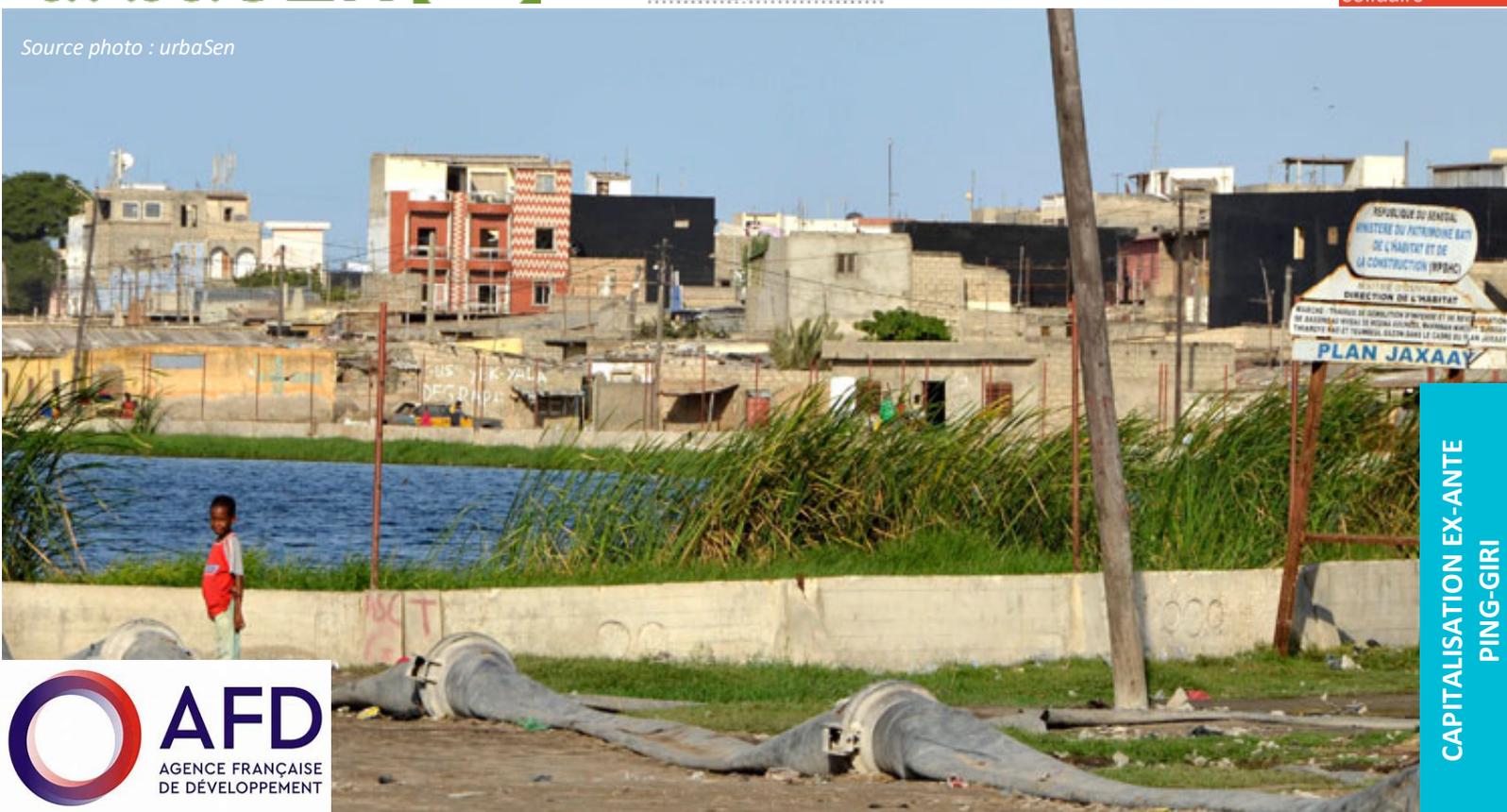


Source photo : urbaSen



CAPITALISATION EX-ANTE

ANALYSE DES CONTRAINTES PHYSIQUES

Projet de Gestion intégrée du risque inondation à Dakar – Pikine
Irrégulier Nord Guediawaye « PING GIRI »

Sarah Lecourt

EPAD, SÉNÉGAL

JUIN 2020



Campus du Jardin d'agronomie tropicale de Paris
45 bis avenue de la Belle Gabrielle
94736 Nogent-sur-Marne Cedex, France
Tél. : 33 (0)1 70 91 92 00
Fax : 33 (0)1 70 91 92 01
gret@gret.org
<http://www.gret.org>

SOMMAIRE

INTRODUCTION	4
L'ÉVOLUTION DE LA PLUVIOMÉTRIE AU SÉNÉGAL	5
Analyse hydro-géomorphologique et cadre d'étude	5
Un changement de dynamique pluviométrique	6
Nappe phréatique et qualité des sols	7
L'IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE	9
Projection climatique	9
Impacts sur la conception des ouvrages	12
BIBLIOGRAPHIE	15

Liste des acronymes

AFD : Agence Française de Développement

ANACIM : Agence Nationale de l'Aviation Civile et de la Météorologie

DPC : Direction de la Protection Civile

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

DTK : Djiddah Thiaroye Kao

IDF : Intensité Durée Fréquence

IRC : Indice de risque de catastrophe

CMIP : Couple Model Intercomparison Project

GEP : Gestion des eaux pluviales

GIEC : Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat

MOA : Mousson Ouest-Africaine

NSQ : Nappe des sables quaternaires

OMVFS : Organisation pour la Mise en Valeur du Fleuve Sénégal

PGRC ACC : Projet de Gestion des Risques de Catastrophes et d'Adaptation aux Changements Climatiques

PNUD : Programme des Nations unies pour le développement

PROGEP : Projet de gestion des eaux pluviales et d'adaptation aux changements climatiques

RCP : Representative Concentration Pathways

SAP : Système d'alerte précoce

Table des figures

- Figure 1. Vue en 3D des bassins versants dans le département de Pikine et Guédiawaye*
- Figure 2. Disposition des bassins versants et plans d'eaux dans les départements de Pikine et Guédiawaye*
- Figure 3. Evolution interannuelle des indices pluviométriques au Sénégal entre 1921 et 2013*
- Figure 4. Evolution de la pluviométrie à Dakar 1895 à 2017. Source : Descroix, 2018*
- Figure 5. Le volume de pompage à la station de Thiaroye*
- Figure 6. Projections climatiques de la zone sahélienne via le modèle CMIP5 avec le scénario RCP 8.5*
- Figure 7. Évolution de l'indice pluviométrique au Sénégal entre 1950 et 2009*
- Figure 8. Exemple des nouvelles courbes IDF produites pour la région de Dakar*

INTRODUCTION

Le Sénégal est un pays sahélien fortement influencé par la **Mousson Ouest-Africaine** observée entre les mois d'avril et d'octobre mais aussi par les courants océaniques venant de l'Atlantique.

Le pays a subi diverses variations climatiques au cours des décennies précédentes, en particulier durant les années 1970 avec d'importants **épisodes de sécheresse**. Celle-ci a généré une crise agricole entraînant un exode rural massif. À partir des années 1970, la nouvelle ville de Pikine¹ dont l'urbanisation était en cours a alors subi les effets de **l'exode rural** avec d'importants déplacements de population à destination de la capitale² (Gouvernement du Sénégal, Banque Mondiale, 2010). De 140 000 habitants en 19713 la ville est passée de 624 000 habitants en 19884 (Sané Y., 2013) (Vernière M., 1973). Le déficit pluviométrique ayant entraîné l'assèchement des Niayes et des dépressions interdunaires et face à la pénurie foncière, **les populations se sont en effet implantées spontanément dans les bas-fonds, alors asséchés.**

Le retour progressif des précipitations à la fin des années 1990 couplée avec la remontée de la nappe d'eau souterraine ainsi qu'à l'augmentation de populations dans des zones sèches mais inondables, a engendré **d'importantes inondations** avec d'importants impacts socio-économiques⁵ (urbaMonde, 2012).

Notons que **les causes des inondations à Dakar sont multifactorielles et complexes**. Si la modification du régime pluviométrique et ses conséquences sont impliquées, d'autres facteurs sont également à prendre en compte. Particulièrement, **la dégradation des réseaux hydrographiques** due à l'ensablement (formation de dunes due aux dépôts éoliens de sables) et au non-respect des servitudes d'écoulement des eaux ; **l'extension urbaine non planifiée** qui augmente l'imperméabilisation et donc le ruissellement⁶ ; l'habitat spontané et non structuré dans certaines zones qui constitue une contrainte majeure à la réalisation de réseaux de voiries et de système d'évacuation des eaux usées et pluviales (Gouvernement du Sénégal, Banque Mondiale, 2010) ; **la diminution de l'exploitation de la nappe de Thiaroye**. Enfin, **le manque d'infrastructures de drainage et leur obstruction** - en particulier les déchets et sables - ne permettent pas l'évacuation des eaux lors des épisodes pluvieux.

Les inondations dans la périphérie dakaroise ont des **causes multi-factorielles, qui peuvent être résumées par :**

- **Une topographie** de Dakar un système **hydrographique** qui favorise les inondations ;
- **Une occupation des zones basses** suite à la sécheresse et à **l'exode rural** des années 1970 ;
- **Un retour des précipitations depuis les dernières décennies comprenant une intensification des pluies ;**
- **La remontée de la nappe de Thiaroye** liée à la réduction de son exploitation et au rejet des eaux usées liée à l'augmentation de la demande en eau. À titre d'exemple en 2015 au moins 2 834 m³/jour d'eaux usées étaient rejetées par la population de Djiddah Thiaroye Kao (DTK), soit l'équivalent d'une pluviométrie annuelle de 436 mm⁷ ;
- **L'expansion d'une urbanisation peu contrôlée**, imperméabilisant les sols et modifiant les voies d'eau ;
- **Le manque de systèmes d'assainissement et leur obstruction**, limitant les capacités de drainage.

¹ Elle comprenait initialement la ville de Guédiawaye.

² Gouvernement (République) du Sénégal, Banque Mondiale, 2010. « Rapport d'évaluation des Besoins Post Catastrophe. Inondations urbaines à Dakar en 2009 », Rapport préparé par le gouvernement de la République du Sénégal avec l'appui de la Banque Mondiale, du système des Nations Unies et de la Commission Européenne, Rapport final, Juin 2010, 191p.

³ Vernière M., 1973. Pikine, « ville nouvelle » de Dakar. In: Espace géographique, tome 2, n°2, 1973. pp. 107-126.

⁴ Sané Y., 2013. « La politique de l'habitat au Sénégal : une mutation permanente », Les Cahiers d'Outre-Mer, 263 | 2013, 311-334.

⁵ urbaMonde, 2012. Programme de Mitigation des Inondations de Thiaroye, Dossier gestion intégrée, Diane von Gunten

⁶ La surface habitée, et donc imperméable, des départements de Pikine et Guédiawaye a considérablement augmenté, passant d'environ 16% de la superficie totale en 1947 à 55% en 2009 (Ndiaye, 2009).

⁷ ADM, 2015. Programme d'investissement prioritaire. Accompagnement d'une planification participative de la CA de Djiddah Thiaroye Ka (Pikine).

I. L'EVOLUTION DE LA PLUVIOMETRIE AU SENEGAL

1. ANALYSE HYDRO-GEOMORPHOLOGIQUE ET CADRE D'ETUDE

Le territoire sénégalais occupe la partie méridionale du bassin sédimentaire sénégal-mauritanien incliné vers l'ouest en direction de l'Océan Atlantique. Le centre de la région de Dakar, correspondant aux départements de Pikine et Guédiawaye, est marqué par **des dépressions où sont identifiés une dizaine de bassins versants** dont les parties basses sont les zones inondables (Gouvernement du Sénégal, Banque Mondiale, 2010).

Dakar se situe dans le prolongement de la **zone des Niayes** qui se caractérise par une succession de bas-fonds et de dunes. Elle s'intègre alors dans un cadre géomorphologie composé de trois dépressions dunaires dans lesquelles affleure la **Nappe des Sables Quaternaires (NSQ)**.

L'hydrogéologie se caractérise alors par la nappe phréatique de Thiaroye qui constitue la partie ouest de la Nappe des Sables Quaternaires. De nature cette nappe phréatique est peu profonde⁸ (Faye et al., 2004). La nappe de Thiaroye est limitée à l'ouest par la nappe infra-basaltique de Dakar et à l'est, la limite est définie par un affleurement de roches marneuses imperméables, situé au niveau de Rufisque (urbaMonde, 2012). **La nappe de Thiaroye est donc proche de la surface**, elle affleure au niveau des lacs et des nombreuses dépressions appelées «Niayes»⁹ (Gouvernement du Sénégal, Banque Mondiale, 2010). Durant la saison des pluies elle inonde de manière régulière les populations (urbaMonde, 2012).

Plusieurs facteurs naturels rendent ces zones propices aux inondations. Tout d'abord, **le dénivelé est moindre** sur ces zones, les pentes des terrains sont de l'ordre de 2 à 3%. De plus, **certains bassins versants sont endoréiques** et ne possèdent pas de sortie vers la mer à cause de cordons dunaires ou de l'urbanisation ce qui augmente la vulnérabilité du territoire aux inondations. Enfin, **les sols sont hydromorphes**, c'est-à-dire que leur composition en eau les rend rapidement saturés d'eau. Lorsque les pluies diluviennes surviennent, les sols ne peuvent à partir d'un seuil plus retenir d'eau. Ceci engendre des débordements des nappes affleurantes (Gouvernement du Sénégal, Banque Mondiale, 2010). Les eaux qui ne peuvent plus s'infiltrer ruissellent et génèrent ainsi de forts débits.

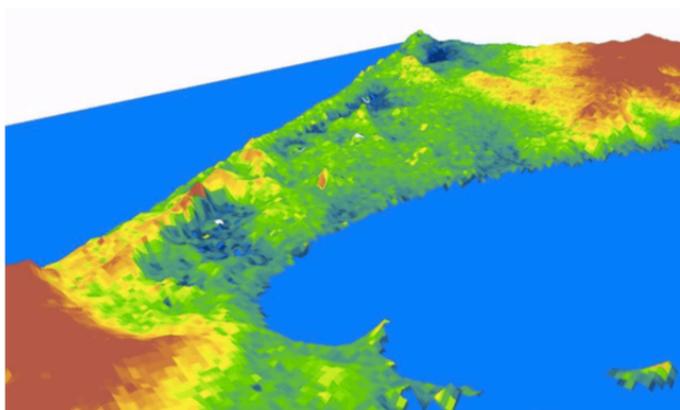


Figure 1. Vue en 3D des bassins versants dans le département de Pikine et Guédiawaye. Source : DGPRES, 2009

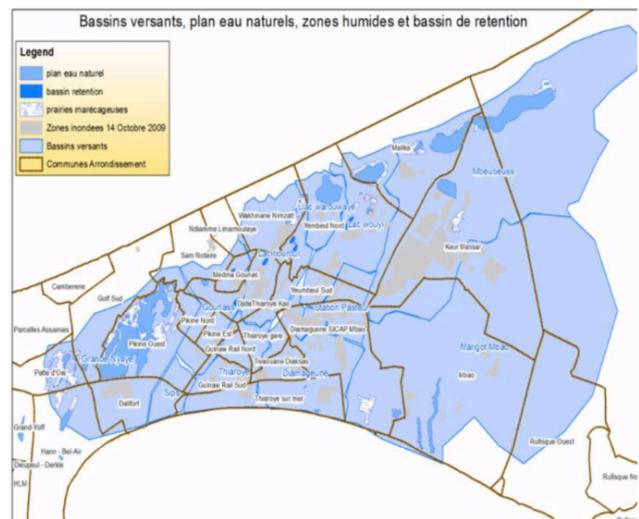


Figure 2. Disposition des bassins versants et plans d'eaux dans les départements de Pikine et Guédiawaye. Source : DGPRES, 2009

⁸ Faye et al, 2014. An assessment of the risk associated with urban development in the Thiaroye area (Senegal). Environmental Geology, 45: 312-322.

⁹ Une nappe phréatique affleurante signifie en effet qu'elle se localise sous la couche superficielle de sable de sable. L'affleurement a deux conséquences importantes pour notre étude : 1) l'eau est en permanence en surface et par endroits ceci se confirme également pendant la saison sèche 2) l'affleurement de la nappe facilite la stagnation des eaux de ruissellement.

2. UN CHANGEMENT DE DYNAMIQUE PLUVIOMÉTRIQUE

La Mousson Ouest-Africaine (MOA) entraîne d'importantes variabilités spatiales et temporelles de la pluviométrie durant l'hivernage. Elle est influencée par plusieurs paramètres tels que l'humidité du sol, le couvert végétal, etc. Plusieurs études sont réalisées dans le but de comprendre la dynamique de cette mousson. Du fait de sa complexité, **la MOA est la cause principale des irrégularités des précipitations qui sont observées** (Sy, 2016 cité dans Barbe A. et al., 2017¹⁰). Afin de comprendre le climat au Sénégal, notamment la pluviométrie, il est important de retracer en détail son évolution depuis le début du XX^{ème} siècle jusqu'à nos jours.

Il est possible d'observer deux grandes périodes depuis le début du 20^{ème} siècle : une période d'abondance, des années 1900 jusqu'au milieu des années 1960. La moyenne annuelle pluviométrique à Dakar sur cette période est de 550 mm. L'année la plus pluvieuse a été 1906 avec 958 mm. **Une deuxième période depuis 1970 jusqu'en 2004, dite sèche, avec une pluviométrie globale moyenne de 340mm¹¹** (ADM, 2011). 1972 est l'année la moins pluvieuse avec une pluviométrie de 117 mm. Puis, **un retour de la pluviométrie** est noté durant les années 2000 particulièrement en 2005 et 2009 correspondant à des années d'inondations. La moyenne annuelle de 2005 à 2009 est remontée et a été de 483 mm (ADM, 2011).

La baisse des précipitations amorcée à partir des années 1970 s'accompagne donc d'une certaine irrégularité puisque des phases déficitaires et des phases excédentaires ont pu succéder. Les années 2005 et 2009 témoignant de cette forte variabilité (figure 3.). Grâce au calcul d'indices pluviométriques on peut donc mettre en évidence la période de forte sécheresse des années 1970 au Sahel puis **l'amorce d'un changement de dynamique pluviométrique à partir des années 1990-2000.** L'évolution de la pluviométrie à Dakar est similaire (figure 4) avec cependant une **remontée des volumes annuels** plus faible ces dernières décennies, qui serait liée à la proximité de l'océan (Descroix, 2018)¹².

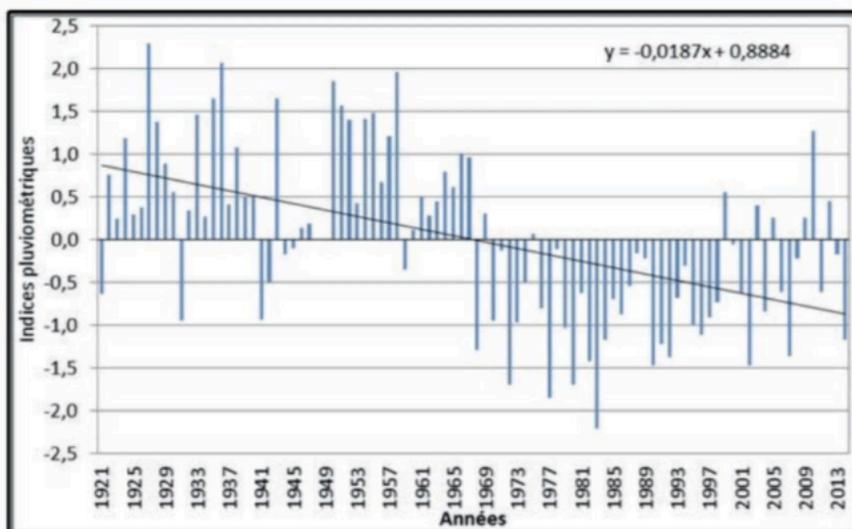


Figure 3. Evolution interannuelle des indices pluviométriques au Sénégal entre 1921 et 2013. Source : Sagna et al, 2015¹³

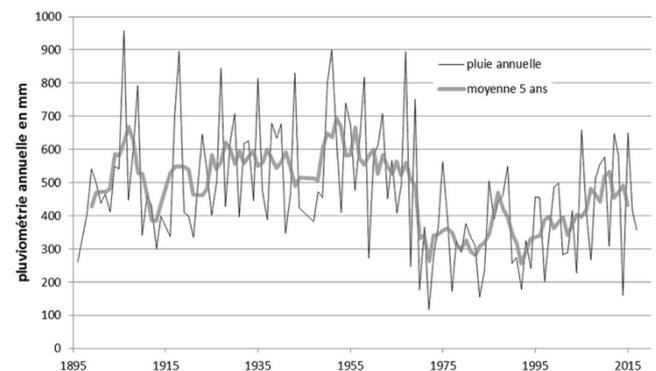


FIGURE 98 – Évolution de la pluviométrie à Dakar 1895 à 2017 : une rupture bien plus nette

Figure 4. Evolution de la pluviométrie à Dakar 1895 à 2017. Source : Descroix, 2018

Le régime pluviométrique a également évolué ces dernières décennies. En effet, l'augmentation des précipitations annuelles s'est accompagnée d'une plus forte augmentation des pluies de fort cumul que des pluies annuelles (Descroix, 2018)

¹⁰ Barbe A., Colbert E., Diallo A., Rabouille F., 2017. « Une analyse de la gestion des eaux pluviales au Sénégal »

¹¹ ADM, 2011. Étude du Plan Directeur de Drainage (PDD) des eaux pluviales de la région périurbaine de Dakar. PROGEP. Rapport final.

¹² Descroix, L., 2018. Processus et enjeux d'eau en Afrique de l'Ouest soudano-sahélienne, Editions des archives contemporaines / IRD Editions, France, ISBN : 9782813003140, 320p., doi : 10.17184/eac.9782813003140

¹³ Sagna et al., 2015. « Les variations récentes du climat constatées au Sénégal sont-elles en phase avec les descriptions données par les scénarios du GIEC ? » In Pollution Atmosphérique N°227 - Octobre - Décembre 2015

La pluviométrie à Dakar se caractérise par :

- Une influence forte de la mousson ouest africaine, dont le phénomène est fluctuant et complexe ;
- Une période de sécheresse depuis 1968 au Sénégal ;
- Un retour progressif des précipitations depuis la fin des années 90
- Un changement structurel marqué par des précipitations plus irrégulières et une intensification des évènements pluvieux

Pour aller plus loin

Sur les causes des inondations :

- Programme de Mitigation des Inondations de Thiaroye (urbaMonde)
- [Rapport d'évaluation des Besoins Post Catastrophe. Inondations urbaines à Dakar en 2009 \(Gouvernement du Sénégal, Banque Mondiale, 2010\)](#)
- [Understanding Urban Flooding in Dakar, Senegal. Tomohito Okuda \(2012\)](#)

Sur la topographie et l'hydrologie :

- [EIES \(PROGEP\) \(à partir de la page 17\)](#)

3. NAPPES PHRÉATIQUES ET QUALITÉ DES SOLS

Ces dernières années, l'urbanisation croissante et les politiques de gestion de l'eau ont façonné le niveau de la nappe phréatique de Thiaroye ainsi que sa composition (urbaMonde, 2012).

Dès 1950, la nappe de Thiaroye a été utilisée pour alimenter en eau potable la ville de Dakar. Le débit d'exploitation (17 000m³/jour) a entraîné un abaissement du niveau de la nappe¹⁴ (Ndao S., et al, 2015). Ce pompage a créé un risque d'intrusion saline (urbaMonde, 2012). Entre 1959 et 1961 l'avancée du biseau salé a amené les autorités étatiques à demander l'arrêt des forages de Thiaroye (urbaMonde, 2012). Il semble que cette explication ne soit pas isolée et que l'épuisement des réserves hydriques de surface ait également joué un rôle. En effet, les nappes ont subi une double contrainte, tout d'abord une contrainte qualitative avec l'intrusion d'eaux salées et la pollution microbiologique et une contrainte quantitative par la baisse de niveau de la nappe¹⁵ (Dasylyva D., Cosandey C., 2005).

Le pompage a alors repris en 1961 mais avec un débit d'exploitation plus faible (la production maximale était de 10 500m³/jour)¹⁶ (Tandia et al., 2004). Au-delà, il y aurait un risque d'intrusion salée¹⁷ (Pigeon J.L., 1999).

Puis, comme expliqué précédemment, la fin des années 1960 a été marquée par une forte sécheresse, l'exode rural et l'urbanisation de terrains asséchés. L'urbanisation de cette zone ne s'est pas accompagnée de la mise en place d'un système d'assainissement. Ces nouveaux habitants ont donc rejeté leurs eaux usées dans la nappe, qui ont nui à sa qualité rendant alors l'eau non-potable (urbaMonde, 2012). Cette contamination a poussé depuis la fin des années 1980 à diminuer les pompages dans la nappe de Thiaroye, car l'eau est devenue impropre à la consommation (figure 5). En 2011, le volume de pompage était à moins de 2000 m³/jour (urbaMonde, 2012).

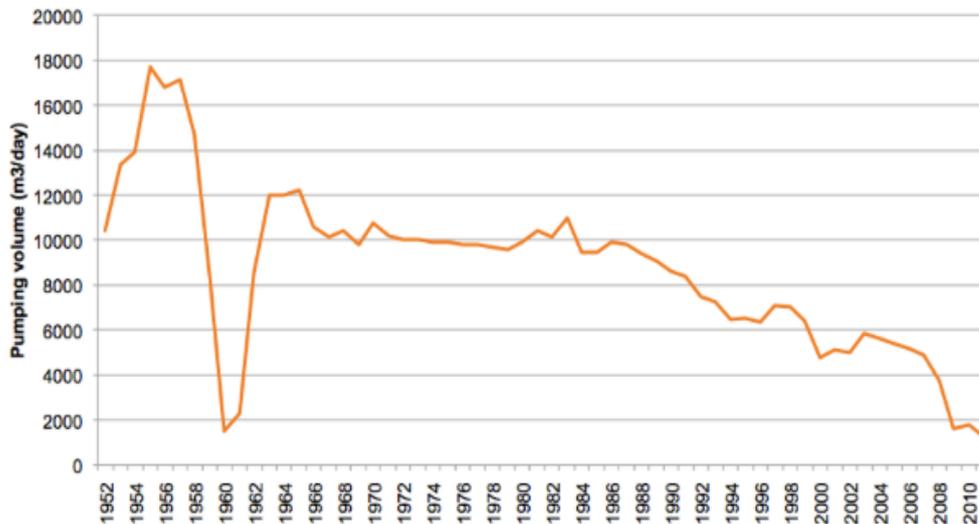
¹⁴ Ndao S., Diaw, E. H. B., Tamba S., & Wade M., (2015). La nappe de «Thiaroye» au Sénégal: une ressource en eau encore utilisable? Vertigo, <https://vertigo.hypotheses.org/2033>

¹⁵ Dasylyva D., Cosandey C., 2005. 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.

¹⁶ Tandia A., Deme I., Sarr M., 2004. Aquifère superficiel et pollution urbaine en Afrique. Rapport final du Sénégal, UNEP / UNESCO / UN-HABITAT / ECA

¹⁷ Pigeon J. L., 1999. Projet d'approvisionnement en eau potable à long terme, Rapport définitif, Dakar, 203 p.

Figure 5. Le volume de pompage à la station de Thiaroye. Source : SONES (2012), adapté par Association urbaMonde (2013).



Dans les années 1990 face à la diminution du pompage de la nappe de Thiaroye les besoins en eau potable de Dakar ont commencé à être satisfaits par l'importation de l'eau du lac de Guiers (situé à 250 km au NE de Dakar) (Pigeon J. L., 1999).

L'une des conséquences de l'arrêt de ce pompage a été les inondations des points bas. De fait, la réduction des pompages couplée à une recharge supplémentaire a fait remonter la nappe de 15 cm en moyenne par année (urbaMonde, 2009). Cette recharge s'explique notamment par l'augmentation de la population et donc des volumes d'eau usées rejetés. Or s'il y a environ 35% des précipitations annuelles qui contribuent à la recharge de la nappe¹⁸ (Merlin, 2008), le reste, estimé à 30 000 m³/jour, provient de l'infiltration des eaux usées domestiques. C'est donc à la fois **l'infiltration des eaux pluviales et des eaux usées domestiques qui sont la cause de la remontée du niveau de la nappe phréatique de Thiaroye**. Ainsi, dans les années 1970, la nappe s'était abaissée de près de 4 mètres et elle était remontée en 2005 jusqu'à submerger les habitations (Ndao S., et al, 2015)

Une des causes des inondations est donc la remontée de la nappe de Thiaroye (inondation par eaux souterraines). Toutefois d'autres facteurs participent aux inondations notamment le **ruissellement en saison des pluies (inondation pluviale)**. D'une part, la zone des Niayes est confrontée au problème de ruissellement avec sa topographie en cuvettes. D'autre part, les sols de la nappe ont une faible capacité de rétention d'eau notamment car la nappe souterraine affleure. Lors de l'hivernage, la typologie du sol a un impact sur l'écoulement des eaux. De fait, la faible possibilité d'infiltration de l'eau¹⁹ engendre le développement d'eaux stagnantes (Gouvernement du Sénégal, Banque Mondiale, 2010).

Lorsque la remontée des nappes se combine à de fortes précipitations, les habitants situés dans les zones basses (dépressions inter-dunaires des Niayes) sont donc fortement touchés. De plus, les eaux stagnantes rentrent en contact avec les eaux usées ce qui augmente la vulnérabilité sociale par les risques de maladies hydriques et favorise la nitrification des eaux de la nappe²⁰ (Faye M., 2013).

Le retour des précipitations au début des années 2000 a donc provoqué des inondations et le sinistre des habitats installés dans des points bas et asséchés. Notons que l'explication de ces inondations est bien l'installation dans des zones potentiellement inondables combiné aux dynamiques anthropocènes et non le retour des précipitations. En

¹⁸ Cabinet Merlin, Senagrosol, Avant-projet détaillé pour la mobilisation de ressources en eau alternatives dans la région de Dakar, 2008

¹⁹ Le ruissellement et l'infiltration des eaux dépendent de la perméabilité des sols. Cette dernière dépend du type de sol et également du couvert végétal. La végétation protège en effet naturellement les sols de l'érosion et facilite l'absorption de l'eau.

²⁰ Faye M., 2013. Contribution à l'étude de mobilisation des ressources en eau pour l'alimentation de Dakar : Diagnostic et perspectives.

1951, 1958 et 1967, les précipitations moyennes annuelles avaient dépassé les 800 mm par an à Dakar sans que cela n'engendre des dégâts matériels ou des pertes humaines²¹ (Cissé O., 2019).

Les inondations à Dakar :

1. **Inondation par ruissellement** des eaux pluviales liées à **l'imperméabilisation des sols**
2. **Inondation par les eaux souterraines** avec la **remontée de la nappe phréatique** de Thiaroye

L'état de la **nappe phréatique** et la **qualité des sols** sont donc des déterminants majeurs des inondations. Ces deux éléments sont fortement influencés par des **dynamiques anthropocènes** : urbanisation non contrôlée, pompage, rejet des eaux usées, remblayage qui rendent le sol imperméable et déplacent le problème, etc.

Pour aller plus loin

Sur le drainage de la nappe :

- [Étude du Plan Directeur de Drainage \(PDD\) des eaux pluviales de la région périurbaine de Dakar, PROGEP \(à partir de la page 16\)](#)
- [Programme de Mitigation des Inondations de Thiaroye. UrbaMonde \(2012\)](#)
- Sur le rabattement de la nappe et le pompage :
- [Étude d'impact de l'arrêt des forages de Thiaroye sur les zones basses. SONES, 2004](#)

II. L'IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

1. PROJECTION CLIMATIQUE

Le changement climatique a un impact sur le volume, l'intensité, la fréquence des précipitations ainsi que sur le comportement hydrologique des bassins versants et la recharge des nappes phréatiques (Gouvernement du Sénégal, Banque mondiale, 2010). Il est donc une composante majeure du risque inondation.

Pour caractériser les effets du changement climatique, **des scénarios climatiques** ont été développés en fonction des forçages radiatifs²² déterminés à partir des concentrations en gaz à effet de serre et des émissions naturelles dans l'atmosphère. Quatre profils représentatifs de l'évolution de concentration des gaz à effet de serre, RCP (Representative Concentration Pathways), ont été définis par le GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat), allant du plus optimiste (RCP2.6²³) au plus pessimiste (RCP8.5) suivant différentes valeurs de forçage radiatif²⁴ (ANACIM, 2017).

Ces différents profils sont ensuite intégrés dans **des modèles climatiques** qui sont des représentations numériques du climat permettant de produire les projections climatiques. L'un des modèles climatiques qui étudie le changement climatique au niveau du Sahel est le modèle CMIP (Couple Model Intercomparison Project) (ANACIM, 2017). Il s'agit d'un modèle qui couple une composante atmosphérique, océanique ainsi qu'une composante thermodynamique permettant de quantifier les émissions des différentes sources d'énergie. Les modèles CMIP se sont succédés jusqu'au CMIP5 en 2011. Il semble que le modèle CMIP5 ainsi que le CMIP3 soient majoritairement utilisés pour modéliser le changement climatique au Sahel et donc les évolutions de la MOA.

²¹ Cissé O., 2019. Les inondations à Dakar (Sénégal): gestion des risques et adaptations locales. Paris : Karthala.

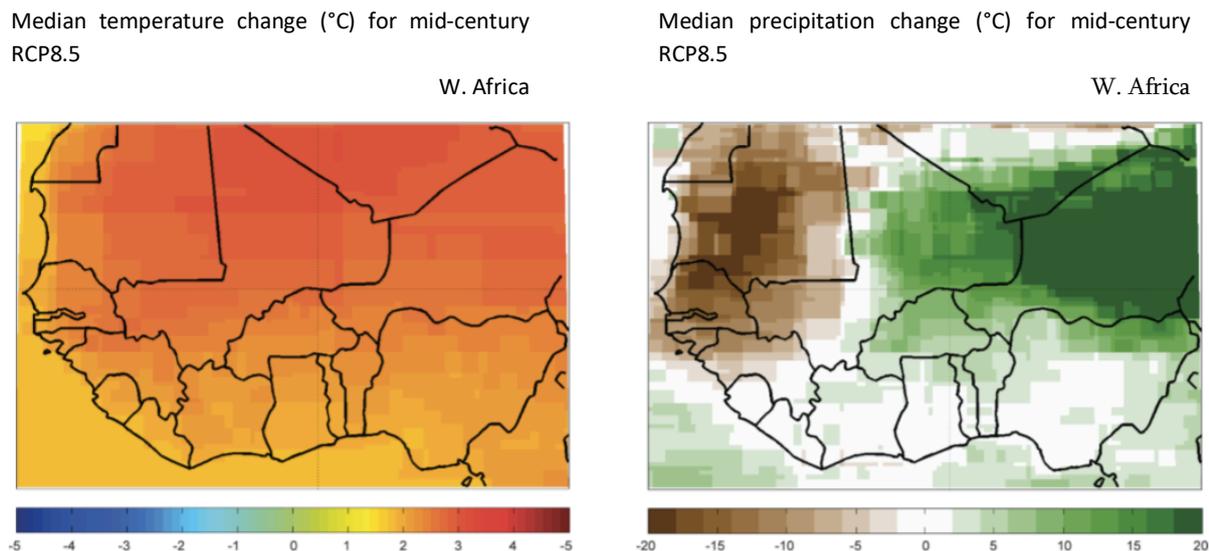
²² Un forçage radiatif est une mesure de l'influence d'un facteur dans la modification de l'équilibre entre l'énergie qui entre dans l'atmosphère terrestre et celle qui en sort, et constitue un indice de l'importance de ce facteur en tant que mécanisme potentiel du changement climatique. Un forçage positif tend à réchauffer la surface et un forçage négatif à la refroidir. Il s'exprime en watt par mètre carré (W/m²) (Gaye et al, 2017).

²³ RCP2.6 correspond à un forçage de 2.6 W.m⁻² à l'horizon 2100 ; RCP8.5 à un forçage de 8.5 W.m⁻²

²⁴ ANACIM, 2017. Élaboration de scénarios climatiques dans le cadre du volet adaptation de la Contribution Déterminée au niveau National (CDN). Rapport provisoire. Ministère de l'environnement et du développement durable. Direction de l'environnement et des établissements classés.

Les projections climatiques des différents modèles indiquent une tendance globale à la hausse des précipitations annuelles dans le Sahel à l'horizon 2050. Cependant, un contraste important apparaît entre la partie est et ouest du Sahel. En effet, d'après le modèle CMIP5, les précipitations auront tendance à diminuer au niveau de la partie ouest (Sénégal, Mauritanie) tandis qu'à l'est (Niger, Mali), elles auront tendance à s'accroître (figure 6.)

Figure 6. Projections climatiques de la zone sahélienne via le modèle CMIP5 avec le scénario RCP 8.5 (Adiku et al, 2015)



Au Sénégal, toutes les projections futures du climat global (futur proche et lointain) prévoient une intensification du réchauffement moyen. Les études montrent également que les températures à Dakar devraient augmenter d'environ 1-2°C avant 2050 et jusqu'à 6°C en 2081-2100 (Gouvernement du Sénégal, Banque mondiale, 2010).

Pour la pluviométrie, une part d'incertitude et des imprécisions demeurent encore quand il s'agit de suivre les tendances futures. Plusieurs auteurs se contredisent certains mettant en avant un retour à une période humide depuis 1999²⁵, d'autres prévoyant une baisse des précipitations annuelles dans les décennies à venir. Tout d'abord il semble qu'au sein même du Sénégal il y ait des évolutions différentes notamment entre le Nord-Ouest et le Sud-Est. De plus, le choix des scénarios influence grandement les résultats (entre RCP4.5 et RCP8.5 par exemple). Enfin, il est difficile de faire la part entre variabilité naturelle du climat et changement climatique.

Les simulations climatiques réalisées par l'Agence Nationale de l'Aviation Civile et Militaire (ANACIM) en se basant sur les scénarios globaux développés par le GIEC, notamment le RCP8.5 sont par contre plutôt explicites. Les résultats confirment la diminution de la pluviométrie annuelle vers l'horizon 2035. Les précipitations des mois de juin, juillet et août au Sénégal auront tendance à diminuer d'environ 0,5 mm entre 2031 et 2050 et 2,5 mm entre 2080 et 2100, constituant une baisse pluviométrique allant jusqu'à 10% dans les décennies à venir (Gouvernement du Sénégal, Banque mondiale, 2010).

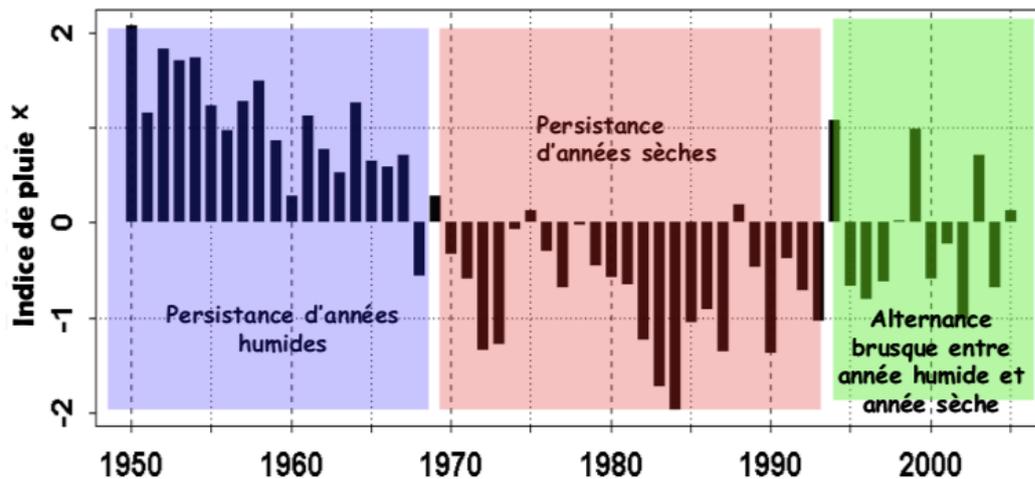
Dans un contexte de changement climatique il semblerait donc qu'il y ait une tendance de baisse des précipitations moyennes annuelles à Dakar. Derrière ces projections à la baisse se cachent de nouveaux phénomènes. En effet, cette diminution s'explique par un déficit du nombre de jours pluvieux mais elle s'accompagne d'une intensification d'évènements pluvieux extrêmes. La saison des pluies est donc plus courte, le nombre de jours de pluie moins important

²⁵ Plusieurs années se sont distingués par des précipitations abondantes (particulièrement 2005, 2009, 2012) et seraient pour certains auteurs le signe d'un retour à une période humide

mais il y a une succession de fortes pluies sur une courte période. De plus on constate que le démarrage de la saison des pluies se fait plus tardivement.

Par ailleurs, il semble qu'il faille sortir de la dichotomie période humide/période sèche pour appréhender les événements amorcés depuis les années 2000. On pourrait plus parler d'une nouvelle période caractérisée par une alternance brusque entre année humide et année sèche (Sagna et al., 2015, Diop M.S., 2019) (voir figure 7.).

Figure 7. Évolution de l'indice pluviométrique au Sénégal entre 1950 et 2009. Source : Agrhymet, 2010



Ainsi, si on peut constater une **réduction du cumul annuel des précipitations**, une **augmentation de leur intensité** ainsi que de la **fréquence de cette intensité**, cela entraînera une **augmentation de l'aléa**.

Tendances pluviométriques à Dakar dans un contexte de changement climatique :

- Une diminution de la pluviométrie moyenne annuelle
- Une diminution du nombre de jours pluvieux à l'année et au sein de la saison des pluies
- Des événements journaliers à plus fort cumul pluviométrique avec une occurrence plus importante de ces pluies intenses
- Une pluviométrie marquée par une grande variabilité interannuelle

Pour aller plus loin

Sur la variabilité pluviométrique et le changement climatique :

- [Les variations récentes du climat constatées au Sénégal sont-elles en phase avec les descriptions données par les scénarios du GIEC ?](#)
- [Notes techniques - Risque d'inondation et villes des pays en développement. AFD \(à partir de la page 82\)](#)
- [Rapport final CGES Progep \(à partir de la page 17\)](#)
- [Géoportail ANACIM projections climatiques](#)
- [Évolution récente de la pluviométrie en Afrique de l'ouest à travers deux régions : la Ségambie et le bassin du Niger moyen \(Descroix et AL, 2015\)](#)

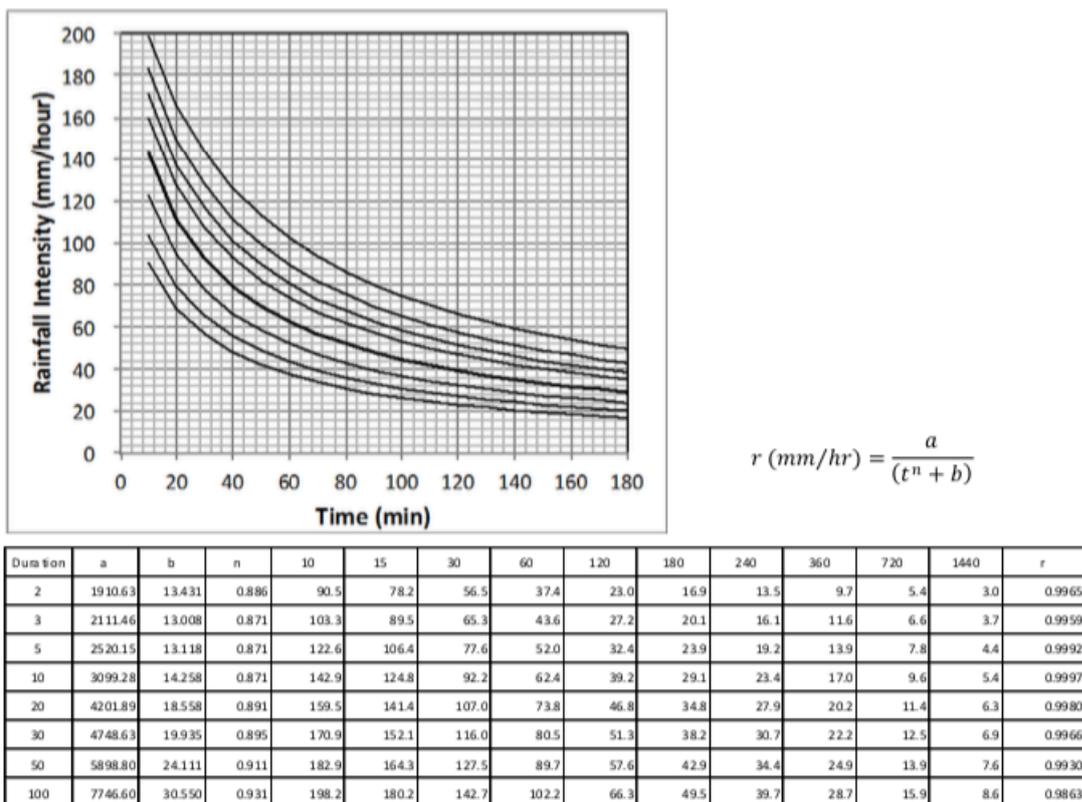
Synthèse des données du changement climatique au Sénégal :

- <https://climateknowledgeportal.worldbank.org/country/senegal>

2. IMPACTS SUR LA CONCEPTION DES OUVRAGES

Une des causes des inondations est parfois lié au mauvais dimensionnement des ouvrages d'évacuation des eaux pluviales. À l'heure actuelle, les ouvrages GEP sont dimensionnés le plus souvent sur une « pluie de projet » déterminée à partir des courbes IDF²⁶ (Intensité Durée Fréquence). Dans le cadre du Plan Directeur d'Urbanisme de Dakar et ses Environs à l'horizon 2035 (2016), un travail de retraitement de données pluviométriques de l'ANACIM a été réalisé afin de produire des courbes IDF valables pour la région de Dakar. Les résultats sont indiqués dans la figure ci-dessous.

Figure 7. Exemple des nouvelles courbes IDF produites pour la région de Dakar. Source Plan Directeur



d'Urbanisme de Dakar et ses Environs Horizon 2035. Source : JICA, 2016

La réflexion sur la conception et le dimensionnement des ouvrages devrait aussi tenir compte des prévisions climatiques : augmentation du dimensionnement pour tenir compte de l'augmentation des événements pluvieux intenses, diversification des usages des ouvrages en période sèches. Enfin, l'augmentation des températures va entraîner parallèlement une augmentation de l'évaporation de l'eau mais aussi de l'évapotranspiration des plantes, qui peut aussi être intégrées dans la réflexion sur la conception des ouvrages de GEP.

Pour aller plus loin

Sur le dimensionnement des ouvrages :

- Étude du Plan Directeur de Drainage (PDD) des eaux pluviales de la région périurbaine de Dakar, PROGEP (à partir de la page 30)
- Plan Directeur d'Urbanisme de Dakar et ses Environs Horizon 2035. JICA (2016)

²⁶ Les courbes IDF représentent l'évolution de l'intensité de la pluie $i(t)$ en fonction de la durée de la pluie (en moyenne de quelques minutes à quelques heures) et de la fréquence de la pluie exprimée en période de retour T (souvent quelques valeurs échantillonnées entre 2 et 100 ans)

Techniques douces de la gestion des eaux pluviales : tour d'horizon en zone sahélienne

Les techniques douces ou dites alternatives de la GEP sont basées sur deux principes : la rétention (stockage) et le retardement de l'écoulement pour permettre l'infiltration. Ces techniques jouent une fonction de substitution au réseau de conduite et de caniveaux. Elles sont utilisées à différentes échelles et avec différents types d'ouvrages comme les noues, les bassins de rétention, les puits d'infiltration, etc. Combinées à des ouvrages courants de grands génie civil, les techniques alternatives permettent de réduire les volumes et les débits atteignant ces ouvrages.

Ces techniques douces demeurent peu nombreuses de manière opérationnelle en zone sahélienne. Elles sont en théorie particulièrement pertinentes, notamment dans un contexte de rareté de la ressource eau. Dans les *scénarii* de changements climatiques, la période de la saison sèche au Sénégal sera plus importante qu'actuellement. Dès lors, la valorisation des eaux pluviales devient en enjeu pour les besoins humains et écosystémiques.

Toutefois, la mauvaise urbanisation est un frein majeur à la réalisation de ces techniques : manque d'espace (création zone de stockage), difficulté afin de trouver des chemins pour les noues (ruelles étroites et sinueuses), beaucoup de remblais rendant le sol imperméable (non propice à l'infiltration), etc.

Voici quelques exemples qui illustrent la mise en place de techniques douces de GEP en zone sahélienne :

1) Infiltration des eaux pluviales

• Puits et tranchées d'infiltration

Ce sont des ouvrages composés d'un massif filtrant et d'un puit creux ou comblé par des cailloux. Leur fonction est d'assurer une infiltration des eaux de ruissellement dans le sol. Des tranchées d'infiltrations ont un rôle similaire ; elles permettent l'infiltration des eaux sur des linéaires plutôt que ponctuellement.

• Ouvrages de rétention et d'infiltration intégrés dans des espaces publics collectifs

Les espaces publics collectifs tels que les jardins publics, les terrains de sport extérieurs sont des espaces propices à l'infiltration des eaux pluviales grâce à leurs surfaces souvent conséquentes, et à la présence d'espaces verts. Les voiries sont également des espaces qui peuvent être aménagés de façon à stocker temporairement l'eau le temps que l'averse se termine.

Chaussée d'infiltration : les rues sont pavées avec des bordures, qui à l'inverse des rues bitumées ont l'avantage de servir comme collecteurs primaires permettant l'infiltration d'une partie des eaux de pluie.

A Tahoua au Niger, cette technique a été utilisée en combinant la mobilisation de personnel qualifié qui assuraient la fabrication des pavés.

• Demi-lunes

Les demi-lunes ne sont pas des techniques de gestion des eaux pluviales au sens strict, mais plutôt une technique traditionnelle utilisée en agriculture permettant de capter et infiltrer les eaux de ruissellement. Cette technique permet ainsi de réduire les débits en aval. Elles sont particulièrement utilisées en milieu rural mais plus globalement, ces techniques peuvent être intégrées à un projet de mise en place de canaux de drainage en aval et ainsi permettre de réduire le dimensionnement de ces ouvrages.

Dogondoutchi, Niger : l'OG RAIL-niger a réduit les problèmes d'eau stagnante dans cette ville de 60 000 habitants en construisant des systèmes de rétention et d'infiltration sur les terrains en amont de la ville grâce à des terrasses en demi-lunes et des digues filtrantes. (Source : Maîtrise des eaux de ruissellement à Dogondoutchi, rail Niger 2009)

2) Ralentissement des écoulements

- **Cordons pierreux**

Les cordons pierreux sont constitués de pierres disposées en plusieurs rangées le long des courbes de niveaux, permettant de ralentir et infiltrer les eaux de ruissellement.

- **Diguettes en terre**

Les diguettes en terre sont des bourrelets de terre façonnées avec de la terre compactée. Elles sont aménagées sur des passages d'eau afin de ralentir le ruissellement des eaux pluviales.

- **Végétalisation**

La végétalisation permet de ralentir les écoulements, de stabiliser les sols, d'éviter les glissements de terrain et assure une rétention de l'eau.

Au Sénégal, le système de vétiver (plante herbacée tropicale, *Chrysopogon zizanioides*) forme une haie qui permet de réduire jusqu'à 70% de l'écoulement des eaux de pluie et 90% des transports de sédiments (Truong et al, 2009). Il permet aussi l'épuration des eaux. L'andropogon Gayanus est une graminée pérenne adaptée aux climats sahéliens et soudano-sahélien. Cette plante permet une couverture permanente du sol et peut également jouer le rôle de fixateur des diguettes en terre car celle-ci est résistante à la sécheresse, contrairement au vétiver.

Ces techniques alternatives permettent de réduire ou différer les écoulements tout en s'intégrant au paysage. Les ouvrages de GEP sont alors l'occasion d'aménager l'espace urbain, jouant ainsi un rôle paysager et plurifonctionnel. Sur l'idée d'urbanisme transitoire, ces espaces peuvent être des zones de stockage/infiltration des eaux pluviales pendant les périodes pluvieuses, et avoir autre usage urbain en période sèche. Ces autres usages peuvent être multiples : terrains de jeux, des skateparcs, des places publiques, ou de simple espace vert, etc.

BIBLIOGRAPHIE

Ouvrages et publications

Adiku S.G.K., et al, 2015. Climate Change Impacts on West African Agriculture : An Integrated Regional Assessment (CIWARA).

ADEPT, 2010, « Les inondations à Dakar et banlieue : Mieux comprendre les causes pour des solutions durables », Actes du colloque organisé les 11 et 12 Juin au CESAG à Dakar par l'amicale des diplômés de l'école polytechnique de Thiès, 65 p.

Amouzou K., Ndiaye M., 2012. Marchés et réponses au déficit de production agricole de la campagne 2011/2012 au Sénégal. PAM Sénégal 25 p.

ANSD, 2008. Situation Economique et Sociale de la Région de Dakar.

CEREMA, 2014. Procédures d'autorisation et de déclaration des projets d'aménagement au titre du code de l'environnement rubrique 2.1.5.0 : rejets d'eaux pluviales. Fiche instructeur N°3

Cutter S., B.J. Boruff et W. L. Shirley, 2003, Social Vulnerability to Environmental Hazards, *Social Science Quarterly*, 84, 2, pp. 242-261.

Cissé O., 2019. Les inondations à Dakar (Sénégal) : gestion des risques et adaptations locales. Paris : Karthala.

Dasylva S., 2001, Les bas-fonds des sables dunaires de la région de Dakar. Potentialités agricoles et contraintes urbaines, Thèse Doctorat, Université de Paris 1, Sorbonne, 405p.

Dasylva D., Cosandey C., 2005. 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.

Dasylva S., 2009. Inondations à Dakar et au Sahel : gestion durable des eaux de pluie, Dakar, Enda Editions, 265 p.

Descroix, L., 2018. Processus et enjeux d'eau en Afrique de l'Ouest soudano-sahélienne, Editions des archives contemporaines / IRD Editions, France, ISBN : 9782813003140, 320p., doi : 10.17184/eac.9782813003140

Faye M., 2013. Contribution à l'étude de mobilisation des ressources en eau pour l'alimentation de Dakar : Diagnostic et perspectives.

Faye et al, 2014. An assessment of the risk associated with urban development in the Thiaroye area (Senegal). *Environmental Geology*, 45: 312-322.

Gaye A.T., Mbaye ML., Ndiaye O., 2017. Elaboration des scénarios climatiques dans le cadre du volet adaptation de la Contribution Déterminée au niveau National.

Mbow C., Diop A., Diaw A.T., Niang C.I., 2018. « Urban sprawl development and Flooding at Yeumbeul Suburb (Dakar, Senegal) », *African Journal of Environmental Science and Technology*, vol.4: 75-88.

Sagna et al., 2015. « Les variations récentes du climat constatées au Sénégal sont-elles en phase avec les descriptions données par les scénarios du GIEC ? » In *Pollution Atmosphérique* N°227 - Octobre - Décembre 2015

Sané Y., 2013. « La politique de l'habitat au Sénégal : une mutation permanente », *Les Cahiers d'Outre-Mer*, 263 | 2013, 311-334.

Truong P., Van T. T., Pinners E., 2009. Application du système vétiver manuel technique. 1e éd. Réseau international du vétiver, 103 p.

UrbaMonde, 2012. Programme de Mitigation des Inondations de Thiaroye, Dossier gestion intégrée, Diane von Gunten

Vernière M., 1973. Pikine, « ville nouvelle » de Dakar. In: Espace géographique, tome 2, n°2, 1973. pp. 107-126.

Rapports

ANACIM, 2017. Élaboration de scénarios climatiques dans le cadre du volet adaptation de la Contribution Déterminée au niveau National (CDN). Rapport provisoire. Ministère de l'environnement et du développement durable. Direction de l'environnement et des établissements classés.

Diallo B., 2009. Rapport analytique provisoire. Élaboration d'une méthodologie de cartographie des risques d'inondation et application à l'échelle régionale à la région de Dakar. Projet d'appui au programme national de prévention, de réduction des risques majeurs et de gestion des catastrophes naturelles au Sénégal dans le contexte de la réduction de la pauvreté. Ministère de l'intérieur du Sénégal, DPC.

Gouvernement (République) du Sénégal, Banque Mondiale 2010, « Rapport d'évaluation des Besoins Post Catastrophe. Inondations urbaines à Dakar en 2009 », Rapport préparé par le gouvernement de la République du Sénégal avec l'appui de la Banque Mondiale, du système des Nations Unies et de la Commission Européenne, Rapport final, Juin 2010, 191p.

JICA, 2016. Plan Directeur d'Urbanisme de Dakar et ses environs, Horizon 2035, Situation actuelle de la zone d'étude. Rapport final, chapitre 03, 186 p.

Cabinet Merlin, Senagrosol, Avant-projet détaillé pour la mobilisation de ressources en eau alternatives dans la région de Dakar, 2008

Pigeon J. L., 1999. Projet d'approvisionnement en eau potable à long terme, Rapport définitif, Dakar, 203p.

Soumaré S., 2012. Etude de vulnérabilités selon le genre et le rôle des femmes dans la lutte contre les inondations à Djiddah Thiaroye Kao. Rapport final Projet INTAC, Ministère de l'écologie et de la protection de la nature.

Tandia A., Deme I., Sarr M., 2004. Aquifère superficiel et pollution urbaine en Afrique. Rapport final du Sénégal, UNEP / UNESCO / UN-HABITAT / ECA

Travaux universitaires

Barbe A. et al., 2017. « Une analyse de la gestion des eaux pluviales au Sénégal ». Rapport d'analyse réalisé dans le cadre du projet EPUR, Gret

Diop M.S., 2019. Les capacités adaptatives des communautés de la périphérie de Dakar face aux inondations (thèse de doctorat : Université Paris-Saclay)

Articles en ligne

Borderon M., Oliveau S., 2016. « Vulnérabilités sociales et changement d'échelle », Espace populations sociétés [Online], 2016/3

Ndao S., Diaw E. H. B., Tamba S., & Wade M., (2015). La nappe de «Thiaroye» au Sénégal: une ressource en eau encore utilisable ? Vertigo, <https://vertigo.hypotheses.org/2033>

