-à-dire en prenant en compte les évolutions temporelles du système hydrogéologique étudié.

En effet, le système du Horst de Diass présente un fort déséquilibre quantitatif, mis en évidence par une baisse des niveaux piézométriques continue depuis les années 1970l sur une grande partie de l'extension du système aquifère. La reproduction de cette caractéristique par le modèle ne peut se faire que par l'utilisation du régime transitoire. Heureusement, on dispose de nombreuses données de prélèvements et de suivis piézométriques sur la période 1970-2015, qui permettent de mettre en œuvre les simulations en régime transitoire et de réaliser le calage des paramètres du modèle en régime transitoire. La mise en œuvre de simulations en régime transitoire nécessite une discrétisation temporelle sur la période de simulation sélectionnée. Pour le modèle hydrogéologique du Horst de Diass, un pas de temps mensuel a été adopté, afin de permettre la représentation des variations saisonnières de la recharge pluviométrique et de la piézométrie sans entrainer des temps de calcul trop longs.

## III.4 Conditions aux limites

Les conditions aux limites utilisées sont de différents types :

- La limite Est est une limite de type flux nul, c'est-à-dire qu'aucun flux d'eau ne peut traverser cette limite dans un sens ou l'autre. Cela correspond à une barrière étanche, et est cohérent avec une baisse de la productivité des formations aquifères vers l'Est, même s'il est reconnu que l'aquifère du Maastrichtien s'étend au-delà de cette limite à l'échelle du Sénégal. La limite ouest du modèle, positionnée au niveau de la faille de William de Ponty et de la faille de Cayar, correspond également à une limite à flux nuls, du fait de l'absence d'échanges latéraux dans cette zone.
- Les limites Ouest le long du littoral, au nord et au sud du système du horst de Diass, sont des limites de type « General Head Boundary ». Ce type de limite est plus souple qu'une limite à charges imposée, et permet de rendre compte de la présence d'une charge imposée à une certaine distance de la limite géographique du modèle, et de terrains potentiellement peu perméables entre la limite géographique et la limite à charge imposée. Dans le cas présent la charge utilisée pour cette limite est fixée à 0 m, c'est-à-dire au niveau moyen de la mer.

La figure suivante présente la localisation de ces deux types de limites :

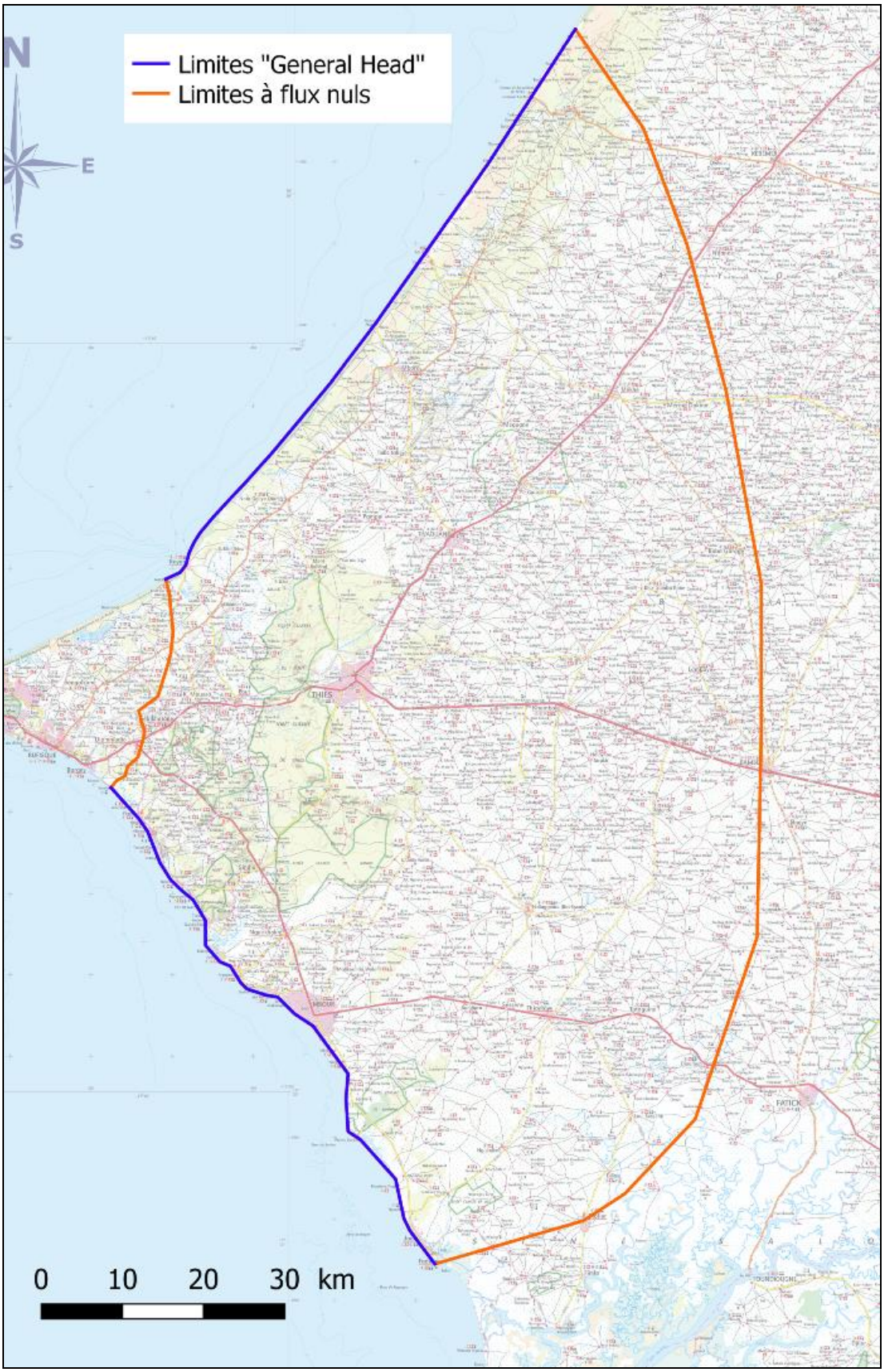
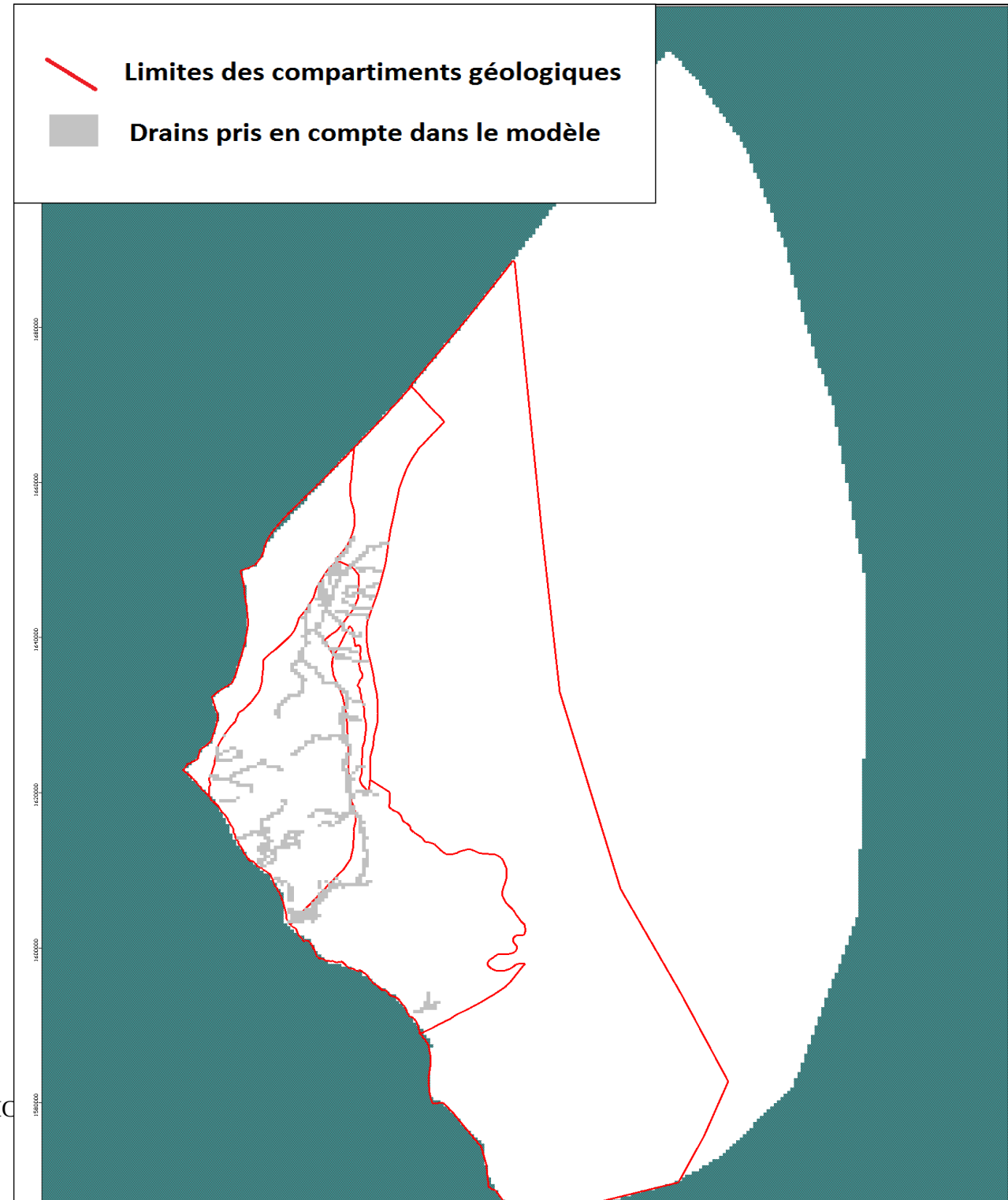



*Figure 11 : Conditions aux limites en bordure du modèle (couche1).*

D'autres conditions aux limites spécifiques sont utilisées à l'intérieur du modèle, afin de créer des entrées d'eau et des sorties d'eau à l'intérieur de son extension. Il s'agit de conditions aux limites de types « Drains » d'une part, et de la recharge pluviométrique d'autre part.

- Les conditions aux limites de type drain sont utilisées au droit de certains cours d'eau et zones humides pérennes ou non pérennes. Ces conditions aux limites permettent de faire en sorte qu'un débit sortant de la nappe soit généré dès que le niveau piézométrique simulé dépasse la cote topographique. Les drains pris en compte dans le modèle correspondent au réseau hydrographique majoritairement non pérenne, et pouvant être en relation hydraulique avec la nappe supérieure. La figure suivante présente la localisation des drains pris en compte dans le modèle.



- La recharge pluviométrique est appliquée sur la surface du modèle, pour représenter les apports d'eau à la nappe par infiltration de l'excédent pluviométrique, ou réinfiltration du ruissellement de surface en saison pluvieuse. Une zonation de la recharge a été utilisée et modifiée à plusieurs reprises lors du calage. La définition initiale des zones est basée sur les types de sols et la géologie rencontrés en surface. La figure suivante présente la répartition des zones de recharge, et le tableau suivant présente les valeurs de recharges moyennes retenues pour le régime permanent par zones, à l'issue de la phase de calage en régime permanent du modèle.

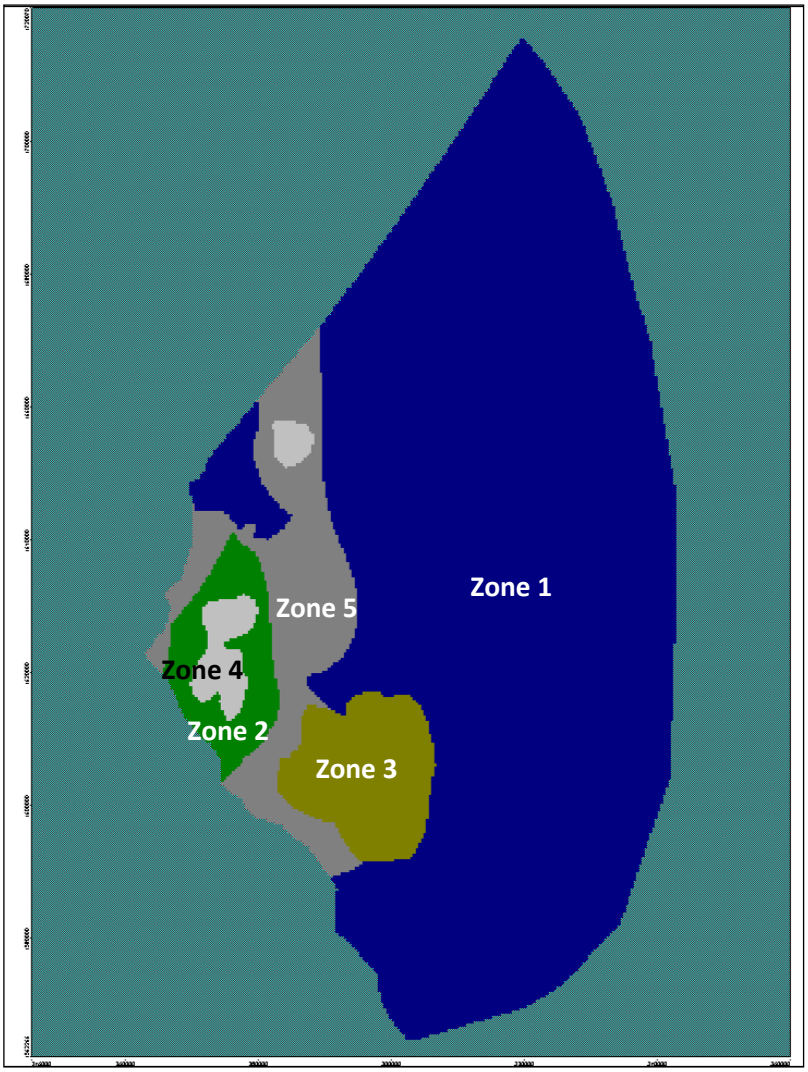



*Figure 13 : Répartition des zones de recharges du modèle hydrogéologique.*

*Tableau 3 : Recharges annuelles des zones du modèle hydrogéologique en régime permanent.*

| Zone | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|---|---|---|---|---|
| Recharge (mm/an) | 0 | 31,9 | 31,9 | 40 | 10 |

Une évaluation des ordres de grandeurs de la recharge moyenne sur la zone a été faite à partir des travaux antérieurs, et en particulier de la modélisation réalisée par COWI-PolyConsult en 2003. Les valeurs obtenues par cette première approche ont été modulées spatialement en fonction des zones de recharge identifiées comme à recharge plus ou moins élevée. Elles ont été également été modulées dans le temps en fonction de la variation de la pluviométrie annuelle. La recharge annuelle ainsi obtenue pour chaque zone est répartie sur les 3 mois correspondant à la saison pluvieuse (juillet, août et septembre).

La figure suivante présente les recharges annuelles prises en compte dans le modèle sur la période de calage 1970-2015.

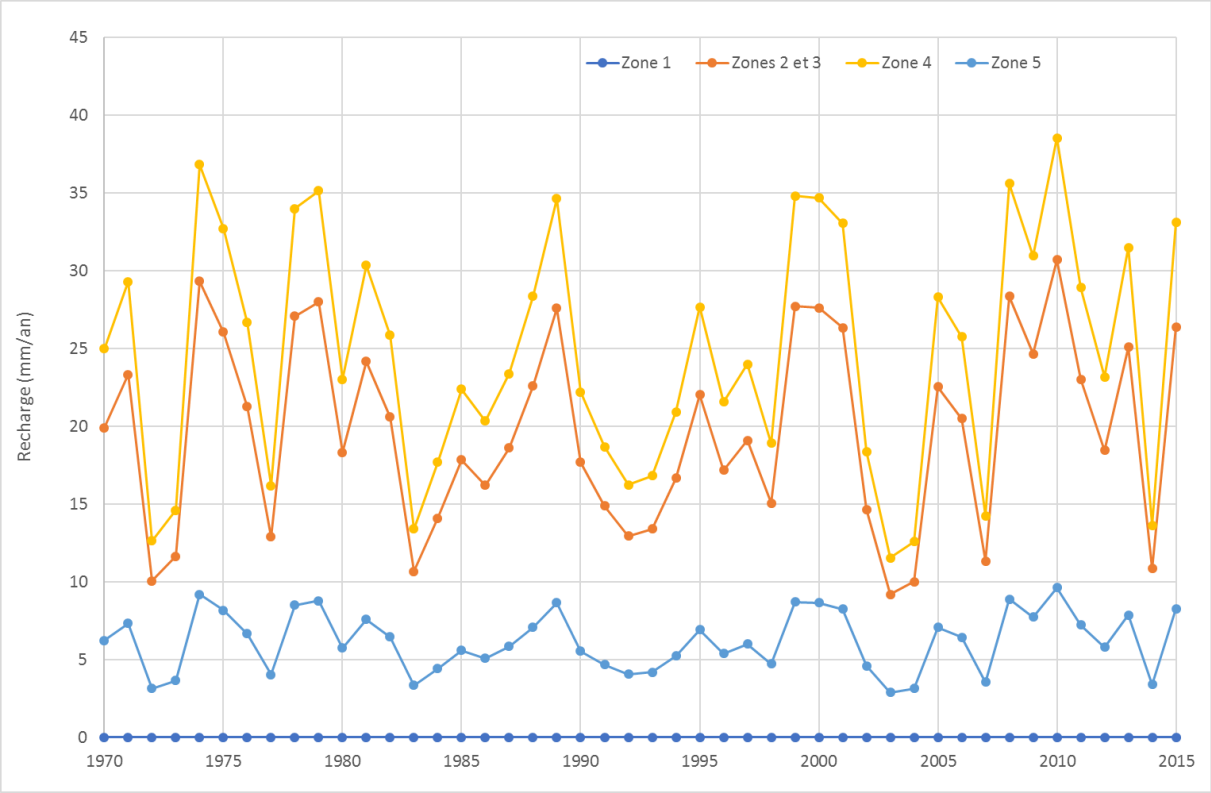



*Figure 14 : Recharges pluviométriques annuelles utilisées en entrée du modèle hydrogéologique pour les différentes zones.*

Les recharges prises en compte dans les zones 2 et 3 sont identiques. La recharge en zone 1 est toujours nulle, en raison d'une couverture de l'aquifère du Paléocène par des formations peu perméables très épaisses.

Les recharges annuelles prises en compte pour les zones 2 et 3, correspondant respectivement à la bordure du massif de Diass, et à la zone d'affleurement du calcaire Paléocène libre de Pout, varient entre 9 et 31 mm/an.

Les recharges de la zone 4, correspondant à la partie centrale du massif de Diass, et au secteur de Mont Rolland, varient entre 12 et 39 mm/an. Les recharges en zone 5, correspondant au compartiment de Sébikotane, et au compartiment de Pout sous couverture varient entre 3 et 10 mm/an.

## III.5 **Prise en compte des prélèvements**

Un travail très important de collecte et d'analyse des données de prélèvements en eaux souterraines a été réalisé dans le cadre du rapport R3. Il a permis de construire une base de données des prélèvements sur la période 1970-2015. Les différents prélèvements en eaux ont été classifiés en fonction de leur usage, avec les 4 classes suivantes définies :

- SONES : pompages pour l'alimentation en eau potable des centres urbains,
- Ruraux : pompages pour l'alimentation en eau potable de localités rurales,
- Privés : pompages sur des forages privés, concernant principalement les usages agricoles,
- Industrie : pompages pour des usages industriels (mines, carrières, industries agroalimentaires…).

A titre indicatif les figures suivantes représentent :

- l'évolution dans le temps des pompages des forages de la SONES ;

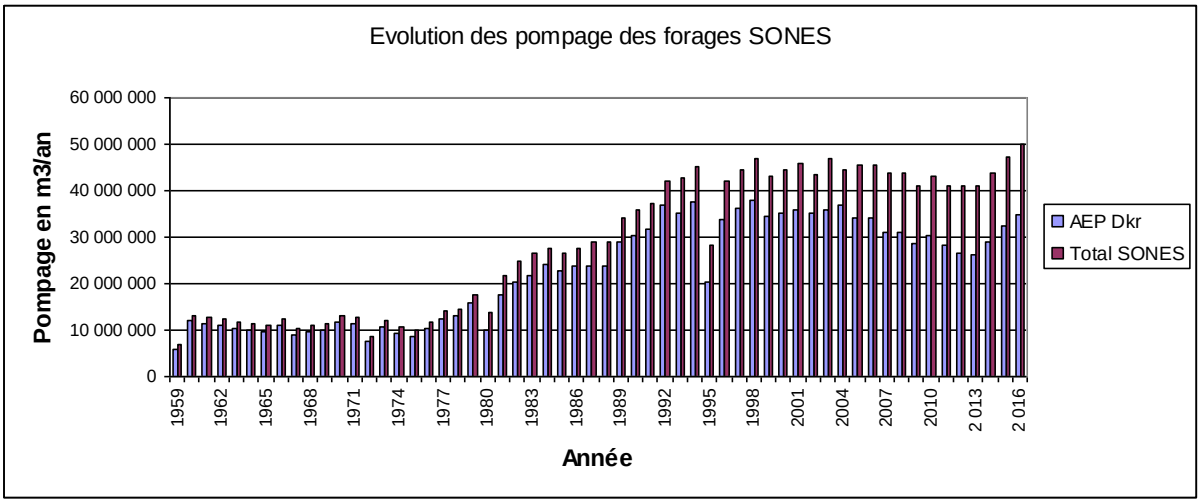



*Figure 15: Evolution des pompages des forages de la SONES*

- La répartition des prélèvements journaliers de 2016 par type d'usage

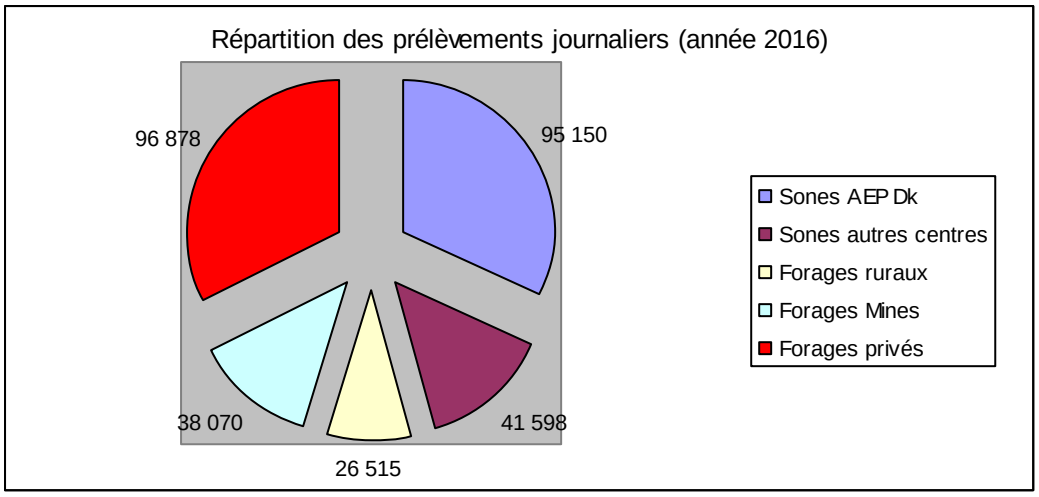



*Figure 16: Répartition des prélèvements journaliers en 2016*

- la localisation des prélèvements pris en compte dans le modèle :

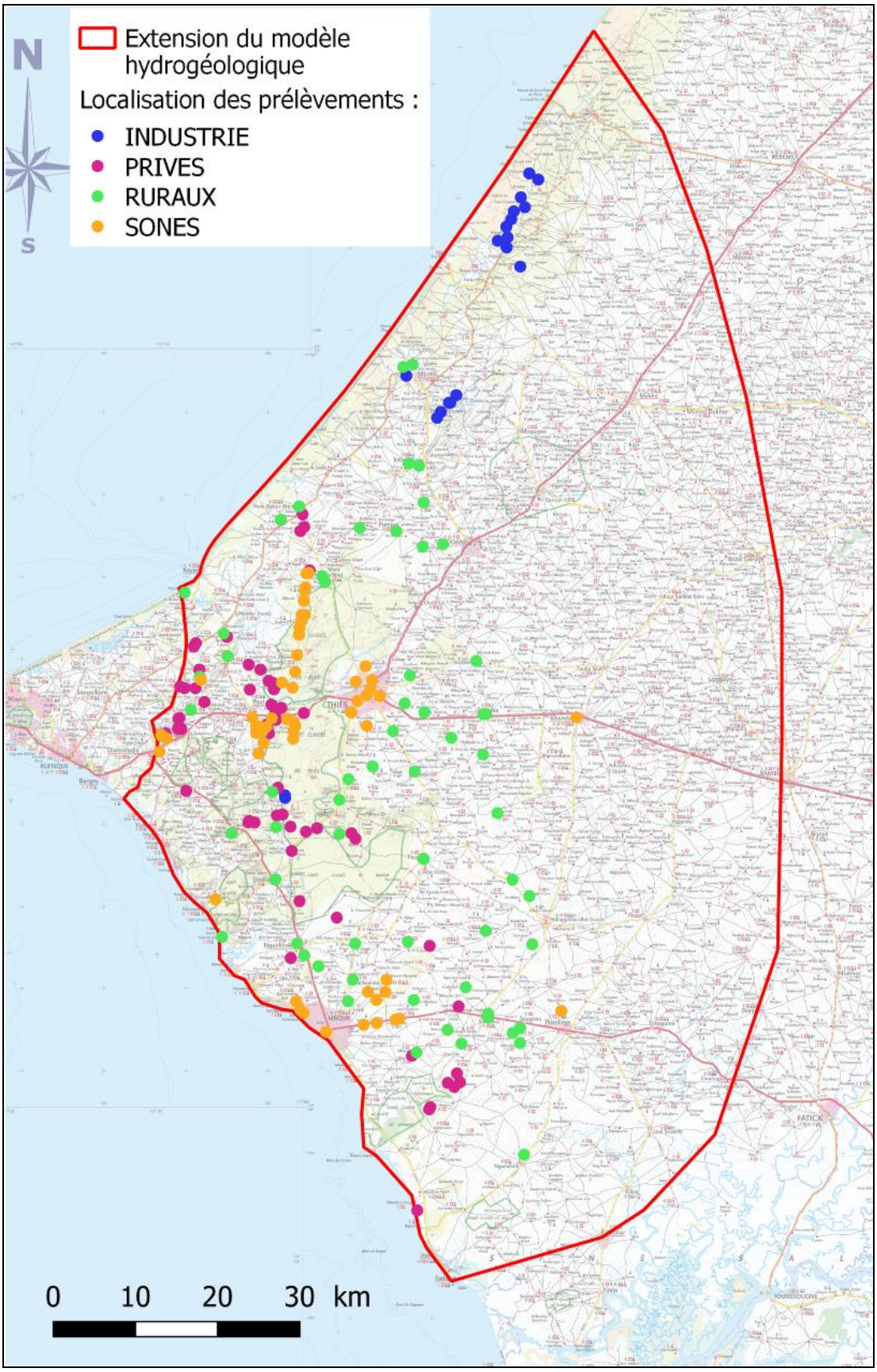



*Figure 17 :Localisation des prélèvements par type d'usage.*

La phase de calage du modèle hydrogéologique est une phase clé dans la construction du modèle, car elle permet de s'assurer que l'on dispose d'un outil qui reproduit de façon adéquat le comportement hydrodynamique du système hydrogéologique réel. Ainsi de la qualité de ce calage obtenu dépendra celle des simulations prospectives qui seront réalisées lors de la phase de simulation des scénarios.

## III.6 **Méthodologie de calage du modèle**

Le calage du modèle hydrogéologique est réalisé en deux étapes :

- Dans un premier temps, le calage est fait en régime permanent. Cette étape correspond à un ajustement de la piézométrie simulée à une date donnée, à laquelle le système est considéré comme stabilisé. Les paramètres ajustés lors de cette première étape sont principalement les perméabilités et les recharges moyennes par zones.
- Dans un deuxième temps, le calage est poursuivi en régime transitoire. Au cours de cette étape, on cherche à reproduire les évolutions piézométriques observées aux points de calage. Dans le cas du Horst de Diass, on dispose de nombreuses chroniques piézométriques enregistrées depuis les années 1970, dont certaines se poursuivent jusqu'à la période actuelle. Lors du calage en régime transitoire, les principaux paramètres ajustés sont les coefficients d'emmagasinement, qui conditionnent la réponse du système en termes de baisse ou de remontée du niveau piézométrique suite à une recharge ou un prélèvement. Les perméabilités et recharges peuvent également être ajustées au cours de cette étape si nécessaire.

La période de calage retenue est la période 1970-2015. Le choix de cette période se justifie d'une part par la disponibilité des données d'entrée (pluviométrie) et de données de calage (piézométrie) au moment de la construction du modèle, et d'autre part par les caractéristiques hydrogéologiques de cette période. En effet, depuis les années 1970 une baisse des niveaux piézométriques est enregistrée sur une grande partie du système aquifère du Horst de Diass, et la capacité du modèle hydrogéologique à reproduire correctement ces évolutions est un gage de robustesse vis-à-vis de l'utilisation future de ce modèle.

Par ailleurs, le fait de ne pas intégrer les années les plus récentes (2016 et 2017) dans la période de calage ne modifie pas l'ajustement des paramètres hydrodynamiques, car les variations piézométriques enregistrées entre 2015 et 2017 sont très faibles en comparaison de celles enregistrées entre 1970 et 2015.

Lors du calage en régime transitoire, il n'a pas toujours été possible d'obtenir un bon calage sur l'ensemble de la période de simulation 1970-2015, pour certains piézomètres. Dans ce cas, on privilégie un calage de bonne qualité sur la période récente, afin d'obtenir des niveaux simulés

acceptables pour l'initialisation des simulation prospectives sous scénarios de prélèvements et de recharge.

Cette approche se justifie par ailleurs par le fait que les évolutions piézométriques simulées dans le modèle du Horst de Diass sont fortement dépendantes des prélèvements imposés dans le modèle, et qu'on suppose ces prélèvements mieux connus sur la période récente que sur les années les plus anciennes de la période de simulation.

## III.7 **Données de calage**

Les données de calage sont constituées des données piézométriques disponibles pour les aquifères du système hydrogéologique du Horst de Diass.

Pour le calage en régime permanent, on utilise les cartes piézométriques disponibles pour 1971, pour le Paléocène et le Maastrichtien. Ces cartes sont présentées dans le rapport R3 (rapport de synthèse des investigations hydrogéologiques et hydrochimiques) de la présente étude.

Les données piézométriques acquises avant 1970 aux piézomètres pour lesquels on dispose d'un historique suffisamment long sont également utilisées pour calculer des niveaux piézométriques moyens à cette date aux points de suivi. Ces données permettent de contrôler le calage fait à partir de la carte piézométrique, les courbes piézométriques tracées dans les secteurs sans données ponctuelles étant toujours interprétatives.

La figure suivante présente une carte des niveaux piézométriques ponctuels utilisés pour finaliser le calage en régime permanent sur la situation de 1970.

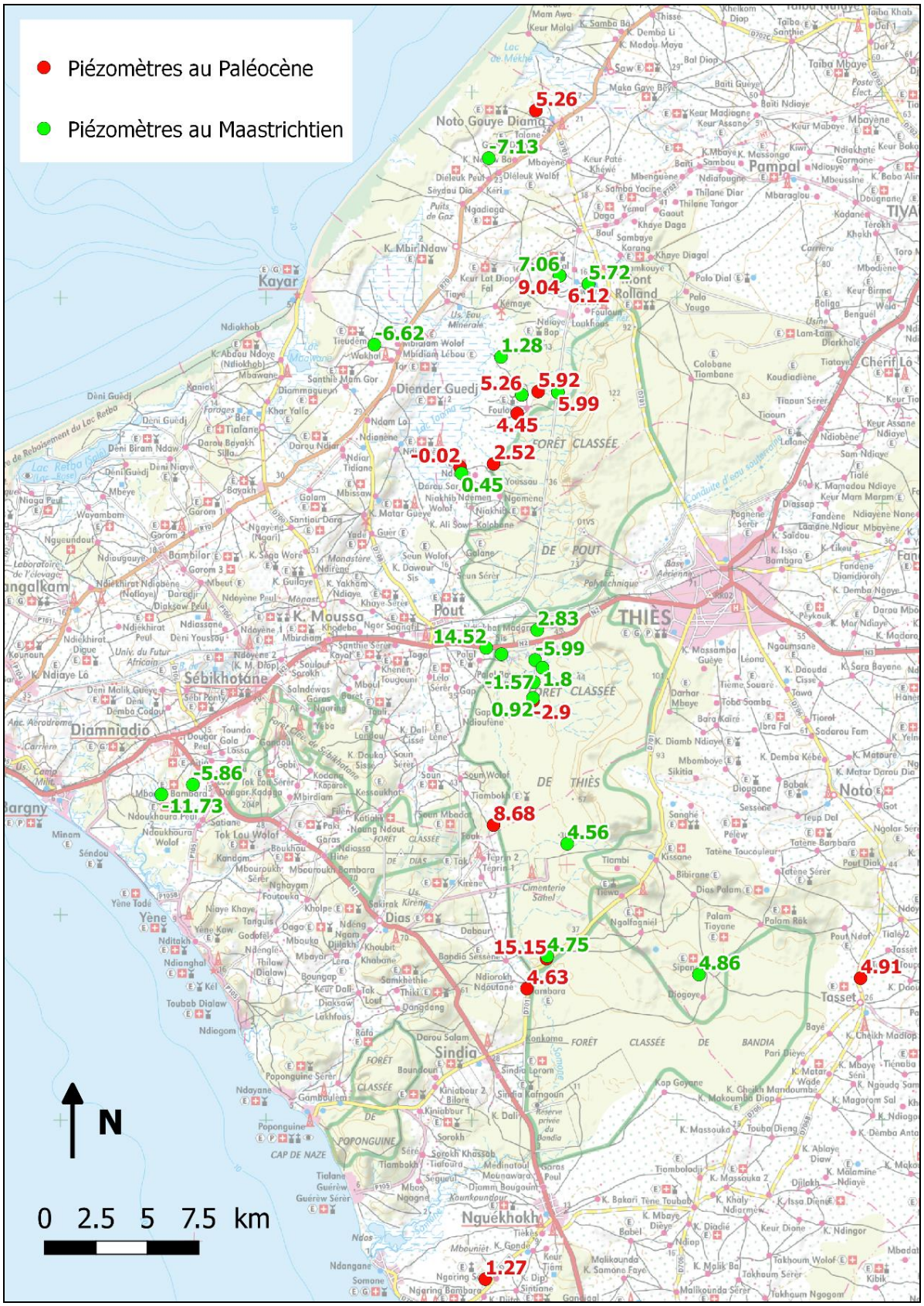



*Figure 18: Niveaux piézométriques mesurés pour la période avant 1970.*

Pour le calage en régime transitoire, les données de suivi continu sur les piézomètres du Paléocène et du Maastrichtien depuis les années 1970 ont été utilisées. Ces données sont présentées en détail au paragraphe suivant.

Certains piézomètres ont été écartés du calage, du fait de doutes sur la validité des données enregistrées. En effet, sur certains points les niveaux piézométriques indiqués n'étaient pas cohérents avec les altitudes locales issues du MNT SRTM. Il est possible que les valeurs indiquées correspondent à des profondeurs, et non pas à des niveaux piézométriques. En l'absence de données de nivellement pour transformer ces valeurs, les points concernés ont été retirés du calage en régime transitoire.

Les piézomètres écartés du calage sont : Kopgoyane S1, Kopgoyane S2, SE31M, Tasset P2.

D'autres points ne sont pas retenus pour le calcul des critères de calage, en raison du faible nombre d'observations disponibles sur ces points. Ils sont cependant utilisés pour un ajustement visuel des chroniques piézométriques observées et simulées.

Le nombre de piézomètres finalement retenus est de 55 soit 32 captant le paléocène et 23 le maastrichtien..

La figure suivante présente la localisation de ces piézomètres.

*Figure 19 : Localisation des 55 points de calage du modèle hydrogéologique*

# III.8 Résultats du calage

## III.8.1 Calage en régime permanent

La figure suivante présente la comparaison de la piézométrie simulée début 1970 en régime permanent et de la carte piézométrique établie en 1971 pour l'aquifère du Paléocène et l'aquifère superficiel du Maastrichtien sur le compartiment de Diass.

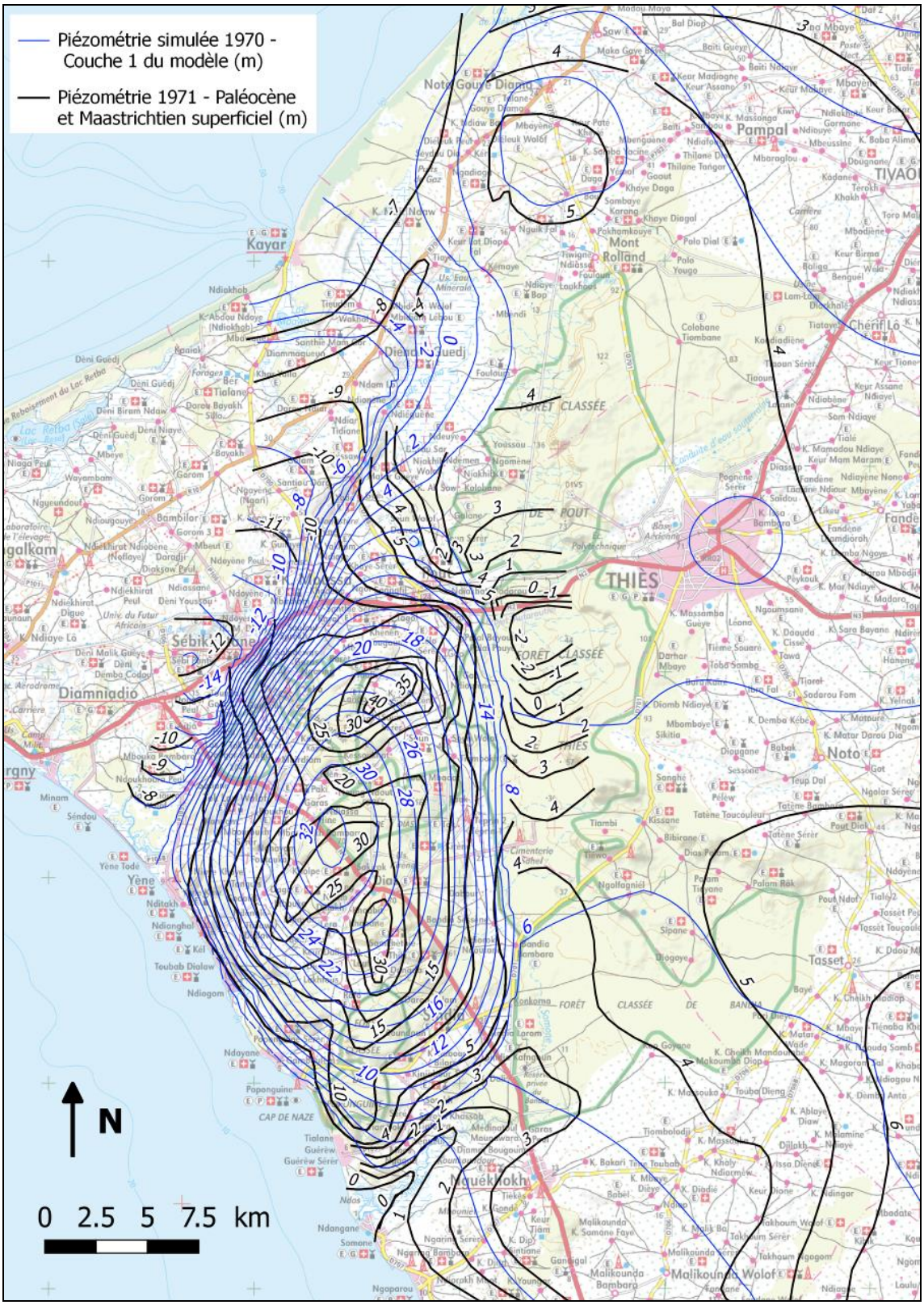



*Figure20: Cartes piézométriques observée et simulée en régime permanent pour les aquifères superficiels, en 1970 (simulation) et en 1971 (observations)*

## III.8.2 Calage en régime transitoire

Le calage en régime transitoire a été fait par modifications successives des paramètres hydrodynamiques, et comparaisons visuelles des chroniques piézométriques simulées et observées.

Les paramètres qui ont été modifiés sont principalement les coefficients d'emmagasinement (en nappe libre et captive). La recharge a également été légèrement modifiée au cours de cette phase. Les perméabilités n'ont pas été modifiées par rapport au calage en régime permanent.

Le calage en régime transitoire a été évalué à la fois par une comparaison visuelle des chroniques piézométriques observées et simulées, et par le calcul de critères de calage intégrant les écarts entre données observées et simulées sur toute la période de simulation.

### III.8.2.1 *Comparaison des chroniques piézométriques observées et simulées*

Les figures suivantes présentent des cas où le modèle a pu reproduire de manière satisfaisante les chroniques de variations piézométriques mesurées :

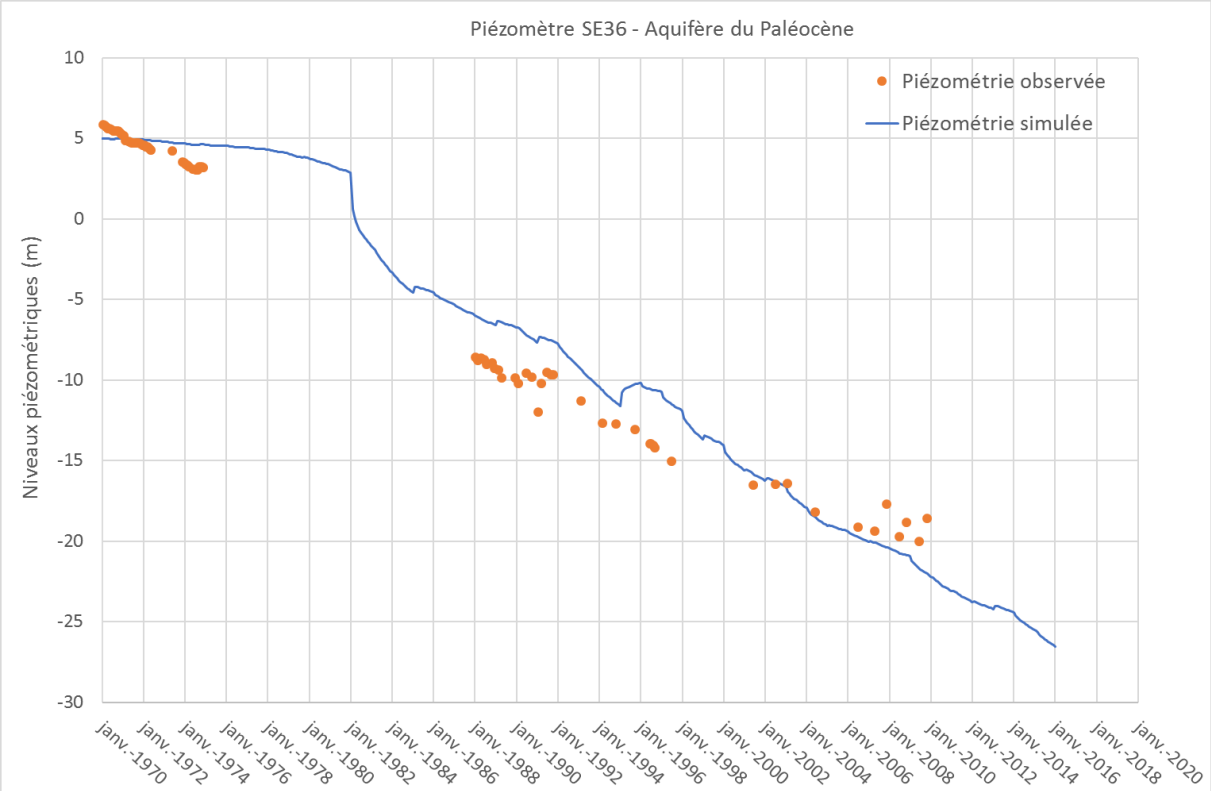



*Figure 21 : Chroniques piézométriques simulée et observée au piézomètre SE36P sur la période 1970-2015.*

Le piézomètre SE36P est localisé au sein du champ captant de Pout Nord, et capte l'aquifère du Paléocène. Les niveaux piézométriques mesurés sont globalement bien reproduits par le modèle tout

au long de la période de calage du modèle, avec une légère sur-estimation dans les années 1980-1990, et une sous-estimation de 1 à 2 m en 2008-2010.

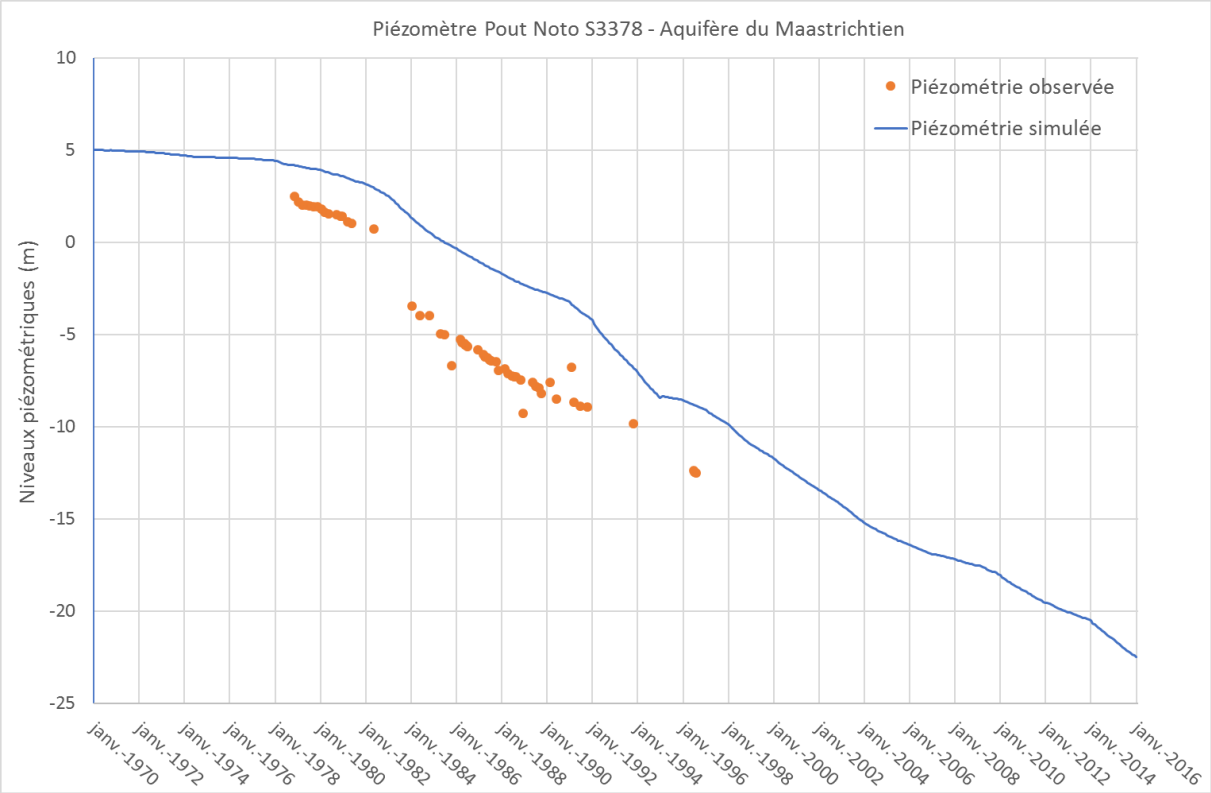



*Figure 22 : Chroniques piézométriques simulée et observée au piézomètre Pout Noto S3378 sur la période 1970-2015.*

Le piézomètre Pout Noto S3378 est localisé en partie nord du champ captant de Pout Nord, et capte l'aquifère du Maastrichtien. Les niveaux piézométriques mesurés sont surestimés de 2 à 5 m par le modèle sur toute la période de calage, et la baisse de la piézométrie enregistrée sur cette période est bien simulée.

Pour d'autres cas, en nombre moins important, les résultats du calage sont moins bon du fait de décalage entre valeurs de piézométrie observée et calculée relativement grande ou tendance d'évolution piézométrique non conforme. Les figures suivantes donnent à titre indicatif quelques de ces cas :

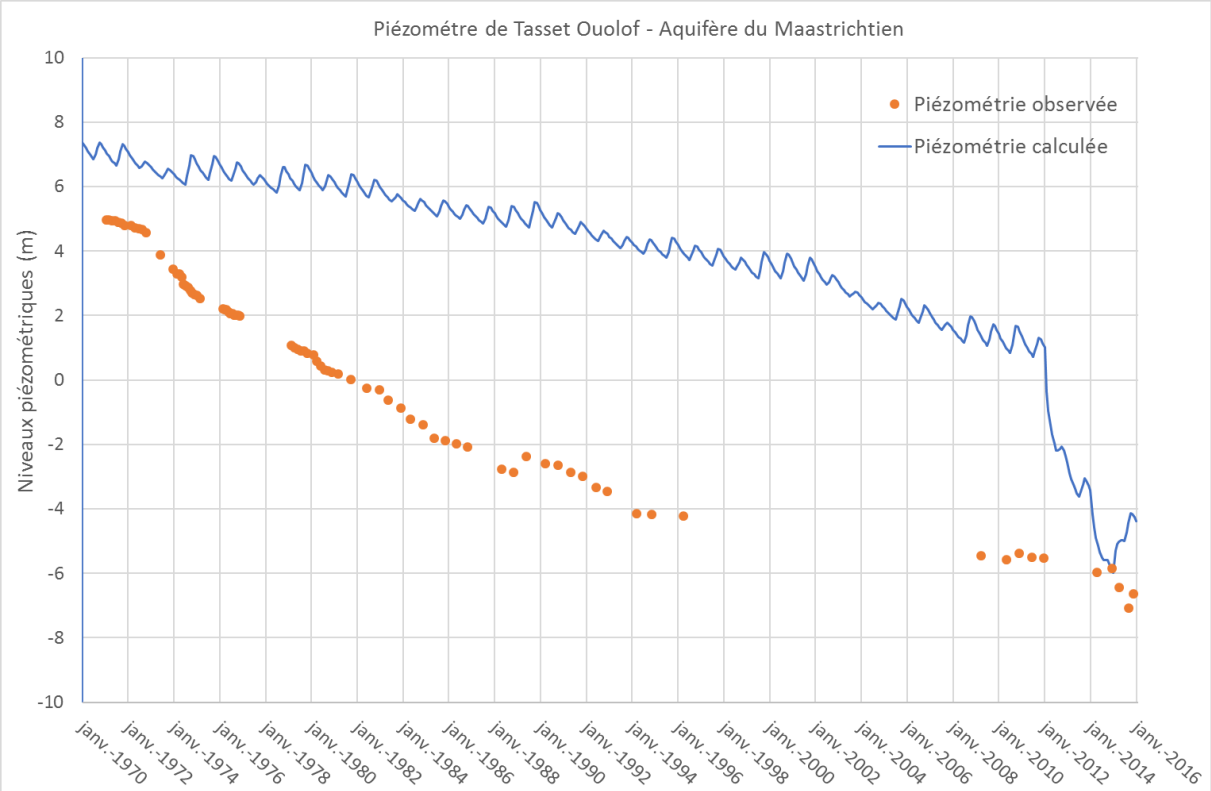



*Figure 23 : Chroniques piézométriques simulée et observée au piézomètre de Tasset Ouolof sur la période 1970-2015.*

Le piézomètre de Tasset Ouolof est situé à proximité du nouveau champ captant de Tasset, et capte l'aquifère du Maastrichtien. Les niveaux piézométriques mesurés en 1971 sont relativement bien reproduits par le modèle, avec une surestimation de 2 m environ. La baisse de la piézométrie simulée entre 1971 et 2011 est beaucoup plus faible que la baisse observée (5 m environ pour la simulation contre. Les niveaux piézométriques simulés baissent ensuite de façon importante à partir de 2012, avec la mise en route des prélèvements sur les 3 forages NDP. Ainsi les niveaux piézométriques simulés en 2014-2015 sont bien reproduits par le modèle.

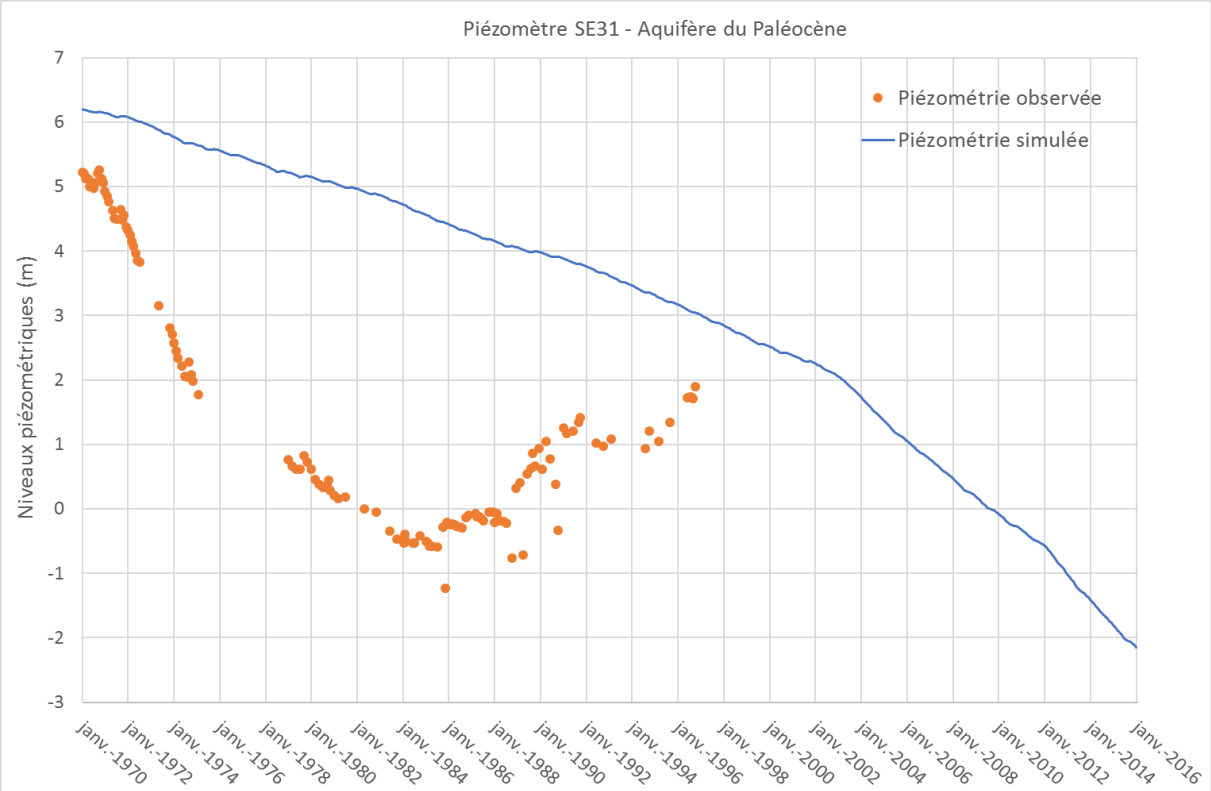



*Figure 24 : Chroniques piézométriques simulée et observée au piézomètre SE31 sur la période 1970-2015.*

Le piézomètre SE31P est localisé dans le compartiment de Pout Sud, à proximité de Bandia, et capte l'aquifère du Paléocène. Les niveaux piézométriques simulés sont assez proches des niveaux observés en 1970, mais l'évolution de la piézométrie entre 1970 et 1996 n'est pas bien reproduite par le modèle. En effet, les observations montrent une baisse de plus de 5 m des niveaux piézométriques de 1970 à 1985, puis une remontée de plus de 2 m des niveaux mesurés entre 1985 et 1996. Cette évolution est constatée sur plusieurs piézomètres de la zone captant le Paléocène (piézomètres de Sipane P9 et Somone), mais n'est expliquée par aucun phénomène particulier. En effet, des variations de recharges ne suffisent pas à expliquer une telle évolution, qui pourrait être liée à des pompages importants dans les années 1970 et 1980, arrêtés ou diminués à partir de 1985.

Aucune information n'ayant pu être trouvée sur des aménagements ou pompages dans la zone susceptible d'influencer les niveaux piézométriques durant cette période, le modèle n'est pas en mesure de reproduire les évolutions observées dans ce secteur.

Les niveaux piézométriques mesurés en 1996 sur ce piézomètre sont légèrement surestimés, de 1 m, par le modèle.

Globalement, le modèle reproduit de façon satisfaisante les niveaux piézométriques observées, et les tendances d'évolution de la piézométrie sur la période 1970-2015.

Certaines zones présentent des surestimations ou sous-estimations des niveaux, cependant de nombreux tests de modification des paramètres hydrodynamiques ont été faits, et le meilleur compromis, permettant d'obtenir un calage acceptable sur l'ensemble du modèle a été retenu.

Dans les secteurs de Bandia et de Notto, on observe des baisses importantes des niveaux observés sur des périodes anciennes, qui ne sont pas correctement reproduites par le modèle. Ces baisses peuvent être liées à des pompages temporaires non recensés et non prises en compte dans la simulation de calage.

#### III.8.2.2 *Critères de qualité du calage aux points de calage*

Les critères de calage utilisés pour la cartographie de la qualité du calage sur la période 1970-2015 sont les erreurs aux moindres carrés (RMSE), calculées à partir des écarts entre données observées et simulées à chaque pas de temps de la simulation. **Les classes suivantes sont considérées pour évaluer la qualité du calage** :

- RMSE **entre 0 et 2,5 m** : **très bon calage**,
- RMSE **entre 2,5 et 5 m** : **bon calage**,
- RMSE **entre 5 et 7,5 m** : **calage moyen**,
- RMSE **supérieur à 7,5 m** : **mauvais calage**.

La figure suivante présente les erreurs RMSE calculées pour les piézomètres captant l'aquifère du Paléocène :

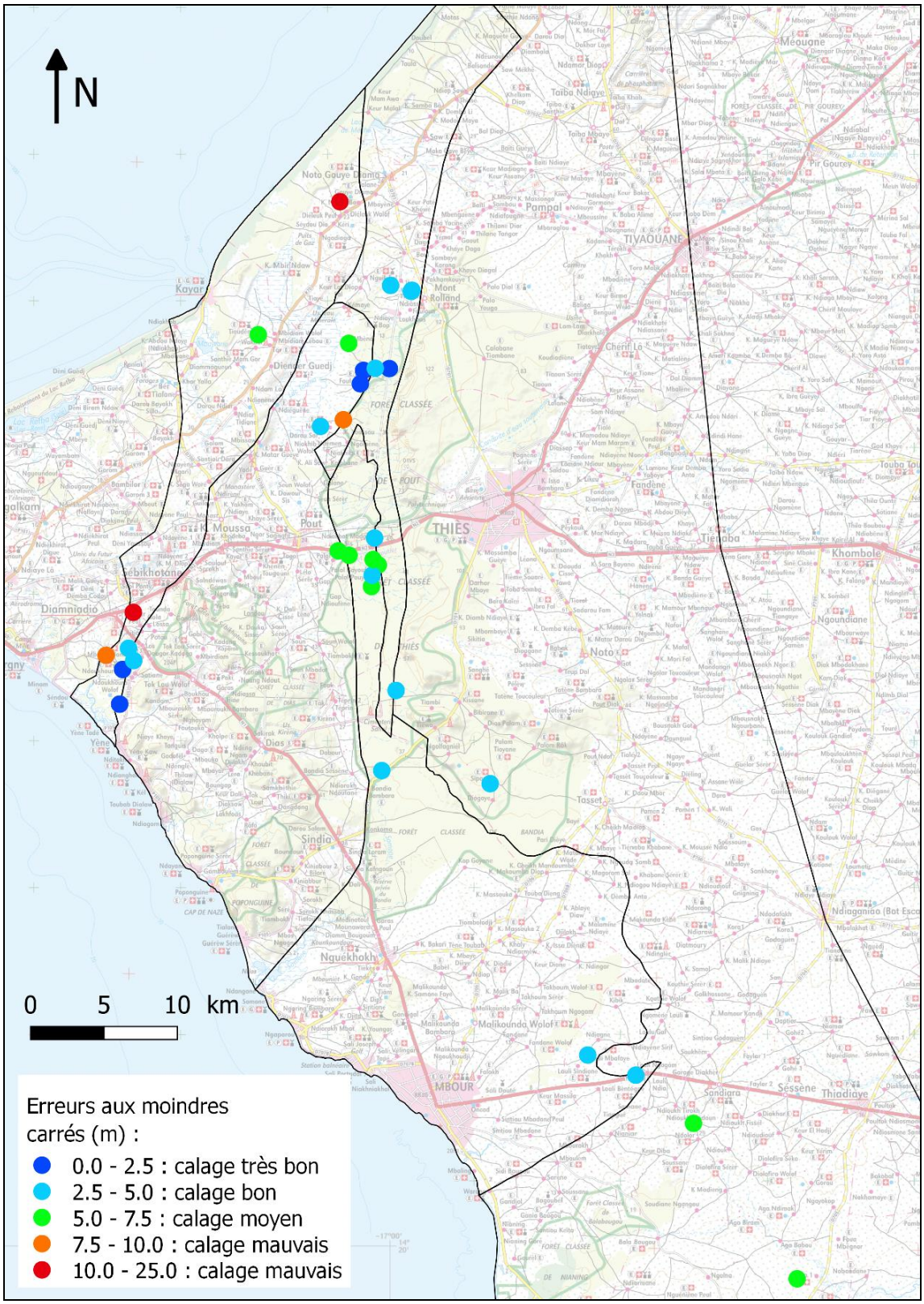



*Figure 25 : Erreurs RMSE calculées aux piézomètres du Paléocène pour la période 1970-2015.*

La répartition des points avec un bon ou un très bon calage est assez homogène spatialement sur l'ensemble du modèle.

La figure suivante présente les erreurs RMSE calculées pour les piézomètres captant l'aquifère du Maastrichtien

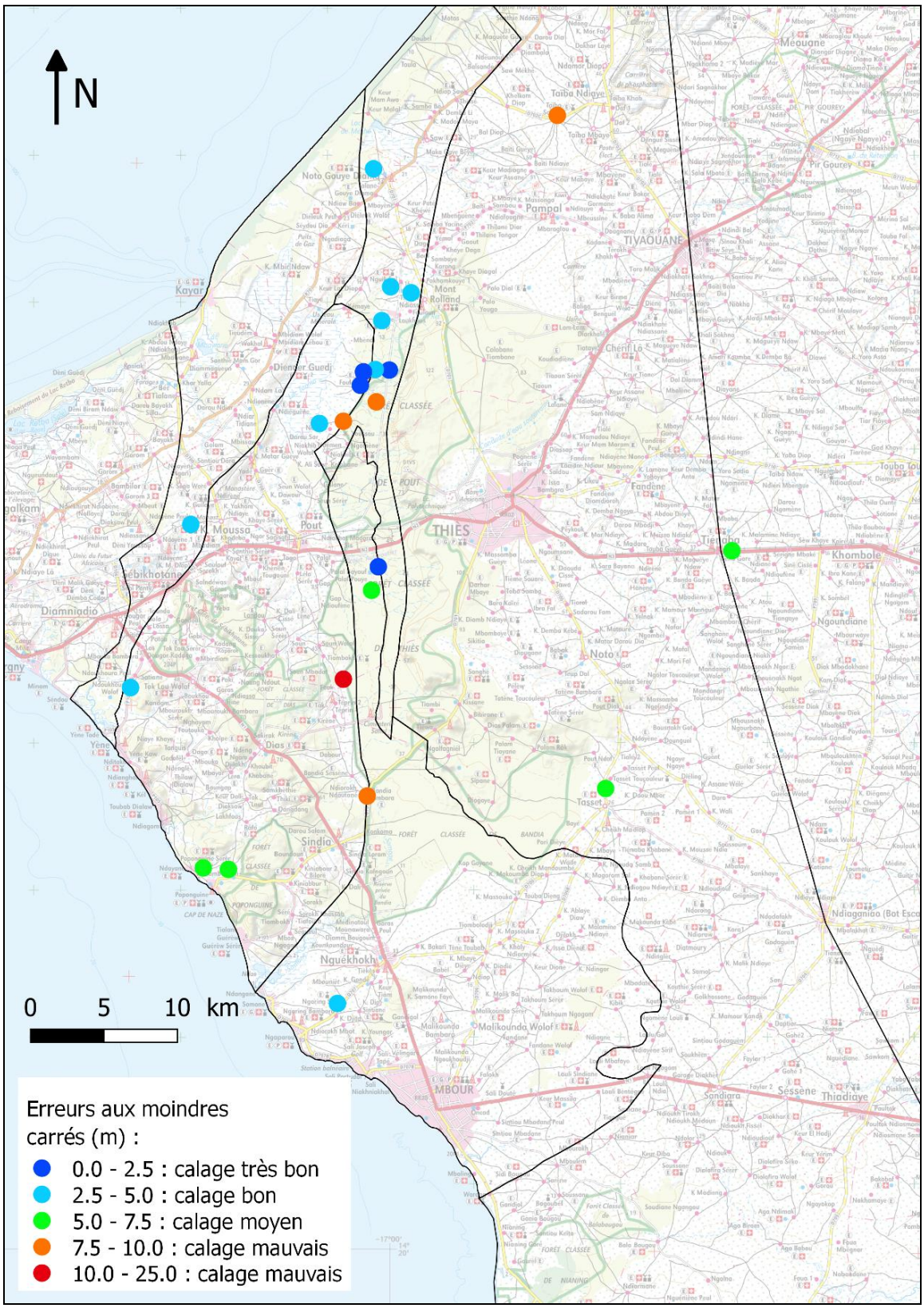



*Figure 26 : Erreurs RMSE calculées aux piézomètres du Maastrichtien pour la période 1970-2015.*

Les points présentant un calage bon ou très bon sont bien répartis sur la surface du modèle, cependant la zone entre Bandia et Pout, sur la partie nord du compartiment de Pout Sud présente des points avec un mois bon calage. Il est notamment compliqué de reproduire le très fort gradient piézométrique observé entre le Maastrichtien superficiel du compartiment de Diass et le Paléocène du compartiment de Pout, en limite est du compartiment de Diass.

Ce fort gradient est probablement lié à la structuration tectonique des compartiments, qui induit de fortes hétérogénéités locales difficiles à reproduire de façon précise dans un modèle de type milieu continu. Cependant les évolutions spatiales de la piézométrie sont bien reproduites à plus grande échelle.

Il faut noter que le modèle ne reproduit pas des écarts piézométriques importants entre l'aquifère du Paléocène et l'aquifère du Maastrichtien, en dehors des zones de pompage. Malgré cette caractéristique, le modèle apparaît être en mesure de reproduire le fonctionnement global de l'hydrosystème du Horst de Diass.

Les figures suivantes présentent les distributions des erreurs RMSE par classe de valeurs, pour l'ensemble des piézomètres, pour les piézomètres du Maastrichtien seul, et pour les piézomètres du Paléocène seul.

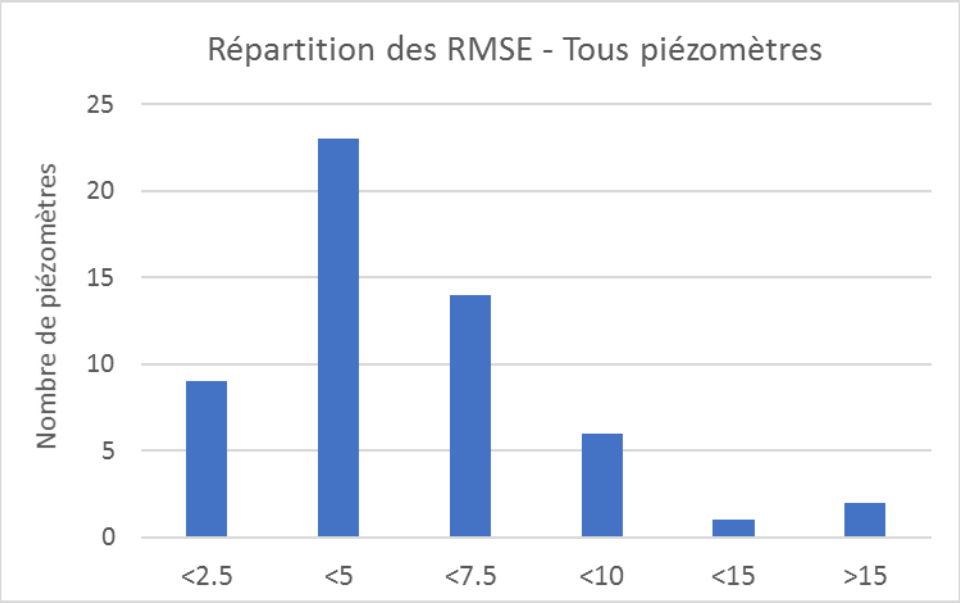



*Figure 27 : Répartition des valeurs de RMSE calculées pour l'ensemble des piézomètres par classes de valeurs.*

Sur les 55 piézomètres utilisés pour le calage, 32 piézomètres, soit 59 %, se trouvent dans les classes de valeurs correspondant à un très bon calage ou à un bon calage.

En prenant en compte la classe de valeur correspondant à un calage moyen, ce sont en tout 46 piézomètres, soit 83 % du total, qui sont calés de façon correcte.

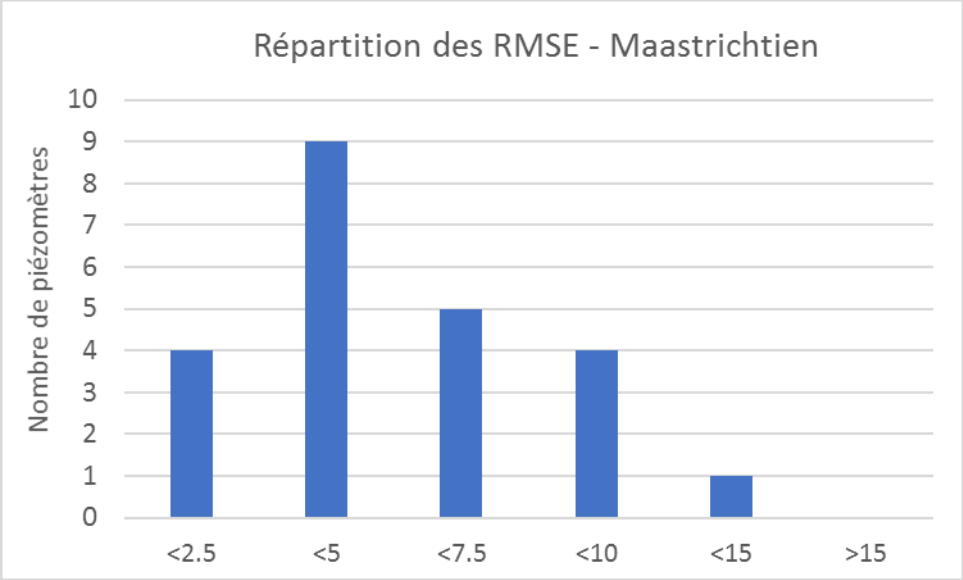



*Figure 28 : Répartition des valeurs de RMSE calculées pour les piézomètres du Maastrichtien par classes de valeurs.*

18 piézomètres du Maastrichtien sur 23, soit 78 % de ces points présentent un calage de qualité moyenne à très bonne. 13 piézomètres, soit 56 % du total, présentent un calage bon ou très bon.

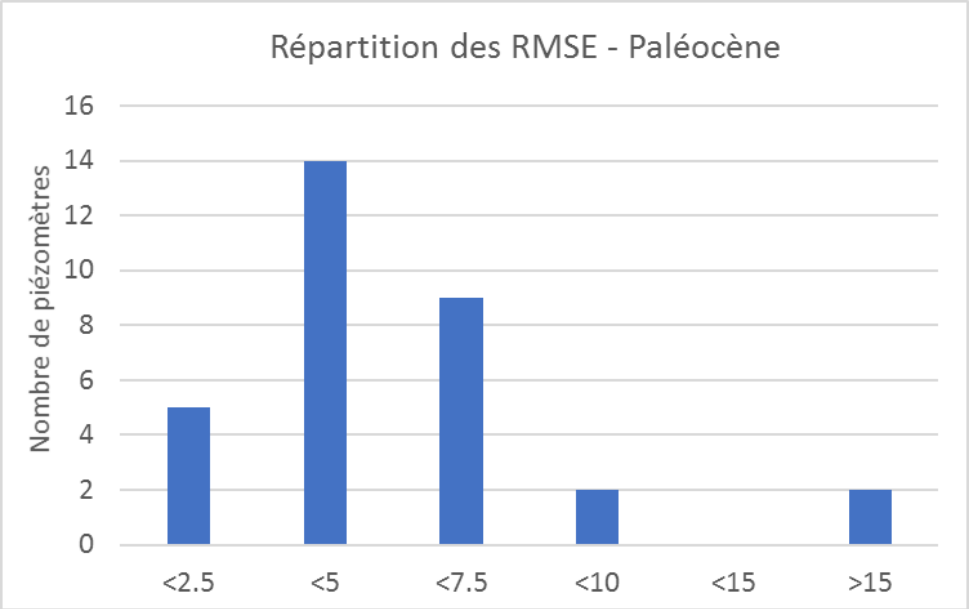
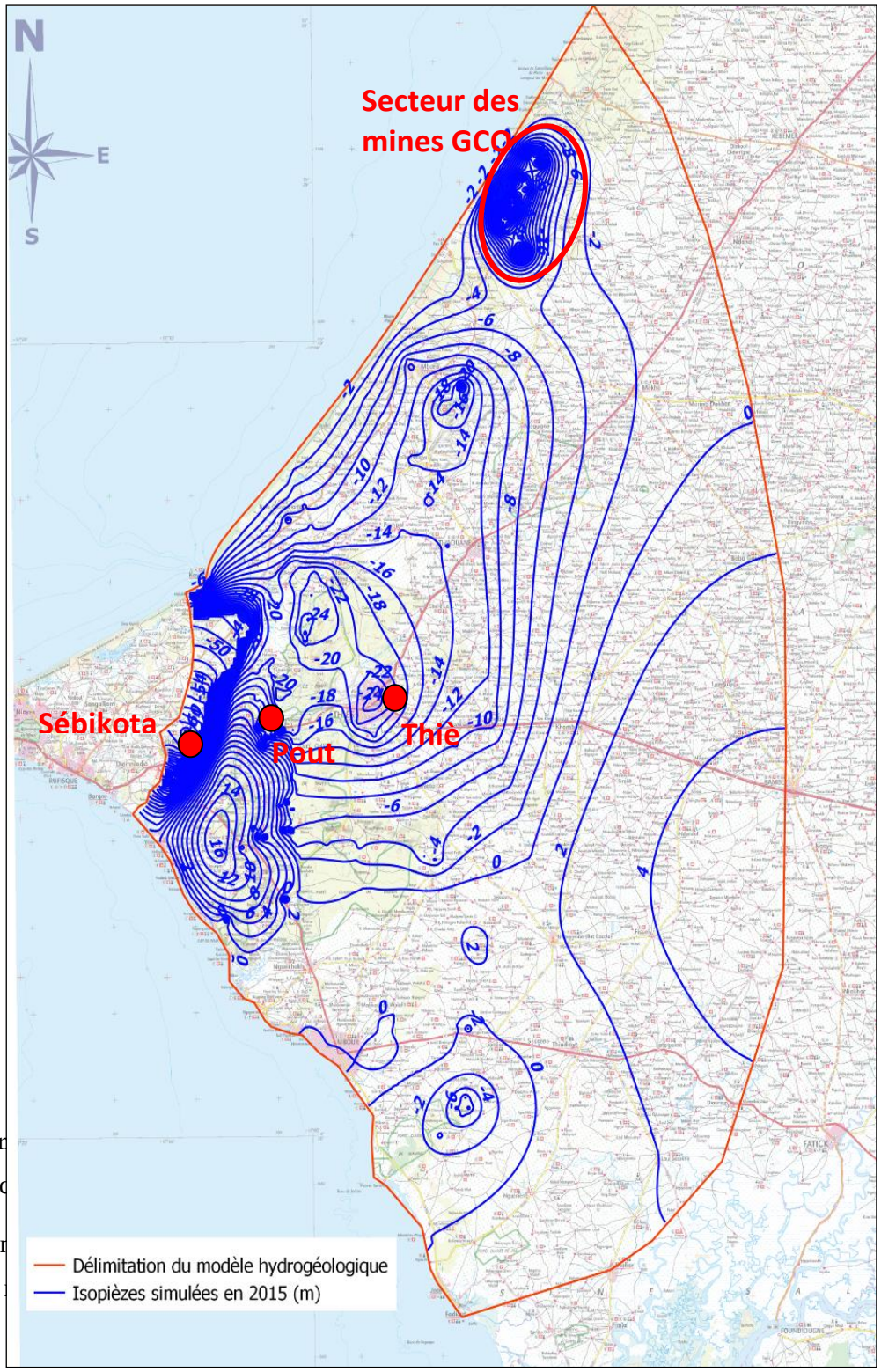



*Figure 29 : Répartition des valeurs de RMSE calculées pour les piézomètres du Paléocène par classes de valeurs.*

Sur 32 piézomètres au Paléocène, 28 piézomètres, soit 87 % du total présentent un calage moyen à très bon. 19 piézomètres, soit 59 % du total, présentent un calage bon ou très bon.

### III.8.2.3 *Carte piézométrique simulée en 2015*

La figure suivante présente la situation piézométrique simulée fin 2015, à la fin de la période de calage en régime transitoire.




La couche 1 du r
superficiel dans le c

Les niveaux piézor
dans le secteur des

### III.8.3 Paramètres hydrodynamiques calés

Le calage du modèle à partir des différents paramètres collectées et analysés lors de la phase de synthèse des données hydrogéologiques et hydro chimiques a permis de restituer des cartes de réparation des paramètres hydrodynamiques suivantes :

- **Perméabilités des couches du modèle :**

Les perméabilités en couche 1 du modèle hydrogéologique varient entre $10^{-6}$ et $10^{-3}$ m/s. Les perméabilités les plus faibles se retrouvent au niveau des failles de Fouloume et de Sébikotane, qui encadrent à l'est et à l'ouest le compartiment de Diass, afin de bien prendre en compte le rôle de barrières hydraulique de ces failles. Les perméabilités les plus élevées se trouvent dans le compartiment de Sébikotane et la partie sud du compartiment de Pout, où le Paléocène est connu pour être karstifié et productif. La perméabilité du Maastrichtien du compartiment de Diass est égale à $3.10^{6}$ m/s.

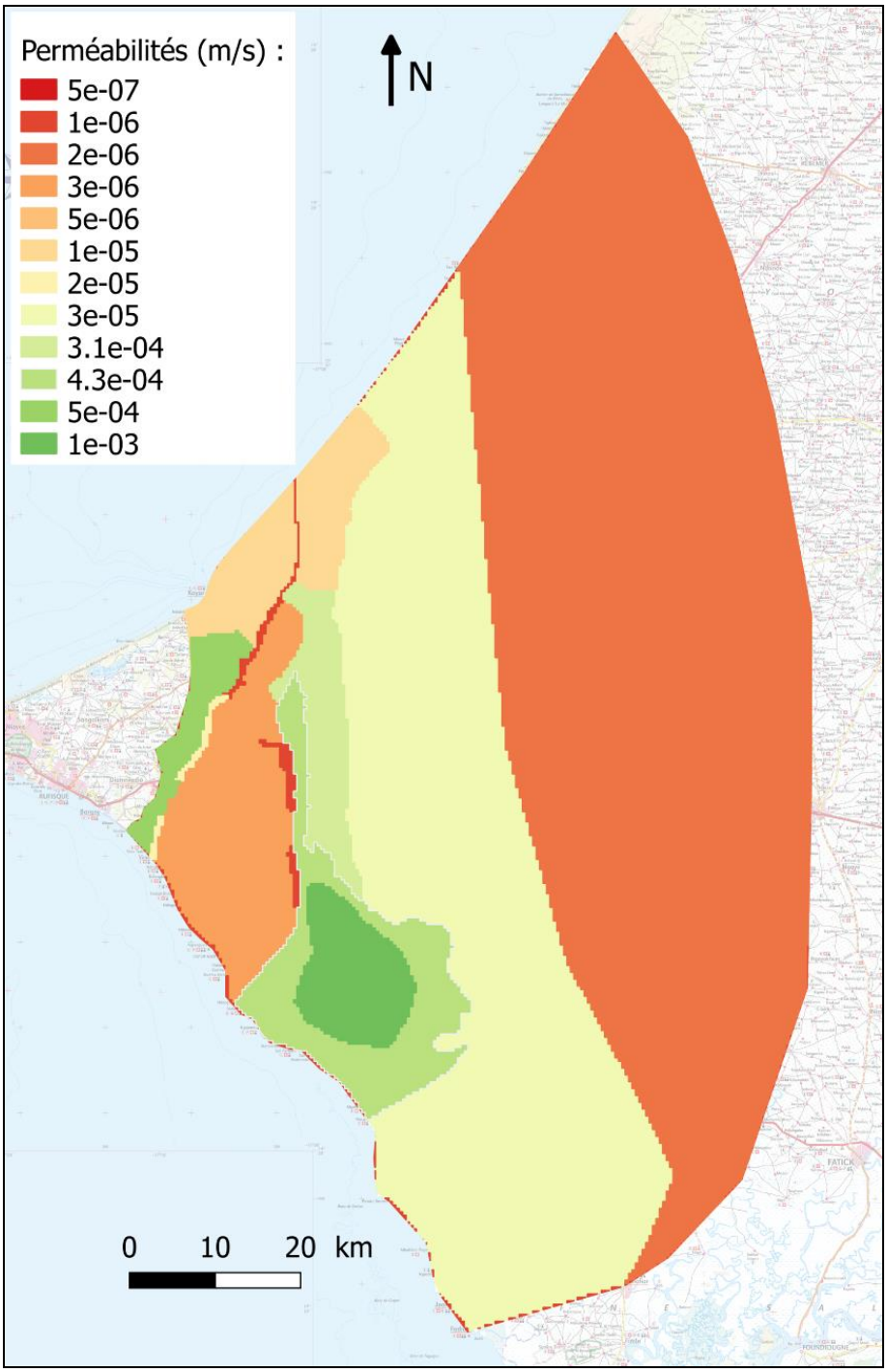



*Figure 31 : Répartition des perméabilités calées en couche 1 du modèle hydrogéologique.*

Pour la couche 2 du modèle, les perméabilités les plus faibles, avec des valeurs de $5.10^{-7}$ m/s, se trouvent en partie ouest, là où une formation de séparation peu perméable (formation de Ndéyane) a été prise en compte entre les formations du Paléocène sus-jacent et du Maastrichtien sous-jacent. Dans le compartiment de Diass, cette formation est absente, et la couche 2 représente alors le Maastrichtien sableux dont la perméabilité est fixée à $3.10^{-6}$ m/s.

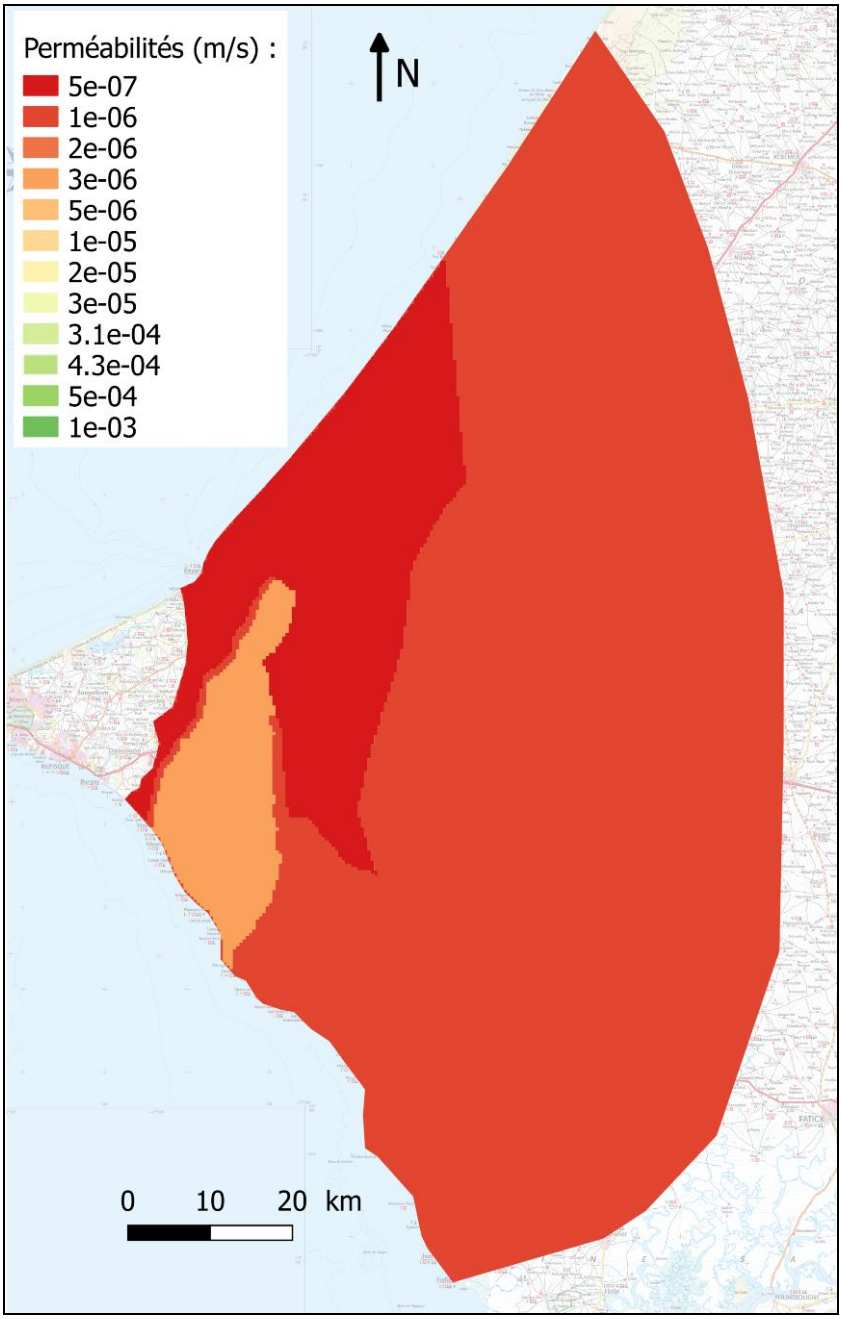



*Figure 32 : Répartition des perméabilités calées en couche 2 du modèle hydrogéologique.*

Pour la couche 3 du modèle la perméabilité du Maastrichtien varie entre $10^{-6}$ m/s en parties est et ouest, et $5.10^{-6}$ m/s en partie centrale, où le Maastrichtien est plus productif.

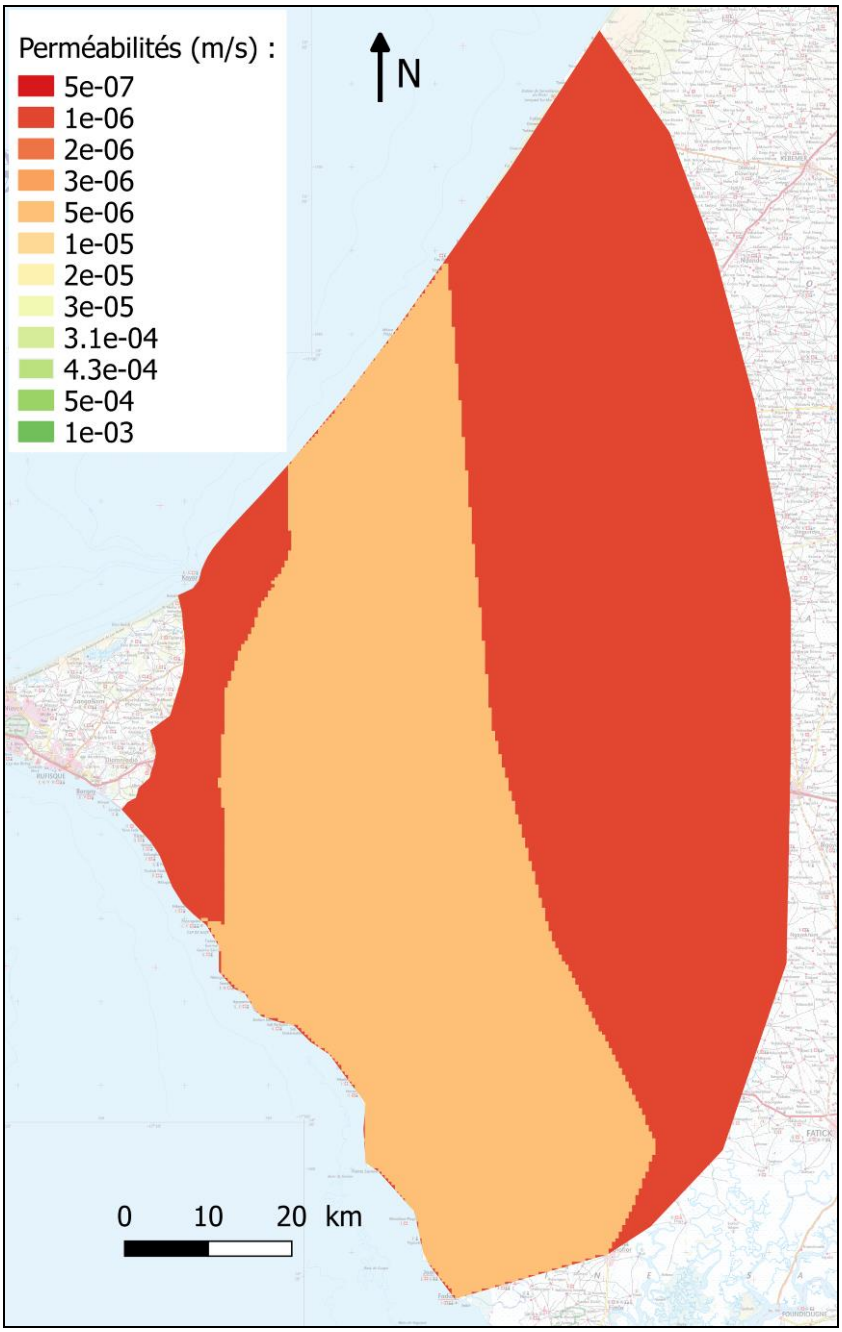



*Figure 33 : Répartition des perméabilités calées en couche 3 du modèle hydrogéologique.*

Pour la couche 4 du modèle, la perméabilité du Maastrichtien profond est prise égale à $10^{-6}$ m/s partout.

### III.8.4 Bilan des entrées et sorties d'eau

A titre indicatif pour l'année 2015, les sorties d'eau sont nettement supérieures aux entrées , il y a donc déstockage d'eau dans les aquifères du système du Horst de Diass**. Ce déstockage s'élève à environ 154 700 m$^3$/jour.**

La recharge pluviométrique, qui est le seul élément du bilan non influencé par l'évolution des prélèvements en eau, est de **61 800 m$^3$/jour en moyenne** pour la **période 1970-2015**, et de **61 000 m$^3$/jour en moyenne** pour la période **1990-2015** (soit environ 22 265 000 m$^3$/an).

Ces bilans font apparaître un net déséquilibre du système hydrogéologique du Horst de Diass, lié principalement à des prélèvements trop importants, qui excèdent largement la recharge pluviométrique.

Le tableau suivant récapitule les entrées et les sorties d'eau du modèle pour l'année 2015 :

*Tableau 4 : Bilans hydrodynamiques du modèle du Horst de Diass pour l'année 2015.*

| | *Recharge* | *Limites GHB* | *Drains* | *Prélèvements* |
|---|---|---|---|---|
| ***Entrées d'eau (m$^3$/jour)*** | **82 700** | **39 600** | **-** | **-** |
| ***Sorties d'eau (m$^3$/jour)*** | **-** | **6 800** | **2 200** | **268 000** |

### III.8.5 Direction d'écoulement

La figure suivante présente les directions d'écoulement simulées à la fin de la période de calage, c'est-à-dire fin 2015.

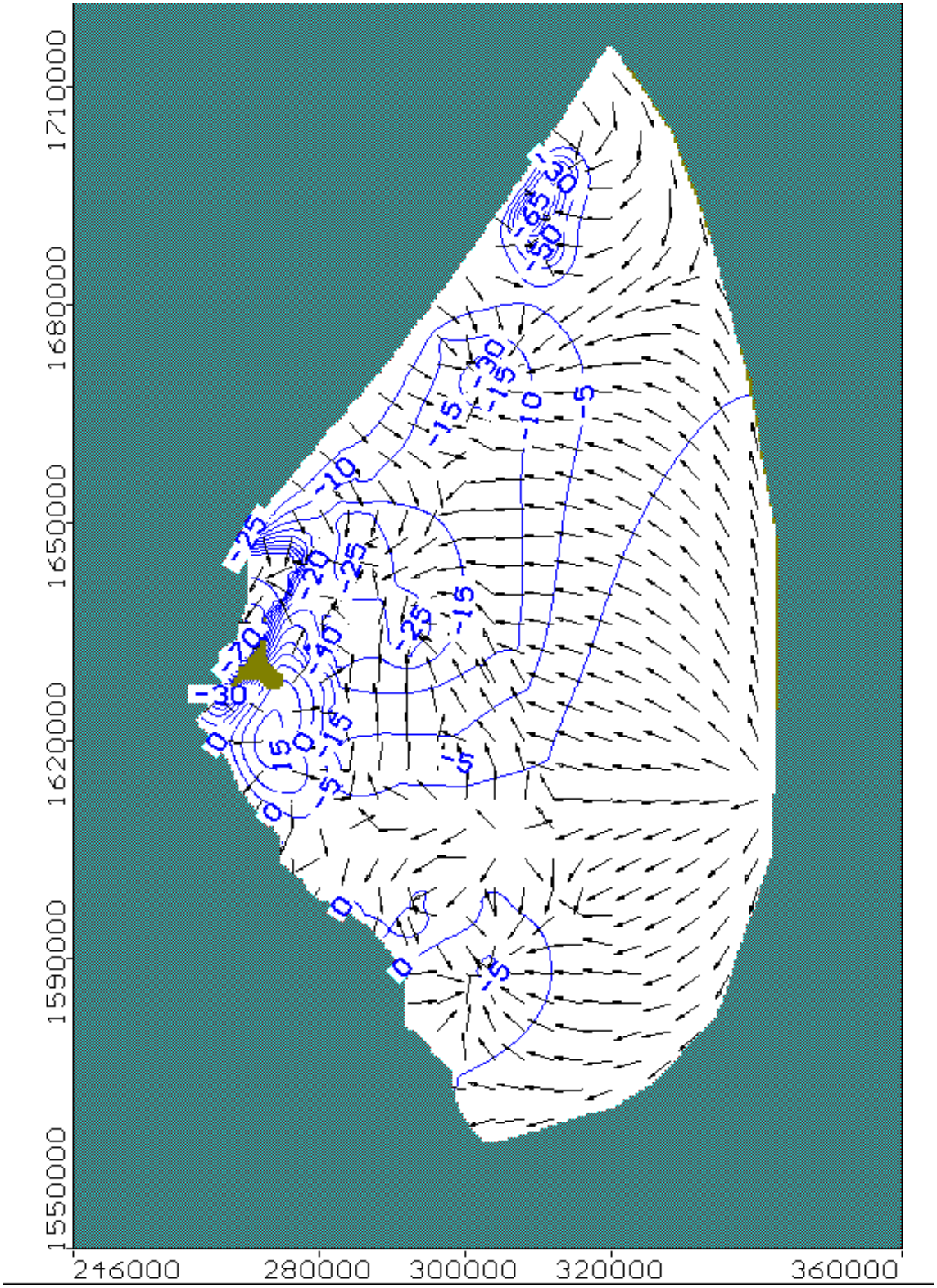



*Figure 34 : Directions d'écoulement et piézométrie calculées par le modèle hydrogéologique du Horst de Diass pour la situation piézométrique de fin 2015*

La figure suivante présente les directions d'écoulement simulées pour mi 2015, avant la période de recharge.

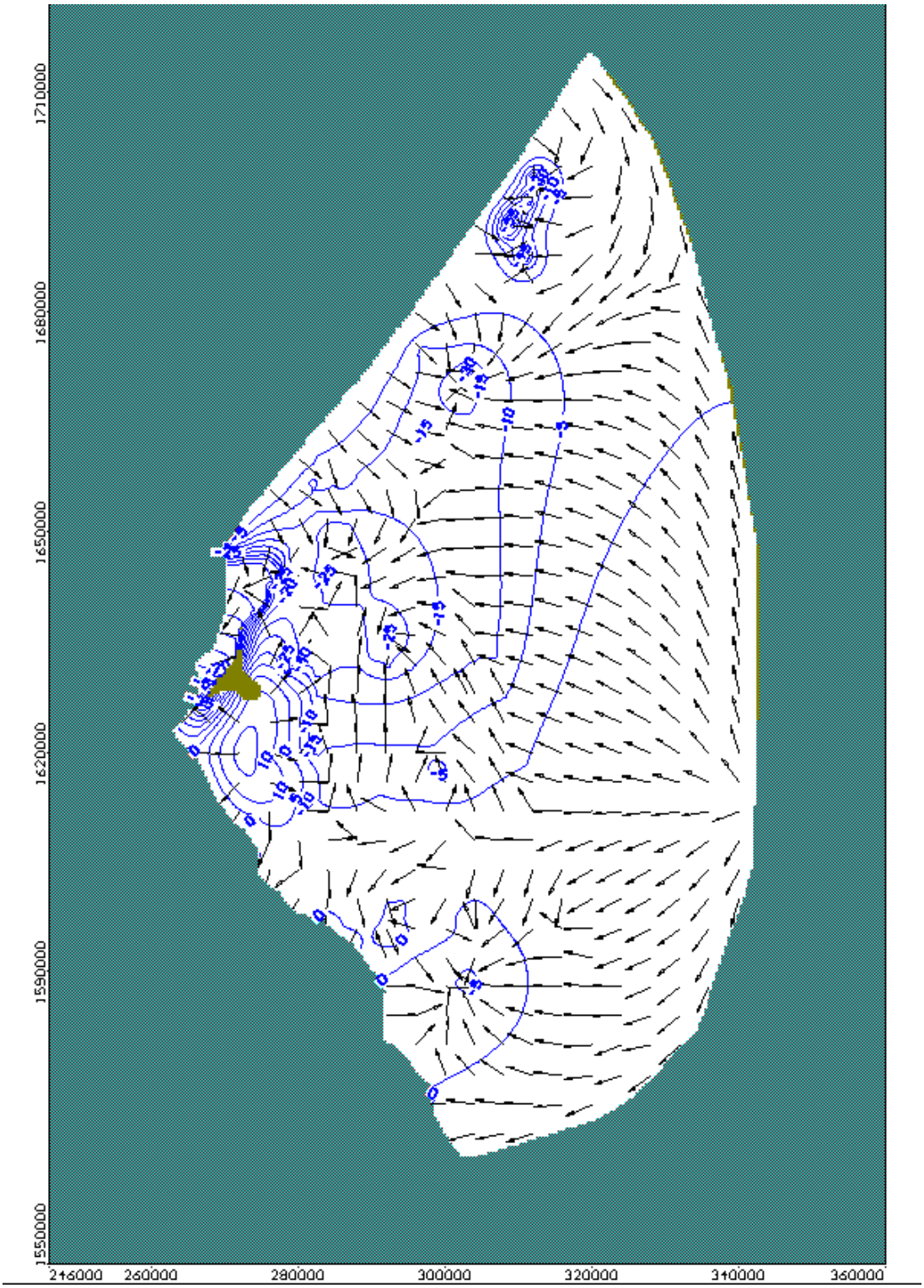



*Figure 35 : Directions d'écoulement et piézométrie calculées par le modèle hydrogéologique du Horst de Diass pour la situation piézométrique de mi-2015.*

Les piézométries simulées avant la période de recharge et après la fin de la période de recharge sont très semblables, la recharge n'ayant qu'une faible influence sur les niveaux piézométriques à l'échelle du modèle en fin de période de calage (2015).

Les écoulements se font depuis les zones de recharge (Massif de Dias, Paléocène libre de Pout) vers les principaux centres de pompages : Pout, Thiès et Sébikotane pour la partie centrale du système hydrogéologique ; Bala Bougou au sud, GCO et Taiba au Nord pour les secteurs périphériques.

Au sud une partie des écoulements souterrains sont dirigés vers la mer.

### III.8.6 Intrusion d'eau saline

Les risques d'intrusion d'eau saline sont ici évalués par les directions d'écoulement calculés par le modèle à proximité du littoral.

Ces directions correspondent à celles calculées dans la première couche du modèle. Les directions calculées en couche 3 (aquifère du Maastrichtien) sont peu différentes. Le long du **littoral nord**, les directions d'écoulement calculées sont toujours dirigées depuis le littoral vers l'intérieur des terres. Cette zone correspond donc à une zone d'intrusion saline préférentielle. Le long du **littoral sud**, les écoulements souterrains sont globalement dirigés de l'intérieur des terres vers la mer, sauf au sud de Mbour, où une dépression piézométrique marquée entraine une inversion du sens des écoulements. Cette zone correspond aussi à une **zone préférentielle pour les intrusions d'eau saline** dans l'aquifère du Paléocène libre, et dans l'aquifère du Maastrichtien sous-jacent. En effet dans ce secteur la relation hydraulique entre les aquifère du Paléocène et du Maastrichtien est relativement bonne du fait de la faible épaisseur des couches de séparation. Le littoral sud à proximité de Mbour représente donc une zone à risque vis-à-vis de l'intrusion d'eau saline.

De manière générale, le rabattement des niveaux piézométriques des aquifères du Paléocène et du Maastrichtien à des niveaux inférieures à la cote de la mer est susceptible d'induire à long terme une salinisation progressive de système hydrogéologique.

La figure suivante présente les directions d'écoulement en partie nord et en partie sud du modèle, calculées en fin de période de calage.

Il est à remarquer qu'au niveau du littoral Nord la nappe des calcaires paléocène au nord de Cayar a son toit relativement profond (plus de 100m en dessous du niveau de la mer) ce qui fait son contact avec la mer pourrait être moins direct. Pour cette raison considérer cette limite comme une limite à potentiel imposé égal à celui du niveau de la mer peut être le meilleur choix. D'autres types de limites pourraient être testés : limite à potentiel imposé égal à celui de la mer repoussée plus à l'intérieur de l'océan ou limite à potentiel supérieur à celui du niveau de la mer.

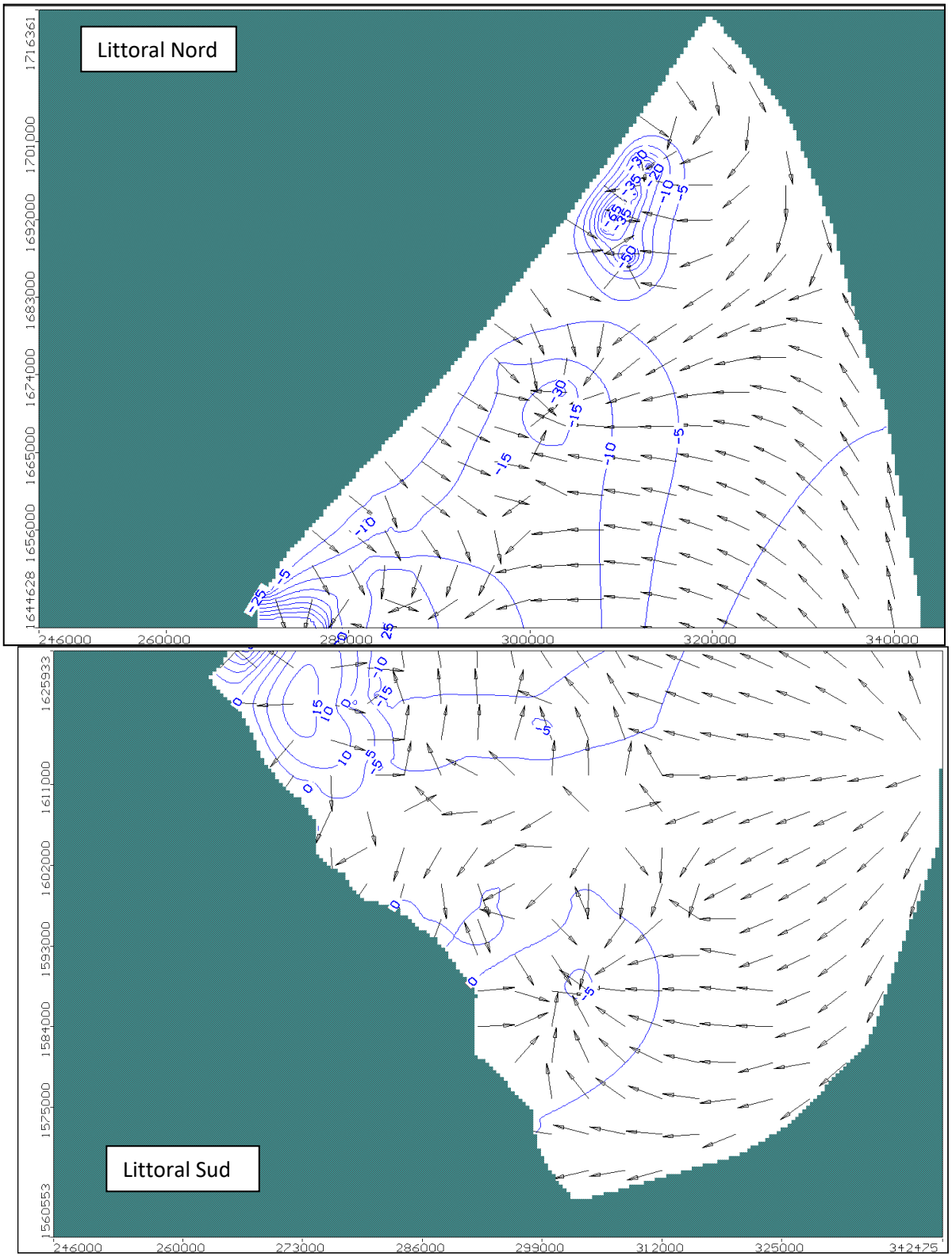



*Figure 36 : Directions d'écoulement et piézométrie calculées par le modèle à proximité du littoral.*

# CHAPITRE IV. MISE EN ŒUVRE DE SCENARIOS D'EXPLOITATION

## IV.1 Définition de scénarios initiaux

Le modèle calé a par la suite servi à faire de la gestion prévisionnelle des ressources en eau du système aquifère du horst de Diass. L'objet de cette gestion prévisionnelle des ressources en eau est d'envisager des scénarios d'exploitation répondant aux besoins en eau des différents usages et tester avec le modèle la réaction du système aquifère. Les scénarios mis en œuvre ont été définis en concertation avec la DGPRE. La période de simulation de ces scénarios est de 2016 à 2035, avec une initialisation des niveaux de nappe simulés fin 2015. Les scénarios retenus sont :

- Un scénario de base qui poursuit jusqu'en fin 2035 les prélèvements au même niveau qu'à l'actuel,
- Le scénario sans pompages correspond à un arrêt complet de tous les prélèvements en eau souterraine à partir de 2016,
- Le scénario d'évolution démographique correspond à une poursuite des prélèvements au même niveau qu'à l'actuel, à l'exception des prélèvements sur les forages privés, qui augmentent de 5 % en 2018, puis de 5 % en 2026.
- Le scénario de prospective de la SONES prend en compte la même augmentation des prélèvements privés que pour le scénario précédent, et considère en plus des évolutions des pompages de la SONES d'après les prévisions fournies par celle-ci en 2017 (tableau suivant).

*Tableau 5 : Volumes journaliers pompés aux champs captant de la SONES entre 2019 et 2033 pour le scénario « prospective SONES » (en m3/jour).*

| Zones de pompage | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 | 2024 | 2025 | 2026 | 2027 | 2028 | 2029 | 2030 | 2031 | 2032 | 2033 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Forages de Sébikotane | 4 000 | 4 000 | 4 000 | 4 000 | 4 000 | 4 000 | 4 000 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Forages de Pout Sud | 26 000 | 26 000 | 10 000 | 10 000 | 10 000 | 10 000 | 10 000 | 10 000 | 10 000 | 10 000 | 10 000 | 10 000 | 10 000 | 10 000 | 10 000 |
| Forages de Pout Nord | 52 000 | 38 320 | 26 925 | 26 925 | 26 925 | 26 925 | 26 925 | 22 925 | 22 925 | 22 925 | 22 925 | 14 925 | 14 925 | 14 925 | 14 925 |
| Forages de Pout Kiréne | 26 000 | 26 000 | 10 000 | 10 000 | 10 000 | 10 000 | 10 000 | 10 000 | 10 000 | 10 000 | 10 000 | 10 000 | 10 000 | 10 000 | 10 000 |
| Forages de la Petite Côte | 33 900 | 40 500 | 40 500 | 40 500 | 40 500 | 40 500 | 40 500 | 15 000 | 15 000 | 15 000 | 15 000 | 15 000 | 15 000 | 15 000 | 15 000 |
| Forages de Thies | 21 300 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Forages de Tassette | 30 000 | 30 000 | 30 000 | 30 000 | 30 000 | 30 000 | 30 000 | 30 000 | 30 000 | 30 000 | 30 000 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Forages de Bayakh | 20 000 | 20 000 | 20 000 | 20 000 | 20 000 | 20 000 | 20 000 | 20 000 | 20 000 | 20 000 | 20 000 | 20 000 | 20 000 | 20 000 | 20 000 |

*NB : Les prévisions de la SONES correspondent à des diminution des pompages dans les anciens forages et champs de captage qui sont compensés par des prélèvements dans les nouveaux champs de captage de Bayakh et Tassette. Les pompages indiqués pour les forages des zones de Bayakh et Tassette sont des prévisions ; des valeurs réelles de pompage ont en définitive été considérées (≈25000m$^3$/jour pour Tassette et ≈36000 m$^3$/jour pour Bayakh) ; ces valeurs sont celles résultant des essai de pompage suite aux travaux de forage*

La figure suivante présente la localisation des pompages pris en compte pour l'année 2016 dans les différents scénarios, ainsi que les débits associés aux points de pompages.

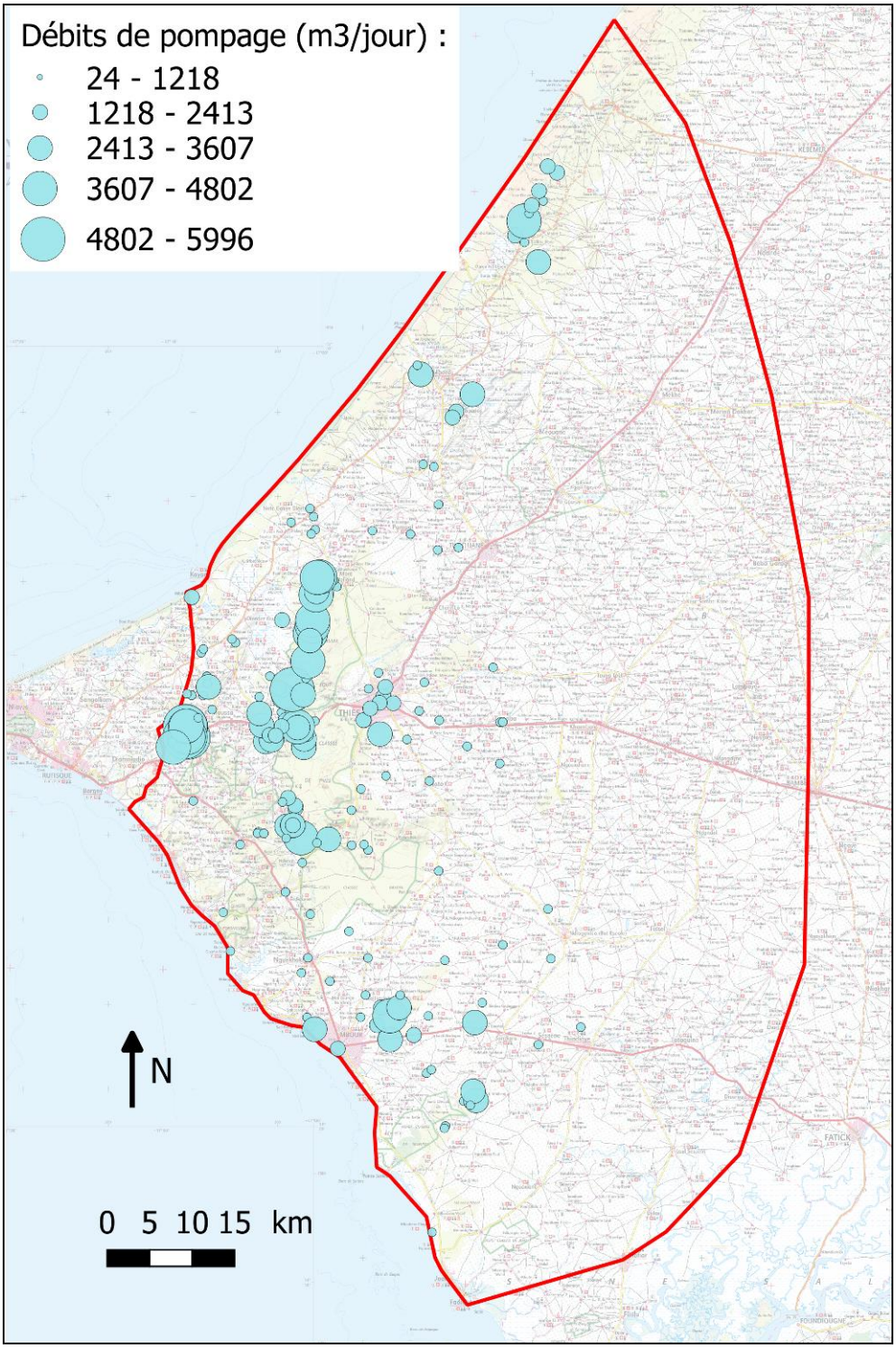



*Figure 37 : Débits de pompage pris en compte dans le modèle pour l'année 2016.*

Le tableau suivant récapitule l'ensemble des scénarios simulés :

*Tableau 6 : Présentation des scénarios 1 à 10.*

| Scénario | Nom du scénario | Prélèvements | Recharge |
|---|---|---|---|
| **Scénario 1** | Scénario sans pompage | Arrêt de tous les prélèvements | Moyenne 1990-2015 |
| **Scénario 2** | Scénario de base recharge moyenne | Prélèvements actuels | Moyenne 1990-2015 |
| **Scénario 3** | Scénario de base recharge faible | Prélèvements actuels | Moyenne 1990-2015 – 10 % |
| **Scénario 4** | Scénario de base recharge faible | Prélèvements actuels | Moyenne 1990-2015 + 10 % |
| **Scénario 5** | Scénario d'évolution démographique recharge moyenne | Prélèvements actuels sauf privés qui augmentent de 5 % en 2018 et 2026 | Moyenne 1990-2015 |
| **Scénario 6** | Scénario d'évolution démographique recharge faible | Prélèvements actuels sauf privés qui augmentent de 5 % en 2018 et 2026 | Moyenne 1990-2015 – 10 % |
| **Scénario 7** | Scénario d'évolution démographique recharge forte | Prélèvements actuels sauf privés qui augmentent de 5 % en 2018 et 2026 | Moyenne 1990-2015 + 10 % |
| **Scénario 8** | Scénario de prospective SONES recharge moyenne | Prélèvements actuels, sauf privés qui augmentent de 5 % en 2018 et 2026, et SONES ajustés d'après prévisions SONES | Moyenne 1990-2015 |
| **Scénario 9** | Scénario de prospective SONES recharge faible | Prélèvements actuels, sauf privés qui augmentent de 5 % en 2018 et 2026, et SONES ajustés d'après prévisions SONES | Moyenne 1990-2015 – 10 % |
| **Scénario 10** | Scénario de prospective SONES recharge élevée | Prélèvements actuels, sauf privés qui augmentent de 5 % en 2018 et 2026, et SONES ajustés d'après prévisions SONES | Moyenne 1990-2015 + 10 % |

## IV.2 **Résultats des scénarios initiaux**

Les résultats des scénarios sont présentés sous deux formes (des cartes piézométriques simulées en 2035 et de chroniques piézométriques sur la période 1970 à 2035) :

Les résultats sous forme de cartes piézométriques présentent les rabattements calculés par le modèle en 2035, par rapport à la situation piézométrique initiale, c'est-à-dire la piézométrie simulée fin 2015. Les rabattements présentés sont calculés comme les différences entre les charges piézométriques

simulées fin 2015 et les charges piézométriques simulées fin 2035. Les valeurs calculées sont donc positives lorsque les niveaux piézométriques baissent entre 2016 et 2035, et négatives lorsque ces niveaux piézométriques remontent.

Les résultats obtenus ont permis de tirer les conclusions suivantes :

- L'arrêt des pompage sur la période 2016 à 2035 a permis d'avoir des remontées significatives du niveau des nappes. Ces remontées n'ont quand pas permis aux nappes de retrouver un niveau au moins supérieur à celui de la mer et cela du fait des niveaux très bas simulés de la période actuelle ;
- Les résultats des scénarios 2 à 10 présentent de grandes similitudes caractérisées par une tendance générale à la baisse des niveau avec des accentuations au niveau des grands centres de pompage ;
- Les modifications de recharge (de 10 % en moins ou en plus par rapport à la recharge moyenne de la période 1990-2015) n'ont pas d'impact marqué sur cet abaissement ;
- En fonction de leurs caractéristiques et des résultats obtenus, les scénarios peuvent être en familles comme suit :

*Tableau 7 : Synthèse des résultats des scénarios initiaux.*

| **Famille de scénarios** | **Caractéristiques des scénarios** | **Résultats des simulations** |
|---|---|---|
| Scénario 1 | Arrêt de tous les pompage, recharge moyenne | Remontée max du niveau de 50m (zone de Sébikotane) 15m (zone de Thies) et 10m (zone de Pout) |
| Scénarios 2, 3, 4 | Pompage au rythme actuel maintenu jusqu'en 2035, recharge modulée (moyenne, +10% et -10%) | smax = 30 m zone de Pout |
| Scénarios 5, 6, 7 | Pompage au rythme actuel avec augmentation des forages privés de 5% en 2018 et 5% en 2026, recharge modulée (moyenne, +10% et -10%) | smax = 30 m zone de Pout |
| Scénarios 8, 9, 10 | Scénario prospective Sones et autres prélèvements maintenus à l'actuel sauf privé qui augmentent de 5% en 2018 et 5% en 2026, recharge modulée (moyenne, +10% et -10%) | smax = 60 m zone de Sébikotane à cause des forages de Bayakh situés au Nord |

Les figures qui suivent présentent les résultats des scénarios 2,5 et 8 qui sont assez représentatifs de tous les autres scénarios testés.

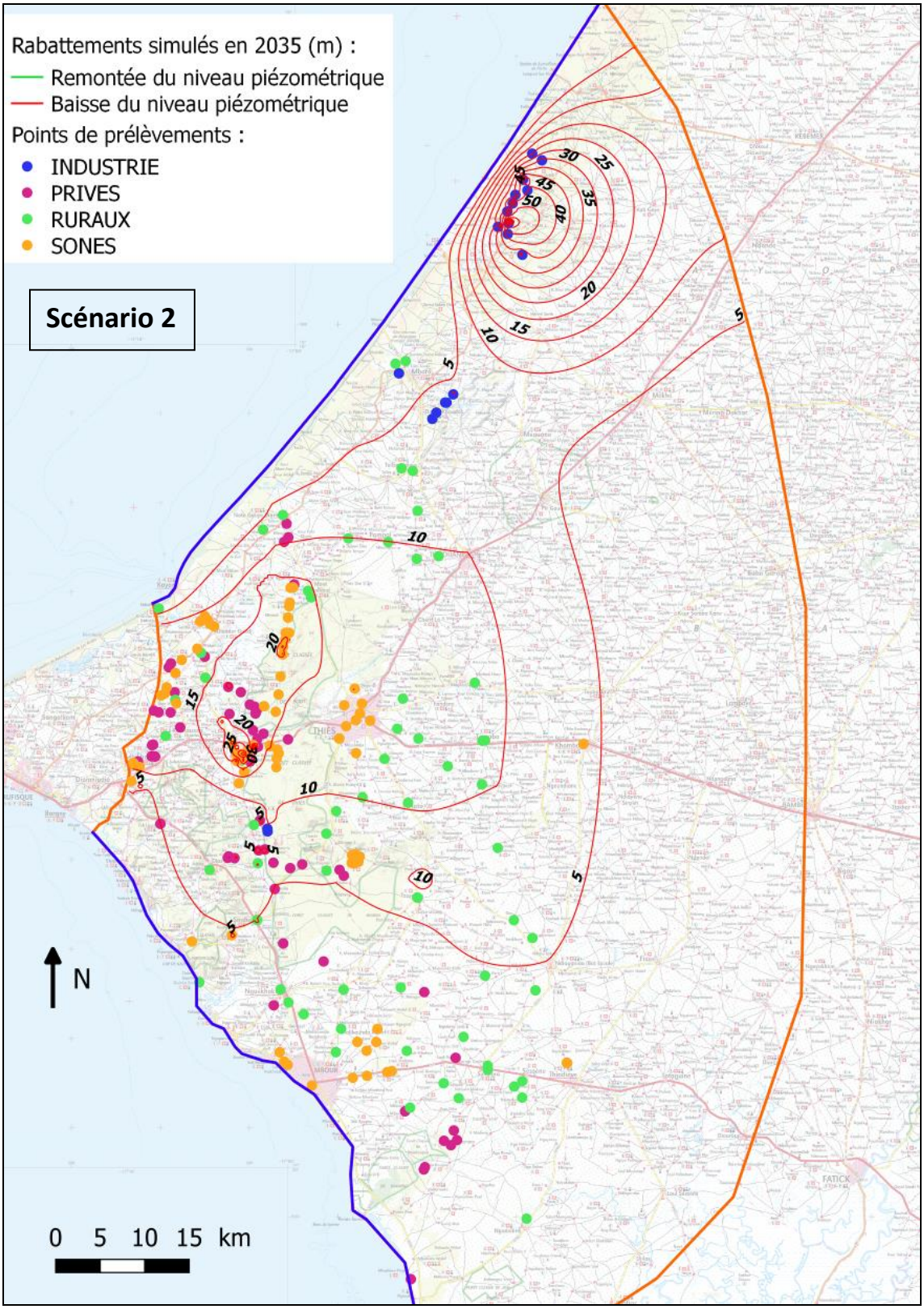



*Figure 38 : Rabattements simulés en 2035 par rapport à la situation piézométrique de fin 2015 pour le scénario 2 « de base » : recharge moyenne en couche 1 du modèle.*

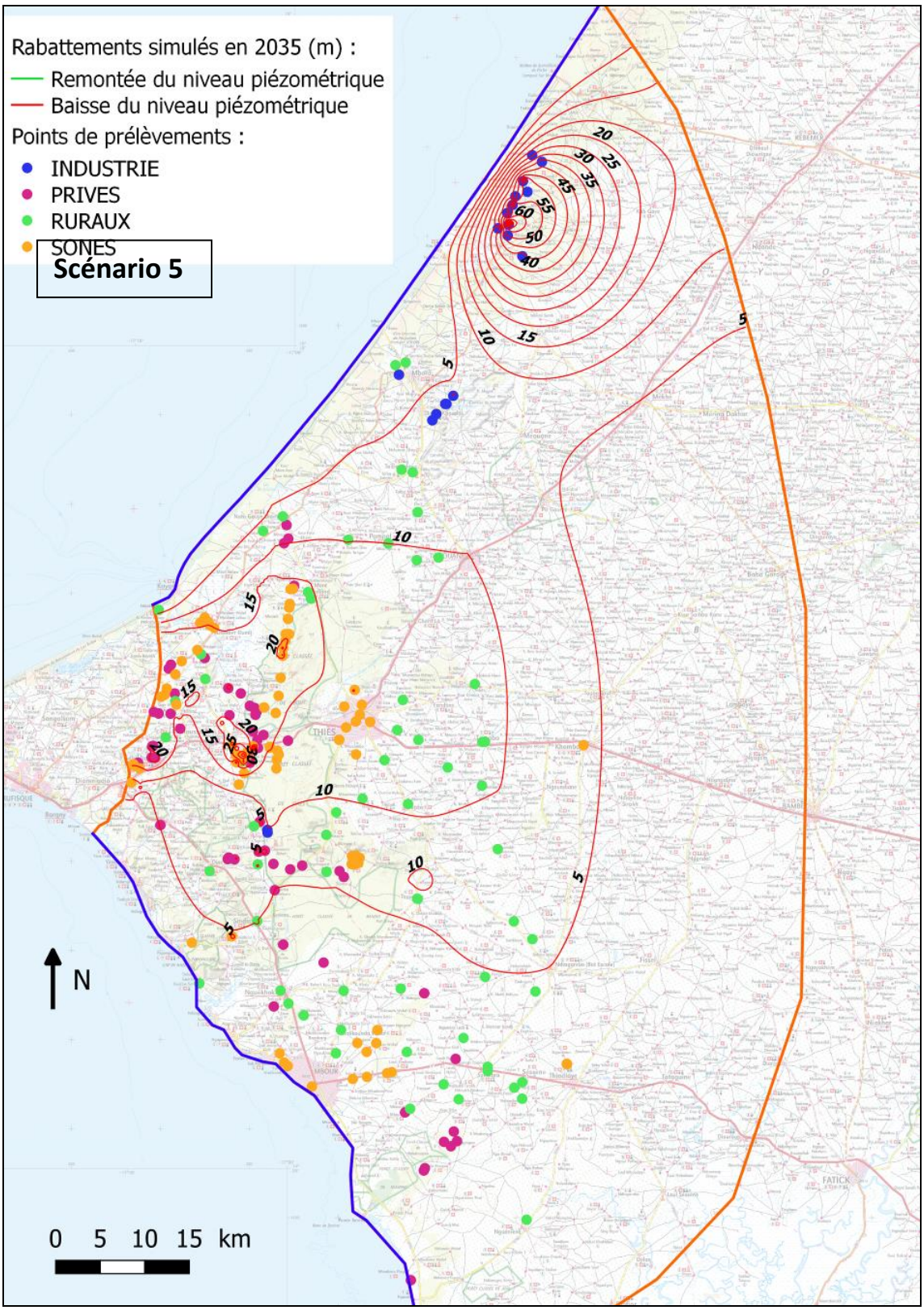



*Figure 39 : Rabattements simulés en 2035 par rapport à la situation piézométrique de fin 2015 pour le scénario 5 « évolution démographique » : recharge moyenne en couche 1 du modèle.*

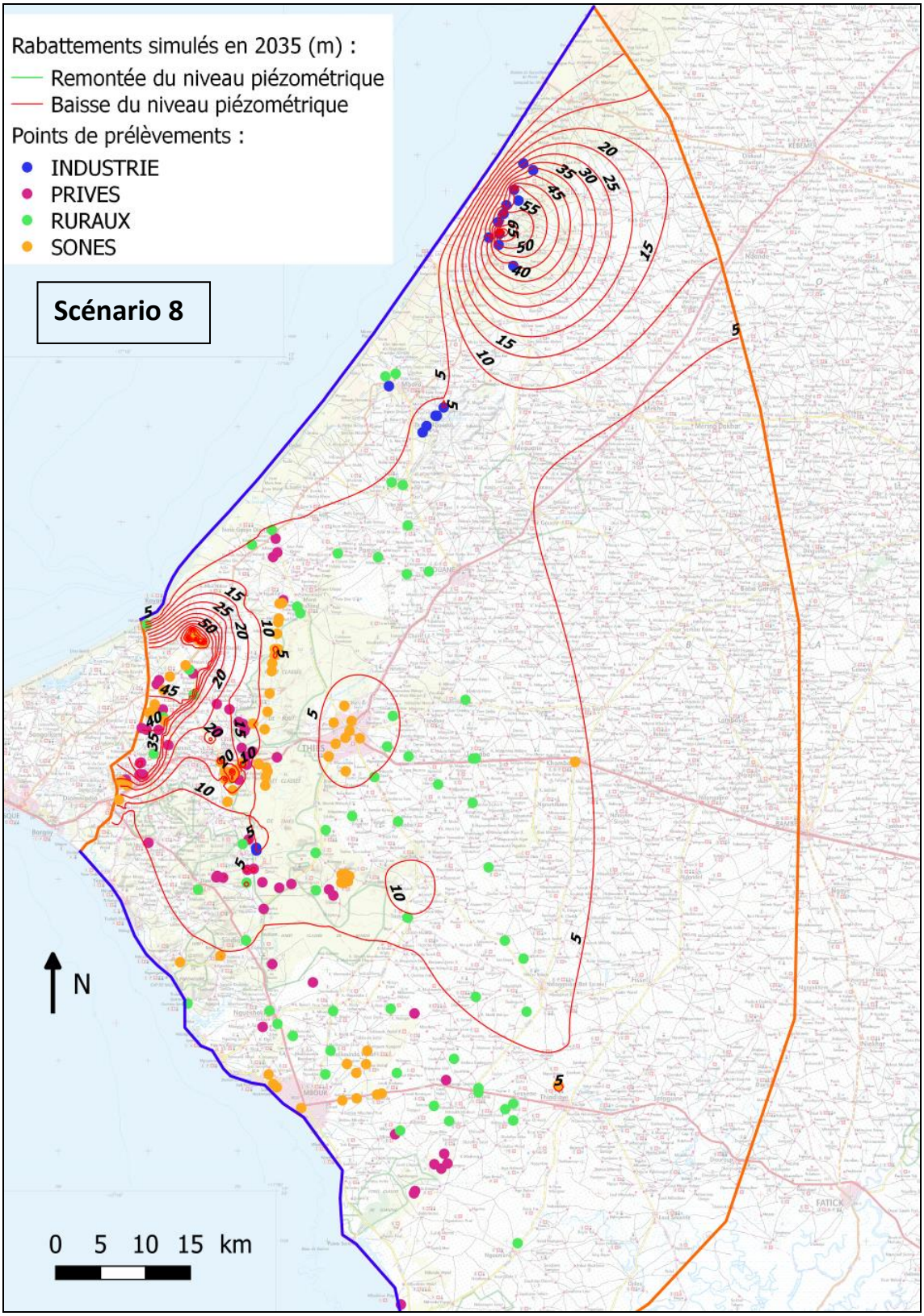



*Figure 40 : Rabattements simulés en 2035 par rapport à la situation piézométrique de fin 2015 pour le scénario 8 « prospective SONES » : recharge moyenne en couche 1 du modèle.*

NB : Signalons que le choix de représenter que les résultats de la couche est motivé par le fait qu'il n'y a pas une grande différence entre les deux couches du modèle.

Les résultats sous forme de chroniques piézométriques simulées sur la période 1970-2035 sont présentés en trois points de suivi piézométrique. Ces points de suivi sélectionnés sont des points présentant un bon calage de la piézométrie sur la période 1970-2015. De cette façon ils sont considérés comme bien représentatifs des évolutions piézométriques des aquifères du Paléocène et du Maastrichtien. Les points sélectionnés sont :

- Le piézomètre Yenne 9 captant le Paléocène, en partie sud du compartiment de Sébikotane,
- Le piézomètre SE36 captant le Paléocène dans le compartiment de Pout nord, et au nord du champ captant de Pout Nord,
- Le piézomètre Pout Noto S3378 captant le Maastrichtien dans le compartiment de Pout nord, au niveau du champ captant de Pout Nord.

Les résultats obtenus ont permis de tirer les conclusions complémentaires suivantes :

- La remontée lente des niveau avec l'arrêt des pompage sur la période 2016-2035 est confirmée et mieux mise en évidence. L'allure de cette remontée est variable selon la nappe et la zone concernée. Elle est ainsi plus rapide dans la nappe supérieure des calcaires paléocènes que dans celle des sables du maastrichtien et aussi dans les zones de forte valeur de recharge.
- Le retour à un état d'équilibre piézométrique du système, c'est-à-dire à une piézométrie au moins égale au niveau de la mer est un objectif difficilement atteignable à moyen terme d'après ces résultats ;
- Les scénarios de poursuite ou d'augmentation des débits de pompage par rapport à l'actuel mettent en évidence de façon attendue un risque fort de surexploitation non durable du système hydrogéologique du Horst de Diass, avec la poursuite de la baisse de la piézométrie dans tous les secteurs, quel que soit le niveau de recharge pris en compte ;
- Le scénario de prospective SONES, avec un ajustement des débits pompés sur l'ensemble des champs captant de la SONES ne permet d'avoir un situation satisfaisante. En effet, les niveaux piézométriques ne sont stabilisés que dans certains secteurs et ils continuent de baisser dans bien d'autres comme l'avaient fait montrer les cartes piézométriques.

Ces résultats sont représentés à travers les figures qui suivent :

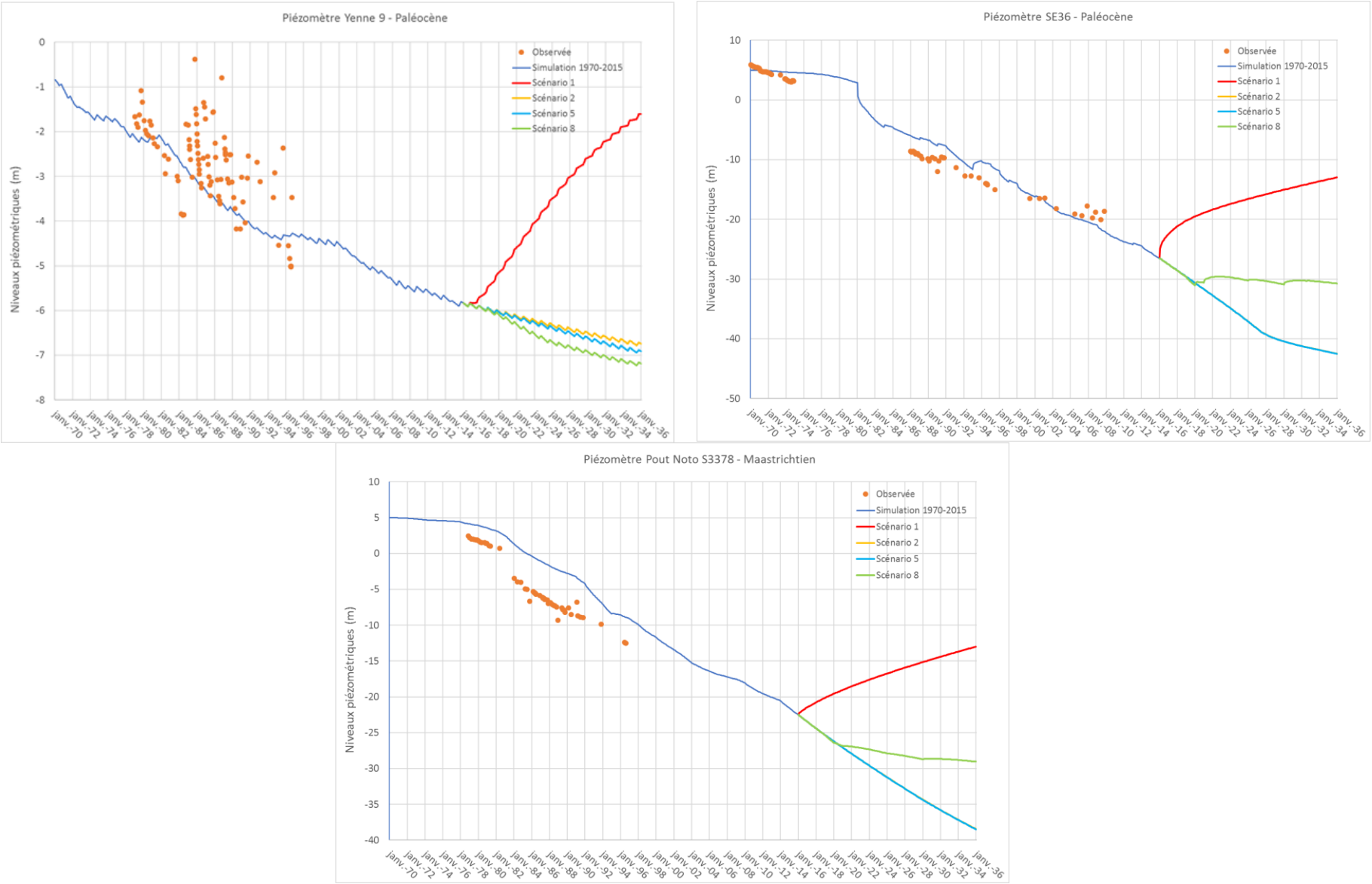



*Figure 41 : Chroniques piézométriques observées et simulées aux trois points de référence pour le scénario complémentaire*

## IV.3 **Directions d'écoulements simulées**

La figure suivante présente les directions d'écoulement simulées en 2035 pour le scénario 8, correspondant au scénario de prospective SONES avec une recharge moyenne. Ce scénario correspond au cas le plus favorable pour le retour à l'équilibre du système hydrogéologique, en dehors du scénario irréaliste d'arrêt de l'ensemble des pompages en eau souterrains.

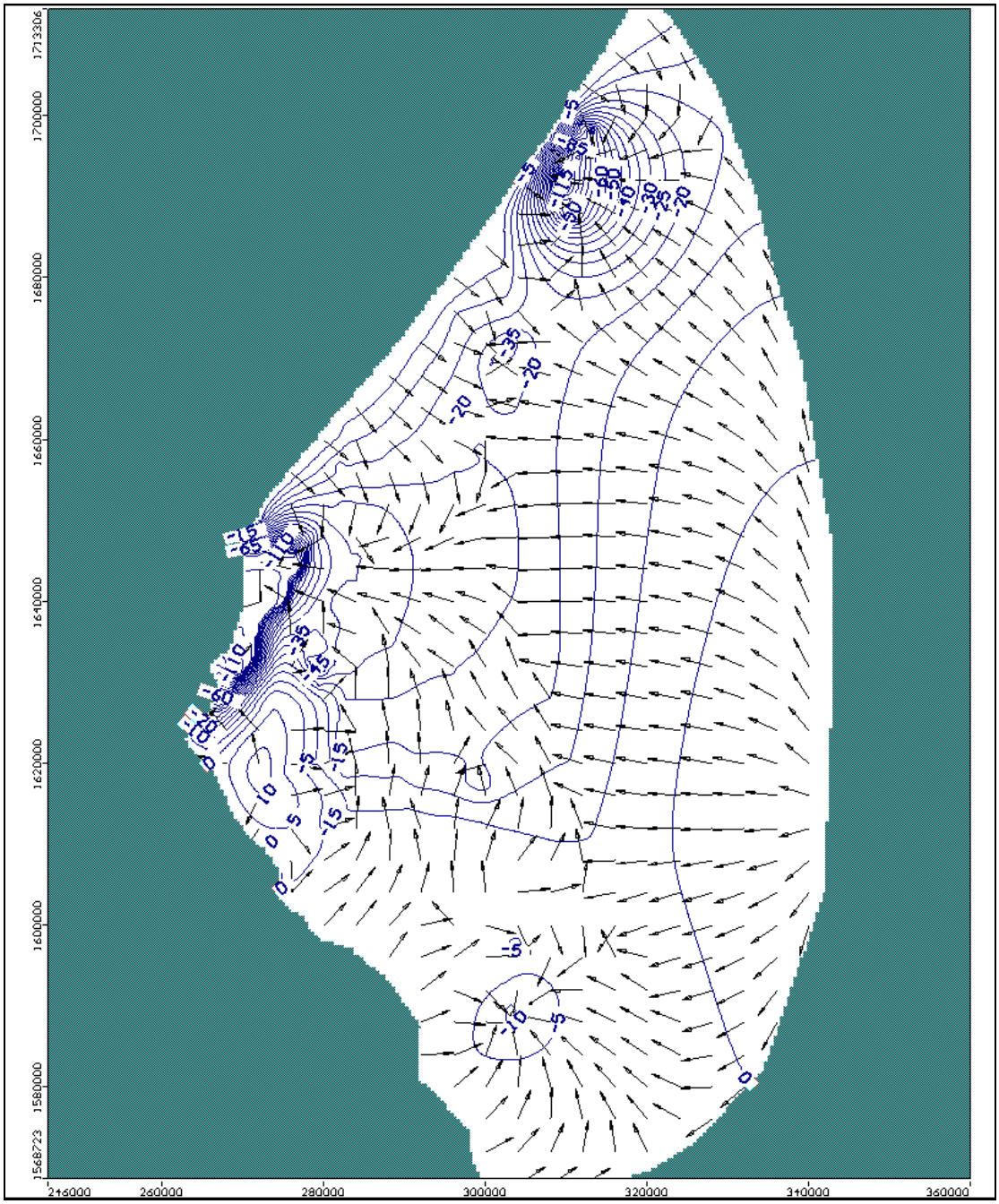



*Figure 42 : Directions d'écoulement et piézométrie simulées en 2035 pour le scénario 8 « prospective SONES » et recharge moyenne en couche 1 du modèle.*

Cette carte montre un risque de salinisation accélérée pour les aquifère du Paléocène et du Maastrichtien le long du littoral nord à l'avenir, malgré les ajustements de débits envisagés sur les forages de la SONES. Le long du littoral sud, c'est une zone plus étendue qui serait concerné par un fort risque de salinisation des aquifères.

## IV.4 **Définition et résultats de simulation du scénario complémentaire**

Les résultats des scénarios initiaux testés ont montré des insuffisances liées à des baisses niveaux piézométriques encore importantes et des risques d'intrusion d'eau salée. Cette situation nous ainsi amené à tester un autre scénario dit complémentaire. L'objectif de ce scénario complémentaire est de tester une modification de la répartition des prélèvements d'eau pour l'AEP de Dakar (forages SONES), de manière à mieux répartir ces pompages et exploiter au mieux la ressource disponible à un niveau de prélèvement proche de celui proposé dans le scénario « prospective SONES » à l'horizon 2035.

Pour ce faire, plusieurs nouveaux champs captant sont proposés dans le cadre de ce scénario, avec au total 22 nouveaux forages. La localisation de ces points est présentée à la figure suivante :

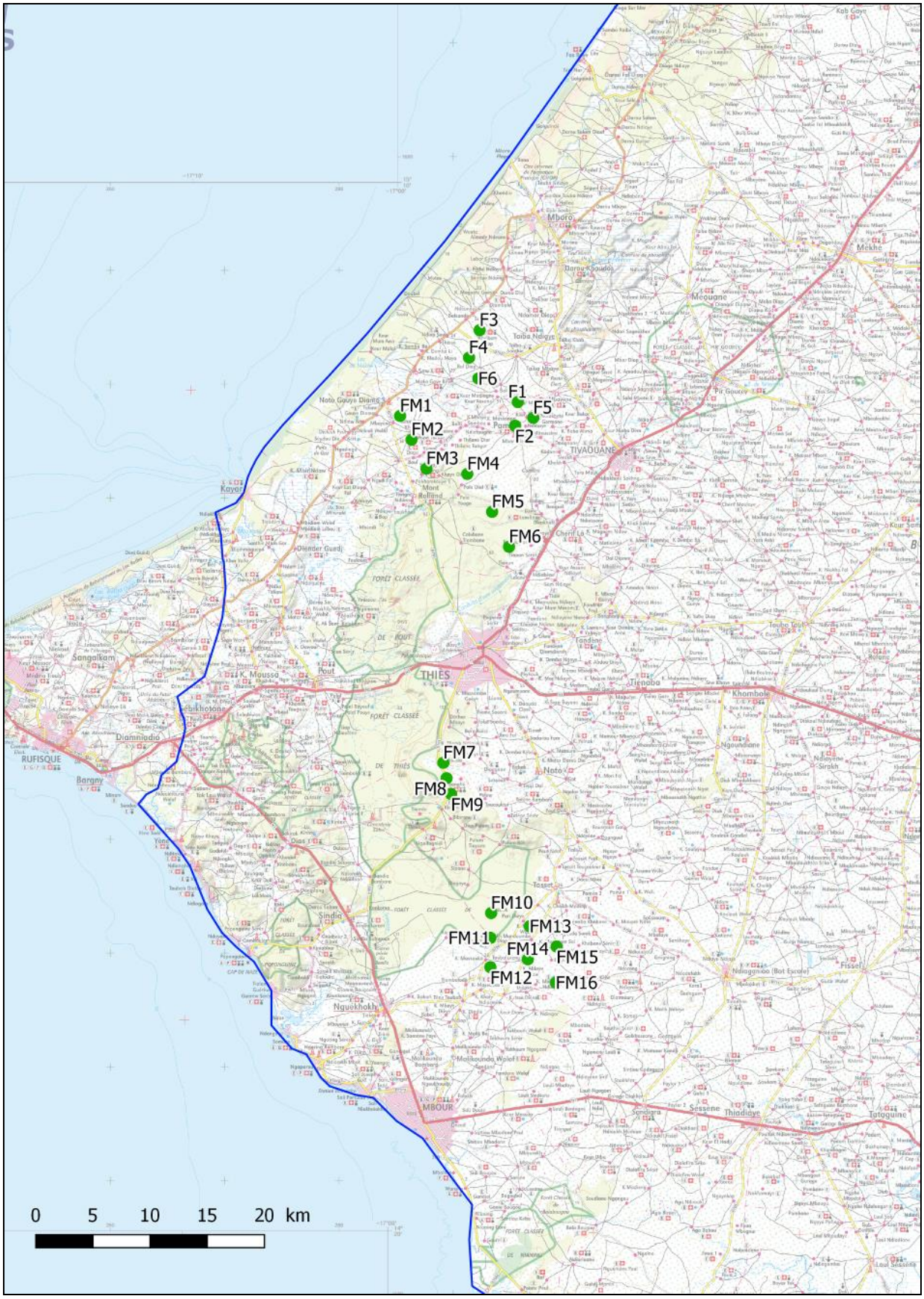



*Figure 43 : Localisation des nouveaux forages proposés dans le cadre du scénario complémentaire.*

Les forages F1 à F6 situés en partie nord du système aquifère captent l'aquifère du Paléocène, et les forages FM1 à FM16 captent l'aquifère du Maastrichtien.

Le tableau suivant récapitule les débits d'exploitation prévus pour ces forages dans le cadre du scénario complémentaire :

*Tableau 8 : Débits journaliers d'exploitation testés pour les nouveaux forages du scénario complémentaire.*

| Forage | Débit d'exploitation ($m^3$/jour) |
|---|---|
| F1 | 1760 |
| F2 | 1760 |
| F3 | 1100 |
| F4 | 1100 |
| F5 | 1760 |
| F6 | 1760 |
| FM1 | 2200 |
| FM2 | 2200 |
| FM3 | 2200 |
| FM4 | 1760 |
| FM5 | 1760 |
| FM6 | 1760 |
| FM7 | 1760 |
| FM8 | 1760 |
| FM9 | 1760 |
| FM10 | 1760 |
| FM11 | 1760 |
| FM12 | 1760 |
| FM13 | 1760 |
| FM14 | 1760 |
| FM15 | 1760 |
| FM16 | 1760 |

Le volume journalier total fourni par ces nouveaux champs captant est proche de 39 000 $m^3$/jour.

En parallèle, et afin d'assurer un niveau de sollicitation réaliste des aquifères, les forages du champ captant de Bayakh, pour lesquels des rabattements très importants sont simulés dans les scénarios précédents à l'horizon 2035, sont arrêtés à partir de 2026 dans le cadre de ce scénario.

Les volumes pompés aux forages privés sont également augmentés de 5 % en 2018 puis en 2026 dans ces scénarios, comme dans les scénario « prospective SONES », afin de prendre en compte une probable augmentation de la demande.

Les autres types de prélèvements (ruraux et industrie) ne sont pas modifiés dans ce scénario, car aucune information n'est disponible quant à leurs possibles évolution. Il faut cependant noter que certains prélèvements ne semblent pas soutenables d'après les scénarios déjà mis en œuvre.

Comme pour le scénario initial, le scénario complémentaire a été décliné en trois versions avec des recharges différentes (moyenne, diminuée de 10% et augmentée de 10%).

Les résultats du scénario complémentaire sont présentés sous forme de cartes de rabattements piézométriques simulés avec une recharge moyenne, et de quelques chroniques piézométriques simulées. Les cartes piézométriques permettent de tirer les conclusions suivantes :

- Par rapport au scénario « prospective SONES », les rabattements simulés pour le scénario complémentaire sont plus faibles dans le compartiment de Sébikotane : (25 m maximum de rabattement, contre 50 m environ).
- Ils sont également plus élevés dans le secteur de Pout et de Thiès où ils atteignent 10 à 15 m.

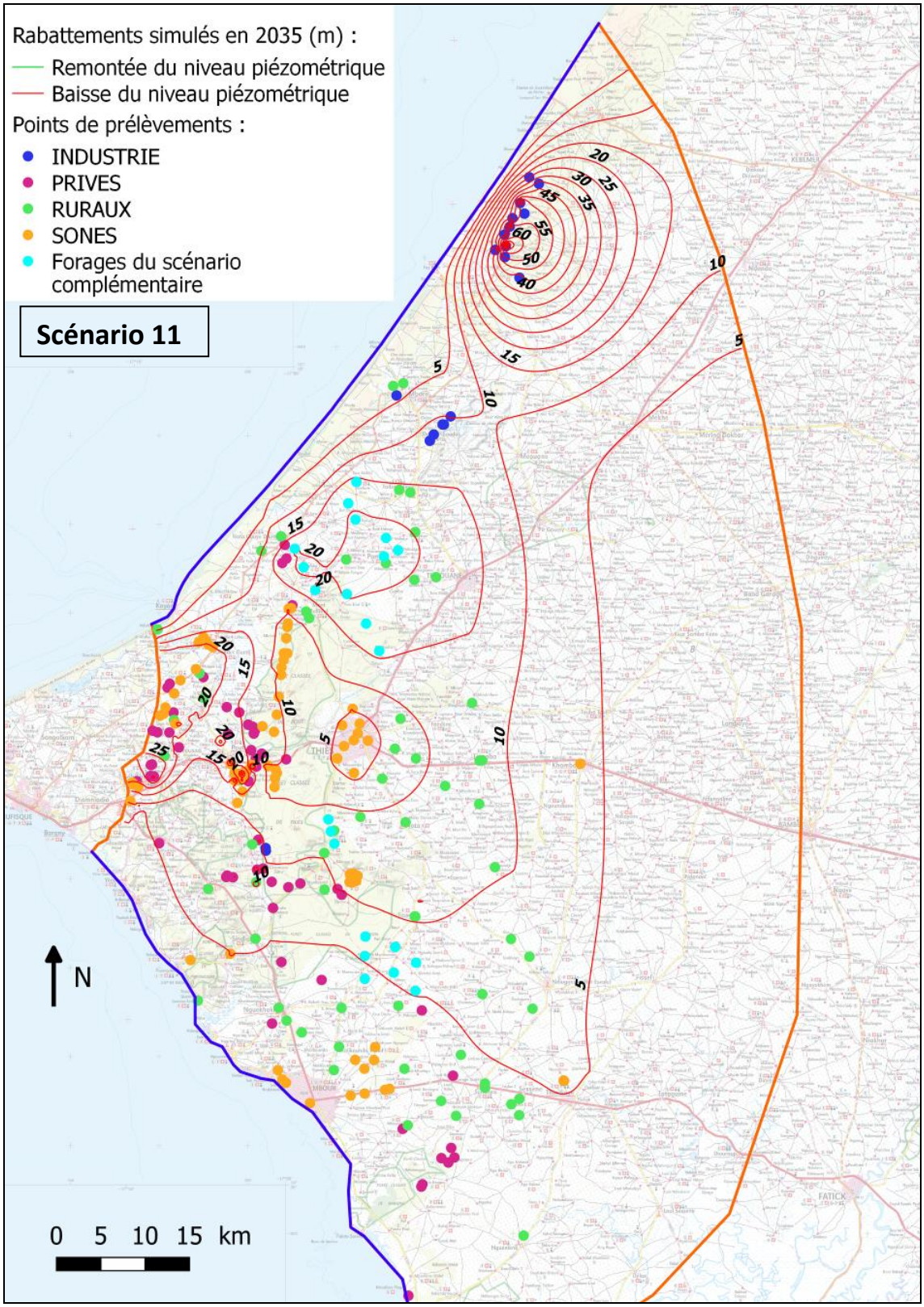



*Figure 44 : Rabattements simulés en 2035 par rapport à la situation piézométrique de fin 2015 du scénario complémentaire (avec recharge moyenne).*

Les chroniques piézométriques (à partir des mêmes points de suivi que les scénarios initiaux) permettent de tirer les conclusions suivantes :

- Pour le piézomètre Yenne 9, situé en partie sud du compartiment de Sébikotane, les niveaux piézométriques simulés en 2035 pour le scénario complémentaire sont légèrement supérieurs à ceux simulés pour les scénario de la SONES, ce qui met en évidence une amélioration relative de la situation piézométrique dans ce compartiment fortement surexploité.
- Pour les deux piézomètres SE36 Paléocène et Pout Noto S3378, situés dans le secteur de Pout, les niveaux piézométriques simulés pour le scénario complémentaire sont inférieurs à ceux simulés pour le scénario SONES, en raison de la présence de nouveaux champs captant.

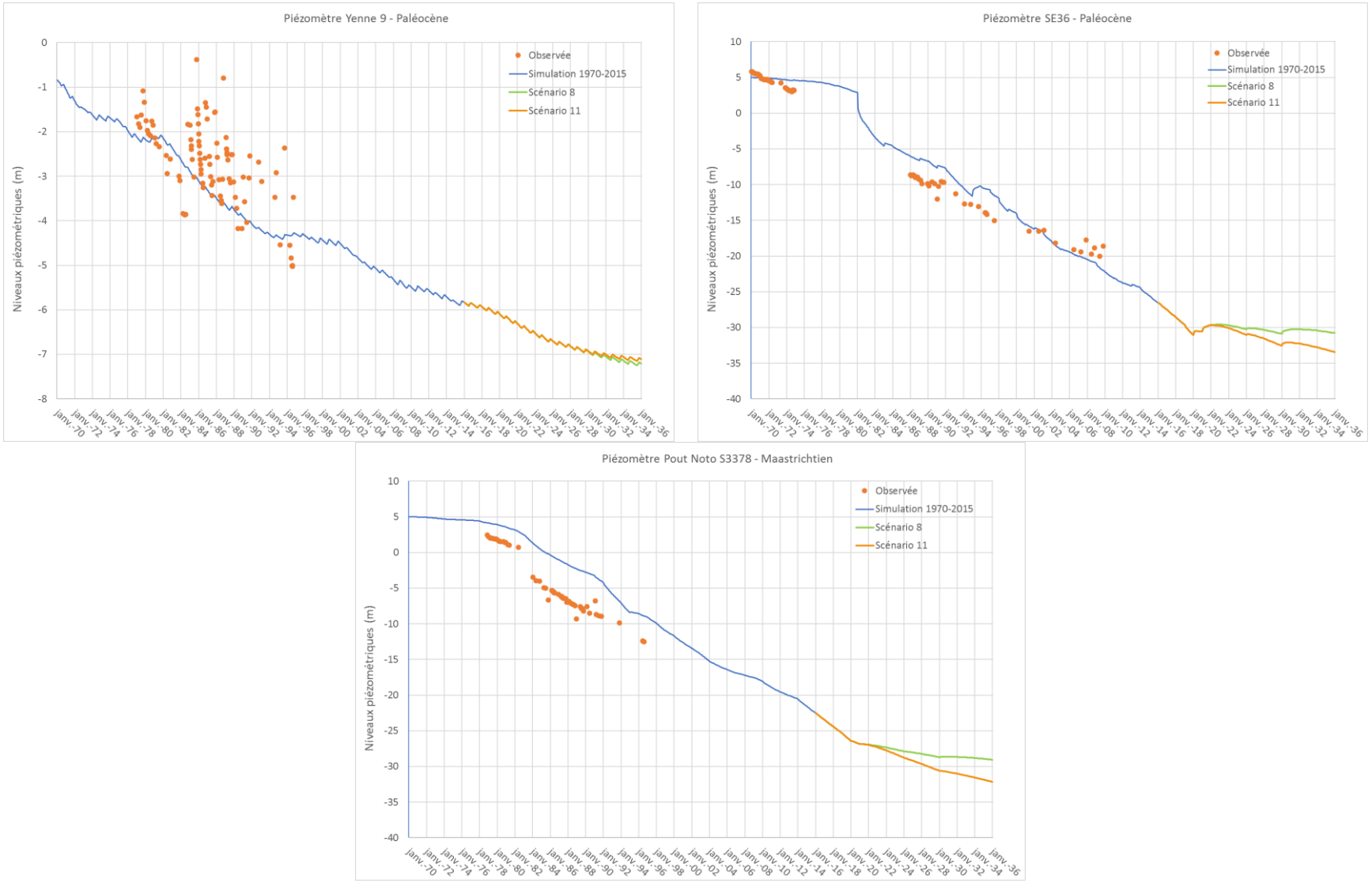



*Figure 45 : Chroniques piézométriques observées et simulées aux trois points de référence pour les scénarios complémentaire*

La figure suivante présente les directions d'écoulement simulées en 2035 pour le scénario complémentaire avec une recharge moyenne, dans la première couche du modèle.

Cette carte fait apparaître que les directions d'écoulement le long du littoral nord sont toujours depuis le littoral vers l'intérieur des terres, mais avec un gradient piézométrique encore plus marqué que dans la situation simulée pour 2015 et dans le scénario « prospective SONES » en 2035.

De même, au niveau du littoral sud, les écoulements sont dirigés du littoral vers l'intérieur des terres sur toute la zone située au sud du compartiment de Diass. Le gradient piézométrique simulé le long de cette limite est comparable à celui simulé pour le scénario « prospective SONES ».

Les écoulements se font toujours en direction du littoral en bordure sud du massif de Diass, et vers l'intérieur des terres dans le compartiment de Sébikotane.

Globalement on peut dire que le scénario complémentaire n'apporte pas une amélioration par rapport aux risques d'intrusion d'eau salée.

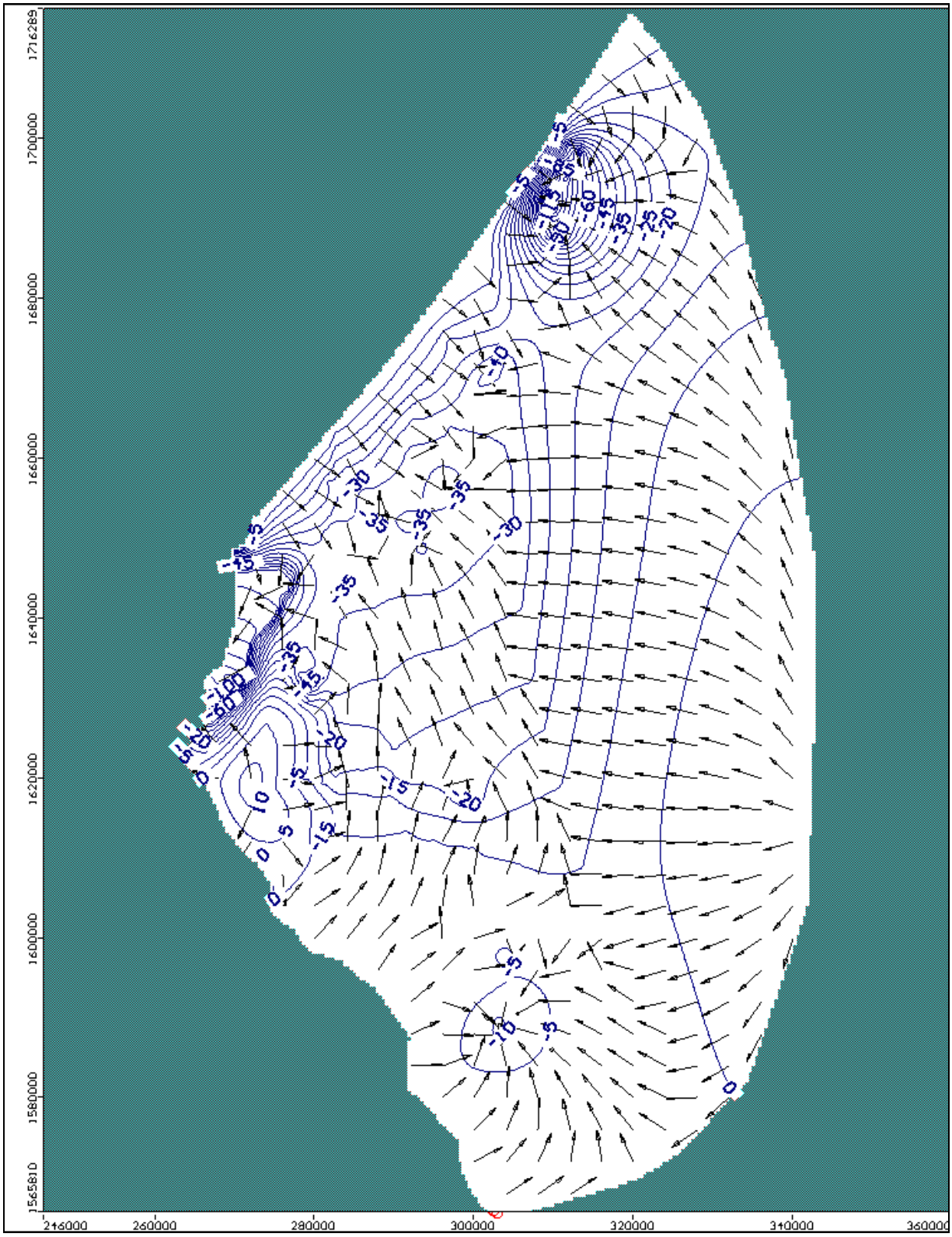



*Figure 46 : Directions d'écoulement et piézométrie simulées en 2035 pour le scénario 11 « prospective SONES » et recharge moyenne.*

# CHAPITRE V. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

## V.1 Conclusions

Cette étude hydrogéologique complémentaire du système aquifère du horst de Diass a été une occasion pour :

- Collecter et analyser l'ensemble des données et informations relatives à ce système qui étaient auparavant dispersées dans divers supports (rapports de travaux de forages et d'études antérieures, bases de données…) ;
- Faire l'état des lacunes et de compléter dans le cadre des activités qui étaient prévues dans cette mission certaines de ces lacunes.

L'analyse et la synthèse de ces données a permis d'améliorer l'état des connaissances sur :

- les caractéristiques géométriques des aquifères et des couches qui les séparent (toit, mur, épaisseur) ;
- les paramètres hydrodynamiques et les caractéristiques physicochimiques des eaux ;
- le fonctionnement hydrauliques des nappes (sens d'écoulement, relation hydraulique entre nappes superposées, relation hydraulique avec les cours d'eau et la mer) ;
- les conditions de recharge par la pluie et les cours d'eau et l'évaluation de cette recharge.

L'ensemble des données collectées et traitées a par ailleurs permis de construire une base de données et outil de gestion mis à la disposition de la DGPRE. Ces données ont aussi permis de construire un modèle hydrogéologique de simulation du fonctionnement des nappes du système aquifère du horst de Diass.

Le modèle hydrogéologique du système aquifère du Horst de Diass développé a permis de confirmer l'état de surexploitation des aquifères du Paléocène et du Maastrichtien dans le secteur. Le niveau de prélèvements est de 268 000 $m^3$/jour environ pour l'année 2015, pour une recharge pluviométrique de près de 83 000 $m^3$/jour. Les autres entrées d'eau simulées dans le système hydrogéologique se situent au niveau du littoral et correspondent à des eaux potentiellement saumâtres, sources d'une dégradation de la qualité des eaux pompées dans les aquifères. Ces chiffres montrent un déséquilibre dans le bilan global du système et l'exploitation des nappes du système à un tel rythme ne peut pas être soutenable dans le temps. Le rythme de pompage correspondant à un équilibre (83 000 $m^3$/an) et qui serait soutenable ne permettrait malheureusement pas de satisfaire les besoins en eau importants de l'alimentation en eau potable et des activités socioéconomiques.

Plusieurs scénarios d'évolution des prélèvements ont été définis avec le maitre d'ouvrage à partir principalement de données de planification fournis par la Sones. Les résultats des simulations de ces

scénarios sous des conditions de recharge proches de celles de la période 1990-2015 ont mis en évidence une poursuite de la baisse du niveau des nappes du système du horts de Diass et du risque de dégradation de la qualité de l'eau au niveau du littoral Sud et Nord. Un scénario d'arrêt des pompage sur la période 2016-2035 n'a pas permis remontée satisfaisante du niveau des nappes (légèrement au dessus du niveau de la mer).

## V.2 Principales recommandations

Au vue de l'ensemble de ces résultats et conclusions des recommandations ont été formulées en vue de poursuivre les efforts pour l'amélioration de l'exploitation et la gestion des ressources en eau du système aquifère du horts de Diass. Celles-ci sont :

- Des dispositions doivent être prises par la DGPRE pour une appropriation de ce modèle afin de pouvoir continuer son utilisation pour une meilleure gestion des ressources en eau du système du horst de Diass. Elles peuvent consister à la désignation et la formation de quelques personnes ressources à l'utilisation de modèle de simulation hydrogéologique. Cette recommandation est heureusement en cours de mise en œuvre et des efforts doivent être fournis pour maintenir le cap ;
- D'autres dispositions allant dans le sens d'améliorer la qualité des données de la DGPRE doivent aussi être prise :
    - suivi régulier des prélèvements conséquents (forages privés, forages industries et forages ruraux) , installation de compteurs, application des dispositions prévues dans le code de l'eau, information des utilisateurs ;
    - amélioration du dispositif de suivi piézométrique et de la qualité des eaux : renforcement du réseau de suivi en particulier au niveau des zones potentielles d'intrusion saline (littoral nord et sud) et de prélèvements importants non encore équipées. Un proposition de renforcement du réseau de suivi est faite et est illustrée par la figure suivante :

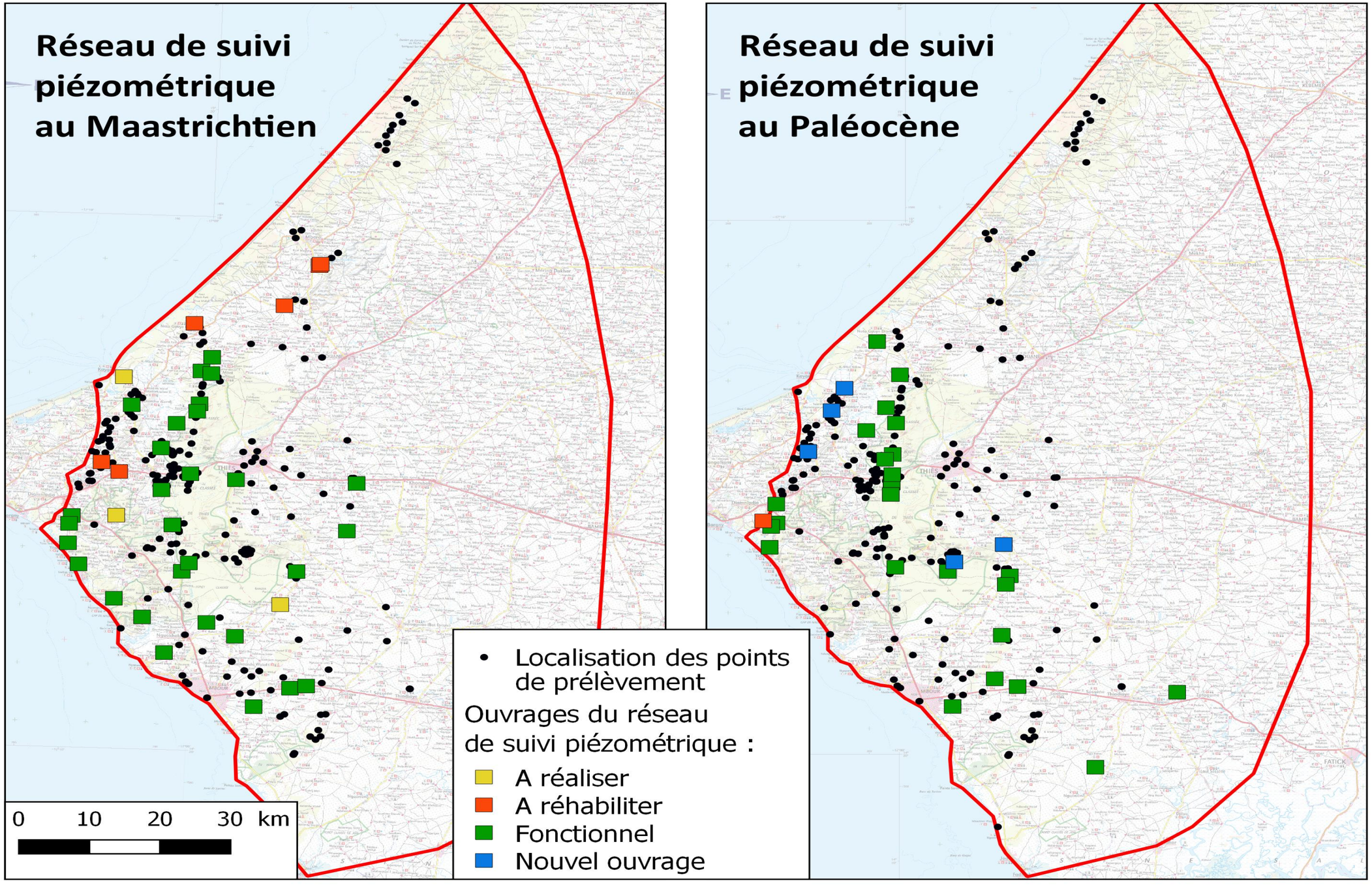



*Figure 47 : Proposition d'amélioration du réseau de suivi piézométrique*

Pour ce qui est de l'exploitation des aquifères du système hydrogéologique du horst de Diass, nous suggérons dans le court terme et par rapport aux prévisions d'exploitation :

- la mise en place dans les meilleurs délais d'un dispositif de suivi quantitatif et qualitatif des nappes dans le nouveau champ captant de Bayakh du fait du risque d'intrusion salée possible.
- la possibilité de réduire à terme (après installation de piézomètres de suivi et confirmation éventuelle des risques d'intrusion) les volumes d'eau pompée dans ce champ et la poursuite des pompages au niveau de Tassette et Thies qui sont moins vulnérables pour compenser ;
- la définition en collaboration avec la Sones en particulier d'un meilleur programme d'exploitation à plus long terme des nappes de ce système prenant à la fois en compte la vulnérabilité du système mais aussi les besoins en eau des différents usages qui sera testée avec le modèle construit ;
- dans ce sens une large diffusion des résultats de cette étude serait conseillée pour permettre aux autorités et utilisateurs d'être sensibles sur les divers enjeux liés à l'exploitation des eaux souterraines du système du horst de Diass.

Pour apporter une solution plus durable et efficace au déséquilibre important observé entre le niveau des prélèvements opérés et la recharge naturelle par les pluies des réflexions et actions de recherche de solutions alternatives (recharge artificielle des nappes à partir d'aménagements des cours d'eau de surface, utilisation de ressources en eau alternatives pour la satisfaction de certains besoins), doivent être entreprises. Une proposition d'étude allant dans ce sens est faite en annexe.

# BIBLIOGRAPHIE


1. Les nappes de la presqu'île du Cap Vert : leur utilisation pour l'alimentation en eau de Dakar par A Martin BRGM 1970 ;
2. Synthèse hydrogéologique du Sénégal Etude géologique structurale par photo interprétation Géométrie et limites des aquifères souterrains DEH 1985 ;
3. Projet de mise en œuvre du plan d'action de gestion intégrée des ressources en eau dans le bassin arachidier (PAGIRE-BA) – Etudes hydrogéologiques pour l'évaluation des potentialités des ressources en eau des zones favorables en vue d'un transfert d'eau vers le Bassin Arachidier 2013
4. Etude hydrogéologique des calcaires paléocènes de la région de Mbour par G, Pitaud 1980.
5. Doublement de la conduite THIES – Dakar Etude de la factibilité et avant projet sommaire Actualisation du modèle mathématique des Aquifères Paléocène et Maestrichtien du Sénégal Occidental Rhein Rhur Ingenieurs- Arlab Dec 1984-85 ;
6. Bilan diagnostic des ressources en eau du Sénégal Projet MH/PNUD/DADSG-SEN/87/006 « Planification des ressources en eau » Sept 94 ;
7. Etude hydrogéologique de la nappe profonde du Maastrichtien COWI Février 1999-2002 ;
8. Projet Eau à Long Terme - Etudes Hydrogéologiques Complémentaires GKW CONSULT 2009.
9. Projet de mise en œuvre du plan d'action de gestion intégrée des ressources en eau dans le bassin arachidier (PAGIRE-BA) – Etudes hydrogéologiques pour l'évaluation des potentialités des ressources en eau des zones favorables en vue d'un transfert d'eau vers le Bassin Arachidier 2013.
10. Bases de données de la DGPRE (inventaire des ouvrages hydrauliques, piézométrie, qualité des eaux, pompages)
11. Données de chroniques des pompages dans les forages de la SONES ;
12. Données de chroniques des pompages dans les forages de GCO ;

# ANNEXE

# Note pour l'étude de faisabilité d'aménagement des eaux de surface pour l'amélioration de la recharge des nappes du système aquifère du horst de Diass en vue d'une exploitation plus durable

## 1. Contexte et justification

Les nappes du système aquifère du horst de Diass joue un rôle important dans l'alimentation en eau potable de Dakar et certaines grandes villes de la région de Thiès. Elle contribue aussi de manière significative à la satisfaction des besoins en eau des industries minières de la zone et de plusieurs exploitations agricoles. En effet la zone du horst de Diass constitue un important potentiel minier et agricole au niveau du pays. A titre indicatif en 2016 la contribution des nappes du système aquifère de Diass pour l'alimentation en eau potable de Dakar et des villes de la région de Thiès a été de 137 000 $m^3$/jour et celle pour les forages privés (des exploitations agricoles et des industries minières est du même ordre de grandeur.

Plusieurs études hydrogéologiques dont certaines ont incluent une modélisation hydrogéologique du fonctionnement de ces nappes ont été menées depuis xxx. La dernière a été celle menée récemment par la DGPRE avec l'appui de l'Association Internationale de Développement (IDA) dans le cadre du projet Eau et Assainissement en milieu urbain (PEAMU) et intitulée « Etude hydrogéologique complémentaire du système du horst de Diass ». Ces études ont toutes montré une surexploitation de ces nappes avec des risques de rabattement excessif et d'intrusion d'eau salée à terme. A titre indicatif, la dernière étude ci-dessus citée a montré que pour l'année 2016 :

- le niveau des prélèvement sur les nappes du système du horst de Diass a été de l'ordre de 268 000 $m^3$/jour ;
- la recharge des nappes par les pluie qui est la principale source d'entrée d'eau pouvant compenser ces prélèvement est de l'ordre de 83 000 $m^3$/jour ;
- soit ainsi un déséquilibre important entre entrées et sorties d'eau qui a commencé depuis les années 1980 et a entrainé des baisses de niveau en dessous de celui de la mer et des risques d'intrusion d'eau salée au niveau des zones littorales.

La définition de plusieurs scénarios d'exploitation visant à concilier la satisfaction des besoins en eau potable et ceux des activités socio-économiques et le test de leur faisabilité à partir du modèle de simulation contruit dans le cadre de « Etude hydrogéologique complémentaire du système du horst de Diass » ont montré n a pas donné des résultats satisfaisants.

Par ailleurs, il se trouve que plusieurs cours d'eau existent dans la zone du système aquifère du horst de Diass et peu d'aménagements existent au niveau de ces cours d'eau.

Ainsi, l'idée d'aménager certains de ces cours en vue de créer des conditions qui améliorent artificiellement la recharge des nappes de cette zone, a paru intéressante à étudier plus à fond. Cette idée fait l'objet de la présente note.

## 2. Présentation de la zone et des potentialités en ressources en eau de surface

Les cartes qui suivent réalisées dans le cadre de l'étude citée plus haut présente :

- les limites de la zone à étudier, son réseau hydrographique, un découpage par bassin versant ;
- la répartition des points de pompage et leur importance relative ainsi la carte piézométrique de la nappe supérieure qui montre entre autre les zones déprimées au niveau desquels il est surtout attendu une recharge artificielle significative.

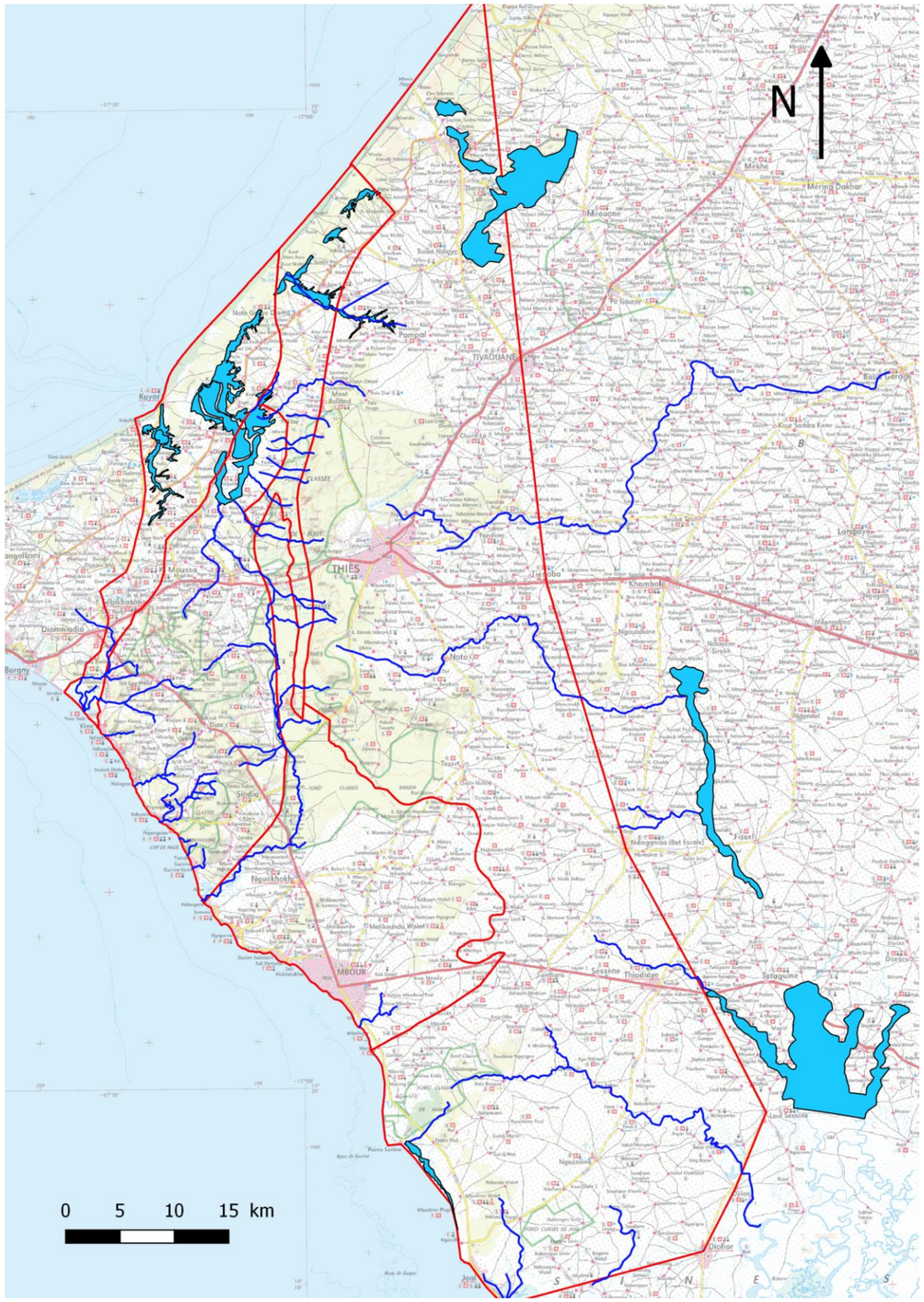



*Figure 48 : Carte du réseau de drainage et de découpage en bassin versant*

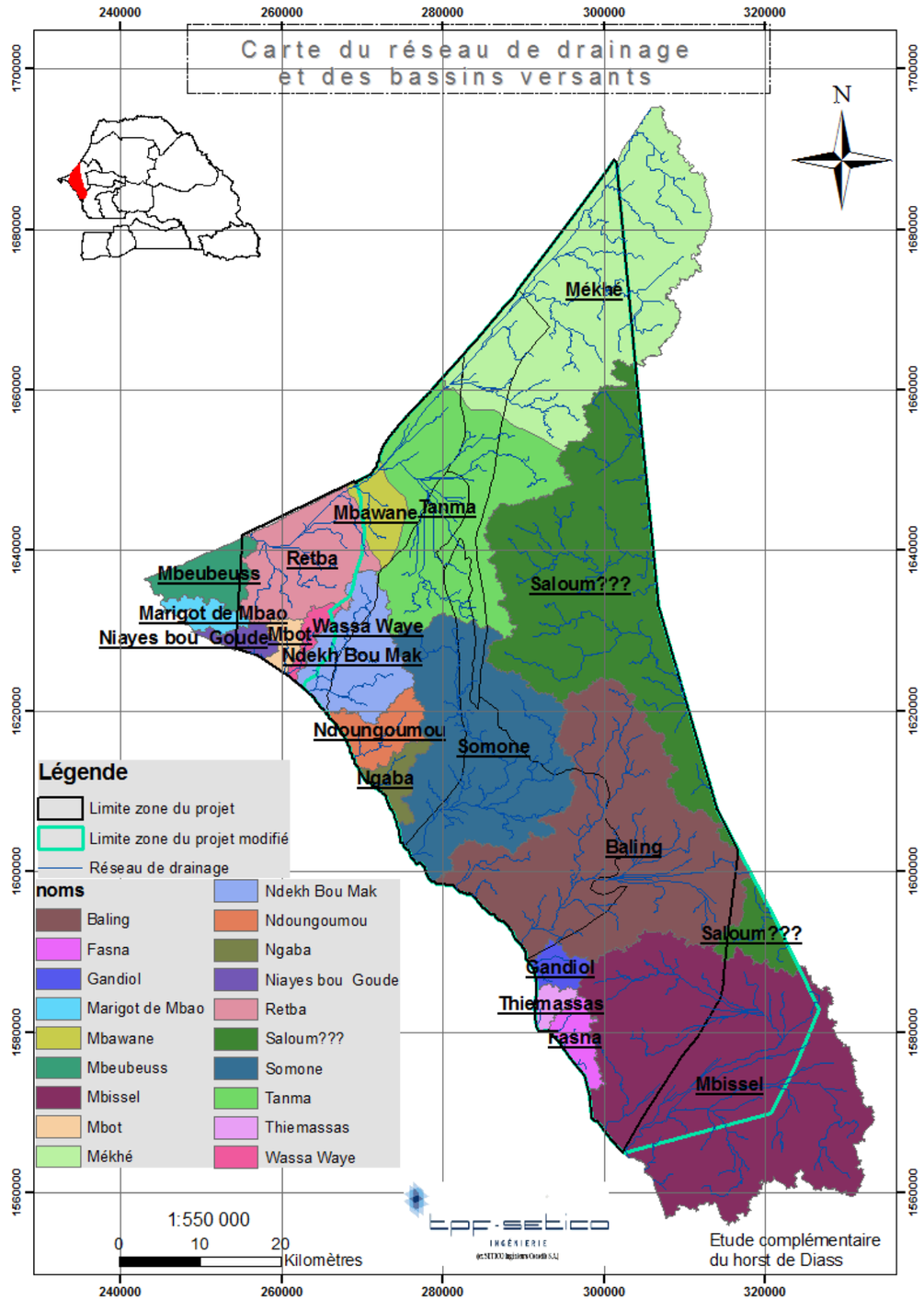



*Figure 49 : Carte du réseau hydrographique*

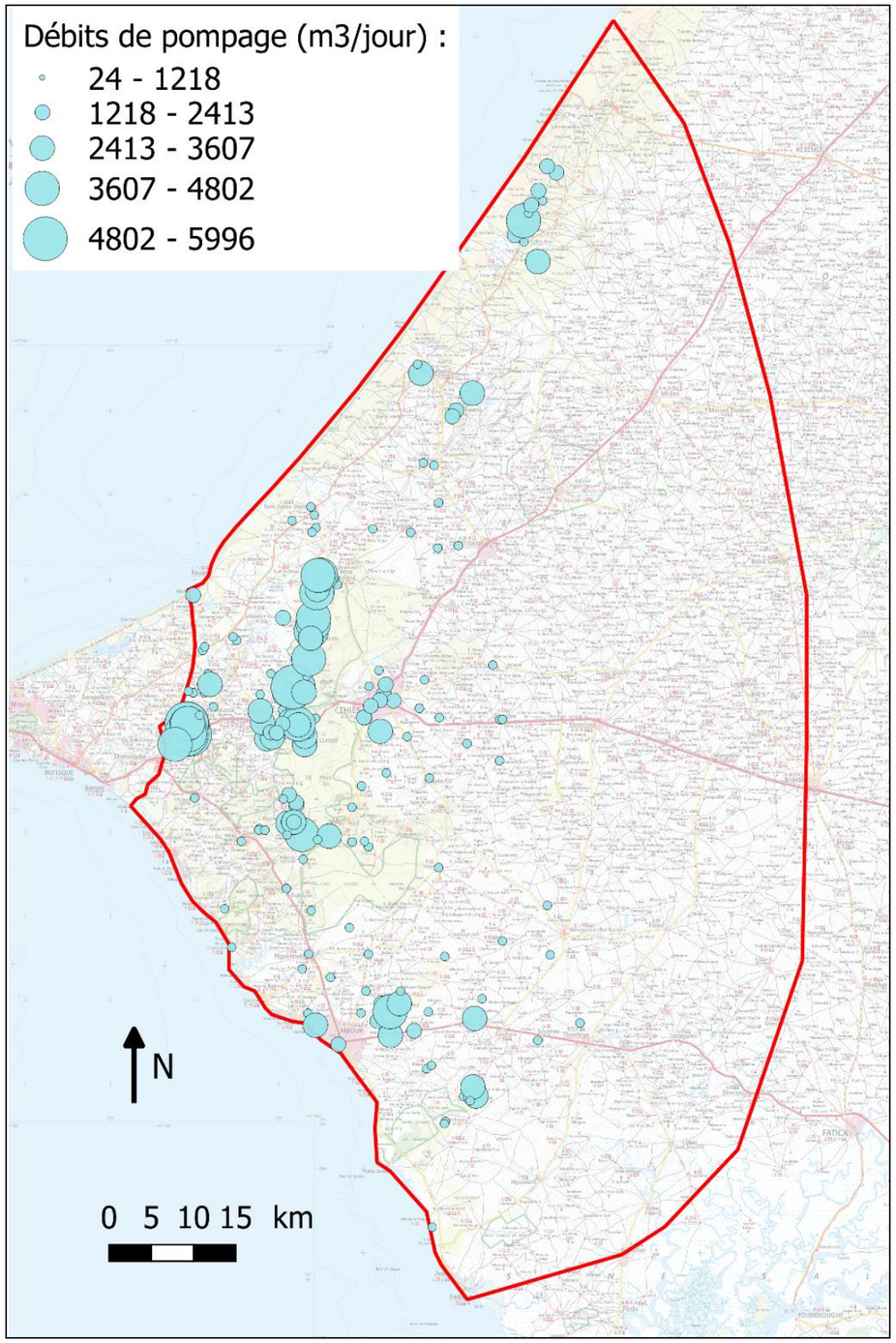



*Figure 50 : Carte de répartition des points de pompage*

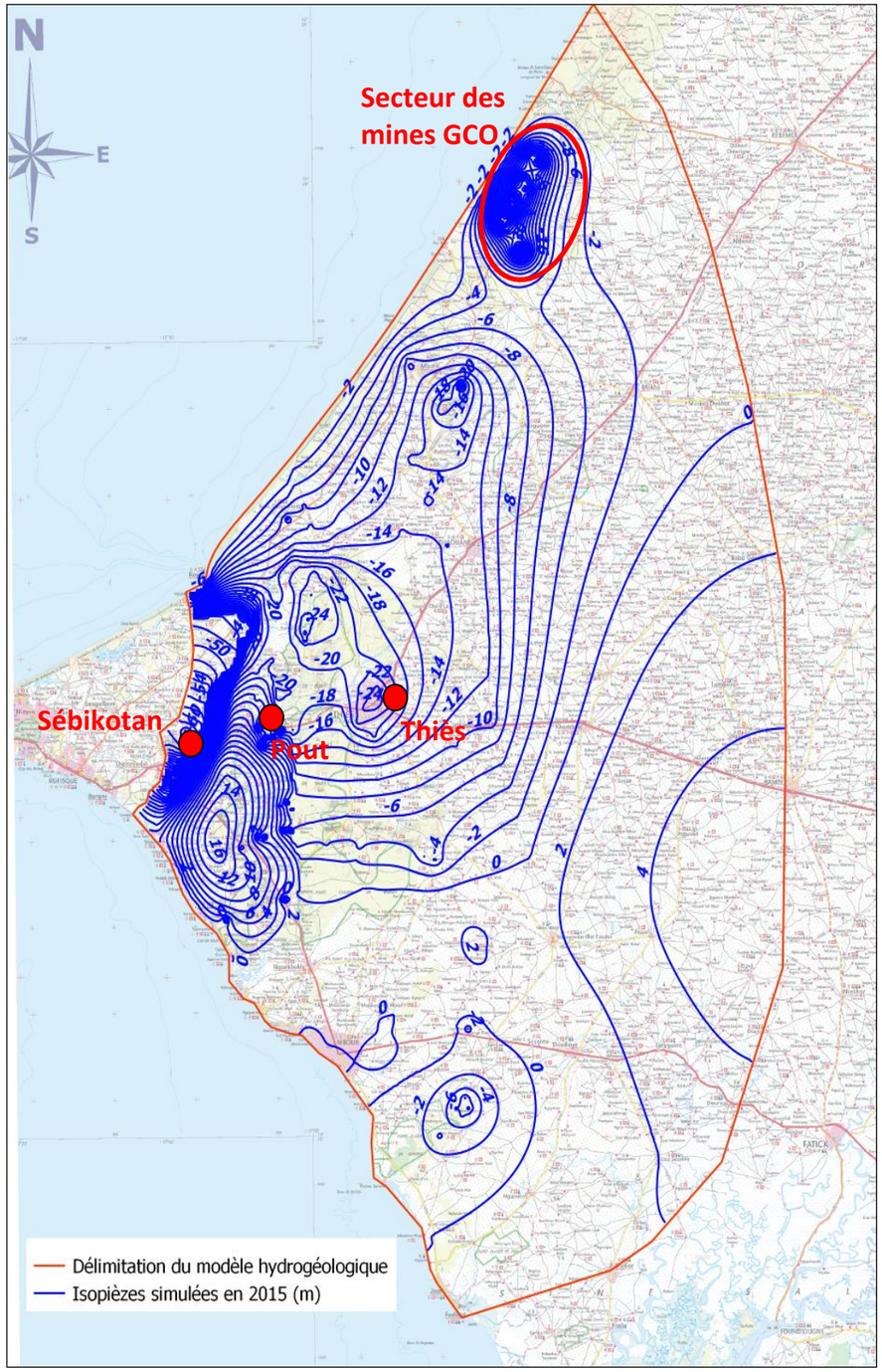



*Figure 51 : Carte piézométrique fin 2015 (aquifère supérieur)*

## 3. Cadre logique de la proposition d'étude

| | |
|---|---|
| **Objectif général :** étudier les possibilités d'aménagement des eaux de surface en vue d'améliorer les conditions de recharge artificielle des nappes du système aquifère du horst de Diass et de rendre l'exploitation de ces nappes plus durables au bénéfice des populations et des activités socioéconomiques | |
| **Objectifs spécifiques** | **Activités à mener** |
| Faire un état des lieux des possibilités d'aménagement des eaux de surface de la zone | Faire un état des cours d'eau de la zone et de leur découpage en bassin versant |
| | Faire l'inventaire des ouvrages d'aménagement d'eau de surface existant pour chaque bassin versant |
| | Evaluer les capacités en eau de ruissellement de chaque bassin (en année normale, excédentaire et déficitaire) et les capacité totale sur toute la zone de l'étude |
| Faire l'étude comparée des types d'aménagement possible en fonction des caractéristiques des bassins versant | Faire l'état des types d'aménagement des eaux de surface pour l'alimentation artificielle des nappes possibles (des plus simples consistant par exemple à ralentir les écoulements et favoriser l'infiltration au plus complexe par exemple ouvrage de stockage couplé à un dispositif d'infiltration) |
| | Identifier en fonction des caractéristiques des sols de surface et pour chaque bassin versant susceptible de faire l'objet d'aménagement le ou les types d'aménagement les plus appropriés |
| Faire l'étude comparée des sites aménageables | Evaluer les volumes d'eau de recharge artificielle possibles (en année normale, excédentaire et déficitaire) pour chaque bassin et pour l'ensemble des bassins aménageables |
| | Comparer le volume d'eau de recharge total possible avec le déficit d'exploitation du système aquifère qui est de l'ordre de 200 000 $m^3$/jour |
| | Evaluer sommairement les couts pour chaque aménagement possible et les rendements correspondants (cout/volume d'eau rechargeable) |
| Faire les études d'impact environnemental et social | Evaluer pour chaque site aménageables les impacts possibles (sur les conflits possibles liés aux usages antérieurs des eaux de surface, sur la recharge de la nappe et la qualité des eaux des nappes, les autres impacts environnementaux et sociaux) |
| Choisir les sites à étudier de façon plus détaillée | Faire un classement des sites aménageables en vue de choisir des sites à retenir pour des études détaillées d'aménagement |