

Programme de Mitigation des Inondations de Thiaroye



Dossier gestion intégrée, Février 2012

urbaMonde

Diane von Gunten

Sommaire

INTRODUCTION.....	4
PRÉSENTATION DE LA NAPPE PHRÉATIQUE DE THIAROYE.....	5
CLIMATOLOGIE.....	6
DÉMOGRAPHIE :	7
EVOLUTION DU NIVEAU DE LA NAPPE DE THIAROYE.....	8
ANALYSE DES PROJETS DE RÉDUCTIONS DES INONDATIONS.....	10
DESCRIPTIF DES PROJETS DE RÉDUCTION DES INONDATIONS.....	10
IMPACT DES PROJETS DE RÉDUCTION DES INONDATIONS SUR LA NAPPE PHRÉATIQUE.	12
AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS DES TROIS PROJETS EN COURS	15
ANALYSE DES SYNERGIES ENTRE LES PROJETS.....	16
ACTEURS LIÉS À LA NAPPE PHRÉATIQUE DE THIAROYE	20
MODÉLISATION	23
CARACTÉRISATION DES ENTRÉES D'EAU.....	23
CARACTÉRISATION DES SORTIES D'EAU.....	31
PARAMÈTRES HYDRAULIQUES ET PIÉZOMÉTRIE.....	35
IMPACT CROISÉ DES PROJETS (BASÉ SUR LE PDD).....	38
AMÉLIORATIONS POSSIBLES DE LA MODÉLISATION.....	42
CONCLUSION	43
ANALYSE INSTITUTIONNELLE.....	44
INTRODUCTION.....	44
PRÉSENTATION DES ACTEURS INTERROGÉS ET DE LEURS RESPONSABILITÉS	45
AVIS SUR LA GESTION DE LA NAPPE PHRÉATIQUE	50
ANALYSE ET CONCLUSION SUR LES ENTRETIENS.....	55
PROPOSITIONS POUR UNE GESTION INTÉGRÉE	57
FACTEURS EXTERNES LIMITANT LA GESTION.....	57
DÉFINITION DE LA GESTION INTÉGRÉE.....	62
AVANTAGES D'UNE GESTION INTÉGRÉE.....	62
CONCLUSION.....	63
CONCLUSION DE L'ÉTUDE	64
ANALYSE DES PROJETS.....	64
MODÉLISATION.....	65
SITUATION INSTITUTIONNELLE.....	66
CONCLUSION.....	67
ANNEXE 1 : ANALYSE DES PROJETS.....	68

ANNEXE 2 : HISTORIQUE DE LA NAPPE DE THIAROYE.....	77
ANNEXE 3 : ANALYSE DE QUALITÉ DES EAUX DE LA NAPPE.....	80
ANNEXE 4 : SYNTHÈSE DES SYNERGIES ET CONTRADICTION ENTRE LES PROJETS.....	82
ANNEXE 5 : POSITION DES FORAGES.....	85
ANNEXE 6 : CARTE PIÉZOMÉTRIQUE.....	85
RÉFÉRENCES :.....	86

INTRODUCTION

En novembre 2011, l'ONG urbaMonde a organisé à Dakar un séminaire sur le sujet « Quelles synergies face aux inondations dans la région de Dakar ? ». A la suite de ce séminaire, un panel d'acteurs gouvernementaux et de membres de la société civile ont formé un cadre de concertation régional qui a pour but d'améliorer la gestion des inondations dans la périphérie de Dakar. Ce panel a défini trois thèmes principaux d'intervention (drainage urbain et eau potable, gestion de la nappe phréatique et aménagement urbain). Cette étude préliminaire est une contribution au deuxième thème : Gestion de la nappe phréatique de Thiaroye, située en périphérie de Dakar.

Plus précisément, cette analyse a pour but de démontrer la nécessité d'une gestion intégrée de la nappe phréatique de Thiaroye (Dakar, Sénégal), de définir les critères de cette gestion intégrée et d'esquisser les moyens techniques et institutionnels d'une telle initiative.

Ce travail débutera par la présentation de la zone d'étude et celle de son historique durant le XX^{ème} siècle. On décrira ensuite les projets de lutte contre les inondations en cours, leurs possibles synergies et leurs impacts sur la nappe phréatique. Une courte analyse des utilisateurs sera aussi présentée.

Dans une seconde partie, plus technique, on comparera plusieurs modélisations de la nappe de Thiaroye, présentes dans la littérature. On utilisera ces modélisations pour décrire l'impact des différents projets sur la nappe phréatique et les incertitudes liées aux modélisations.

Dans la partie suivante, on s'intéressera à la situation institutionnelle et à l'avis des services techniques sur les différents projets. En se basant sur une série d'entretiens, on définira les responsabilités de chaque service et on présentera leur avis sur les différents projets et les possibilités d'améliorations du schéma institutionnel.

Finalement, on définira les bases d'une gestion intégrée et le pourquoi de sa nécessité. En conclusion, on formulera des propositions concrètes pour l'amélioration de la gestion actuelle, tant au niveau organisationnel que technique.

Ce rapport, et les propositions qu'il contient, servira de base de discussion avec les acteurs institutionnels et de la société civile. Il sera présenté au cadre de concertation régional et discuté par celui-ci.

PRÉSENTATION DE LA NAPPE PHRÉATIQUE DE THIAROYE

La nappe phréatique de Thiaroye se trouve sur la presque-île du Cap-Vert au Sénégal. Cette nappe forme la partie ouest de la nappe des sables quaternaires, qui est une nappe phréatique non confinée d'environ 300 km². Elle s'étend de Kanak à Dakar et est composée de dépôts sableux (Ouedraogo, 2009). La nappe de Thiaroye est coupée à l'ouest par la nappe infra-basaltique de Dakar, une nappe phréatique confinée par une couche de basalte (S.C.Faye et al.). A l'est, la limite est définie par un affleurement de roches marneuses imperméables, situé au niveau de Rufisque (PDD rap.technique, Annexe 1, p.7). La nappe de Thiaroye est proche de la surface. Elle inonde régulièrement les habitations durant la saison des pluies. Ces inondations répétées causent des problèmes importants dans la région (urbaMonde, 2009).

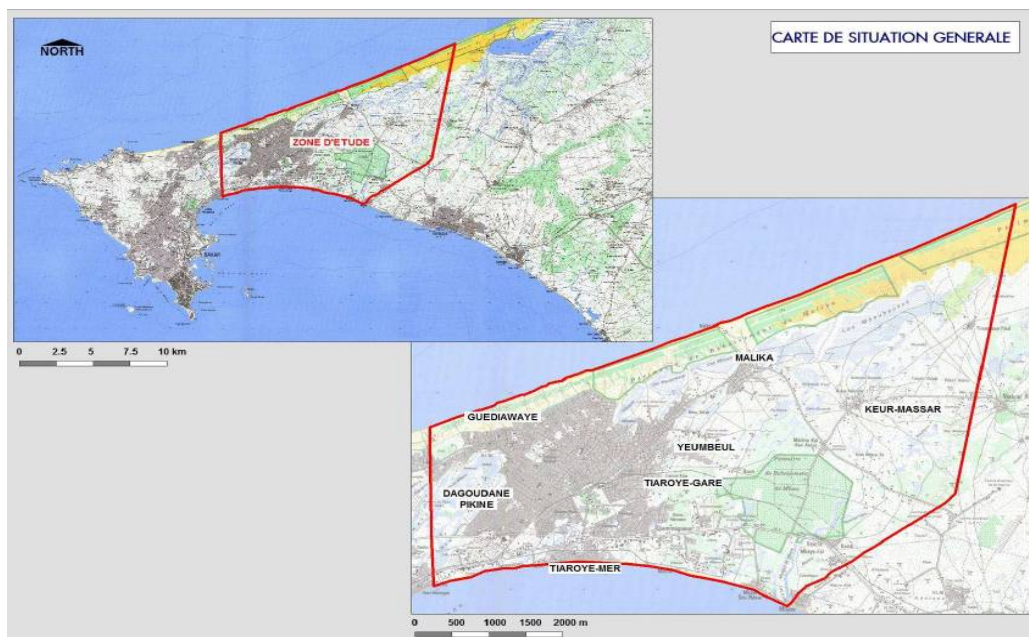


Figure 1 : Limites de la nappe phréatique de Thiaroye (tiré du PDD, rap.technique, Annexe 1,p.9)

Climatologie

La presque-île du Cap-Vert est dotée d'un microclimat influencé par l'océan Atlantique et la région saharienne (Koukoui,2002). La température moyenne (1980-2005) est de 24.7°C (Re, 2010) avec un maximum entre mars et octobre et un minimum entre novembre et février (Koukoui,2002). Le climat de la région est marqué par une saison des pluies entre juillet et septembre qui concentre la majorité des précipitations (PDA, rap.6, p.16).

La figure 2 présente la pluviométrie annuelle, caractérisée par une importante variabilité. Dans les années 1900-1960, celle-ci se situe aux environs de 550mm/an. Elle diminue ensuite soudainement avec un minimum en 1972 (117mm/an). La moyenne pluviométrique se situe

ainsi dans les années 1970-1990 à environ 350mm/an (PDA, rap.6, p.17). Après cette période de sécheresse, les précipitations augmentent à nouveau durant les années 2000. On a ainsi une moyenne de 480 mm/an de pluie entre 2005 et 2009.

A cause du réchauffement climatique, les températures vont probablement augmenter à Dakar d'environ 1-2°C avant 2050 et jusqu'à 6°C en 2100 (évaluation post-catastrophe, 2010, p.130). Les précipitations vont aussi décroître (entre 1 et 10%). Le niveau de la mer risque lui de s'élever d'environ 0.1-0.4m en 2050 et d'environ 0.2-0.9m en 2100. L'augmentation du niveau de la mer est aussi liée à une érosion des côtes de la presqu'île du Cap-Vert (Niang,2010). Tous ces changements sont à prendre en compte pour comprendre l'évolution de la nappe de Thiaroye.

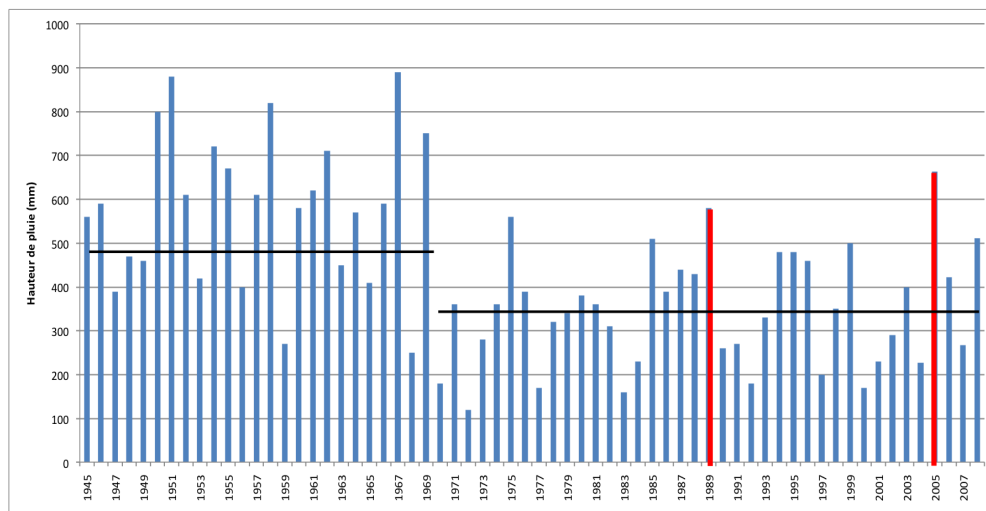


Figure 2: Pluviométrie annuelle, Données de l'ANAMS (association nationale de météorologie du Sénégal)

Démographie :

La nappe phréatique de Thiaroye est située sous les villes de Pikine et de Guédiawaye, dans la périphérie de Dakar. Ces deux villes sont densément peuplées (environ 1.8 millions habitants (PDA rap 6,p.9)) et l'habitat y est partiellement irrégulier. Une partie importante de la population (25-45%) vit en-dessous du seuil de pauvreté (Evaluation post-catastrophe, 2010, p.45). L'urbanisation spontanée n'a pas tenu compte de la présence de la nappe phréatique et environ 10'000 familles vivent dans des zones inondables (urbaMonde, 2009).

Il n'y a pas de réseau de drainage des eaux usées dans la zone d'étude et l'assainissement y est donc majoritairement individuel (PDA, rap.5,p.31). La consommation en eau potable est d'environ 30 l/habitant/jour dans les habitations irrégulières et d'environ 60 l/habitant/jour en zone régulière où les habitants bénéficient d'un titre foncier (PDA, rap. 6, p.56). Selon le plan directeur d'assainissement (PDA), la consommation totale d'eau est approximativement de 52'000 m³/j auxquels il faut ajouter environ 5000-10'000 m³/j dus aux fuites du réseau (PDA, rap.5, p.41; PDD, rap.technique, Annexe 1, p.52).

EVOLUTION DU NIVEAU DE LA NAPPE DE THIAROYE

Du fait de sa proximité avec Dakar et de son niveau proche de la surface, la nappe phréatique de Thiaroye est fortement influencée par l'activité humaine. Depuis le début du siècle, le niveau de cette nappe et la composition de ses eaux varient en fonction de l'urbanisation et des politiques de gestion de l'eau. Les pages suivantes décrivent cette évolution et un

historique plus détaillé peut aussi être consulté en annexe.

1940-1950 : La nappe, située dans un ancien réseau dunaire, forme naturellement des lacs et marais dans les dépressions du terrain. La pluviométrie est importante (550mm/an, PDA rap.6, p.17).

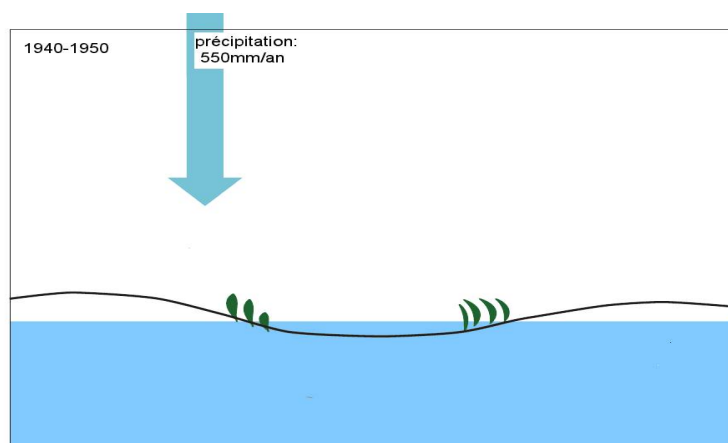
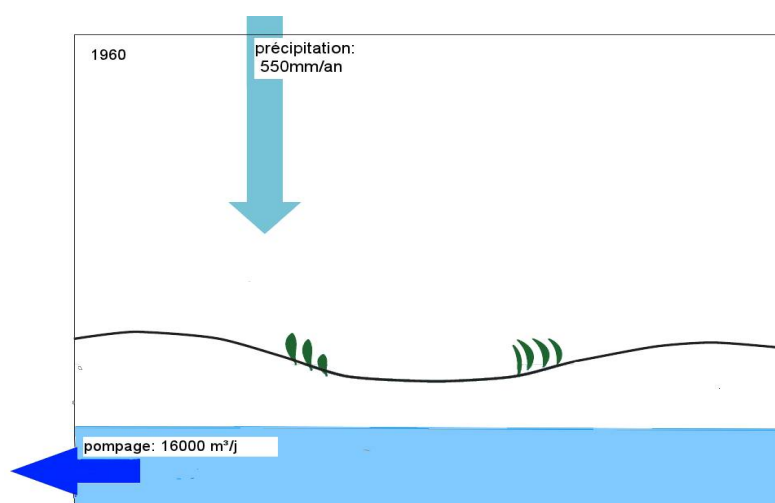


Figure 3: Pluviométrie de l'ANAMS (PDA rap.6, p.17) – Figure modifiée de C.Royez



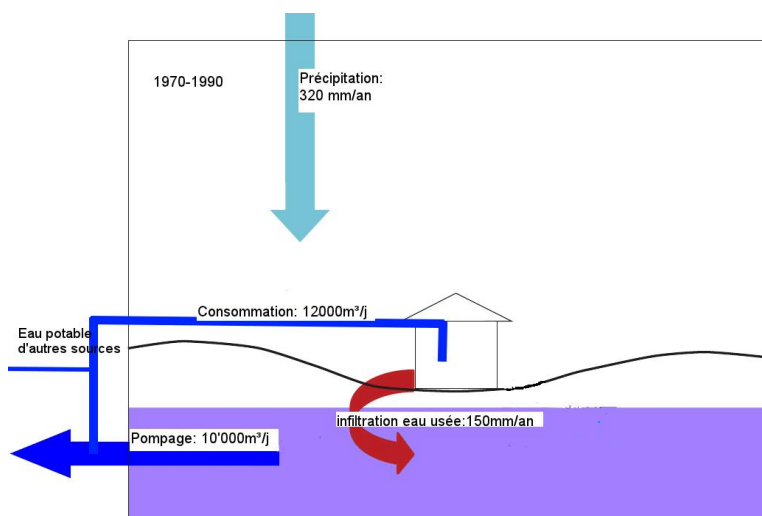
1960 : Dakar commence à pomper la nappe de Thiaroye en 1950 pour l'eau potable. Ce pompage abaisse le niveau de la nappe. Puisque cette nappe est en contact avec la mer, la baisse de niveau crée un risque d'intrusion saline. A cause de la proximité du biseau salin, l'exploitation de la nappe est stoppée entre 1959 et 1961 (PDA rap.6, p.30).

Le pompage reprend ensuite avec un débit de 10'000m³/j ce qui permet de limiter le risque d'intrusion saline (PDA rap.6, p.30).

Figure 4: Pompage PDA rap.6, p.30 - Pluviométrie de l'ANAMS (PDA rap.6, p.17) – Figure modifiée de C.Royez

1970-1980 : La pluviométrie diminue fortement et le pompage pour l'eau potable

et le pompage pour l'eau potable continue. La nappe se stabilise à un niveau bas et des terrains s'assèchent. Ces terrains sont rapidement habités à cause de l'important exode rural dû à la sécheresse. Aucun assainissement de la zone n'est toutefois mis en place.



Les rejets en eaux usées de ces nouveaux habitants dans la nappe diminuent donc la qualité de l'eau au point de la rendre non-potable. Dans les puits de Thiaroye, par exemple, la concentration de nitrate passe de 5-40 mg/l en 1970 à 400-450 mg/l en 1997 (Diédhiou,2011) alors que la limite maximum est de 50 mg de nitrate par litre (WHO, 2003).

Figure 5: Pluviométrie de l'ANAMS (PDA rap.6, p.17) - Consommation et infiltration :Koukouï, 2002, p.50 - Pompage : PDA, rap.6, p.30 - Figure de C.Royez modifiée

1990-2010 :

Du fait de la mauvaise qualité de l'eau, le pompage de la nappe de Thiaroye diminue depuis le début des années 1990. En parallèle, la ville de Dakar commence à importer de l'eau du lac de Guiers pour satisfaire ses besoins en eau potable (Pigeon, 1999). Cette eau s'ajoute à la recharge en

eaux usées de la nappe. De plus, les précipitations augmentent. Le niveau de la nappe s'élève donc d'environ 15cm/an et les inondations deviennent récurrentes (urbaMonde, 2009).

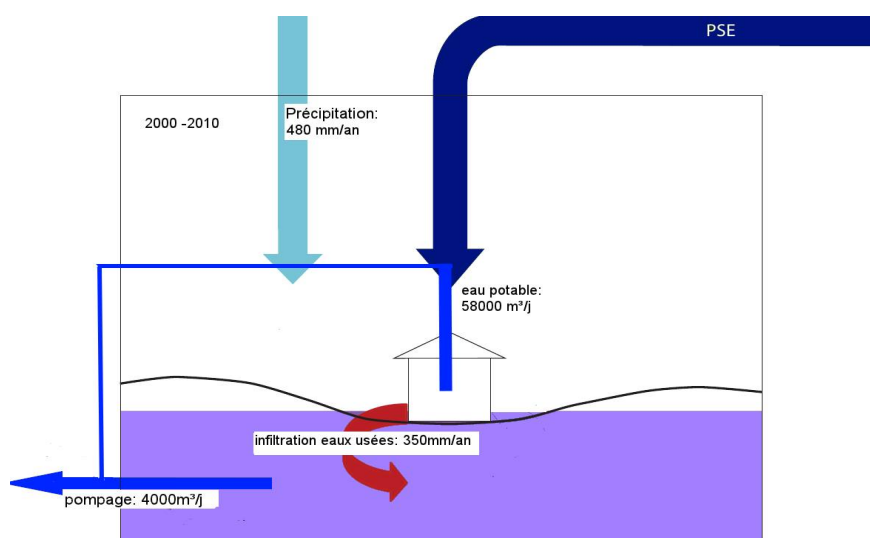


Figure 6: Pluviométrie de l'ANAMS (PDA rap.6, p.17), Consommation : PDA, rap.5, p.41, Infiltration : PDA, rap. 6, p.31. Les données sont en m³/j et ont été converties en mm/an en utilisant une zone de 61km² (PDA, rap.6 p.31), Pompage : PDA, rap.6.p.30 - Figure de C.Royez modifiée

ANALYSE DES PROJETS DE RÉDUCTIONS DES INONDATIONS

Descriptif des projets de réduction des inondations

Il existe plusieurs projets de réduction des inondations qui sont rapidement décrits ci-dessous. Une description plus détaillée se trouve en annexe.

- Le PDA (Plan Directeur d'Assainissement) : Le but de ce projet, mené par l'ONAS (Office National de l'Assainissement du Sénégal), est d'améliorer l'assainissement à Dakar et dans la périphérie dans la période 2010-2025. En effet, la zone de Thiaroye n'est majoritairement pas connectée à un système d'évacuation des eaux usées, celles-ci se déversant donc directement dans la nappe. Cette recharge additionnelle augmente fortement le risque d'inondation. La création d'un réseau d'égout est donc une priorité pour lutter contre les inondations. (PDA, rap.1-6).

L'amélioration de l'assainissement aurait aussi un impact sur la qualité de l'eau, notamment sur la pollution liée aux nitrates.

- Le PROGEP (Programme de Gestion des Eaux Pluviales dans la Zone Périurbaine de Dakar) : Le principe directeur de ce projet est de créer un réseau de drainage gravitaire dans la périphérie de Dakar. Ce projet prévoit également de connecter plusieurs bassins de rétention avec la mer pour évacuer les eaux pluviales des zones basses. De plus, la nappe sera maintenue à un niveau maximum à l'aide d'un système de drainage horizontal. Le PROGEP est soutenu par l'ADM (association de développement municipal) (PDD,2011).
- Mobilisation de ressources en eau alternatives pour l'irrigation dans la région de Dakar (PDMAS - Programme de Développement des Marchés Agricoles) : La concentration en nitrate de l'eau de la nappe de Thiaroye fait que celle-ci ne peut pas être utilisée comme eau potable. Ce projet propose donc de l'utiliser pour l'irrigation et de la pomper en direction des maraîchers de Sangalkam (env. 15km à l'est de Thiaroye). La construction d'une conduite entre Thiaroye et Sangalkam serait nécessaire, mais il serait possible de ré-utiliser les forages d'eau potable. Le pompage induirait un rabattement rapide de la nappe et donc une diminution du risque d'inondation. Ce projet est une partie d'un programme plus large visant à soutenir l'agriculture, le PDMAS qui dépend du ministère de l'agriculture (Étude d'impact, PDMAS).
- Le plan Jaxaay : En 2005, des inondations importantes se sont produites. Le gouvernement du Sénégal a réagi en créant le plan Jaxaay, dépendant du ministère de la construction, de l'habitat et de l'hydraulique. Le principe de ce plan d'urgence est d'exproprier les habitants vivant dans les zones inondées et de les reloger à la périphérie de Dakar. Dans les zones évacuées, des bassins de rétention/infiltration sont construits. Cependant, comme ces bassins sont construits directement dans la nappe affleurante, ils ont seulement une faible capacité de rétention. Ainsi, pour augmenter la capacité de ces bassins, ils sont pompés avant et durant l'hivernage et l'eau est rejetée à la mer. Ce pompage n'est toutefois pas suffisant comme l'ont montré les inondations de 2009.

- PASDUNE : Le Programme d'Action pour la Sauvegarde et le Développement Urbain des Niayes et zones vertes de Dakar (PASDUNE) a été créé en 2002 par l'État du Sénégal. Il vise à contribuer à une bonne utilisation du sol et de l'espace des Niayes dans une perspective de développement durable. Il est mené par le département de l'urbanisme et de l'aménagement du territoire.
- PELT/PEPAM/PSE : Ces différents projets visent à un meilleur approvisionnement en eau potable pour la ville de Dakar et sa banlieue. Ils sont soutenus par la SONES (Société Nationale des Eaux du Sénégal) et des bailleurs internationaux. Une réalisation importante de ces programmes est la construction d'une conduite d'eau potable entre Dakar et le lac de Guiers, situé à 300km au nord de Dakar (J.L. Pigeon, 1999).

Impact des projets de réduction des inondations sur la nappe phréatique

Les projets présentés ci-dessus sont en phase d'étude ou en cours de réalisation. Leur impact final sur la nappe phréatique de Thiaroye est donc difficile à connaître précisément. On présente toutefois des estimations préliminaires ci-dessous.

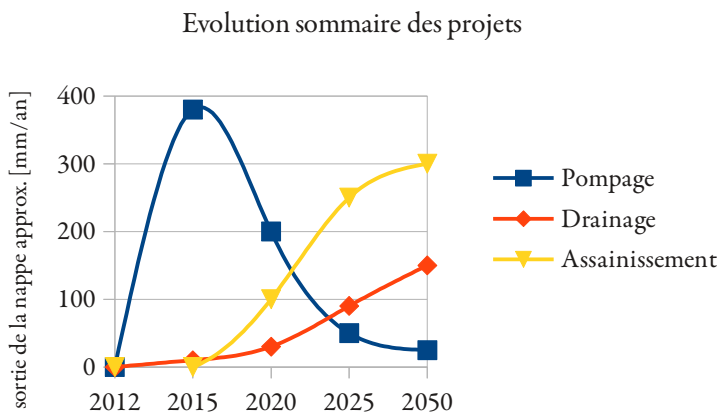


Figure 7 : Estimation non quantitative de l'impact des projets de gestion des inondations sur la nappe phréatique

Le PDA

L'amélioration de l'assainissement va diminuer la recharge additionnelle liée aux eaux usées. En effet, ces eaux usées ne seront plus déversées dans la nappe mais dirigées vers la mer ou utilisées pour l'agriculture à la suite de leur traitement. Le niveau de la nappe phréatique va donc baisser. De plus, la réduction des effluents diminuera les rejets en nitrate ce qui limitera la contamination de la nappe phréatique.

Actuellement, la recharge additionnelle liée aux eaux usées est estimée à

55000m³/j (PDA, rap.5, p.41). La nappe réagit significativement à cette recharge additionnelle avec une augmentation de niveau de 0.5-1m en 2003 dans la zone proche des forages (PDMAS, rapport B/C, p.29). De plus, sans système d'assainissement collectif, les rejets vont probablement augmenter du fait de l'accroissement démographique et de l'amélioration des conditions de vie. On estime cette augmentation à 20% de la demande actuelle pour 2025 (PDA, rap.6, p.61). Le manque d'assainissement est donc un facteur important dans le risque d'inondation.

Comme les projets d'assainissement dans la zone ne sont pas connus (il existe seulement une analyse détaillée de la situation), il est difficile de faire une estimation du nombre de connexions à un système d'assainissement collectif. A l'horizon 2015, il est probable que ce pourcentage aura peu augmenté car la zone est difficile d'accès. A l'horizon 2050, on pourrait toutefois s'attendre à une amélioration importante.

Au niveau du risque d'inondation, une connexion complète de la zone à un système d'évacuation des eaux usées permettrait une mise hors-eau de la région de Thiaroye-Pikine (PDMAS, rapport B/C,p.29). Un scénario à court-terme plus raisonnable en terme de coût (un taux de connexion de 50% aux égouts) montre lui un rabaissement de 1m de la nappe dans la zone couverte par les égouts (PDMAS, rapport B/C,p.28). Ce rabattement ne serait pas suffisant pour une réduction marquante des inondations dans toute la zone de Pikine/Thiaroye.

Le PROGEP

Dans la majorité de la zone d'étude, le relief ne permet pas un écoulement naturel des précipitations vers la mer. La recharge de la nappe est donc naturellement formée par le total des précipitations minoré de l'évaporation (Ouedraogo, 2011 p.71). La recharge naturelle se situe

aux alentours de 30-200 mm/an (Ouedraogo, 2011 p.71; Faye, 2004; Re, 2010; Koukoui,2002; Comte, 2008, p.150) avec une marge d'erreur très importante (Ouedraogo, 2011 p.71).

La création d'un réseau de drainage diminue la recharge naturelle de la nappe car les eaux pluviales se déversent partiellement dans la mer. Cette diminution est dépendante, entre autre, de la pluviométrie, de l'efficacité du réseau de drainage, de l'imperméabilisation des sols et du régime d'évaporation. Elle se situe toutefois logiquement en-dessous de la recharge naturelle.

De plus, le réseau de drainage des eaux pluviales sera partiellement enterré. Il formera donc un réseau de drainage horizontal qui donnera un niveau maximum à la nappe phréatique de Thiaroye (PDD, p.16) . Ce niveau est dépendant du niveau actuel de la nappe ainsi qu'on peut le

Niveau d'eau actuel (m NGS)	Objectif de rabattement (m)	Niveau d'eau après rabattement de la nappe (m NGS)
7 et plus	2	5 et plus
6.5	2	4.5
6	2	4
5.5	1.8	3.7
5	1.6	3.4
4.5	1.4	3.1
4	1.2	2.8
3.5	1	2.5
3	0.8	2.2
2.5	0.6	1.9
2	0.4	1.6
1.5	0.2	1.3
1	0	1
0.5	0	0.5
0	0	0

Rabattement de la nappe

Figure 8: tiré du rapport technique du PDD, 2011, p.32

voir dans le tableau ci-dessous.

Le rabattement de la nappe est localisé autour des points de drainages (p.67). En l'absence d'un réseau de drainage secondaire et tertiaire (le PDD ne prévoit la construction que du réseau primaire), le risque d'inondation reste donc fort dans les zones éloignées des conduites de drainage principales. La recharge naturelle utilisée dans cette étude était toutefois volontairement anormalement haute (400mm/an, p.47) . Une recharge plus basse pourrait donner une piézométrie de référence et des résultats différents. Il serait intéressant de faire une étude similaire avec des paramètres d'entrées différents.

Le drainage diminuerait de plus les risques d'inondations du fait d'une meilleure gestion des écoulements de surface, très importants en saison des pluies (PDD, 2011, p.6).

La mobilisation de ressources en eau alternatives pour l'irrigation (PDMAS)

Des études détaillées au sujet de l'impact de la reprise des forages sur la nappe phréatique de Thiaroye (PDMAS, rapport A/B/C) proposent un pompage de la nappe de 16'000m³/jour (PDMAS, rapport APD). Ce pompage serait suivi d'une baisse de niveau de la nappe de 0.5 à 3m (PDMAS, rapport B/C). La réaction de la nappe, présentée sur la figure ci-dessous, serait rapide et le rabattement devrait être effectif dans l'année.

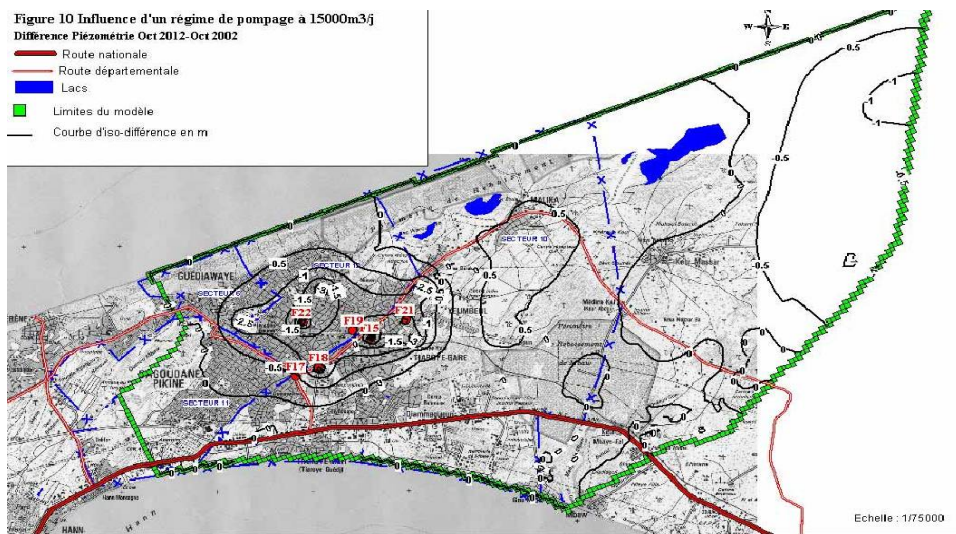
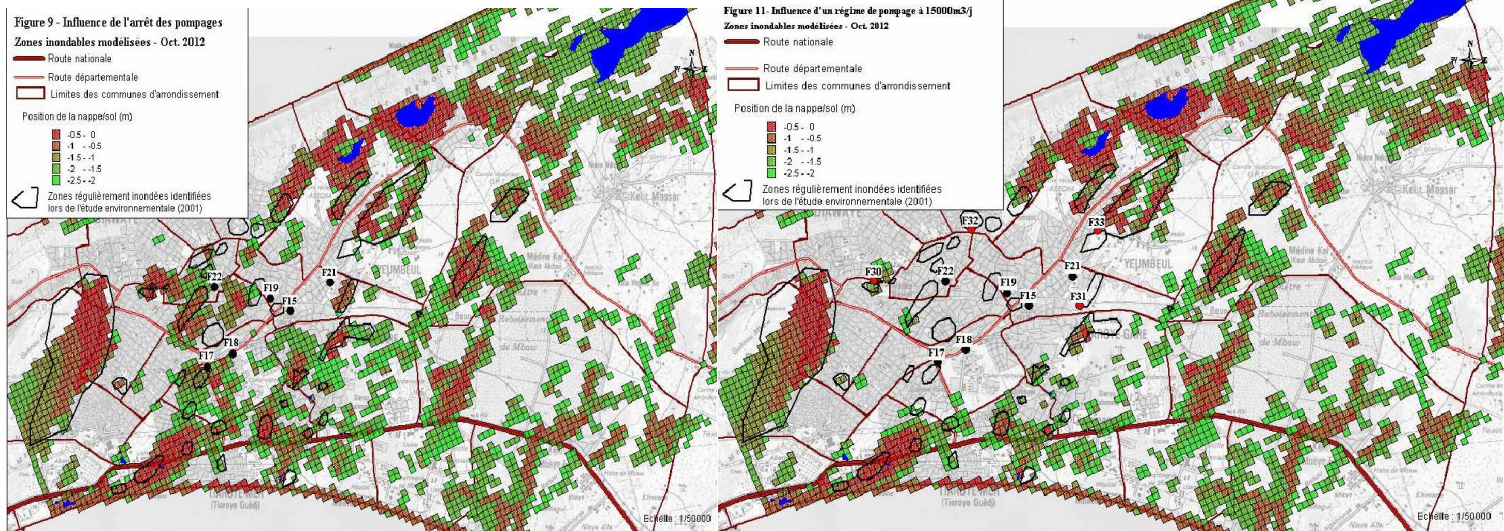


Figure 9 : Rabattement de la nappe induit par la reprise des forage (PDMAS, rapport B/C, p.25)

Ce rabattement de la nappe induirait une diminution importante des zones inondables. Cependant, comme les pompages sont proche de la mer, ils impliquent un risque d'intrusion saline ce qui les rend inapplicables pour les régions côtières comme Thiaroye-sur-mer (PDMAS, rapport B/C). Le risque d'inondation resterait donc important dans ces régions.

Si un système de contrôle de la nappe est mis en place, les pompages pourront être adaptés à la demande, à la recharge ainsi qu'au risque d'intrusion saline.



Figures 10: Zones inondables avant pompage (gauche) et après pompage (droite)

Avantages et inconvénients des trois projets en cours ¹

Projet	Avantages	Inconvénients
PDA assainissement	<p>Réduction de la pollution de la nappe, notamment du taux de nitrate</p> <p>L'amélioration de l'assainissement est nécessaire pour une bonne qualité de vie dans la zone</p> <p>Il serait possible de réutiliser les effluents pour l'agriculture si ceux-ci sont de bonne qualité.</p>	<p>Il est difficile de gérer un système d'évacuation des eaux dans une ville très peuplée comme Pikine</p> <p>Le risque d'inondation resterait important dans les habitations situées dans les régions basses.</p> <p>Un système d'évacuation des eaux usées est long à mettre en place.</p>
PDMAS – reprise des forages	<p>Réductions des inondations importantes et rapides (2-3ans) du fait de la vitesse de réaction importante de la nappe.</p> <p>Les forages sont déjà construits et peuvent être ré-utilisés.</p> <p>Valorisation de l'eau douce pour l'irrigation.</p> <p>Le nitrate présent dans l'eau est un fertilisant utile pour l'irrigation</p> <p>Les maraîchers de Sangalkam achètent de l'eau subventionnée provenant du lac de Guiers. L'eau de Thiaroye leur coûterait moins cher et ferait économiser des subventions à l'État.</p> <p>Il est possible d'arrêter de pomper si la nappe descend trop.</p> <p>Amélioration de l'efficacité de l'assainissement puisque la distance entre la nappe et les fosses septiques augmente.</p> <p>Réduction de l'espace utilisé par les bassins de rétention même s'ils restent nécessaires.</p>	<p>Risque d'intrusion d'eau salée</p> <p>Nécessité de construire une conduite d'eau importante et de pomper cette eau</p> <p>Il existe des sources d'eau plus proche de Sangalkam pour l'irrigation</p> <p>Sangalkam est proche de la périphérie de Dakar et s'urbanise. L'activité agricole risque donc de diminuer.</p> <p>Risque de pollution des champs si la qualité de l'eau n'est pas suffisante (métaux lourds, salinisation...)</p>
PROGEP drainage	<p>Réduction des inondations importantes</p> <p>Amélioration de l'efficacité de l'assainissement puisque la distance entre la nappe et les fosses septiques augmente</p> <p>Possibilités de créer des espaces verts autour des bassins si la gestion est bonne</p>	<p>Perte d'eau douce vers la mer</p> <p>Investissement relativement important et temps de mise en place long (env. 10 ans)</p> <p>Obstructions des conduites et mélange d'eau usée</p> <p>Création de bassins de rétention qui sont une gêne pour la population</p> <p>Risque de dégradation des Niayes et de la baie de Hann</p>

¹ Ce texte, écrit par l'auteur de ce rapport, peut aussi être consulté et modifié sur le site fr.wikipedia.org dans l'article nappe de Thiaroye. License : Creative commons

Analyse des synergies entre les projets

Plusieurs projets de mitigation des inondations sont donc prévus simultanément dans la zone de Thiaroye. Nous analysons ici leurs effets croisés, leurs possibles synergies et les risques de contradiction. On montrera de plus qu'une coordination efficace est nécessaire à la réalisation de plusieurs synergies et permet de dépasser certaines contradictions. Il y a ainsi un réel intérêt à créer un climat propice à l'échange d'information.

Contrôle du niveau de la nappe

La première de ces synergies est un contrôle du niveau de la nappe. Une analyse *a priori* de la situation conclurait que l'action combinée du drainage, de l'assainissement et du pompage résulterait dans un rabattement trop important de la nappe. On risquerait une baisse de la qualité de l'eau et une perte de ressource.

Cependant, le rabattement de la nappe peut être contrôlé grâce à l'action coordonnée de ces trois projets. Ils permettent en effet tous de diminuer, mais aussi d'augmenter, la recharge de la nappe phréatique comme l'explique le tableau ci-dessous.

Projet	Actions si le niveau de la nappe est trop haut	Actions si le niveau de la nappe est trop bas	Limitations des actions possibles
Reprise des pompages	Augmenter le débit des pompages	Diminuer le débit des pompages	Débit maximum des pompes, demande en eau
Assainissement	Diminution des rejets en eaux usées	Recharge artificielle de la nappe à partir des eaux usées traitées	Réalisation d'un réseau d'assainissement collectif, la qualité de l'eau traitée limite les possibilités de recharge artificielle
Drainage des eaux pluviales	Drainage horizontal	Infiltration de l'eau de pluie dans les bassins de rétentions	Hauteur du drainage horizontal, capacité d'infiltration des bassins

Il y a ainsi une base pour contrôler à différents niveaux la hauteur de cette nappe phréatique. C'est un scénario très en avance sur la situation actuelle mais qui montre que la coordination entre ces trois projets permet une gestion optimale de la situation. Au contraire, une vision sectorielle augmente le risque d'inondation et de rabattement exagéré.

Calendrier

Une deuxième synergie est l'optimisation du temps. Tenir compte des degrés de réalisation de chaque projet permet d'optimiser leur réalisation de plusieurs manières explicitées ici.

Tout d'abord, on peut coordonner la reprise des forage et la mise en place de l'assainissement et du drainage. Le drainage et l'assainissement sont en effet indispensables à long terme car ces projets s'attaquent aux sources des inondations, c'est-à-dire la remontée de la nappe phréatique et les pluies intenses qui se produisent durant l'hivernage. De plus, l'amélioration de l'assainissement est indispensable à la qualité de vie des populations. Ce ne sont toutefois pas des projets pensés pour l'urgence. Leur mise en place précipitée pourrait leur être

préjudiciable notamment car elle ne permettrait pas l'implication des populations ou des études de détail. La reprise des forages crée au contraire une réduction rapide des inondations et permet un meilleur établissement des autres projets. Il y a donc un avantage certain à rabattre rapidement la nappe afin de mieux planifier la gestion des sorties et des entrées d'eau sur le long terme.

De plus, le drainage doit en premier lieu se mettre en place en aval, près des côtes, pour créer un réseau cohérent (PDD, 2011,p.66). Ces endroits sont moins touchés par la reprise des pompages du fait de la proximité du biseau salin. Un réseau de drainage devrait donc être installé dans ces communes, où le risque d'inondation resterait fort même si les pompages étaient repris.

Du point de vue du calendrier, la mise en place simultanée du drainage, d'un système de gestion des déchets et d'un assainissement collectif a de multiples avantages. Cela diminuerait par exemple le risque d'obstructions des conduites de drainage par les déchets ou le mélange eaux usées/eaux pluviales. Au contraire, mettre en place un système de drainage sans tenir compte du calendrier de l'assainissement peut se révéler négatif, par exemple, au niveau de l'organisation des travaux (partage du matériel, tranchées à refaire).

Qualité de l'eau

La qualité de l'eau limite les possibilités d'utilisation de la nappe de Thiaroye. L'amélioration de cette qualité créerait de nouvelles opportunités et permettrait d'optimiser les ressources en eau. La réalisation d'un système collectif d'assainissement va diminuer les rejets polluants et la pollution de l'eau. De plus, la reprise des forages peut être coordonnée avec le PDA pour traiter l'eau plus efficacement. Dans cette optique, les forages présents sur le site pourraient être utilisés pour pomper l'eau en profondeur afin de la traiter. La recharge artificielle d'eau traitée de qualité pourrait aussi améliorer la qualité de l'eau de la nappe par dilution.

L'amélioration de la qualité de l'eau de Thiaroye est également un axe stratégique du PROGEP. Ce projet prévoit en effet le rejet des eaux de pluie et de l'eau de la nappe de Thiaroye dans la mer. L'eau rejetée doit donc correspondre aux normes sénégalaises concernant les rejets en mer afin de ne pas polluer les eaux côtières (PDD, étude d'impact, 2011). Ces normes de qualité seront spécialement suivies dans la baie de Hann où un projet de dépollution de cette baie de grande ampleur est en cours (Hann, 2007) . Il faudra coordonner ces deux projets d'une manière efficace (Seydou Niang, communication personnelle, 2012).

En outre, la réutilisation de l'eau dans l'agriculture ou dans l'industrie lui donne une valeur marchande. La nappe phréatique se transforme en une ressource génératrice de revenu au lieu d'être une charge pour la communauté. Donner un rôle social et économique à l'eau de Thiaroye revient donc à créer une motivation à sa protection à long-terme. En conséquence, les projets qui ont pour but de diminuer les risques de pollution, comme ceux liés à l'assainissement et à la gestion des déchets, auront probablement plus de soutien. Par exemple, les industries qui utiliseraient l'eau de Thiaroye accepteraient peut-être plus facilement de traiter leurs déchets toxiques s'ils savaient que leur approvisionnement en eau à bas prix en dépend à moyen-terme.

Au niveau des risques d'intrusion saline, la possibilité de choisir entre une nappe rabattue par pompage ou par drainage diminuerait les risques de pollution saline, notamment pour les régions côtières.

Protection des Niayes

La protection de l'écosystème des Niayes travaille aussi en synergie avec plusieurs projets de rabattement de la nappe. En effet, la protection des zones humides permet aussi d'améliorer le drainage en créant des zones non habitables où l'eau peut être stockée durant la saison des pluies et infiltrée ou drainée ensuite. Ceci diminue le besoin en bassins de rétention mal acceptés. La plantation d'arbres augmente aussi l'évapotranspiration de la nappe et contribue donc à rabattre la nappe ainsi qu'à améliorer sa qualité.

Les Niayes risquent toutefois de souffrir de l'apport d'eaux drainées ou usées. Les risques d'eutrophisation peuvent être élevés. De plus un rabattement trop important pourrait assécher certaines zones. Il y a donc un risque que les groupes concernés par les Niayes s'opposent aux projets s'ils n'ont pas un droit de regard sur les équipements de ces endroits. Le risque d'opposition diminuerait probablement si une collaboration était mise en place et que les zones à protéger étaient mieux définies.

Evolution de la demande en eau

Le projet de reprise des forages et le PDA envisagent une ré-utilisation de l'eau de la nappe de Thiaroye, notamment pour l'irrigation. Pour que cette ré-utilisation soit financièrement viable à long-terme, il faudra respecter la demande en eau. Deux scénarios sont possibles : soit la demande en eau pour l'irrigation reste importante, soit cette demande diminue du fait de l'urbanisation à la périphérie de Dakar. Des synergies entre les projets permettent cependant de faire face à ces deux cas de figure.

Dans le premier cas, un apport constant en eau pour l'irrigation doit être présent. Pourtant, l'amélioration de l'assainissement diminuera les possibilités de pompage de la nappe. Par contre, un volume important d'eau traitée sera produite, qui pourrait être ré-utilisé pour l'irrigation si la qualité des effluents est suffisante. De cette manière, les eaux usées peuvent être valorisées dans l'agriculture où les besoins en eau sont importants au lieu d'être rejetée à la mer. On améliore ainsi la gestion des ressources en eau. Les nutriments présents dans l'eau diminuent aussi les besoins en engrais chimiques (Tilley, 2008,p.150). Les conduites utilisées pour transporter l'eau de la nappe de Thiaroye pourraient à terme servir pour transporter l'eau traitée par les centrales d'épuration de l'ensemble de la ville de Dakar. L'eau drainée par le PROGEP pourrait être ré-utilisée de la même manière en la collectant aux exutoires ou dans les bassins.

Si la demande en eau destinée à l'irrigation décroît dans la prochaine décennie, le pompage pourrait être diminué à condition que le réseau de drainage horizontal soit suffisant pour maintenir le rabattement de la nappe. Il serait aussi possible d'utiliser l'eau pompée de la nappe de Thiaroye pour des applications industrielles (urbaMonde,2010) comme par exemple le refroidissement des machines et le nettoyage (PDMAS, volet socio-économie et environnement, p.6). L'eau de la nappe de Thiaroye pourrait aussi servir pour l'irrigation de l'agriculture urbaine à petite échelle. En dernier recours, on pourrait aussi la rejeter à la mer. Ces quatre options permettront d'optimiser l'utilisation de la ressource en fonction des demandes.

Gestion des imprévus

La coordination entre les projets leur permet aussi de mieux gérer les imprévus. En effet, une gestion coordonnée de l'état de la nappe permettrait de faire face plus facilement aux retards ou à l'abandon d'une partie d'un projet. Si un système de suivi central était réalisé, on pourrait par exemple investir plus dans le maintien du système de drainage si le pompage était hors-service dans une région.

De plus, une vision globale de la situation permet de s'adapter rapidement aux nouveaux événements. Un projet seul peut avoir tendance à considérer le succès comme l'accomplissement des tâches prescrites précédemment même si celles-ci ne sont plus en adéquation avec la situation présente. Une vision transversale qui a des objectifs plus larges que ceux d'un projet, peut au contraire changer le cours de ses actions plus facilement.

Afin de vérifier l'efficacité des projets, un échange d'information entre le service qui gère les mesures de la nappe phréatiques de Thiaroye (la direction de la gestion et de la planification des ressources en eau - DGPRE) et les différents projets devrait être mis en place.

Conclusion

Les synergies entre les projets sont nombreuses mais elles sont souvent conditionnées à un certain degré de coordination et de gestion commune. En effet, la coordination de la mise en place d'un système de drainage, d'assainissement et de pompages permet, entre autres :

- de gérer avec précision le niveau de la nappe,
- de simplifier la réalisation d'infrastructures,
- d'accélérer la réduction du risque d'inondation tout en ayant le temps de faire les diagnostics nécessaires aux phases opérationnelles,
- d'améliorer plus facilement la qualité de l'eau,
- de répondre de façon optimale aux demandes en eau,
- et de mieux gérer les imprévus.

Au contraire, le manque de coordination peut entraîner un rabattement exagéré de la nappe ce qui crée un risque d'intrusion saline. De plus, il institue une gestion sous-optimale de la ressource en eau et complexifie la mise en place d'installations. Les priorités peuvent aussi être mal définies et conduire à des retards dans des volets indispensables à la réduction des inondations.

Malgré les avantages d'une gestion intégrée, l'importance de l'accomplissement de cette transversalité est pourtant, de notre point de vue, sous-estimée par les acteurs institutionnels.

ACTEURS LIÉS À LA NAPPE PHRÉATIQUE DE THIAROYE

Pour compléter notre analyse de la situation, nous allons ici décrire les impacts de la nappe phréatique sur les différents acteurs et les quantifier si possible.

Population des villes de Pikine et de Guédiawaye

Cette population subit fortement la remontée de la nappe phréatique du fait de la récurrence des inondations. La montée des eaux endommage les habitations, détruit les infrastructures communautaires, augmente les risques de noyades, double le nombre de cas de paludisme et réduit les possibilités de transport, ce qui engendre un risque sur l'emploi situé principalement au centre de Dakar (évaluation post-catastrophe, 2010).

En 2009, dans les villes de Pikine et de Guédiawaye, les inondations ont ainsi touché directement 360'000 habitants, c'est-à-dire 30% de la population. La perte financière de ces habitants fut en moyenne de 14% du revenu annuel (évaluation post-catastrophe, 2010, p.20). Cette perte importante a poussé à la mise en place de techniques de survie, comme la diminution des rations alimentaires. Le coût total des inondations, pour les quartiers péri-urbains de Dakar, est estimé à 82 millions de dollars ou à 42 milliards de francs CFA (évaluation post-catastrophe, 2010, p.20).

Utilisateurs du réseau d'eau potable

La concentration en nitrate dans l'eau de Thiaroye ($> 260\text{mg/l}$) est telle qu'il n'est pas possible de l'utiliser directement comme eau potable (Pigeon, 1999, p.82). L'eau pompée à Thiaroye est donc actuellement mélangée à d'autres sources d'eau avant d'être distribuée dans le réseau d'eau potable. Ce mélange induit une baisse de la qualité de l'eau (urbaMonde,2009). Une déconnexion des forages de Thiaroye du réseau d'eau potable est donc dans l'intérêt des utilisateurs de ce réseau. L'approvisionnement ne serait pas mis en danger par une déconnexion du fait du bas débit actuel des forages de Thiaroye (env. $4000\text{m}^3/\text{j}$, PDA, rap.6,p.30).

Maraîchers

Pour les maraîchers de la périphérie de Dakar, la nappe phréatique de Thiaroye serait une source possible d'eau pour l'irrigation. Actuellement, environ $15'000\text{m}^3/\text{jour}$ d'eau potable sont fournis par la SDE (la Sénégalaise des Eaux) aux maraîchers dans les régions de Sangalkam, Bargny, Rufisque et Thiaroye (PDMAS, APD, p.8). L'utilisation de l'eau potable pour l'irrigation constitue une perte de ressource et un sur-coût important pour le gouvernement qui subventionne cette eau à hauteur de 300 francs CFA par m^3 (PDA, étude d'impact, p.31).

De plus, le prix de l'eau, même subventionné, reste haut ($113\text{ FCFA}/\text{m}^3$, PDMAS, schéma institutionnel, p.54) et limite la productivité de l'agriculture, notamment dans la zone de Rufisque. Environ $30'000\text{ m}^3/\text{j}$ d'eau seraient en fait nécessaires (PDMAS, volet socio-économique et environnement, p.14). L'apport de l'eau de la nappe de Thiaroye serait donc vue positivement à condition que sa qualité soit compatible avec l'agriculture.

De plus, son prix d'achat (env. 85 francs CFA avec un arrêt total des subventions, PDMAS, schéma institutionnel, p.54) serait plus bas que celui pratiqué actuellement. En effet, l'eau de Thiaroye n'est pas potable. Elle a donc moins de valeur marchande. Cette diminution de prix

permettrait un meilleur accès à l'irrigation ce qui entraînerait une augmentation du rendement et des bénéfices pour les maraîchers.

Les inondations ont également un impact important sur les maraîchers des zones urbaines. En 2009, leur perte a ainsi été estimée à 61 millions de FCA dans la zone de Rufisque (évaluation post-catastrophe, 2010, p.78). Les données pour la zone de Thiaroye ne sont pas disponibles.

Industriels

Comme dans le cas des maraîchers, la nappe de Thiaroye est une possible source d'eau pour les industriels de la zone (industries chimiques, tanneries, raffineries...). Une demande d'environ 2100m³/j serait existante avec des exigences de qualité variables (PDMAS, volet socio-économique et environnement, p.26). L'eau actuellement distribuée par la SONES est coûteuse (PDMAS, volet socio-économique et environnement, p.9) et des stratégies alternatives d'approvisionnement seraient bienvenues.

De plus, durant la saison des pluies, les inondations freinent les activités industrielles et induisent des pertes et dommages importants, estimés à 870 millions de FCA en 2009 (évaluation post-catastrophe, 2010, p.80). La diminution des inondations est donc importante pour ces entreprises et ceci peut constituer une motivation supplémentaire pour la réutilisation de l'eau de la nappe de Thiaroye dans l'industrie.

Secteur informel

Au Sénégal, le secteur informel, qui occupe 2/3 de la population active (évaluation post-catastrophe, 2010, p.78), est indispensable à la survie de beaucoup de familles. Son arrêt durant les inondations a donc des conséquences sociales majeures. De plus, il implique une perte économique importante, estimée à 3.3 milliards de francs CFA pour la région de Dakar durant les inondations de 2009 (évaluation post-catastrophe, 2010, p.80).

Écosystèmes

Les zones humides de la presqu'île du Cap-Vert (les Niayes) sont des écosystèmes à protéger. Ce sont les poumons verts de la capitale et des réservoirs importants pour la biodiversité. On peut ainsi y dénombrer 133 espèces d'oiseaux dont 40 espèces endémiques et 20% de la flore sénégalaise (Dasylva, -). De plus, l'activité agricole y est importante.

Cependant, comme ces écosystèmes sont alimentés par la nappe phréatique durant la saison sèche, un rabattement de la nappe peut les assécher et les mettre en danger. Les Niayes requièrent donc que la nappe phréatique reste au-dessus d'un niveau minimum. Une coordination entre urbanisation et protection des zones humides est doit être mise en place afin de prendre en compte tous les critères.

Au niveau des inondations, le risque pour les Niayes est faible car ce sont des zones naturellement humides. Les inondations augmentent toutefois sérieusement le risque de pollution à cause de l'arrivée de l'eau de ruissellement et à cause des fuites de produits chimiques (notamment les pesticides et les engrais). Dans le secteur forestier de Dakar, 45 millions de francs CFA ont ainsi été dépensés en 2009 pour la gestion de la pollution chimique (évaluation post-catastrophe, 2010, p.81). Les données pour les Niayes ne sont pas connues.

Conclusion

En conclusion, l'état actuel de la nappe phréatique de Thiaroye n'est pas satisfaisant pour les différents acteurs. Les inondations en périphérie de Dakar ont un coût social et financier énorme. De plus, les besoins d'irrigation dans les zones maraîchères de Rufisque mettent en

évidence le paradoxe d'avoir un excès d'eau en ville et un manque en campagne. L'utilisation de l'eau de la nappe de Thiaroye pour l'irrigation permettrait ainsi de mettre en synergie besoins agricoles et urbains.

MODÉLISATION

La deuxième partie de ce rapport est constitué d'une comparaison des modélisations disponibles de la nappe phréatique de Thiaroye. Nous analysons aussi certains scénarios de gestion de l'eau. En nous basant sur ces analyses, nous proposons finalement des améliorations des modélisations actuelles.

Caractérisation des entrées d'eau

La recharge d'une nappe détermine son niveau. Avant de pouvoir la modéliser, il faut donc quantifier les entrées d'eau. Cette quantification est complexe et entraîne des incertitudes importantes dans le cas de la nappe de Thiaroye (Ouedraogo, 2009, p.71). Pour caractériser ces incertitudes, nous allons ici examiner séparément les composantes de la recharge de la nappe de Thiaroye, en nous basant sur la littérature existante.

Recharge naturelle

Par recharge naturelle, on entend ici la recharge de la nappe liée à la pluviométrie. Cette recharge peut se calculer à l'aide de la formule suivante (Koukou, 2002, p.46) :

$$R = N - ETR - Q = N - ETR \quad (1)$$

où R est la recharge, N la pluviométrie en mm/an, ETR l'évaporation de l'eau de pluie avant que celle-ci n'atteigne la nappe et Q le ruissellement de l'eau en dehors de la zone de captage de la nappe phréatique, par exemple vers la mer.

Le ruissellement

La zone de captage de la nappe de Thiaroye est caractérisée par un fort endoréisme (PDD, rap.technique, 2011, p.14). L'eau de pluie ne s'écoule donc pas vers la mer et se concentre dans les dépressions situées au-dessus de la nappe. On peut donc négliger Q , le terme de ruissellement (Koukou, 2002, p.46).

La pluviométrie

Le terme N est simplement donné par la hauteur de pluie. Dans le cas de la nappe de Thiaroye, cet apport est concentré durant l'hivernage, entre juillet et septembre. Il se situe actuellement aux alentours de 480mm/an mais il est très variable (PDA, rap.6,p.17). Comme on l'a noté précédemment, une période de sécheresse a diminué la pluviométrie (340 mm/an) dans les années 1970-2000 (PDA, rap.6,p.17).

La hauteur de pluie est mesurée régulièrement sur la presqu'île du Cap-Vert par les stations météorologiques de Yoff, Hann, Pikine, Mbao, Bambilor et Kayar (Koukou, 2002, p.45). La pluviométrie moyenne mesurée est similaire dans toutes ces stations (PDMAS, rapport A, p.31). Pour un pas de temps mensuel, qui est celui utilisé dans la plupart des simulations de la nappe de Thiaroye, l'erreur liée à l'interpolation de la pluie est donc probablement faible. Des erreurs de mesures sont possibles mais sont probablement aussi négligeables avec des pas de temps longs.

Les modélisations disponibles de la nappe considèrent généralement la pluie comme constante avec des valeurs données ci-dessous :

Références	Pluie annuelle en 2000-2060
PDD, rap.technique, Annexe 1, 2011, p.52	400mm/an (ou 300mm/an en tenant compte du drainage dans la recharge naturelle)
PDMAS, rapport B/C, p.10	Deux scénarios de pluviométrie : 200mm/an ou 500mm/an

Il est difficile de prédire la pluviométrie à Dakar du fait de sa forte variabilité. La possible diminution des précipitations due au réchauffement climatique (Niang, 2010) rend l'exercice encore plus complexe. Le mieux est donc de prévoir plusieurs scénarios de pluie qui permettent d'estimer la sensibilité des résultats.

On peut par exemple définir trois scénarios, l'un avec une pluviométrie intense, le deuxième avec une pluviométrie moyenne et le dernier avec une pluviométrie faible. Une valeur possible pour un scénario de pluviométrie intense serait de 550mm/an ce qui est la moyenne pluviométrique entre 1896-1969 (PDA, rap.6, p.17). Un scénario de pluviométrie basse pourrait être de 300 mm/an ce qui est 40mm/an plus bas que la dernière sécheresse de 1970-2000. Un scénario moyen pourrait être de 425mm/an, c'est-à-dire la moyenne entre les deux autres scénarios. Il y a toutefois une part d'arbitraire dans ces choix.

Pour éviter ce problème, on peut tirer, d'une manière aléatoire, des pluies annuelles entre le maximum et le minimum des pluies observées, c'est-à-dire entre 100 et 600mm/an (PDMAS, rapport B/C, p.10). Cette méthode évite de simuler uniquement des scénarios constants avec, par exemple, que des fortes pluies. Elle est donc plus réaliste. Elle ne donne toutefois pas les réactions de la nappe dans les cas extrêmes.

Il serait intéressant de pouvoir comparer les résultats de ces deux méthodes. Toutefois, pour simplifier les futures simulations, nous choisirons plutôt de garder la pluie constante à 550, 425 et 300mm/an. En effet, l'autre méthode nécessite que l'on teste un grand nombre de pluies différentes pour avoir toute la plage des réactions possibles de la nappe phréatique. Ceci demande un temps de simulation trop important.

Évaporation de la pluie

Il est difficile d'estimer l'évaporation et donc de connaître la part de la pluie qui s'infiltré dans la nappe. Le tableau suivant donne les différentes estimations présentes dans la littérature dans la situation climatologique actuelle :

Référence	Évaporation par hivernage	Méthode utilisée
PDA, rap.6, 2010, p.18	450 mm	Non décrite. Peut-être une mesure de l'évaporation potentielle.
Koukoui, 2002, p.48	290 mm	L'évaporation est fonction de l'évaporation potentielle, de l'humidité et de la capacité du sol, ainsi que de de la pluviométrie. Méthode de Albrecht (Albrecht, 1951)
Faye, 2001, p.92	221-511mm 190 - 561mm	Estimation basée sur la méthode de Albrecht. Estimation basée sur la méthode de Turc ² . Année 1984-1996 à la station Dakar-Yoff.
Comte, 2008, p.150	300 mm	Estimation basée sur la littérature (Martin, 1970)
Tandia, 2000, p.32	270 – 440 mm	Évaporation mesurée à Dakar-Yoff entre 1978 et 1998 avec un évaporamètre PICHE ³ et estimée avec la méthode de Turc.
PDD, rap.technique, Annexe 1, p.47	95 mm	20% de la pluie annuelle est évaporée (480 mm/an actuellement).

Les différences entre les valeurs reportées sont très importantes (95-450mm/hivernage). Une évaporation de 450mm/an (PDA, rap.6, 2010, p.18) nous semble toutefois être une estimation trop élevée car toute la hauteur de pluie devrait dans ce cas s'évaporer. La recharge naturelle de la nappe serait donc presque nulle.

Une évaporation de 300mm par hivernage pour une pluie d'environ 450mm/an nous paraît un ordre de grandeur raisonnable en l'absence d'études plus détaillées sur le sujet. En effet, cette valeur est proche de celles données par trois références (Comte,2008,p.150; Tandia,2000,p.32; Koukoui,2002,p.48) et elle est cohérente avec les estimations de la recharge décrites ci-dessous.

Un point à souligner est le lien entre évaporation et pluie. La longueur de l'hivernage, l'intensité des pluies et la hauteur totale de pluie influencent l'évaporation. Avoir une estimation constante de l'évaporation introduit donc des erreurs qu'il faudrait estimer.

2 Méthode de Turc : $ETR = P / (0.9 + P^2/L^2)^{0.5}$ avec P la précipitation et $L = 0.05T^3 + 25T + 300$ où T est la température (Laborde, 2000)

3 L'évaporamètre de Piche est constitué par une éprouvette renversée fermée à sa base par une rondelle de papier buvard. Le tube est gradué depuis son sommet en dixièmes de millimètres d'eau évaporée. (Guyot, 1997)

Recharge naturelle

Comme dans le cas de l'évaporation, l'estimation de la recharge naturelle de la nappe de Thiaroye diffère beaucoup selon les sources.

Références	Recharge [mm/an]	Méthode
Koukoui, 2002, p.49	32-48	Utilisation de la formule (1) pour 5 stations météorologiques entre 1984-1996
Comte, 2008, p.150	200	Estimation basée sur la littérature (Martin, 1970 non consulté; Vallet, 1972 non consulté et PDMAS rapport A)
Faye, 2001, pp.107, 110, 115	50-85	Thiaroye : Recharge fixée à 85mm/an avec l'utilisation de formule (1) et de la méthode de Turc. Corrigée à 73mm/an après calibration. Infiltration plus basse à Dakar-Yoff et Pikine (50mm/an).
Re, 2011	40-60	Basé sur la littérature (Tandia, 2000, Travia, 1987, 1991 non consulté)
Dasyva, 2005	231 -116 - 20	Le taux d'infiltration est une fonction de la pluviométrie. Pluviométrie maximum (712mm/an), moyenne (529mm/an) et faible (220mm/an)
PDD, rapport technique, Annexe 1, p.47	400	Recharge choisie volontairement très haute du fait de l'absence de ruissellement.

Pour avoir un ordre de grandeur de la recharge naturelle de la nappe de Thiaroye, nous pouvons utiliser les mesures piézométriques mensuelles (PDMAS, rap.6, annexe A6-3-e) de la nappe. Ces mesures, parfois trop fragmentaires pour être utiles, proviennent de la DGPRE (direction de la gestion et de la planification des ressources en eau). Elle donnent le niveau de la nappe avant et après l'hivernage. Cette différence de niveau est une estimation de la recharge naturelle, car celle-ci est principalement due à la pluie qui tombe durant l'hivernage (Koukoui, 2002, p.43). On peut donc approximer la recharge de la nappe de Thiaroye avec la formule suivante (Nicholson, 2003, p.19) :

$$R = Po \Delta h \quad (2)$$

où R est la recharge, Po la porosité (c'est-à-dire le volume d'eau présent dans le sol divisé par le volume total de sol) et Δh la différence entre la hauteur piézométrique maximum et minimum de l'année en cours.

Comme la nappe n'est pas confinée, la hauteur piézométrique est simplement la hauteur de la nappe, mesurée au piézomètre PZ18⁴ de Thiaroye (PDMAS, rap.6, annexe A6-3-e). Pour le terme Po , nous ne tenons pas compte des différences entre porosité, porosité efficace et coefficient d'emmagasinement. Nous posons la porosité à 0.2 ce qui est la valeur habituelle pour une nappe composée principalement de sable (Comte, 2008, p.150 ; Faye, 2004, Koukoui, 2002, p.40).

⁴ Localisation des piézomètres en annexe

Dans le cas de la nappe phréatique de Thiaroye, il faut tenir compte des pompages d'eau potable et des apports en eaux usées dans le calcul de la recharge (PDD, rap.technique). Les apports en eaux usées s'élevaient à 5600m³/j ou 73 mm/6mois en 1976. En 1986, ils s'élevaient à 12'000m³/j ou 108mm/6mois (PDMAS rapport A, p.51). On enlèvera cet apport à la remontée de la nappe pour estimer la recharge naturelle, donnée dans le tableau ci-dessous. Au niveau des pompages, nous avons choisi une période (1976-1982) où les pompages étaient constants à environ 10'000 m³/j (PDA, rap.6, p.29), ce qui nous permet de négliger ce paramètre.

année	Δh [mm]	Pluie [mm]	EU [mm/6mois]	recharge [mm]
1976	670	390	73	61
1977	260	170	73	-21
1978	1560	320	73	239
1979	500	340	73	27
1980	890	380	73	105
1981	500	360	91.25	8.75
1982	501	310	91.25	8.95

Cette estimation de la recharge est bien sûr très grossière. L'apport en eau usée est par exemple très incertain. On néglige aussi les différences spatiales entre les piézomètres et la porosité du sol. De plus, la pluie moyenne est plus haute aujourd'hui et l'imperméabilisation du sol, liée à l'urbanisation, change le régime d'infiltration. Cependant, l'avantage de cette méthode est d'être basée sur des mesures directes. La recharge naturelle de la nappe doit donc se trouver approximativement entre 30 et 200mm/an.

Cet ordre en grandeur est compatible avec la recharge donnée dans les références de la page précédente, sauf dans le cas de la modélisation du PDD (PDD, rapport technique, Annexe 1, p.47) . La recharge de 400mm/an, utilisée dans le PDD, est ainsi beaucoup plus haute que toutes les estimations précédentes et probablement irréaliste. En effet, si la porosité du sol est de 0.2, une recharge naturelle de 400mm/an implique une remontée piézométrique annuelle de 2000mm ce qui est vraiment éloigné des valeurs mesurées (PDA, rap.6,p.25). Cette sur-estimation pose problème car les scénarios tirés de la modélisation du PDD sont les plus complets actuellement existants. Leur validité peut toutefois être discutée du fait de l'importance de la recharge prise en compte dans le modèle.

Les mesures piézométriques (PDMAS, rap.6, annexe A6-3-e) sont souvent utilisées durant la modélisation pour affiner l'estimation de la recharge. Le modèle fait varier la recharge et parfois la perméabilité en fonction des données piézométriques disponibles. Cette étape s'appelle le calage et elle permet de diminuer les incertitudes liées à la recharge.

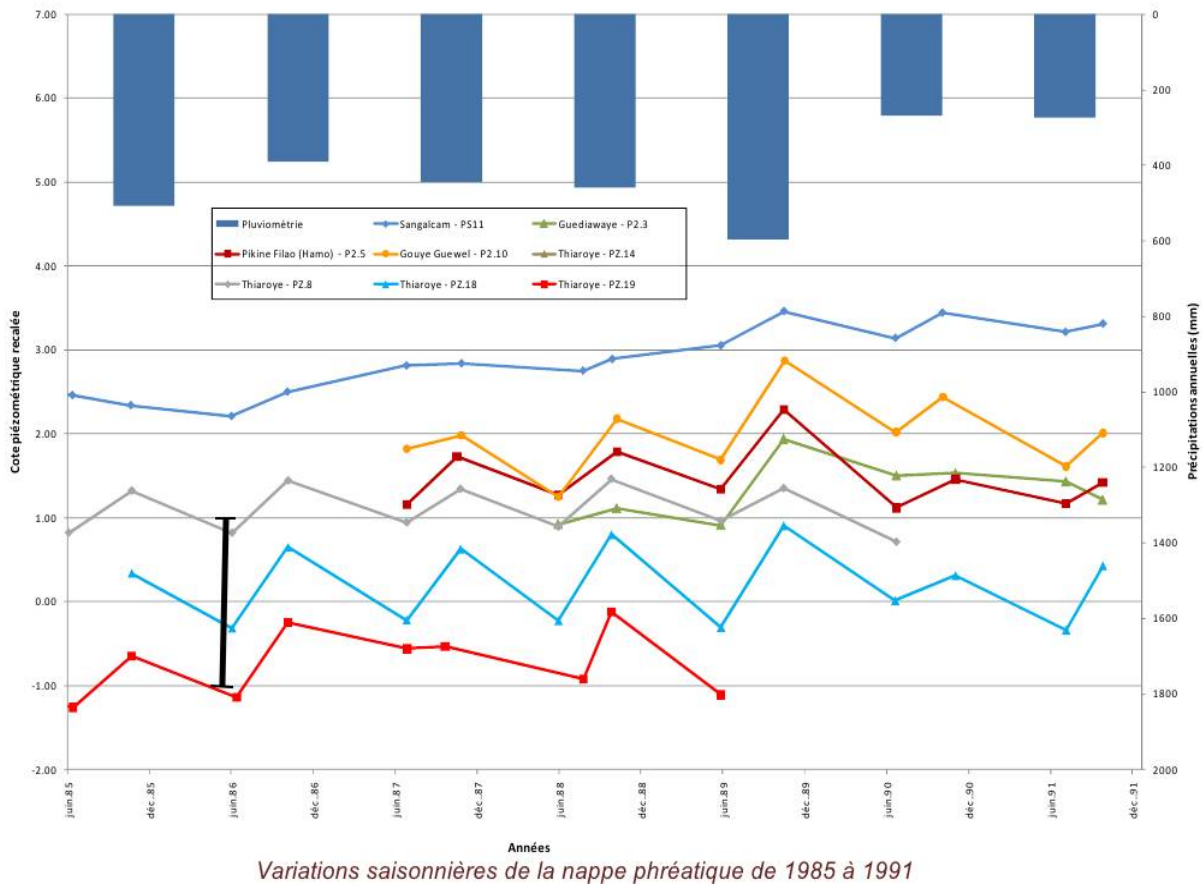


Figure 11: la barre noire verticale est une estimation de la remontée piézométrique annuelle pour une recharge de 400mm/an et les colonnes bleues présentent la pluviométrie – figure modifiée depuis le PDA, rap.6, p.25

Recharge anthropique

Eaux usées

Du fait du manque de système d'assainissement, les eaux usées de Pikine et de Guédiawaye se déversent dans la nappe et participent à sa recharge. Cet apport est non-négligeable et explique une partie importante de la remontée de la nappe phréatique (PDA, rap.6,p.31). Il met de plus en danger la qualité de l'eau (Dhiédhiou, 2011).

Les volumes d'eau potable facturés par la SDE (sénégalaise des eaux) permettent de déterminer les rejets en eaux usées. Si les données ne sont pas disponibles, le nombre d'habitants de la zone et leur utilisation moyenne de l'eau permet d'approximer ces rejets. La démographie et des analyses socio-économiques sont aussi utilisées pour prédire les apports futurs (PDA, rap.6).

Une analyse des volumes facturés permet de quantifier les rejets d'eau usée à 52000m³/j en 2011 (PDD, rap.technique, Annexe 1, p.52) . Une analyse de l'utilisation moyenne de l'eau par les habitants (Wetlands International, 2011) conclut à des rejets dans le même ordre de grandeur

(37'000m³/j pour la zone Pikine/Guédiawaye). La différence entre ces deux estimations est probablement due au fait que l'étude de terrain s'est limitée à la commune d'arrondissement de Djiddah Thiaroye Kao dont la situation sociale est différente de celle d'autres communes. En général, on observe une énorme augmentation des rejets d'eau usée due à l'accroissement de la population et à l'augmentation du volume d'eau utilisé (PDA, rap.6).

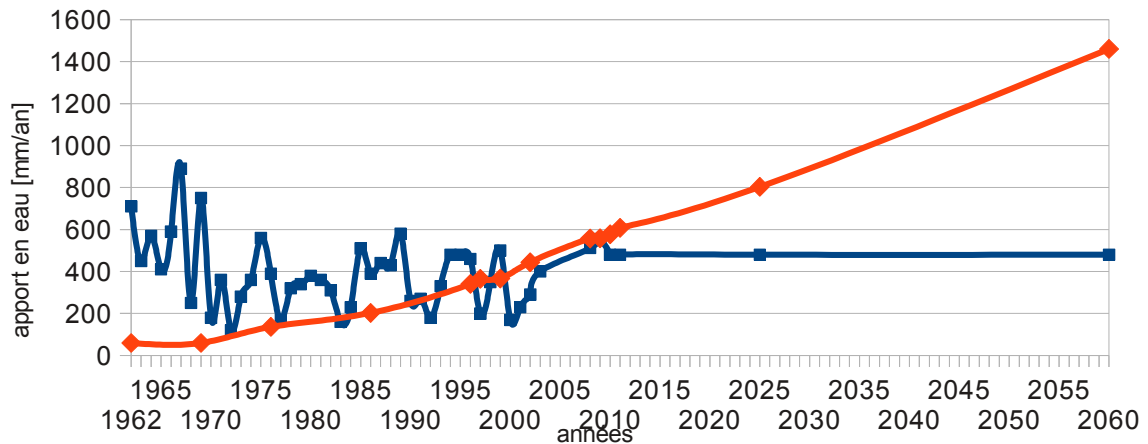


Figure 12: Apports en eau de pluie (courbe bleue) et en eau usée (courbe rouge) - Données et prévisions de Koukoui, 2002, p.50; PDD, Annexe 1, p.22 et p.51; PDMAS rap.A p.52; PDA rap.6, p.31 et p.61 - Zone urbanisée de 30km² depuis 1996. Avant 1996, voir Koukoui, 2002, p.50. Les résultats en mm/an sont très sensibles à la zone urbanisée choisie.

Cependant, toutes les eaux usées n'atteignent pas la nappe. Une partie s'évapore ou ne finit pas dans le sol après utilisation. Pour estimer la recharge anthropique, les rejets en eaux usées sont donc généralement multipliés par un coefficient constant. Ce coefficient est choisi arbitrairement entre 0.95 et 0.75 selon les sources (PDD rap.technique, Annexe 1, p.23; PDA, rap.5, p.40; Koukoui, 2002, p.50). Ce choix introduit des incertitudes substantielles (figure ?) qui ne sont pas réellement prise en compte actuellement. D'autres sources d'erreur, liées par exemple à l'analyse démographique ou à la détermination de la zone urbanisée, existent.

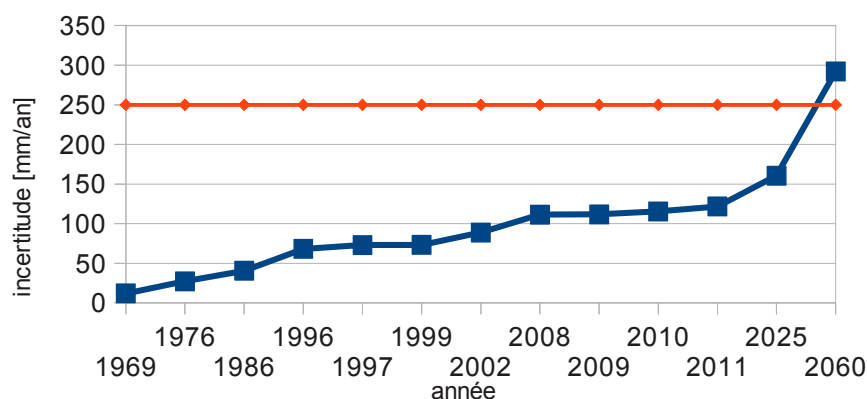


Figure 13 : La courbe rouge donne l'ordre de grandeur du maximum de la recharge naturelle. La courbe bleue donne la différence entre la recharge anthropique estimée avec un coefficient de 0.75 ou celle estimée avec un coefficient de 0.95. La courbe bleue est donc le résultat de la formule suivante : $y = 0.95 * x - 0.75x$ où x est le volume d'eau potable utilisé.

Fuites du réseau d'eau potable

Les fuites du réseau d'eau potable participent à la recharge anthropique de la nappe mais ne sont pas facturées aux utilisateurs. Il faut donc les ajouter aux apports en eaux usées pour obtenir le total de la recharge anthropique.

Les fuites s'élèveraient à 10% du volume d'eau distribué en 2010 selon le PDA (PDA, rap.6, p.31). Cet apport supplémentaire serait donc de 5800m³/j actuellement. Cependant, dans la modélisation du PDD (PDD, rapport technique, Annexe 1, p.52), l'estimation des fuites du réseau d'eau potable est plus haute avec un volume de 15'000m³/j en 2010 ce qui correspond à environ 25% du volume distribué. Cette référence propose des fuites s'élevant à env.15% du volume distribué pour 2060 (21'000m³/j). En l'absence d'information supplémentaire, 15% du volume d'eau potable distribué nous semble une approximation raisonnable des fuites d'eau potable.

La recharge et l'apport en eau dus aux fuites peuvent être considérés comme identiques puisque l'eau fuit dans le sol (l'évaporation est donc plus faible) et que les volumes considérés sont relativement petits.

Caractérisation des Sorties d'eau

Le niveau de la nappe phréatique de Thiaroye s'élève (PDMAS, rap.B/C). Il y a donc un déséquilibre entre les entrées d'eau, décrites ci-dessus et les sorties d'eau que nous allons quantifier ci-dessous. Une partie importante de ce chapitre sera aussi consacrée à l'estimation des sorties futures proposées par les projets de gestion des inondations (reprise des forages, réseau de drainage et amélioration de l'assainissement).

Reprise évaporatoire

Du fait de sa faible profondeur, l'évaporation dans la nappe de Thiaroye n'est pas négligeable. Elle est fonction du niveau de la nappe de la manière décrite par la figure ci-dessous (Comte, 2008, p.151 et PDMAS, rap. A, p.34). Cette courbe est basée sur des mesures en milieu aride dans la cas d'une nappe sableuse (PDMAS, rap. A, p.34). A notre connaissance, il n'existe pas de données directes pour la nappe de Thiaroye.

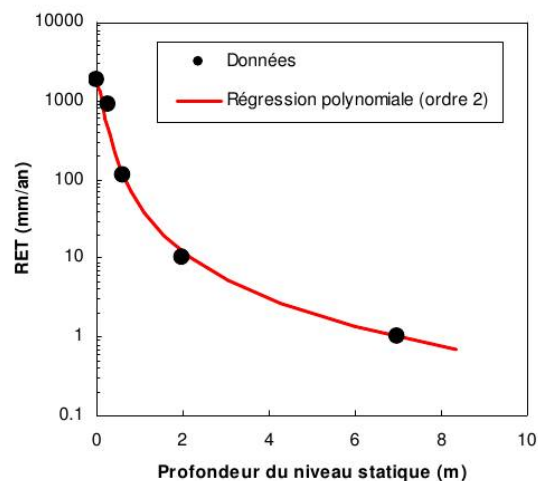


Figure 14: tiré de Comte, 2002, p.151, RET = reprise évaporatoire annuelle

D'autres méthodes d'estimation de l'évaporation, qui nous semblent moins précises, existent. H.Koukoui et N.Ndiaye proposent une évaporation fixe sur les surfaces d'eau libres connectées à la nappe (Koukoui, 2002). S.Dasylya *et al.* utilisent une évaporation constante de 100mm/an sur toute la zone d'étude (Dasylya, 2004).

La détermination de l'évaporation ne tient pas compte du type de végétation ou de l'imperméabilisation du sol. Ces facteurs peuvent avoir un impact local important (A.A.Diop, PASDUNE, 2012, communication orale).

Entrée/Sortie d'eau de mer

La nappe de Thiaroye est en contact avec l'océan (PDMAS, rapport B/C, p.27). Il y a donc des échanges entre l'eau douce de la nappe et l'eau de mer. La quantification de ces échanges n'est pourtant pas nécessaire pour modéliser la nappe. En effet, l'océan donne à la nappe phréatique un niveau piézométrique constant de 0m sur les côtes (Faye, 2001, p.100). Le débit aux limites est déterminé par cette condition. On connaît ainsi le comportement de la nappe en bordure des côtes dans un modèle 2D.

L'étude de la position du biseau salin et du risque d'intrusion saline lié au pompage ne peut se faire que dans un modèle 3D qui étudie plus en détail l'interface eau douce/eau salée. (voir, par exemple, PDD, rapport technique, Annexe 1, p.39)

Pompages

Pompage pour l'eau potable

La nappe phréatique de Thiaroye est pompée pour l'eau potable depuis les années 1960. La pollution de l'eau, notamment due aux nitrates (Diédhiou, 2011), a induit une diminution des pompages pour l'eau potable. Ces pompages pour l'eau potable vont probablement s'arrêter dans les prochaines années (PDA, rap.6, p.30 et la figure ci-dessous)

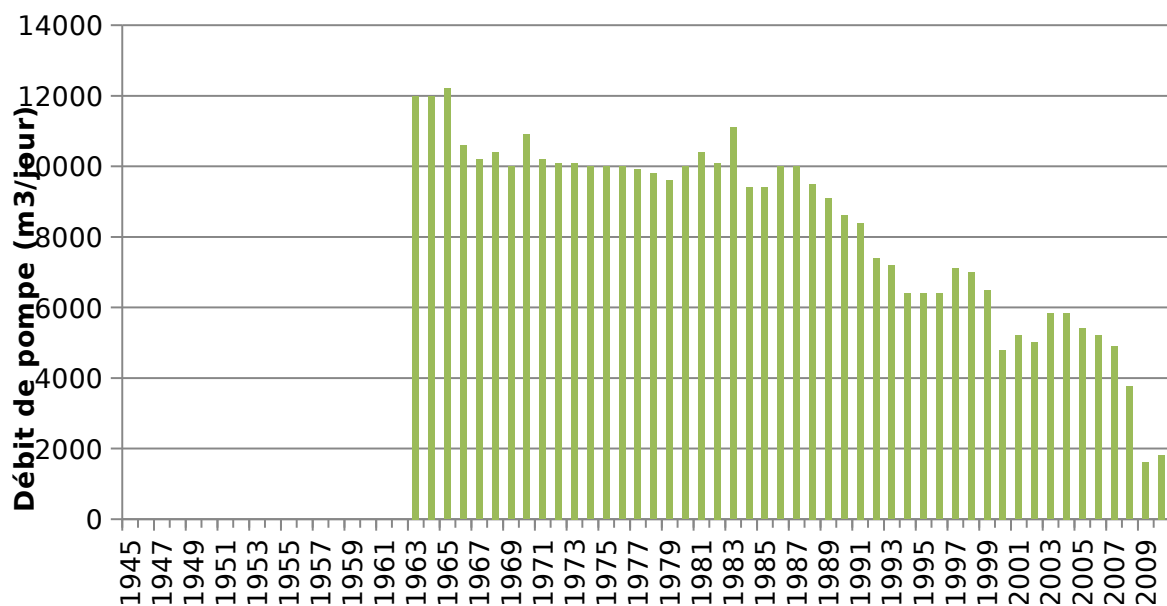


Figure 15: figure modifiée d'urbaMonde, 2009 - données du PDMAS, étude d'impact (1962-2001) et du PDD, rap.technique, Annexe 1, p.24

La position des forages est donnée en annexe. Il est prévu d'utiliser les mêmes forages pour l'eau potable et pour l'eau destinée à l'irrigation en ajoutant trois forages dans le deuxième cas. Les débits pompés entre 1998 et 2010 sont donnés dans le rapport technique du PDD pour chaque forage (PDD, rapport technique, Annexe 1, p.24).

Pompage pour l'irrigation

Actuellement, les prélèvements agricoles sont très dispersés et trop faibles pour avoir un réel impact sur le niveau de la nappe (PDMAS, rap.A, p.36). Il est toutefois prévu de compenser la diminution des pompages pour l'eau potable en créant un système de pompage d'eau destinée à l'irrigation (Mobilisation de ressources en eau alternatives pour l'irrigation dans la région de Dakar, PDMAS, APD).

Les études détaillées du PDMAS (PDMAS, APD; PDMAS, étude d'impact) planifient un pompage pour l'irrigation de $16000\text{m}^3/\text{j}$ au total. Le débit de chaque forage serait de $100\text{m}^3/\text{h}$ 16h par jour (PDMAS, rap. B/C, p.9).

Drainage des eaux pluviales

L'amélioration du drainage conduit à deux types de sortie d'eau. Premièrement, le réseau de drainage des eaux pluviales connecte les bassins des Niayes avec la mer. Une partie de la pluie peut donc s'écouler vers la mer et ne participe plus à la recharge naturelle de la nappe phréatique. La réalisation du réseau de drainage diminuerait ainsi la recharge de $100\text{mm}/\text{an}$ de pluie en 2060 selon le PDD (PDD, rap.technique, Annexe 1, p.22). Cette diminution est probablement très dépendante de l'estimation de la recharge naturelle initiale, qui est très haute dans le PDD ($400\text{mm}/\text{an}$, PDD, rapport technique, Annexe 1, p.47).

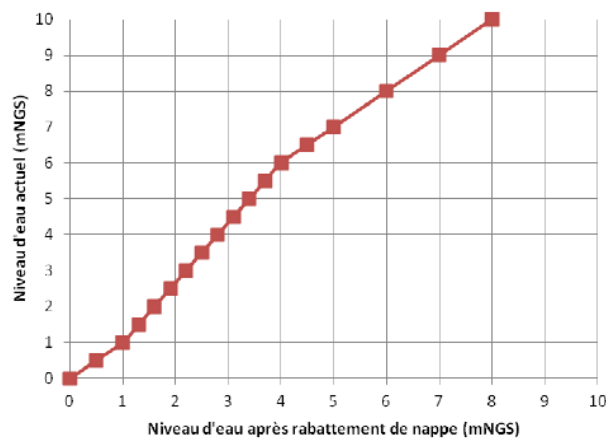


Figure 16: Rabattement de la nappe prévu en fonction du niveau actuel – figure tirée du PDD, rapport technique, p.32

Cependant, l'impact majeur du PDD sur la nappe phréatique serait la mise en place d'un système de drainage horizontal (PDD, 2011, p.16). Ce système abaisserait la nappe de 2m maximum, dépendant des différences entre le niveau de la nappe et le niveau de la mer. Les sorties d'eau dues au drainage horizontal s'élèveraient à $11000\text{m}^3/\text{j}$ en 2010 et à $18'000\text{m}^3/\text{j}$ en 2060 pour un scénario avec une recharge naturelle importante ($400\text{mm}/\text{an}$), de l'assainissement autonome et un arrêt des forages (PDD, rapport technique, Annexe 1, p.54/58).

Amélioration de l'assainissement

Le PDA (plan directeur d'assainissement) ne sera pas disponible avant mars 2012 (Ousmane Camara, ONAS, communication orale, 2012). Il est donc difficile de prévoir le volume d'eau usée traitée qui ne participerait plus à la recharge de la nappe. L'impact des eaux usées est toutefois central sur le niveau de la nappe phréatique et la diminution de cette recharge additionnelle aura un impact important sur la réduction à long terme des inondations (PDD, rapport technique, Annexe 1).

Les modélisations actuellement disponibles proposent les scénarios d'assainissement suivants. Il sera sûrement possible de les affiner après la publication du PDA .

Références	Année prise en compte	Scénarios – rejet en eau usée
PDD, rap.technique, Annexe 1, p.52	2025/2060	Assainissement autonome : 62054m ³ /j pour 2025 et 119 248 m ³ /j pour 2060 Assainissement collectif : 0 m ³ /j en 2025 et 2060
PDMAS, rap. B/C, p.9	2013 (modélisation de 2004)	50% du volume des eaux usées collecté, c'est-à-dire 23'300 m ³ /j d'eau traitée en 2013. Ce scénario n'est plus à jour.
Modélisation de la nappe de 2007 du cabinet Merlin (PDD, rapport technique, Annexe 1, p.41)	2050/2100	Infiltration liée aux eaux usées réduite à 120mm/an en 2050 et à 0mm/an en 2100. Infiltration actuelle de 300mm/an selon cette référence.

Paramètres hydrauliques et piézométrie

L'examen détaillé des paramètres hydrauliques (porosité, perméabilité,...) et de la géologie de la nappe de Thiaroye sortirait du cadre de cette étude. Il existe en effet déjà des modèles qui intègrent ces paramètres et plusieurs références qui les présentent. On les résumera donc simplement ici.

Porosité

La porosité d'une nappe phréatique est donnée par le volume d'eau présent dans le sol divisé par le volume total de sol. Ce paramètre est dépendant de la composition du sol. La nappe de Thiaroye est principalement composée de sable et sa porosité se situe donc aux alentours de 20% (Koukoui, 2002 ; Faye, 2004 ; Ouedraogo, 2009,p.49, Comte, 2008,p.150). Des valeurs entre 17 et 32% sont toutefois possibles (Ouedraogo, 2009,p.49) . Deux références (PDMAS, rap.A, p.61, PDD, rap.technique, Annexe 1,p.46) proposent une porosité efficace (volume d'eau extractible divisé par le volume du sol) de 25%.

Perméabilité

La perméabilité mesure la facilité de déplacement de l'eau dans la nappe. Dans le cas de la nappe de Thiaroye, ce paramètre se situe entre $4 \cdot 10^{-5}$ et $1.6 \cdot 10^{-4}$ m/s pour les perméabilités horizontales (Koukoui, 2002,p.40 ; Ouedraogo, 2009, p.46;PDMAS, rap.A, p.14, Comte, p.150). La perméabilité verticale est plus basse, environ un dixième de la perméabilité horizontale (PDD, rap.technique, Annexe 1, p.46).

Au cours de la mise en place d'un modèle, la perméabilité horizontale est souvent modulée durant la phase de calage (c'est-à-dire durant la calibration du modèle). Une piézométrie de référence est utilisée pour trouver les perméabilités qui donnent les hauteurs piézométriques les plus proches des mesures. Ces perméabilités calées sont ensuite gardées dans les autres étapes de la modélisation (Ouedraogo, 2009, p.73 ; PDD, rap.technique, Annexe 1, p.46, PDMAS, rap.A, p.61).

Les résultats de ce processus dans le cas de deux modélisations sont présentés dans les figures 17A et 17B. La figure de gauche (PDD, rap.technique, Annexe 1) montre des perméabilités en général plus élevées que celle de droite (Ouedraogo, 2009). Une explication à cette différence est la recharge de la nappe qui est plus importante dans le cas de gauche (PDD, rap.technique, Annexe 1) que dans le cas de droite (Ouedraogo, 2009). Durant le calage, le modèle peut tendre vers une perméabilité plus élevée pour faire baisser plus rapidement le niveau de la nappe et ainsi retrouver la piézométrie de référence.

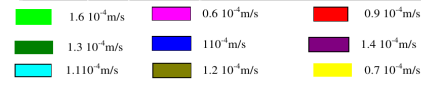
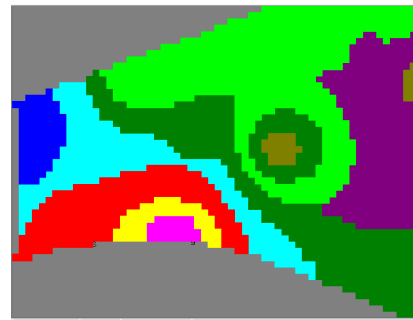
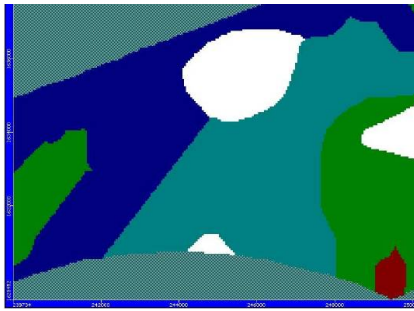


Figure 17 A et B:

en blanc $4 \cdot 10^{-4}$ m/s, en bleu foncé $2 \cdot 10^{-4}$ m/s, en vert 0.008m/s, en rouge 0.03m/s (Marigot de Mbao), en bleu clair 10^{-4} m/s; modifiée depuis PDD, rap.technique, Annexe 1, p.46

tiré de Ouedraogo, 2009,p.73

Substratum

Le substratum est la couche rocheuse qui définit la limite inférieure de la nappe. Dans le cas de Thiaroye, il est formé de marnes et d'argiles très peu perméables (PDD, rap.technique, Annexe 1,p.10). Il existe plusieurs cartes de ce substratum (Koukou, 2002, p.33 ; PDMAS, rap.A, p.11, PDD rap.technique, Annexe 1, p.12 ; Ouedraogo, 2009, p.42) dont nous donnons un exemple ici.

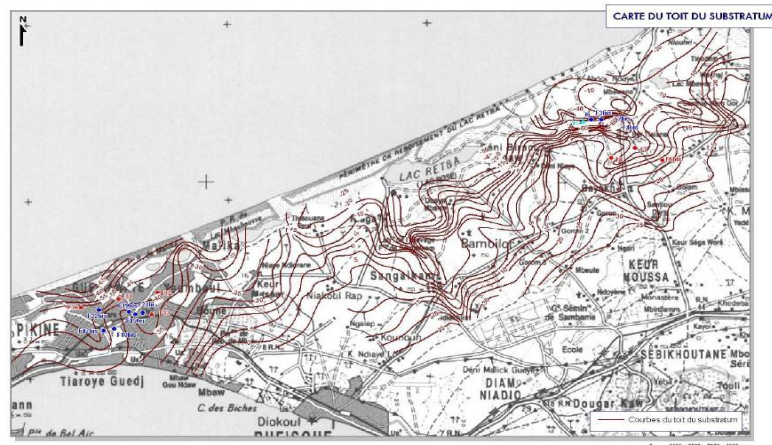


Figure 18: tiré du PDD, rap.technique, Annexe 1, p.12

Piézométrie

Un réseau de mesures du niveau piézométrique de la nappe de Thiaroye existe depuis 1953 (PDMAS, rap.A, p.16). La fréquence des mesures varie toutefois beaucoup au cours du temps et les cartes piézométriques ne sont donc pas disponibles chaque année. Le tableau suivant liste les cartes présentes dans la littérature. Une carte du niveau piézométrique de la nappe de Thiaroye est également présente en annexe.

Date	Références
Juillet 1948	PDMAS, rap. A, p.19 PDD, rap.technique, Annexe 1, p.16
Juin 1971 (extrême basses eaux)	PDMAS, rap. A, p.19 PDD, rap.technique, Annexe 1, p.16 Koukou, 2002, p.35
1995	Tandia, 1999
Juillet 1997	Koukou, 2002,p.36 Ouedraogo,2009,p.93
Avril 2003	PDMAS, rap. A, p.21 PDD, rap.technique, Annexe 1, p.17
Juin 2010	PDD, rap.technique, Annexe 1, p.19

Topographie :

La zone d'étude est relativement plate. Elle est composée de dépressions inter-dunaires où la nappe phréatique est affleurante (PDD, rap.technique, Annexe 1, p.7). Un modèle numérique de terrain (MNT) de la zone existe. Sa précision est de 0.25-0.5m en hauteur. Il date de 1999 (PDD, rapport technique, p.16).

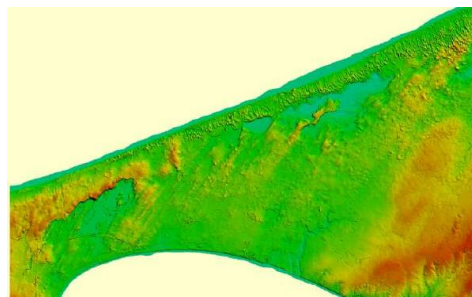


Figure 19: représentation du MNT; source: PDD, rap.technique, p.17

Impact croisé des projets (basé sur le PDD)

Dans ce chapitre, on tentera de quantifier l'impact des différents projets en cours (drainage, assainissement et reprise des pompages) sur la réduction des inondations. On utilisera pour cela la modélisation de la nappe de Thiaroye effectuée par les bureaux d'ingénieurs SGI consulting et CPGF-horizon dans le cadre du PROGEP. Les détails de la modélisation peuvent être trouvés dans l'annexe 1 du rapport technique du PDD (PDD, rap.technique, Annexe 1).

Nous réutilisons donc ici les résultats d'une étude antérieure. En effet, nous n'avons malheureusement pas pu produire nos propres modélisations par manque de temps. Les paramètres du modèle, notamment la caractérisation des sorties et des entrées d'eau, sont donc différents de ceux exposés ci-dessus. La comparaison entre les paramètres décrits dans cette étude et ceux utilisés dans la suite de ce rapport est présentée ci-dessous (voir le paragraphe sur les scénarios).

Nous avons choisi d'analyser les résultats de la modélisation du PROGEP car c'est la modélisation la plus récente et la seule à intégrer les impacts croisés des trois projets principaux de gestion des inondations.

Zone d'étude et conditions aux limites

La zone d'étude est celle de la nappe de Thiaroye comme le montre la figure suivante.

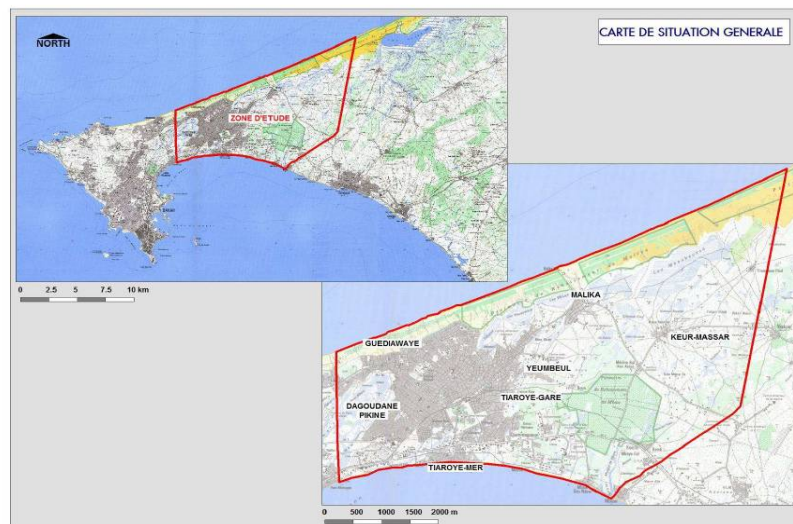


Figure 20: Limites de la zone d'étude - figure tirée du PDD, rap.technique, Annexe 1, p.9

L'aire modélisée est de 192km². Le maillage choisi est de 50m x 50m. Les conditions aux limites sont données par le bord de l'océan au nord et au sud (potentiel imposé à 0m), par la nappe infra-basaltique à l'ouest (potentiel imposé) et par un flux nul à l'est. (PDD, rap.technique, Annexe 1, p.43). Le milieu est homogène et isotrope.

Le modèle, très complet, est un modèle 2D basé sur le programme Visual MODFLOW 2009.1 (Visual MODFLOW, 2005). Tous les scénarios décrivent la situation possible pour 2060. Comme le calcul des zones inondables est basé sur la topographie issue du MNT, l'exactitude des zones inondées dépend de la précision de ce MNT (PDD, rap.technique, Annexe 1, p.54).

Scénarios et paramètres d'entrées

On va ici présenter les quatre scénarios étudiés. Dans le premier scénario, seul le drainage est mis en place. Dans le deuxième, la nappe est pompée pour l'irrigation et drainée. Dans le troisième, la nappe est drainée et l'assainissement est de type collectif. Dans le quatrième scénario, les trois projets sont opérationnels mais le pompage est plus bas.

N°	Scénarios	Recharge naturelle [mm/an]	Pluie drainée [mm/an]	Eaux usées [m ³ /j]	Fuite eau potable [m ³ /j]	Pompages [m ³ /j]
2	Drainage	400	100	120'000	24500	0
3	Pompage/Drainage	400	100	120'000	24500	16'000
4	Assainissement / Drainage	400	100	0	24500	0
5	Assainissement/ Drainage/Pompage	400	100	0	24500	4000

Source : PDD, rapport technique, Annexe 1, p.53

Comme nous l'avons expliqué dans l'introduction, nous utilisons dans ce chapitre les résultats d'une modélisation antérieure. Les paramètres de la modélisation sur laquelle sont basées les figures 21A à 21H sont donc différents des paramètres choisis dans le chapitre précédent. Nous présentons la comparaison entre ces paramètres dans le tableau suivant.

Paramètres d'entrée du modèle	PDD, rap.technique, Annexe 1	Partie précédente de cette étude
Pluviométrie	500mm/an	300, 425 et 550 mm/an
Évaporation de la pluie avant infiltration	100mm/an	Environ 300mm/an
Ruissellement hors de la zone	0mm/an	0mm/an
Recharge naturelle	400mm/an	30-200mm/an
Recharge due aux eaux usées	52'000 ³ /j en 2010 et 120'000m ³ /j en 2060 (90% des volumes utilisés s'infiltrent)	50'000-120'000m ³ /j (75%-90% des volumes utilisés s'infiltrent)

Recharge due aux fuites d'eau potable	13'000m ³ /j en 2010 et 21'000m ³ /j en 2060 sur les secteurs non assainis en 2010 2500-3500m ³ /j sur les secteurs assainis en 2010	15% des volumes d'eau distribués
Reprise évaporatoire	En fonction de la profondeur de la nappe	En fonction de la profondeur de la nappe
Pompages destinés à l'irrigation	16'000m ³ /j ou 0m ³ /j	16'000m ³ /j ou 0m ³ /j
Amélioration de l'assainissement	Si le PDA est réalisé, aucune recharge liée aux eaux usées	?
Réseau de drainage des eaux pluviales	100mm/an + Réseau de drainage horizontal	>100 mm/an + Réseau de drainage horizontal
Porosité	0.25	0.2
Perméabilités horizontales	Entre 10 ⁻⁴ et 3*10 ⁻² m/sec	Entre 4*10 ⁻⁵ et 1.6*10 ⁻⁴ m/s

La différence principale entre les paramètres d'entrée du PROGEP et ceux que nous aurions choisi est une recharge de la nappe plus importante dans la cas du PROGEP. La recharge naturelle y est spécialement haute (de 2 à 13 fois la recharge habituelle) et la recharge due aux fuites d'eau potable est aussi plus haute que celle que nous avons imaginée. Cette recharge importante explique aussi probablement les différences au niveau des perméabilités horizontales qui auraient été modifiées durant le calage (voir figures 17A et B).

Rabattement de la nappe et zones inondables

Les quatre figures à droite de la page suivante présentent le rabattement de la nappe induit par chaque scénario. Ces cartes ont été produites en faisant la différence entre le niveau piézométrique modélisé pour 2060 dans le scénario considéré et dans le cas où aucun projet ne se mettrait en place. Les quatre figures de gauche donnent les zones inondables basées sur la topographie du MNT .

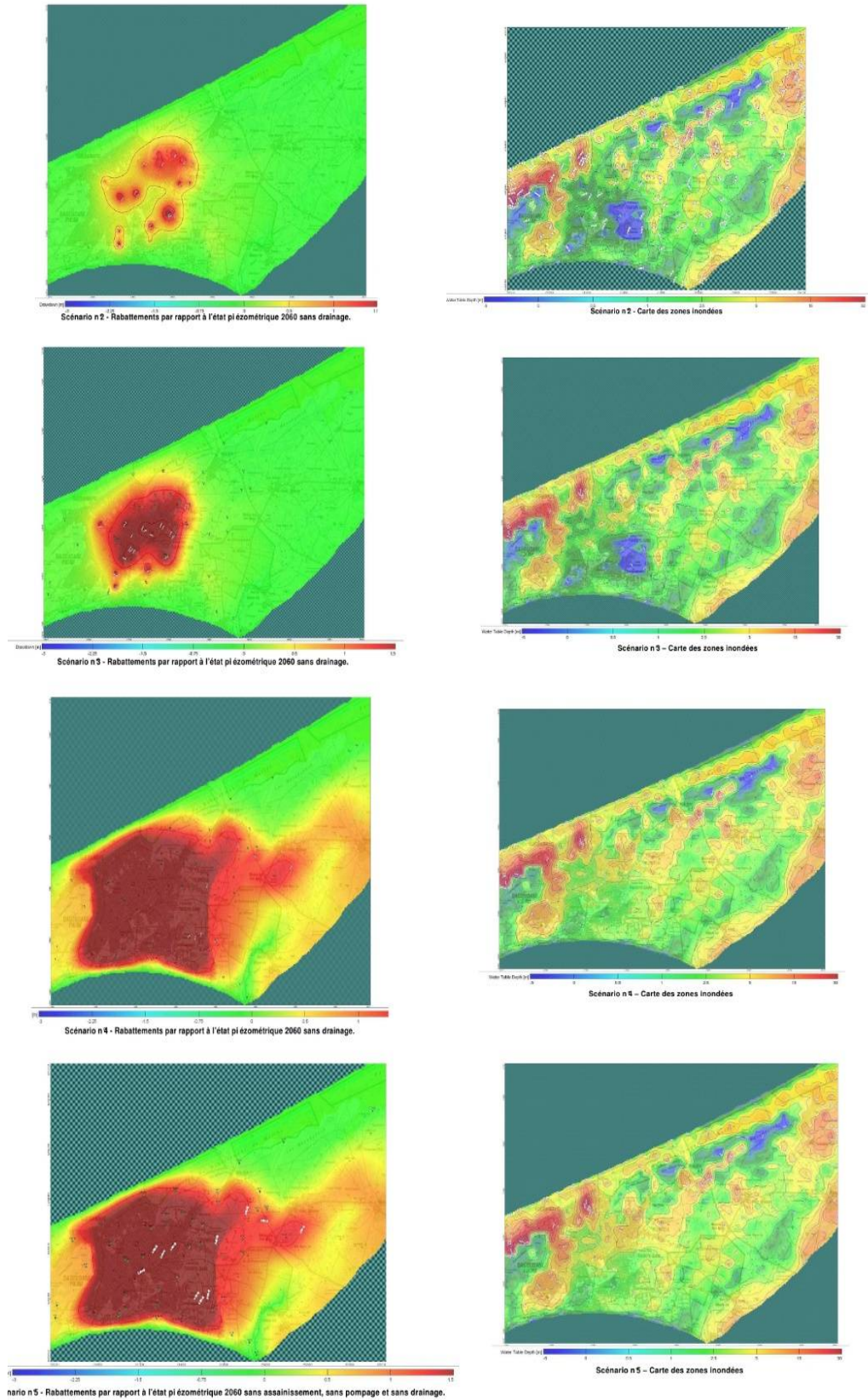


figure 21 A à H: Scénarios 2-3-4-5 de haut en bas - Figures de gauche (A à D): Les zones rouges indiquent un rabattement de plus de 1m, les zones vertes un rabattement faible. - Figures de droite (E à H): les zones inondables sont en bleu, les zones vertes indiquent une nappe à environ 1-2m de profondeur et les zones jaunes et rouges une nappe plus profonde. Source : PDD, rapport technique, Annexe 1

Analyse et commentaires

Dans les figures précédentes, le lien entre le manque d'assainissement et le risque d'inondation ressort clairement. Un système d'assainissement collectif est nécessaire pour rabattre la nappe phréatique de Thiaroye à long terme. C'est ainsi le moyen le plus efficace de lutte contre les inondations (PDD, rap.technique, Annexe 1, p.67) . La mise en place d'un réseau d'assainissement collectif dans la région est toutefois un processus complexe (Norman, 2011), entre autre du fait de la situation socio-économique et de la densité de l'habitat .

Deuxièmement, le réseau de drainage des eaux pluviales est un moyen efficace de lutte contre les inondations seulement si un réseau de drainage secondaire et tertiaire est en place. Un réseau de drainage primaire, où seules les voies de drainages principales sont construites, induit un rabattement de la nappe trop localisé autour des points de drainages pour être efficace. Le drainage des eaux pluviales est toutefois indispensable pour gérer les pluies intenses durant l'hivernage (PDD, 2011,p.6).

A l'horizon 2060, le pompage de la nappe à un débit de 16'000m³/jour n'est pas suffisant pour réduire les inondations du fait de l'importance des rejets d'eaux usées. Ce pompage induit toutefois un rabattement plus important que le réseau de drainage. De plus, la reprise des pompes réduit efficacement le risque d'inondations dans la décennie suivant sa mise en place (PDD, rap.technique, Annexe 1, p.35).

Selon cette modélisation, il est possible de drainer et de pomper la nappe en parallèle. La diminution des rejets en eau usée doit toutefois aller de paire avec une diminution des pompes pour éviter une progression trop importante du biseau salin (PDD, rap.technique, Annexe 1, p. 41).

Avant de conclure, il faut noter que la recharge naturelle (due à la pluie) utilisée dans cette modélisation est très haute (400mm/an). Ceci se défend dans une modélisation qui a pour but de vérifier la faisabilité d'un système de drainage des eaux pluviales. Cependant, le calage et les résultats du modèle sont possiblement faussés du fait du choix de la recharge.

Améliorations possibles de la modélisation

Beaucoup de recherches au sujet de la modélisation de la nappe de Thiaroye ont été effectuées. Il existe pourtant des questions qui sont toujours ouvertes aujourd'hui. Nous allons en lister quelques-unes ici.

- Il est important de déterminer les zones inondables dans plusieurs scénarios de gestion des inondations. Ceci a été fait ci-dessus avec une recharge de la nappe très haute. Refaire la même analyse avec une recharge plus petite, par exemple de 100mm/an donnerait plus de poids aux résultats.
- Il existe plusieurs modèles de la nappe de Thiaroye (Ouedraogo, 2009; PDMAS, rap. A, PDD, rapport techniques, Annexe 1,...). A notre connaissance, on a toutefois rarement fait les mêmes modélisations avec différents modèles. Une estimation des zones inondables en utilisant plusieurs modèles en parallèle permettrait de déceler les différences entre ces modèles et d'estimer leurs incertitudes. Ceci serait relativement facile à faire à condition de pouvoir obtenir les modèles en question.
- Plusieurs cartes piézométriques de la zone sont disponibles pour la période 1948-2010 (PDD, rapport technique, Annexe 1; Tandia, 1999, Ouedraogo, 2011,...). Les entrées et les sorties

d'eau de cette période sont aussi relativement bien connues. On pourrait donc simuler cette période afin d'examiner si les réactions mesurées de la nappe phréatique correspondent aux réactions de la nappe données par le modèle. Ce test permettrait de voir si le modèle reste valable dans des conditions variables.

- Les zones inondables de la commune d'arrondissement Djiddah Thiaroye Kao ont été déterminées par une étude détaillée de terrain (Enquête concession, 2011). De plus, l'étude d'impact de l'arrêt des forages (PDMAS, rap. B/C, p.18) a modélisé les zones inondables pour octobre 2013. Il serait assez simple de voir si ces zones correspondent à celle trouvées par l'enquête de terrain de 2010.
- D'autres scénarios de gestion de l'eau sont possibles. On peut imaginer, par exemple, un pompage important dans les cinq prochaines années suivi d'une mise en place d'un réseau de drainage et d'une amélioration de l'assainissement. La réaction de la nappe à ces différentes options pourrait être testée.
- La nappe infra-basaltique, située à l'est de la presqu'île du Cap-Vert, sous Dakar, est fortement pompée pour l'eau potable (PDD, rap.technique, Annexe 1,p.32). Son niveau diminue. Comme elle est en contact avec la nappe de Thiaroye qui remonte, l'eau de Thiaroye a probablement tendance à se déverser dans la nappe infra-basaltique. La pollution due aux nitrates avance vers la presqu'île (PDD, rap.technique, Annexe 1, p.29) et met en danger les puits d'eau potable. La reprise des pompages, en rabattant la nappe, pourrait peut-être inverser le sens de l'écoulement. Un modèle numérique donne les échanges en eau aux limites. L'étude des échanges à la limite est de la nappe de Thiaroye dans un scénario de pompage permettrait d'estimer l'intérêt de la reprise des pompages pour la protection de la nappe infra-basaltique.
- Une modélisation des impacts du réchauffement climatique sur le niveau de la nappe phréatique de Thiaroye serait aussi intéressante. La remontée du niveau de la mer et de l'érosion des côtes changera probablement la position du biseau salin et la piézométrie de la nappe.

Conclusion

Un modèle est un outil qui permet d'affiner les choix de gestion de l'eau. Il permet de se projeter dans l'avenir et de prédire les impacts possibles des choix actuels. Il ne représente toutefois pas la réalité et une quantification des incertitudes est indispensable. Cette quantification devrait être améliorée dans les modélisations de la nappe phréatique de Thiaroye. De plus, l'estimation de la recharge devrait être précisée et la sensibilité des résultats à ce paramètre mieux étudiée.

Malgré le manque d'estimation des erreurs, les modélisations de la nappe de Thiaroye démontrent le lien entre manque d'assainissement et augmentation du risque d'inondations (PDD, rapport technique, Annexe 1, p.67). Elles montrent aussi que la reprise des pompages est un moyen efficace de lutte contre les inondations à court-terme (PDD, rap.technique, Annexe 1, p.35). A plus long-terme (50 ans), les rejets en eaux usées semblent trop importants pour être compensés par le pompage (PDD, rap.technique, Annexe 1, p.60). Le drainage des eaux pluviales réduit aussi le risque d'inondations en gérant les pluies intenses et en créant un réseau de drainage de la nappe. Un rabattement important de la nappe par drainage est toutefois seulement possible si le réseau est plus dense que celui prévu aujourd'hui (PDD, rap.technique, Annexe 1, p.67).

ANALYSE INSTITUTIONNELLE

Introduction

Dans l'avant-dernière partie de ce rapport, nous analysons la gestion actuelle de la nappe de Thiaroye et les responsabilités de chaque acteur. Nous cherchons également à connaître le point de vue des services techniques sur les moyens de diminuer le risque d'inondation, tant au niveau technique qu'institutionnel.

Pour cela, nous avons conduit une série d'entretiens avec des représentants des services techniques sénégalais ainsi qu'avec deux instituts de recherche. Ces entretiens ont toujours eu pour but de répondre à trois questions : Quelle est la responsabilité du service technique concerné dans la gestion de la nappe de Thiaroye ? Quel est le point de vue de la personne interrogée sur la gestion de la nappe phréatique ? Quel est son avis sur le schéma institutionnel ? Par contre, ces entretiens n'avaient pas de cadre précis et ils se déroulaient différemment dans chaque cas pour laisser aux personnes interrogées la possibilité de s'exprimer le plus librement possible.

Sur la base de notes écrites prises durant les entretiens, nous avons ensuite produit un résumé écrit de ceux-ci puis nous nous sommes basés sur ce résumé pour décrire le point de vue de chaque acteur. Il est évident qu'une part importante de la discussion se perd dans une analyse aussi courte. Toutefois, nous ne souhaitons pas, dans ce rapport, connaître en détail l'avis de chaque agence gouvernementale. Nous voudrions plutôt avoir les grandes lignes de leurs actions et de leur préoccupations. Pour cela, nous pensons que notre démarche est suffisante.

Nous avons également volontairement mis de côté les acteurs de la société civile bien que ceux-ci jouent un grand rôle dans la gestion de la nappe de Thiaroye. La raison pour ce choix est que des analyses plus détaillées sur le rôle des acteurs civils dans la gestion des inondations sont en cours de réalisation (A. Amiguet, communication personnelle, 2012).

Présentation des acteurs interrogés et de leurs responsabilités

Nous allons ici rapidement décrire les responsabilités de chaque services techniques dans la gestion des la nappe phréatique de Thiaroye. Ces responsabilités sont résumées dans le tableau situé à la fin de ce paragraphe.

Plan Jaxaay

Acronyme : -

Personne interrogée : M.Sidi Baye⁵, responsable de la gestion des inondations

Responsabilité du service dans la gestion de la nappe de Thiaroye :

Le plan Jaxaay est le service qui gère le projet « plan Jaxaay » au sein du ministère de l'habitat, de la construction et de l'hydraulique. Il a la responsabilité de reloger les familles déplacées à la suite de la réalisation des bassins de rétentions. Il est aussi responsable de la gestion de ces bassins de rétentions.

Le plan Jaxaay se donne aussi la responsabilité de la gestion des inondations en général, notamment de la coordination entre les actions des différents services.

Direction de la gestion de la planification des ressources en eau

Acronyme : DGPRE

Personnes interrogées : M.Niokhor Ndour, chef de la division planification des eaux et responsable SIG (et M.Salim Gom, responsable des eaux souterraines et du réseau de piézomètre)

Responsabilité du service dans la gestion de la nappe de Thiaroye :

La DGPRE planifie au niveau national la gestion de la ressource en eau. Pour cela, elle a divisé le Sénégal en 5 UGP (unités de gestion et de planification, Legendre, 2011). Dans chacune de ces UGP, un schéma général de la gestion de l'eau sera défini. La nappe phréatique de Thiaroye se trouve dans l'UGP du Cap-Vert (Legendre, 2011, p.36-37) et elle sera donc gérée en fonction des axes de gestion définis pour cette partie du territoire. Ce schéma général ne sera probablement pas suffisant pour une gestion détaillée et des conventions plus locales devraient être signées.

La DGPRE est aussi responsable des mesures piézométriques de la nappe de Thiaroye. Il n'a pas été possible de déterminer qui est responsable des mesures de qualité de l'eau de la nappe de Thiaroye entre la SONES et la DGPRE. La DGPRE gère également un centre de documentation sur les ressources en eau du Sénégal.

Hydraulique urbaine

Acronyme : -

Personne interrogée : Mme Badji, technicienne à l'hydraulique urbaine

⁵ L'auteur a contrôlé de son mieux l'orthographe du nom des personnes interrogées. Il est toutefois possible que des erreurs soient encore présentes. Nous présentons nos excuses aux personnes concernées.

Responsabilité du service dans la gestion de la nappe de Thiaroye :

L'hydraulique urbaine est le ministère de tutelle de la SONES. Ce service fait donc le lien entre le gouvernement et la SONES pour la gestion de la nappe de Thiaroye. Des réunions régulières entre la SONES, la SDE (la Sénégalaise Des Eaux, une société privée qui s'occupe de approvisionnement en eau), l'ONAS et l'hydraulique urbaine sont organisées pour maintenir une collaboration entre ces services.

Mme Badji faisait également parti d'un comité pour organiser la reprises des forages de Thiaroye mais ce comité ne s'est plus réuni depuis longtemps du fait du manque de financement pour ce projet.

Société nationale des eaux du Sénégal

Acronyme : SONES

Personne interrogée : M. Ada Ndao, chargé de projet, ingénieur

Responsabilité du service dans la gestion de la nappe de Thiaroye :

La SONES gère les pompages d'eau potable de la nappe de Thiaroye. Elle aurait aussi la responsabilité de la gestion des forages destinés à l'irrigation quand ceux-ci seront opérationnels. Pour l'instant, le projet est en arrêt à cause du manque de financement. La SONES ne cherche toutefois pas de fond pour la réalisation de ce projet, estimant que ce volet est de la responsabilité du PDMAS.

La SONES gère l'approvisionnement en eau potable de la banlieue de Dakar. Cette eau potable, après être utilisée, s'infiltré dans le sol et augmente la recharge de la nappe.

Office national de l'assainissement du Sénégal

Acronyme : ONAS

Personne interrogée : M. Ousmane Camara, directeur d'exploitation

Responsabilité du service dans la gestion de la nappe de Thiaroye :

L'ONAS gère les réseaux de collecte d'eau usée et d'eau pluviale. Sur le volet assainissement, ils sont moins présents en banlieue car ils s'occupent principalement de systèmes d'assainissement collectif (gestion des réseaux d'égout). A Pikine, la majorité de la population est desservie par des systèmes individuels comme les fosses septiques. L'ONAS se sent donc moins responsable de ces zones. La situation va toutefois probablement changer avec la mise en place du PDA qui implique l'extension de réseaux collectifs de collecte des eaux usées en banlieue.

L'ONAS est responsable de la gestion des eaux pluviales en ville de Dakar. Il serait aussi responsable de la gestion des eaux pluviales en périphérie de Dakar. L'ADM a cependant récemment pris la responsabilité de ce volet en mettant en place le PROGEP. Le partage des responsabilités sur ce point n'est actuellement pas clair pour les deux services qui attendent le rapport sur le schéma institutionnel des consultants du PROGEP pour se prononcer.

Agence de développement municipale

Acronyme : ADM

Personne interrogée : M. Gora Ndiaye, responsable technique du PROGEP

Responsabilité du service dans la gestion de la nappe de Thiaroye :

L'ADM est un agence gouvernementale qui soutient les municipalités du Sénégal, notamment en leur servant de garant pour obtenir des fonds auprès de bailleurs comme la banque mondiale. Dans ce cadre, l'ADM coordonne le PROGEP qui est le projet de gestion des eaux pluviales et de drainage horizontale de la nappe phréatique de Thiaroye. Sa responsabilité dans la gestion de la nappe de Thiaroye devrait donc être ponctuelle, dépendant des projets en cours.

Conseil régional

Acronyme : -

Personne interrogée : M.Malick Faye, Directeur technique et secrétaire permanent du cadre de concertation

Responsabilité du service dans la gestion de la nappe de Thiaroye :

Le conseil régional, soutenu par urbaMondé, met en place un cadre de concertation sur la gestion des inondations en périphérie de Dakar. Ce cadre de concertation réunira les services techniques, les municipalités et les acteurs de la société civile pour coordonner des actions à long-terme contre les inondations. Il devrait être effectif depuis février 2012. Une de ces premières actions sera de soutenir la recherche de fond pour la reprise des forages.

Programme de développement des marchés agricoles

Acronyme : PDMAS

Personne interrogée : M.Sayon Kamara, responsable de l'irrigation

Responsabilité du service dans la gestion de la nappe de Thiaroye :

Le PDMAS gère les forages destinés à l'irrigation dans la zone de Beer Thialane. Ce service affirme toutefois ne pas avoir de responsabilité dans la reprise des forages de Thiaroye, notamment dans la recherche de financement. La SONES serait, selon le PDMAS, le service responsable de ce projet.

Programme d'Action pour la Sauvegarde et le Développement Urbain des Niayes et Zones Vertes de Dakar

Acronyme : PASDUNE

Personne interrogée : M.Abdoul Aziz Diop, Responsable du programme

Responsabilité du service dans la gestion de la nappe de Thiaroye :

Ce programme vise à protéger les Niayes et les zones vertes qui sont dues à l'affleurement de la nappe phréatique de Thiaroye. PASDUNE a donc la responsabilité de la protection des écosystèmes de la zone de Thiaroye, notamment de la grande Niaye de Pikine.

Université Cheikh Anta Diop

Acronyme : UCAD

Personnes interrogées : M.Serigne Faye, maître de conférence en géologie et M.Seydou Niang, Responsable du laboratoire des eaux usées

Responsabilité du service dans la gestion de la nappe de Thiaroye :

Recherche scientifique sur la qualité de l'eau, le niveau piézométrique, les risques de pollutions, etc de la nappe phréatique de Thiaroye.

Institut Africain de Gestion Urbaine

Acronyme : IAGU

Personne interrogée : M. Oumar Cissé, directeur

Responsabilité du service dans la gestion de la nappe de Thiaroye :

Recherche scientifique sur la qualité de l'eau, le niveau piézométrique, les risques de pollutions, etc de la nappe phréatique de Thiaroye.

Responsabilités actuelles des acteurs gouvernementaux dans la gestion de la nappe de Thiaroye

	ONAS	ADM	SONES	PDMAS	Cadre de concertation	SDE	DGPRES	Plan Jaxaay	Hydraulique urbaine	PASDUNE	Ministère du cadre de vie	IAGU	UCAD
Assainissement autonome	?												
Assainissement collectif	X												
Eaux pluviales de Dakar	X												
Eaux pluviales en banlieue	X	X						x					
Reprise des forages - gestion			X			X							
Reprise des forages - financement			?	?	X								
Gestion des bassins de rétention	?	?						X					
Pompage eau potable			X			X							
Protection des Niayes										X			x
Déchets solides											X		
Recherche scientifique												X	X
Planification de la gestion					X		X		x				
Suivi de la nappe			x				X						
Diffusion des informations					X		X					x	x

Avis sur la gestion de la nappe phréatique

M.Sidi Baye du Plan Jaxaay

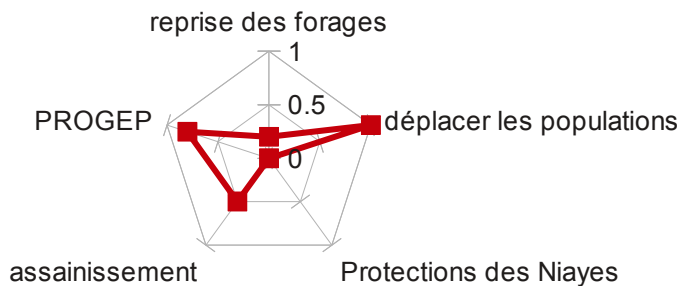


Figure 22: Position sur la gestion de la nappe (quantification subjective basée sur l'entretien du 11 janvier 2012)

Ainsi qu'on le voit sur ce graphique, M.Sidi Baye propose de gérer les inondations en améliorant la gestion des eaux pluviales et en déplaçant les populations qui habitent dans les zones basses. Il soutient la mise en place d'un système d'assainissement collectif, mais ne pense pas que ce système puisse être réalisé rapidement. Il n'est pas forcément contre la reprise des forages mais craint que les maraîchers ne puissent pas payer pour l'eau déplacée ce qui rendrait le système trop cher pour être utile.

Au niveau du schéma de gestion institutionnel, il lui semble que le plan Jaxaay doit coordonner l'action des différents services techniques dans la lutte contre les inondations. Des luttes d'influence rendraient toutefois ce travail difficile.

M.Niokhor Ndour de la DGPRE

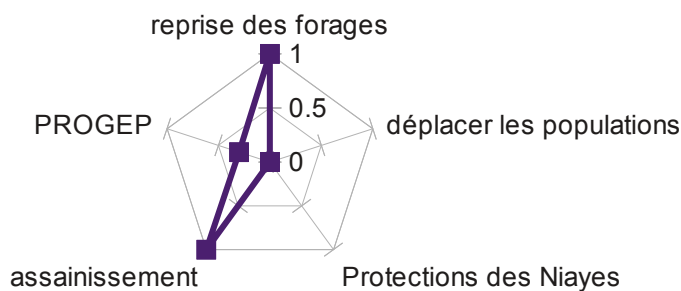


Figure 23: Position sur la gestion de la nappe (quantification subjective basée sur l'entretien du 23 janvier 2012)

Selon M.Niokhor Ndour, la reprise des forages de Thiaroye est une urgence pour la gestion des inondations. L'assainissement devrait aussi être une priorité.

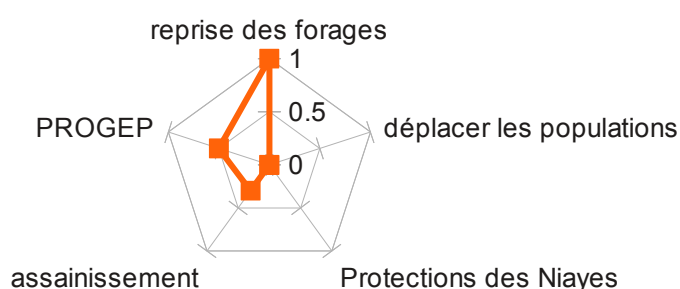
Au niveau du schéma institutionnel de gestion, il rappelle que la DGPRE est responsable de la planification des ressources en eau. Comme il existe une multiplicité d'acteurs liés à la nappe de Thiaroye (population de la banlieue, SONES, maraîchers,...), il pense que la meilleure méthode de gestion serait l'écriture d'une convention locale de gestion des ressources naturelles

(Granier, 2006). Cette convention permettrait de tenir compte du point de vue de tous les acteurs.

Mme Badji de l'hydraulique urbaine

Selon elle, il faut plus d'études techniques au sujet de l'efficacité de chaque projet. Il est difficile de citer les actions nécessaires en l'absence d'informations précises. Des études détaillées permettraient également d'optimiser les ressources allouées à la lutte contre les inondations. Mme Badji déplore également le manque de coordination entre les structures et propose de donner la responsabilité de la lutte contre les inondations à une structure précise, par exemple, la DGPRE. Cette structure devrait ensuite travailler en coordination avec les autres services.

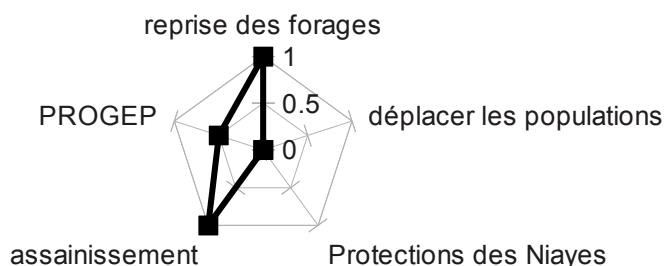
M.Ada Ndao de la SONES



M.Ada Ndao soutient principalement la reprise des forages comme moyen de lutte contre les inondations. Il attend le financement du PDMAS pour le lancement de ce projet. En effet, ce serait les maraîchers qui bénéficieraient de l'eau destinée à l'irrigation. Il faut donc qu'une structure soutenant l'agriculture finance ce projet.

Figure 24: Position sur la gestion de la nappe (quantification subjective basée sur l'entretien du 20 janvier 2012)

M.Ousmane Camara de l'ONAS



En tant que directeur d'exploitation de l'ONAS, M.Camara souligne l'importance de l'amélioration de l'assainissement dans la gestion des inondations. Il défend aussi une reprise rapide des forages pour faire baisser le niveau de la nappe phréatique de Thiaroye. Le PROGEP est aussi un projet important de réduction des inondations mais l'obstruction des canalisations par les déchets et le sable risque de le rendre inefficace.

Figure 25: Position sur la gestion de la nappe (quantification subjective basée sur l'entretien du 6 février 2012)

Au niveau de la gestion du PROGEP, il faudra éclaircir le partage des responsabilités entre l'ONAS et l'ADM sur la gestion des eaux pluviales en banlieue. A un niveau plus général, il faudrait un service pour fédérer tous les projets et pour allouer les ressources d'une manière optimale. Avoir trop de projets divergents diminue leur visibilité auprès des bailleurs de fond.

M.Gora Ndiaye de l'ADM

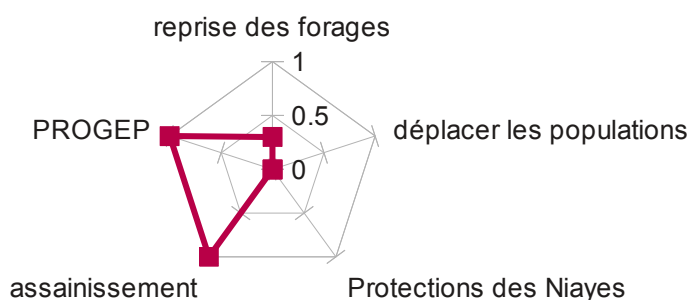


Figure 26: Position sur la gestion de la nappe (quantification subjective basée sur l'entretien du 30 janvier 2012)

Pour M.Gora Ndiaye, le drainage horizontal de la nappe de Thiaroye prévu par le PROGEP va permettre de baisser son niveau sans devoir pomper, ce qui coûte cher en électricité ou en essence. Un système de drainage des eaux pluviales est de plus indispensable du fait des fortes pluies de l'hivernage. L'amélioration de l'assainissement doit aussi être une priorité puisque

que c'est l'infiltration des eaux usées dans la nappe qui est à la source des inondations. L'intérêt de la reprise des forages est dépendant de la demande en eau. Si quelqu'un est prêt à payer pour le pompage, on pourrait éviter une perte de ressource. Sinon, il faut assurer la sécurité des habitants même si cela implique de rejeter l'eau à la mer.

Au niveau de la gestion, chaque instance devrait être responsable d'une partie du bilan hydrologique (exemple : SONES pour l'eau potable, ONAS pour l'eau usée, PDMAS pour l'eau destinée à l'irrigation,...). Il faudrait de plus coordonner ces différents services. Puisque les inondations menacent plusieurs communes, une gestion inter-communale est nécessaire. La coordination des inondations pourrait donc être de la responsabilité de l'ADM ou la ville de Dakar qui sont des structures inter-communales.

M.Malick Faye du conseil régional

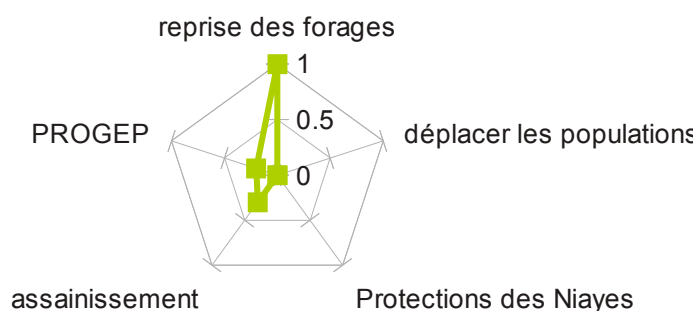


Figure 27: Position sur la gestion de la nappe (quantification subjective basée sur l'entretien du 31 janvier 2012)

Selon M.Malick Faye, la priorité pour lutter contre les inondations est la reprise des forages. Le PDA et le PROGEP sont intéressants mais long à mettre en place. Les forages sont donc indispensables à moyen-terme.

M.Malick Faye écrit l'arrêté qui permettra la création d'un cadre de concertation sur les inondations. Ce cadre devrait permettre

d'améliorer la coordination entre les acteurs en présence. Il servirait de base non contraignante pour les différentes actions de lutte contre les inondations.

M.Abdoul Aziz Diop de PASDUNE

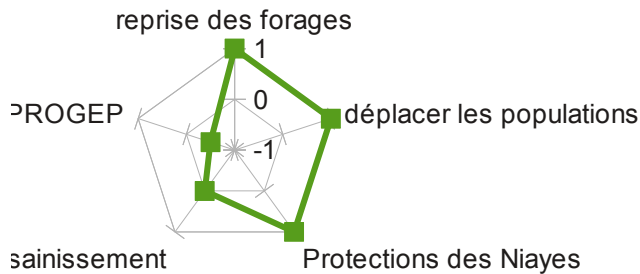


Figure 28: Position sur la gestion de la nappe (quantification subjective basée sur l'entretien du 17 janvier 2012)

Selon le responsable de PASDUNE, une meilleure gestion de la végétation permettrait de mieux drainer la nappe et donc de diminuer le risque d'inondation. Il faut donc protéger et étendre les espaces verts quitte à devoir déplacer des populations. La reprise des forages est aussi indispensable pour diminuer le risque d'inondation.

Pour gérer efficacement les inondations, un changement de paradigme est nécessaire. Le Sénégal a actuellement une approche ministérielle avec des ministères s'occupant chacun d'un secteur précis. Cette approche n'est toutefois pas efficace pour les problèmes qui dépendent de plusieurs ministères comme la gestion des inondations de la banlieue de Dakar. Une approche par programme où l'on a une structure pour chaque problème serait plus adaptée à la situation et elle améliorerait la coordination.

M.Seydou Niang et M.Serigne Faye de l'UCAD

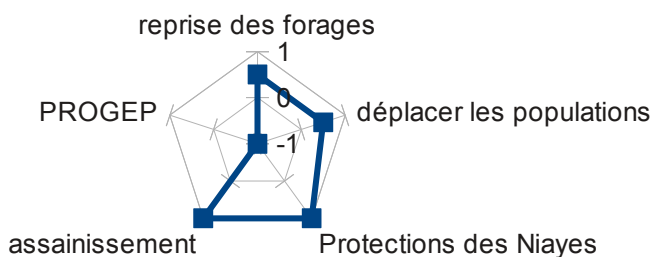


Figure 29: Position sur la gestion de la nappe de M.Seydou Niang (quantification subjective basée sur l'entretien du 18 janvier 2012)

Pour M.Seydou Niang, il faut tout d'abord améliorer l'assainissement pour diminuer le risque d'inondation. Des déplacements de population sont également nécessaires pour ceux qui habitent dans des zones inondables. La protection des Niayes et la création d'espaces verts dans les zones inondables est une priorité même si les possibilités de gestion de ces espaces sont limités dans les banlieues. Le PROGEP pose par contre un risque pour la qualité de l'eau des Niayes et de la baie de Hann car il est probable que les eaux pluviales

seront mélangées aux eaux usées. L'intérêt de la reprise des forages est dépendant de la demande en eau à long terme des maraîchers.

Pour gérer les inondations, il faudrait un organe de coordination au plus haut niveau (primature ou présidence) avec un pouvoir exécutif et pas seulement consultatif. Il est nécessaire que cet organe puisse gérer les ressources, notamment financières. De cette manière, les projets seraient exécutés en fonction de leur importance et pas des possibilités financières de chaque service.

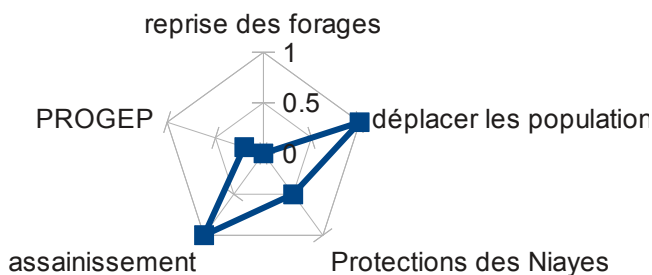


Figure 30: Position sur la gestion de la nappe de M. Serigne Faye (quantification subjective basée sur l'entretien du 9 janvier 2012)

M. Serigne Faye voit la réalisation d'un système d'assainissement collectif ou semi-collectif comme une priorité. Pour lui, certains déplacements de population sont de plus inévitables. La protection des espaces naturels est également une nécessité.

Tenir compte du facteur social, notamment à travers la sensibilisation et l'implication de la population est aussi indispensable.

M. Oumar Cissé de l'IAGU

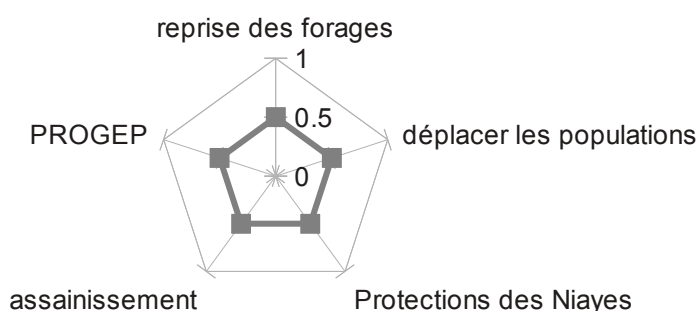


Figure 31: Position sur la gestion de la nappe (quantification subjective basée sur l'entretien du 14 février 2012)

Il est important, pour M. Cissé, d'étudier toutes les options de gestion des inondations. La reprise des pompages est une possibilité mais la qualité de l'eau de la nappe limite ses applications, même dans l'agriculture. Le rabattement de la nappe va de plus induire une concentration des polluants du fait de la diminution de la dilution. Le drainage horizontal implique une perte de ressource en eau mais il n'est pas dépendant de la demande en eau. Des études précises devraient également déterminer des zones inondables non habitables.

Au niveau institutionnel, la séparation entre le ministère de l'hydraulique, responsable de la gestion de l'eau, et celui de l'agriculture, responsable de l'irrigation est dommageable. Le ministère de l'hydraulique

devrait être responsable de tous les types d'eau même de celles que ne peuvent être bues. Il devrait ensuite collaborer avec le ministère de l'agriculture et le ministère de l'urbanisme.

Analyse et conclusion sur les entretiens

La majorité des acteurs souligne l'importance de l'assainissement dans la lutte contre les inondations. Les rejets d'eau usée expliquent en effet la majorité de la remontée de la nappe et la pollution de l'eau. L'assainissement est également une priorité sociale. Plusieurs acteurs ont toutefois noté la complexité de la mise en place d'un réseau de collecte des eaux usées en banlieue. Des projets similaires, à Dakar, dans les quartiers de Yoff, Camberène, Thiaroye, Ngor, Ouakam, etc ont récemment donné des résultats mitigés (Norman, 2011).

Le drainage des eaux pluviales a lui moins de soutien de la part des services techniques. Le risque d'obstruction des canaux, les probables branchements clandestins d'eaux usées et le danger de pollution des Niayes sont souvent soulignés. Le financement du PROGEP, qui s'élèverait à plus de 100 milliards de francs CFA (PDD, 2011, p.62), donne aussi l'impression de mettre trop l'accent sur les eaux pluviales au détriment d'autres priorités. L'impression général est que les ressources sont mal réparties. La nécessité de gérer les fortes pluies de l'hivernage est toutefois mise en avant par certains acteurs comme M.Ndiaye ou M.Camara.

La reprise des forages est une urgence pour gérer les inondations à moyen-terme. Cette solution est souvent citée pour diminuer le risque d'inondation. La demande réelle des maraîchers, leur possibilités financières et la qualité de l'eau mettent toutefois en péril la durabilité de ce projet selon certains acteurs. Le drainage horizontal de la nappe, qui ne nécessite pas de pompage, serait aussi une bonne alternative si les canaux ne seraient pas obstrués et si le réseau de drainage serait suffisamment étendu pour permettre un réel rabattement.

Du fait du bas coût des pompages (5 milliards de francs CFA (PDMAS, APD,p.20)) et du fait de l'importance de la diminution rapide des inondations, la réalisation parallèle d'un système de drainage horizontal et de forage semble une approche plus sécurisée et plus flexible à l'auteur.

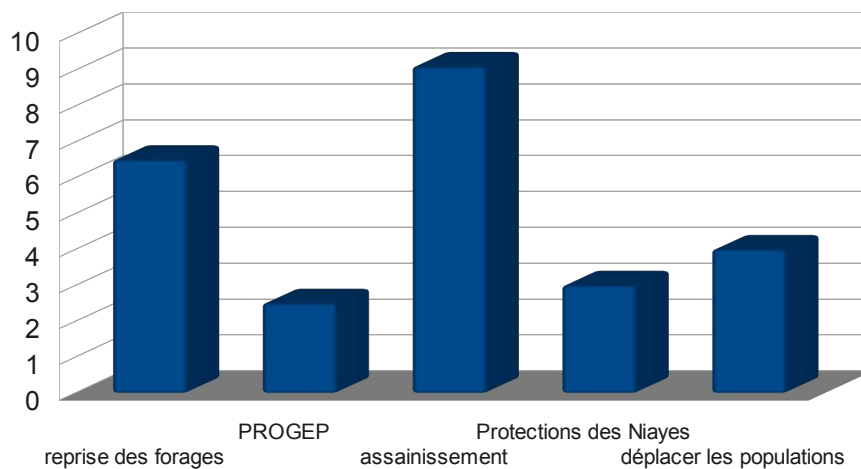


Figure 32: Ce graphique a été obtenu en additionnant le score, estimé pour chaque entretien, des projets. Un score haut indique donc que le projet semble important à une majorité d'acteurs interrogés.

Au niveau du schéma institutionnel de gestion, la majorité des services techniques (8 sur 11 personnes interrogées) souligne le manque de coordination entre les différents acteurs.

Le cadre de concertation sur la gestion des inondations, créé en février 2012, semble donc répondre à un besoin. Cette approche d'amélioration de la coordination n'est citée toutefois que par un acteur qui est le responsable de ce cadre de coordination (M. Malick Faye). Les autres services techniques proposent plutôt d'améliorer la coordination à l'intérieur des services gouvernementaux. Le fait d'avoir participé au séminaire de novembre 2011 sur la gestion des inondations (ce qui est le cas de cinq personnes), où ce cadre de concertation a été planifié, ne le rend pas plus attractif. Il est de plus souvent souligné qu'un pouvoir central exécutif, et pas seulement consultatif, devrait être organisé pour gérer les inondations et la nappe phréatique de Thiaroye. Une meilleure collaboration du cadre de concertation avec la DGPRE pourrait lui donner plus de poids institutionnel et permettrait d'améliorer sa visibilité. Dans l'état actuel, le cadre de concertation ne semble pas encore être un outil efficace de coordination mais la situation pourrait changer rapidement.

PROPOSITIONS POUR UNE GESTION INTÉGRÉE

Après l'analyse détaillée de la situation présentée ci-dessous, nous allons ici formuler des propositions pour améliorer la gestion de la nappe de Thiaroye. Le but ici n'est pas d'avoir des solutions toutes prêtes à appliquer mais plutôt d'avoir une base de discussion et de réflexion.

Nous commencerons par définir les critères qui limitent la gestion de la nappe de Thiaroye et dont nous devons tenir compte. Nous définirons ensuite des buts pour une gestion intégrée en tenant des limitations et des seuils défini précédemment. Nous finirons par décrire les avantages d'une gestion intégrée.

Facteurs externes limitant la gestion

Pour améliorer la gestion de la nappe de Thiaroye, il faut donc tenir compte des besoins des acteurs présents ainsi que d'autres limitations comme l'évolution de l'urbanisation ou du climat. Ces limitations sont définies ci-dessous, tant qualitativement ainsi que quantitativement, à l'aide d'un système de seuils. Ces seuils sont définis d'une manière préliminaire en fonction des besoins des acteurs les plus sensibles.

Seuil maximum de la nappe

Le seuil maximum de la nappe est bien entendu défini par le risque d'inondation. Il est en effet très difficile d'exproprier les familles vivant dans les zones inondables et il est impossible d'exiger qu'elles vivent avec la menace permanente des inondations. Il faut donc rabattre le niveau de la nappe pour permettre à un maximum de personnes de rester dans leur maison.



Figure 33: tiré d' (Urbamonde, 2009)

On propose ici un seuil qui suivrait le rabattement de 0.5-3m, décrit sur la figure 8 (PDMAS, rapport B/C). Dans les zones côtières, un rabattement supplémentaire devrait être envisagé par rapport à ce qui est présenté sur cette figure. Ce rabattement supplémentaire ne pourrait toutefois pas être obtenu à l'aide d'un système de pompage.

Ce seuil de rabattement est techniquement possible (PDMAS, rapport B/C; PDD,2011) et diminue significativement le risque d'inondation (PDMAS, rapport B/C) . L'impact sur les zones humide,

notamment la grande Niayes de Pikine, est probablement faible puisque que la majorité du rabattement se situe plus à l'est. Des études plus détaillées sur le sujet seraient toutefois nécessaires.

Ce rabattement pourrait être obtenu par une meilleure gestion des eaux pluviales, par une amélioration de l'assainissement, par la reprise des pompages ou par un mélange de ces différentes méthodes. Un modèle numérique de la nappe et des études plus détaillées sont nécessaires pour estimer les solutions optimales de rabattement de la nappe. Une étude des modélisations existantes sur ce sujet est présente dans la deuxième partie de ce rapport.

Seuil minimum de la nappe

Plusieurs facteurs limitent le rabattement de la nappe. Du fait de la proximité de la nappe de Thiaroye avec la mer, le premier de ces facteurs est le risque d'intrusion saline. La salinisation diminue la qualité de l'eau et la rend impropre à son utilisation dans l'agriculture ainsi que dans certaines applications industrielles. Le premier seuil de rabattement est donc lié aux besoins des maraîchers. Il est situé à une conductivité maximum de $3000\mu\text{S}/\text{cm}$ (FAO, 1994). Cette limite de salinisation doit maintenant permettre de définir une limite supérieure de pompage de l'eau dans la zone, garantissant un moindre risque d'intrusions salines dans la nappe de Thiaroye.

Historiquement, un pompage à $16'000\text{m}^3/\text{j}$ dans les années 1960 a résulté dans une pollution de la nappe (PDA, rap. 6, p.28). Le projet de mobilisation des ressources en eau alternatives du PDMAS propose un pompage identique. Cependant, du fait de la recharge additionnelle de $55000\text{ m}^3/\text{jour}$ dues au eaux usées, un pompage de $16'000\text{m}^3/\text{jour}$ est compatible avec la situation actuelle de la nappe (PDD rap.technique, 2011, annexe 1, p.40). Une diminution des pompages sera toutefois nécessaire au moment de la mise en place d' un système collectif d'assainissement.

Un deuxième seuil minimum peut être donné par le risque d'affaissement des sols. En effet, le rabattement d'une nappe est en général suivi par un abaissement du sol dont le volume était partiellement composé d'eau. Ce seuil est mal connu dans le cas de Thiaroye. Les constructions de la zone sont cependant peu à risque car elle sont majoritairement à un étage et donc plutôt légères. Le poids du bâtiment est en effet un facteur d' affaissement des sols (BRE Digest, 1993). De plus, l'alternance entre les saisons sèches et les saisons humides déplace le niveau de la nappe d'environ 0.8m (PDA, rap.6,p.25) chaque année sans poser de problèmes importants à notre connaissance. Pour finir, les sols sableux, comme ceux de la zone de Thiaroye, sont réputés moins à risque que les sols argileux (Wray, 1995). *A priori*, le risque semble donc limité. Cependant, une étude plus complète sur ce point pourrait être menée, notamment à cause de la haute densité de construction dans la zone d'étude (Ndione, 2009, p.25).

Un dernier seuil minimum est donné par la protection des zones humides de la presqu'île du Cap-Vert (les Niayes). En effet, ces zones humides sont alimentées par la nappe phréatique durant la saison sèche. Un rabattement exagéré aurait donc comme résultat de les assécher.

Pour la définition de ce seuil, il faut distinguer les Niayes qui sont utiles pour l'agriculture des Niayes urbanisées où la lutte contre les inondations est prioritaire. Le choix de ce seuil est ainsi dépendant des zones qu'on choisit de préserver et donc d'un équilibre entre urbanisation et protection des écosystèmes.

De ces trois seuils, le plus simple à quantifier est celui donné par le risque de salinisation (conductivité maximum de $3000\mu\text{S}/\text{cm}$). En l'absence d'études supplémentaires, c'est celui

que l'on propose d'utiliser. Pourtant, la quantification des deux autres contraintes pourrait aboutir à un rabatement maximum plus haut.

Seuil de qualité de l'eau

La protection de la qualité de l'eau est indissociable d'une gestion intégrée d'une nappe phréatique. Dans le cas de la nappe de Thiaroye, la qualité de l'eau est très basse avec notamment des concentrations importantes en nitrate (Diédhiou, 2011) dues aux rejets d'eaux usées. Une attention particulière doit donc être portée sur la qualité de l'eau.

Le choix d'un seuil de qualité à moyen-terme doit tenir compte de la situation initiale pour ne pas être irréaliste. Il nous semble donc qu'atteindre les seuils de potabilité (WHO, 2003) pour l'eau de Thiaroye n'est pas possible même si la possibilité de boire cette eau serait bénéficiaire pour les habitants de Pikine et de Guédiawaye.

Il semble plus raisonnable de s'attacher aux besoins des maraîchers. En effet, la ré-utilisation de l'eau pour l'agriculture implique des critères de qualité à respecter (FAO, 1994). Ceux-ci seront donc utilisés comme standards minimum dans ce rapport.

Le premier critère à respecter est une conductivité située au-dessous de 3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour éviter une salinisation des sols et une perte de productivité (FAO, 1994). Deux études situées dans une zone proche des forages (PDMAS, volet socio-économie et environnement, p.23 et Re, 2011) mesurent des conductivités hautes mais en-dessous de 3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Deux autres études (Finger, 2011 et M.Diedhiou, 2011) trouvent au contraire une eau trop saline pour être utilisée dans l'agriculture. De plus, une étude dans la zone de Mbeubeuss (Niang, 2011) à environ 10km des forages de Thiaroye mesure aussi des conductivités en-dessus de 3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Un autre critère de qualité important est la concentration de l'eau en métaux lourds. Le PDD (PDD, étude d'impact) mesure des concentrations inacceptables en métaux lourds (cadmium) dans les eaux de surface. Des mesures des eaux souterraines à proximité de la décharge de Mbeubeuss (Niang, 2011) montrent toutefois des concentrations en métaux lourds en-dessous des normes de la FAO (FAO, 1994).

En conclusion, l'utilisation de l'eau des forages de Thiaroye pour l'agriculture est soumise à de fortes restrictions. Du fait de l'urgence de la mise hors-eau de la région et du temps nécessaire à la mise en place d'un drainage ou d'un assainissement efficace, il est nécessaire de reprendre les forages. Cependant, la réutilisation à court terme de cette eau à des fins agricoles se trouve compromise par un manque d'assurances quant à sa qualité. Si l'eau de Thiaroye n'est pas utilisable pour l'irrigation, il faudra soit la rejeter à la mer, soit la mélanger à d'autres sources (urbaMonde, 2010), soit l'utiliser dans des applications industrielles. Ces trois cas entraînent une perte de ressource et des sur-coûts importants.

En annexe, on trouvera les mesures de qualité de l'eau utilisées dans cette courte analyse.

Seuil de demande minimum

Dans le projet de mobilisation des ressources en eau alternatives ou, dans une moindre mesure, dans le PDA ou le PROGEP, il est prévu de réutiliser l'eau de la nappe de Thiaroye pour l'agriculture ou pour des applications industrielles (tanneries, industries chimiques, activités de raffinages,... PDMAS, volet socio-économie et environnement).

Cette réutilisation est une source de revenu et permet une utilisation raisonnée des ressources en eau. Elle est cependant dépendante de l'évolution de la demande. Il existe donc un seuil de demande minimum pour la mise en place d'un système de distribution d'eau non-potable vers un client. Ce seuil est défini par la rentabilité du système.

La demande en eau pour l'irrigation dans la périphérie de Dakar est d'environ 30'000m³/j (PDMAS, volet socio-économie et environnement, p.14) en 2008 pour les régions de Sangalkam, Bargny, Rufisque et Thiaroye dont 16'000m³/j pourraient être couverts par la nappe de Thiaroye (PDMAS, APD, p.8). Ces régions sont toutefois proches de la périphérie de Dakar et peuvent s'urbaniser rapidement du fait de l'extension de la capitale (PDU, 2010, p.233). Une diminution de la demande est donc probable à moyen-terme.

Cependant, il est rentable de créer un système d'amenée d'eau pour l'irrigation même si la demande diminuerait à terme. En effet, prenons le projet du PDMAS comme exemple. Ce projet est devisé à 5 milliards de francs CFA (PDMAS, APD, p.20). Dans ce budget, environ 700 millions de francs sont à dépenser pour les pompes sur la nappe qui sont indépendants de l'état de l'agriculture. Il reste donc un investissement de 4.3 milliards de francs CFA. Dans la situation actuelle, la SONES subventionne chaque m³ d'eau pour l'irrigation à hauteur de 300 francs CFA (PDA, étude d'impact, p.31) et la demande en eau pompée de la nappe de Thiaroye est de 16'000m³/jour. Il faut donc $(4'300'000'000 / (300 * 16'000)) = 900$ jours au système pour être rentable si le gouvernement arrête complètement de subventionner l'eau destinée à l'irrigation. L'arrêt de l'agriculture à Sangalkam dans les deux ans et demi n'est pas probable et le risque financier est donc faible.

En outre, la demande en eau peut augmenter en réaction à la diminution du prix du m³ (de 113 francs CFA à 87 francs CFA sans subventions, PDMAS, schéma institutionnel, p.54) . Actuellement, la productivité de l'agriculture à Rufisque est en effet limitée par le manque d'eau qui est trop chère pour beaucoup de petits maraîchers (PDMAS, volet socio-économie et environnement, p.14).

De plus, ce coût ne tient pas compte des avantages du maintien et du développement de l'agriculture urbaine qui peut créer des emplois, dynamiser l'économie locale et sécuriser l'approvisionnement de Dakar en fruits et légumes (Smith, 2004).

Pour les applications industrielles, la demande est plus faible, aux alentours de 2100m³/j (PDMAS, volet socio-économie et environnement, p.27). Les industries demandeuses sont toutefois proche des forages et le coût de l'amenée d'eau est faible. Leur approvisionnement est donc rentable (PDMAS, volet socio-économie et environnement, p.27) et éviterait une utilisation inutile d'eau potable. De plus, les industries sont moins regardantes sur la qualité de l'eau et leur demande resterait constante durant l'année contrairement à la demande d'eau pour l'irrigation qui décroît fortement durant la saison des pluies (urbaMonde, 2010).

La demande en eau est ainsi un facteur limitant moins important que d'autres facteurs comme la qualité de l'eau. De plus, ce seuil de rentabilité ne remet pas en cause la nécessité de rabattre la nappe phréatique. En effet, les inondations ont un coût humain et économique (4.2 milliards de CFA dans la périphérie de Dakar pour la seule année de 2009, évaluation post-catastrophe, 2010, p.20) qui est nettement supérieur au coût de la gestion de la nappe en aval des problèmes d'inondation.

Evolution des rejets en eaux usées

La demande en eau va probablement augmenter dans la périphérie de Dakar. En effet, la population des villes de Pikine et Guédiawaye augmente (PDA, rap. 6, p.8). De plus, l'amélioration des conditions de vie de la région est liée à une augmentation de la demande en eau. Le PDA (PDA, rap.6, p.61) prévoit un accroissement de 20% de la demande actuelle pour 2025. Comme l'amélioration de l'assainissement est un projet au long-terme, il est probable que les rejets en eaux usées augmenteront à court-terme avant de diminuer grâce à la mise en place du réseau d'assainissement. Il sera donc nécessaire d'absorber cette augmentation dans le rabattement de

la nappe phréatique. Ce fait est une limitation importante pour les politiques de gestion de l'eau.

Limitations liées au réchauffement climatique

Le réchauffement climatique aura un impact important sur la nappe de Thiaroye et peut être un facteur limitant dans sa gestion. Toutefois, il existe peu d'études sur les changements probables de cette nappe dans le climat futur. Il est donc difficile de quantifier cet impact. L'augmentation du niveau de la mer, l'érosion des côtes et la diminution de la pluviométrie ont une influence directe sur la nappe qu'il devient urgent d'étudier d'une manière détaillée dans un modèle 3D.

Complexité de la situation institutionnelle

La gestion de la nappe de Thiaroye est confiée à un groupe complexe d'acteurs gouvernementaux. Par exemple, la SONES s'occupe des infrastructures, la SDE de distribuer l'eau, l'ADM a comme projet d'améliorer le drainage, l'assainissement est sous la responsabilité de l'ONAS, la DGPRE planifie la gestion de l'eau potable, etc. Cette multiplicité d'acteurs et leur manque de vision commune est un facteur limitant important du point de vue de l'auteur.

La société civile est aussi très présente sur le dossier du fait de l'importance sociale des inondations. Son apport est important mais il n'est pas toujours pris en compte.

La mise en place récente d'un cadre de concertation sur la gestion des inondations permettra possiblement d'améliorer la coordination entre ces différents acteurs. Cependant, il faudra probablement toujours tenir compte de l'éclatement des responsabilités dans la gestion de la nappe de Thiaroye.

Définition de la gestion intégrée

D'une manière très générale, on peut définir ainsi la gestion intégrée de l'eau :

La gestion intégrée des ressources en eau est un processus qui favorise le développement et la gestion coordonnés de l'eau, des terres et des ressources connexes, en vue de maximiser, de manière équitable, le bien-être économique et social en résultant, sans pour autant compromettre la pérennité d'écosystèmes vitaux (Partenariat mondial pour l'eau, 2000).

C'est donc une gestion qui met sur un pied d'égalité bien-être social, intérêt économique et protection des écosystèmes.

Pour appliquer une gestion intégrée à la nappe de Thiaroye, il faut la définir avec plus de précision. Ceci peut se faire uniquement avec l'accord des différents acteurs et cette consultation, en cours, peut faire changer la liste ci-dessous. D'une manière préliminaire, on peut toutefois définir les buts suivants pour une gestion intégrée de la nappe de Thiaroye :

- Niveau de la nappe stable et donc un risque faible d'inondation ou de sur-exploitation
- Limitation de la contamination de la nappe phréatique
- Utilisation et protection optimale de la ressource en eau
- Protection des écosystèmes, notamment des zones humides dépendantes de la nappe phréatique
- Vision partagée à long-terme par tous les acteurs
- Politique qui promeut la coordination entre les différents acteurs (civils ou gouvernementaux), les synergies et les compétences locales.

Avantages d'une gestion intégrée

Il est légitime de s'interroger sur la nécessité d'une gestion intégrée car sa mise en place demande des efforts de la part de tous les acteurs institutionnels. Il y a toutefois plusieurs points qui rendent ce type de gestion indispensable.

Premièrement, ainsi que l'a montré l'analyse des projets ci-dessus, une coordination et une gestion intégrée de la nappe phréatique fait apparaître des synergies importantes entre les projets de gestion des inondations. Souvent, la mise en place d'une vision générale transforme même les contradictions entre les projets en synergies positives. Par exemple, la mise en place non coordonnée du drainage, de l'assainissement et de la reprise des pompages crée un risque de sur-exploitation de la nappe. Au contraire, la mise en place coordonnée de ces projets permet un contrôle du niveau de la nappe à différents niveaux.

Deuxièmement, le risque d'inondation est une urgence sociale. Les actions contre ce risque doivent donc être rapides. Ces solutions doivent toutefois être soutenable à long-terme. Pour mettre en adéquation urgence et stabilité, une vision coordonnée et transversale est un avantage indéniable car elle permet d'accorder les projets d'action rapide et les améliorations à long-terme. Par exemple, une action rapide contre les inondations consiste à rejeter l'eau douce à la mer. Ceci est parfaitement valable à court-terme mais il faut en parallèle une vision

à long-terme de protection des ressources en eau pour éviter une perte trop importante en eau douce.

La gestion intégrée permet également de réagir efficacement face aux nouveaux événements, comme le réchauffement climatique. On passe ainsi d'une vision par projet, où la réussite est définie en fonction des objectifs particuliers du projet, à un objectif plus général de gestion de la nappe phréatique. Les actions qui se révèlent inadaptées peuvent donc être modifiées rapidement. Les responsabilités sont plus claires et on augmente les possibilités de gestion des échecs car plusieurs projets peuvent se compenser si besoin.

Pour finir, une gestion intégrée tient compte de la société civile et promeut les compétences locales. Elle crée donc des solutions viables à long-terme car ces solutions sont gérées localement et sont comprises et acceptées par la population.

Conclusion

La gestion intégrée de la nappe de Thiaroye permettrait une réduction du risque d'inondations, une protection à long-terme des ressources en eau et une meilleure prise en compte des besoins des différents acteurs. C'est donc une étape indispensable pour atteindre une gestion raisonnée de cette nappe phréatique.

De plus, le manque de coordination actuel entre les projets, l'inachèvement de synergies pourtant bien connues, par exemple sur la ré-utilisation de l'eau dans l'agriculture, et une certaine compétition entre les projets montrent que la gestion des inondations de la banlieue de Dakar serait plus efficace si une vision transversale du problème était présente.

CONCLUSION DE L'ÉTUDE

Dans ce dernier chapitre, nous reprenons rapidement les résultats essentiels de ce rapport centré sur la gestion de la nappe de Thiaroye. Ce résumé est organisé suivant les trois axes principaux de cette étude, c'est-à-dire une analyse des projets en cours, puis une analyse des modélisations existantes et enfin une analyse de la situation institutionnelle. Des propositions d'amélioration de la gestion actuelle sont aussi présentées ici.

Analyse des projets

Il y a trois projets de gestion des inondations actuellement en cours : la mise en place d'un réseau de drainage des eaux pluviales, la réalisation d'un système d'assainissement collectif et l'augmentation du débit des pompages de la nappe dans le but de réutiliser l'eau pour l'irrigation.

Ces trois projets sont nécessaires car :

- L'amélioration de l'assainissement est indispensable pour la qualité de vie des populations, la diminution de la recharge artificielle liée aux eaux usées et la réduction de la pollution, notamment celle dues aux nitrates
- La mise en place d'un réseau de drainage permettrait de gérer les fortes pluies de l'hivernage. Même si la remontée de la nappe phréatique est responsable de l'augmentation des inondations, les pluies sont aussi un danger du fait du manque d'exutoire vers la mer et de l'imperméabilisation des sols. Le réseau de drainage horizontale pourrait de plus rabattre la nappe.
- La reprise des pompages est une urgence puisque c'est le seul projet qui rabat la nappe rapidement. Les deux autres projets ne sont en effet pas réalisables rapidement. Ce projet permettrait également une réutilisation de l'eau et donc une gestion optimale des ressources.

Il y a toutefois des obstacles importants à la réalisation et à l'efficacité de ces projets :

- La mise en place d'un réseau collectif d'assainissement est très complexe dans une zone pauvre et densément urbanisée comme celle de Pikine. En outre, les derniers essais de mise en place d'un réseau d'assainissement collectif dans la banlieue de Dakar n'ont pas réellement été couronnés de succès (Norman, 2011).
- La réalisation d'un réseau de drainage primaire rabat la nappe uniquement dans les zones proches des points de drainage (PDD, rap.technique, Annexe 1). Des réseaux de drainage secondaire et tertiaire sont donc nécessaires pour obtenir un réel rabattement de la nappe. C'est donc un projet plutôt long à mettre en place ce qui n'est pas adapté à une réduction rapide des inondations. De plus, le risque d'obstruction des conduites à cause des déchets solides ou de branchements d'eau usée clandestins est important. La gestion des bassins de rétention et leur position risque aussi de poser problème. Pour finir, la protection des Niayes est aussi un point dont il faut tenir compte.

- La réutilisation de l'eau de Thiaroye dans l'agriculture est possible seulement si sa qualité est suffisante. Malheureusement, l'eau de la nappe de Thiaroye est de mauvaise qualité. Sa conductivité est notamment très haute (i.e elle est très saline). Il n'est donc pas assuré qu'on puisse l'utiliser pour irriguer. L'urbanisation fait aussi diminuer la demande en eau destinée à l'irrigation même si celle-ci devrait rester suffisante pour rentabiliser le système dans les prochaines années.

Si une coordination entre les projets existent, il y a peu de risque de sur-exploitation. Au contraire, la mise en place des trois projets permettrait, dans le futur, d'assurer un contrôle efficace du niveau de la nappe de la manière suivante :

Projet	Actions si le niveau de la nappe est trop haut	Actions si le niveau de la nappe est trop bas	Limitations des actions possibles
Reprise des pompages	Augmenter le débit des pompages	Diminuer le débit des pompages	Débit maximum des pompes, demande en eau
Assainissement	Diminution des rejets en eaux usées	Recharge artificielle de la nappe à partir des eaux usées traitées	Réalisation d'un réseau d'assainissement collectif, qualité de l'eau traitée
Drainage des eaux pluviales	Drainage horizontal	Infiltration de l'eau de pluie dans les bassins de rétentions	Hauteur du drainage horizontal, capacité d'infiltration des bassins

Ce tableau montre un scénario très en avance sur la situation actuelle mais qui prouve que la coordination entre ces trois projets permet une gestion optimale de la situation.

Dans tous les cas, l'amélioration de l'assainissement doit aller de paire avec une diminution des pompages (de 16'000m³/j à 4000m³/j) pour éviter le risque d'intrusion saline .

Un système de contrôle de la nappe qui suivrait son niveau et sa qualité régulièrement est aussi nécessaire. Partiellement mis en place par la DGPRE, ce contrôle devrait être régulier et les informations récoltées devrait être facilement accessible.

Un système d'alerte rapide en cas d'inondations est aussi nécessaire. Un index de risque à court-terme d'inondation pourrait être basé sur un suivi de la hauteur des bassins de rétention, de l'état du réseau de drainage (quand celui-ci sera en place), du niveau piézométrique de la nappe phréatique et des prédictions météorologiques. Le plan ORSEC ou la compagnie des sapeurs-pompiers pourrait gérer ce système et l'utiliser dans les opérations d'urgence.

Modélisation

En l'absence de modèles disponibles, nous avons fait une analyse critiques des modélisations existantes, c'est-à-dire celles faites dans le cadre du PDD (PDD, rap.technique, Annexe 1, 2011), de la reprise des forages (PDMAS, rapport A/B/C, 2003) ainsi que de trois modélisations tirées de la recherche (Comte, 2008; Ouedraogo, 2010; Faye, 2001).

Entre ces modélisations, la modélisation la plus intéressante est celle du PDD(PDD, rap.technique, Annexe 1, 2011) . L'impact croisé des trois projets y est examiné et il y a une estimation des zones

inondables pour chaque cas (réalisation du drainage seul, du drainage et de la reprise des forages, du drainage et de l'assainissement collectif et des trois projets).

Il y a toutefois un problème important avec cette modélisation : la recharge naturelle (liée à la pluie, sans tenir compte des eaux usées) est beaucoup trop haute. La valeur choisie est de 400mm/an au lieu de 30-200mm/an⁶. Il y a donc quatre fois trop d'eau dans le système, la nappe est noyée et la modélisation faussée.

Le choix de la recharge se défend dans une modélisation qui a pour but de vérifier la faisabilité d'un système de drainage des eaux pluviales. Cependant, ce choix rend la définition des zones inondables très incertaines.

Une autre incertitude importante est la part des eaux usées qui s'infiltrent dans la nappe. En effet, on peut déterminer relativement facilement le total des eaux utilisées. Pourtant, une partie seulement s'infiltrer dans la nappe. Comme les eaux usées sont principalement relâchées dans le sol, la part qui s'infiltrer est très importante. Les estimations sont donc entre 0.75 et 0.95 du volume d'eau utilisé. Pourtant, les volumes d'eau usée sont si importants actuellement (env. 55'000m³/j) que le choix du coefficient, entre 0.75 et 0.95, implique une grande incertitude sur la recharge totale (11'000m³/j à comparer avec le pompage proposé de 16'000m³/j). Ce point n'est actuellement pas étudié et mériterait plus d'attention.

Plusieurs modélisations seraient réalisables dans une étude ultérieure. Premièrement, une modélisation similaire à celle faite dans la cadre du PROGEP mais avec une recharge naturelle plus basse serait nécessaire pour déterminer avec précision les zones inondables. Deuxièmement, les incertitudes sur ces zones inondables devraient être estimées avec plus de précision, par exemple en utilisant plusieurs modèles en parallèle ou en réalisant des analyses de sensibilité sur les paramètres mal connus comme la recharge ou la perméabilité. En outre, les échanges entre la nappe infra-basaltique, située au bout de la presqu'île du Cap-Vert, et la nappe de Thiaroye pourraient aussi être étudiés afin de mieux connaître les risques de contamination de la nappe infra-basaltique. Pour finir, les effets du réchauffement climatique sur la nappe de Thiaroye seraient aussi un sujet d'étude passionnant.

Situation institutionnelle

Nous avons conduits des interviews avec la plupart des services techniques sénégalais et des instituts de recherche. Nous les avons interrogés au sujet de leur point de vue sur la gestion de la nappe phréatique et sur le schéma institutionnel en place.

En général, ils se plaignent du manque de coordination dans la gestion de la nappe de Thiaroye (sauf le plan Jaxaay qui se sent responsable de la totalité de la gestion de la nappe). Ils ne citent toutefois pas le cadre de concertation comme une façon de régler ce problème même s'ils ont participé au séminaire de novembre 2011 sur la gestion des inondations.

Pour améliorer la coordination, la DGPRE propose la création d'une convention locale de gestion des ressources naturelles (Gravier, 2006). Ce texte est un texte proche d'un contrat de nappe. Il définit les buts et les moyens pour atteindre une gestion intégrée. Il est écrit en coordination avec les acteurs concernés. C'est un outil connu au Sénégal mais, à notre connaissance, surtout en milieu rural (par exemple pour la gestion d'une forêt ou d'un puits).

⁶ Il existe une incertitude importante sur l'estimation de la recharge naturelle qui n'est pas égale à la pluie du fait de l'évaporation.

Au niveau de la reprise des forages, la SONES et le PDMAS ne s'accordent pas sur qui est responsable de la recherche de financement. Il y a donc un risque d'enlisement. Le cadre de concertation serait là très utile pour dynamiser la recherche de fond.

Sinon, le pompage de la nappe serait peut-être plus rapidement mis en place si la demande en eau serait plus clairement définie. Il faudrait donc vendre activement l'eau de Thiaroye et pas attendre que les industries ou les paysans, par exemple, en fasse la demande. Avoir des acheteurs permettrait de motiver les bailleurs de fonds.

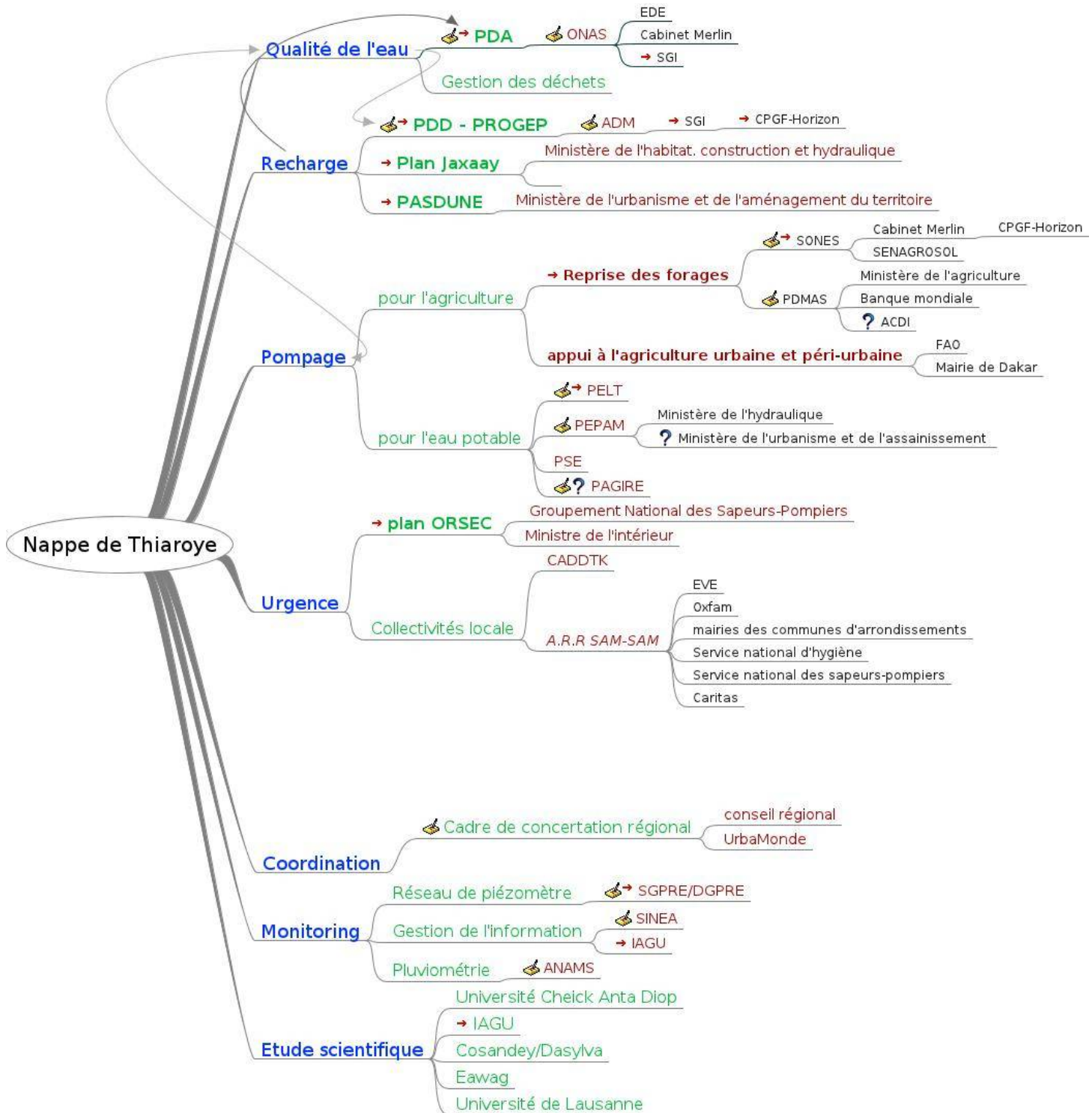
Dans un autre domaine, les eaux pluviales en banlieue sont traditionnellement de la responsabilité de l'ONAS . Ces eaux sont maintenant gérée par l'ADM. Il y a là une sorte de conflit de responsabilité.

Conclusion

La nappe de Thiaroye est un système hydrologique fortement soumis à l'influence humaine. Une gestion intégrée de ce système permettrait de faire ressortir les potentialités importantes de cette nappe phréatique, notamment en terme d'approvisionnement en eau. Le manque de planification urbaine et de gestion de l'eau en font toutefois un éco-système qui menace sérieusement les habitants de la banlieue de Dakar. L'amélioration de la gestion de la nappe de Thiaroye est donc une priorité pour améliorer les conditions de vie des 1.8 millions d'habitants des villes de Pikine et de Guédiawaye.

ANNEXE 1 : ANALYSE DES PROJETS

Les pages suivantes présentent un résumé des projets en cours. La figure ci-dessous résume la situation institutionnelle.



PDA

Acronyme	PDA
Nom	Plan Directeur d'Assainissement de Dakar 2025
Description	Le but de ce projet est d'améliorer l'assainissement à Dakar et dans sa périphérie dans la période 2010-2025.
Degré d'avancement	Une analyse détaillée de la situation a été effectuée par SGI consulting, le cabinet Merlin et EDE en 2010. Pour l'instant, il n'y a pas de propositions concrètes sur les actions à entreprendre.
Impact sur la nappe	<p>Le but de ce projet est d'améliorer l'assainissement à Dakar et dans la périphérie dans la période 2010-2025. En effet, la zone de Thiaroye n'est majoritairement pas connectée à un système d'évacuation des eaux usées qui se déversent donc dans la nappe. Cette recharge additionnelle augmente fortement le risque d'inondation. La création d'un réseau d'égout est donc une priorité pour lutter contre les inondations. (PDA, rap.1-6).</p> <p>L'amélioration de l'assainissement a aussi un impact sur la qualité de l'eau, notamment sur la pollution liée aux nitrates.</p>
Scénarios	Comme les projets d'assainissement dans la zone ne sont pas connus, il est difficile de faire une estimation du nombre de connexions dans la zone. A l'horizon 2020, il est probable que ce pourcentage aura peu augmenté car la zone est difficile d'accès. A l'horizon 2050, on pourrait s'attendre à une amélioration importante.
Organisme responsable	ONAS (Office National de l'Assainissement du Sénégal)
Référence	Cabinet SGI-Merlin, Étude d'actualisation du plan directeur d'assainissement liquide de Dakar 2025 (PDA), rapport 1 - 6, 2010

PROGEP

Acronyme	PROGEP
Nom	Programme de Gestion des Eaux Pluviale dans la Zone Périurbaine de Dakar
Description	Le but de ce projet est d'améliorer le drainage dans la zone de Pikine. Il est prévu de connecter les bassins de rétention avec la mer (et d'ainsi pouvoir réellement utiliser leur capacité de rétention). Un drainage horizontal est aussi prévu qui permettrait de rabattre la nappe en plus de drainer la pluie.
Degré d'avancement	Fin de l'étude préliminaire par SGI consulting.
Impact sur la nappe	Le principe directeur de ce projet est de créer un réseau de drainage gravitaire dans la périphérie de Dakar. Ce projet prévoit aussi de connecter plusieurs bassins de rétention avec la mer pour évacuer les eaux pluviales des zones basses. De plus, la nappe sera maintenue à un niveau maximum à l'aide d'un système de drainage horizontal.
Organisme responsable	Étude commandée par l'ADM (Agence de Développement Municipal)
Références	<p>Cabinet SGI, Merlin, EDE : Étude du plan directeur de drainage des eaux pluviales de la région périurbaine de Dakar, vol.1 : Rapport, 2011</p> <p>Cabinet SGI, Merlin, EDE , Etude du plan directeur de drainage des eaux pluviales de la région périurbaine de Dakar, Hypothèses et données de bases + Annexe 1 : Etude hydrogéologique et modélisation de la nappe de Thiaroye, 2011</p> <p>Mbaye Mbengue Faye, Projet de gestion des eaux fluviales (PROGEP) : Étude d'impact environnementale et sociale, 2011</p> <p>Mbaye Mbengue Faye, Cadre de gestion environnementale et sociale, 2011</p>

Mobilisation de ressources en eau alternatives pour l'irrigation dans la région de Dakar

Acronyme	Mobilisation de ressources en eau alternatives pour l'irrigation dans la région de Dakar (PDMAS)
Nom	Mobilisation de ressources en eau alternatives pour l'irrigation dans la région de Dakar (Programme de Développement des Marchés Agricoles)
Description	La concentration en nitrate de l'eau de la nappe de Thiaroye fait que celle-ci ne peut pas être utilisée comme eau potable. Ce projet propose donc de l'utiliser pour l'irrigation et de la pomper en direction des maraîchers de Sangalkam (env. 15km à l'est de Thiaroye). La construction d'une conduite entre Thiaroye et Sangalkam serait nécessaire, mais il est possible de ré-utiliser les forages d'eau potable. Le pompage induit un rabattement rapide de la nappe et donc une diminution du risque d'inondation. (Étude d'impact, PDMAS).
Degré d'avancement	Des études détaillées ont été produites par le cabinet Merlin/SENAGROSOL en 2008 . Ces études concluent à un impact positif du projet et à un coût raisonnable (5 milliards de CFA, PDMAS, étude d'impact). Le projet a été approuvé par le président du Sénégal Me Abdoulaye Wade et par le conseil des ministres. Les forages de Beer Thialane sont en cours de construction ainsi que les conduites d'amenée d'eau pour ce forage. Toutefois, les pompage et la construction de conduite entre Thiaroye et Sangalkam n'ont pas débuté. La recherche des fonds est cours mais le projet semble bloqué au niveau institutionnel.
Impact sur la nappe	Ce projet prévoit un pompage de la nappe de 16'000m ³ /jour (PDMAS, rapport APD) qui serait suivi d'une baisse de niveau de la nappe. La réaction de la nappe est rapide et le rabattement, situé entre 0.5 et 3m (PDMAS, rapport B/C), devrait être effectif dans l'année.
Scénario	On estime que le projet va se mettre en place rapidement et donc que le pompage sera effectif vers 2015. A l'horizon 2050, on estime toutefois que son importance va diminuer du fait de l'amélioration de l'assainissement et du drainage.
Organisme resp.	PDMAS/SONES
Référence	Cabinet Merlin-Senagrosol, Étude d'impact pour la mobilisation de ressources en eau alternatives dans la région de Dakar, 2008 Cabinet Merlin – Senagrosol, Rapport APD pour la mobilisation de ressources en eau alternatives dans la région de Dakar, 2008 Antea-SENAGROSOL, modélisation de la nappe scénarios d'arrêt Phases A,B et C, 2004

Plan Jaxaay

Acronyme	Plan Jaxaay
Nom	Plan Jaxaay
Description	Le plan Jaxaay est un plan d'urgence créé suite aux inondations de 2005. Le principe du plan Jaxaay est en effet d'évacuer définitivement les habitants vivant dans les zones inondées et de les reloger à la périphérie de Dakar. Dans les zones évacuées, des bassins de rétention/infiltration sont construits. L'eau de ces bassins est pompée avant et durant l'hivernage vers la mer pour augmenter leur faible capacité de rétention. Le plan Jaxaay contient aussi un volet amélioration du drainage (plan Jaxaay,2010).
Degré d'avancement	Plusieurs bassins ont été construits depuis 2005. La construction de ces bassins a impliqué l'expropriation de 1865 familles en 2005. Un travail de drainage et de pompage a aussi été effectué.
Impact sur la nappe	L'impact sur la nappe est faible. En effet, les bassins de rétentions sont construits aux points les plus bas, ceux où la nappe est affleurante. Ils sont donc remplis en permanence par l'eau provenant de la nappe et n'ont qu'une faible capacité de rétention (urbaMonde, 2009). L'impact du plan Jaxaay sur la nappe est donc un changement dans le régime d'infiltration. Le pompage des bassins de rétention vers la mer implique une diminution de la recharge entre 1.5 et 3 millions de m ³ par hivernage (Sidi Baye, communication personnelle, 2012). D'un point de vue social, le plan Jaxaay a eu un impact important sur la population. Les expropriations ont été perçues négativement par les habitants. La création de bassins de rétention a aussi créé un sentiment d'insécurité à cause du risque de noyade et d'agression. De plus, l'eau stagnante attire les moustiques vecteurs de paludisme (Urbamonde,2009).
Scénarios	Sur le long terme, on suppose que l'importance du plan Jaxaay va décroître et qu'il va être remplacé par des projets plus adaptés aux conditions sociales et hydrologiques de la zone. On estime donc son impact sur la nappe nul à l'horizon 2020-2050.
Organisme responsable	Ministère de l'habitat, de la construction et de l'hydraulique
Référence	Urbaniste sans frontières/ urbaMonde, Mitigation des inondations de Thiaroye – dossier diagnostic, 2009 Rapport d'activité – plan Jaxaay, Ministère de l'habitat, construction et de l'hydraulique, 2010

PASDUNE

Acronyme	PASDUNE
Nom	Programme d'Action pour la Sauvegarde et le Développement Urbain des Niayes et Zones Vertes de Dakar
Description	Le PASDUNE a été créé en 2002 par l'État du Sénégal. Il vise à contribuer à une bonne utilisation du sol et de l'espace des Niayes dans une perspective de développement durable.
Degré d'avancement	Ce projet a été aménagé, dans le cadre d'un projet pilote, le grand lac de Hann Mariste. On a, entre autres, relevé les berges du lac et planté des arbres pour stabiliser les berges. Un travail pour améliorer les alentours du lac a aussi été fourni.
Impact sur la nappe	Ce projet n'a actuellement pas un impact très important sur le niveau de la nappe. A plus long terme, le PASDUNE pourra avoir un impact important sur le régime d'infiltration de la nappe. La gestion des espaces verts dans les dépressions peut aussi éviter une urbanisation dans les zones inondables. De plus, la plantation d'arbres peut induire une baisse du niveau de la nappe.
Scénario	On va négliger l'impact de ce projet au niveau de notre estimation de la recharge.
Organisme responsable	Ministère de l'urbanisme et de l'aménagement du territoire
Référence	Actes du séminaire, version préliminaire, 2011

Plan ORSEC

Acronyme	Plan ORSEC
Nom	Organisation de réponse et de sécurité civile
Description	<p>C'est le plan d'urgence du gouvernement sénégalais. Il est déclenché en cas d'inondations ou d'autres catastrophes. Il vise à protéger les populations, les biens et l'environnement.</p> <p>Un volet d'alerte précoce des risques majeurs est aussi prévu.</p>
Degré d'avancement	Ce plan est opérationnel et a été déclenché durant les inondations de 2009.
Impact sur la nappe	Ce plan vise à réagir aux situations d'urgence. Il n'a donc pas d'impact sur le niveau de la nappe au long terme. Toutefois, il pourrait prendre part à un système d'alerte précoce en cas d'inondations.
Organisme responsable	Le ministère de l'intérieur, de la gouvernance et de la préfecture
Référence	Actes du séminaire, version préliminaire, 2011

PSE/PELT/PEPAM

Acronyme	PELT, PEPAM, PSE
Nom	Projet Eau Long Terme, Plan Eau Potable et Assainissement du Millénaire et Projet Sectoriel Eau
Description	<p>Ces trois programmes sont des programmes du gouvernement sénégalais, financés par des organismes supra-national comme la banque mondiale. Ils visent à améliorer l'accès à l'eau potable et à l'assainissement ainsi qu'à gérer d'une manière durable les ressources en eau.</p> <p>Plus précisément, l'objectif du PSE était de résoudre le déficit hydrique de Dakar qui était de 40'000m³ en 1996. Ce projet s'est terminé en 2004.</p> <p>C'est aussi dans le cadre de ce projet que le raccordement d'eau potable entre Dakar et le lac de Guiers a été effectué.</p> <p>Le PELT a comme but de répondre aux besoins en eau de Dakar et du Sénégal pour l'horizon 2015.</p>
Degré d'avancement	Le PSE est terminé et le PELT est en cours de réalisation concrète.
Impact sur la nappe	<p>La nappe de Thiaroye a été pompée pour l'eau potable depuis 1950. Le pompage s'est stabilisé aux alentours de 10'000m³/j dans les années 1960-1980 (PDA, rap.6,p30) .</p> <p>Toutefois, le pompage a diminué depuis les années 1980 à cause du taux de nitrate trop important. Ce pompage était de 4000m³/j en 2000-2004 (PDA, rap.6,p30). L'eau ainsi pompée est mélangée à de l'eau potable moins polluée. Ce mélange diminue toutefois la qualité de l'eau potable (urbaMonde, 2009).</p> <p>Actuellement, le pompage est trop faible pour éviter une remontée de la nappe et augmente les risques d'inondations (PDMAS, rap.B/C).</p>
Scénarios	On estime que le pompage pour l'eau potable va diminuer et s'arrêter à l'horizon 2020.
Organisme responsable	SONES (Société Nationale des Eaux du Sénégal)
Référence	<p>World Bank, Long-Term Water Sector Project : implementation completion and result report, 2009</p> <p>World Bank, Water Sector Project : implementation completion report, 2004</p> <p>Actes du séminaire, version préliminaire, 2011</p>

Promotion de l'utilisation d'une eau de qualité en appui à l'agriculture urbaine et péri-urbaine.

Acronyme	Agriculture urbaine - FAO
Nom	Promotion de l'utilisation d'une eau de qualité en appui à l'agriculture urbaine et péri-urbaine.
Description	Le but de ce projet est de soutenir l'agriculture urbaine et d'améliorer l'irrigation en milieu urbain. Une des idées directrices est d'utiliser l'eau traitée par la station d'épuration de Cambérène pour l'irrigation.
Degré d'avancement	Des formations et des ateliers participatifs ont été organisés avec la population de Dakar.
Impact sur la nappe	L'impact sur la nappe serait faible si les champs concernés par l'agriculture urbaine trouvent dans la région de Thiaroye. En effet, l'eau pompée se retrouverait tout simplement dans la nappe. Ce projet pourrait toutefois contribuer à un rabattement de la nappe si les cultures étaient situées en dehors de la zone contribuant à la recharge de la nappe.
Scénario	L'eau de la nappe de Thiaroye ou les eaux traitées dans la région de Pikine pourraient être utilisées pour l'agriculture urbaine de la région de Dakar.
Organisme responsable	FAO (Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture)
Référence	Flyer présentant le projet (version papier uniquement)

ANNEXE 2 : HISTORIQUE DE LA NAPPE DE THIAROYE

La nappe phréatique de Thiaroye est naturellement proche de la surface. En effet, cette région est située dans un ancien réseau dunaire formé de collines et de dépressions sans lien direct avec la mer. Sans intervention humaine, la nappe forme des lacs dans ces dépressions.

En 1950, la ville de Dakar a commencé à pomper cette nappe pour l'eau potable avec un débit moyen de 17'000m³/j. Ceci a induit un abaissement de la nappe. Comme cette nappe est en contact avec la mer, cette baisse de niveau a créé un risque d'intrusion d'eau de mer dans l'eau non-salée de la nappe. Comme ce risque devenait majeur, l'exploitation de la nappe a été stoppée entre 1959-1961 (PDA, rap.6, p.28).

En 1961, le pompage reprend. Il est toutefois réduit à environ 10'000m³/j pour protéger la nappe des intrusions d'eau salée (PDA, rap.6, p.29). Ce pompage durera jusqu'en 1988. Il s'ajoute à une baisse des précipitations depuis la fin des années 1960 (ANAMS, PDA, rap.6, p.30). Il aura donc comme conséquence de baisser le niveau de la nappe ainsi que d'assécher des terrains naturellement inondés.

Dans les années 1970, Dakar a été soumis à un important exode rural partiellement dû à la sécheresse et à une urbanisation importante due à son nouveau statut de capitale (B.D.Boro, -). Les terrains asséchés par la baisse de la nappe ont donc été très rapidement utilisés pour construire des nouvelles habitations. Ce secteur correspond à la ville de Pikine où environ 900'000 personnes vivent actuellement.

Dans ces quartiers, en partie irréguliers, l'assainissement était et reste peu étendu et peu efficace. Les latrines sont principalement reliées à des fosses septiques qui ne sont pas adaptées à la situation hydrologique. En effet, les eaux usées des fosses septiques se déversent directement dans la nappe qui se trouve proche de la surface même quand la nappe est pompée. L'urbanisation de la zone a donc coïncidé avec une augmentation importante du taux de nitrate dans l'eau. Dans les puits de Thiaroye, par exemple, la concentration de nitrate est passée de 5-40 mg/l en 1970 à 400-450 mg/l en 1997 (Re, 2010).

La limite admissible pour l'eau potable étant de 50mg/l (WHO, 2003), l'eau de la nappe de Thiaroye est devenue impropre à la consommation si on ne la dilue pas. Ceci a induit une baisse des pompages de la nappe (environ 5000m³/j entre 2001 et 2004 (PDA, rap.6, p.30)).

En parallèle, la ville de Dakar a commencé à importer de l'eau du lac de Guiers pour satisfaire ses besoins en eau potable (Pigeon, 1999). Une partie de cette eau est utilisée à Pikine et se rajoute à la recharge naturelle de cette nappe. De plus, les pluies ont été relativement importantes (mais pas exceptionnelles) à la fin des années 2000, notamment en 2005 et 2009.

Ces trois facteurs (baisse des pompages, augmentation de la recharge et de la précipitation) ont fait remonter le niveau de la nappe d'environ 15 cm par année (urbaMonde, 2009). Cette remontée de la nappe est une catastrophe pour les habitants de la région de Pikine car elle induit un risque élevé d'inondation. Le manque de drainage et la topographie de la région en forme de cuvette aggravent le problème. De plus, la proximité de la nappe réduit fortement l'efficacité des fosses septiques qui refoulent très régulièrement.

En 2005, des pluies importantes, mais pas exceptionnelles, ont induit de sérieuses inondations dans la région. Le gouvernement du Sénégal a réagi en créant le plan Jaxaay. Le principe de ce plan d'urgence est d'exproprier les habitants vivant dans les zones inondées et

de les reloger à la périphérie de Dakar. Dans les zones évacuées, des bassins de rétention/infiltration ont été construits. Cependant, comme ces bassins sont construits directement dans la nappe affleurante, ils ont seulement une faible capacité de rétention. Ainsi, l'eau de ces bassins est pompée avant et durant l'hivernage pour augmenter les possibilités de rétention. Cette capacité n'est toutefois pas suffisante comme l'ont montré les inondations de 2009.

ANNEXE 3 : ANALYSE DE QUALITÉ DES EAUX DE LA NAPPE

La réutilisation de l'eau de la nappe de Thiaroye pour l'irrigation pourrait présenter un risque de salinisation des sols. Le tableau ci-dessous résume les mesures de qualité de l'eau dans la littérature, liées à ce risque.

paramètres	limite admissible (modérée-sevère)		
conductivité	700-3000	uS/cm	source limite http://www.fao.org/DOCREP/003/T0234E/T
SAR	3 to 9	-	
infiltration	Higher than 700-200	uS/cm	si SAR <3
Cl	4 – 10	me/l	
B	0.7 to 3	mg/l	
Ph	6.5 -8.4		

puits	emplacement	conductivité [uS/cm]	SAR	B [mg/l]	Cl [mg/l]	Ph	
P2-2	Pikine	1780	5.4409055	0.03		382	6.9
P2-3	Pikine (golf)	890	2.66926547	0.04		121	7.9
P3-2	Camp militaire	260	1.01151129	0.02		31	5.5
P19	14° 47'11.5"; 17° 21'41.3"	740	1.60081535	0.04		180	6.8
P2-5	Corniche Guediawaye	1465	2.12062081			169	7.4
P1	Technopole	1772	2.38467907			286	6.9
P4	Pikine	2850	4.35214816			478	6
P3-2	Camp militaire Thiaroye	1797	1.43781346			346	3.9
F17	Marché Thiaroye	1684	1.68998949			267	4.9
F19	Thiaroye	2100	1.77224858			188	4.8
F21	Thiaroye	2160	6.75241042			137	4.7
F22	Thiaroye	1950	6.07971886			155	5.1
average	suburb		3.27952533			182	
Pompe Nietty Mbar	eau pompée	1850					
Pompe Nietty Mbar	eau pompée	2390	2.43608652			146.56	Env.7
Pompe Nietty Mbar	eau pompée	3020	2.75723463			148	Env.7
Pompe Bagdad		4280	4.02464932			212.94	Env.7
Pompe Bagdad		1840					
Pompe Bagdad		1900					
Pompe Bagdad		2880					
Pompe Bagdad		3330					
Pompe Bagdad		2770					
Pompe Bagdad		3020					
Pompe Bagdad		3630					
Pompe Bagdad		2680					
Pompe Bagdad		2810					
Pompe Bagdad		2080					
Pompe Bagdad		3030					
forage Thiaroye		1500				150.5	5.1
MB3 SS	Matal Yendou	1795	3.4			370.3	7.6
MB4 SS	Mbeubess ouest	2640	2.4			340.5	6.6
MB5 SS		1929	2.8			314.1	6.1
MB6 SS		652	2.8			121.5	7.1
MB15 SS		3720	8.2			962.3	6.9
MB28 SS	Matal Yendu	1898	3.7			346.4	7.1
MB29 SS	Dialloba	2870	6.1			687.2	7.2
MB35 SS	Mbeubeuss flanc sud-est	1892	4.1			417.4	6.6
MB3 SH	Matal Yendou	2595	3.3			548.3	6.8
MB4 SH	Mbeubess ouest	2625	1.8			300.1	7.8
MB5 SH		1928	1.8			338	7.7

Les premières mesures jusqu'à P19 sont de Re, 2010. Les mesures jusqu'à F22 sont de Diedhiou, 2011. La moyenne des mesures en périphérie est de Faye, 2004 et la suite est tirée de Finger, 2011. La moyenne des forages de Thiaroye provient du PDMAS, volet socio-économique et environnement. Toutes les données commençant par MB (pour Mbeubeuss) sont de Niang, 2011

ANNEXE 4 : SYNTHÈSE DES SYNERGIES ET CONTRADICTION ENTRE LES PROJETS

	PROGEP (drainage)	Reprise des forages	PDA (assainissement)
PROGEP drainage		<ol style="list-style-type: none"> 1.Utiliser les forages pour contrôler le niveau de la nappe ou si le drainage ne fonctionne pas. 2.La reprise rapide des forages permet une mise en place du drainage plus progressive 3. Moins d'eau pendant la construction des conduites 	<ol style="list-style-type: none"> 1.Mettre en place l'assainissement diminue le taux d'eaux usées dans les eaux pluviales 2. Passer les "eaux pluviales" de la saison sèche par les stations d'épurations
Reprise des forages	<ol style="list-style-type: none"> 1.Mettre en place en priorité le drainage dans les communes près de la côte qui ne peuvent pas bénéficier de la reprise des forages 2.Le drainage horizontal abaisse la nappe parallèlement aux forages. Le niveau est suffisant pour être drainé et pompé. 3. Utiliser le drainage durant l'hivernage quand la demande en eau est faible. 	<p>COMMUN A TOUS LES PROJETS:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1.Réduction des inondations 2. Partage des informations et des mesures liées à la nappe 3. "Rattraper" un projet qui ne marche pas 4. Adapter les actions en fonction de la situation et pas des buts d'un projet 6.Intégration des compétences locales et société civile 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Utiliser l'eau traitée à des fins d'irrigation quand le niveau de la nappe sera abaissé du fait de l'amélioration de l'assainissement 2.Les fosses septiques fonctionnent mieux si la nappe est plus basse. 3.Utilisation des forages pour traitement de l'eau de la nappe en profondeur 4.Recharge artificielle de la nappe
PDA (assainissement)	<ol style="list-style-type: none"> 1.Les fosses septiques fonctionnent mieux si la nappe est plus basse. 	<ol style="list-style-type: none"> 1.L'irrigation motive à protéger la qualité de l'eau et donc à améliorer l'assainissement. 2.La reprise rapide des forages permet une mise en place de l'assainissement plus progressive. 3.Moins d'arrivée d'eau durant la mise en place. 	

Synthèse des synergies entre les projets

	Plan Jaxaay	Protection des Niayes (PASDUNE)	Gestion des déchets	Eau potable	PDMAS Soutien à l'agriculture urbaine et péri-urbaine
PROGEP (drainage)	Réutilisation des bassins de rétention	Le drainage de l'eau de pluie dans les Niayes est lié à un projet d'amélioration de ces espaces	Une meilleure gestion des déchets décroît le risque d'obstructions des canaux		
Reprise des forages	Moins de pompage et moins de gens à déplacer si la nappe est plus basse	La plantation d'arbre rabat la nappe par évapotranspiration			Amélioration de l'agriculture
PDA (assainissement)		Réduction des risques d'eutrophisation des Niayes	Amélioration de l'hygiène	Réduction des risque de contamination	Réutilisation des eaux usées pour l'irrigation

Contradiction entre les projets

Contradiction	Solutions possibles
Rabatement exagéré de la nappe si l'assainissement et le pompage sont en place parallèlement.	Contrôle du niveau de la nappe centralisée (PDGRE) Utilisation de l'eau traitée pour l'irrigation si la demande de l'agriculture reste forte (ONAS)
Mise en place du drainage avant l'assainissement (branchement clandestin)	Coordonner la mise en place du PROGEP et du PDA (ONAS/ADM)
Mise en place du drainage avant la gestion des déchets (risque d'obstruction des conduites et eaux polluées)	Améliorer la gestion des déchets si possible Curer les canaux régulièrement
Risque de pollution des Niayes par les eaux pluviales	Qualité des eaux drainées à contrôler A balancer avec l'amélioration des bords des Niayes prévue dans le PROGEP (PASDUNE/ADM)
Perte de ressource en eau d'irrigation due au drainage et à l'assainissement	Réutilisation de l'eau traitée ou drainée si la qualité est suffisante (ONAS/PROGEP)
La qualité de l'eau destinée à l'irrigation n'est pas forcément suffisante	Mélange de différentes sources d'eau , utilisation de l'eau pour l'industrie Amélioration la qualité de l'assainissement et la gestion des déchets
Projet de dépollution de la Baie de Hann (Hann, 2007) et rejet d'eaux pluviales	Le PROGEP doit respecter les critères de rejet en mer quitte à dériver l'eau drainée en saison sèche par une station d'épuration
Diminution de la demande en eau d'irrigation si Sangalkam s'urbanise (PDU de Dakar)	Importance du soutien à l'agriculture (PDMAS) Rentabilisation de la conduite rapide (SONES) Remise en cause du plan directeur d'urbanisme

ANNEXE 5 : POSITION DES FORAGES

La carte suivante donne la position des forages de la nappe de Thiaroye. Les forages représentés par des points rouges sont les forages existants, initialement connectés au réseau d'eau potable. Ces forages pourront être utilisés dans le futur pour pomper l'eau destinée à l'irrigation. Les forages dessinés en noir sont des forages supplémentaires destinés à l'irrigation.

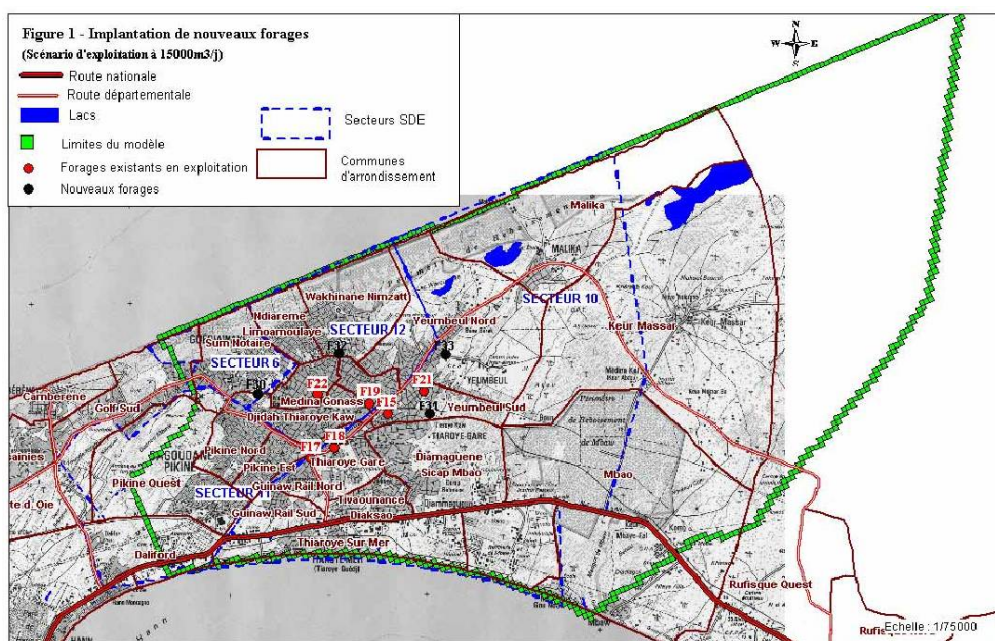


Figure 34 : position des forages (tiré de PDMAS, rapport B/C, p.8)

ANNEXE 6 : CARTE PIÉZOMÉTRIQUE

La carte ci-dessous donne la hauteur piézométrique de la nappe de Thiaroye et de la région de Beer Thialane en juillet 1997.

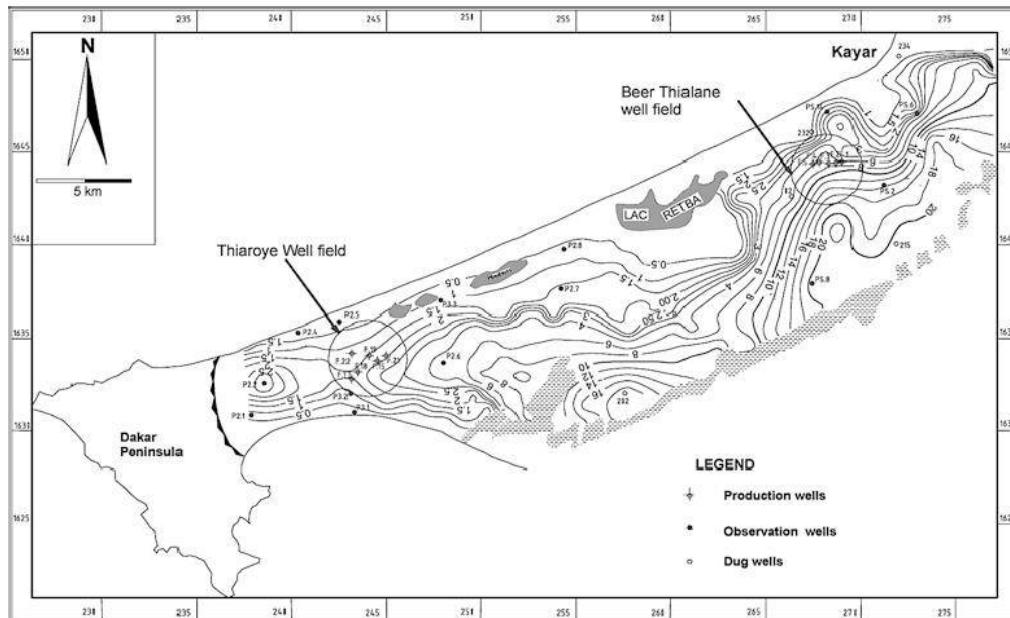


Figure 35: Hauteur piézométrique de la nappe de Thiaroye et de Beer Thialane (tiré de Faye, 2004)

RÉFÉRENCES :

- Albrecht, 1951 F.Albrecht, Monatskarte des Niederschlages im Indischen und Stillen Ocean – Monatskarte der Verdunstung und des Wasserhaushaltes des Indischen und Stillen Ocean – Ber. Des dt. Wetterdienst in der US-Zone, BD.4, p.20-39, 1951 – référence non consultée
- Boro,- B.D. Boro, Dakar : capitale du Sénégal, Centre de ressource documentaire, Aide et Action
- BRE digest, 1993 Building Research Establishment (BRE), Low-rise buildings on shrinkable clay soils : Part 1, BRE digest 240, 1993
- Comte, 2008 J.C Comte, Apport de la tomographie électrique à la modélisation des écoulements densitaires dans les aquifères côtières, Thèse de l'université d'Avignon et d'Hydriad, 2008
- Dasylya, - S. Dasylya, C.Cosandey, Éléments d'évaluation et d'action de gouvernance durable de l'eau de pluie en milieu urbanisé au Sahel pour la biodiversité et la sécurité alimentaire. Retour d'expérience d'une étude dans les « niayes » de la région de Dakar, année inconnue (2009?)
- Dasylya, 2004 S. Dasylya, C. Cosandey, D. Orange, and S. Sambou. Rainwater infiltration rate and groundwater sustainable management in the Dakar region, Agricultural Engineering International: the CIGR Journal of Scientific Research and Development, vol. 6, 2004
- Dasylya, 2005 D.Dasylya et C.Cosandey, L'exploitation de la Nappe des Sables Quaternaires pour l'alimentation en eau potable de Dakar : une offre compromise par l'insuffisance de la recharge pluviométrique, Géocarrefour, vol.80, 2005
- Diédhiou, 2011 M.Diédhiou, S.Cissé Faye et al., Tracing groundwater nitrate sources in the Dakar suburban area: an isotopic multi-tracer approach, Hydrological Processes, 2011
- Enquête concession, 2011 urbaMonde, Collectif des association de Djiddah Thiaroye Kao, Enquête concession, 2011
- Evaluation catastrophe, 2010 post- République du Sénégal, rapport d'évaluation des besoins post-catastrophes : Inondations urbaines à Dakar en 2009, 2010
- FAO, 1994 R.S.Ayers, D.W.Westcot, Water quality for agriculture, FAO irrigation and drainage paper, 1994
- Faye, - S. Faye, I. Niang Diop, S. Cissé Faye, D.G.Evans, M.Pfister, P. Maloszewski, K. P. Seiler, Seawater intrusion in the Dakar (Senegal) confined aquifer: calibration and testing of a 3D finite element model, année inconnue
- Faye, 2001 S.C.Faye, Nappe libre des sables quaternaires Thiaroye/Beer Thialane (Dakar, Sénégal) : Étude de la contamination par les nitrates sur la base d'un système

- d'information géographique (PC ARC/INFO), Münchner Geologische Hefte, Reihe B : Angewandte Geologie, 2001
- Faye, 2004 S.C Faye, S.Faye, S. Wohnlich, C. B.Gaye, An assessment of the risk associated with urban development in the Thiaroye area (Senegal), Environmental Geology, 2004
- Finger, 2011 F.Finger, Étude de faisabilité et des bénéfices des techniques de la phytoremédiation dans le contexte de la communend'arrondissement de Djiddah Thiaroye Kao, Dakar, urbaMonde, 2011
- Guyot, 1997 G.Guyot, Climatologie de l'environnement : de la plante aux éco-systèmes, Elsevier Masson, Paris, 1997
- Hann, 2007 PLT, ONAS, Direction de l'environnement, Rapport sur la dépollution des rejets d'eaux usées domestiques et industrielles dans la baie de Hann, Rapport d'ateliers, 2007
- Koukoui, 2002 H.Koukoui, N.Ndiaye, Modélisation numérique de la nappe des sables quaternaires de Thiaroye. Phase 1 : Élaboration des paramètres d'entrée du modèle, projet de fin d'étude de l'université Cheick Anta Diop, 2002
- Legendre, 2011 B.Legendre (COWI consulting), Plan stratégique de mobilisation des ressources en eau : Description des unités de gestion et de planification (UGP) du développement des ressources en eau, Direction de la planification des ressources en eau du Sénégal, 2011
- Martin, 1970 A.Martin, Les nappes de la presqu'île du Cap-Vert (République du Sénégal) : Leur utilisation pour l'alimentation en eau de Dakar, Notice et cartes hydrogéologiques 1/50 000, Bureau de Recherches Géologiques et Minières, France, 1970 – Référence non consultée
- Ndione, 2009 E.S.Ndione, O.Gueye *et al.*, Pikine aujourd'hui et demain : Diagnostic participatif de la ville de Pikine (Dakar, Sénégal), Enda Graf Sahel, 2009
- Niang, 2010 I.Niang, M.Danshoko et al., Impacts of climate change on the Senegalese coastal zones: Examples of the Cap Vert peninsula and Saloum estuary, Global and Planetary changes, vol. 72, 2010
- Niang, 2011 S.Niang, B.Sarr, H.R. Pfeiffer, A. Guèye-Girardet, M.Gaye, M.Ndiaye, S.Daouk, Y.Dieng, O.Cissé, M.Sow, H.Tall, La décharge de Mbeubeuss : Impact sur les ressources en eau et sur les sols, Institut fondamental d'Afrique Noir Cheikh Anta Diop, Initiations et étude africaine N°42, 2011
- Nicholson, 2003 T.J.Nicholson, D. Timlin, J. Starr, R Cady, T. Nicholson, Comparing ground-water recharge estimates using advanced monitoring techniques and models, US Departement of agriculture, US nuclear regulatory comission, 2003
- Norman, 2011 G.Norman, P.Scott, S.Pedley, The PAQPUD settled sewerage project (Dakar, Senegal): Problems arising, lessons learned, Habitat International, vol.35, 2011
- Laborde, 2000 J.P.Laborde, Eléments d'hydrologie de surface, CNRS, Université de Nice, 2000

Ouedraogo, 2011	I. I.Ouedraogo, Contribution à l'étude hydrodynamique de la nappe du littoral dans la banlieue de Dakar , DEA Université Cheikh Anta Diop, 2009
Partenariat mondial pour l'eau, 2000	Partenariat mondiale pour l'eau, comité technique consultatif, La gestion intégrée des ressources en eau, TAC Background Paper vol.4, 2000
PDA, rap.1-6	Cabinet SGI, Merlin : Étude d'actualisation du plan directeur d'assainissement liquide de Dakar 2025 (PDA), rapport 1 - 6, 2010
PDD, 2011	Cabinet SGI, Merlin, EDE , Etude du plan directeur de drainage des eaux pluviales de la région périurbaine de Dakar, vol.1 : Rapport, 2011
PDD, rap. technique, 2011	Cabinet SGI, Merlin, EDE , Etude du plan directeur de drainage des eaux pluviales de la région périurbaine de Dakar, Hypothèse et données de bases, 2011
PDD étude d'impact, 2011	M.M. Faye, Projet de gestion des eaux pluviales (PROGEP) : Etude d'impact environnementale et sociale, 2011
PDMAS, rapport A	Antea-SENAGROSOL, Projet eau à long terme, Etude d'impact sur l'arrêt des forages de Thiaroye sur les zones basses. Modélisation de la nappe : Phase A, 2003
PDMAS, rapport B/C	Antea-SENAGROSOL, Projet eau à long terme, Etude d'impact sur l'arrêt des forages de Thiaroye sur les zones basses. Modélisation de la nappe : Phases B et C, 2004
PDMAS, volet socio-économie et environnement	Antea-SENAGROSOL, Projet eau à long terme, Etude d'impact sur l'arrêt des forages de Thiaroye sur les zones basses , volet socio-économie et environnement, 2003
PDMAS, Etude d'impact	Cabinet Merlin, Senagrosol, Etude d'impact pour la mobilisation de ressources en eau alternatives dans la région de Dakar, 2008
PDMAS, schéma institutionnel	Cabinet Merlin, Senagrosol, Schéma institutionnel pour la mobilisation de ressources en eau alternatives dans la région de Dakar, 2008
PDMAS, APD	Cabinet Merlin, Senagrosol, Avant-projet détaillé pour la mobilisation de ressources en eau alternatives dans la région de Dakar, 2008
PDU, 2010	Plan directeur d'urbanisme de Dakar « Horizon 2025 », Ministère de l'urbanisme et de l'aménagement du territoire, 2010
Plan Jaxaay, 2010	Rapport d'activité – plan Jaxaay, Ministère de l'habitat, de la construction et de l'hydraulique, 2010
Smith, 2004	O.Smith, P.Moustier, L.Mougeot et A.Fall, Développement durable de l'agriculture urbaine en Afrique francophone : Enjeux, concepts et méthodes, Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement et Centre de Recherches pour le Développement International, 2004
Tandia, 1999	A.A Tandia, E.S. Diop, C.B. Gaye, Pollution par les nitrates des nappes phréatiques sous environnement semi-urbain non assaini: exemple de la nappe

- de Yeumbeul, Sénégal, Journal of African Earth Science, vol.29, 1999
- Tandia, 2000 A.A. Tandia, Origine, évolution et migration des formes de l'azote minéral dans les aquifères situés sous environnement péri-urbain non assaini: cas de la nappe des sables quaternaires de la région de Dakar (Sénégal). Thèse d'état, Univ. Cheick Anta Diop de Dakar, 2000
- Travi, 1987 Y. Travi., J.Gac, J.C Fontes, et B.Fritz, Reconnaissance chimique et isotopique des eaux de pluie au Sénégal. Géodynamique, vol 2, 1987 – références non consultée
- Travi, 1991 Y.Travi, J.Y.Gac, E. Gibert, M.Leroux, et J.C. Fontes, Composition isotopique et genèse des précipitations sur Dakar pendant les saisons des pluies 1982 et 1984. In Proceedings of an international symposium on isotope techniques in water resources development (pp. 495–497). IAEA, Vienna., 1991 – Référence non consultée
- Tilley, 2008 E.Tilley et al, 2008. Compendium of Sanitation Systems and Technologies. Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology (Eawag). Dübendorf, Switzerland.
- urbaMonde, 2009 Association urbaMonde, Programme de Mitigation des Inondations de Thiaroye, Dossier Diagnostic, 2009
- urbaMonde, 2010 Association urbaMonde, Programme de Mitigation des Inondations de Thiaroye, Dossier Hydraulique, 2010
- Vallet, 1972 P.Vallet, Approvisionnement en eau et assainissement de Dakar et ses environs : Etude des eaux souterraines, Tome II : Etude hydrogéologique de la nappe des sables quaternaires, Rapport OMS, Projet Sénégal 3201, 1972 – référence non consultée
- Visual MODFLOW, 2005 Waterloo Hydrogeologic Inc., Visual Modflow Premium – Tutorial, 2005(?)
- Wetlands International, 2011 Centre de suivi écologique, Université Cheikh Anta Diop (LATEU IFAN, Département de géologie), Rapport 1, Influence du mauvais assainissement et de la présence de la décharge de Mbeubeuss, 2010 Inondation et urbanisation *in* Wetlands International, Centre de suivi écologique, Projet pour l'élaboration d'une stratégie de gestion intégrée d'une zone humide urbaine : cas de Pikine-Guédiawaye au Sénégal, 2011
- WHO, 2003 World Health Organisation, Guidelines for drinking water quality : Chemical fact sheet (nitrate/nitrite), 2003
- Wray, 1995 W.K.Wray, So your home is built on expansive soils? A discussion on how expansive soils affect buildings, American Society of Civil Engineers, 1995

