



# Impacts du changement climatique dans le bassin du fleuve Sénégal: une évaluation spatiale de la vulnérabilité



Commandée par





# Impacts du changement climatique dans le bassin du fleuve Sénégal: une évaluation spatiale de la vulnérabilité

A&W-rapport 2253

---

**Altenburg & Wymenga conseillers écologiques:**

I.S. Mettrop  
E. Wymenga  
E. Klop  
M. Bekkema

**Potsdam Institute for Climate Impact Research:**

S. Fournet

**Université d'Amsterdam :**

*Students:*

E.S. Rentier (student)  
R. Bossen (student)  
C. Juijn (student)

*Supervisor:*

A.C. Seijmonsbergen

**Front cover**

Compilation de photographies de la première mission, Ivan Mettrop

**I.S Mettrop, E. Wymenga, E. Klop, M. Bekkema 2019.**

Impacts du changement climatique dans le bassin du fleuve Sénégal: une évaluation spatiale de la vulnérabilité.

A&W-rapport 2253, Altenburg & Wymenga conseillers écologiques, Feanwâlden.

**Commandée par:****Organisation pour la Mise en  
Valeur du Fleuve Sénégal (OMVS)**

Immeuble OMVS

Rocade Fann Bel-air Cerf-volant

Boîte Postale: 3152 Dakar-Fann,

Sénégal

**Effectuée par:****Altenburg & Wymenga  
ecologisch onderzoek bv**

Postbus 32

9269 ZR Feanwâlden

Telefoon 0511 47 47 64

Fax 0511 47 27 40

info@altwym.nl

[www.altwym.nl](http://www.altwym.nl)

© Altenburg & Wymenga ecologisch onderzoek bv. Overname van gegevens uit dit rapport is toegestaan met bronvermelding.

**Projectnummer**

2819

**Projectleider**

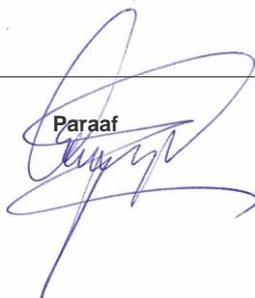
I. Mettrop

**Status**

Rapport final

**Autorisatie**

approuvé

**Paraaf****Datum**

15-11-2019

**Kwaliteitscontrole**

E. Wymenga

## Conten

---

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>1</b>
1.1	Cadre de l'étude	1
1.2	Portée et objectifs de cette étude	3
<b>2</b>	<b>Zone d'étude</b>	<b>5</b>
2.1	Le bassin du fleuve Sénégal	5
2.2	Zone d'étude: Vallée du fleuve Sénégal	5
2.3	Précipitations	7
2.4	Gestion de l'eau	8
2.5	Services écosystémiques	10
<b>3</b>	<b>Changement climatique dans le Bassin du Sénégal</b>	<b>13</b>
3.1	Introduction	13
3.2	Résultats	15
3.3	Résumé des conclusions	21
<b>4</b>	<b>Dynamique et disponibilité de l'eau</b>	<b>22</b>
4.1	Niveaux d'eau et débits dans le fleuve	22
4.2	Disponibilité spatiale de l'eau du fleuve	24
4.3	Corrélations entre les caractéristiques du fleuve et l'inondation	30
4.4	En conclusion	36
<b>5</b>	<b>Ressources naturelles, occupation des sols et services écosystémiques</b>	<b>37</b>
5.1	Approche Générale	37
5.2	Cartographie de l'occupation du sol	37
5.3	Combinaison des cartes des eaux et des cartes d'occupation du sol	44
5.4	Conclusion	48
<b>6</b>	<b>Les mécanismes d'impact du changement climatique</b>	<b>51</b>
6.1	Introduction	51
6.2	L'impact sur le système hydrologique	53
6.3	Impact sur la sécurité alimentaire: agriculture	56
6.4	Impact sur la sécurité alimentaire: élevage	59
6.5	Impact sur les services écosystémiques	61
6.6	Augmentation des concurrences et conflits potentiels croissants	65
<b>7</b>	<b>Options d'adaptation au climat</b>	<b>67</b>
7.1	Introduction	67
7.2	Maintenir une inondation artificielle	67
7.3	Développement et test de cultures résistantes à la sécheresse	69
7.4	Stimuler l'agroforesterie	71
7.5	Adaptation locale	72
7.6	Autres possibilités d'innovation	73
7.7	Recommandations	75
	<b>References</b>	<b>79</b>
	<b>Appendix A: Rapport de mission 20-26 février 2018</b>	<b>84</b>
	<b>Appendix B: Rapport de mission 10-17 décembre 2018</b>	<b>96</b>

## **Remerciements**

Nous remercions l'OMVS Sénégal pour le support et les commentaires tout au long de ce projet. Mr. Fawzi Bedredine and mr. Lamine Ndiaye sont reconnus pour leur soutien organisationnel et substantif pendant l'étude. En plus, nous remercions Mme Aram Ngom Ndiaye et m. Ibrahima Samba Ba (tous OMVS) et Teun Smink (A&W) pour le support, les idées et la discussion lors des visites sur le terrain, et mme Maha Sall (OMVS) pour le grand ensemble de données hydrologiques. Au cours de l'étude, nous avons également eu des discussions fructueuses avec m. R. Drost et mr. E. Kuindersma de Waterschap Rivierenland (Pays-Bas).

De plus, nous avons reçu des informations et des données précieuses du Centre de Documentation et des Archives (CDA) de l'OMVS et de la Société Nationale d'Exploitation des Terres du Delta du Fleuve Sénégal (S.A.E.D.).

## Résumé

Le fleuve Sénégal est une artère vitale des communautés locales, des écosystèmes et de l'économie rurale dans le bassin du fleuve en Mauritanie, au Sénégal, au Mali et en Guinée. Une grande partie du bassin du Sénégal est située dans le Sahel, où les précipitations annuelles sont variables et imprévisibles. Par conséquent, les changements climatiques ont un impact majeur sur la disponibilité de l'eau dans cette région.

L'OMVS reconnaît que les changements climatiques constituent un défi de taille pour le futur proche et qu'une connaissance approfondie des impacts des changements climatiques (futurs) est nécessaire pour optimiser la gestion intégrée de l'eau. L'OMVS a mis en place, en 2017, la composante "Planifier la résilience du bassin au changement climatique" dans le programme PGIRE II (Projet de gestion intégrée des ressources en eau et de développement des usages multiples du bassin du Fleuve Sénégal). Dans ce cadre, la vulnérabilité du bassin au changement climatique est évaluée dans cette étude afin de mieux comprendre les conséquences spatiales pour l'occupation du sol et les services écosystémiques. Sur la base d'analyses spatiales de la disponibilité de l'eau et de l'occupation des sols, cette étude propose des options d'adaptation.

### Changements climatiques dans le bassin du Sénégal

À l'échelle mondiale, le changement climatique est devenu l'un des plus grands défis à venir. Depuis des années, il figure parmi les priorités de la société. L'Afrique, en particulier les parties arides du continent, fait partie des régions les plus vulnérables au monde. Dans cette étude les connaissances actuelles et les incertitudes concernant les changements climatiques attendus dans le bassin du Sénégal sont résumées, sur la base des modèles et des résultats les plus récents disponibles (Chapitre 3). Trois conclusions principales peuvent être tirées:

- 1) Les prévisions de changement de température en Afrique de l'Ouest pour la fin du 21<sup>e</sup> siècle sont comprises entre +3°C et +6°C par rapport à la fin du 20<sup>e</sup> siècle. Cette augmentation de température conduira irrévocablement à un degré plus élevé d'évaporation locale, faisant du bassin du Sénégal une zone sensible au changement climatique.
- 2) Dans le bassin du fleuve Sénégal, il n'y a pas de consensus pour une augmentation ou une diminution moyenne des précipitations pour quelque terme ou scénario que ce soit. Cependant, il y aura plus de variation entre les années, une intensification des événements pluvieux et des changements dans le calendrier et la durée de la période des pluies.
- 3) Dans les hauts plateaux guinéens (en amont), les précipitations diminueront probablement. Ces hauts plateaux constituent la tête de source du fleuve Sénégal et une diminution des précipitations dans cette région aura probablement un effet sur les taux de débit du fleuve Sénégal

### Options d'adaptation au climat

Sur la base d'une analyse spatiale de la gestion de l'eau (Chapitre 4), de l'occupation des sols (Chapitre 5) et des mécanismes de changement climatique pertinents pour le bassin du Sénégal (Chapitre 6), nous avons identifié plusieurs mesures d'adaptation au climat, d'échelles spatiales et temporelles différentes. Par exemple, des mesures hydrologiques importantes peuvent être prises au niveau du bassin qui affecte toute la vallée. En outre, il existe plusieurs options d'adaptation pertinentes aux niveaux régional et local, qui peuvent être très utiles, en particulier pour l'agriculture et l'élevage.

Les options (Chapitre 7) sont résumées ici. Celles-ci peuvent constituer une contribution importante au dialogue avec les communautés locales et les parties prenantes:

- Des inondations annuelles pendant la saison des pluies sont nécessaires pour garantir à la fois les services écosystémiques et de régulation du fleuve, aussi bien à l'avenir, en particulier dans les zones qui ne sont pas directement connectées au fleuve;
- Les inondations annuelles sont essentielles pour maintenir les eaux souterraines à un niveau élevé et prévenir les problèmes liés à la sécheresse à long terme.
- Pour les cultures de décrue, les pâturages et la biodiversité, un régime d'inondation artificielle serait bénéfique en termes de la disponibilité directe de l'eau et des sédiments riches en nutriments fournis par le fleuve;
- Permettre des niveaux d'eau d'au moins 3,5 mètres pendant la période de pluie serait favorable du point de vue de l'adaptation au climat dans les parties les plus arides de la moyenne vallée.

Sur la base de cette étude et des discussions au cours de l'étude avec les parties prenantes, les agriculteurs locaux et les experts de l'OMVS, nous aboutissons aux recommandations suivantes:

- Pour quantifier l'impact du changement climatique, il est recommandé d'utiliser un modèle hydrodynamique dans lequel les scénarios climatiques actuels et futurs les options de gestion sont incluses. Un tel modèle sera déterminant pour développer des stratégies de gestion de l'eau adaptables pour la moyenne vallée;
- Des inondations pendant la saison des pluies sont nécessaires pour garantir les services écosystémiques aussi bien que possible à l'avenir. Pour les cultures de décrue, les pâturages et la biodiversité, un régime d'inondation artificiel imitant les inondations naturelles est nécessaire ;
- Il est important de mieux comprendre la présence spatiale des cultures de décrue, cultures irriguées, des forêts et savanes boisées inondées sur l'ensemble de la moyenne vallée. Cette étude a fourni un premier aperçu, mais il existe un besoin d'informations spatiales plus détaillées et d'une vérification précise;
- La hausse des températures menacera les rendements des cultures. En conséquence, des changements transformationnels sont nécessaires. Il est important de lancer des programmes de recherche axés sur les cultures résistantes à la sécheresse, sur les modifications des dates de plantation et de semis dans le calendrier agricole, et sur le potentiel de l'agroforesterie. Les projets pilotes pourraient être réalisés sous la forme de fermes expérimentales, similaires au concept de Fermes Agricoles Communautaires Intégrées (FACI).

# 1 Introduction

---

*Le fleuve Sénégal est une artère vitale des communautés locales, des écosystèmes et de l'économie rurale dans le bassin du fleuve en Mauritanie, au Sénégal, au Mali et en Guinée. Une grande partie du bassin du Sénégal est située dans le Sahel, où les précipitations annuelles sont variables et imprévisibles. Par conséquent, les changements climatiques ont un impact majeur sur la disponibilité de l'eau dans cette région. Sur la base d'analyses spatiales de la disponibilité de l'eau et de l'occupation des sols, cette étude évalue la vulnérabilité de la basse et moyenne vallée du bassin du fleuve Sénégal au changement climatique et propose des options d'adaptation.*

## 1.1 Cadre de l'étude

Une gestion intégrée de l'eau du fleuve Sénégal est essentielle étant donné les ressources en eau limitées dans le Sahel. Cette tâche importante est réalisée par l'Organisation pour la Mise en Valeur du fleuve Sénégal (OMVS). L'OMVS représente les intérêts des quatre États membres (Mauritanie, Sénégal, Mali et Guinée) et assure la gestion de l'eau du fleuve Sénégal, telle que formulée dans le Schéma Directeur pour l'aménagement et la gestion des eaux du fleuve Sénégal (SDAGE, horizon 2025). Ce schéma fournit une vision globale et un cadre pour le développement et la gestion de l'eau dans le bassin. L'OMVS veille à ce que l'eau soit répartie entre les différents secteurs et serve la croissance économique et la stabilité politique de la région. L'OMVS contribue ainsi à réduire la vulnérabilité de l'approvisionnement en nourriture et des moyens de subsistance des populations rurales des États membres. L'OMVS reconnaît que les changements climatiques constituent un défi de taille pour le futur proche et qu'une connaissance approfondie des impacts des changements climatiques (futurs) est nécessaire pour optimiser la gestion intégrée de l'eau.

Dans le cadre de la coopération bilatérale à long terme entre le Sénégal et les Pays-Bas, un programme de gestion intégrée de l'eau a été mis en place en 2007 (PGIRE: Projet de gestion intégrée des ressources en eau et de développement des usages multiples du bassin du Fleuve Sénégal). Le PGIRE est un programme multisectoriel visant à renforcer l'intégration régionale dans les quatre États membres et à améliorer les moyens de subsistance des populations du bassin. La première phase (PGIRE I) s'est déroulée de 2007 à 2013 et la seconde phase a ensuite démarré sur la période 2014-2020 (PGIRE II)<sup>1</sup>. Les objectifs de PGIRE II sont doubles:

- Soutenir le développement des diverses utilisations de l'eau dans le bassin du fleuve Sénégal de manière concertée entre les pays membres de l'OMVS;
- Renforcer la capacité de l'OMVS à prendre en compte le changement climatique dans le développement et la gestion concertés des ressources en eau dans le bassin du fleuve Sénégal.

Dans le PGIRE II, l'OMVS a mis en place la composante "Planifier la résilience du bassin au changement climatique" en 2017. Une première étude dans ce contexte a été réalisée par Artelia (2018), concernant une évaluation de la vulnérabilité du bassin du fleuve Sénégal au changement climatique et un plan d'ajustement et de renforcement de la résilience du bassin.

---

<sup>1</sup> PGIRE II est soutenu par le Fonds fiduciaire III, géré par la Banque Mondiale. Le fonds a été créé pour soutenir la capacité institutionnelle de l'OMVS et améliorer les conditions environnementales et la qualité de l'eau dans le bassin du fleuve Sénégal. Le «Waterschap Rivierenland» (Office de l'eau) néerlandais a une fonction consultative.

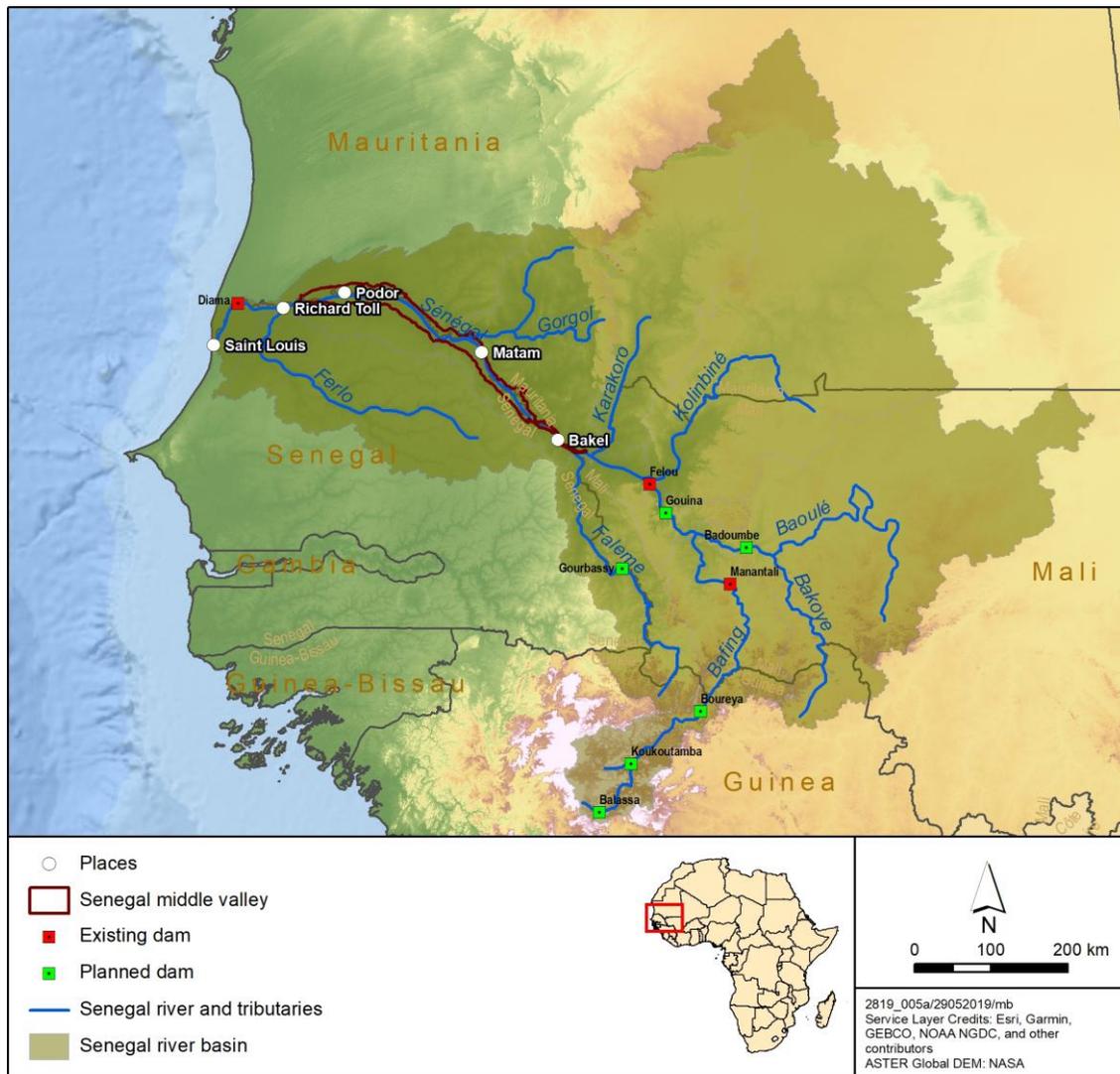


Figure 1.1. Le fleuve principal et ses affluents du bassin du fleuve Sénégal et de son bassin versant, couvrant une partie de la Guinée, du Mali, de la Mauritanie et du Sénégal.

Une prochaine étape dans l'évaluation de la vulnérabilité du bassin au changement climatique consiste à fournir des informations sur les conséquences spatiales pour l'occupation du sol et les services écosystémiques. La présente étude aborde ce défi en utilisant une approche spatiale. Nous nous concentrons sur les modifications spatiales de la disponibilité de l'eau et de l'occupation du sol, en particulier dans les basses et moyennes vallées, résultant des changements climatiques anticipés. La connaissance combinée des deux études - Artelia (2018) et la présente étude - peut être utilisée pour formuler des mesures pour le plan d'investissement pour les années à venir.

## 1.2 Portée et objectifs de cette étude

### Portée géographique

La caractérisation des impacts du changement climatique sera réalisée sur l'ensemble du bassin du fleuve Sénégal. Le noyau de l'étude se situe toutefois dans la basse et moyenne vallée, où l'état et la production de ressources naturelles dépendent fortement de la disponibilité de l'eau. Les impacts climatiques sur les massifs du Fouta Djallon (Guinée) et de la région de Manantali (Mali) sont pris en compte dans cette étude au niveau global.

Le travail de terrain dans le cadre de l'étude s'est concentré sur la moyenne vallée située entre Podor et Matam, où l'on a examiné le lit principal du fleuve Sénégal. Nous définissons la moyenne vallée comme la vaste plaine alluviale située entre le delta du Sénégal à l'ouest et Bakel à l'est. Cette zone a une longueur d'environ 400 km et une largeur maximale de 25 km.

### Objectifs

L'objectif général de cette étude est de caractériser les impacts du changement climatique sur l'environnement et les ressources naturelles du bassin du fleuve Sénégal, et en particulier de la vallée moyenne. Plus spécifiquement, les objectifs de cette étude étaient de:

1. Définir les effets possibles du changement climatique sur les précipitations et la dynamique du fleuve;
2. Traduire les conséquences des changements dans la disponibilité de l'eau en changements potentiels dans les ressources naturelles (eau, occupation du sol, écosystèmes, biodiversité) et d'autres services écosystémiques;
3. Donner un aperçu des différentes options d'adaptation au climat, afin de garantir les services écosystémiques liés à l'eau du fleuve dans le bassin du fleuve Sénégal à l'avenir.

Dans le prolongement de l'étude menée par Artelia (2018), qui comprend un exercice de modélisation de l'eau associé à une analyse économique, cette étude adopte une approche spatiale pour étudier l'influence potentielle des changements liés au climat. La présente étude implique une analyse spatiale, y compris des techniques de télédétection, afin de mieux comprendre la disponibilité spatiale de l'eau en lien avec le changement climatique. À l'aide de cartes des eaux, associées à certains niveaux d'eau, et de cartes d'occupation des sols et de types de terrain, des informations très utiles ont été obtenues. Cette étude propose une approche pratique précisant l'importance des éventuels changements climatiques pour les parties prenantes, la gestion de l'eau, les ressources naturelles et les fonctions des rivières.

Parallèlement aux recherches menées, une formation réussie a été organisée aux Pays-Bas, au cours de laquelle les employés de l'OMVS ont acquis des compétences précieuses dans le domaine de l'analyse des SIG et de la télédétection.

### Approche de l'étude et présentation du rapport

Dans ce rapport, nous commençons par donner un aperçu concis des caractéristiques du bassin du fleuve Sénégal, en particulier de la basse et moyenne vallée, et des services écosystémiques fournis par le fleuve (Chapitre 2). Dans cette étude, nous utilisons les services écosystémiques comme outil pour spécifier et quantifier l'importance des ressources naturelles pour les communautés locales.

Ensuite, nous discutons des connaissances existantes sur le changement climatique dans la région du bassin du Sénégal et des développements attendus sur la base de modèles climatiques. Des descriptions de scénarios futurs plausibles dans le système de delta du fleuve Sénégal sont également fournies, ainsi que des informations sur l'incertitude de ces prévisions

(Chapitre 3). L'étude sur le climat est basée sur les connaissances les plus récentes disponibles et spécifiquement pour cette étude fournie par l'Institut pour l'adaptation au climat de Potsdam (*Postdam Institute for Climate Adaptation*).

Afin de pouvoir transférer les changements futurs dans la disponibilité (spatiale) de l'eau résultant des changements dans les précipitations et les débits des rivières en raison du changement climatique, nous avons entrepris une étude spatiale de la relation entre les débits des rivières et les inondations dans la basse et la moyenne vallée. Le Chapitre 4 présente les résultats. Il s'agit d'un aperçu de la dynamique actuelle et historique du fleuve et de la disponibilité annuelle récurrente de l'eau, à la fois quantitative et spatiale, à l'aide de techniques de télédétection.

Pour comprendre comment et de quelle manière l'occupation du sol et les services écosystémiques pourraient être affectés par le changement climatique en raison de l'élévation de la température et de la disponibilité de l'eau, il est nécessaire de broser un tableau fidèle de ces services dans la zone d'étude. Sur la base de deux missions sur le terrain et d'une analyse approfondie par télédétection, nous avons produit un aperçu des types de terrain et des types d'occupation du sol dans la moyenne vallée, y compris une carte produite de l'utilisation des terres. Cette partie de l'étude a été réalisée en étroite collaboration avec l'Institut de la biodiversité et de la dynamique des écosystèmes de l'Université d'Amsterdam. Les résultats sont présentés au Chapitre 5.

L'importance ultime et les implications de la dynamique spatiale des cours d'eau par rapport aux services écosystémiques, en particulier à la lumière des changements climatiques, sont analysées et examinées au Chapitre 6. En outre, différentes options et approches pratiques en matière d'adaptation sont examinées, en fonction des résultats des chapitres précédents. Une synthèse de l'étude et de ses résultats les plus importants est présentée au Chapitre 7. Ce chapitre identifie également les lacunes dans les connaissances.

## 2 Zone d'étude

---

*En guise d'introduction à la zone d'étude, ce chapitre fournit une brève caractérisation du bassin du fleuve Sénégal, de la basse et moyenne vallée en tant que zone d'étude, des ressources en eau et des développements importants. En outre, nous décrivons de manière succincte la gestion de l'eau et les services écosystémiques dans la zone d'étude et le lien avec le changement climatique.*

### 2.1 Le bassin du fleuve Sénégal

Le fleuve Sénégal est l'un des plus grands fleuves d'Afrique de l'Ouest. Le fleuve a une longueur de 1800 km et draine un bassin versant de 34300 km<sup>2</sup> en moyenne, traversant la Guinée, le Mali, la Mauritanie et le Sénégal (Figure 1.1). Le fleuve traverse différentes zones climatiques et écosystèmes. La branche principale du fleuve Sénégal est le Bafing, originaire des montagnes du Fouta Djallon, au centre de la Guinée, où les précipitations annuelles dépassent 2 000 mm. Près de la moitié du débit du fleuve Sénégal dépend du Bafing (Zwarts et al., 2009). L'autre affluent, la rivière Bakoye, prend sa source sur le plateau mandingue de l'ouest du Mali, à environ 250 km à l'est. Le Bakoye représente près du quart du débit total du fleuve.

Le fleuve Sénégal traverse les savanes boisées sèches du Mali et les paysages arides du Sahel, où les précipitations annuelles ne dépassent pas 300 mm. Environ la moitié du bassin est située en Mauritanie, où les précipitations sont très limitées. Le fleuve accumule le débit de plusieurs autres affluents plus petits, tels que les rivières Gorgol, Karakoro, Kolimbine, Falémé et Ferlo. Le fleuve Sénégal atteint l'océan Atlantique à Saint-Louis, au Sénégal.

De juillet à octobre, le fleuve Sénégal est caractérisé par de hauts niveaux d'eau. La saison des basses eaux s'étend de décembre à juin. Les pluies de mousson dans le haut bassin pendant la saison des pluies sont le principal facteur à l'origine de ces fluctuations importantes des niveaux d'eau et des débits. En aval de Bakel, le fleuve pénètre dans la moyenne vallée. De là, le fleuve coule sur environ 800 kilomètres jusqu'à son embouchure, avec un très faible angle d'inclinaison d'environ 0,0015% (Bader & Albergel 2015). Chaque année, le cycle naturel des inondations inonde de vastes zones des plaines inondables. Dans la vallée, ces inondations annuelles peuvent couvrir un lit important de 10 à 20 kilomètres de large, ce qui peut être considéré comme un delta intérieur. Ces inondations fournissent des services écosystémiques précieux, profitant aux communautés riveraines. Par conséquent, les activités d'occupation des sols dépendant des ressources en eau sont fortement influencées par les variations majeures de la dynamique des cours d'eau. L'eau du fleuve Sénégal est essentielle pour l'approvisionnement en eau potable des grandes villes de Dakar et de Nouakchott et constitue la base de secteurs importants tels que l'agriculture, l'élevage, la pêche et la production d'énergie. En outre, divers services écosystémiques dépendent fortement de la disponibilité de l'eau.

### 2.2 Zone d'étude: Vallée du fleuve Sénégal

La caractérisation des impacts du changement climatique concerne l'ensemble du bassin du fleuve Sénégal. Cette étude se concentre toutefois sur le lit du fleuve dans la basse et la moyenne vallée, où les ressources naturelles, les écosystèmes et l'occupation du sol

dépendent fortement de la disponibilité de l'eau. La moyenne et la basse vallée traitées dans cette étude englobent à peu près le lit du fleuve entre Bakel (en amont) et Richard-Toll (en aval). Il comprend deux affluents, le Falémé et le Karakoro. La zone comprend les régions de Tambacounda, Matam, Saint-Louis au Sénégal, Guidimakha, Gorgol, Brakna et Trarza en Mauritanie et Kayes au Mali.

La vallée du fleuve comprend le lit du fleuve d'une largeur de 2 à 3 km à Bakel et de 15 à 22 km en direction de Podor (Figure 1.1). La largeur maximale du lit du fleuve est d'environ 26 km. Une grande partie du lit du fleuve est inondée pendant la saison des inondations, en fonction du débit du fleuve et des précipitations locales (chapitre 4). Ballou (au sud de Bakel), Matam, Kaédi, Podor et Dagana sont d'importants villages proches du lit du fleuve. Sur la rive gauche (Sénégal), on accède à la vallée par un itinéraire principal (Kidira - Richard Toll), et sur la rive droite (Mauritanie), un itinéraire principal relie Kaédi à Boghé. En général, le lit du fleuve est bordé, tant du côté sénégalais que du côté mauritanien, par des levées de sable plus hautes. Le lit du fleuve est partiellement inondé pendant la saison des inondations.

La basse et moyenne vallée est une zone rurale où le fleuve Sénégal et son lit jouent un rôle central dans l'approvisionnement en eau, l'agriculture, la pêche et d'autres activités économiques. La densité de population varie selon les régions (Figure 2.1). La région est en plein développement avec des agglomérations en expansion autour de grands villages ruraux: routes et marchés, mais aussi infrastructures d'alimentation en eau et en électricité, écoles et structures de santé (GRDR 2014).

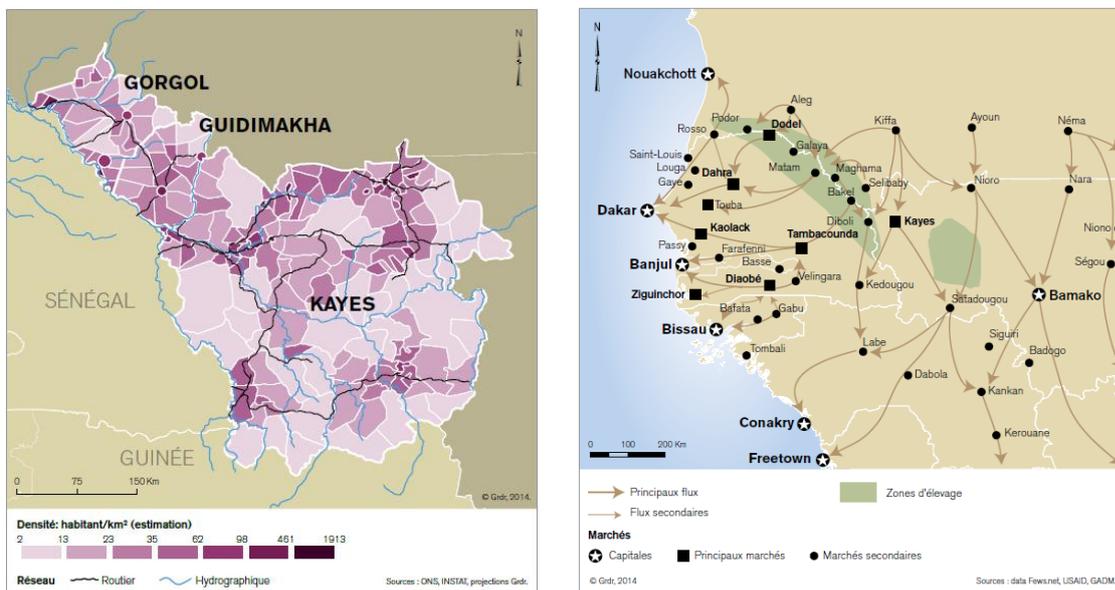


Fig. 2.1. Densité de population dans trois régions de la moyenne vallée (à gauche) et aperçu des principales zones d'élevage et de mouvements de bétail dans la région. Source: GRDR (2014).

L'agriculture et l'élevage sont des éléments clés de l'économie rurale (GRDR 2014). L'élevage est très important dans la région, en particulier dans le Ferlo (nord-est du Sénégal) et les zones situées au nord du fleuve Sénégal, en Mauritanie. Les pâturages inondés près du fleuve sont essentiels pour que les pasteurs locaux gardent leurs troupeaux pendant la saison sèche. Le long du fleuve Sénégal et dans tout le Sahel, les pasteurs nomades se dispersent avec leur bétail loin du bassin pendant la saison des pluies et retournent dans les plaines inondables pendant la saison sèche (DeGeorges & Reilly, 2006). Au fil du temps, l'intensité du pâturage a

considérablement augmenté, notamment avec l'introduction de forages, ce qui a entraîné une surexploitation et des modifications du paysage (Zwarts et al. 2018).

### 2.3 Précipitations

Les précipitations dans le bassin du Sénégal montrent un gradient distinct nord-sud. À la source du fleuve dans les hauts plateaux guinéens, les précipitations dans le bassin du Sénégal dépassent 1400 mm par an. Le lieu où les rivières Bafing et Bakoye jaillissent de la Guinée et du sud du Mali, les quantités de précipitations restent supérieures à 850 mm par an. Peu de temps après leur rencontre pour former le fleuve Sénégal, au nord du réservoir de Manantali, les précipitations diminuent jusqu'à moins de 500 mm par an, un niveau auquel l'agriculture pluviale devient difficile. Environ la moitié du bassin du Sénégal est située en Mauritanie, où les précipitations sont encore plus faibles. Dans la région des affluents du Gorgol, du Karakoro et de la Kolimbine en Mauritanie, les précipitations annuelles moyennes sont inférieures à 140 mm par an (Figure 2.2).

Les précipitations au Sahel sont très variables selon les saisons (Fig. 2.3), les années et les décennies. Au cours des grandes sécheresses des années 1970 et 1980, toutefois, cette répartition des précipitations s'est déplacée vers le sud. Après les longues sécheresses des

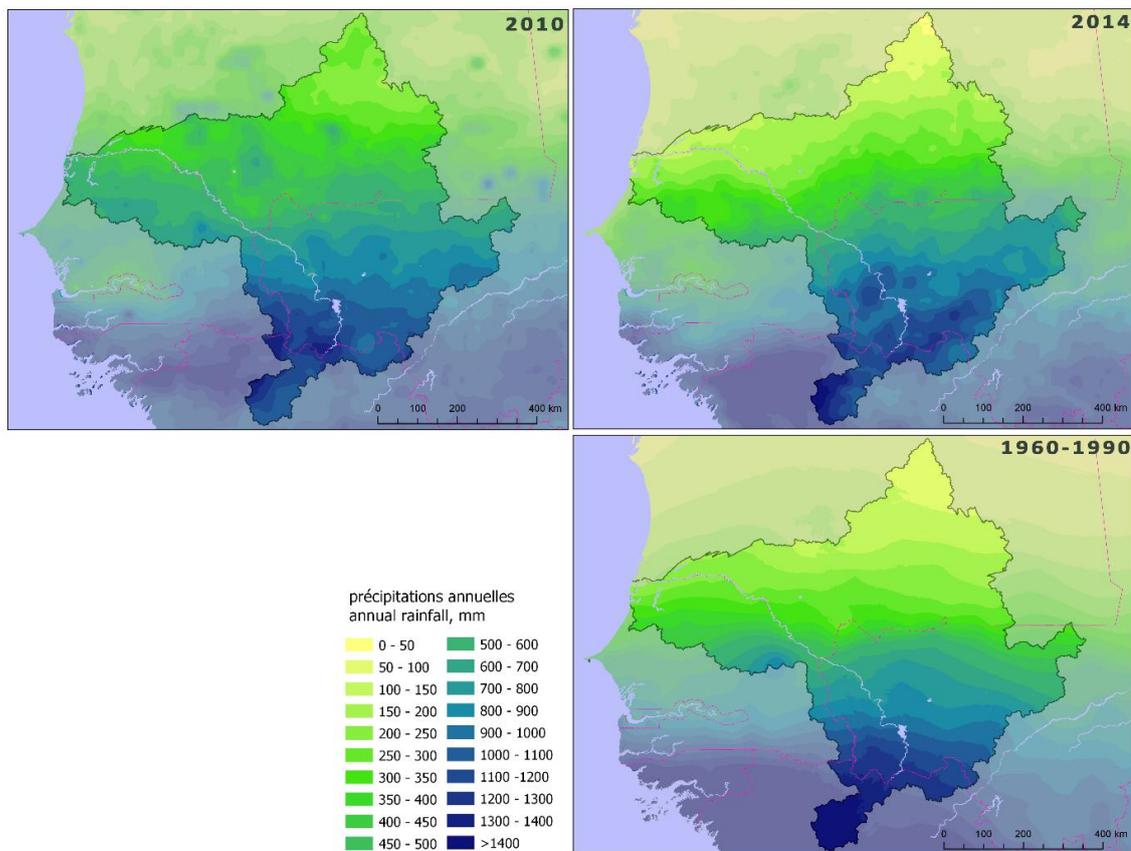


Fig. 2.2. Estimation des précipitations annuelles par satellite (FEWS) pour une année humide (2010) et une année sèche (2014) et la pluviométrie moyenne calculée pour une période de 30 ans (mesures au sol en 1960-1990) dans le bassin du Sénégal.

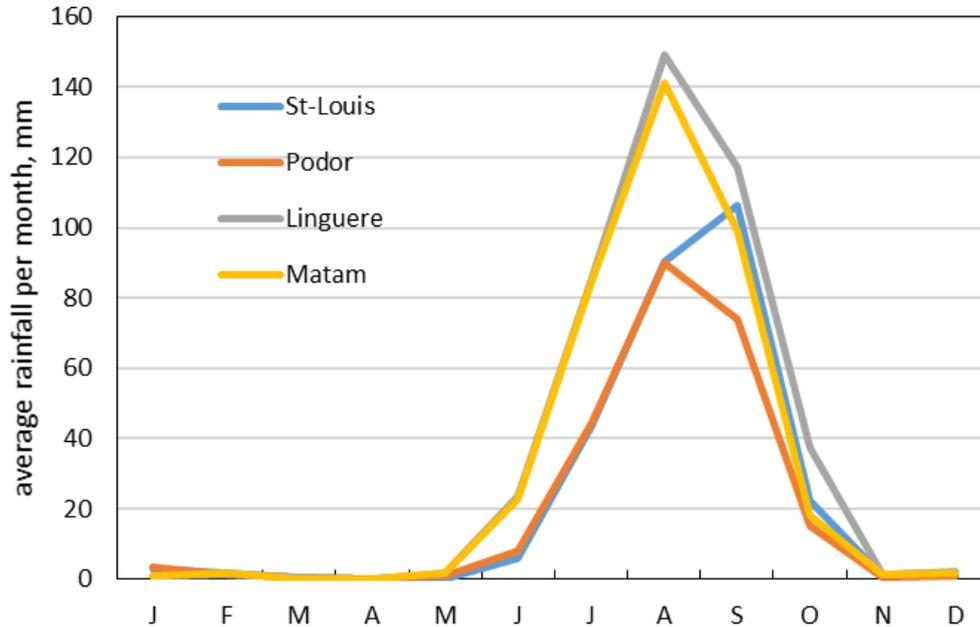


Fig. 2.3. Les précipitations moyennes mensuelles pour 4 stations météorologiques: Linguère, Matam, Podor et Saint-Louis. Les valeurs moyennes sont calculées pour une période de 60 ans (1956-2016).

années 70 et 80, les précipitations semblent se redresser au cours des deux dernières décennies, 2010 étant l'année la plus humide depuis 1958 (Sanogo et al. 2015; Zwarts et al. 2018; Fig. 2.4). La reprise des précipitations semble être principalement due à une intensité accrue des précipitations plutôt qu'à une augmentation du nombre de jours de pluie (Giannini et al., 2013).

Ces dernières années, on a observé un raccourcissement de la saison des pluies, associé à une variation accrue des précipitations. Au cours des quelques mois où il pleut, les précipitations sont plus élevées qu'auparavant (Artelia 2018). Les observations au cours du dernier siècle indiquent une diminution des précipitations de 10 à 15 mm par décennie et un raccourcissement de la période des pluies (USAID, 2018).

## 2.4 Gestion de l'eau

Les périodes de sécheresse aiguë des années 1970 et 1980 («La Grande Sécheresse») ont créé un besoin de gestion active de l'eau dans le bassin. La construction de deux barrages, à savoir le barrage de Diama dans le nord du Sénégal (achevé en 1986) et le barrage de Manantali dans l'ouest du Mali (achevée en 1988) ont entraîné des changements majeurs dans la dynamique hydrologique du fleuve Sénégal. Avant la construction des barrages, les niveaux d'eau suivaient l'impulsion des inondations générée par les précipitations dans le bassin versant. Il pourrait y avoir d'énormes variations de taille, de hauteur et de durée des inondations (Zwarts et al. 2009). Avant la construction des barrages, une superficie moyenne de 459 000 ha était inondée chaque année des deux côtés de la rive (DeGeorges & Reilly 2006, Zwarts et al. 2009), dont 15 000 à 150 000 ha pourraient être utilisés pour les cultures de décrue, en fonction des inondations (National Research Council, 2003).

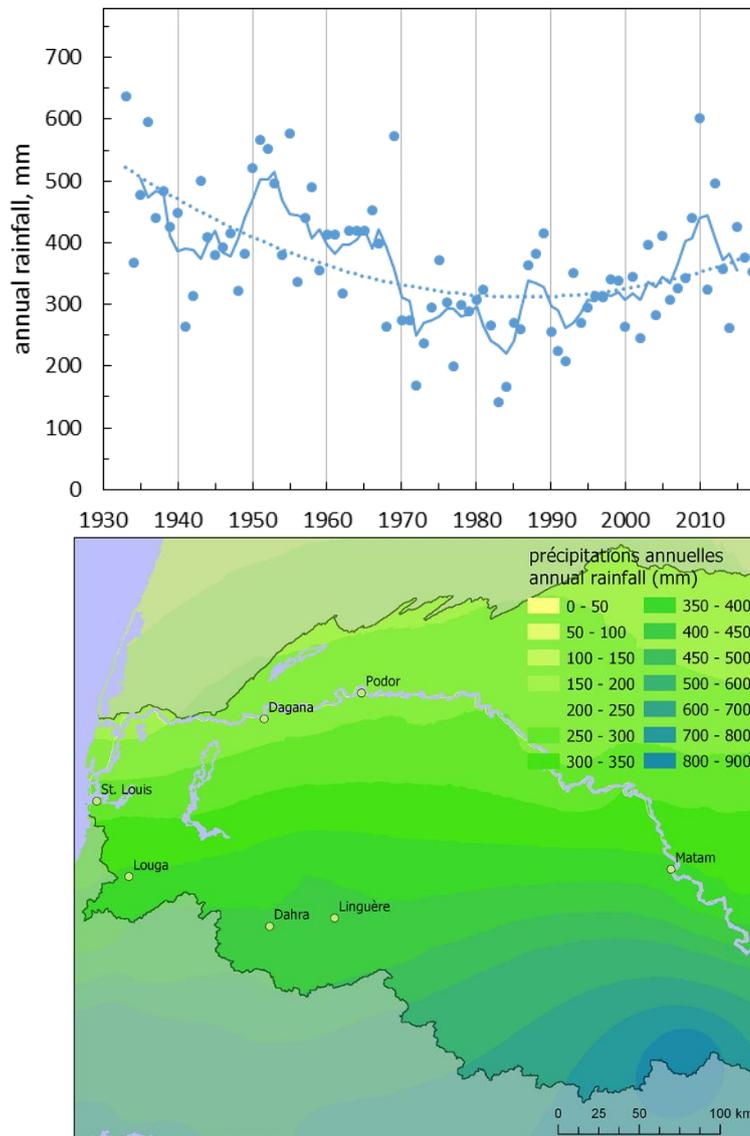


Fig. 2.4. Les précipitations annuelles moyennes dans le nord du Sénégal sont calculées pour 7 stations météorologiques: Dagana, Dahra, Linguère, Louga, Matam, Podor et Saint-Louis (1933-2018). Les estimations corrigées des précipitations mensuelles calculées par satellite ont été remplacées par le manque de données ces dernières années. Trait plein: moyenne mobile calculée sur une période de 5 ans; ligne pointillée: polynôme du second degré. La carte montre les sept stations avec les précipitations moyennes dans le bassin du Sénégal en 1960-1990.

Après la construction du barrage de Diama (en aval) et du barrage de Manantali (en amont), les niveaux d'eau sont plus stables toute l'année. La gestion actuelle garantit une impulsion artificielle d'inondation, gouvernée par les lâchées d'eau à Manantali. Les deux barrages ont été construits principalement pour faciliter l'irrigation pendant la saison sèche afin de maximiser l'autosuffisance en production rizicole permanente (Venema et al., 1997). Le barrage de Diama empêche l'intrusion d'eau salée du Delta dans les zones en amont. Le barrage de Manantali fournit la production de l'hydroélectricité. Avec une capacité de rétention de 12 km<sup>3</sup> sur le Bafing (Bader & Albergel, 2015) et une capacité de production de 800 GWH par an (Mietton et

al., 2007), le barrage est conçu pour fournir de l'énergie à trois des États membres de l'OMVS (Sénégal, Mali et Mauritanie).

Le cadre pour la gestion de l'eau de l'OMVS sur le fleuve Sénégal est fourni par le «Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux du Fleuve Sénégal» (SDAGE, horizon 2025). Le SDAGE repose sur l'ambition stratégique des quatre États membres d'assurer la disponibilité de l'eau pour les parties prenantes, tout en adhérant aux principes de la GIRE. Pour la mise en œuvre du SDAGE, il est essentiel d'améliorer les connaissances sur le développement futur du bassin. L'OMVS est bien conscient du fait que le bassin est confronté à des défis majeurs pour répondre à la demande croissante en nourriture, eau et énergie de la part d'une population croissante. Dans le même temps, les ressources naturelles et les services écosystémiques sont en jeu. Le changement climatique a un impact supplémentaire important et interférant (Figure 2.6), aggravant les problèmes associés à la pression humaine (Artelia 2018).

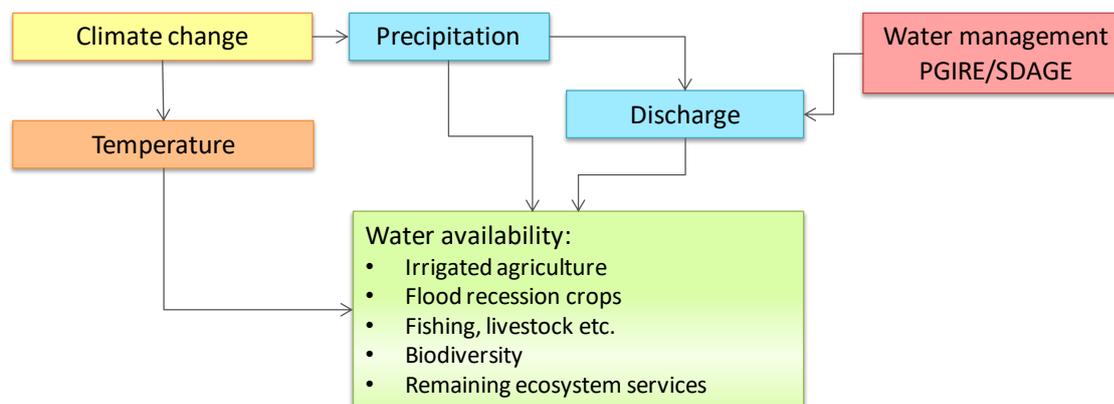


Fig. 2.5. Vue d'ensemble schématique des facteurs déterminant la disponibilité de l'eau dans la moyenne vallée.

## 2.5 Services écosystémiques

L'eau du fleuve Sénégal revêt une importance capitale pour des millions de personnes. Le fleuve est une ressource importante pour la majorité de la population rurale car il nourrit les modes de vie pastoraux, agricoles et piscicoles. 2,7 millions de la population malienne, 1,9 millions d'habitants mauritaniens et 1,5 millions de la population du Sénégal vivent dans le bassin. Depuis toujours, les moyens de subsistance des communautés du bassin dépendent en partie ou en grande partie des ressources du fleuve (p.e. Varis et Lahtela, 2002).

En particulier dans les parties arides du bassin, où les régimes de précipitations varient considérablement d'une année à l'autre et dans une même année, le fleuve est la seule source d'eau sûre. Le fleuve est une ressource clé directe pour le développement en termes d'approvisionnement en eau, de production de poisson, de céréales, de fruits et d'énergie. Ces valeurs d'approvisionnement profitent directement aux habitants des communautés rurales et périurbaines. Le fleuve Sénégal et les zones humides du bassin fournissent toutefois un spectre plus large de services écosystémiques. (Fig. 2.6). Cela représente non seulement des services d'approvisionnement tels que la production alimentaire et l'eau potable, mais également des services de régulation tels que la biodiversité, la durabilité, la résilience des

communautés face aux aléas et l'atténuation des défis futurs tels que le changement climatique (par exemple Finlayson et al., 2018). Dans cette étude, nous nous concentrons principalement sur l'approvisionnement et les services de support. Il convient toutefois de souligner que, pour les communautés riveraines et rurales, les autres services - de régulation et culturels - ont également une grande valeur.

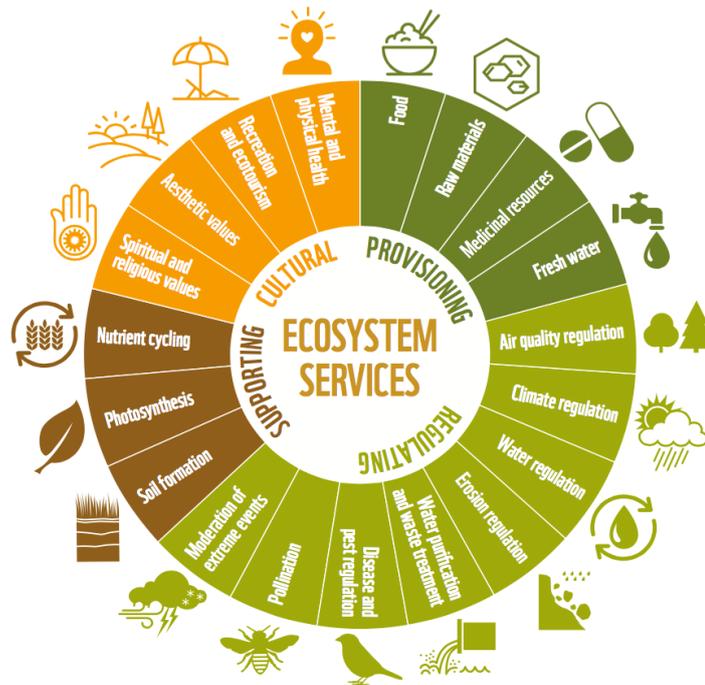


Fig. 2.6. Les écosystèmes qui fonctionnent bien fournissent une gamme de services d'approvisionnement, de régulation, de soutien et culturels. Les services d'approvisionnement sont les produits obtenus à partir d'écosystèmes, les services de régulation sont les avantages tirés de la régulation des processus écosystémiques, les services culturels sont les avantages non matériels que les gens obtiennent des écosystèmes et les services de soutien sont les services nécessaires à la production de tous les autres services écosystémiques. Source WWF (2016), adapté de l'évaluation des écosystèmes pour le millénaire (2005).

### **BOX 1. Le système de circulation de l'air en Afrique de l'Ouest, moteur des saisons**

Les conditions météorologiques en Afrique de l'Ouest sont dictées par la zone de convergence intertropicale (ZCIT), une ceinture de basse pression qui épouse l'équateur. À l'échelle du continent africain, il en résulte des précipitations caractéristiques, avec des conditions très humides autour de l'équateur et une diminution progressive des précipitations au nord et au sud.

En Afrique de l'Ouest, ce **gradient de précipitations** s'étend sur une distance remarquablement courte, y compris le bassin supérieur du Niger et le delta intérieur du Niger. La circulation de l'air autour de l'équateur est le principal moteur de la séquence des précipitations annuelles en Afrique. L'air chaud et humide ascendant immédiatement au nord et au sud de l'équateur est aspiré dans l'itcz et transporté à une altitude de 10 à 15 km plus au nord et au sud de l'équateur. Pour compenser la montée d'air dans la zone de convergence, le flux septentrional descend dans la zone désertique, normalement centrée entre 20 ° et 30 ° N. L'air descendant se réchauffe au fur et à mesure que la pression augmente, devenant sous saturé de vapeur d'eau et conduisant au ciel typiquement clair et à l'aridité générale du Sahara.

Ce **système de circulation d'air**, appelé cellule Hadley, garantit que le vent dominant sur le Sahara, l'Harmattan, souffle toujours du nord-est et non du nord. L'Harmattan, un phénomène bien connu en Afrique de l'Ouest, apporte de l'air sec et poussiéreux au Sahel et plus au sud. Lorsque, pendant l'été nordique, le soleil est suspendu dans le Sahara, une ceinture de basse pression se forme sur le Sahel, entraînant nuages, pluie, orages fréquents et mousson du sud-est.

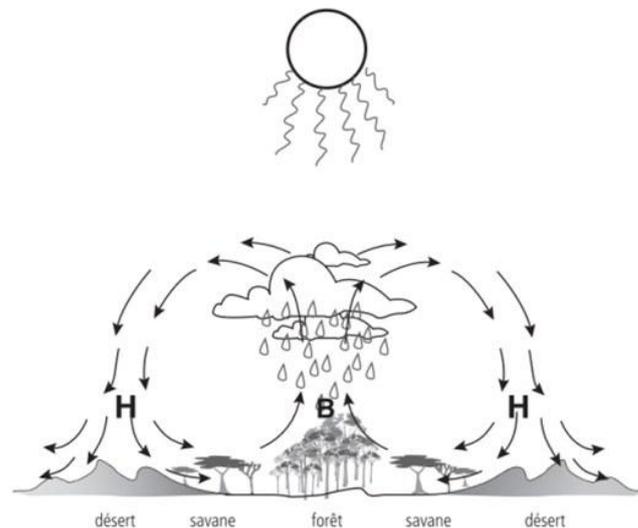


Fig 2.8. Coupe schématique du système de circulation d'air de la zone de convergence intertropicale (ITCZ). B: Zone de basse pression avec air ascendant chaud et humide, H: Zone de haute pression avec air sec relativement descendant, provoquant des vents dominants sur le Sahel (Harmattan). De Beintema et al. (2007).

## 3 Changement climatique dans le Bassin du Sénégal

---

*À l'échelle mondiale, le changement climatique est devenu l'un des plus grands défis à venir. Depuis des années, il figure parmi les priorités de la société. L'Afrique, en particulier les parties arides du continent, fait partie des régions les plus vulnérables au monde. Les projections relatives aux changements climatiques pour cette région indiquent une tendance au réchauffement, une fréquence élevée de chaleur extrême et des variations des précipitations (Serdeczny et al. 2016). Ce chapitre résume les connaissances actuelles et les incertitudes concernant les changements climatiques attendus dans le bassin du Sénégal, sur la base des modèles et des résultats les plus récents disponibles.*

### 3.1 Introduction

La prévision des changements climatiques futurs est une science complexe qui comporte de nombreuses incertitudes. Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) est la principale organisation qui publie périodiquement de nouvelles mises à jour sur les changements climatiques attendus. Celles-ci sont basées sur une combinaison de modèles et de scénarios pour montrer la variation des résultats et le niveau d'incertitude. Afin de mieux comprendre les scénarios possibles pour l'Afrique de l'Ouest, et le bassin du fleuve Sénégal en particulier, l'Institut de recherche sur l'impact du climat de Potsdam (PIK) a mené une analyse spécifique pour cette étude (Fournet, 2018). L'objectif était de fournir des scénarios futurs plausibles pour le bassin du fleuve Sénégal, sur la base des dernières connaissances scientifiques.

Les résultats de l'analyse pour le bassin du fleuve Sénégal sont résumés dans ce chapitre, sur la base du rapport technique de PIK (Fournet, 2018). Toutes les données et tous les textes fournis sont basés sur des informations de pointe communiquées par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). Il existe quatre scénarios couramment utilisées dans les études relatives aux changements climatiques fondées sur les travaux du GIEC; dans l'encadré 2, des informations plus techniques sont fournies. Les quatre scénarios ou RCP (Représentative Concentration Pathways) décrivent différents futurs climatiques, qui sont tous considérés comme possibles en fonction de la quantité de gaz à effet de serre émise dans les années à venir. Par conséquent, le scénario avec la plus faible concentration de gaz à effet de serre (RCP 2.6) montre des changements futurs mineurs, tandis que le scénario avec les taux de concentration les plus élevés (RCP 8.5) indique des changements futurs importants. Les scénarios diffèrent du niveau de prise en compte des mesures d'atténuation (globales).

RCP2.6 - Politique climatique très ambitieuse dans le monde entier, faibles taux de concentration de gaz à effet de serre.

RCP4.5 - nombreuses mesures d'atténuation dans le monde entier, taux de concentration modestes

RCP6.0 - Mesures d'atténuation limitées dans le monde, taux de concentration modérés.

RCP8.5 - pratiquement aucune mesure d'atténuation dans le monde entier, taux de concentration élevés.

Les prévisions de changement climatique se concentrent sur l'évolution de la température et des précipitations dans la région du bassin du Sénégal. Tous les deux ont un impact important

## **BOX 2. Scénarios techniques de base (RCP) pour les futurs changements climatiques**

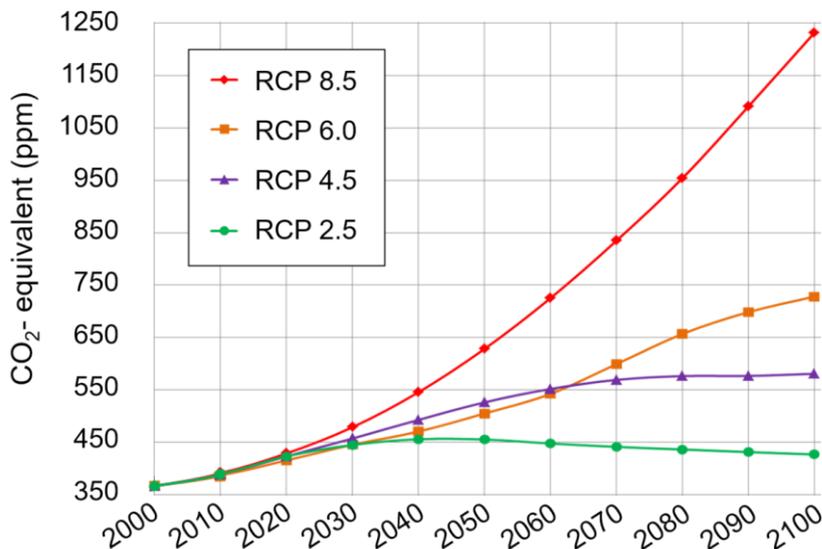
En 2014, le GIEC a finalisé le cinquième rapport d'évaluation (RE5). Des chercheurs du monde entier ont analysé les résultats de modèles afin de développer les résultats de ce RE5 du GIEC. Le projet d'inter-comparaison de modèles couplés (CMIP5) a produit un état des connaissances basé sur un jeu de données multi-modèle. Le CMIP5 comprend des simulations et des projections climatiques à long terme du XXe siècle pour le XXIe siècle et au-delà, à la fois pour les modèles climatiques classiques océan-atmosphère et les modèles de systèmes terrestres. Tout modèle global de CMIP5 utilise en entrée un ensemble de quatre profils de changement de concentration représentatifs (RCP - scénarios). C'est la base des modèles climatiques pour évaluer les impacts climatiques potentiels, les options d'atténuation et les coûts associés.

Les RCP sont des scénarios d'émissions socio-économiques utilisés en climatologie pour fournir des descriptions plausibles de la manière dont l'avenir peut évoluer en fonction de diverses variables, notamment les changements socio-économiques, technologiques, d'utilisation des sols et énergétiques, ainsi que les émissions de gaz à effet de serre et de polluants atmosphériques. Ces RCP sont identifiés par leur forçage radiatif total approximatif pour l'année 2100 par rapport à 1750. En résumé, le forçage radiatif ( $W / m^2$ ) ou le forçage climatique est la différence entre l'ensoleillement (lumière solaire) absorbée par la Terre et l'énergie renvoyée dans l'espace: pour RCP2.6;  $4,5 W / m^2$  pour RCP4,5;  $6,0 W / m^2$  pour RCP 6.0;  $8,5 W / m^2$  pour RCP8.5.

RCP2.6 présente un profil décroissant dans lequel le forçage radiatif atteint environ  $3 W / m^2$  avant 2100, puis diminue à  $2,6 W / m^2$ . RCP4.5 et RCP6.0 ont des profils de stabilisation intermédiaires, dans lesquels le forçage radiatif se stabilise après 2100. Le profil RCP8.5 est élevé, dans lequel le forçage radiatif autour de  $8,5 W / m^2$  en 2100 continue de croître.

### IPCC AR5 Greenhouse Gas Concentration Pathways

Representative Concentration Pathways (RCPs) from the fifth Assessment Report by the International Panel on Climate Change



"Representative Concentration Pathways (RCPs)". IPCC, 13 February 2019.

sur les secteurs ruraux et la vie rurale, notamment en raison d'une modification des conditions climatiques (périodes prolongées de chaleur excessive, modification du calendrier des saisons et modification de la disponibilité de l'eau (voir plus loin le chapitre 7)). Les résultats présentés dans ce chapitre s'appuient sur les derniers modèles climatiques mais le niveau d'incertitude est également élevé. Ces conditions préalables sont indiquées dans le texte. Pour les analyses de PIK, trois périodes de projection ont été utilisées: 2010-2039 (court terme), 2040-2069 (moyen terme), 2070-2099 (long terme).

### 3.2 Résultats

#### 3.2.1 Tendances générales pour l'ensemble du continent africain

##### Température

L'Afrique est l'un des continents les plus vulnérables au changement climatique en raison de sa forte exposition et de sa faible capacité d'adaptation. En Afrique continentale, le GIEC attribue une confiance élevée aux preuves du réchauffement de la planète résultant du changement climatique anthropique. Les analyses de température décennales suggèrent

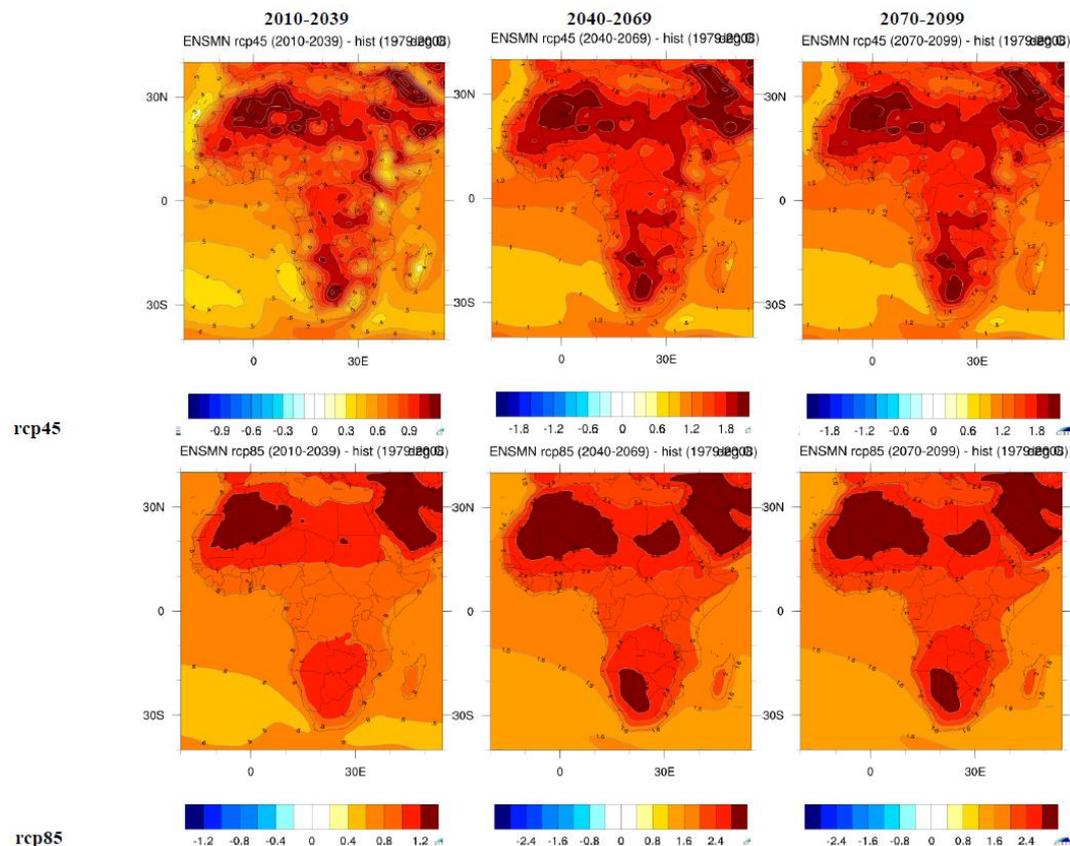


Figure 3.1. Différence absolue des températures moyennes de l'air à la surface (°C) sur le continent africain selon deux scénarios de changement climatique (RCP 4.5 et RCP 8.5) pour trois périodes futures (Fournet 2018). Explication des cartes: chaque carte montre la différence entre la période future modélisée choisie et la période de référence (1979 - 2008). Les couleurs indiquent le niveau de changement absolu de la température moyenne de l'air (le bleu est plus froid, le rouge est plus chaud).

fortement une augmentation des tendances de réchauffement pour les 50 et 100 prochaines années. Il est probable que les températures dans toute l'Afrique augmenteront plus vite que la moyenne mondiale, en particulier dans les régions les plus arides au XXI<sup>e</sup> siècle. Par rapport à la fin du 20<sup>e</sup> siècle, les variations de température annuelles moyennes atteignent 2°C au milieu du 21<sup>ème</sup> siècle et dépassent 4°C à la fin du 21<sup>ème</sup> siècle sur l'ensemble continental, conformément à RCP8.5. La variation moyenne est inférieure à 2° C sur les deux périodes mentionnées ci-dessus dans RCP2.6.

### Précipitation

Les prévisions de précipitations en Afrique pour le milieu ou la fin du 21<sup>ème</sup> siècle sont plus incertaines que les prévisions de température et présentent une dépendance spatiale et saisonnière plus grande que les prévisions de température. Tous les modèles présentent certaines caractéristiques comparables à grande échelle, telles que les tendances en matière d'assèchement en Afrique du Nord et du Sud et les précipitations en augmentation dans l'Est.

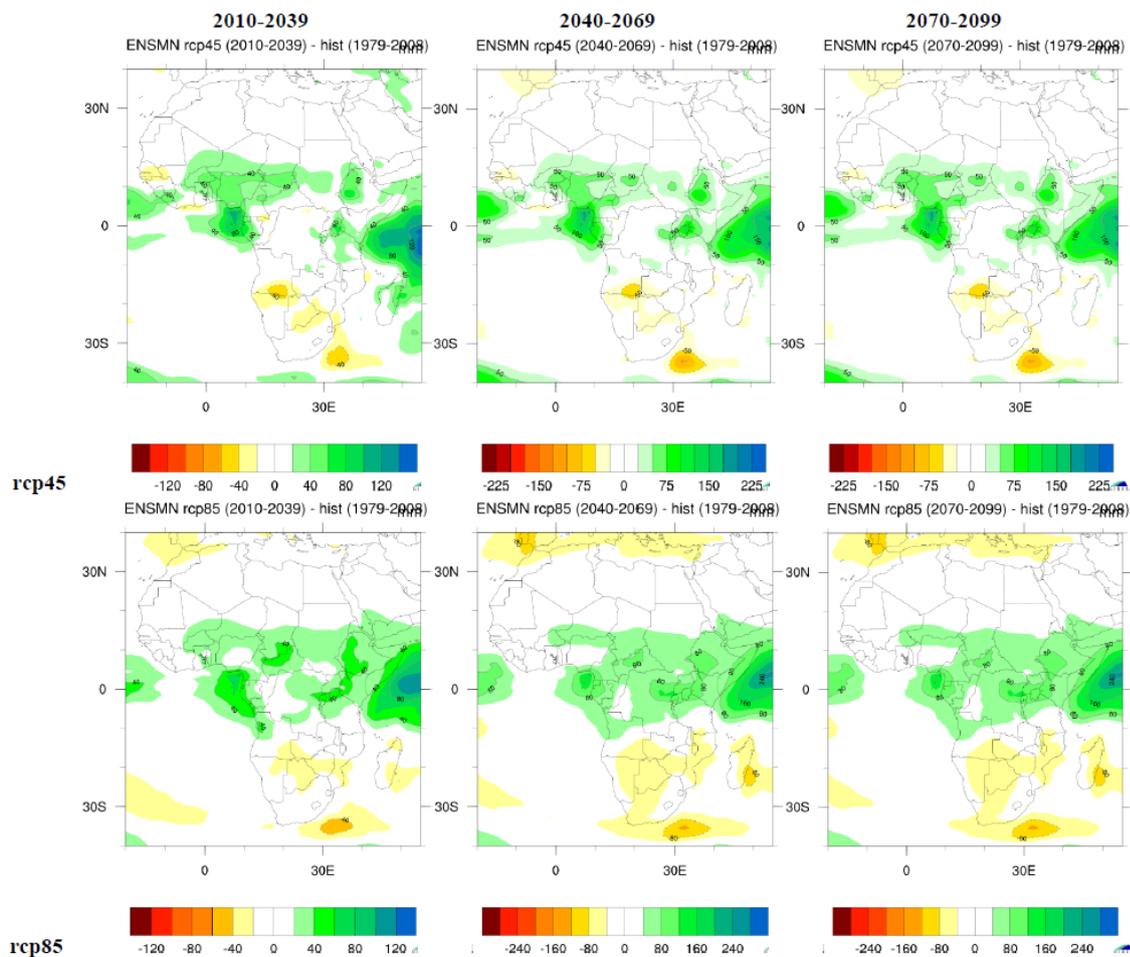


Figure 3.2 Différence absolue des précipitations annuelles moyennes (mm) pour 2 scénarios d'émissions (RCP 4.5 et RCP 8.5) entre 3 périodes futures en mm (dérivée de PIK, 2018). Explication des cartes: chaque carte montre la différence entre la période future modélisée choisie et la période de référence (1979 - 2008). Les couleurs indiquent le niveau de changement absolu de la température moyenne de l'air (le rouge est moins pluvieux, le vert-bleu plus pluvieux).

Plus en détail, les projets CMIP5 réduiraient les précipitations annuelles moyennes sur l'ensemble de la région méditerranéenne d'Afrique du Nord entre le milieu et la fin du 21e siècle, selon le RCP8.5. Le modèle prédit également des baisses en Afrique australe à partir du milieu du 21e siècle selon le RCP8.5, qui s'étend considérablement à la fin du 21e siècle.

En revanche, le CMIP5 devrait prévoir une augmentation des précipitations annuelles moyennes dans les zones d'Afrique centrale et orientale à partir du milieu du 21e siècle dans le cadre du RCP8.5. Dans RCP 4.5, ces modifications sont beaucoup moins importantes.

Notez que les changements indiqués sur la carte sont donnés comme un changement dans les précipitations annuelles moyennes. Sur une base annuelle, celles-ci peuvent sembler plutôt petites, en particulier dans les régions à forte variation annuelle des précipitations dans le temps et dans l'espace.

### 3.2.2 Focus sur le Sénégal et le bassin fluvial

#### Température

Dans les régions ouest-africaines et sahéliennes, les températures de surface ont augmenté au cours des 50 dernières années. Le nombre de jours et de nuits froids a diminué et le nombre de jours et de nuits chauds a augmenté entre 1961 et 2000. La plupart de ces tendances sont statistiquement tangibles à 90% et des tendances similaires sont observées pour les indices de température extrême. Collins (2011) montre statistiquement un réchauffement significatif entre 0,5 et 0,8 ° C entre 1979 et 2010 sur l'ensemble des régions.

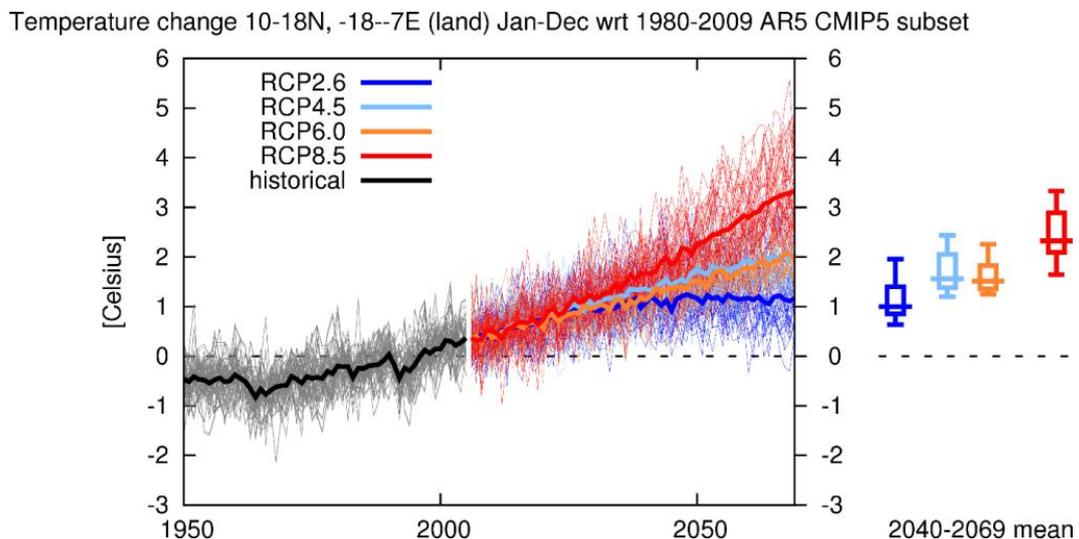


Figure 3.3 Différence absolue de la température moyenne de la surface de l'air (° C) pour quatre scénarios dans la région du bassin du Sénégal par rapport à la période de référence historique. Explication du graphique: les lignes fines représentent les simulations de modèles individuels, les lignes épaisses la moyenne de l'ensemble. La boîte à moustaches sur le côté droit du graphique indique la médiane (-), la mosaïque de variation de 25 à 75% (I) et les mosaïques de 5% et 95%. Les couleurs font référence aux différents scénarios.

En ce qui concerne les prévisions, il existe un consensus clair pour une augmentation moyenne des températures dans le bassin du fleuve Sénégal. Une augmentation des températures de 0,8 à 1 ° C à court terme (2010-2019), de 1,1 à 2,5 ° C à moyen terme (2040-2069) et de 1,1 à 4,2 ° C à long terme (2060-2099) est projetée selon les différents scénarios pris en compte. Comme prévu, il existe une nette différence entre les différents scénarios. Dans la situation actuelle, RCP 4.5 et RCP 6.0 peuvent être considérés comme des scénarios réalistes.

En ce qui concerne les disparités spatiales, l'augmentation des températures moyennes est, quel que soit le terme et le scénario d'émission, beaucoup plus prononcée dans le nord-est de la région et beaucoup moins prononcée dans le sud-ouest de la région, le rayonnement concentrique ayant un gradient ouest (figure 3.4). Près des côtes de l'Afrique de l'Ouest, l'impact du changement climatique sur la hausse de la température est moins prononcé, mais il existe toujours un consensus clair sur une hausse de la température.

Les résultats présentés ici montrent une nette constance dans l'élévation de la température, de sorte que le niveau de certitude est élevé. Pour les cartes spatiales, il est important de retenir qu'il s'agit de projections globales présentant une évolution moyenne.

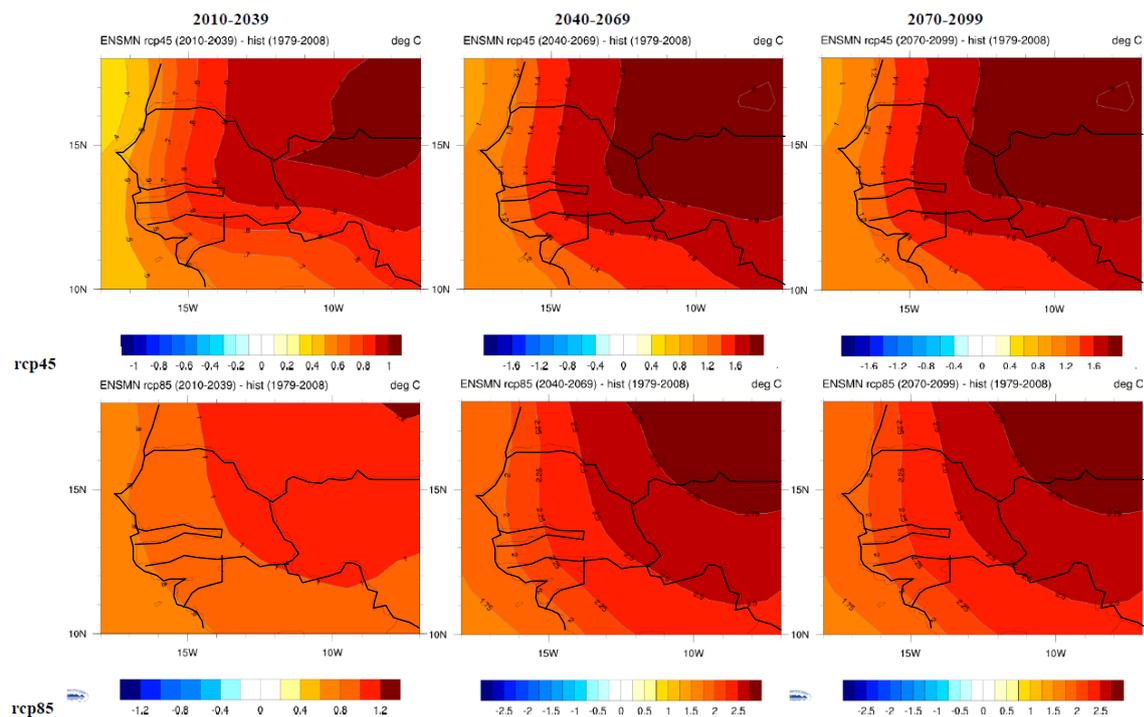


Figure 3.4 Différence absolue de la température moyenne de la surface de l'air (C) dans la région du bassin du Sénégal entre deux scénarios de changement climatique (RCP4.5 et RCP 8.5) entre trois périodes futures (dérivée de PIK, 2018). Explication des cartes: chaque carte montre la différence entre la période future modélisée choisie et la période de référence (1979 - 2008). Les couleurs indiquent le niveau de changement absolu de la température moyenne de l'air (le bleu est plus froid, le rouge est plus chaud).

### Précipitations

Comme indiqué précédemment, un faible degré de confiance est associé aux prévisions de précipitations dans la partie tropicale de l'Afrique de l'Ouest et son système de mousson. Il est probable que les fluctuations naturelles de l'oscillation atlantique multi-décennale - les changements périodiques dans la zone de convergence intertropicale (ITCZ, Encadré 1) - vont influencer sur les climats régionaux au moins autant que les changements induits par l'homme, qui affecteront la mousson ouest-africaine.

Des études basées sur des modèles régionaux suggèrent une augmentation du nombre de jours de précipitations extrêmes en Afrique de l'Ouest et dans le Sahel en mai et juillet, ainsi que des récurrences plus intenses et fréquentes de précipitations extrêmes sur les hauts plateaux guinéens. Les projections de précipitations ouest-africaines dans les archives du CMIP5 montrent une grande variation entre les modèles ainsi que sur l'amplitude et la direction du changement. Cette grande variation et donc l'incertitude sont au moins en partie imputables à l'incapacité des modèles à résoudre les précipitations convectives, caractéristiques de la région (Box 1).

De nombreux modèles CMIP5 indiquent que le cœur de la saison des pluies est plus humide, avec un léger décalage du début à la fin du 21e siècle. Une complication supplémentaire est faite avec les modèles climatiques régionaux qui peuvent modifier le signal de changement dans les régimes pluviométriques des modèles globaux entrants, en particulier dans les régions avec une topographie élevée et complexe. En conclusion, il existe un bas niveau de confiance dans la robustesse des changements dans les précipitations régionales jusqu'à ce qu'un ensemble plus large de résultats régionaux soit disponible. Dans le bassin du fleuve Sénégal, il n'y a pas de consensus pour une augmentation ou une diminution moyenne des précipitations pour quelque terme ou scénario que ce soit (Fig. 3.5).

Relative Precipitation change 10-18N, -18--7E (land) Jan-Dec wrt 1980-2009 AR5 CMIP5 subset

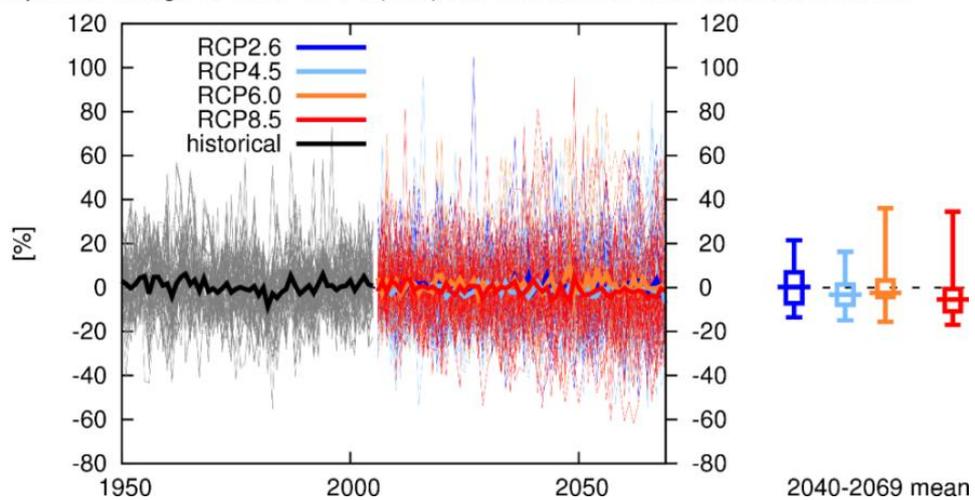


Figure 3.5 Différence absolue des précipitations moyennes (mm) pour quatre scénarios de changement climatique dans la région du bassin du Sénégal par rapport à la période de référence historique. Explication du graphique: les lignes fines représentent les simulations de modèles individuels, les lignes épaisses la moyenne de l'ensemble. La boîte à moustaches sur le côté droit du graphique indique la médiane (-), la mosaïque de variation de 25 à 75% (|) et les mosaïques de 5% et 95%. Les couleurs font référence aux différents scénarios.

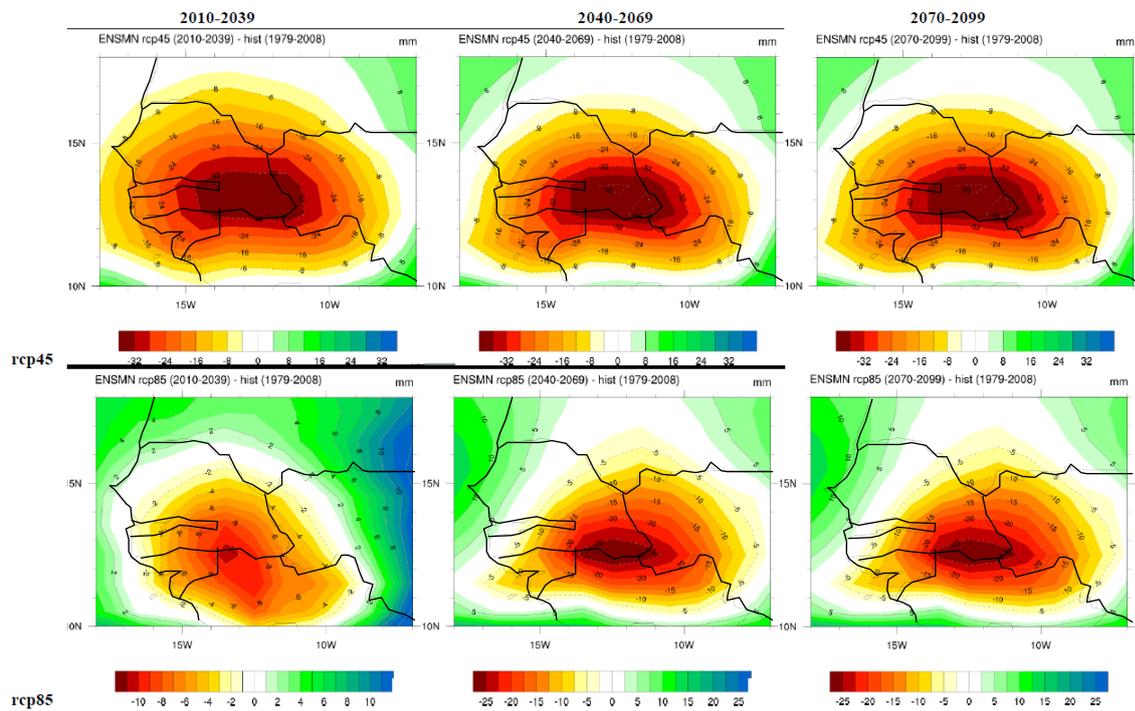


Figure 3.6. Différence absolue des précipitations annuelles moyennes (mm) pour deux scénarios de changement climatique (RCP 4.5 et RCP 8.5) au cours de trois périodes futures. Explication des cartes: chaque carte montre la différence entre la période future modélisée choisie et la période de référence (1979 - 2008). Les couleurs indiquent le niveau de changement absolu de la température moyenne de l'air (le rouge est moins pluvieux, le vert-bleu plus pluvieux).

Pour la disparité spatiale à plus grande échelle, on peut observer une forte réduction concentrique des précipitations dans la zone autour de la frontière entre le Mali, le Sénégal et la Guinée, donc dans la partie sud du bassin (Figure 3.6). Cette partie du bassin du Sénégal se situe à la frontière avec les hautes terres guinéennes, la source du fleuve Sénégal. En général, dans cette région, les précipitations annuelles atteignent jusqu'à 900-1200 mm, avec toutefois de fortes variations annuelles (chapitre 2.3). De ce point de vue, les changements prévus peuvent au premier abord ne pas sembler très importants, mais s'appliquent dans un très vaste domaine. Il faut garder à l'esprit que le niveau d'incertitude de ces projections est élevé, que les variations annuelles sont importantes et que les scénarios climatiques prévoient également des précipitations plus irrégulières.

Une diminution systématique des précipitations dans cette zone aura probablement un effet sur les débits du fleuve Sénégal, ce qui pourrait par la suite avoir un impact important sur la disponibilité de l'eau dans le bassin. Cependant, pour quantifier les projections actuelles des différents scénarios climatiques en une modification du débit futur du fleuve, un modèle hydrologique dans lequel les changements climatiques peuvent être incorporés est nécessaire (comme cela a été fait pour le bassin supérieur du Niger et le delta intérieur du Niger, Liersch et al. 2018).

### 3.3 Résumé des conclusions

Sur la base des résultats des analyses effectuées par PIK (Fournet, 2018) pour tous les scénarios et différentes périodes de projection, trois conclusions principales peuvent être tirées:

1) Les prévisions de changement de température en Afrique de l'Ouest pour la fin du 21<sup>e</sup> siècle sont comprises entre + 3 ° C et + 6 ° C par rapport à la fin du 20<sup>e</sup> siècle. Cette augmentation de température conduira irrévocablement à un degré plus élevé d'évaporation locale, faisant du bassin du Sénégal une zone sensible au changement climatique.

2) Dans le bassin du fleuve Sénégal, il n'y a pas de consensus pour une augmentation ou une diminution moyenne des précipitations pour quelque terme ou scénario que ce soit. Cependant, il y aura plus de variation entre les années, une intensification des événements pluvieux et des changements dans le calendrier et la durée de la période des pluies.

3) Dans les hauts plateaux guinéens (en amont), les précipitations diminueront probablement. Ces hauts plateaux constituent la tête de source du fleuve Sénégal et une diminution des précipitations dans cette région aura probablement un effet sur les taux de débit du fleuve Sénégal.

L'ensemble des trois développements prévus ci-dessus auront des conséquences sur les services écosystémiques liés à la disponibilité de l'eau dans le bassin, comme expliqué dans les chapitres suivants.

## 4 Dynamique et disponibilité de l'eau

---

*Le fleuve et le lit du fleuve offrent des ressources naturelles précieuses aux communautés locales en tant que sols riches en nutriments pour l'agriculture, les pâturages et la pêche. Les ressources naturelles sont la clé de l'occupation du sol et des services écosystémiques. Dans les zones arides du bassin du Sénégal, comme dans la zone d'étude, la disponibilité de l'eau est essentielle à cet égard. Pour comprendre l'impact du changement climatique lié à l'eau, il est donc important de disposer d'une image récente et de qualité de la disponibilité en eau et des ressources naturelles. Dans ce chapitre, nous présentons les résultats d'une analyse de la dynamique de l'eau et d'une évaluation spatiale de la disponibilité de l'eau à l'aide de techniques de télédétection.*

### 4.1 Niveaux d'eau et débits dans le fleuve

Pour les données quantitatives sur les caractéristiques des rivières, l'OMVS a fourni un vaste ensemble de données indiquant les niveaux d'eau et les débits journaliers de 1980 à nos jours. Pour la distribution spatiale de l'eau à des moments spécifiques et la corrélation des informations spatiales avec les niveaux d'eau, des techniques de télédétection et des outils statistiques ont été utilisés. Les analyses de télédétection se sont concentrées sur la moyenne vallée du fleuve Sénégal (section 4.2).

Les précipitations en saison des pluies sont le principal facteur à l'origine des importantes fluctuations des niveaux d'eau et des débits du fleuve Sénégal. En juillet, les niveaux d'eau commencent à monter et atteignent rapidement le pic en septembre, après ils redescendent et atteignent les niveaux bas de la saison sèche en janvier (figure 4.1). Chaque année, le cycle naturel des inondations inonde de vastes étendues des plaines inondables de la basse et moyenne vallée. Dans le passé, de vastes zones du delta du Sénégal étaient inondées, mais cela a changé après les grands remblais du delta dans les années 1960 et 1990 (Zwarts et al. 2009). En conséquence, les activités d'occupation du sol dépendantes des ressources en eau sont fortement influencées par les fortes variations des précipitations, non seulement dans le bassin du fleuve Sénégal, mais également dans les zones en amont.

#### **Avant et après la construction des barrages**

Avant la construction des barrages, les niveaux d'eau dans la rivière étaient déterminés par l'impulsion d'inondation générée par les précipitations dans le bassin versant. Les graves sécheresses des années 1970 et 1980 («La Grande Sécheresse») ont créé un besoin de gestion active de l'eau dans le bassin. Depuis la construction des barrages, les niveaux d'eau du fleuve sont plus stables tout au long de l'année, et une gestion rigoureuse des rejets à Manantali permet d'éviter une baisse importante du niveau de l'eau. La figure 4.1 illustre les différences entre les niveaux moyens maximum d'eau (cm) par mois dans le fleuve enregistrés à Podor et à Matam, avant (1980-1983) et après (1990-2018) la construction des barrages de Diama et de Manantali.

Avant la construction des barrages, le niveau de l'eau pendant la saison sèche à Podor n'excédait pas 70 cm et a été multiplié par cinq pour atteindre environ 350 cm pendant la saison des pluies. En revanche, depuis les années 90, les niveaux d'eau pendant la saison sèche sont maintenus autour de 250 cm et atteignent 400 cm pendant la saison des pluies à Podor.

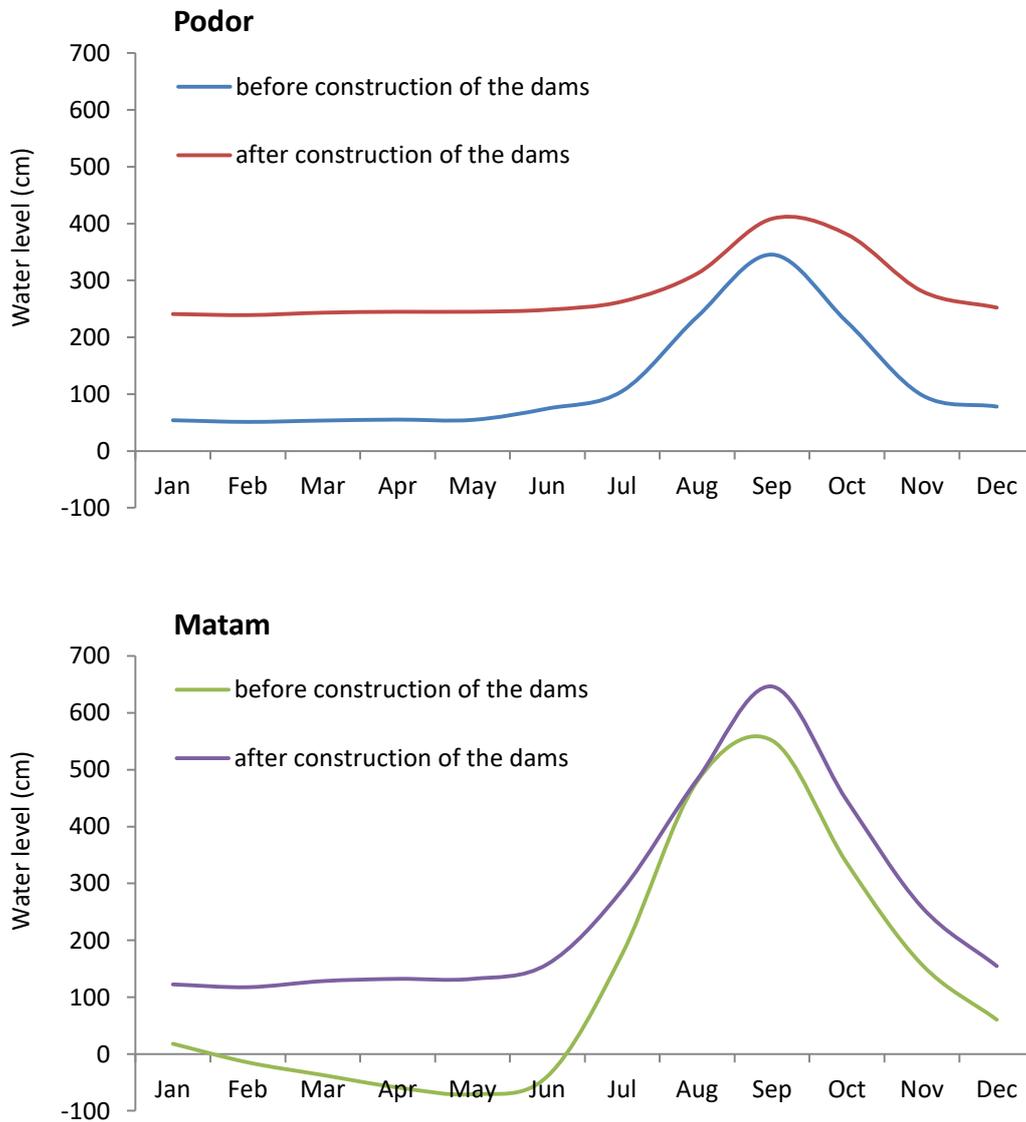


Figure 4.1 Niveaux d'eau moyens (cm) par mois dans le fleuve Sénégal enregistrés aux stations de mesure de Podor et Matam, avant (1980-1983) et après (1990-2017) la construction des barrages de Diama et de Manantali. Les valeurs négatives des niveaux d'eau enregistrées à Matam au cours de la période 1980-1983 indiquent la période où les niveaux d'eau sont les plus bas (étiage). Toutes les données sont fournies par l'OMVS.

À Matam, située plus en amont (Fig. 2.1), la différence entre avant et après la construction des barrages est encore plus grande qu'à Podor. Avant la construction des barrages, la diminution du niveau de l'eau pendant la saison sèche à Podor était dans une certaine mesure amortie par l'afflux d'eau de rivière du delta pendant la saison sèche. Toutefois, cette eau n'atteignant pas les zones situées plus en amont, ce qui signifiait qu'avant la construction des barrages en amont, certaines parties du bassin étaient asséchées pendant la saison sèche, caractéristiques des cours d'eau pluviaux du Sahel. La baisse du niveau de l'eau pendant la saison sèche (étiage) a varié d'une année à l'autre, en fonction du débit restant. Pendant la période de la grande sécheresse des années 1970 et 1980, les niveaux d'eau étaient extrêmement bas. Depuis les années 1990, toutefois, les niveaux d'eau sont maintenus au-dessus de 100 cm pendant la saison sèche et à plus de 600 cm pendant la saison des pluies à Matam.

Après la construction des barrages, la disponibilité de l'eau dans la basse et la moyenne vallée a changé au cours d'une grande partie de la saison (novembre - juillet). Ces changements facilitent fortement la disponibilité de l'eau pour l'agriculture irriguée, tout en ayant un impact important sur le fonctionnement de l'écosystème (chapitres 5 et 6).

Une partie importante des propriétés hydrologiques du bassin versant en aval de Bakel est régulée par la gestion du barrage de Manantali. En outre, des apports substantiels d'affluents non contrôlés sont reçus en aval de Manantali, principalement des affluents Bakoye, Baoulé et Falémé, ainsi que par le Karakoro et le Gorgol (Figure 1.1). La gestion de l'eau du barrage de Manantali est telle qu'une impulsion artificielle est maintenue, mais les propriétés de l'inondation ont changé (Fig. 4.1): pendant la crue, le débit et les niveaux d'eau sont inférieurs à ceux de l'époque antérieure au barrage. pendant la saison sèche, les niveaux d'eau sont plus élevés en raison des déversements du barrage. La gestion de l'eau pourrait changer à l'avenir, car il est prévu de construire de nouveaux barrages, par exemple sur l'affluent Falémé (à Gourbassi) et sur le fleuve Sénégal même (à Gouina).

Zwarts et al. (2009) mentionnent que près de la moitié du débit du fleuve Sénégal dépend du Bafing, ce qui signifie que le fleuve Bafing est le principal tributaire en termes d'apport en eau du fleuve pour l'ensemble de la vallée du fleuve Sénégal. Les données de débits de l'OMVS montrent que le débit moyen à Bakel - où les principaux affluents se rejoignent - sur la période 2010-2018 est de  $545 \text{ m}^3 / \text{s}$ . Sur la même période, le débit de Bafing en aval de Manantali a été de  $188 \text{ m}^3 / \text{s}$ , celui de Faleme à Kidira de  $143 \text{ m}^3 / \text{s}$  et le débit de Bakoye à Oualia de  $89 \text{ m}^3 / \text{s}$ . Cela correspond à l'affirmation selon laquelle près de la moitié du débit du fleuve Sénégal est fourni par le Bafing.

Le barrage de Manantali est situé sur le Bafing. En outre, l'affluent Bakoye contribue à près du quart du débit total du fleuve (Zwarts et al., 2009). La gestion du barrage à Manantali, dans le Bafing, est donc déterminante pour ce qui est de la possibilité d'atténuer les effets du changement climatique grâce à la gestion du barrage dans toute la vallée.

## **4.2 Disponibilité spatiale de l'eau du fleuve**

Pour analyser la variabilité spatiale de l'eau dans la basse et la moyenne vallée, nous avons produit des cartes d'eau. Les cartes d'eau ont été produites en utilisant des techniques de télédétection. Une description complète de la méthodologie de calcul et des jeux de données utilisés est fournie au paragraphe 4.2.1. Les cartes produites montrent la distribution spatiale des eaux stagnantes dans le bassin et donnent une idée de l'étendue de l'inondation à des moments spécifiques, en particulier lors de périodes humides avec des niveaux d'eau élevés dans le fleuve Sénégal. Pour ces analyses, de nombreuses images ont été utilisées, issues de plusieurs différents satellites. Les images des satellites Landsat ont été utilisées pour analyser la situation de 1999 à 2018 et, au cours des dernières années, les images Sentinel-2 ont été utilisées.

### **4.2.1 Sélection des variables d'entrée et prétraitement**

#### **Sélection des variables d'entrée**

Pour la situation de 1999, 2000 et 2002, nous avons utilisé les images satellite de Landsat 7, pour la période 2013-2018, nous avons utilisé Landsat 8, ainsi que des images Sentinel-2 pour 2016 et 2017. Un problème inévitable lors de l'utilisation d'images satellite est la couverture

nuageuse. En particulier pendant la saison des pluies inondée, de nombreuses images sont couvertes de nuages et ne peuvent donc pas être utilisées pour des analyses. À cause de cela, nous étions liés à une quantité sélective et plutôt modeste de 30 images appropriées au total provenant de satellites Landsat sans nuages (tableaux 4.2 et 4.3).

Lorsque les inondations se retirent après une période caractérisée par des niveaux d'eau élevés et par la baisse des niveaux d'eau, des nappes d'eau isolées peuvent se former dans les anciennes zones inondées. Ces masses d'eau ne sont plus reliées au fleuve et ne sont donc plus liées au niveau de l'eau dans le fleuve. Pour assurer la fiabilité de nos analyses de corrélation avec les niveaux d'eau du fleuve, il est important que les images de ces situations soient exclues. Par conséquent, seules les images de dates, sur lesquelles le niveau d'eau a montré une augmentation globale sur une période de cinq jours, ont été utilisées pour la création de cartes d'eaux.

### Analyse des données Sentinel

Les données multispectrales sans nuages Sentinel-2 Niveau 1C couvrant le milieu de la vallée du fleuve Sénégal ont été téléchargées à partir du centre de données en accès libre de l'ESA (ESA, 2018) (Tableau 3.1; Figure 4.2). La résolution en pixels des données Sentinel-2 est de 10 m, 20 m ou 60 m en fonction de la bande spectrale. Le processeur Sen2Cor implémenté dans la boîte à outils open source Sentinel Application (SNAP, v.6.0; ESA, 2018b) a été utilisé pour appliquer une correction atmosphérique et créer des produits de réflectance de surface de niveau 2A à une résolution de 10 m (Mueller-Wilm, 2016).

L'indice d'eau normalisé par différence (NDWI2) (McFeeters, 2007) a été calculé à l'aide du processeur NDWI2 dans SNAP, sur la base des bandes 3 (vert) et 8 (proche de l'infrarouge) (Figure 4.3). Un seuil NDWI2 de -0,2 a été appliqué pour délimiter les caractéristiques des eaux de surface. Les seuils NDWI varient en fonction des caractéristiques locales de l'eau, telles que la turbidité, la couleur et la taille des caractéristiques de l'eau, par rapport à la résolution en pixels de l'image satellite (Lei Ji et al., 2009). Le seuil NDWI2 choisi a été basé sur l'inspection visuelle des images Sentinel-2 de juin 2017 en appliquant des masques pour différentes valeurs de seuil dans SNAP et en comparant les résultats à des images satellites haute résolution (Bing maps, 2018). Si le seuil est défini sur -0,2, la plupart des caractéristiques de l'eau sont extraites. Si le seuil standard de 0 est utilisé, les traits d'eau étroits présentent des écarts considérables. L'un des problèmes connus de l'indice de niveau d'eau NDWI2 est que cette méthode ne supprime pas le signal des terrains bâtis. Par conséquent, les terrains construits peuvent être classés à tort dans les eaux (Sun et al., 2012) (Figure 4.4).

Tableau 4.1: Produits de données Sentinel-2 utilisés pour l'analyse.

Productname	Acquisition Date
S2A_MSIL1C_20170617T113321_N0205_R080_T28QDD_20170617T114506	17/06/17
S2A_MSIL1C_20170614T112111_N0205_R037_T28QDD_20170614T113645	14/06/17
S2A_MSIL1C_20170614T112111_N0205_R037_T28QED_20170614T113645	14/06/17
S2A_MSIL1C_20170614T112111_N0205_R037_T28QFD_20170614T113645	14/06/17
S2A_MSIL1C_20170614T112111_N0205_R037_T28PFC_20170614T113645	14/06/17
S2A_MSIL1C_20170601T110651_N0205_R137_T28PGC_20170601T112448	01/06/17
S2A_MSIL1C_20170601T110651_N0205_R137_T28PGB_20170601T112448	01/06/17
S2B_MSIL1C_20170910T113309_N0205_R080_T28QDD_20170910T113505	10/09/17
S2B_MSIL1C_20170907T112109_N0205_R037_T28QDD_20170907T113242	07/09/17
S2B_MSIL1C_20170907T112109_N0205_R037_T28QED_20170907T113242	07/09/17

S2B_MSIL1C_20170907T112109_N0205_R037_T28QFD_20170907T113242	07/09/17
S2B_MSIL1C_20170907T112109_N0205_R037_T28PFC_20170907T113242	07/09/17
S2A_MSIL1C_20170909T110651_N0205_R137_T28PGC_20170909T112440	01/06/17
S2A_MSIL1C_20170909T110651_N0205_R137_T28PGB_20170909T112440	01/06/17
SENTINEL2A_20160927-112525-613_L2A_T28QDD_D_V1-3	27/09/16
SENTINEL2A_20160927-112525-613_L2A_T28QED_D_V1-3	24/09/16
SENTINEL2A_20160927-112525-613_L2A_T28QFD_D_V1-3	24/09/16
SENTINEL2A_20160927-112525-613_L2A_T28PFC_D_V1-3	27/09/16
S2A_OPER_PRD_MSIL1C_PDMC_20160924T195954_R137_V20160924T110802_20160924T112414.SAFE	24/09/16
SENTINEL2A_20170922-112655-804_L2A_T28QDD_D_V1-4	22/09/17
SENTINEL2A_20170922-112655-804_L2A_T28QED_D_V1-4	22/09/17
SENTINEL2A_20170922-112655-804_L2A_T28QFD_D_V1-4	22/09/17
SENTINEL2A_20170922-112655-804_L2A_T28PFC_D_V1-4	22/09/17
S2A_MSIL1C_20170919T110721_N0205_R137_T28PGB_20170919T111808	19/09/17
S2A_MSIL1C_20170919T110721_N0205_R137_T28PGC_20170919T111808	09-19-17

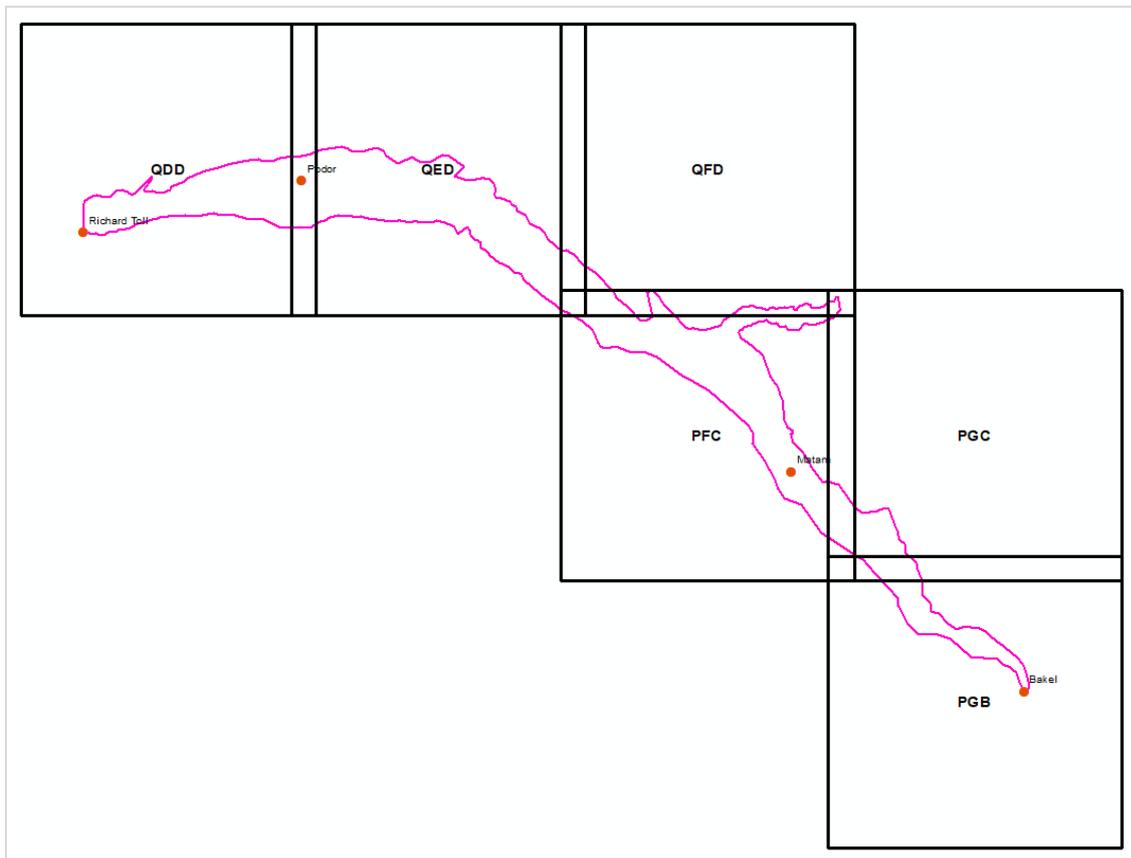


Figure 4.2 Grille de tuiles Sentinel-2 pour le bassin du fleuve Sénégal entre Richard-Toll et Bakel.

Un fichier de forme vectorielle du contour du bassin du fleuve Sénégal a été créé sur la base du composite de couleur vraie Sentinel de juin 2017. Le contour a été utilisé comme masque pour extraire les données NDWI2 de cette zone. Le nombre de pixels classés comme étant de l'eau a été multiplié par 100 (taille des pixels = 10 x 10 m) pour calculer la surface recouverte d'eau pour tout le bassin du fleuve Sénégal entre Richard-Toll et Bakel. Pour pouvoir comparer les zones de surface d'eau Sentinel-2 à celles calculées à partir des données Landsat, les zones de surface d'eau Sentinel-2 ont également été calculées pour la partie couverte par les dalles Landsat pour Podor et Matam.

*Pixels urbains situés à proximité de Podor et classés incorrectement comme étant des eaux à l'aide du NDWI2 sur des données Sentinel-2.*

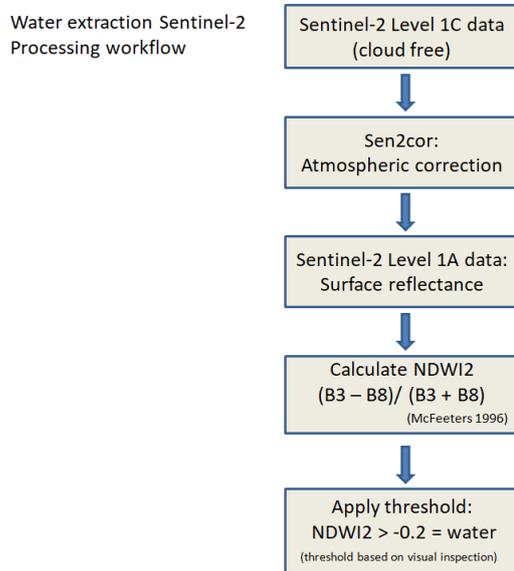


Figure 4.3 Processus d'extraction d'eau Sentinel-2.

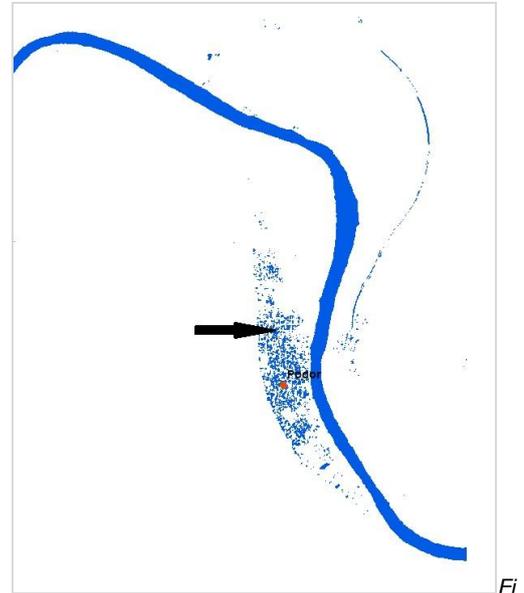


Figure 4.4 Pixels urbains situés à proximité de Podor et classés incorrectement comme étant des eaux à l'aide du NDWI2 sur des données Sentinel-2.

### Analyse des données Landsat

Les produits de données de réflectance de surface Landsat 7 et Landsat 8 OLI / TIRS couvrant la région du fleuve Sénégal près de Podor et Matam ont été téléchargés à partir du site Web USGS Earth Explorer (USGS, 2018) (tableau 3.2). L'indice d'eau NDWI2 a été calculé à l'aide des bandes 3 (vert) et 5 (proche de l'infra rouge), selon la formule suivante:

$$NDWI2 = (bande\ de\ réflectance\ 3 - bande\ de\ réflectance\ 4) / (bande\ de\ réflectance\ 3 + bande\ de\ réflectance\ 4)$$

La résolution en pixels de ces bandes spectrales est de 30 m. Les images NDWI2 ont été reclassées en eau (valeur 1) et autres (valeur 0) en utilisant le seuil NDWI2 de  $-0,2$ . Si les images contenaient des nuages, ceux-ci étaient masqués à l'aide des données de l'image de qualité Landsat 8 pixels. Cependant, des données Landsat sans nuage ont été utilisées pour la plupart. Le contour du bassin du fleuve Sénégal a été utilisé pour extraire les données NDWI2 et calculer la superficie couverte par l'eau. Le nombre de pixels classés comme étant de l'eau a été calculé en multipliant par 900 (taille des pixels = 30 x 30 m) afin de calculer la surface couverte par l'eau dans chaque tuile de Landsat.

*Tableau 4.2: Produits de données de réflectance de surface de Landsat 7 utilisés pour l'analyse.*

<b>Product name</b>	<b>Acquisition date</b>
LE072040481999092601T1-SC20180725065109	26/09/99
LE072040491999092601T1-SC20180724045055	26/09/99
LE072030491999102101T1-SC20180723042717	21/10/99
LE072040481999111301T1-SC20180725065848	13/11/99
LE072040491999111301T1-SC20180724045107	13/11/99
LE072030492000090501T1-SC20180723042624	05/09/00
LE072030492002011401T1-SC20180724045113	14/01/02
LE072030492002070901T1-SC20180724045114	09/07/02
LE072030492002082601T1-SC20180724045101	26/08/02

*Tableau 4.3: Produits de données de réflectance de surface de Landsat 8 OLI / TIRS utilisés pour l'analyse.*

<b>Product name</b>	<b>Acquisition date</b>
LC08_L1TP_203049_20160808_20170322_01_T1	08/08/13
LC08_L1TP_203049_20130901_20170502_01_T1	01/09/13
LC08_L1TP_204049_20130924_20170502_01_T1	24/09/13
LC08_L1TP_203049_20140224_20170425_01_T1	24/02/14
LC08_L1TP_203049_20140718_20170421_01_T1	18/07/14
LC08_L1TP_203049_20140904_20170420_01_T1	04/09/14
LC08_L1TP_204049_20140911_20170419_01_T1	11/09/14
LC08_L1TP_204049_20140927_20170419_01_T1	27/09/14
LC08_L1TP_203049_20150619_20170407_01_T1	19/06/15
LC08_L1TP_204049_20150914_20170404_01_T1	14/09/15
LC08_L1TP_204049_20160425_20170326_01_T1	25/04/16
LC08_L1TP_203049_20160520_20170324_01_T1	20/05/16
LC08_L1TP_203049_20160707_20170323_01_T1	07/07/16
LC08_L1TP_204049_20160714_20170323_01_T1	14/07/16
LC08_L1TP_204049_20160831_20170321_01_T1	31/08/16
LC08_L1TP_203049_20160925_20170321_01_T1	25/09/16
LC08_L1TP_203049_20170523_20170526_01_T1	23/05/17
LC08_L1TP_203049_20170624_20170713_01_T1	24/06/17
LC08_L1TP_204049_20170717_20170727_01_T1	17/07/17
LC08_L1TP_203049_20170827_20170914_01_T1	27/08/17
LC08_L1TP_204049_20180125_20180206_01_T1	25/01/18

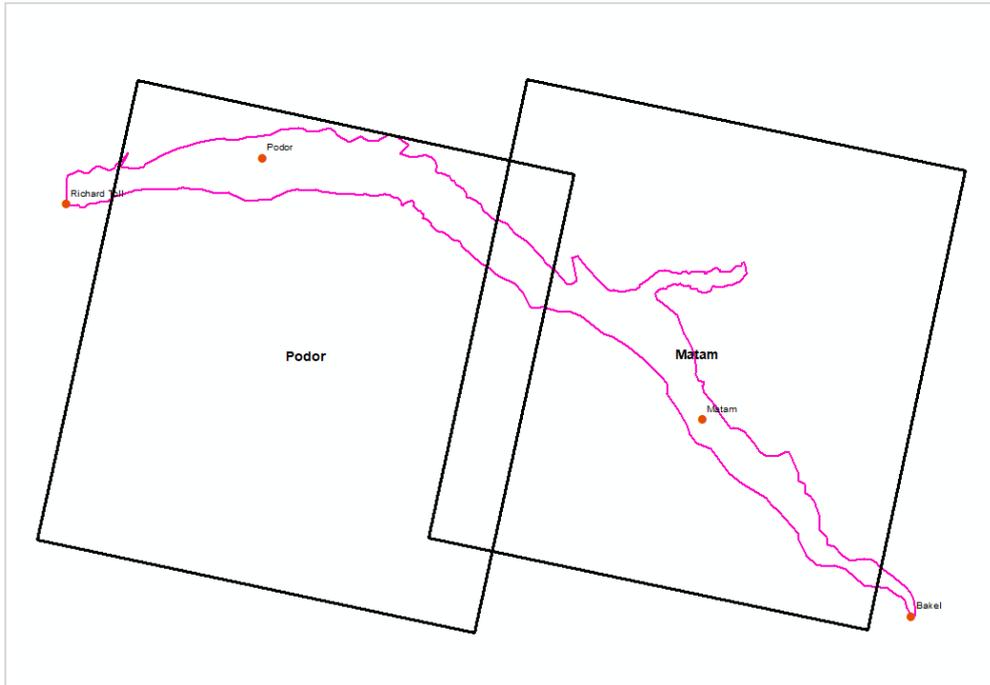


Figure 4.5 Grille de tuiles Landsat pour le bassin du fleuve Sénégal.

### Combiner Landsat et Sentinel

Lors de la combinaison des résultats d'analyses avec les images Landsat et Sentinel, il est important de prendre en compte le fait que ces résultats ne sont pas exactement comparables. L'imagerie Sentinel a une résolution de 10 m, tandis que l'imagerie Landsat a une résolution de 30 m. Cela signifie que des images Sentinel peuvent extraire des informations plus détaillées, telles que de petits affluents supplémentaires. Par conséquent, la surface totale de l'eau calculée sera naturellement plus grande des analyses Sentinel que des analyses Landsat pour une situation donnée.

#### 4.2.2 Résultats de la télédétection

L'Annexe C renferme toutes les cartes des eaux produites. Les cartes des eaux montrent non seulement que les résultats de l'analyse peuvent être déterminés avec précision et fiabilité sur la base des images Landsat et Sentinel, mais également qu'il existe de grandes différences de surface d'inondation entre les saisons et les années individuelles.

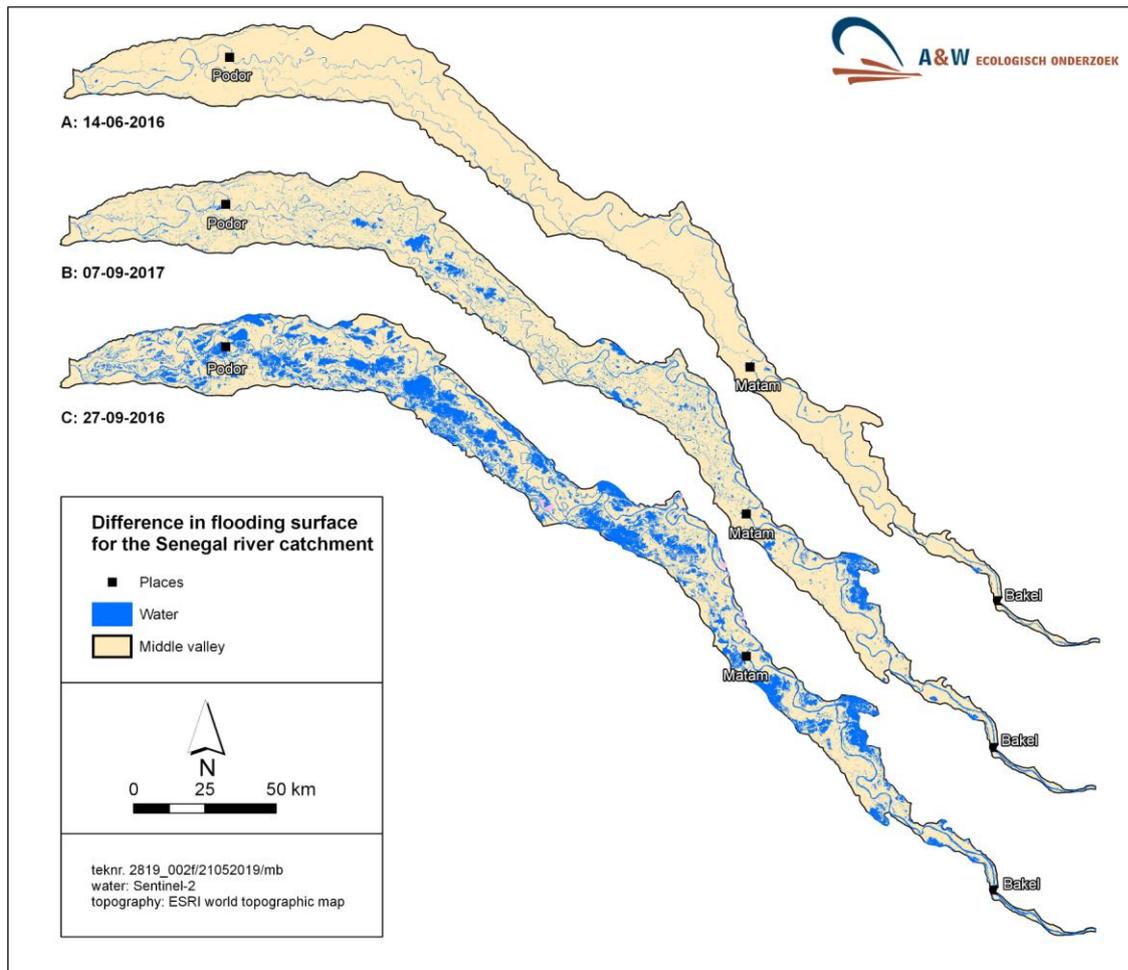


Figure 4.6 Trois exemples (A, B, C) de cartes des eaux dans la moyenne Vallée (environ 755.514 ha de Bakel à Richard Toll) à différentes dates.

Afin de pouvoir comparer de manière exhaustive les résultats NDWI2 des imaginaires Sentinel, Landsat 7 et Landsat 8, tous les résultats des surfaces inondées ont été exprimés en pourcentage de couverture de pixels d'eau par rapport au nombre total de pixels de la plaine inondable potentielle. Ces informations ont été utilisées pour une analyse plus poussée des corrélations.

#### 4.3 Corrélations entre les caractéristiques du fleuve et l'inondation

La dynamique du fleuve Sénégal montre une forte corrélation linéaire entre les niveaux d'eau et les débits lorsque l'on considère les données de Matam fournies par l'OMVS (Figure 4.7a). Plus le niveau d'eau est élevé, plus le débit est élevé. Les débits montrent également une forte corrélation exponentielle avec la surface inondée, calculée par analyse NDWI2 (Figure 4.7b). Malheureusement, les débits ne sont pas disponibles pour les autres stations de mesure situées le long du fleuve. Les niveaux d'eau, en revanche, sont disponibles pour plusieurs stations pendant une longue période. Par conséquent, nous avons choisi d'utiliser le niveau d'eau mesuré plutôt que les débits pour explorer davantage les corrélations.

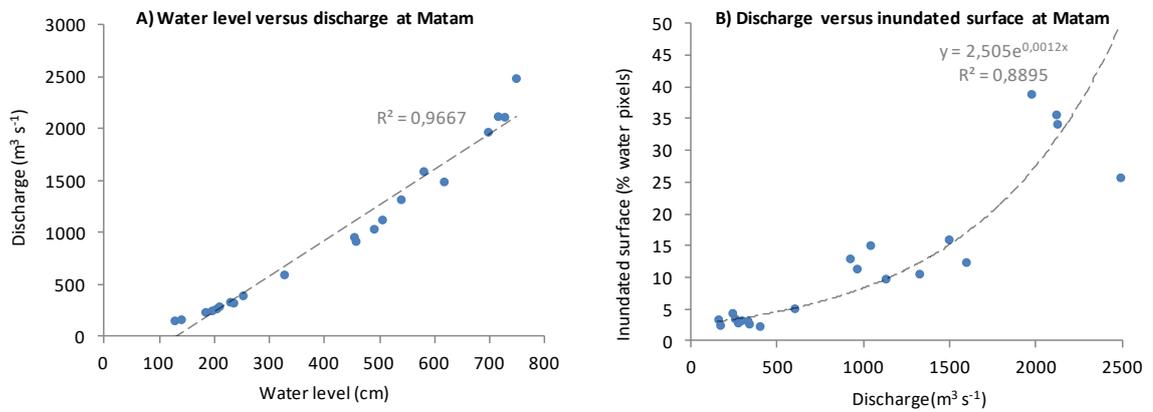


Figure 4.7 A) Les niveaux d'eau et les débits montrent une forte corrélation linéaire pour la station de mesure de Matam. B) Les débits montrent une forte corrélation exponentielle avec la surface inondée autour de Matam.

Matam et Podor montrent tous deux de fortes corrélations exponentielles entre le niveau de l'eau et la surface inondée (figures 4.8 et 4.9). Les résultats combinés pour les deux sites indiquent que, dans les situations où le niveau d'eau du fleuve est inférieur à 3 mètres de hauteur, il n'y a pas d'inondation significative. Cependant, lorsque le niveau d'eau du fleuve dépasse cette limite de 3 mètres, le fleuve déborde de son lit et une inondation se produit avec une expansion exponentielle.

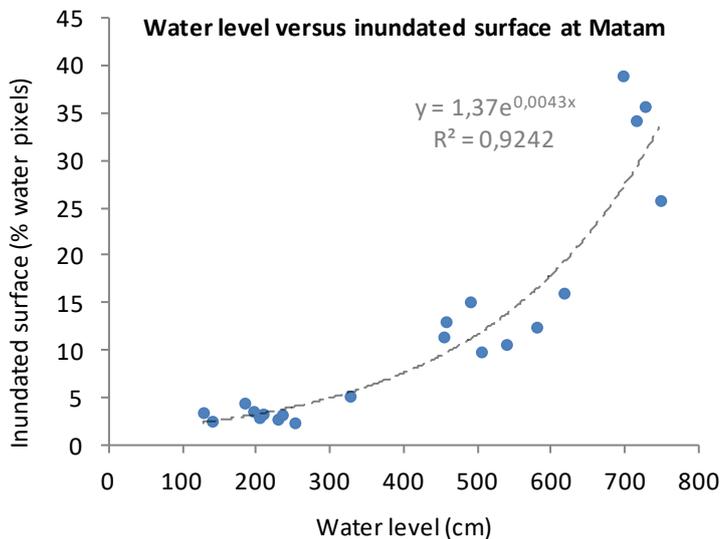


Figure 4.8 Les niveaux d'eau mesurés à Matam montrent de fortes corrélations exponentielles avec la surface inondée, telles que détectées par l'analyse NDWI2.

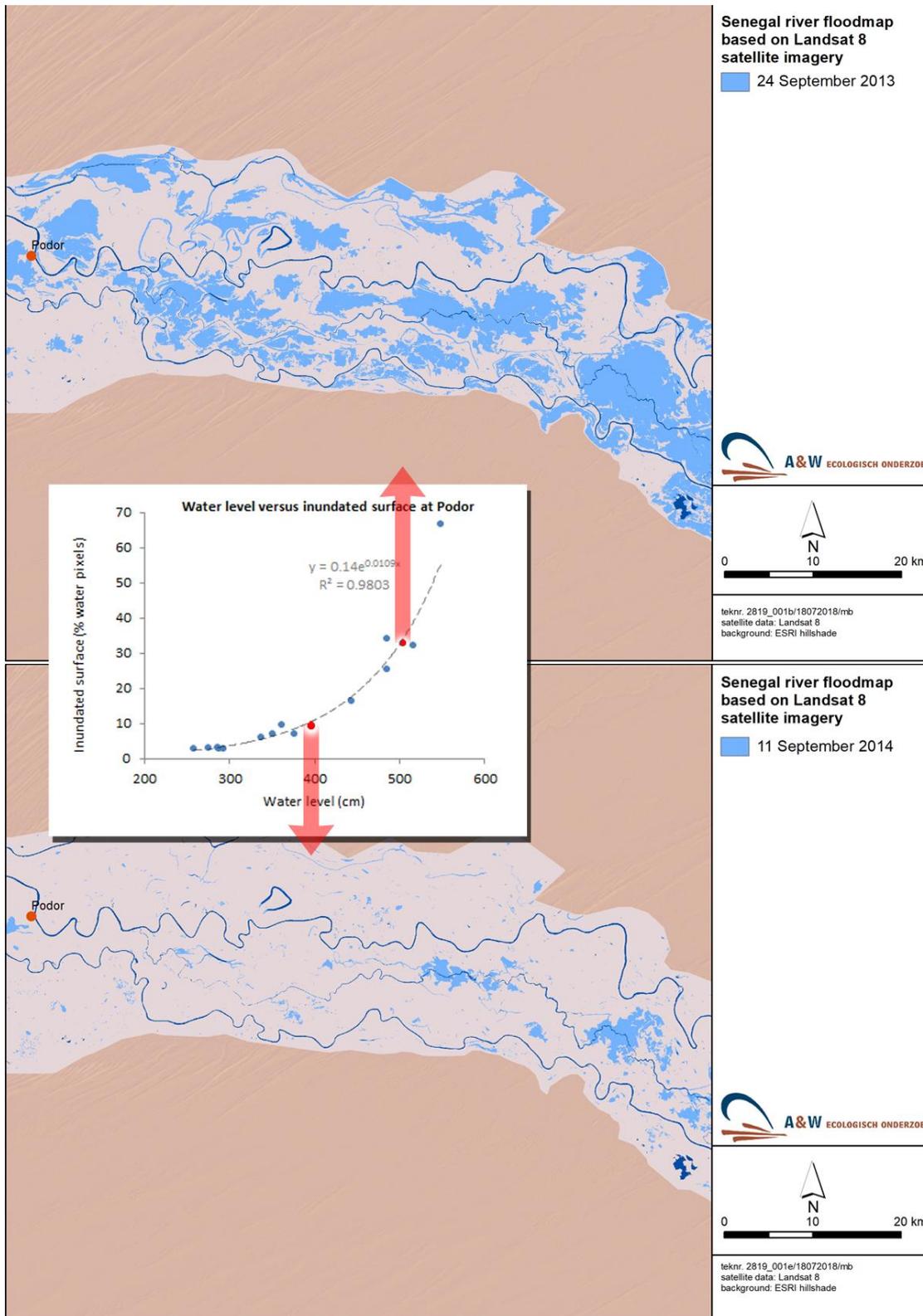


Figure 4.9 Les niveaux d'eau mesurés à Podor montrent de fortes corrélations exponentielles avec la surface inondée. La ligne d'eau bleu foncé sur les deux figures illustre la surface de l'eau dans la récente situation de sécheresse de juillet 2017, en tant que référence du fleuve. Sur la carte des eaux ci-dessous, la zone d'inondation lors d'inondations modérées est indiquée (fin septembre 2014) en bleu clair et la carte des eaux ci-dessus illustre les graves inondations (fin septembre 2013). Les niveaux d'eau correspondants sont indiqués par des flèches rouges sur le graphique.

Sur la base des fortes corrélations entre les niveaux d'eau et la zone d'inondation, il est possible d'estimer la zone d'inondation des années précédentes. Les niveaux d'eau ont été mesurés avec précision de 1980 à nos jours par l'OMVS. Pour chaque année, au moment où le niveau d'eau est maximum, la zone d'inondation correspondante peut être calculée avec les formules de l'analyse de corrélation. Le résultat est illustré à la figure 4.10, avec des graphiques distincts pour les zones autour de Podor et de Matam. Les zones d'inondation maximales indiquées par an sont exprimées en pourcentages de la surface potentielle de la plaine d'inondation dans les tuiles (Figure 4.5) telle qu'elle est utilisée pour les analyses NDWI2 pour les zones autour de Podor et autour de Matam.

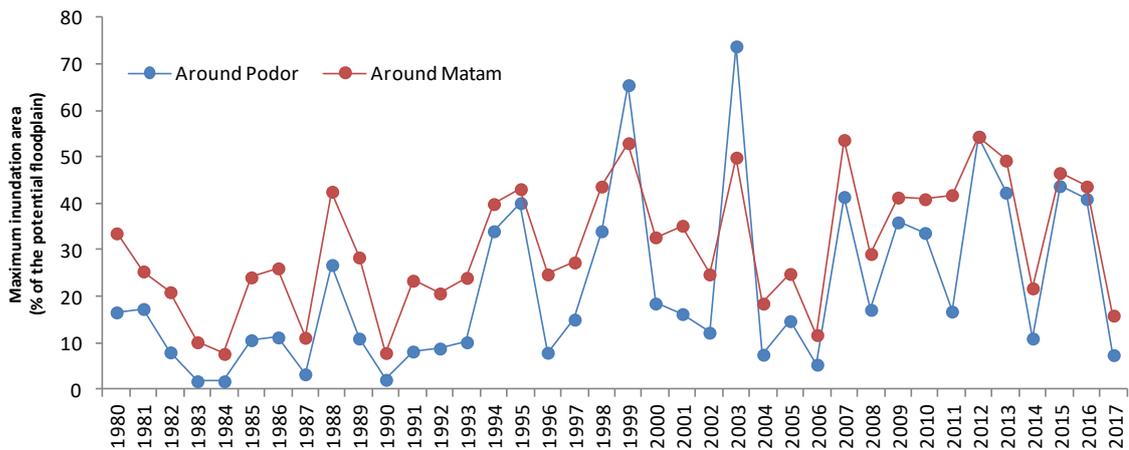


Figure 4.10 Sur la base des niveaux d'eau maximaux par an et des résultats des analyses de corrélation, la zone d'inondation maximale estimée pour chaque année à partir de 1980 pour les zones autour de Podor et de Matam (pour les deux rives du fleuve au Sénégal et en Mauritanie).

Les deux tuiles des zones autour de Podor et de Matam forment ensemble la vallée moyenne (Figure 4.5), définie comme la zone allant de Bakel au sud-est à Richard-Toll au nord-ouest. Le pourcentage moyen d'inondation des deux sous-zones peut être utilisé pour estimer la zone d'inondation annuelle maximum pour l'ensemble de la moyenne vallée, pour les deux rives du fleuve au Sénégal et en Mauritanie (Figure 4.11).

Selon nos estimations, la zone d'inondation maximale annuelle varie entre 50 000 et 450 000 ha sur l'ensemble de la moyenne vallée, d'une superficie d'environ 755 514 ha (Richard Toll - Bakel). Ces estimations montrent une variation énorme au fil des ans, mais il est clair que la zone d'inondation est généralement relativement petite comparée à l'ensemble de la moyenne vallée au cours des dernières années. Avant la Grande Sécheresse et la construction des barrages, la zone d'inondation était beaucoup plus vaste. Selon DeGeorges & Reilly (2006), une superficie moyenne de 459 000 ha a été inondée chaque année au cours de ces années.

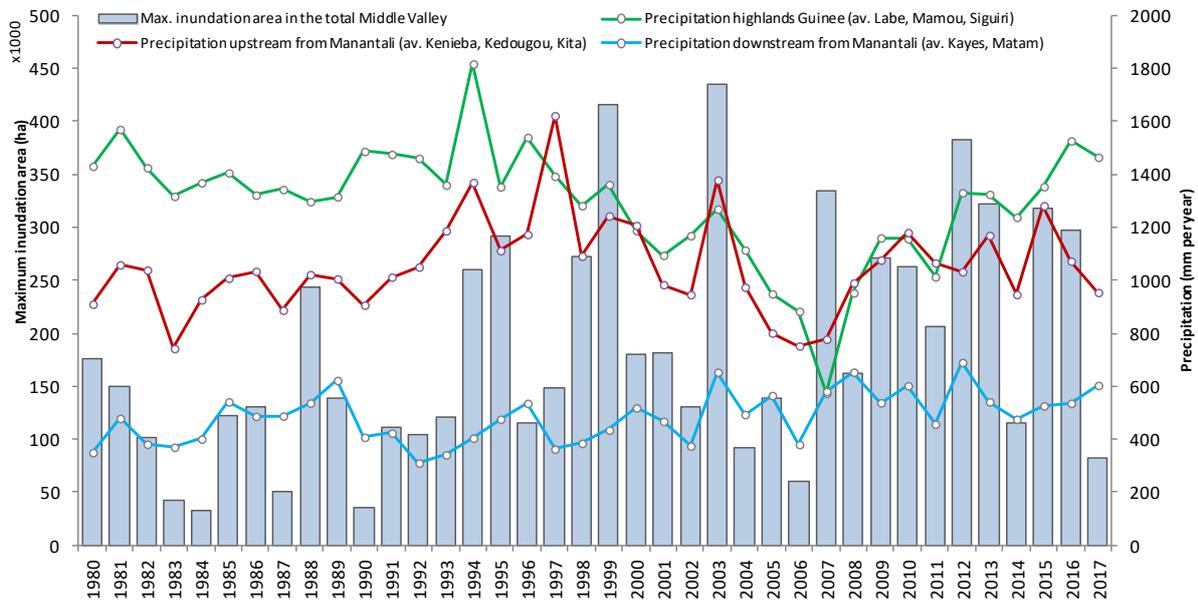


Figure 4.11 Estimations de la superficie d'inondation maximale par an dans l'ensemble de la moyenne vallée (environ 755 514 ha de Bakel à Richard Toll), pour les deux rives du fleuve au Sénégal et en Mauritanie. De plus, les précipitations moyennes (mm par an) sont indiqués pour les stations des hauts plateaux guinéens (en vert: Labé, Mamou et Siguiri), en amont de Manantali (en rouge: Kenieba, Kedougou et Kita) et en aval de Manantali (en bleu: Kayes et Matam).

En ce qui concerne le changement climatique, une question importante est la suivante: quelle est l'influence des précipitations sur la zone d'inondation et quelle est l'influence de la gestion de l'eau sur les niveaux d'eau? La figure 4.11 ne montre pas immédiatement un lien étroit entre les précipitations annuelles et la zone d'inondation estimée. Les années de forte inondation dans la moyenne vallée, le taux de précipitation en amont n'est pas toujours élevé, et inversement: les années de pluie abondantes ne montrent pas toujours de fortes valeurs d'inondation dans la moyenne vallée.

Pour analyser la relation entre la superficie inondée et les précipitations dans les bassins versants, les graphiques en nuages de points (Figure 4.12) apportent plus de clarté. Dans ces graphiques, la superficie maximale annuelle estimée d'inondation dans la moyenne vallée est représentée par rapport aux précipitations dans les hauts plateaux de la Guinée (A), en amont de Manantali (B) et en aval de Manantali (C). Il ressort clairement de ces chiffres qu'il n'y a pas de corrélation forte entre les précipitations et l'inondation, ce qui signifie que les précipitations annuelles dans le bassin versant ne déterminent pas de manière significative la zone d'inondation maximale la même année.

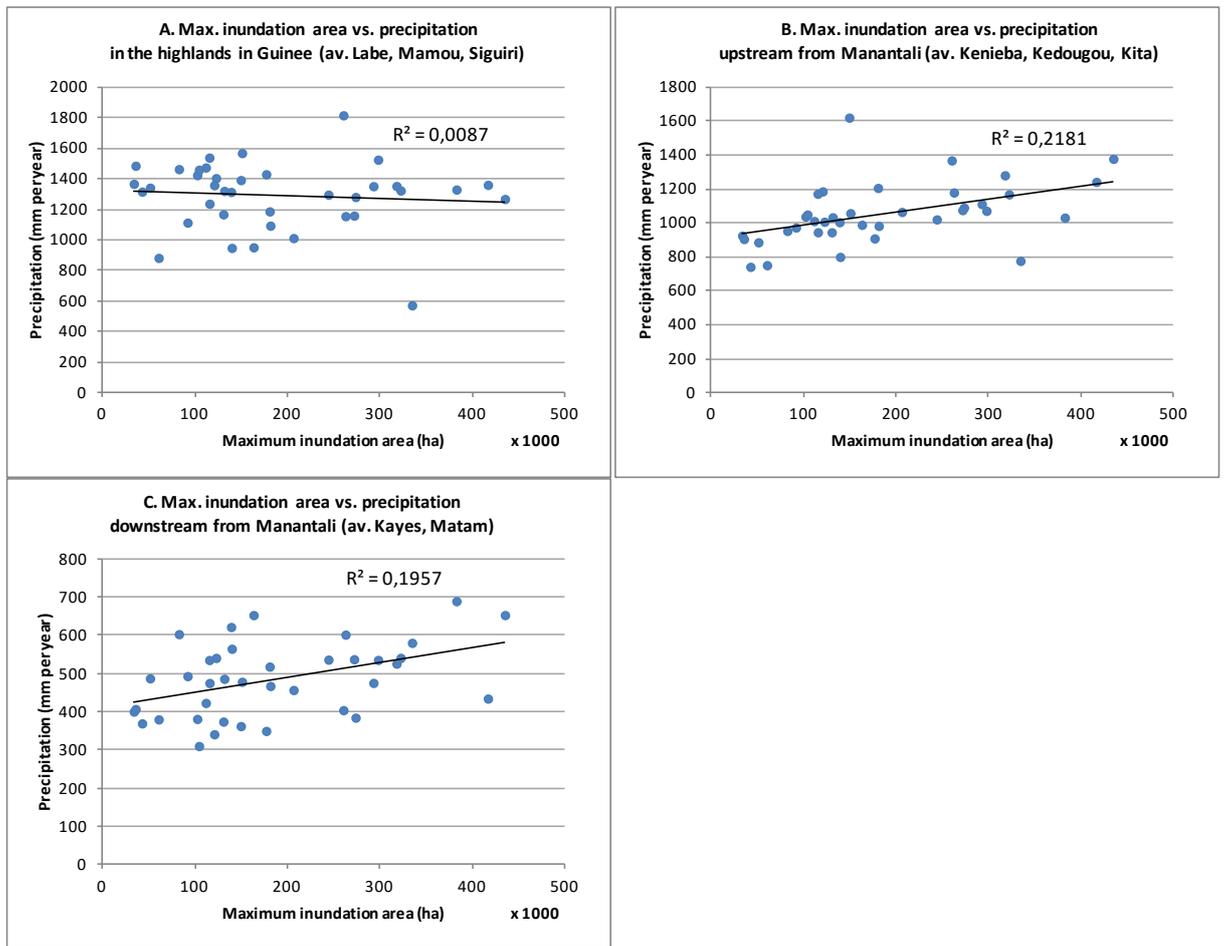


Figure 4.12 Nuages de points, illustrant la superficie maximale estimée annuelle d'inondation dans la moyenne vallée par rapport aux précipitations dans les hauts plateaux de Guinée (A), en amont de Manantali (B) et en aval de Manantali (C).

L'inondation n'étant pas fortement corrélée aux précipitations dans la zone du bassin du fleuve, la variation du niveau de l'eau est donc également influencée par d'autres facteurs. Dans les bassins fluviaux sahéliens, l'interaction entre le débit et les eaux souterraines joue un rôle important. Après plusieurs années sèches (d'où la baisse des niveaux d'eaux souterraines), une partie importante de l'eau est «utilisée» pour compléter les ressources en eaux souterraines. Cela signifie que plus de précipitations au cours d'une année donnée ne se traduisent pas directement par un débit plus élevé, et donc par une grande surface inondée. La même chose s'applique à l'inverse: après une série d'années humides, moins de précipitations seront nécessaires pour provoquer des inondations, car les niveaux d'eaux souterraines sont encore relativement élevés. Ce phénomène est parfois appelé «mémoire hydrologique» du système et est également connu pour le Delta Intérieur du Niger (Bassin supérieur du Niger: Zwarts et al. 2005, Zwarts et al. 2009).

La gestion de l'eau en amont est bien entendu beaucoup plus importante. Depuis la construction du barrage de Manantali sur l'affluent du Bafing (fournissant près de la moitié du débit annuel), le niveau de l'eau du fleuve Sénégal est en grande partie déterminé par la gestion de l'eau du barrage (rétention en saison des pluies, rejets supplémentaires pendant la saison sèche). Les débits des bassins versants de la Faleme, du Baoulé et de Bakoye sont

encore incontrôlés et présentent un schéma naturel de déversement. Ce schéma changera avec la mise en service de nouveaux barrages sur l'affluent Falémé (à Goubassi) et sur le fleuve Sénégal (à Gouina). La gestion opérationnelle des barrages actuels (Manantali, Félou) et des futurs barrages (Goubassi, Gouina) sera déterminante pour atténuer l'impact du changement climatique dans la vallée en aval.

#### **4.4 En conclusion**

Les résultats des analyses de ce chapitre permettent de tirer les conclusions suivantes:

1) Pour la disponibilité de l'eau dans la basse moyenne vallée, l'approvisionnement en eau par le fleuve est très important. Jusqu'à ce que nous sachions, il y a une impulsion d'inondation saisonnière avec des inondations importantes de septembre à octobre.

2) De grandes parties de la basse et moyenne vallée situées entre Bakel et Podor sont inondées chaque année au cours de cette période, mais de vastes inondations ne se produisent certainement pas chaque année. Il y a une énorme variation annuelle de la superficie inondée. Les inondations sont étroitement liées aux niveaux d'eau maximum, qui sont à leur tour fonction du débit du fleuve.

3) Les analyses des niveaux d'eau associés à la disponibilité spatiale de l'eau montrent qu'il existe une corrélation exponentielle évidente: généralement, lorsque le niveau d'eau du fleuve dépasse une limite de 3 mètres, le fleuve déborde de son lit et les inondations se produisent avec une expansion exponentielle.

4) La variation des débits, et donc de l'inondation annuelle, n'est que partiellement déterminée directement par les précipitations dans le bassin versant. L'apparition de séries d'années humides et sèches, également appelée «mémoire hydrologique», joue un rôle important, mais beaucoup plus dans la gestion en amont des ressources en eau par le biais de barrages.

5) Bien que le degré d'inondation dans la vallée ait augmenté depuis les grandes sécheresses des années 80, il existe toujours une forte restriction des inondations en raison de la gestion de l'eau par le biais de barrages. En même temps, cela peut offrir des possibilités de stockage de l'eau en tant que mesure d'adaptation au changement climatique.

## 5 Ressources naturelles, occupation des sols et services écosystémiques

---

*Le fleuve et son lit offrent des ressources naturelles précieuses aux communautés locales en tant que sols riches en nutriments pour l'agriculture, les pâturages et la pêche. Pour comprendre l'impact d'un changement du climat, il est important de disposer d'une image récente et de qualité de l'occupation des sols et des ressources naturelles. Dans ce chapitre, nous présentons les résultats d'une évaluation spatiale combinée à une étude sur le terrain de certaines parties de la moyenne vallée. Nous utilisons ces informations pour analyser l'impact du changement climatique.*

### 5.1 Approche Générale

Les ressources naturelles, l'occupation du sol et les services écosystémiques sont étroitement liés. Les ressources naturelles sont souvent exploitées selon différents types d'usage des sols, tandis que les ressources naturelles offrent un éventail de services d'approvisionnement ou d'autres services écosystémiques (Figure 2.6). L'objectif de cette partie de l'étude est d'analyser les implications de la dynamique du fleuve et de la disponibilité de l'eau sur les services écosystémiques. En particulier, l'objectif était d'obtenir plus d'informations sur les types d'usage des sols inondés à un moment donné. Nous avons donc cartographié les types d'occupation du sol, en tant qu'indicateur des ressources naturelles et des services écosystémiques.

En coopération avec des étudiants de l'université d'Amsterdam, des techniques de télédétection ont été appliquées pour créer des cartes d'occupation du sol des deux parties de la moyenne vallée (Rentier, 2018; Bossen, 2018; Juijn, 2018). Dans ces analyses, six types d'occupation du sol différents ont été distingués:

1. Zones dégagées avec des arbustes et une faible densité d'arbres (y compris une zone potentielle pour les cultures de décrues)
2. Forêts (canopée fermée)
3. Agriculture irriguée (principalement des rizières)
4. Sol stérile
5. Eau
6. Champs de *Typha*

Les types d'occupation du sol sont un bon indicateur, mais approximatif, des services écosystémiques dans la moyenne vallée. Le Tableau 5.1. donne une présentation globale des services écosystémiques que l'on peut distinguer au niveau des types de couverture du sol cartographiés. Dans cette étude, les cartes obtenues sont comparées aux cartes des eaux du chapitre 4. Cette comparaison permet de mieux comprendre l'importance spatiale des inondations temporaires dans la moyenne vallée et l'importance des niveaux d'eau associés en termes de services écosystémiques.

### 5.2 Cartographie de l'occupation du sol

Récemment, l'occupation du sol a été cartographiée à plusieurs reprises au Sénégal, en se basant sur l'expérience des experts sénégalais du Centre de Suivi d'Ecologie (CSS) et d'autres

institutions. Avec la qualité et la résolution croissantes de l'imagerie satellitaire, il est devenu plus facile de réaliser des projets nationaux d'occupation du sol. L'une des premières évaluations de l'usage des sols de haute qualité a été réalisée par Tappan et al. (2004). Outre les modèles d'utilisation des terres par écorégion, ils ont également analysé les tendances des changements dans l'usage des sols. Ce travail a récemment été mis à jour par le CILSS (2016) pour l'Afrique de l'Ouest, comprenant une évaluation de l'usage du sol et des tendances au Sénégal au cours des années 1975, 2000 et 2013. Récemment, l'Observatoire du Sahara et du Sahel a également produit un atlas de l'occupation du sol / usage du sol avec une résolution de 200 m (OSS, 2015). Pour nos objectifs, cette résolution est trop basse. Par conséquent, nous avons réalisé une carte spécifique d'occupation du sol avec Sentinel pour cette étude.

Tableau 5.1. Impression globale des services écosystémiques des types de couverture du sol dans la moyenne vallée du fleuve Sénégal, basée sur deux visites sur le terrain en février et décembre 2018 et sur des études antérieures de Klop et al. (2016).

Type d'occupation des sols	Usage des sols	Services Ecosystémiques
Globalement : le lit du fleuve au niveau du système	Divers types d'usage des sols et de l'eau: Agriculture irriguée, cultures de décrue des inondations, pâturage, pêche	- Contrôle des inondations (important au niveau du système et spécifiquement pour le Delta du Sénégal et Saint - Louis - rétention d'eau (importante aux niveaux local et régional) - Transport
Zones ouvertes avec des arbustes et une faible densité d'arbres (couverture inférieure à 50%) Les essences les plus fréquentes sont les acacias <i>seyal</i> , <i>Acacia nilotica</i> , <i>Ziziphus mauritianus</i> , <i>Balanites aegyptiaca</i> , <i>Faidherbia albida</i>	- pâturages saisonniers - Cultures de décrue le long du fleuve - Petit et moyen jardinage potager: principalement oignons, chou, tomates, piment, aubergine, carottes, etc. Récessions en partie inondables, irrigation à petite échelle	- Sols humides riches en nutriments pour l'agriculture - Arbres: bois, fruits, charbon de bois, usage médicinal - Végétation pour le pâturage - Biodiversité
Forêts humides et inondées à canopée fermée Les forêts inondées sont principalement constituées d' <i>Acacia nilotica</i> et, dans une moindre mesure, de <i>Ziziphus mauritianus</i>	- Pâturage limité	- Bois, fruits, charbon de bois, usage médicinal Biodiversité
Agriculture irriguée	- La riziculture - Production de canne à sucre	- Biodiversité (espèces spécifiques limitées)
Sols stériles (principalement la partie occidentale de la vallée)	- Aucune / pâture de faible intensité	- Végétation pour le pâturage - Biodiversité
Plans d'eau ou Eaux végétantes	- Pêche	- Eau potable pour les communautés locales et le bétail - Alimentation (poisson) - Biodiversité
Zones infestées par <i>Typha</i> / dans la partie orientale Champs de <i>Scirpus</i>	- Pâturage (fortement limitée)	- Biodiversité

Les cartes d'occupation du sol ont été établies à l'aide de techniques de télédétection associées à deux missions sur le terrain dans la vallée moyenne (février et décembre 2018, annexes A et B), afin de collecter des sites de formation et de les valider. Ces cartes montrent la distribution spatiale de différents types d'utilisation des sols et de terrains dans le bassin du fleuve Sénégal. Des images satellites ont été utilisées pour ces analyses.

### **5.2.1 Les méthodes des techniques de télédétection**

Pour l'analyse spatiale de l'occupation du sol, des images satellite détaillées de Sentinel-2A ont été utilisées. Ces images datent du 10-05-2018 et couvrent la moyenne vallée de Bakel au sud-est à Richard-Toll au nord-ouest. Les images ont été téléchargées à partir du hub de données à accès libre de l'ESA (ESA, 2018). Cette imagerie a treize bandes spectrales différentes et une résolution de 10 à 20 mètres. Après avoir téléchargé toutes les données nécessaires, les données ont été préparées pour la classification. Les bandes spectrales B2, B3, B4 et B8 ont été empilées pour chaque image individuelle et les couleurs ont été corrigées à l'aide de l'outil de correction des couleurs d'ERDAS Imagine 2015. Après l'empilement des couches, toutes les tuiles ont été mosaïquées et équilibrées en couleurs, puis découpées pour créer un fichier raster couvrant toute la moyenne vallée. Ensuite, le raster pré-traité a été classé dans *eCognition* à l'aide de l'analyse OBIA (Object Based Image Analysis). Lors de l'exécution d'OBIA, les pixels sont regroupés dans des objets en fonction de leur ressemblance spectrale, un processus appelé «segmentation». Afin d'obtenir le paramètre d'échelle optimal pour cette segmentation, les recherches de Darwish et al. (2003) ont été utilisées comme ligne directrice. *eCognition* ajoute automatiquement une catégorie «non classifiée» pour les zones qui ne peuvent pas être classées.

Pour la classification dans *eCognition*, les sites de formation ont été utilisés comme références. Ces sites de formation ont été désignés pour chaque classe et sont basés sur les points d'observation sur le terrain au cours de la mission sur le terrain du 20 au 26 février 2018 (annexe A). En combinant les coordonnées de ces observations de terrain, l'imagerie Sentinel-2A et des données visuelles supplémentaires provenant de Google Earth, différentes classes ont été identifiées sur l'imagerie satellite puis classées pour l'ensemble de la plaine d'inondation potentielle de la moyenne vallée. Après la classification, les petits pixels ont été filtrés à l'aide de l'outil '*majority filter*' dans ArcMap.

Enfin, une évaluation de la précision a été réalisée dans ArcMap afin de valider les résultats de l'analyse. Des points répartis aléatoirement dans chaque classe ont été générés, le nombre de points de chaque classe étant proportionnel à sa surface relative. Selon Congalton (1991), une bonne règle empirique consiste à collecter un minimum de 50 échantillons pour chaque catégorie d'usage des sols, ce qui donne lieu à une évaluation de plus de 350 points d'échantillonnage pour l'analyse de l'usage des sols de la moyenne vallée. Lors de l'évaluation de la précision, la valeur 0 ou 1 a été attribuée à chaque point d'échantillonnage, indiquant si la zone classée était affectée à la classe correcte (1) ou non (0). À la fin de l'évaluation, l'exactitude totale a été calculée. La précision totale est la fraction des points classés avec précision par rapport au nombre total de points sélectionnés.

## 5.2.2 Résultats de la télédétection

### Fiabilité de la cartographie

La cartographie a été réalisée avec des techniques automatiques et à une échelle globale, ce qui signifie que ces résultats ne peuvent pas être utilisés comme une carte détaillée de l'occupation du sol sur le terrain. À ces fins, d'autres cartes de l'occupation du sol sont disponibles, telles que les cartes d'usage des sols du CILSS (2016) et Tapan et al. (2004). Pour une bonne impression de l'occupation du sol dans la moyenne vallée, nous nous référons récemment aux atlas de l'OSS (2015a, 2015b). En outre, les analyses pour la présente étude ont été effectuées pour un moment précis (images sentinelles du 10 mai 2018). Aux fins de la présente étude, le niveau global et le nombre limité de types d'occupation du sol ne sont pas une restriction, car nous souhaitons analyser la combinaison avec les inondations.

La précision globale des cartes générées était de 78% (286/366) sans classe (type d'occupation du sol) inférieure à 50%. Selon Landis & Koch (1977), une valeur supérieure à 80% représente un accord fort et une valeur comprise entre 40 et 80% représente un accord modéré. La précision globale de 78% de la carte d'occupation du sol générée peut donc être qualifiée d'assez fiable. Les champs de Typha et l'eau présentent les probabilités de précision les plus faibles pour (respectivement 50% et 56%). Ceci est principalement dû à la réflexion de couleur difficile à reconnaître. Les zones dégagées avec des arbustes et des cultures de décrue, et l'agriculture irriguée présentent les taux de précision les plus élevés (respectivement 90 et 85%), ce qui signifie que ces types d'usage du sol peuvent être classés avec précision.

### Répartition des types d'occupation du sol

La carte générée montre clairement la variation et la distribution de six types différents d'occupation du sol et d'usage des sols dans la plaine inondable potentielle (Figures 5.2 et 5.3). Une version détaillée de cette carte en ligne peut être trouvée en version numérique à l'Annexe D. Le Tableau 4.1 présente les statistiques correspondantes de ces cartes. Les zones pour différents types d'occupation du sol ont été calculées en extrayant le nombre de pixels pour chaque type d'occupation du sol et en multipliant par 100 (taille de pixel Sentinel-2 = 10x10m). Les superficies sont calculées par rapport à la plaine inondable potentielle totale de la moyenne vallée, avec les limites indiquées aux Figures 5.1 et 5.2.

Tableau 5.1 Surface totale calculée pour chaque type d'occupation du sol dans la plaine inondable potentielle totale de la moyenne vallée.

Type d'occupation du sol	Nbre. de pixels	Surface (m <sup>2</sup> )	% de la plaine d'inondation potentielle totale
1 Zones dégagées avec des arbustes et une faible densité d'arbres (y compris une zone potentielle pour les cultures de décrue)	37316407	3731640700	53,1
2 Forêts (canopée fermée)	2141367	214136700	3,1
3 Agriculture irriguée (principalement des rizières)	2531587	253158700	3,6
4 Sol nu	24935885	2493588500	35,5
5 Eau	2343096	234309600	3,3
6 Champs de Typha	999805	99980500	1,4
<b>Total</b>	<b>70285752</b>	<b>7028575200</b>	<b>100</b>

Les résultats montrent que plus de la moitié de la plaine inondable potentielle concerne des zones dégagées ayant des arbustes et une faible densité d'arbres. Les arbres actuels sont principalement des *Acacia nilotica*, mais aussi, dans les endroits plus secs, *Faidherbia albida* (Acacia blanc), *Acacia seyal* (Acacia rouge, principalement à l'est de la vallée) et *Balanites aegyptiaca*. Ces parties du lit du fleuve sont des zones potentielles pour les cultures de décrues en cas d'inondation à grande échelle. Surtout pour les communautés rurales, cette méthode d'agriculture réalisable était et reste lucrative. On cultive principalement du sorgho et une variété de légumes: haricots, oignons, tomates, choux, aubergines, piment, gombo, carottes, patates douces, etc. Le degré d'utilisation de cette zone potentielle pour les cultures de décrue dépend du degré de inondation. En théorie, une très grande surface convient aux cultures de décrue en cas d'inondation à grande échelle. Notre méthode de télédétection ne permet pas de détecter la différence entre l'agriculture traditionnelle de décrue et les autres zones libres recouvertes de végétation, car la décrue est pratiquée uniquement pendant et après la période des pluies. Il était très difficile de trouver des images utiles récemment au cours de cette période (sans nuages).

De plus, il y a une grande proportion de sol nu dans la moyenne vallée (35,5%). Dans ces zones, la perte de couverture végétale, le surpâturage et l'érosion des sols induits par la sécheresse ont pour résultat des sols nus et non productifs, même pendant la saison des pluies. La portion de sol nu dans la zone autour de Podor est relativement grande, tandis que la zone autour de Matam montre plutôt des zones plus ouvertes avec de la végétation (Figures 5.1 et 5.2).

La proportion d'agriculture irriguée est faible sur l'ensemble de la moyenne vallée, beaucoup moins que dans le delta occidental. Le régime de gestion de Manantali facilite la disponibilité de l'eau pour l'agriculture irriguée toute l'année, ce qui conduit dans de nombreux endroits du bassin à un passage de l'agriculture traditionnelle de décrue à une production intensive, irriguée et permanente principalement de riz dans le bassin. Les systèmes d'irrigation se sont développés rapidement, en particulier dans le bas delta. Dans la moyenne vallée, le développement de l'agriculture irriguée a pris plus de temps et à une échelle beaucoup plus réduite que dans le delta inférieur densément peuplé. La riziculture est de loin l'activité agricole la plus importante. Sur la base de notre travail sur le terrain, nous pouvons conclure que l'agriculture irriguée a été détectée avec succès par la télédétection appliquée dans cette étude, bien qu'une petite partie de ces zones n'ait pas été détectée.

Dans la moyenne vallée, la forêt inondée à canopée fermée, constituée principalement d'*Acacia nilotica*, n'était présente qu'à petite échelle. Le climat sec offre peu de chance aux forêts relativement denses, mais plus important encore, une grande partie des vastes forêts inondées de la moyenne vallée ont déjà été défrichées (Tappan et al. 2004, CILSS 2016). Le déclin des arbres dans la vallée après le défrichage au cours des dernières années est préoccupant, et la superficie de forêt à couvert fermé deviendra probablement encore moins importante à l'avenir.

Enfin, les champs de *Typha* sont présents à petite échelle et sont plus fréquents dans la partie occidentale de la vallée moyenne (Figure 5.1). Dans la partie orientale de la vallée, des champs de *Scirpus* sont présents à la place du *Typha*. Cela correspond aux constatations faites lors des visites sur le terrain (annexes A et B). Les champs de *Typha* se développent rapidement en cas d'eau douce stagnante. De nos jours, dans le bas delta, une vaste zone de *Typha* s'y trouve (Zwarts et al. 2009), bloquant l'arrivée d'eau et provoquant la prévalence de maladies d'origine hydrique. De plus, les champs de *Typha* entravent sérieusement l'accès à l'eau aux pêcheurs.

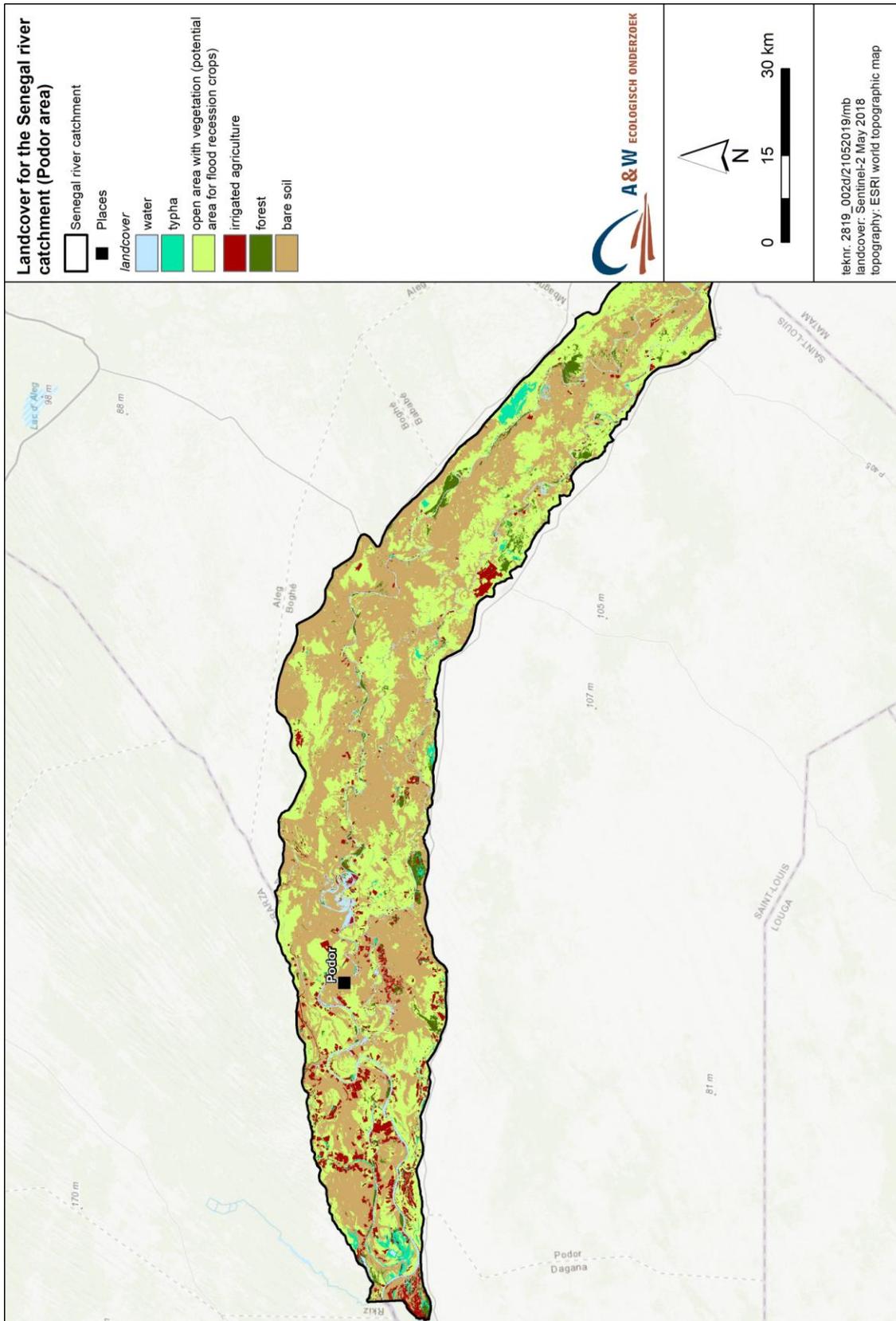


Figure 5.1. Types d'occupation du sol dans la zone de plaine inondable potentielle sélectionnée autour de Podor

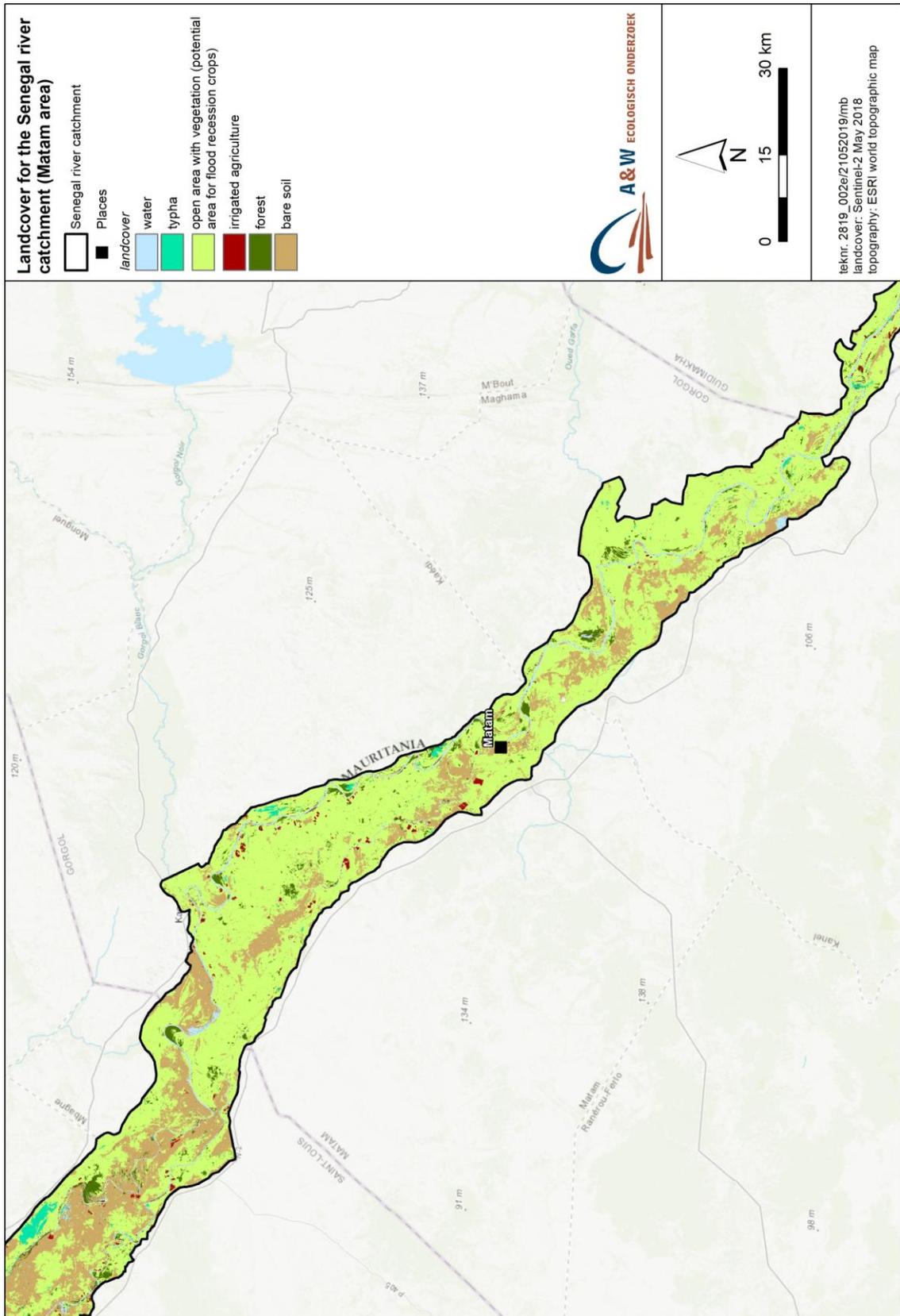


Figure 5.2. Types d'occupation du soldans la zone d'inondation potentielle sélectionnée autour de Matam.

### 5.3 Combinaison des cartes des eaux et des cartes d'occupation du sol

En combinant et en comparant les cartes des eaux générées et l'analyse de l'occupation du sol, il est possible de mieux comprendre les types d'usage des sols qui sont inondés lors d'inondations à grande échelle. De cette manière, il est possible de se faire une idée de la zone potentielle de culture de décrue, ainsi que de la zone comprenant la biodiversité dépendant des inondations.

#### 5.3.1 Méthodologie

Les cartes NDWI générées (eau = 1, pas d'eau = 0) ont été multipliées par la carte d'occupation du sol à l'aide du calculateur de trame dans ArcMap (ArcGIS Desktop 10.5.1). Sur la carte d'inondation résultante, seuls les pixels de l'occupation du sol inondés ont conservé leurs valeurs d'origine. La valeur 0 a été attribuée aux pixels non inondés. Ensuite, le nombre de pixels inondés pour chaque type d'occupation du sol a été extrait de la table attributaire. Pour calculer les inondations dans les régions de Podor et de Matam, les cartes d'occupation du sol générées par les étudiants de l'UVA ont été connectées aux contours des tuiles Landsat. La surface potentiellement inondée dans le bassin versant, séparément pour la région de Podor et la région de Matam, fait référence à la zone située sur les deux dalles Landsat (Figure 5.3). Enfin, les valeurs de pixel Landsat ont été multipliées par 900 pour calculer les zones inondées (taille de pixel Landsat = 30x30m).

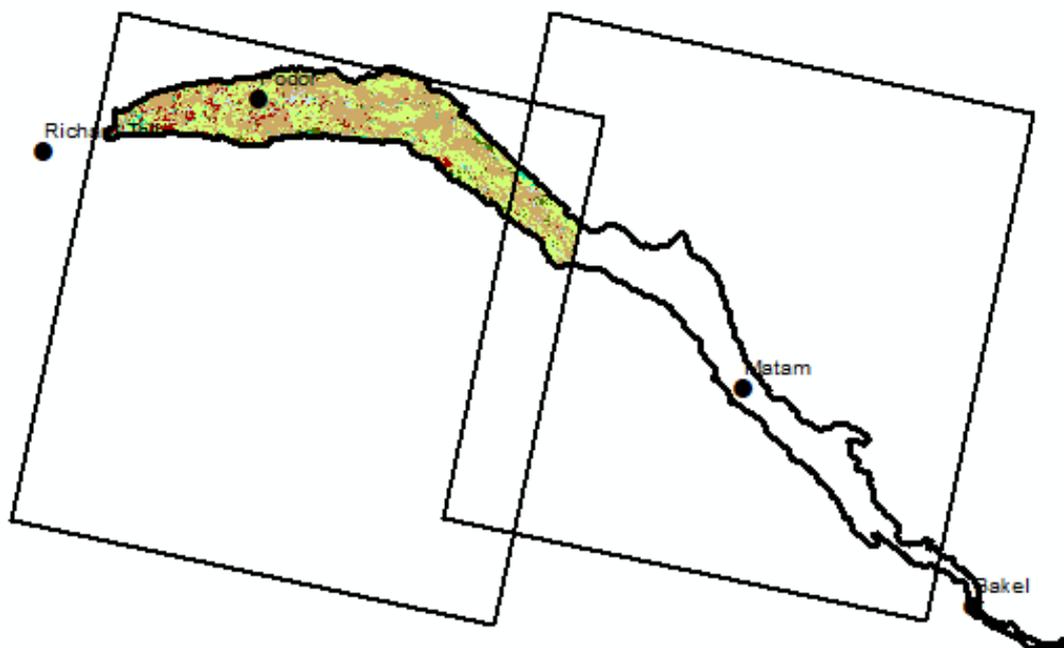


Figure 5.3 Comparaison entre les grilles de tuiles Landsat et la carte d'occupation du sol.

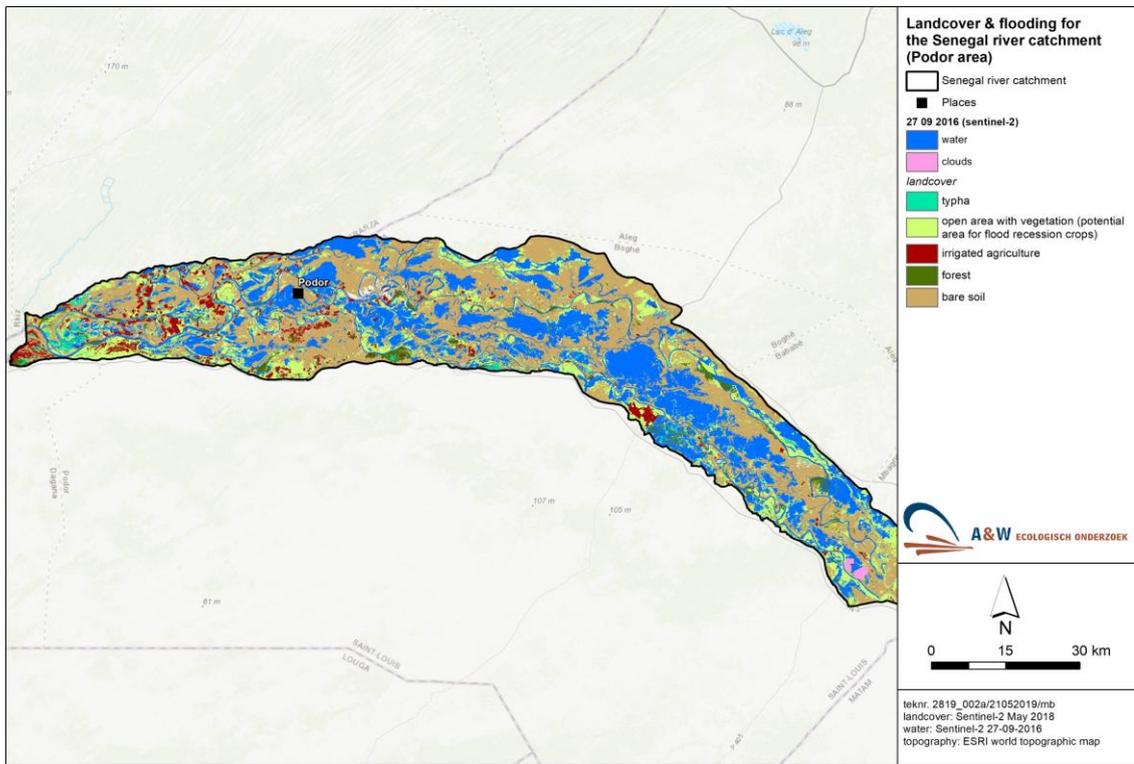


Figure 5.4 Exemple de carte combinée du 27-09-2016, montrant les inondations par rapport à l'occupation du sol dans la région de Podor.

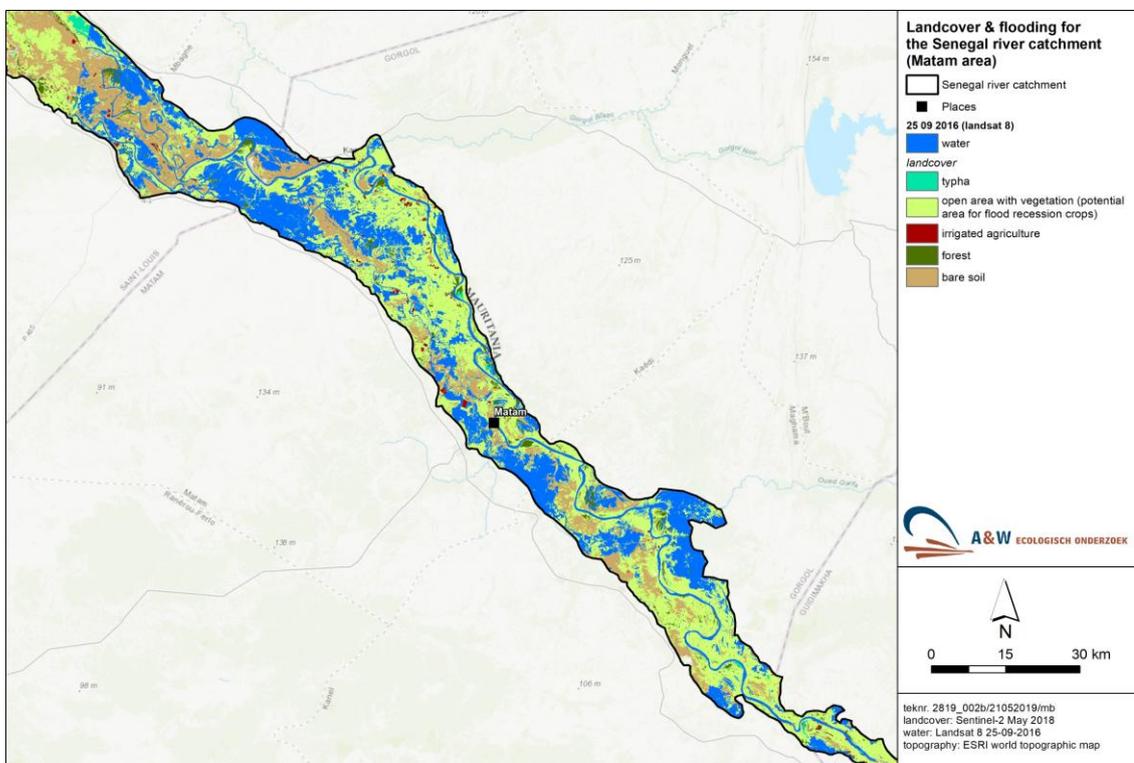


Figure 5.5 Exemple de carte combinée du 25-09-2016, montrant les inondations par rapport à l'occupation du sol dans la région de Matam.

### 5.3.2 Résultats

Les cartes générées montrent les six types d'occupation du sol dans la plaine inondable potentielle en combinaison avec les eaux stagnantes à des moments particuliers. Les Figures 5.4 et 5.5 sont des exemples de cartes combinées d'inondations et d'occupation du sol à la fin de septembre 2016 dans la moyenne vallée. Nous avons pu effectuer 21 analyses combinées avec les cartes d'eau générées disponibles (12 pour Podor et 9 pour Matam). La Figure 5.6 montre la superficie inondée par type de terrain dans la plaine inondable potentielle par rapport au niveau d'eau dans le fleuve, séparément pour la région de Podor et la région de Matam. Les dates des images utilisées sont présentées dans les Tableaux 5.2 (Podor) et 5.3 (Matam).

Tableau 5.2 Surface totale calculée (en hectares) pour l'inondation pour chaque type d'occupation du sol de la plaine inondable autour de Podor, dans les limites de la Figure 5.4, à des dates spécifiques avec les niveaux d'eau correspondants. Le pourcentage du type d'occupation du sol par rapport à la superficie totale inondée est indiqué entre parenthèses.

Date	Niveau d'eau du fleuve à Podor (cm)	Surface totale inondée	Zones dégagées avec végétation (zone potentielle pour les cultures de décrue)	Sol stérile	Forêt	Agriculture irriguée
14-06 2017	286	11566	736 (6%)	791 (7%)	60 (1%)	1009 (9%)
17-07 2017	288	10663	1509 (14%)	739 (7%)	238 (2%)	744 (7%)
14-07 2016	293	10787	1184 (11%)	689 (6%)	239 (2%)	849 (8%)
26-08 2014	351	27398	11803 (43%)	4810 (18%)	501 (2%)	2002 (7%)
07-09 2017	362	38162	16803 (44%)	9649 (25%)	672 (2%)	1761 (5%)
27-09 2014	397	36285	19553 (54%)	6260 (17%)	663 (2%)	1233 (3%)
31-08 2016	444	65688	40177 (61%)	12529 (19%)	1477 (2%)	1827 (3%)
14-09 2015	485	102398	63452 (62%)	24414 (24%)	2088 (2%)	2152 (2%)
13-11 1999	485	132486	74834 (56%)	34443 (26%)	4345 (3%)	5510 (4%)
24-09 2013	504	132076	79506 (60%)	35278 (27%)	2941 (2%)	3138 (2%)
27-09 2016	516	129094	77447 (60%)	34692 (27%)	2063 (2%)	3349 (3%)
26-09 1999	549	264294	119676 (45%)	111144 (42%)	8095 (3%)	8329 (3%)

Tableau 5.3 Surface totale calculée (en hectares) pour l'inondation pour chaque type d'occupation du sol dans la plaine inondable autour de Matam, dans les limites de la Figure 5.5, à des dates spécifiques avec les niveaux d'eau du fleuve correspondants. Le pourcentage du type d'occupation du sol par rapport à la superficie totale inondée est indiqué entre parenthèses.

Date	Niveau d'eau du fleuve à Matam (cm)	Surface totale inondée	Zones dégagées avec végétation (zone potentielle pour les cultures de décrue)	Sol stérile	Forêt	Agriculture irriguée
24 06 2017	251	8147	1532 (19%)	486 (6%)	76 (5%)	317 (4%)
14 06 2017	234	11215	1470 (13%)	677 (6%)	29 (1%)	575 (5%)
18 07 2014	326	18252	10838 (59%)	1032 (6%)	171 (0%)	262 (1%)
27 08 2017	453	33851	22285 (66%)	2189 (6%)	404 (1%)	640 (2%)
07 09 2017	489	47294	32709 (69%)	3927 (8%)	709 (1%)	943 (2%)
08 08 2016	616	53997	41070 (76%)	3223 (6%)	725 (1%)	641 (1%)
21 10 1999	696	121768	95042 (78%)	10924 (9%)	4277 (4%)	1224 (1%)
27 09 2016	714	117561	93634 (80%)	10572 (9%)	1883 (2%)	1115 (1%)
25 09 2016	726	114715	91590 (80%)	10428 (9%)	2102 (2%)	991 (1%)

Des informations intéressantes se dégagent de l'ensemble de données de la région de Podor. Premièrement, lorsque le niveau de l'eau dans le fleuve dépasse 3 m, ce qui entraîne une inondation, il s'agit principalement du type de terrain dégagé, avec des zones de végétation. En règle générale, les zones inondées sont moins inondées. Naturellement, dans les zones d'agriculture irriguée, les inondations sont rares. La même chose vaut pour la région autour de Matam; la plupart des inondations se produisent dans des zones dégagées de végétation. Les zones de sol stérile, les forêts à canopée fermée ou les zones irriguées sont beaucoup moins inondées en période de crue des eaux.

À des moments où le fleuve déborde dans la zone autour de Podor, les types d'occupation du sol «zones dégagées avec végétation» et «sol stérile» sont inondés par une expansion exponentielle (Figure 5.6). Dans le cas de Podor, par exemple, où les niveaux d'eau des rivières sont d'environ 5 m, comme ce fut le cas en novembre 1999, septembre 2013, septembre 2015, septembre 2015, quelque 70 000 à 80 000 ha de type d'occupation du sol 'zones dégagées avec végétation' deviennent inondés dans la partie de 402 000 kha du bassin autour de Podor, comme le montre la Figure 5.4. Cela signifie qu'environ 20% de la plaine inondable autour de Podor est une zone potentielle propice aux cultures de décrue après une inondation prolongée. En outre, le cas extrême de septembre 1999, lorsque le niveau du fleuve avait dépassé les 5,5 m, a été caractérisé par de nombreuses inondations au cours desquelles non seulement de nombreuses zones dégagées de végétation ont été inondées (environ 30% de la plaine inondable potentielle), mais également une très grande superficie de sol stérile.

La question pertinente est la suivante: à quelle fréquence des inondations importantes se produisent-elles autour de Podor? Après l'automne exceptionnel de 1999, avec des niveaux d'eau supérieurs à 5,5 m, seulement un niveau d'eau comparable a été atteint en 2003. À l'automne de 2007, 2009, 2010, 2012, 2013, 2015 et 2015, les niveaux d'eau du fleuve ne dépassaient généralement pas 5 m au maximum. Les années qui ont suivi, les inondations du fleuve ont été moins importantes; le niveau d'eau du fleuve ne dépassait pas 3,5 à 4,3 m. Durant ces années, il n'y a pas eu d'inondations extrêmes autour de Podor. Ou du moins: au cours de ces années, il n'était pas question d'une expansion exponentielle des inondations dans les zones dégagées recouvertes de végétation, qui sont des zones potentielles pour les cultures en décrue.

Quant à la région autour de Matam, on observe une forte corrélation similaire entre le niveau d'eau du fleuve et le type d'occupation du sol 'zones dégagées recouvertes de végétation'. Ce type devient inondé d'expansion exponentielle, en particulier lorsque le niveau de la rivière atteint environ 7 m (Figure 5.6). Dans de telles situations, environ 95 000 hectares d'hectares ouverts avec de la végétation sont inondés dans la dalle, comme le montre la Figure 5.5, qui représente environ 28% de la plaine inondable potentielle autour de Matam. Depuis l'automne / hiver extrêmement humide de 1999, les niveaux d'eau du fleuve dépassaient 7 m en 2000, 2001, 2003, 2007-2013, 2015 et 2016. Au cours des années 2002, 2004, 2005, 2006, 2006 et 2017, les niveaux d'eau du fleuve étaient inférieurs à 7 m. Nous n'avons pas réussi à trouver d'imagerie sans nuage à utiliser pour la télédétection au cours de ces années. Sur la base de l'analyse de corrélation, nous pouvons supposer qu'il n'y a pas eu d'inondation significative au cours de ces années. Ou du moins: ces années-là, il n'était pas question d'expansion exponentielle par crue conformément à la courbe de la figure 5.6.

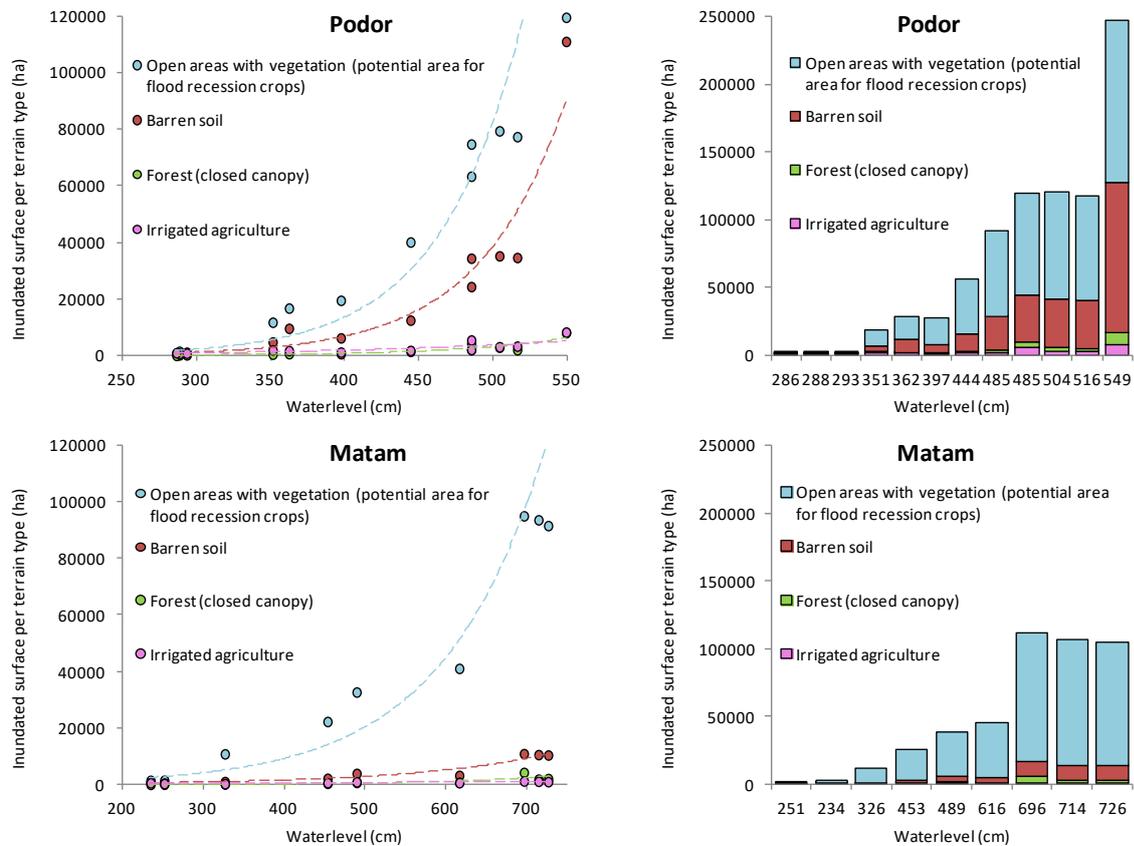


Figure 5.6 Surface inondée par type de terrain dans la plaine inondable potentielle par rapport au niveau d'eau du fleuve, séparément pour la région de Podor et la région de Matam.

## 5.4 Conclusion

Les résultats des analyses présentées dans ce chapitre permettent de tirer les conclusions suivantes:

- 1) Dans la vallée du Sénégal, plusieurs types d'usage des sols sont classés: zones dégagées avec des arbustes et une faible densité d'arbres, forêts (canopée fermée), agriculture irriguée (principalement des rizières), sol stérile, eau libre et champs de *Typha*.
- 2) Une partie importante des types d'usage des sols et des services écosystémiques associés est liée aux inondations annuelles et à la disponibilité de l'eau. En particulier, le type «zones dégagées avec végétation», la zone potentielle pour les cultures de décrue et importante pour le pâturage, dépend des crues en période humide.
- 3) Ces dernières années, toutefois, les inondations sont de moins en moins fréquentes et il n'est certainement plus question d'inondations annuelles à grande échelle dans des zones qui ne sont pas directement connectées au lit du fleuve. Cette évolution peut être considérée comme négative en ce qui concerne plusieurs services écosystémiques fournis par le fleuve. 53% de la surface totale de la moyenne vallée, sur les deux rives du fleuve au Sénégal et en Mauritanie, sont classés comme zones dégagées avec végétation, ce qui est potentiellement propice aux cultures de décrue après des inondations à grande échelle. Toutefois, ces dernières années, les

inondations se sont limitées à une zone relativement petite directement reliée au lit du fleuve.

- 4) Les analyses spatiales des inondations combinées à l'occupation du sol montrent qu'il existe une corrélation exponentielle évidente: généralement, lorsque le niveau d'eau du fleuve dépasse une limite de 3 mètres, le fleuve déborde de son lit et les inondations se produisent avec une expansion exponentielle.
- 5) La combinaison des cartes d'eau et de l'usage des sols fournit de nombreuses informations: la disponibilité de l'eau en tant que ressource naturelle se limite de plus en plus à la zone située le long du fleuve, ce qui est préoccupant. La diminution des zones potentielles pour les cultures de décrue est préoccupante, mais la biodiversité de ces habitats est sérieusement mise à mal, du fait de la réduction des inondations dans les zones semi-arides ouvertes du bassin. Comme cela a été expliqué au chapitre 3, les changements climatiques entraîneront une augmentation des taux d'évaporation et donc une diminution supplémentaire de la disponibilité en eau dans la moyenne vallée, en particulier dans les zones reculées du bassin qui ne sont pas directement reliées au lit du fleuve.



*Les habitats naturelles dans la basse vallée, près de Podor, février 2018.*



Maraichage près de Podor, février 2018.

## 6 Les mécanismes d'impact du changement climatique

### 6.1 Introduction

Les états riverains du bassin du fleuve Sénégal souhaitent poursuivre le développement de l'utilisation des ressources en eau fluviale pour soutenir l'économie régionale et la sécurité alimentaire, ainsi que pour conserver et restaurer les ressources restantes des zones humides. Pour le délicat équilibre entre ces objectifs, la gestion intégrée des ressources en eau (GIRE) est le processus clé. Pour la gestion à venir des ressources en eau et des écosystèmes dans le bassin du fleuve Sénégal, cela est élaboré dans le SDAGE (Schéma Directeur de Gestion et de Gestion des Eaux du Fleuve Sénégal).

Les effets futurs du changement climatique exacerbent les problèmes associés à la pression anthropique sur les ressources naturelles. Selon une étude approfondie réalisée par Artelia (2018), la forte croissance démographique des quatre États du bassin du fleuve Sénégal, conjuguée aux effets du changement climatique, pourrait entraîner une pression humaine incontrôlée sur les ressources en eau du fleuve. Cela aura de graves conséquences pour l'environnement - déforestation massive, déstabilisation des rivières, mauvaise qualité de l'eau - et l'équilibre socio-économique des États. Dans cette perspective future, la vulnérabilité des communautés en particulier rurales est très élevée (Artelia, 2018).

Dans ce chapitre, nous développons les mécanismes d'impact du changement climatique afin de mieux formuler les mesures d'adaptation au chapitre 7. Une évaluation de l'impact du changement climatique sur les services écosystémiques liés à l'eau, comme dans cette étude et Artelia (2018), peut fournir des outils aux parties prenantes locales et aux décideurs pour une gestion de l'eau à l'avenir.

#### Trois changements principaux

Comme expliqué au chapitre 3, le changement climatique englobe trois principaux développements futurs: une augmentation de la température dans le bassin, une réduction des précipitations dans la zone de la tête de source du fleuve Sénégal, un régime de précipitations plus irrégulier et une saison humide plus courte dans le bassin (Figure 6.1).

L'augmentation prévue de la température entre + 3°C et + 6°C pour la fin du XXI<sup>e</sup> siècle par rapport à la fin du XX<sup>e</sup> siècle peut être considérée comme certaine, et est conforme aux projections climatiques antérieures pour cette région (par exemple Christensen et al., 2007). Cependant, l'évolution des précipitations annuelles est plus incertaine en Afrique de l'Ouest (chapitre 3, par exemple, Lebel et Ali 2009, Krysanova et al. 2015). Très probablement, il y aura plus de variation entre les années, et des changements sont attendus dans le calendrier et la durée de la période des pluies. La quantité totale de précipitations peut rester la même, mais la saison des pluies sera probablement plus courte. En outre, les précipitations intenses devraient devenir plus fréquentes et plus extrêmes, ce qui pourrait entraîner des inondations destructrices, l'érosion et la dégradation des sols. De plus, dans les hauts plateaux guinéens (en amont), les précipitations diminueront probablement, ce qui aura vraisemblablement un effet sur les débits du fleuve Sénégal. Il est important de mieux comprendre les conséquences pour le système hydrologique.

#### Mécanismes d'impact

Ces trois principaux changements liés au climat (augmentation de la température, diminution des précipitations dans le Fouta Djallon et un régime de précipitations local plus irrégulier)

auront un effet important sur divers paramètres hydrologiques et climatiques (Figure 6.1). Certains effets seront directs, tels que l'impact d'une température plus élevée sur l'évaporation, d'autres seront indirects, tels qu'une pression plus forte sur les ressources en eau restantes dans le lit du fleuve. Les effets indirects peuvent prendre plus de temps pour se manifester mais ne sont pas moins importants.

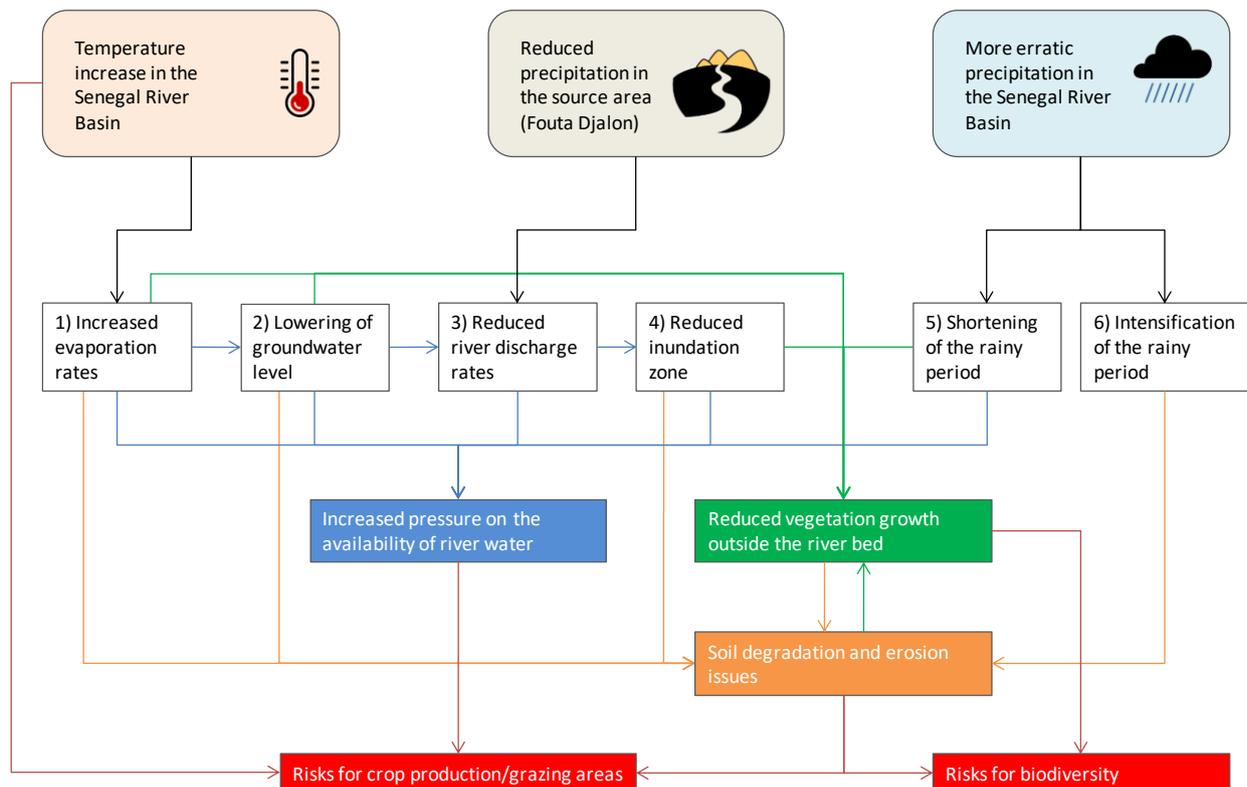


Figure 6.1 Un organigramme montrant tous les facteurs liés au climat et leurs interrelations.

L'augmentation des températures dans le bassin du Sénégal entraînera une augmentation des taux d'évaporation (n° 1 de la Figure 6.1). L'augmentation des taux d'évaporation aura un effet local sur la quantité d'eau stagnante, mais également sur le niveau de la nappe phréatique (n° 2). Le niveau des eaux souterraines devrait généralement baisser dans le bassin, en particulier dans les zones qui ne sont pas directement connectées aux rives du fleuve, ce qui aura de nombreuses conséquences. Premièrement, un abaissement du niveau des eaux souterraines aura un effet direct sur la disponibilité de l'eau via l'extraction des eaux souterraines, mais aussi sur le débit du fleuve (n° 3). Ces effets climatiques locaux, associés à la réduction des précipitations au niveau de la source (Fouta Djallon), entraîneront une réduction de la disponibilité en eau pour les inondations zonales temporaires (n° 4), ce qui aura un impact majeur sur les services écosystémiques du bassin hydrographique.

De plus, l'évolution des précipitations est susceptible de changer. Il n'existe aucune certitude absolue quant à la manière dont ces changements se dérouleront. Il y aura probablement plus de variation, à la fois en ce qui concerne la durée de la période des pluies et l'intensité des événements pluvieux. La période des pluies devrait être plus courte (n° 5), ce qui se traduira par une saison sèche plus longue. En outre, les pluies devraient être plus intenses (n° 6), ce

qui entraînerait une érosion des berges du fleuve, un risque accru de dommages aux champs agricoles et de dégradation des sols.

Tous ces développements entraîneront de manière irrévocable une pression accrue sur les ressources en eau du fleuve (flèches bleues sur la Figure 6.1). Immédiatement le long de la rivière, il y aura toujours assez d'eau disponible, mais le besoin deviendra particulièrement important dans les zones reculées du bassin, non reliées au lit du fleuve. En outre, l'augmentation de l'évaporation, la diminution de la nappe phréatique et la réduction de la période des pluies entraveront considérablement la croissance de la végétation, notamment la survie des arbres et la production du riz et d'autres cultures. Cela peut finalement conduire à la dégradation des sols. La dégradation des sols entraînera à son tour une nouvelle diminution de la végétation. Ces développements forment un cercle vicieux qui met en péril non seulement les possibilités d'élevage et de cultures de décrue, mais aussi, dans une large mesure, la biodiversité. L'intensification des événements pluvieux, la réduction des inondations, l'augmentation de l'évaporation et la baisse du niveau des eaux souterraines (flèche orange sur la Figure 6.1) sont d'autres facteurs qui exacerberont la dégradation et l'érosion des sols.

Le rôle clé de l'eau dans le bassin du fleuve Sénégal fait que les changements dans la disponibilité de l'eau à travers le changement climatique affectent tous les aspects de la vie rurale dans le bassin, mais auront également des effets de report sur l'économie régionale et nationale (Fig. 6.2).

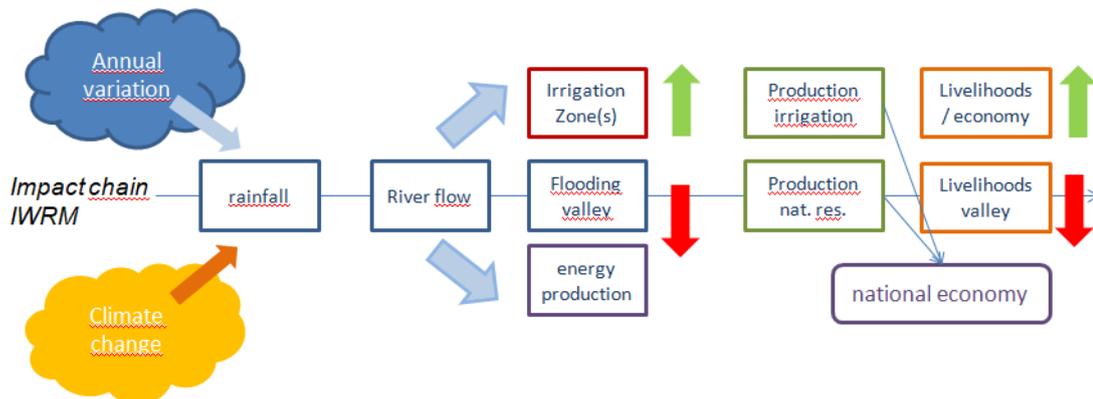


Figure 6.2. Résumé de la chaîne d'impact du changement climatique dans un bassin fluvial sahélien. Les précipitations variables déterminent le débit du fleuve, et le débit du fleuve détermine la disponibilité de l'eau dans la basse et la moyenne vallée et dans le delta. Il détermine également les opportunités d'irrigation, d'inondation et de production d'énergie, qui ont des effets directs et indirects sur la production de ressources naturelles, l'agriculture et, en fin de compte, sur l'économie (nationale et régionale) et les moyens de subsistance des communautés rurales.

## 6.2 L'impact sur le système hydrologique

Les principaux affluents du fleuve Sénégal proprement dit trouvent leur source dans les hauts plateaux de la Guinée, en particulier dans les montagnes du Fouta Djallon (Fig. 1.1). D'après l'évaluation présentée au chapitre 3, il est évident que le climat changera à l'avenir dans la région du bassin du fleuve Sénégal et qu'il est déjà en train de changer. On s'attend à ce que,

sans atténuation drastique du climat mondial (scénario RCP 4.5), les précipitations diminuent dans la zone de la source du fleuve Sénégal. C'est notamment le cas dans le bassin versant de l'affluent du Falémé et dans une moindre mesure du Bafing. L'ampleur de la diminution n'est pas précis et, compte tenu du niveau d'incertitude élevé, ne peut être donné que comme une indication du changement.

### Impact sur les débits et les inondations

La quantité de pluie annuelle est relativement élevée dans cette partie du bassin, environ 900-1300 mm par an (Figure 2.3). La diminution projetée des précipitations annuelles semble plutôt faible (> 30 mm, environ 3%). Il convient toutefois de souligner qu'il s'agit d'une part d'un vaste domaine et, d'autre part, que les projections sont très incertaines. Troisièmement, parallèlement à la diminution prévue des précipitations annuelles, la température augmentera, ce qui entraînera une évaporation beaucoup plus importante avec ses effets connexes. Enfin, et peut-être le plus important, les précipitations annuelles varient beaucoup. Durant les années humides, l'impact peut être très faible, mais en particulier au cours des années sèches, l'impact d'une diminution des précipitations peut être ressenti.

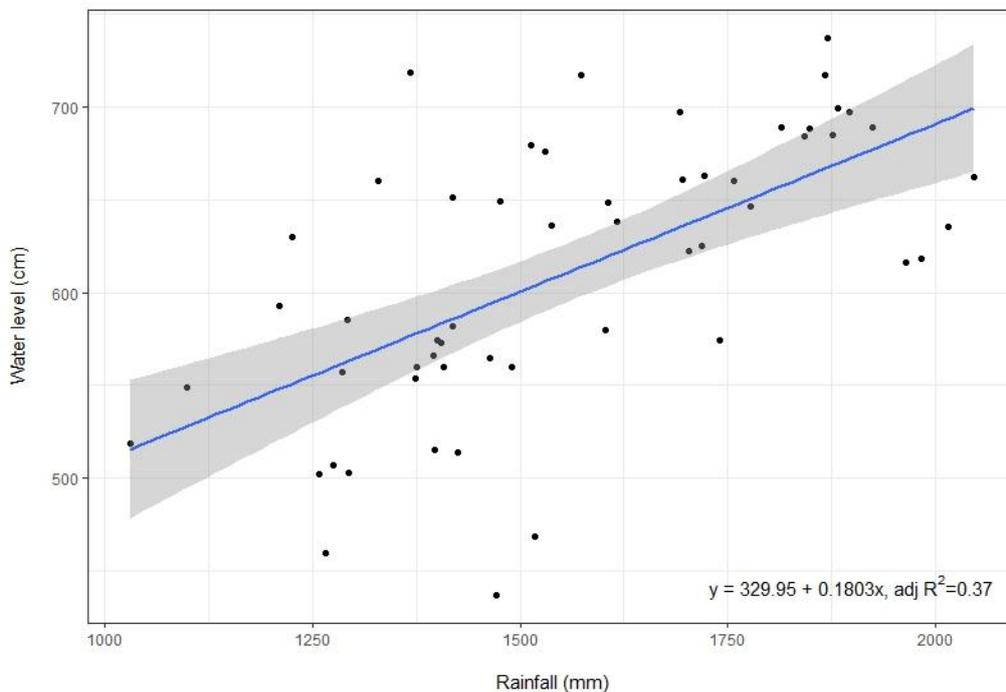


Figure 6.3. Exemple de lien entre les précipitations annuelles cumulées et le débit maximal à Kankan (fleuve Milo, affluent du Niger dans les hauts plateaux guinéens) entre 1938 et 1995. La zone grisée indique l'intervalle de confiance de 95% autour des valeurs prédites par l'équation de régression. De Klop et al. (2019).

Une diminution des précipitations devrait entraîner une diminution des débits. Dans les systèmes fluviaux sahéliens qui prennent leur source dans les hauts plateaux guinéens, il existe une relation claire entre les précipitations dans le bassin versant et le débit du système fluvial concerné (exemple de la Fig. 6.3). On peut s'attendre à ce que des relations comparables soient détectées pour les rivières Falémé et Bafing. Compte tenu de la relation étroite qui existe entre les débits et les inondations dans la moyenne vallée (chapitre 4), la zone d'inondation dans la moyenne vallée devrait également diminuer à l'avenir.

Pour quantifier l'impact hydrologique du changement climatique attendu sur le débit, il est nécessaire de disposer d'un modèle hydrodynamique permettant de modéliser l'impact du changement climatique dans les zones de la source. Une telle approche est testée dans le bassin du Niger supérieur en Guinée et au Mali (Liersch et al. 2018). Bien que ce type de modélisation dépende fortement de la qualité des données, il est possible de prévoir de manière quantitative l'impact futur d'un changement de régime de température et de précipitations sur l'évolution des débits. En utilisant les résultats présentés au chapitre 4, ces prédictions peuvent être utilisées pour une prévision spatiale des inondations.

### Zones sensibles

D'après l'analyse présentée au chapitre 3, il est précisé que les précipitations seront irrégulières et que la variation annuelle sera encore plus forte qu'aujourd'hui. De ce point de vue, on peut affirmer que les zones du bassin à pluviosité modeste, c'est-à-dire les zones situées au nord de Bakel (Figure 2.3), seront plus sensibles au changement climatique que les zones situées au sud de Bakel. C'est notamment le cas des régions du sud-est de la Mauritanie (Gorgol, Guidimakha, Assaba et Hodh el Gharbi) et de la partie Est du bassin au nord-ouest du Mali (région de Kaye), où l'augmentation de température serait la plus sévère (Fig. 3.4).

Dans la zone de la source du Falémé, les précipitations devraient être plus faibles à long terme. C'est une zone sensible où la pluviométrie est actuellement d'environ 900 à 1300 mm. Dans ces régions méridionales du bassin, où les précipitations sont relativement importantes, le couvert forestier diminue lorsque les précipitations tombent en dessous de 800 mm / an. Cela peut entraîner une dégradation du paysage et une érosion accrue. Ainsi, une partie des zones de la source en Guinée et des régions adjacentes au Mali et au Sénégal sont également sensibles au changement climatique.

Les lacs peu profonds et les zones humides reliées au fleuve Sénégal, tels que le lac R'kiz en Mauritanie, sont également vulnérables au changement climatique (Klop et al. 2016). Dans ces régions, l'agriculture pluviale n'est plus envisageable avec des taux d'évaporation croissants dus à des températures plus élevées associées à des précipitations plus irrégulières. En combinaison avec un approvisionnement en eau limité dans ces zones, la qualité de l'eau sera probablement réduite en raison d'une stagnation accrue et, les années où les précipitations sont faibles, ces masses d'eau peuvent en grande partie s'assécher. Ces changements contribuent à la dégradation des zones humides d'eau douce, ce qui se traduit par une perte de ressources naturelles pour les communautés environnantes, une grave perte de biodiversité, la colonisation des espèces envahissantes et la salinisation. Ces systèmes seront encore plus dépendants des hauts niveaux d'eau pour l'approvisionnement en eau par le fleuve.

### Résumé

- Le changement climatique, en particulier une diminution des précipitations dans les zones des sources et des modifications du régime des précipitations, conduira très probablement à une diminution des débits et des inondations dans la moyenne vallée du fleuve Sénégal. Pour quantifier cet impact, un modèle hydrodynamique est nécessaire, dans lequel les scénarios climatiques actuels et futurs et les options de gestion de l'eau sont intégrés.
- Les zones à précipitations modestes, c'est-à-dire celles situées dans la moitié nord du bassin, seront plus sensibles au changement climatique que les zones situées au sud. C'est notamment le cas des régions du sud-est de la Mauritanie (Gorgol, Guidimakha, Assaba et Hodh el Gharbi) et de la partie Est du bassin au nord-ouest du Mali (région de Kaye), où la température devrait être la plus sévère.

- La zone de la source du Falémé, en particulier, peut être considérée comme étant sensible à la dégradation du paysage et à l'érosion accrue à la suite d'une diminution prévue des précipitations.
- Les lacs peu profonds et les zones humides qui sont reliés au fleuve Sénégal, comme le lac R'kiz en Mauritanie, sont également vulnérables au changement climatique. Ces systèmes seront encore plus dépendants des hauts niveaux d'eau pour l'approvisionnement en eau par le fleuve.

### 6.3 Impact sur la sécurité alimentaire: agriculture

Le changement climatique aura un impact important sur la sécurité alimentaire en plusieurs manières, en général par le biais d'une pression accrue sur les ressources naturelles. La sécurité alimentaire dépend de la production issue de l'agriculture, de l'élevage, de la pêche et de divers services écosystémiques. Dans cette section, nous traitons de l'agriculture; dans les prochaines sections, l'élevage et les services écosystémiques généraux seront développés.

#### **Superficie et qualité des sols pour l'agriculture**

Dans les environnements arides de la moyenne vallée du fleuve Sénégal, l'approvisionnement en eau du fleuve est et a toujours été le facteur le plus important permettant la pratique de l'agriculture et d'autres sources de production alimentaire. Dans le passé, cela concernait principalement les cultures traditionnelles de décrue des inondations et, depuis la construction des barrages, le développement de l'agriculture irriguée. Il s'agit de polders d'irrigation à grande échelle dans le delta et d'irrigation à plus petite échelle dans la moyenne vallée (PIV's: périmètres irrigués villageois).

#### Cultures de décrues

Les cultures de décrue traditionnelles dépendent fortement de l'ampleur de l'inondation annuelle (Mané & Fraval, 2001). Traditionnellement, les parties de la plaine inondable de la vallée qui étaient inondées pendant au moins 45 jours pouvaient être cultivées sans autre activité que la simple plantation de semences pendant le retrait de l'eau. La fertilité du sol était assurée par les dépôts fluviaux et par les excréments d'animaux paissant dans ces plaines inondables pendant la saison sèche. Surtout pour les communautés rurales pauvres, ce mode d'agriculture réalisable était et reste lucratif. Le sorgho et une variété de légumes sont principalement cultivés dans ces cuvettes basses inondées par le fleuve en hiver: haricots, oignons, tomates, choux, aubergines, piments, gombos, carottes et patates douces.

#### Agriculture irriguée

Actuellement, la disponibilité de l'eau et les possibilités d'usage des sols dans le fleuve Sénégal ne dépendent pas uniquement de la dynamique du fleuve induite par les précipitations, mais sont également fortement influencées par la gestion de l'eau et des barrages (chapitre 4; par exemple Horowitz et Salem-Murdock 1993; DeGeorges & Reilly 2006; Dumas et al. 2010). La gestion de l'eau facilite la disponibilité de l'eau pour l'agriculture irriguée toute l'année, ce qui a entraîné, dans de nombreux endroits du bassin, le passage de l'agriculture traditionnelle de décrue à une production intensive, irriguée et permanente principalement dans le bassin (Dumas et al. , 2010). Les systèmes d'irrigation se sont développés rapidement dans la vallée, en particulier du côté sénégalais, passant de 20 ha de terres irriguées en 1974 à 13 000 ha en 1986 et à 18000 ha en 1988 (DeGeorges, 2006). En conséquence, une forte augmentation des rendements de la production de riz a été atteinte, atteignant 4,8 T / ha en 1990 et 5,7 T / ha en 2003 dans le bassin du fleuve (Gueye, 2004). À

partir de ce moment, la riziculture par irrigation est de loin l'activité agricole la plus importante du bassin du fleuve Sénégal (OMVS, 2011).

#### Impact de la diminution des inondations sur la superficie et la qualité

L'agriculture irriguée ne dépend pas des inondations. Tant que le fleuve retient de l'eau, l'alimentation en eau par pompage motorisé est suffisante pour soutenir l'irrigation. Le coût du carburant peut toutefois être important.

Les cultures de décrues dépendent fortement des inondations. Des changements dans les débits du fleuve et une réduction des inondations auront des conséquences majeures sur la superficie, la réduction des crues et le rendement des cultures. Deuxièmement, les sédiments (argiles et limons) qui se déposent lors des inondations annuelles fournissent de la fertilité à l'agriculture, y compris les cultures en décrue (DeGeorges & Reilly, 2006). Une diminution de l'inondation entraînera donc également des sols pauvres en éléments nutritifs. Cela signifie que l'existence de cultures en décrue après la crue dans la moyenne vallée dépend fortement de la gestion des barrages à l'avenir.

#### **Raccourcissement et changement de calendrier de la saison des pluies**

En général, on s'attend à ce que la saison des pluies soit plus courte à cause du changement climatique (figure 6.1), ce qui signifie que la saison de croissance pour les cultures sera également plus courte. De plus, la saison des pluies en Afrique de l'Ouest et au Sahel présentera plus de variation dans l'intensité des précipitations et la saison des pluies pourrait être retardée de 5 à 10 jours (Dunning et al. 2018). Les deux effets auront un impact important sur le calendrier et le potentiel de l'agriculture, les cultures irriguées et les cultures de décrue. En particulier, les cultures de décrue peuvent être perdues, soit à cause du mauvais timing des semis, du fait que la saison sèche débute trop tôt, soit à cause de la destruction des plantations par les inondations.

#### **Une température plus élevée et des rendements décroissants**

En plus des six facteurs hydrologiques indiqués à la Figure 6.1, l'impact de l'augmentation de la température sur les rendements agricoles est directement négatif. Les températures élevées entraînent une augmentation du potentiel d'évapotranspiration, de la maintenance de la respiration des cultures et une réduction de la durée de leur cycle. Cette baisse de rendement, par exemple de sorgho ou de mil, est indépendante de l'augmentation ou de la diminution des précipitations (Sultan et al., 2013), suggérant un rôle primordial de l'augmentation de la température en tant que facteur de changement de rendement.

De plus, le changement climatique devrait avoir une incidence négative sur la productivité du riz si les agriculteurs continuent à utiliser les variétés actuelles. Sans adaptation, le raccourcissement de la période de croissance dû aux températures plus élevées aura un impact négatif important sur les rendements. Dans les rizières irriguées d'Afrique de l'Ouest, le rendement pourrait même diminuer de -45% en saison sèche (Van Oort & Zwart 2017), ce qui serait principalement dû à une photosynthèse réduite à des températures extrêmement élevées (figure 6.4).

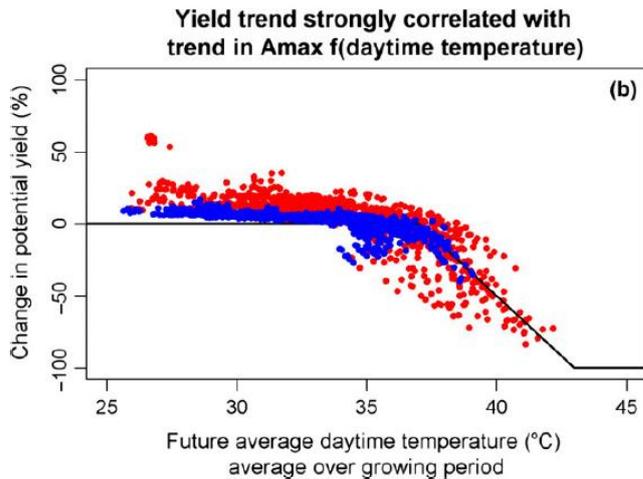


Figure 6.4. Variation simulée des rendements potentiels des cultures de riz sur les sites irrigués pour les scénarios 2.6 (bleu) et 8.5 (rouge) du PRC, dans lesquels le rendement est tracé en fonction de la température moyenne de jour (AMAX). AMAX est optimal entre 20 et 37 ° C. Chaque point représente une simulation pour un site (53 sites irrigués en Afrique) au cours d'une saison spécifique (saison principale ou hors saison) et d'une année (1998-2002). Source et figure de Van Oort & Zwarts (2017).

Un autre problème attendu est le fait que l'activité des insectes dans les régions agricoles augmentera parallèlement à la température moyenne de la surface (Deutsch et al., 2018). Cette activité des insectes peut sérieusement augmenter les pertes de riz, de sorgho et de mil pour deux raisons. Premièrement, les températures plus élevées augmentent le taux métabolique des insectes de manière exponentielle. Deuxièmement, des températures plus chaudes augmenteront les taux de reproduction des insectes. De cette façon, les effets du changement climatique sur les infestations de ravageurs devraient aggraver les problèmes d'insécurité alimentaire dans la vallée, entraînant une hausse des prix des denrées alimentaires et des souffrances des familles en situation d'insécurité alimentaire. L'augmentation de l'utilisation des pesticides et des pratiques agronomiques telles que la rotation des cultures peuvent aider à contrôler ces pertes d'insectes.

## Résumé

- Une diminution des inondations induite par le climat aura des conséquences majeures sur la superficie, la réduction des crues et le rendement des cultures. L'existence future de cultures de décrue des inondations dans la vallée moyenne dépend fortement de la gestion des barrages à l'avenir.
- Une diminution de l'inondation entraînera également des sols pauvres en éléments nutritifs en raison d'un manque d'approvisionnement en éléments nutritifs lors des inondations.
- Le raccourcissement de la saison des pluies et un changement de la répartition temporelle auront un impact important sur le calendrier, le potentiel et les rendements des cultures, des cultures irriguées et des cultures de décrue.
- Une température plus élevée aura, quelles que soient les précipitations et les inondations, un impact négatif important sur les rendements.
- De plus, à mesure que les températures augmentent, la vulnérabilité aux parasites augmentera, ce qui pourrait également affecter les rendements.

### 6.4 Impact sur la sécurité alimentaire: élevage

Le lit du fleuve, en particulier dans la partie nord du bassin, offre des possibilités de pâturage pour le bétail (Klop et al., 2016, Zwarts et al. 2009, Zwarts et al. 2018, GRDR 2014). Le cycle de croissance des herbes annuelles au Sahel est court. Cependant, les précipitations locales sont très importantes pour le pâturage. Un fourrage de haute qualité est limité à la saison de croissance réelle et à une courte période après la fin des pluies (Senock et Pieper, 1990). Les pâturages inondés près du fleuve sont essentiels pour que les pasteurs locaux gardent leurs troupeaux pendant la saison sèche. Le long du fleuve Sénégal et dans tout le Sahel, les pasteurs nomades se dispersent avec leur bétail loin du bassin pendant la saison des pluies et retournent dans les plaines inondables pendant la saison sèche. Au cours des années où les précipitations sont réduites, les plaines inondables sont pratiquement le seul refuge, permettant aux animaux de survivre jusqu'aux prochaines périodes de pluie (DeGeorges & Reilly, 2006). Comme le montre la Figure 6.5, les pasteurs utilisent une vaste zone comme aires de pâturage, mais qui sont reliées à d'autres parties du bassin par un réseau de marchés et de routes (GRDR 2014).

Le Ferlo dans le nord du Sénégal et les zones situées au nord du fleuve en Mauritanie sont très importants pour les pasteurs. Au fil du temps, l'intensité du pâturage a énormément augmenté, entraînant une surexploitation et des modifications du paysage (Zwarts et al. 2018). La réalisation d'un réseau de grands forages, produisant de 10 à 30 m<sup>3</sup> d'eau par heure, permettait au bétail de brouter toute l'année dans le Ferlo après le milieu des années 1950 (Ancey et al., 2008). C'était le début d'une forte augmentation du nombre de bovins, passant de 1 par km<sup>2</sup> en 1950 à 4 et 12 par km<sup>2</sup> en 1955 et 1970, respectivement. Au cours des 60 dernières années, le nombre de bovins dans le Ferlo a probablement augmenté de 12 à 15



Figure 6.5. Zones de pâturage importantes pour le bétail dans la moyenne vallée, marchés et principaux mouvements de bétail. Source: GRDR 2014.

fois, les chèvres et les ovins même environ 50 fois. Au départ, les éleveurs du Ferlo élevaient leur bétail à proximité des points d'eau, mais cette routine a changé après les années 1980, de 1 par km<sup>2</sup> en 1950 à 4 et 12 par km<sup>2</sup> en 1955 et 1970, respectivement. Au cours des 60 dernières années, le nombre de bovins dans le Ferlo a probablement augmenté de 12 à 15 fois, les chèvres et les ovins même environ 50 fois. Au départ, les éleveurs du Ferlo élevaient leur bétail à proximité des points d'eau, mais cette routine a changé après les années 1980, lorsque les gens ont apporté de l'eau à leur bétail (plutôt que l'inverse), en utilisant de grandes chambres à air en caoutchouc et des récipients de 1 000 litres (voir Zwarts et al 2018, et les sources mentionnées dans cette publication).

### **Impact du changement climatique sur la croissance de l'élevage**

L'espérance d'un raccourcissement de la saison des pluies et de la saison de croissance aura de graves conséquences sur l'élevage, en particulier sur les éleveurs qui exploitent les ressources naturelles - croissance annuelle des graminées - dans la partie nord du bassin. Les changements attendus, combinés à la hausse de la température, entraîneront une perte excessive de pâturages, en particulier dans la partie nord du bassin. La production de végétation naturelle sera également plus faible en raison de changements dans le calendrier des précipitations, des précipitations plus irrégulières et d'une température plus élevée. De plus, les précipitations irrégulières et la variation des précipitations peuvent entraîner une fréquence plus élevée d'années sèches (saisons plus longues et plus sèches). Cela risque de mettre les ressources du bétail sous pression, comme lors des grandes sécheresses des années 1970 et 1980.

L'exploitation des pâturages qui dépendent de forages peut être plus difficile lorsque les niveaux d'eau souterraine baissent en raison de la réduction des inondations. Cela entraînera certainement une pression accrue sur les pâturages de la moyenne vallée.

Outre le pastoralisme, la production animale autour des villages est sédentaire. L'élevage sédentaire comprend principalement des chèvres, des moutons et des bovins. Pendant les années sèches, la disponibilité de fourrage peut devenir limitée et les villageois doivent acheter des aliments supplémentaires pour leurs animaux.

### **Résumé**

- En combinaison avec une augmentation de la température, les changements attendus dans le régime des précipitations entraîneront une dégradation excessive des pâturages, en particulier dans la partie nord du bassin. En conséquence, la production de pâturages sera plus faible en raison de changements dans le calendrier des précipitations, des précipitations plus irrégulières et d'une température plus élevée.
- L'exploitation de pâturages dépendant de forages peut être plus difficile lorsque le niveau des eaux souterraines baisse en raison de la diminution des inondations. Cela entraînera certainement une pression accrue sur les pâturages de la moyenne vallée.
- L'élevage sédentaire dans la moyenne vallée sera également confronté au changement climatique. Cela est dû à une diminution des inondations (moins de pâturages potentiels), à une saison de croissance plus courte, à une production moindre et à une concurrence accrue avec les pasteurs d'autres régions arrivant dans la moyenne vallée.

## 6.5 Impact sur les services écosystémiques

La variation saisonnière de la dynamique des inondations est une fonction essentielle de l'écosystème pour maintenir ou générer des services écosystémiques (Klop et al., 2016). En l'absence de cette dynamique naturelle des inondations après la construction des barrages ("après-barrages"), bon nombre des services de régulation de l'écosystème ont diminué avec l'évolution négative de l'écosystème. Dans certains cas, le changement climatique peut aggraver ces évolutions négatives à l'avenir.

### Impact sur les services de régulation

La moyenne vallée offre un certain nombre de services de régulation importants, parmi lesquels le contrôle des inondations et la rétention d'eau sont les plus importants.

#### Contrôle des crues

Le contrôle des crues est extrêmement important en période de débits excessifs et de précipitations, entraînant une inondation presque complète de la moyenne vallée, mais atténuant la pression des inondations sur le delta, le barrage de Diama et les environs de Saint-Louis. Dans les années 1999, 2003, 2007 et 2012, le débit a été élevé. La vallée moyenne a servi de tampon extrêmement important pour les inondations (Fig. 4.11), bien que certaines parties de Saint-Louis aient été inondées en 2003 (année de l'ouverture de la brèche).

En principe, le changement climatique ne modifiera pas le potentiel de contrôle des inondations de la moyenne vallée, mais il est de la plus haute solennité de souligner l'importance de cette fonction. Dans la mesure où la variation des précipitations, et donc des inondations, peut s'accroître, il peut y avoir des saisons d'inondation lorsque le contrôle des inondations dans la moyenne vallée est essentiel. À cet égard, il est important de ne pas réduire les zones basses inondables par des remblais ou l'urbanisation. Cela évite les dommages dans les années avec une forte inondation.

#### Rétention d'eau

En plus du contrôle des inondations, la rétention d'eau est également très importante en tant que service écosystémique. L'inondation de la moyenne vallée offre la possibilité de retenir l'eau dans les plans d'eau et les dépressions. Cela aura une influence positive sur la disponibilité en eau locale directe (pour les communautés locales, le bétail, la biodiversité), mais aussi pour la recharge des réservoirs d'eau souterraine. Le changement climatique peut avoir un impact sur les inondations et successivement sur la rétention d'eau si aucune mesure n'est prise.

### Impact sur les services d'approvisionnement

Les services d'approvisionnement comprennent la fourniture de sols riches en nutriments pour l'agriculture et le pâturage (sections 6.3 et 6.4), ainsi que des possibilités pour la pêche et d'autres services d'approvisionnement (voir ci-dessous). En particulier, les services liés à l'eau peuvent être influencés par le changement climatique.

#### Les pêches

L'inondation saisonnière des plaines inondables pendant la saison des pluies fournit un habitat de reproduction à grande échelle pour de nombreuses espèces de poissons et est considérée comme cruciale du point de vue de la production halieutique et de la biodiversité. Les récoltes de la pêche artisanale traditionnelle dans les plans d'eau du bassin fluvial étaient et restent en partie une importante ressource alimentaire pour les communautés locales. Depuis la construction du barrage de Diama et du barrage de Manantali, les quantités de poissons et les

prises de la pêche artisanale traditionnelle ont été réduites (Mietton et al., 2007). En conséquence, la pêche comme moyen de subsistance est plus souvent associée à d'autres sources de nourriture et de revenus au cours des dernières décennies (Klop et al. 2016).

La production de poisson - et donc la récolte potentielle - est liée à la taille des zones d'inondation. Cela signifie qu'une diminution des inondations et de la durée des inondations en cas de diminution du débit dû au changement climatique affectera la biodiversité et la production de poisson dans la moyenne vallée. La biodiversité des poissons peut également être affectée par les températures plus élevées, lorsque la qualité de l'eau est en jeu.

Services d'approvisionnement liés aux arbres et aux forêts inondées Les forêts inondées situées dans le lit du fleuve, en particulier *Acacia nilotica*, ne constituent qu'une fraction de la vaste superficie inondable de forêts inondées qui existait auparavant (CILSS 2016, Tappan et al. 2004). Dans le passé, les forêts inondées étaient abondantes dans la moyenne vallée. Bien que les forêts inondées avec un couvert forestier fermé ne couvrent qu'une petite partie des zones, il existe encore de vastes peuplements de forêts et de faibles densités d'arbres (appartenant au type «zones ouvertes avec végétation»). Ces forêts offrent des services d'approvisionnement précieux, notamment des fruits, des médicaments, du charbon de bois, du bois d'œuvre et la biodiversité. En outre, les forêts servent de frayères pour les poissons une fois inondées et les populations locales installent des ruches dans les arbres pour récolter le miel.



Figure 6.6. Images de la moyenne vallée près de Podor, avec des étendues de forêts inondées d'*Acacia nilotica*. Ces zones fournissent une gamme de services écosystémiques (pâturage, pêche, fruits, miel, médicaments) aux communautés locales et sont très importantes pour la biodiversité. Dans le même temps, ils sont parfois surexploités pour la production de charbon de bois. Les photos ont été prises en février 2018.

### **Biodiversité dans les plaines inondables**

La valeur de la biodiversité des zones humides sahéniennes, y compris les forêts, les oiseaux et d'autres espèces sauvages, est remarquable au niveau international (Zwarts et al. 2009). Les inondations saisonnières de la moyenne vallée revêtent une importance capitale pour toute une gamme d'espèces de zones humides, d'espèces locales et d'espèces d'oiseaux qui migrent vers les régions du nord (Europe, Asie) pour se reproduire ou vers des régions d'Afrique pendant la saison sèche. Les arbres dans les forêts inondées hébergent une biodiversité très importante au niveau international. Les vastes zones inondables d'*Acacia nilotica* sont devenues rares en Afrique de l'Ouest (Zwarts et al., 2009; Zwarts et al., 2015). Ces forêts abritent une grande variété d'espèces, parmi lesquelles notamment des espèces d'oiseaux.

Les précipitations et les inondations sont les «instruments vitaux» de l'écosystème sahéniens: des pluies abondantes apportent une végétation luxuriante, favorisent la feuillaison, la fructification, l'ensemencement et la floraison des arbres, des arbustes et des herbes, et laissent derrière eux des bassins temporaires qui retiendront l'eau saison sèche. La diversité des insectes est corrélée à la biomasse de graminées et de feuilles, alors que les bassins temporaires sont importants comme refuges pour les insectes et comme sites de ponte vitaux pour les insectes phytophages (Zwarts et al., 2009). Pour les oiseaux migrateurs, les conditions sur les aires d'hivernage africaines déterminent les taux de survie. Des facteurs tels que l'engraissement pré-migratoire, les dates de départ et le moment de la migration sont affectés par ces conditions. Des conditions défavorables peuvent avoir un impact négatif sur les performances de reproduction (Zwarts et al., 2009). Lorsque l'évaporation augmente dans le bassin du Sénégal, les inondations diminuent et la disponibilité en eau du fleuve diminue, les conditions pour les oiseaux migrateurs se détériorent également.

Les écosystèmes sahéniens sont déjà affectés par le changement climatique et les impacts climatiques futurs devraient être importants, au-delà des effets du changement d'usage sols et d'autres facteurs de stress non climatiques. La hausse des températures et les variations de précipitations dans la région ont déjà eu des impacts importants dans la région du Sahel ouest-africain, notamment une mortalité ou un dépérissement croissant des arbres, avec des baisses de la densité des arbres et de la richesse en espèces enregistrées au cours de la seconde moitié du XXe siècle (Gonzalez *et al.*, 2012). En outre, le déclin de la couverture forestière, et donc de la biodiversité, au cours des dernières décennies est provoqué par des facteurs de stress non climatiques tels que le déboisement des forêts pour la culture et le pâturage, les activités minières, les fortes demandes de biomasse et de bois d'oeuvre et le manque de gestion des ressources forestières. (USAID, 2018). Le changement climatique est susceptible d'aggraver indirectement ces facteurs de stress non climatiques affectant les forêts.

### **Résumé**

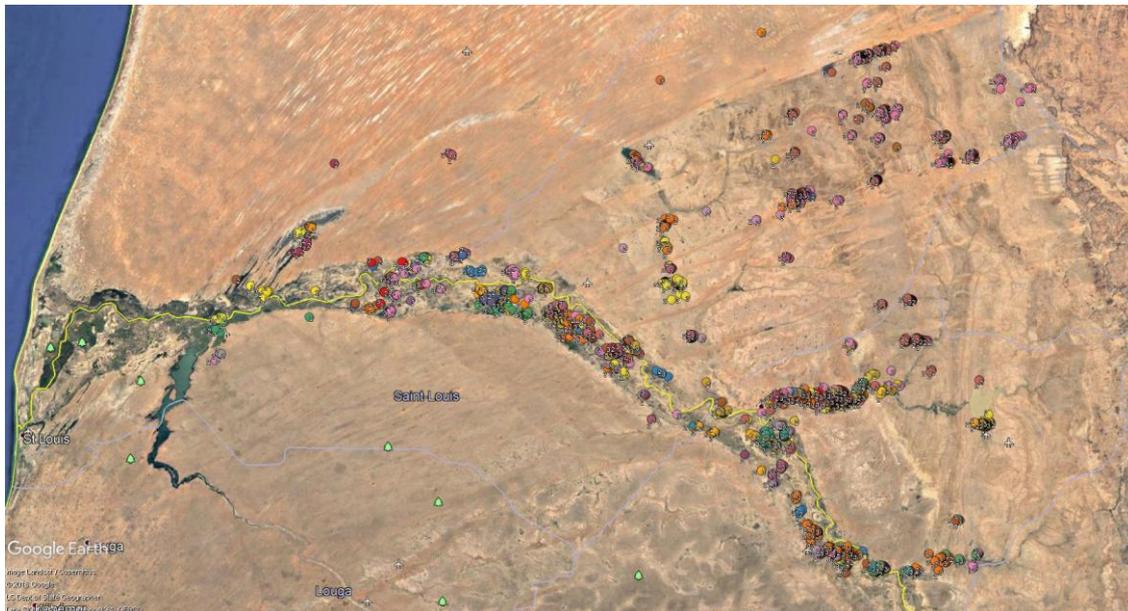
- Le contrôle des crues est un service régulateur important de la moyenne vallée au niveau du bassin. Les précipitations attendues plus irrégulières et les variations futures des précipitations rendent très important le maintien de cette fonction de régulation.
- La rétention d'eau après une inondation est essentielle pour la disponibilité de l'eau locale ainsi que pour la recharge des réservoirs d'eau souterraine. Le changement climatique peut avoir un impact sur les inondations et successivement sur les possibilités de rétention d'eau.
- Le changement climatique affectera probablement les services d'approvisionnement sous forme de pêche (températures plus élevées, moins d'inondations) et de services

### **BOX 3. Le lien naturel entre la vallée du fleuve Sénégal et les Pays-Bas**

*Au printemps et à l'automne, quelques milliards d'oiseaux migrateurs migrent de leurs quartiers de repos africains vers leurs zones de reproduction septentrionales, et vice versa. Les Pays-Bas se trouvent au carrefour des voies de migration et accueillent des millions d'oiseaux au printemps et en automne, lorsqu'ils se reposent et se nourrissent dans les zones humides côtières ou intérieurs, les pâturages et les forêts. En outre, de nombreuses espèces se reproduisant aux Pays-Bas ont trouvé refuge en Afrique pendant l'hiver nordique, en particulier dans le Sahel.*

*Le Sénégal et la Mauritanie font partie de l'ouest du Sahel. Parallèlement aux Pays-Bas, ces pays revêtent une importance primordiale pour les oiseaux migrateurs de la voie de migration de l'Atlantique Est. La combinaison des zones humides côtières et continentales avec d'autres habitats naturels importants, comme les savanes boisées et les forêts inondables, fournit des habitats de nourriture et de repos à de nombreuses espèces d'oiseaux migrateurs. Surtout dans le Delta du Sénégal - PN Djoudj, PN Diawling - et dans la vallée du Sénégal, on trouve beaucoup de ces habitats. Les oiseaux migrateurs - canards, échassiers et de nombreuses espèces d'oiseaux terrestres - font littéralement et figurativement le lien entre la vallée du Sénégal et les Pays-Bas.*

*À titre d'exemple, nous montrons dans cet box la distribution de la Barge à queue noire, l'espèce nationale des Pays-Bas. Récemment, un certain nombre de barges ont été équipés d'un émetteur par l'Université de Groningen indiquant avec précision leur localisation quotidienne. Sur la carte ci-dessous, tous les endroits sont indiqués où les barges ont été enregistrés dans la vallée du Sénégal et le sud de la Mauritanie. Les barges, qui sont obligés d'atteindre des niveaux d'eau peu profonds où ils se nourrissent de petits animaux benthiques, utilisent toute la vallée du Sénégal entre Podor et Matam. Il montre l'importance écologique de la région dans un contexte international. De nombreuses autres espèces se reproduisant ou traversant les Pays-Bas montrent le même lien avec la vallée et le delta du Sénégal.*



*Endroits de Barges à queues noirs avec émetteur entre 2014 et 2018 dans la vallée du Sénégal (notez que le delta du Sénégal - également très important - ne figure pas sur cette carte). Avec la permission de Ruth Howinson, Joslyn Hooijmeijer et Theunis Piersma, Groningen Institute for Evolutionary Life Sciences, l'Université de Groningen. Voir aussi <https://volg.keningfanegreide.nl/king-of-the-meadows-transmittersite/>*

fournis par des forêts inondées (moins d'inondations, pression accrue sur les ressources).

- Les écosystèmes sahéliens sont déjà affectés par le changement climatique et les impacts climatiques futurs devraient avoir des effets substantiels sur la biodiversité, mis à part les effets du changement / intensification de l'usage des sols et d'autres facteurs de stress non climatiques.

## 6.6 Augmentation des concurrences et conflits potentiels croissants

Comme indiqué précédemment par Artelia (2018), les problèmes liés au climat risquent très probablement d'aggraver une situation de pression humaine dans le bassin mal contrôlée et ayant de graves conséquences pour l'environnement. Les communautés rurales continueront à exploiter de manière intensive les ressources disponibles, ce qui se traduira par exemple par la déforestation massive (charbon de bois), la déstabilisation des fleuves et des plans d'eau connectés, ainsi que de nombreux autres problèmes physiques liés à l'eau.

Le changement climatique prévu mettra les ressources naturelles de l'environnement aride au nord et au sud de la moyenne vallée, en particulier les pâturages et les forêts, sous haute pression. Zwarts et al. (2018) ont effectué une analyse détaillée des tendances de la couverture ligneuse (couverture d'arbres et de forêts) dans les zones terrestres situées au nord et au sud de la partie occidentale de la moyenne vallée (y compris le Ferlo). Entre les années 1960 et 2010, la couverture ligneuse dans toute la région a considérablement diminué (Figure 6.6), en particulier au nord de 16,75° N, où elle a diminué de 91% mais moins au sud de 15,75° N (moins 40%). Le contraste est encore plus grand pour les grands arbres (largeur de la canopée > 10 m), diminuant de 98% au nord de 16,75° N et de 12% seulement au sud de 15,75° N. La savane, densément peuplée de grands acacias à 17° de latitude nord dans les années 1960, s'est transformée au cours des dernières années en un paysage ouvert avec peu d'arbres.

L'énorme déclin de la couverture ligneuse, quantifié en détail par Zwarts et al. (2018), est en partie liée aux grandes sécheresses mais beaucoup plus causée par le surpâturage. Dans le cadre de cette étude, il montre que la capacité tampon pour faire face aux futurs changements climatiques des zones arides des rives gauche et droite du fleuve Sénégal est extrêmement limitée. Dans le même temps, ces zones sont les plus sensibles à la hausse des températures et aux précipitations irrégulières.

Le changement climatique prédit aggravera la situation dans ces zones arides, ce qui signifie que les pâturages devraient être perdus ou du moins ne plus être productifs de manière durable (section 6.4). La vallée moyenne, où les inondations alimentent les pâturages, est une oasis à cet égard. Par conséquent, le changement climatique entraînera inévitablement une pression accrue sur la moyenne vallée pour le pâturage ou d'autres moyens de subsistance. Cela peut poser des problèmes de propriété foncière, augmentant ainsi le risque d'investir dans les infrastructures d'irrigation (Adhikari et al., 2015). La concurrence entre les espaces pour l'agriculture irriguée, les cultures en décline et le pâturage va s'intensifier, entraînant potentiellement davantage de conflits.

En plus d'une pression accrue sur la vallée du fleuve, les pasteurs devraient désormais se déplacer plus au sud, où les précipitations et le potentiel de pâturage sont plus importants. En général, les impacts du changement climatique auraient déjà accru le nombre de réfugiés environnementaux au Sahel (Epule et al., 2015). La combinaison du changement climatique et

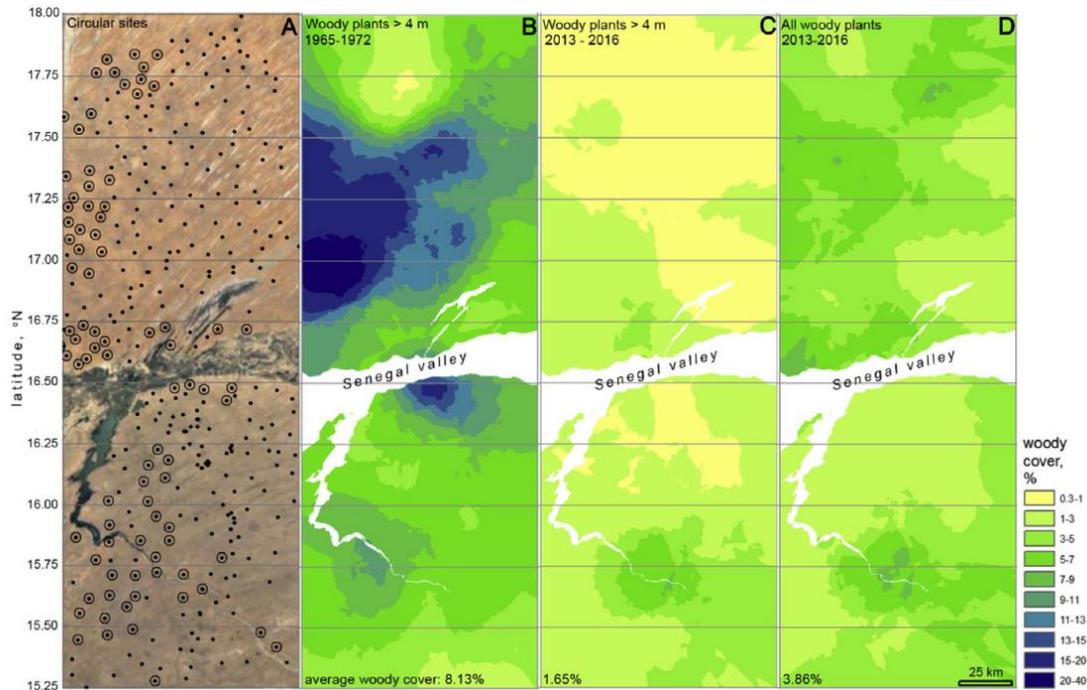


Fig. 6.7. Carte interpolée de la couverture ligneuse comprise entre 15 et 16° de longitude ouest et entre 15,25 et 18° de latitude nord, basée sur les 390 placettes circulaires (points noirs du panneau A), à l'aide d'une technique de krigeage; les 87 parcelles entourées de cercles indiquent les parcelles pour lesquelles des images satellites étaient disponibles pour 2013-2016 ainsi que pour 2002-2004. Comme la contribution des plantes ligneuses  $\leq 4$  m est inconnue pour 1965-1972 (B), la couverture ligneuse en 2013-2016 est donnée sans (C) et avec (D) les petites plantes ligneuses. Source et informations supplémentaires sur les méthodes et les antécédents: Zwarts et al. (2018).

de la pression humaine mal contrôlée peut avoir des conséquences désastreuses sur l'environnement et un impact sur l'équilibre socio-économique des États (Artelia 2018). Compte tenu de tout cela, la vulnérabilité de l'écosystème, de la population et de la biodiversité dans la vallée moyenne du Sénégal est très élevée.

### Vulnérabilité des communautés locales pauvres et éloignées

En particulier, les communautés pauvres dépendent fortement de l'utilisation directe des ressources naturelles locales. Cette forte dépendance à l'égard des activités sensibles au climat, telles que l'agriculture pluviale, conjuguée à une capacité d'adaptation limitée, à des crises alimentaires récurrentes et à la pénurie d'eau, rend ces communautés particulièrement vulnérables aux effets futurs du changement climatique. Fournir un soutien aux agriculteurs les plus pauvres est d'une importance cruciale, étant donné que ce groupe est le plus vulnérable aux changements climatiques à long terme et le moins à même d'apporter les changements nécessaires pour maintenir ses moyens de subsistance face à une telle menace (Bryan et al. , 2009). Les communautés pauvres des villages reculés en particulier doivent faire face aux problèmes liés aux maladies d'origine hydrique, car elles ne disposent pas des équipements et des moyens nécessaires pour les prévenir. Les effets de la hausse des températures et des variations de précipitations peuvent inclure l'apparition accrue de paludisme et de maladies diarrhéiques (Costello et al., 2009; Watts et al., 2015).

## 7 Options d'adaptation au climat

---

### 7.1 Introduction

Il existe de nombreuses mesures d'adaptation au climat, à différentes échelles spatiales et temporelles. Par exemple, des mesures hydrologiques importantes peuvent être prises au niveau du bassin fluvial qui affecte toute la vallée. En outre, il existe plusieurs options d'adaptation pertinentes aux niveaux régional et local, qui peuvent être très utiles, en particulier pour l'agriculture et l'élevage.

L'adaptation au changement climatique est pertinente pour plusieurs secteurs et a également une haute priorité dans d'autres initiatives et programmes. Dans ce contexte, il est important de mentionner le programme de la Grande Muraille Vert (<https://www.grandemurailleverte.org/>). Dans le cadre du GMV, situé en partie dans la vallée du Sénégal, plusieurs actions sont en cours de recherche et de mise en œuvre. Il est intéressant de rechercher une synergie avec ces programmes. Cela pourrait renforcer l'appui des communautés locales et stimuler la mise en œuvre concrète de mesures dans la région.

Ce chapitre donne un aperçu des principales options pour atténuer les futurs effets négatifs du changement climatique dans la vallée, à différents niveaux d'échelle.

### 7.2 Maintenir une inondation artificielle

#### L'importance de la dynamique des inondations

La future disponibilité en eau dans le bassin du fleuve Sénégal repose sur une gestion active de l'eau du fleuve. Par conséquent, la gestion opérationnelle des barrages construits est très importante. Des fluctuations annuelles considérables des précipitations, et par conséquent un fleuve très dynamique, ont toujours été caractéristiques du Sahel (LeBarbé et al., 2002; Zeng, 2003, Zwarts et al. 2009). L'importance de l'inondation artificielle est reconnue dans la gestion actuelle. Cependant, au cours des dernières années, il n'y a certainement pas de grandes inondations chaque année et, la plupart du temps, elles ne se limitent qu'aux zones directement reliées au lit du fleuve. La superficie inondée varie énormément chaque année, comme expliqué au chapitre 4. Les inondations pendant la saison des pluies et, du moins en partie, un régime hydrique dynamique sont des facteurs nécessaires pour garantir à la fois les services d'approvisionnement et de régulation du fleuve tout comme dans le futur. Compte tenu de l'élévation de la température, et donc des taux d'évaporation accrus, la (ré) introduction d'inondations annuelles à grande échelle peut offrir une solution aux zones les plus arides et vulnérables qui ne sont pas directement connectées au lit du fleuve.

Les inondations annuelles sont essentielles pour maintenir les eaux souterraines à un niveau élevé. Une année sèche, sans inondation importante, peut entraîner une baisse importante du niveau des eaux souterraines. Dans les années qui suivent, des problèmes liés à la sécheresse risquent de se poser, car le rétablissement du niveau des eaux souterraines prend beaucoup de temps. Cet effet a été un facteur déterminant lors de "La Grande Sécheresse" dans les années quatre-vingt.

Un régime d'inondation artificiel serait très bénéfique pour les cultures de décrue dans les parties les plus arides de la vallée. Avant la construction des barrages, une superficie moyenne de 459 000 ha était inondée chaque année des deux côtés de la rive (DeGeorges & Reilly,

2006), dont 15 000 à 150 000 ha pourraient être utilisés pour les cultures de décrue (National Research Council 2003). Nous pouvons en conclure que ces dernières années (depuis les années 1999) les inondations potentielles dans les zones de cultures de décrue potentielles dans la vallée ont été moins fréquentes et d'ailleurs moins étendues que dans les années antérieures au milieu des années 1970. Ce développement est causé en partie par les changements climatiques et en partie par des influences anthropiques telles que la gestion des barrages.

Les inondations annuelles sont non seulement importantes pour l'agriculture en termes de disponibilité directe de l'eau, mais également pour les dépôts fluviaux. Les sédiments (argiles et limons) qui se déposent lors des inondations annuelles constituent une bonne base pour l'agriculture, y compris les cultures en décrue (DeGeorges & Reilly, 2006). Ces argiles et limons fournissent la fertilité. Sans ces dépôts du fleuve, le sous-sol du sable ne conviendrait pas à l'agriculture. En outre, l'amélioration de la fertilité des sols est très bénéfique pour les pâturages, et donc l'élevage. Lors des visites sur le terrain, les agriculteurs locaux dans les plaines inondables ont souligné à maintes reprises l'importance de l'apport de sédiments riches en nutriments dans le fleuve.

La biodiversité dans les forêts inondées est également encouragée par l'introduction d'un régime d'inondations artificielles. La restriction de la dynamique naturelle des fleuves et, par conséquent, la perte de plaines inondables continuent de causer une grave dégradation des habitats et de la biodiversité, notamment des oiseaux migrateurs et le développement des arbres. Les impacts hydrologiques prévus, décrits au paragraphe 5.1, ne feront qu'aggraver ces problèmes liés à l'eau pour la biodiversité.

### **Mise en pratique de l'inondation artificielle**

Les inondations artificielles sembleraient être au moins une solution partielle aux problèmes climatiques à venir. Il est important que les inondations artificielles, issues des lâchées d'eau à Manantali, imitent les modèles naturels et présentent un degré élevé de régularité. Les agriculteurs peuvent facilement anticiper ces inondations artificielles lorsque les inondations sont régulièrement déclenchées et que la gestion de l'eau est communiquée, tandis que des inondations irrégulières et une mauvaise communication peuvent conduire à des catastrophes (Adams, 2000).

Le barrage de Manantali est actuellement supposé contenir autant d'eau que possible à la fin de l'été. À mesure que les précipitations diminueront dans le Fouta Djallon en Guinée, comme prévu, les barrages deviendront moins lucratifs et il deviendra (encore) plus difficile d'obtenir un soutien lors des crues. La prise en compte d'une part d'une demande croissante d'énergie hydroélectrique et d'autre part des avantages agricoles et écologiques des inondations deviendra encore plus importante (par exemple, DeGeorges & Reilly 2006).

Dans le SDAGE, plusieurs projets de grands barrages sont présentés en plus du barrage de Manantali dans le bassin supérieur du fleuve Sénégal, notamment la création de grands réservoirs sur le Falémé (Gourbassy) et le Bakoye (Badoumbe). Avec ces barrages supplémentaires, il deviendrait possible de réguler complètement le débit du fleuve Sénégal en aval. En outre, le SDAGE promeut une gestion de l'eau écologiquement responsable et réaffirme son engagement à apporter un soutien aux inondations. Par conséquent, nous avons fortement suggéré de mettre l'accent sur le soutien des inondations artificielles, sans trop compromettre la production d'énergie et les investissements.

Une question importante est la suivante: quels niveaux d'eau de rivière sont nécessaires pour une inondation étendue, afin de garantir des niveaux élevés d'eau souterraine, des conditions appropriées pour les cultures en décrue et la sauvegarde de la biodiversité? Bien que la moitié de la surface de la moyenne vallée soit potentiellement intéressante pour les revenus liés à l'eau et les services écosystémiques (chapitre 5), les inondations se limitent généralement à une zone relativement petite directement reliée au lit du fleuve. Comme expliqué au chapitre 4, des niveaux d'eau de 3,5 à 4 m entraînent l'inondation d'une superficie de 40 à 50% de la surface potentielle pour la sécurité alimentaire dans la moyenne vallée. Permettre des niveaux d'eau d'au moins 3,5 mètres, de préférence encore plus, pendant la période humide annuelle serait très favorable du point de vue de l'adaptation au climat dans les parties sèches de la moyenne vallée.

### Résumé

1. Des inondations annuelles pendant la saison des pluies sont nécessaires pour garantir à la fois les services d'approvisionnement et de régulation du fleuve, en particulier dans les zones les plus arides et vulnérables qui ne sont pas directement connectées au lit du fleuve;
2. Les inondations annuelles sont essentielles pour maintenir les eaux souterraines à un niveau élevé et prévenir les problèmes liés à la sécheresse à long terme.
3. Pour les cultures de décrue, les pâturages et la biodiversité, un régime d'inondation artificielle serait extrêmement bénéfique. Non seulement à cause de la disponibilité directe de l'eau, mais aussi à cause des sédiments riches en nutriments fournis par le fleuve;
4. Permettre des niveaux d'eau d'au moins 3,5 mètres, de préférence légèrement plus hauts, pendant la période de pluie annuelle serait très favorable du point de vue de l'adaptation au climat dans les parties les plus arides de la moyenne vallée.

## 7.3 Développement et test de cultures résistantes à la sécheresse

### Sécheresse et rendements des cultures

L'augmentation des températures menacera les rendements des cultures et des changements transformationnels sont nécessaires (Ramirez-Villegas et Thornton, 2015). La plupart des études sur l'impact du changement climatique en Afrique de l'Ouest sur les rendements de la production agricole montrent des impacts négatifs (Roudier et al., 2011). Une élévation de la température réduit la durée du cycle de la culture et crée un stress hydrique plus important en raison d'une demande d'évaporation plus élevée, ce qui entraîne un rendement réduit de la culture. Les changements de précipitations induits par le climat peuvent potentiellement aggraver ou atténuer cet impact (Roudier et al., 2011), mais l'effet global de l'élévation de la température sur le rendement des cultures est généralement considéré comme négatif. Les stratégies possibles pour contrer ces effets néfastes sur les rendements des cultures pourraient consister à créer des variétés de cultures plus résilientes ou à adopter des variétés existantes plus résistantes au stress de sécheresse induit par le climat.

Sultan et al. (2013) montrent, par exemple, que l'effet du changement climatique n'est pas identique pour tous les principaux cultivars de mil et de sorgho cultivés. Les cultivars modernes ayant un potentiel de rendement biologique élevé, mais un cycle de croissance court devraient entraîner des pertes de rendement plus importantes en raison du changement climatique. Une variabilité moindre des rendements et une résistance accrue à la sécheresse sont les avantages des cultivars traditionnels par rapport aux cultivars modernes. Au cours de nos missions sur le terrain dans la moyenne vallée, nous avons obtenu des informations pertinentes des communautés locales, montrant l'importance de l'identification des caractéristiques des cultures locales. Par exemple, le mil est connu pour sa capacité à pousser

dans des conditions très sèches sur des sols relativement secs et à forte teneur en sable. Ainsi, dans les scénarios futurs d'inondations moins fréquentes, d'où une sédimentation moins limoneuse par le fleuve et des taux d'évaporation plus élevés, la culture traditionnelle du mil résistant à la sécheresse peut offrir des avantages considérables par rapport aux cultivars relativement modernes et exigeants en eau tels que le maïs. Ceci est un exemple, montrant que l'identification de telles caractéristiques de cultures locales spécifiques est une clé pour développer une stratégie qui aborde le compromis entre l'intensification et la résilience au changement climatique (Dingkuhn et al., 2006).

En outre, le changement climatique devrait avoir une incidence négative sur la productivité du riz, à savoir une hausse future de la température dans le bassin. Si les agriculteurs adoptent des variétés de riz ayant en somme une température élevée, ce qui signifie qu'elles sont adaptées au raccourcissement de la durée de croissance induite par les augmentations de température, les rendements actuels peuvent être garantis à l'avenir. Avec cette adaptation, les rendements en riz pluvial pourraient même légèrement augmenter (Van Oort & Zwart, 2017). En outre, des modifications du calendrier agricole devraient être envisagées. Le calendrier de plantation / semis changera à l'avenir, en fonction du raccourcissement de la saison des pluies. Cela nécessite des recherches expérimentales supplémentaires.

### **Développement concept du FACI**

Il est important que les programmes de recherche soient lancés et coordonnés au niveau régional/national. Les pilotes doivent être réalisés dans des champs expérimentaux. Ceci est important au niveau de l'ensemble du bassin. Il ne s'agit pas seulement de la culture du riz, mais également d'autres variétés et cultures. Ces champs de test ne doivent pas nécessairement réussir immédiatement et il n'est pas nécessaire d'obtenir des résultats à court terme, car il est possible que des années de recherche soient nécessaires. Par conséquent, un programme de recherche pluriannuel doit être formulé, en tenant compte de tous les aspects des changements de culture dans les zones arides et isolées de la vallée. Après tout, en plus des caractéristiques spécifiques des cultures, des considérations techniques jouent également un rôle, et il faudra un certain temps pour que les gens s'habituent à l'application de cultures de remplacement.

L'approche mentionnée ci-dessus est déjà développée et testée dans la pratique dans le cadre de la Grande Muraille Vert (GMV). Sur le site du GMV, le concept de Fermes Agricoles Communautaires Intégrées (FACI) est expliqué ([www.grandmuraillevet.org](http://www.grandmuraillevet.org), Agence PanAfricaine de la Grande Muraille Verte):

*L'approche participative dans la GMV renforce la position centrale des terroirs dans le modèle de développement et de gouvernance locale du processus de transformation du Sahel par effet domino, itératif et intégrateur. Le processus part de l'émergence de Fermes Agricoles Communautaires Intégrées (FACI) et polyvalentes, dont le développement, la démultiplication et la dissémination génèrent des Domaines Agricoles Communautaires Intégrés (DACI) dans le périmètre communautaire ou intercommunautaire. Les FACI et les DACI renforcent les capacités de production et de transformation agricoles et de génération de revenus stables. Elles favorisent dans le court terme l'intervention du secteur privé et la création d'Agropoles Rurales (AgropoR). Le principal défi est la définition d'un processus dynamique de gestion durable, favorisant la restauration et la protection du Capital Naturel, l'identification et la valorisation des Opportunités Locales de développement (OLD) et l'optimisation de leurs chaînes de valeur. Le modèle de développement des terroirs est repensé plus inclusif et plus participatif et dans une approche économique.*

Le concept de FACI est également intéressant en tant que moyen de tester des mesures d'atténuation des effets du changement climatique au niveau communautaire, tout en testant de nouvelles voies pour l'adaptation au climat à l'échelle locale.

#### **7.4 Stimuler l'agroforesterie**

##### **L'importance de l'agroforesterie**

L'agroforesterie concerne les systèmes d'usage des sols dans lesquels la plantation et / ou la gestion active des arbres est associée à l'agriculture ou à l'élevage. Dans les systèmes agroforestiers, il existe une collaboration complexe entre la lumière, les nutriments et l'eau qui a un effet sur le système de production multicouche. Un système commun est la culture itinérante, dans laquelle les champs sont plantés avec des cultures vivrières pendant 2-3 ans, suivis par une période avec des arbres dans laquelle le sol peut récupérer, après quoi le cycle peut se répéter tandis que la végétation en jachère fournit des produits forestiers et les fonctions. Il y a de nombreux avantages pour les forêts inondées en particulier. Il est très important que ces forêts inondables soient préservées dans la moyenne vallée lorsque la température augmente. L'agroforesterie peut offrir de grands avantages pour le pâturage, le poisson (en cas d'inondation) et l'agriculture (l'effet d'ombre est important). En outre, les forêts sont très importantes pour la biodiversité, comme expliqué au chapitre 5. Enfin, l'agroforesterie offre une source pour capter davantage de CO<sub>2</sub> de l'atmosphère, ce qui est important dans le contexte de la lutte contre les effets des changements climatiques.

##### **Développement de sites d'essais agroforestiers**

L'agroforesterie est considérée comme une forme d'agriculture bien adaptée aux petits exploitants, qui ont peu d'accès aux ressources agricoles modernes. Particulièrement, pour les petits agriculteurs des régions les plus arides de la vallée, il conviendrait de poursuivre les recherches, de préférence sous la forme de programmes de recherche expérimentale locaux. Dans le cadre du changement climatique, l'accent devrait être mis sur des sujets tels que:

- Amélioration de la fertilité des sols en reboisant les sols nus
- Augmentation de la production d'aliments pour animaux afin de maintenir le bétail en période de sécheresse
- Diversification d'autres produits commercialisables tels que le bois de chauffage, les fruits, les huiles végétales ou les médicaments, générant ainsi davantage de possibilités de revenus
- Atteindre un équilibre durable entre une production accrue et une meilleure gestion des ressources naturelles sans affecter la capacité de production
- Encourager les processus et qualités écologiques importants pour une agriculture durable: disponibilité de l'eau, santé des sols, captage du CO<sub>2</sub>, conservation de la biodiversité et des services écosystémiques.

Il est important que ces programmes de recherche en agroforesterie soient lancés et coordonnés au niveau régional / national. Des études pilotes expérimentales doivent être effectuées sur des sites d'essai éloignés des parties arides de la vallée, qui ne sont pas directement reliés au lit du fleuve, car à ces endroits, le besoin est le plus important pour ce développement. Les espèces locales des forêts existantes (inondables) devraient être utilisées pour l'agroforesterie.

## 7.5 Adaptation locale

Bien qu'il soit encore nécessaire de procéder à des évaluations plus cohérentes des effets du changement climatique sur les rendements des cultures à l'échelle locale dans la vallée du Sénégal, en particulier en ce qui concerne les précipitations, certaines recommandations peuvent être formulées pour une adaptation locale. Outre l'adaptation via une gestion intégrée de l'eau à grande échelle au niveau (inter) national et des initiatives nationales pour la préparation de programmes de recherche sur les cultures robustes et l'agroforesterie, comme expliqué précédemment, trois formes d'adaptation à l'échelle de la «communauté locale» peuvent être distinguées:

- 1) Adaptation innovante locale en agriculture et sécurité alimentaire
- 2) Adaptation transformationnelle locale
- 3) Migration

Les deux premières formes d'adaptation sont expliquées plus en détail pour la vallée moyenne.

### **1) Adaptation innovante locale en agriculture et sécurité alimentaire**

L'agriculture pluviale est particulièrement vulnérable aux augmentations de température, aux changements dans le calendrier et la quantité des précipitations et à la fréquence accrue des périodes sèches. La survie des communautés locales dans la vallée dépendra fortement de l'adaptation locale efficace de l'agriculture au changement climatique. Les agriculteurs d'Afrique de l'Ouest sont connus pour leur capacité à adapter leurs pratiques aux changements de l'environnement (Sultan et al., 2013).

À l'échelle locale, il est intéressant pour les agriculteurs d'explorer d'autres cultures que les cultures régulières. Une plus grande diversité de cultures ("diversification des cultures"), par exemple en incluant la culture du fonio, peut également être une option d'adaptation locale. Le fonio (*Digitaria exilis*) est l'une des cultures traditionnelles de la zone de savane sèche de l'Afrique de l'Ouest et il est largement cultivé en Guinée (Cruz et al. 2007). Étant donné que le fonio mûrit très rapidement, deux mois seulement après le semis, il peut être récolté bien avant la récolte d'autres céréales comme le maïs, le mil ou le riz. C'est donc une source alimentaire importante à une époque de l'année où les autres céréales ne sont pas encore disponibles. Le fonio peut tolérer la sécheresse dans une certaine mesure, et il peut pousser sur des sols sableux et pauvres qui ne conviennent pas à d'autres céréales.

En plus de mettre au point et d'essayer des cultures résistantes à la sécheresse, des recherches supplémentaires sont nécessaires sur d'autres options d'adaptation, telles que les dates de semis et de semis décalées plus tard dans la saison sèche et froide. Bien que le riz prospère bien dans les climats chauds et humides, des températures élevées de plus de 35 ° C peuvent endommager les processus des plantes et entraîner une baisse des rendements (Van Oort & Zwart, 2017). Changements dans le calendrier agricole, par exemple l'avance des dates de semis et de plantation, peut réduire ou même éviter les risques de dommages causés par des températures très élevées.

Bien que l'irrigation reste la clé pour faire face au changement climatique, plusieurs mesures d'adaptation au niveau de l'exploitation peuvent être mises en œuvre afin de minimiser le risque de conditions futures dans des zones reculées qui ne sont pas directement connectées au lit du fleuve (Adhikari et al., 2015). La conservation des sols et de l'eau est particulièrement importante car ces pratiques peuvent améliorer l'efficacité de l'irrigation, des engrais et des semences améliorées (Kato et al. 2011). Les techniques de captage de l'eau ('Zai' ou 'Tassa'),

par lesquelles des fosses sont creusées dans le sol pendant la pré-saison pour capturer de l'eau et concentrer du compost, sont fréquemment utilisées dans le Sahel. De plus, l'utilisation de diguettes en pierre a été largement adoptée dans Sahel au cours des dix dernières années (Barbier et al., 2009). Ces techniques ont un effet dans les zones à faible relief. Des diguettes en pierre (appelées «cordons pierreux») perpendiculaires à la direction de la pente ralentissent les processus de ruissellement et favorisent l'infiltration et l'augmentation de la disponibilité en eau. Des bandes d'herbe étroites ou des haies vives (appelées «haies vives») alignées perpendiculairement à la direction de la pente ont le même effet (Yossi et al., 2006).

De plus, les pasteurs du Sahel ont déjà adopté des stratégies d'adaptation pour assurer leurs moyens de subsistance face aux changements climatiques perçus et réellement en cours (Zampaligré et al., 2014). L'application de stratégies de fractionnement des troupeaux et le passage des éleveurs aux élevages bovins et ovins constitueraient une stratégie valable d'aversion pour le risque, assurant une utilisation optimisée des ressources pastorales.

## **2) Adaptation transformationnelle locale**

Lorsque les adaptations à l'innovation deviennent inadéquates, pour des raisons financières ou en raison d'un manque d'informations, les agriculteurs peuvent être obligés d'opter des adaptations transformationnelles. Cela signifie qu'une forme substantiellement différente de génération de revenus est à l'étude. L'impact négatif de la hausse des températures sur les rendements des cultures dans les régions arides de la moyenne vallée pourrait entraîner un déplacement des ressources des ménages, les populations locales pouvant se concentrer sur des activités moins dépendantes du climat. Par exemple, dans les zones où la production de cultures dominantes devient vraiment non viable, de nombreux habitants devront abandonner l'agriculture et se lancer dans l'élevage (Jones & Thornton, 2009). La dégradation des sols est une autre cause de cette transition (Brottem et Brooks, 2017). La production animale permet aux agriculteurs de diversifier leurs revenus, contribuant ainsi à réduire la variabilité. Cependant, dans les zones les plus vulnérables, où ce changement est le plus nécessaire, les ménages sont les moins préparés. La dégradation des sols réduit la viabilité de cette transition pour tous les ménages, à l'exception des plus riches (Brottem & Brooks, 2017).

## **7.6 Autres possibilités d'innovation**

### **Typha: contrôle et applications**

L'expansion rapide de *Typha australis* a eu des effets négatifs sur la population de poissons, la stimulation de diverses maladies d'origine hydrique, le blocage des canaux, une diminution de la qualité de l'eau et une augmentation des taux d'évaporation. Le développement de *Typha* est considéré comme un problème sérieux dans la partie occidentale de la vallée et on s'attend à ce que, avec l'augmentation des températures à l'avenir, ces problèmes liés au *Typha* deviendront encore plus importants. Par conséquent, les moyens de contrôler le *Typha* sont étudiés. Les méthodes biologiques de contrôle de la prolifération de *Typha* n'ont toujours pas prouvé leur efficacité. L'élimination mécanique des peuplements de *Typha* nécessite des efforts physiques et financiers considérables, tandis que la dissémination de semences en suspension dans l'air rend le problème plutôt incontrôlable (Mietton et al., 2007). L'élimination mécanique n'est donc pas une option durable, à moins que les coûts d'élimination puissent être compensés par les revenus de production.

Une nouvelle industrie pour promouvoir l'utilisation de *Typha* constituerait un moyen supplémentaire de contrôler la propagation de l'espèce, tout en créant des emplois pour la population locale (Mietton et al., 2007). Par conséquent, la faisabilité économique du

développement d'une telle industrie devrait être explorée plus avant dans la vallée. Les possibilités de mise en place d'une chaîne de production pour les produits en provenance du *Typha* doivent être décrites, à la fois pour l'utilisation locale et pour l'exportation. La biomasse du *typha* peut être utilisée de nombreuses manières différentes, telles que le carburant, la production de méthane, la vannerie, les matériaux de construction / d'isolation et le fourrage pour les animaux.

Dans le bassin du Sénégal, des rendements de 6 à 8 tonnes de matière sèche par hectare sont attendus pour le *Typha*, en fonction du type de sol, de la profondeur de l'eau et de la disponibilité des éléments nutritifs (Elbersen, 2005). La durabilité et la continuité de la croissance du *Typha* ne semblent pas poser de problèmes dans le bassin, car le *Typha* est en pleine expansion et la saison de croissance dure toute l'année en raison des températures élevées. Les coûts de la récolte, du séchage et du transport de la biomasse vers une installation de traitement sont cruciaux pour déterminer la faisabilité d'une chaîne de production pour le *Typha*, en fonction de l'application. Le séchage ne semble pas poser de problème dans le bassin du fleuve Sénégal.

Compte tenu des températures élevées et du faible taux d'humidité, la biomasse peut être séchée à l'air jusqu'à 80% en poids sec en moins de 10 heures (Henning, 2002). Cependant, la récolte, la manipulation et le transport de la biomasse du *Typha* dans un environnement aquatique tel que le bassin du fleuve Sénégal sont plutôt compliqués (Dieng, 2002). Afin d'éliminer efficacement l'ensemble des peuplements de *Typha*, la coupe doit être effectuée dans la zone située entre 20 cm et 50 cm sous la surface de l'eau (Hellsten et al., 1999). Cependant, pour une utilisation durable, une approche différente est nécessaire (Elbersen, 2005). Les plantes doivent être coupées à 20 cm au-dessus du niveau de l'eau afin de maintenir l'échange d'air avec les parties inférieures de la plante. De plus, les plantes doivent être coupées à la sénescence afin de conserver des réserves suffisantes pour la repousse de rhizomes en vue d'une utilisation durable. Les fréquences de récolte sont peu connues. Elbersen déclare que la récolte peut être effectuée une fois par an. Toutefois, si l'eau fournit des nutriments supplémentaires, il peut être possible de récolter plusieurs fois par an.

## **TOOGA**

En Mauritanie, une nouvelle initiative est prise pour l'application utile de *Typha* en combinaison avec la valorisation des fruits du désert *Data Balanites aegyptiaca*. Les données du désert sont un arbre très commun dans la zone sahélienne, en particulier dans la zone de la grande muraille verte. C'est aussi un arbre qui est commun dans la partie plus sèche de la vallée du Sénégal et les zones environnantes. Les données sur les fruits du désert ont une valeur énergétique élevée. Dans le projet TOOGA - [www.toogga.com](http://www.toogga.com) - les fruits sont combinés à la pulpe de *Typha*, produisant une pastille nutritive pour le bétail. Cette initiative montre que la valorisation des ressources naturelles dans la vallée du Sénégal peut ouvrir de nouvelles voies de développement et générer des revenus supplémentaires pour les communautés locales. De tels développements peuvent également être intéressants pour la vallée du Sénégal, en particulier dans une approche participative.

## **En résumé**

Quant aux coûts de récolte du *Typha*, peu d'informations sont disponibles. La plupart de la littérature est axée sur l'éradication totale et non sur la production durable. Elbersen (2005) suppose que l'équipement de tonte coûterait plus de 2,25 millions de dollars US pour 30 machines récoltant 200 000 tonnes de biomasse sèche de 30 000 à 40 000 ha par an, soit des coûts d'exploitation exclusifs. En supposant que les coûts supplémentaires représentent 2 fois

les coûts de la machine, Elbersen estime à 3,4 US \$ par tonne les coûts de récolte de matière sèche. L'équipement pour la récolte dans des conditions humides est coûteux.

## 7.7 Recommandations

Sur la base des résultats de ce rapport, un certain nombre de recommandations sont formulées. Ce sont des recommandations pour des études de suivi concrètes, mais concernent également des points d'attention généraux dans les stratégies d'adaptation.

1. Pour quantifier l'impact du changement climatique, en particulier une diminution des précipitations dans les zones sources sur les débits et les inondations dans la moyenne vallée du fleuve Sénégal, un modèle hydrodynamique est nécessaire, dans lequel les scénarios climatiques actuels et futurs les options de gestion sont incluses. Un tel modèle sera déterminant pour développer des stratégies de gestion de l'eau adaptables pour la moyenne vallée;
2. Des inondations pendant la saison des pluies sont nécessaires pour garantir les services d'approvisionnement et de régulation du fleuve aussi bien que possible à l'avenir. Pour les cultures de décrue, les pâturages et la biodiversité, un régime d'inondation artificiel imitant les inondations naturelles est nécessaire. Non seulement à cause de la disponibilité directe de l'eau, mais aussi à cause des sédiments riches en nutriments fournis par le fleuve et pour assurer des niveaux élevés d'eaux souterraines à long terme. Autoriser annuellement des niveaux d'eau d'au moins 3,5 mètres, de préférence légèrement plus élevés, pendant la période de pluie annuelle serait très favorable du point de vue de l'adaptation au climat, en particulier pour les zones les plus arides et les plus vulnérables qui ne sont pas directement connectées au lit du fleuve;
3. Il est important de mieux comprendre la présence spatiale des cultures de décrue, des forêts inondées et de la répartition des arbres, ainsi que de l'agriculture irriguée sur l'ensemble de la moyenne vallée. Cette étude a fourni un premier aperçu de la classification, mais il existe un besoin d'informations spatiales plus détaillées et d'une vérification précise. La surveillance au moyen de techniques d'information géographique et de télédétection est donc un élément central des prochaines années. Des investissements devraient être faits dans un département SIG fort, qui deviendra un instrument spatial pour l'avenir, afin de pouvoir garder un bon aperçu des changements dans la vallée et des résultats de l'adaptation;
4. La hausse des températures menacera les rendements des cultures et des changements transformationnels sont nécessaires (Ramirez-Villegas et Thornton, 2015). Deux sujets de recherche plus approfondis semblent prometteurs s'agissant des innovations locales dans le secteur de l'agriculture. Premièrement, l'exploration de l'utilisation d'espèces tolérantes à la sécheresse à haut rendement deviendra très importante. En outre, il est très important de poursuivre prochainement les recherches sur les modifications des dates de plantation et de semis dans le calendrier agricole. Ces changements peuvent réduire considérablement l'impact négatif du changement climatique sur les rendements des cultures, minimisant ainsi la vulnérabilité.
5. Il est important de lancer des programmes de recherche axés sur les cultures résistantes à la sécheresse et coordonnés aux niveaux régional et national. Les pilotes doivent être réalisés sous la forme de champs expérimentaux. Ceci est important au niveau de l'ensemble du bassin;
6. Il est très important que les arbres et les forêts inondées soient préservés dans la moyenne vallée lorsque la température augmente. L'agroforesterie peut offrir de

grands avantages pour le pâturage, le poisson, l'agriculture et la biodiversité. Il est recommandé de lancer des programmes de recherche et de mettre en place des sites expérimentaux d'agroforesterie dans les zones les plus arides de la vallée, afin de préserver les arbres et les forêts inondées et d'explorer la valeur ajoutée de l'agroforesterie en termes de services écosystémiques;

7. Nous recommandons la mise au point des sites d'essais pratiques en collaboration avec les communautés locales - à l'instar du concept de fermes communautaires agricoles intégrées (FACI) - où les mesures d'adaptation locales (cultures résistantes à la sécheresse, agroforesterie, etc.) peuvent être testées.

Tableau 7.1. Un aperçu récapitulatif des impacts du changement climatique et des mesures d'adaptation associées à différents niveaux.

Impact sur le changement climatique / mesures d'adaptation	Niveau du Bassin	Niveau Régional	Niveau de la communauté locale
<b>Impact sur le système hydrologique</b>			
<ul style="list-style-type: none"> <li>Diminution générale des débits et des inondations dans la moyenne vallée du fleuve Sénégal.</li> </ul>	Maintenir une crue artificielle par la gestion intégrée de l'eau		
<ul style="list-style-type: none"> <li>Le risque d'abaissement du niveau de la nappe phréatique à long terme</li> </ul>	Maintenir une crue artificielle par la gestion intégrée de l'eau		
<ul style="list-style-type: none"> <li>Les zones à pluviométrie modérée et à la hausse relativement élevée à l'avenir sont particulièrement sensibles au changement climatique: régions du sud-est de la Mauritanie, du nord-ouest du Mali</li> </ul>		Amélioration des infrastructures d'irrigation	
<ul style="list-style-type: none"> <li>La tête desources du fleuve Falémé est particulièrement sensible à la dégradation du paysage et à l'érosion accrue</li> </ul>		Développer l'agroforesterie, initialement via des sites de test	
<ul style="list-style-type: none"> <li>Les lacs peu profonds et les zones humides dépendant de l'arrivée d'eau du fleuve, comme le lac R'kiz en Mauritanie, sont particulièrement vulnérables.</li> </ul>		Amélioration des infrastructures d'irrigation	
<b>Impact sur la sécurité alimentaire: agriculture</b>			
<ul style="list-style-type: none"> <li>Une diminution des inondations aura des conséquences majeures sur la superficie, la réduction des crues et le rendement des cultures</li> </ul>	Maintenir une crue artificielle par la gestion intégrée de l'eau		
<ul style="list-style-type: none"> <li>L'augmentation des taux d'évaporation entraînera une réduction de la disponibilité en eau pour l'agriculture</li> </ul>		Amélioration des infrastructures d'irrigation	Application de techniques de micro captage de l'eau
<ul style="list-style-type: none"> <li>Une diminution de l'inondation entraînera des sols pauvres en éléments nutritifs</li> </ul>	Maintenir une crue artificielle par la gestion intégrée de l'eau	Développer l'agroforesterie, initialement via des sites de test	Application de techniques de conservation des sols
<ul style="list-style-type: none"> <li>Le raccourcissement de la saison des pluies et un changement de calendrier auront un impact sur les rendements des cultures irriguées et des cultures en décrue</li> </ul>		Amélioration des infrastructures d'irrigation	Expériences sur les dates de semis et de plantation
<ul style="list-style-type: none"> <li>Une température plus élevée entraînera une baisse significative des rendements.</li> </ul>		Développement et test de cultures résistantes à la sécheresse / à la chaleur dans des	

		champs expérimentaux	
<ul style="list-style-type: none"> <li>Les températures plus élevées augmentent la vulnérabilité de l'agriculture face aux parasites affectant les rendements</li> </ul>		Développement et test de cultures résistantes à la sécheresse / à la chaleur dans des champs expérimentaux	
<b>Impact sur la sécurité alimentaire: élevage</b>			
<ul style="list-style-type: none"> <li>Perte de pâturages et baisse de la production, en particulier dans la partie nord du bassin</li> </ul>	Maintenir une crue artificielle par la gestion intégrée de l'eau	Développer l'agroforesterie, initialement via des sites de test	Techniques de division du troupeau ou passage de bovins à ovins et caprins
<ul style="list-style-type: none"> <li>L'exploitation des espaces de pâturages en fonction des forage deviendra plus difficile, ce qui entraînera une pression plus forte sur la moyenne vallée</li> </ul>		Amélioration des infrastructures d'irrigation	Techniques de division du troupeau ou passage de bovins à ovins et caprins
<ul style="list-style-type: none"> <li>L'élevage sédentaire dans la moyenne vallée subira une saison de croissance plus courte, une production moindre et une concurrence accrue</li> </ul>			Techniques de division du troupeau ou passage de bovins à ovins et caprins
<b>Impact sur (les autres) services écosystémiques</b>			
<ul style="list-style-type: none"> <li>La rétention d'eau après une inondation est essentielle pour la disponibilité de l'eau locale et la recharge de la nappe phréatique. Le changement climatique peut avoir un impact sur les inondations et successivement sur la rétention d'eau;</li> </ul>	Maintenir une crue artificielle par la gestion intégrée de l'eau	Amélioration des infrastructures d'irrigation	
<ul style="list-style-type: none"> <li>Le changement climatique affectera probablement les services d'approvisionnement tel que la pêche (températures plus élevées, moins d'inondations) et de services fournis par des forêts inondées (moins d'inondations, pression accrue sur les ressources);</li> </ul>	Maintenir une crue artificielle par la gestion intégrée de l'eau	Développer l'agroforesterie, initialement via des sites de test	
<ul style="list-style-type: none"> <li>Les impacts climatiques futurs devraient avoir des effets substantiels sur la biodiversité, au-delà des effets du changement d'usage des sols et d'autres facteurs de stress non climatiques.</li> </ul>	Maintenir une crue artificielle par la gestion intégrée de l'eau	Développer l'agroforesterie, initialement via des sites de test	

## References

---

- Adams, A., 2000. The Senegal River: Flood management and the future of the valley. International Institute for Environment and Development, Issue Paper/Drylands Program (93).
- Adhikari, U., Nejadhashemi, A.P., Woznicki, S.A., 2015. Climate change and eastern Africa: a review of impact on major crops. *Food and Energy Security* 4(2): 110-132.
- Artelia, 2018. PGIRE II - Vulnérabilité du bassin du fleuve Sénégal face aux changements climatiques: R2 – Rapport du diagnostic d'évaluation de la vulnérabilité; R3 - Rapport du plan d'adaptation et de renforcement de la résilience du bassin. Artelia Eau & Environnement, Ref: 8411203.
- Bader, J.C., Albergel, J., 2015. Artificial flood support on the Senegal river: a challenge to protect natural resources in the valley. Montpellier: L'Institut de Recherche pour le Développement (IRD).
- Bader, J.C., Lamagat, J.P., Guiguen, N., 2003. Gestion du barrage de Manantali sur le fleuve Sénégal. Analyse quantitative d'un conflit d'objectifs. *Hydrol. Sci. J.* 48(4):525-538.
- Barbier, B., Yacouba, H., Karambiri, H., Zoromé, M., Somé, B., 2009. Human vulnerability to climate variability in the Sahel: farmers' adaptation strategies in northern Burkina Faso. *Environmental Management* 43: 790-803.
- Barnabás, B., Jäger, K., Fehér, A., 2008. The effect of drought and heat stress on reproductive processes in cereals. *Plant, Cell and Environment* 31: 11-38.
- Beintema, A.J., van der Kamp, J., Kone, B., 2007. Les forêts inondées: trésors du Delta Intérieur du Niger au Mali. A&W report 964. Altenburg & Wymenga conseillers écologiques, Veenwouden, NL; Wetlands International, Sévaré, Mali.
- Bossen, R., 2018. An evaluation: mapping temporal land use and land cover (LULC) for the Senegal River Basin to analyze the changed area. Bsc dissertation University of Amsterdam.
- Brottem, L., Brooks, B., 2017. Crops and livestock under the sun: Obstacles to rural livelihood adaptations to hotter 21st century temperatures in eastern Senegal. *Land Degrad. Dev.* 29: 118-126.
- Bryan, E., Deressa, T.T., Gbetibouo, G.A., Ringler, C., 2009. Adaptation to climate change in Ethiopia and South Africa: options and constraints. *Environmental Science & Policy* 12: 413-426.
- Christensen, J.H., Hewitson, B., Busuioc, A., Chen, A., Gao, X., Held, I., Jones, R., Kolli, R.K., Kwon, W.-T., Laprise, R., Magaña Rueda, V., Mearns, L., Menéndez, C.G., Räisänen, J., Rinke, A., Sarr, A., Whetton, P., 2007. Regional Climate Projections. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- CILSS, 2016. Landscapes of West Africa – a Window on a Changing World. U.S. Geological Survey EROS, Garretson, USA. <http://www.cilss.int/index.php/2017/03/08/atlas-sur-les-paysages-de-lafrique-de-louest/>.
- Cogels, F.X., Coly, A., Niang, A., 1997. Impact of dam construction on the hydrological regime and quality of a Sahelian lake in the River Senegal Basin. *Regulated Rivers: Research & Management* 13: 27-41.
- Collins, J.M., 2011. Temperature variability over Africa. *Journal of Climate* 24: 3649-3666.
- Congalton, R.G., 1991. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. *Remote sensing of environment* 37(1): 35-46.
- Costello, A., Abbas, M., Allen, A., Ball, S., Bellamy, R., Friel, S., Grace, N., Johnson, A., Kett, M., Lee, M., Levy, C., Maslin, M., McCoy, D., McGuire, B., Montgomery, H., Napier, D.D., Pagel, J., Puppin de Oliveira, J.A., Redclift, N., Rees, H., Rogger, D., Scott, H., Stephenson, J., Twigg, J., Wolff, J., Patterson, C., 2009. Managing the health effects of climate change. *The Lancet* 373: 1693–1733.
- Darwish, A., Leukert, K., Reinhardt, W., 2003. Image segmentation for the purpose of object-based classification. In: *Geoscience and remote sensing symposium 2003, igarss'03 proceedings, 2003 ieee international*, Vol. 3: 2039-2041.
- DeGeorges, A., Reilly, B.K., 2006. Dams and large scale irrigation on the Senegal River: impacts on man and the environment. *International Journal of Environmental Studies* 63 (5): 633-644.

- Deutsch, C.A., Tewksbury, J.J., Tigchelaar, M., Battisti, D.S., Merrill, S.C., Huey, R.B., Naylor, R.L., 2018. Insect metabolic and population growth rates predict increasing crop losses in a warming climate. *Science* 2018, DOI: 10.1126/science.aat3466.
- Dieng, M., 2002. Problématique du Typha au Sénégal. In: Workshop on Typha in Saint Louis, Senegal: 23-25 Julliet 2002,
- Dingkuhn, M., Singh, B.B., Clerget, B., Chantereau, J., Sultan, B., 2006. Past, present and future criteria to breed crops for water-limited environments in West-Africa. *Agricultural Water Management* 80: 241-261.
- Dumas, D., Mietton, M., Hamerlynck, O., Pesneaud, F., Kane, A., Coly, A., Duvail, S., Baba, M.L.O., 2010. Large dams and uncertainties: the case of the Senegal River (West Africa). *Society and Natural Resources* 23: 1108-1122.
- Dunning, C.M., E. Black & R.P. Allan 2018. Later west seasons with more intense rainfall over Africa under future climate change. *Journal of Climate* 31: 9719-9738. DOI: 10.1175/JCLI-D-18-0102.1
- Elbersen, W., 2005. Typha for bioenergy. Memo report on BUS no. B1.
- Epule, T.E., Ford, J.D., Lwasa, S., Lepage, L., 2017. Climate change adaptation in the Sahel. *Environmental Science and Policy* 75: 121-137.
- Epule, T.E., Peng, C., Lepage, L., 2015. Environmental refugees in sub-Saharan Africa: a review of perspectives on trends, causes, challenges, and way forward. *Geojournal* 80: 79-92.
- Finlayson, C.M., Davies, G.T., Moomaw, W.R., Chmura, G.L., Natali, S.M., Perry, J.E., Roulet, N., Sutton-Grier, A.E., 2018. The Second Warning to Humanity – Providing a Context for Wetland Management and Policy. *Wetlands*, <https://doi.org/10.1007/s13157-018-1064-z>.
- Fournet, S 2018. Caractérisation des impacts du changement climatique dans le bassin du fleuve Sénégal, Volet 1: États des lieux des connaissances scientifiques et des incertitudes sur la compréhension du changement climatique dans le bassin du fleuve Sénégal et dans son ensemble régional. Rapport Potsdam Institute for Climate Impact Research, 2018.
- Giannini, A., Salack, S., Lodoun, T., Ali, A., Gaye, A.T., Ndiaye, O., 2013. A unifying view of climate change in the Sahel linking intra-seasonal, interannual and longer time scales. *Environmental Research Letters* 8, 024010, DOI:10.1088/1748-9326/8/2/024010.
- Gonzalez, P., Tucker, C.J., Sy, H., 2012. Tree density and species decline in the African Sahel attributable to climate. *Journal of Arid Environments* 78: 55-64.
- Gueye, A.Z., 2004. Etude bibliographique sur la filière riz au Sénégal. Observatoire National dur Riz au Sénégal (O.N.R.S.).
- GRDR 2014. Atlas - La Moyenne vallée du Fleuve Sénégal. Centres et Périphéries. Groupe de Recherche et de Réalisations pour le Développement Rural. Dakar.
- Hellsten, S., Dieme, C., Mbengue, M., Janauer, G.A., den Hollander, N., Pieterse, A., 1999. Typha control efficiency of a weed-cutting boat in the Lac de Guiers in Senegal: a preliminary study on mowing speed and re-growth capacity. *Hydrobiologia* 415: 249-255.
- Henning, R.K., 2002. Valorisation du Typha comme combustible domestique en Afrique de l'Ouest etv en Europe. In: Workshop on Typha in St. Louis, Senegal, Julliet 2002.
- Horowitz, M.M., Salem-Murdock, M., 1993. Development-induced food insecurity in the Middle Senegal Valley. *Geojournal* 30: 179-184.
- Isupova, M.V., Mikhailov, V.N., 2008. Hydrological and morphological processes in Senegal River Mouth Area. *Water Resources* 35: 30-42.
- Jobin, W., 1999. Dams and disease: ecological design and health impacts of large dams, canals and irrigation systems. E & FN Spon, London.
- Jones, P.G., Thornton, P.K., 2008. Croppers to livestock keepers: livelihood transitions to 2050 in Africa due to climate change. *Environmental Science & Policy* 12(4): 427-437.
- Juijn, C., 2018. Remote sensing analysis of the Land Use and Land Cover change in the Senegal river valley. Bsc dissertation University of Amsterdam.

- Kato, E., Ringler, C., Yesuf, M., Bryan, E., 2011. Soil and water conservation technologies: a buffer against production risk in the face of climate change? Insights from the Nile basin in Ethiopia. *Agricultural Economics* 42: 593-604 .
- Klop, E., E. Wymenga, E. Klop, M. Bekkema 2019. Ecological hotspots and land use patterns in the Upper Niger Basin, Guinea. A&W-report 2501. Altenburg & Wymenga ecologisch onderzoek, Feanwâlden.
- Klop, E., Wymenga, E., Gueye, Y., Mawade Wade, P., Davids, L., Flink, S., Baker, C., Stolk, M., 2016. The use of ecosystem services to value wetlands in the Senegal River Basin – a pilot study, A&W-report 2111, Altenburg & Wymenga ecologisch onderzoek, Feanwâlden.
- Krysanova, V., Hattermann, F., Huang, S., Hesse, C., Vetter, T., Liersch, S., Koch, H., and Kundzewicz, Z. W. (2015). Modelling climate and land use change impacts with SWIM: lessons learnt from multiple applications. *Hydrological Sciences Journal*, 60(4):606–635.
- LeBarbé, L., Lebel, T., Tapsoba, D., 2002. Rainfall variability in West Africa during the years 1950-90. *Journal of Climate* 15: 187-202.
- Lebel, T., Ali, A., 2009. Recent trends in the Central and Western Sahel rainfall regime (1990-2007). *Journal of Hydrology* 375: 52-64.
- Lei J., Zhang, L. and B. Wylie, 2009. Analysis of Dynamic Thresholds for the Normalized Difference Water Index. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 75(11): 1307-1317.
- Liersch, S., S. Fournet & H. Koch 2018. Assessment of Climate Change and Water Management Impacts on the Water Resources in the Upper Niger and Bani River basins. Report. Potsdam Institute for Climate Adaptation. Potsdam.
- Mané, L., K., Fraval, P., 2001. Suivi par télédétection des cultures de décrue dans la vallée du fleuve Sénégal en saison froide 2000/2001. Saint-Louis, Senegal: Societe Nationale d'Amenagement et d'Exploitation des Terres du Delta du fleuve Senegal et des vallees du fleuve Senegal et de la Falémé (SAED); Saint-Louis, Senegal: Africa Rice Centre (WARDA/ADRAO); Saint-Louis, Senegal: International Water Management Institute (IWMI). 29p.
- McFeeters, S.K., 2007. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing* 17(7): 1425-1432, DOI: 10.1080/01431169608948714.
- Mietton, M., Dumas, D., Hamerlynck, O., Kane, A., Coly, A., Duvail, S., Pesneaud, F., Baba, M.L.O., 2007. Water management in the Senegal River Delta : a continuing uncertainty. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions* 4: 4297-4323.
- Millennium Ecosystem Assessment, 2005. Ecosystems and Human Well-being: Synthesis. Island Press, Washington, DC.
- Mueller-Wilm, U., 2016. ESA Sentinel-2. Sen2Cor Configuration and User Manual. S2-PDGS-MPC-L2A-SUM-V.2.3, Issue 1, Date 2016-11-25. 47p.
- National Research Council, 2003. Scientific Data for Decision Making Toward Sustainable Development: Senegal River Basin Case Study: Summary of a Workshop. Washington, DC: The National Academies Press.
- OMVS, 2011. SDAGE du Fleuve Sénégal, Phase III: version définitive. Organisation pour la Mise en Valeur du Fleuve Sénégal.
- OSS 2015a. Sénégal. Atlas des cartes d'occupation du sol. Observatoire du Sahara et du Sahel. Projet Amélioration de la résilience des populations sahéliennes aux mutations environnementales - REPSAHEL.
- OSS 2015b. Mauritanie. Atlas des cartes d'occupation du sol. Observatoire du Sahara et du Sahel. Projet Amélioration de la résilience des populations sahéliennes aux mutations environnementales - REPSAHEL.
- Pottinger, L., 1997. Manantali dam changes will make a bad situation worse. *World Rivers Review* 15(5).
- Ramirez-Villegas, J., Thornton, P.K., 2015. Climate change impacts on African crop production. CCAFS working paper #119. Copenhagen: CGIAR research program on climate change, agriculture and food security (CAAFS).

- Rentier, E.S., 2018. Mapping land use, land cover and the spatial-temporal floodplain extent of the Middle Valley of the Senegal river. Bsc dissertation University of Amsterdam.
- Roudier, P., Sultan, B., Quirion, P., Berg, A., 2011. The impact of future climate change on West African crop yields: What does the recent literature say? *Global Environmental Change* 21: 1073-1083.
- Sanogo, S., Fink, A.H., Omotosho, J.A., Ba, A., Redl, R., Ermert, V., 2015. Spatio-temporal characteristics of the recent rainfall recovery in West Africa. *International Journal of Climatology*, DOI: 10.1002/joc.4309.
- Senock, R.S., Pieper, R.D., 1990. Livestock production constraints in the Sahel. *Rangelands* 12: 225-229.
- Serdeczny, O., S. Adams, F. Baarsch, D. Coumou, A. Robinson, W. Hare, M. Schaeffer, M. Perrette, & J. Reinhardt 2016. *Climate change impacts in sub-saharan africa: from physical changes to their social repercussions*. Regional environmental change .doi: 10.1007/s10113-015-0910-2
- Sultan, B., Roudier, P., Quirion, P., Alhassane, A., Muller, B., Dingkuhn, M., Ciais, P., Guimberteau, M., Traore, S., Baron, C., 2013. Assessing climate change impacts on sorghum and millet yields in the Sudanian and Sahelian savannas of West Africa. *Environmental Research Letters* 8, 014040.
- Sun, F., Sun, W., Chen, J. and P. Gong, 2012. Comparison and improvement of methods for identifying waterbodies in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing* 33(21): 6854-6875.
- Tappan, G.G., M. Sall, E.C. Wood and M. Cushing, 2004. Ecoregions and land cover trends in Senegal. *Journal of Arid Environments* 59: 427-462.
- USAID, 2018. Climate Change Adaptation in Senegal. Factsheet from [www.climatelinks.org](http://www.climatelinks.org).
- Van Oort, P.A.J., Zwart, S.J., 2017. Impacts of climate change on rice production in Africa and causes of simulated yield changes. *Global Change Biology*, DOI: 10.1111/gcb.13967.
- Varis, O., Fraboulet-Jussila, S., 2002. Analysis of eutrophication level and critical loads of Lac de Guiers, Senegal. *Verhandlungen des Internationalen Verein Limnologie* 28: 462-466.
- Varis, O., Lahtela, V., 2002. Integrated Water Resources Management along the Senegal River: Introducing an Analytical Framework. *Water Resources Management* 18(4): 501-521.
- Venema, H.D., Schiller, E.J., Adamowski, K., Thizy, J-M, 1997. A water resources planning response to climate change in the Senegal River Basin. *Journal of Environmental Management* 49: 125-155.
- Watts, N., Adgar, W.N., Agnolucci, P., Blackstock, J., Byass, P., Cai, W., Chaytor, S., Colbourn, T., Collins, M., Cooper, A., Cox, M.P., Depledge, J., Drummond, P., Ekins, P., Galaz, V., Grace, D., Graham, H., Grubb, M., Haines, A., Hamilton, I., Hunter, A., Jiang, X., Li, M., Kelman, I., Liang Lu Lott, M., Lowe, R., Luo, Y., Mace, G., Maslin, M., Nilsson, M., Oreszcyn, T., Pye, S., Quinn, T., Svendsdotter, M., Venevsky, S., Warmer, K., Xu, B., Yang, J., Yu, C., Zhang, Q., Gong, P., Montgomery, H., Costello, A., 2015. Health and climate change: policy responses to protect public health. *The Lancet* 386, 1861–1914.
- Wood, L.C., Tappan, G.G., Hadj, A., 2004. Understanding the drivers of agricultural land use change in south-central Senegal. *J. Arid Environ.* 59: 565-582.
- Woodhouse, P., 2012. Foreign agricultural land acquisition and the visibility of water resource impacts in Sub-Saharan Africa. *Water Alternatives* 5(2): 208-222.
- WWF. 2016. Living Planet Report 2016. Risk and resilience in a new era. WWF Internatioal, Gland, Switzerland.
- Yossi, H., Kaya, B., Traore, C.O., Niang, A., Butare, I., Levasseur, V., Sanogo, D., 2006. Les haies vives au Sahel, Etat des connaissances et recommandations pour la recherche et le développement', World Agroforestry Centre 2006.
- Zeng, N., 2003. Drought in the Sahel. *Science* 302:999-1000.
- Zwarts, L., Bijlsma, R.G., van der Kamp, J., Wymenga, E., 2009. Living on the Edge: wetlands and birds in a changing Sahel. KNNV Publishing, Zeist.
- Zwarts, L., Bijlsma, R.G., van der Kamp, J., 2018. Large decline of birds in Sahelian rangelands due to loss of woody cover and soil seed bank. *Journal of Arid Environments* 155: 1-15.
- Zwarts, L., Bijlsma, R.G., van der Kamp, J., Sikkema, M., Wymenga, E., 2015. Moreau's paradox reversed, or why insectivorous birds reach high densities in savanna trees. *Ardea* 103: 123-144.

### **Data sources**

Bing maps, 2018: <https://www.bing.com/maps>

ESA, 2018. Open Access Hub: <https://scihub.copernicus.eu/>

ESA, 2018b. Sentinel Application Toolbox v.6.0 (SNAP): <http://step.esa.int/main/toolboxes/snap/>

USGS (2018). Earth Explorer: <https://earthexplorer.usgs.gov/>

## Appendix A: Rapport de mission 20-26 février 2018

### A. 1. Introduction

Une mission de terrain dans le bassin du fleuve Sénégal a été effectuée du 20 février au 26 février 2018 par les consultants écologiques d'Altenburg & Wymenga (Eddy Wymenga et Ivan Mettrop). L'équipe de la mission de terrain est complétée par l'OMVS en la personne de madame Aram Ngom Ndiaye.

L'objectif de cette mission de terrain était d'obtenir d'informations sur le terrain concernant la disponibilité spatiale des ressources en eau (hydrologie), l'utilisation des terres (vulnérabilité de certains habitats), les services écosystémiques et la biodiversité. Les sites visités se trouvaient en particulier dans les environs de Dagana. En général, il y a certains types de terrain importants dans la région.

- Forêts (avec inondation temporaire / sans inondation temporaire)
- Cultures endiguées et irriguées (maraîchages, rizières)
- Cultures de décrues
- Zones humides avec dominance de *Typha*
- Autres habitats naturels
- Sol nu (pas utilisé)

### L'itinéraire

L'itinéraire est indiqué dans le tableau. Une description plus détaillée des activités et des principaux résultats est décrite au chapitre 2; le 'journal quotidien'.

Date	Time	Location	Activities
20 Février	Après midi Soir	Amsterdam – Dakar Dakar	Voyage Reste à l'hotel Résidence Hoteliere Olympus
21 Février	Matin Après midi	Dakar Dakar	Réunion à l'OMVS Dakar Travailler à l'hotel
22 Février	Matin Après midi	Dakar – Saint Louis Saint Louis – Richard Toll	Voyage + réunion à OMVS St. Louis Voyage + réunion à S.E.A.D.
23 Février	Journée complète	around Dagana	Visites de terrain
24 Février	Matin + après midi Evening	Richard Toll – Dakar Dakar	Voyage + visites de terrain le long du fleuve Sénégal Reste à l'hotel Résidence Hoteliere Olympus
25 Février	Après midi	Dakar	Travailler à l'hotel
26 Février	Matin + après midi Soir	Dakar Dakar – Amsterdam	Atelier démarrage à l'OMVS Dakar incl. présentation Voyage

## A. 2. Journal quotidien

### Mardi 20 février 2018

Pendant le vol d'Amsterdam à Dakar, nous avons travaillé sur la préparation de la mission. Nous avons préparé le programme, les lieux à visiter, les sujets à discuter au l'office d'OMVS et la présentation pour l'atelier démarrage.

### Mercredi 21 février 2018

La majeure partie de la journée consistait en une visite très utile au bureau de l'OMVS à Dakar. Nous avons rencontré les personnes suivantes:

Mohamed Fawzi Bedredine (Ingénieur Génie Rural et Coordonnateur Régional Adjoint du PGIRE) nous a aimablement aidé à organiser la planification des excursions. Aussi, il nous a présenté plusieurs personnes intéressantes et importantes à l'OMVS. En outre, nous avons convenu que notre étude et l'étude récemment achevée par Artelia (2017) sont très complémentaires et certainement pas similaires. Le travail quantitatif d'Artelia peut très bien servir de base à nos analyses spatiales. De plus, le programme initial pour les journées sur le terrain a été modifié un peut. Avec Fawzi, nous avons formulé un nouveau programme, comme indiqué dans le tableau en introduction. Ensuite, nous avons brièvement visité M. Brahim H'Meyada (Haut commissaire Adjoint). Nous avons rencontré madame Anta Seck (Coordinatrice Régionale du PGire). Anta était heureux d'être informé de nos activités. Nous avons aussi rencontré madame Véronique Mboss Faye Komaclo (spécialiste en changement climatique). Enfin, nous avons rencontré madame Aram Ngom Ndiaye (géographe/environnementaliste), qui nous accompagnera pendant les journées sur le terrain.

### Jeudi 22 février 2018

Nous avons voyagé de Dakar à St. Louis. A Saint Louis, nous avons visité le bureau CDA (Centre de Documentation et des Archives) de l'OMVS. Après avoir expliqué le but du projet et nos activités pendant les jours sur le terrain à mr. Babacar Diong et mr. Oumar Dansogo, ils nous ont fourni les informations nécessaires pour accéder à la base de données avec des rapports, etc. Nous avons également obtenu un CD-rom contenant la bibliothèque numérique consacrée au fonds M.A.S. et O.E.R.S.

De plus, nous avons été informés de la mission de Geoconsult dans le contexte de PGIRE. L'objectif principal de l'étude de Geoconsult est de prévoir l'OMVS d'une base de données cartographiques homogènes sur l'ensemble du bassin. En outre, une étude sera réalisée afin de dégager les grandes tendances et les évolutions récentes des écosystèmes. Ce projet est également important pour notre étude. Le rapport de phase 1 est déjà disponible et nous l'obtiendrons.

Ensuite, nous avons visité le S.A.E.D. (Société Nationale d'Exploitation des Terres du Delta du Fleuve Sénégal) et nous avons discuté avec mr. Moustafa Lo sur les pratiques agricoles dans la région. Mr. Lo pourrait nous fournir beaucoup d'informations sur les sites que nous avons l'intention de visiter, et sur les caractéristiques hydrologiques de la région. Il y avait un dossier contenant des informations importantes sur les principales cultures cultivées (riz, oignon, tomate, patate douce, maïs) avec un accent particulier sur l'exploitation de ces cultures. Le S.A.E.D. est impliqué dans l'infrastructure agricole et l'établissement dans la région (seulement dans les lits de la rivière) et fournit également des conseils sur l'utilisation d'engrais et d'herbicides, etc. Enfin, mr. Lo pourrait nous dire que les cultures de décrue traditionnelles sont encore pratiquées à grande échelle dans la région à l'est de Podor. Ouest de Podor ces activités ont fortement diminué.

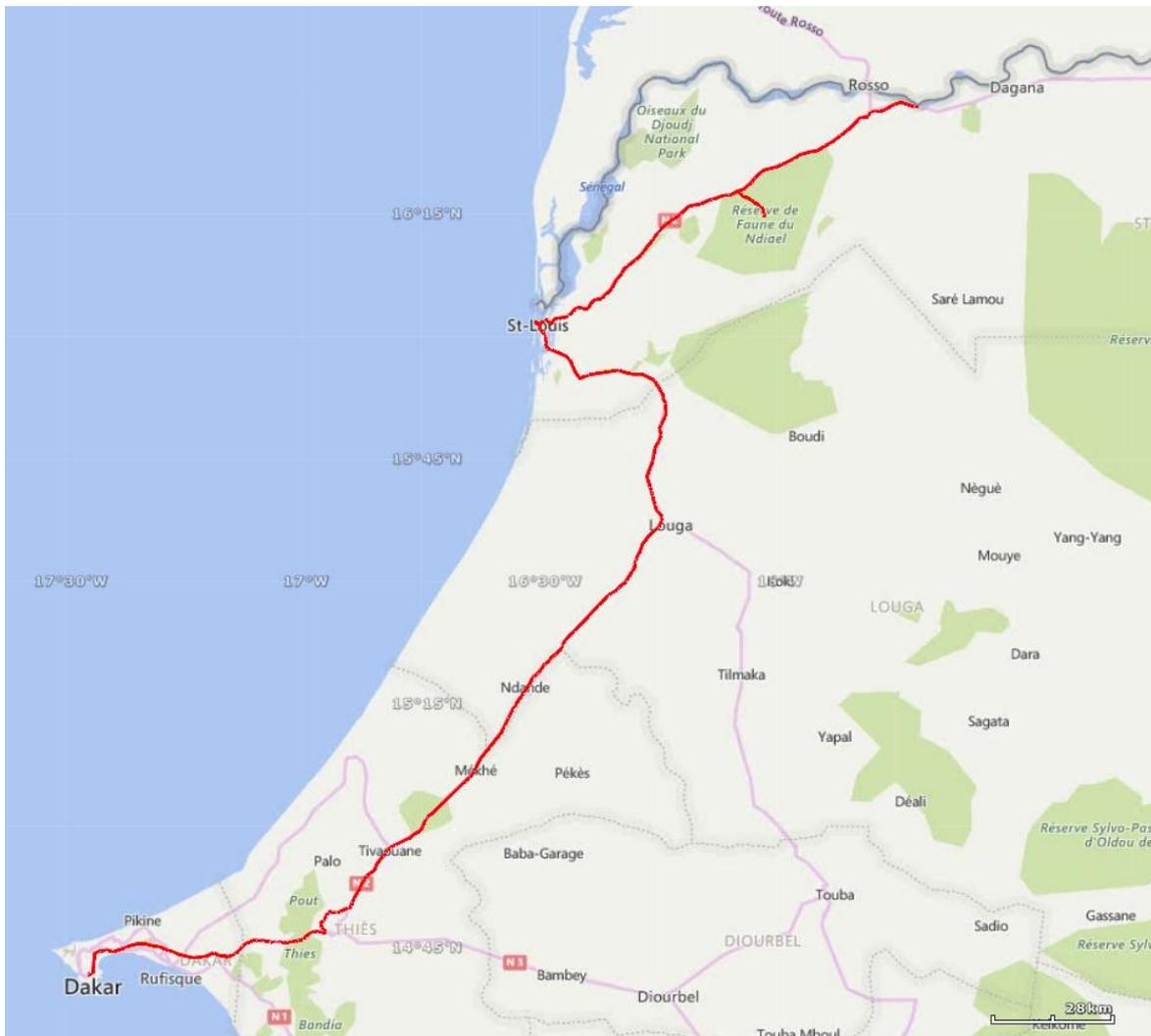


Figure 1; la route de jeudi 22 février 2018

### Vendredi 23 février 2018

De Richard Toll nous avons voyagé vers la région à l'est de Dagana pour les visites sur le terrain (Figure 2). Sur le chemin et sur place autour de Dagana nous avons pris des notes à plusieurs checkpoints (CP's).

Le premier CP était au pont sur le canal d'écoulement 'Taoueye' (CP1). L'eau coule par ce canal vers le lac de Guyere. Le débit est remarquablement élevé, il y a beaucoup d'eau est autorisé à passer dans le canal. Sur les bords du canal *Typha* spp. se développe. Nous observons également *Vossia cuspidata* et *Echinochloa colona*. Il y a une grande diversité d'oiseaux aquatiques.

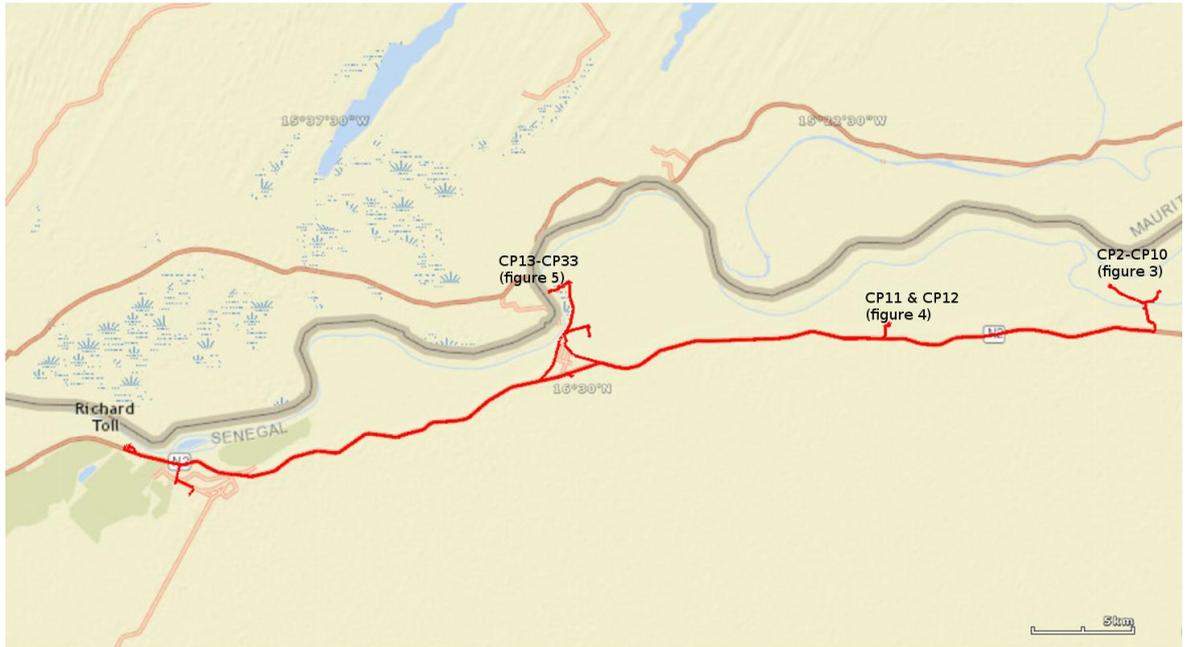


Figure 2; la route de vendredi 23 février 2018



Figure 3; locations des CPs 2-CP10



CP1



CP2

Nous avons continué à la région l'est de Dagana. Au **CP2**, nous avons visité un maraîchage. Une grande variété de cultures est cultivée ici ; oignons, tomates, courgettes, maïs et concombre. Les différentes cultures sont mélangées, et on peut facilement utiliser de l'eau du canal latéral de la rivière.

Près du Fayana Walo (**CP3**) nous avons visité une forêt avec inondation temporaire. Beaucoup d'arbres poussent ici, y compris de nombreux *Acacia* spp. avec une grande biodiversité. Presque tous les arbres sont *Acacia nilotica*, ils ont tous fleuri. L'écorce des arbres est utilisée pour la gomme arabique. Les parties basses contiennent beaucoup d'argile, la digue est de sable. Au bord de l'eau il y a beaucoup de végétations de Chypre. Ces végétations sont partiellement pâturées. Il n'y a pas de *Vossia* ici et ni de *Typha*. Dans les périodes humides l'eau est ici jusqu'à la digue.

**CP4** est proche de CP3. Les poissons sont capturés ici par les villageois locaux. Les écailles du poisson sont enlevés sur place, les reliques de ceci sont encore visibles sur place. En plus, il y a des ruches d'abeilles dans les *Acacia nilotica* arbres. Il n'y avait pas beaucoup de coupe dans cet endroit pour le charbon de bois et le bois de chauvage. CP4, ainsi CP3, est complètement inondé dans la période humide, mais il n'y a pas de *Typha* ici. Peut-être c'est trop sec pendant la période sans pluie. D'ici, les poissons remontent vers le fleuve Sénégal. Donc, l'endroit est un important lien écologique. Enfin, il y a beaucoup des oiseaux ici: *Motacilla flava*; *Tringa glareola*; *Himantopus himantopus*; *Egretta garzetta*; *Ardea alba*; *Ardeola ralloides*; *Egretta ardesiaca*; *Phylloscopus bonelli*; *Phylloscopus collybita*; *Phoenicurus phoenicurus*.



CP3



CP3



CP4



CP4

**CP5, CP6, CP9 et CP10** sont situés dans les champs de riz. Le riz est déjà récolté au moment de la visite sur le terrain. Donc, il n'y avait pas de travail de terre à ce moment-là. Quelques femmes cherchent dans les champs arides et secs pour tubercules racines d'herbes (herbes inconnues) pour le goût en poudre (photo CP9).



CP5



CP9

**CP7 & CP8** étaient similaires à **CP3**: Végétation *Cyperaceae*, mais aussi de très grands Acacias (10 à 10 m) ont été abattus et brûlés en charbon de bois. De plus: les gens pêchent et tous ces champs ont été broutés par des vaches. Les vaches étaient encore dans certains endroits; partout étaient des fientes. Madame Ndiaye a expliqué un nouveau projet intéressant sur la conversion des déjections en biogaz.

Sur le chemin du retour vers l'ouest, nous faisons un arrêt intermédiaire (**CP11 et CP12**). Ici, il y a des maraîchage avec doubles cultures (deux saisons). Après utilisation comme une rizière, les champs sont utilisés comme maraichages. Les cultures sont irrigués. Principalement, les oignons sont cultivés. Cela a une raison politique. Le gouvernement a cessé d'importer des oignons pour augmenter la production d'oignon au Sénégal. Cela a conduit à une énorme stimulation de la production d'oignons. En plus des oignons, il y a beaucoup de maïs, de citrouille, des courgettes et beaucoup de tomates ici. Beaucoup d'herbicide est utilisé dans les maraichages (Figure). C'est un développement inquiétant, parce que la qualité de l'eau dans l'environnement est négativement affectée. Il n'y a pas beaucoup d'oiseaux. En particulier, les grands oiseaux sont absents et il n'y a pas d'oiseaux de proie. Cependant, il y a beaucoup de *Vanellus spinosus*.



Figure 4; locations des CP11 & CP12



CP11



CP12



CP12



CP12

Au **CP13**, situé dans les rives étroites du fleuve Sénégal, nous visitons les cultures décrues. Dans ce domaine, on cultive des patates douces.

**CP14** et **CP15** sont situés dans les champs de riz. Le riz est récolté. Donc, il n'y avait pas de travail de terre à ce moment-là.

**CP16** et **CP17** sont situés dans une zone de rizières abandonnées. Les champs sont abandonnés longtemps (il y a déjà plusieurs années) et maintenant la région est colonisée par *Prosopis Africanus*. La biodiversité n'est pas élevée.



CP 16



CP 18

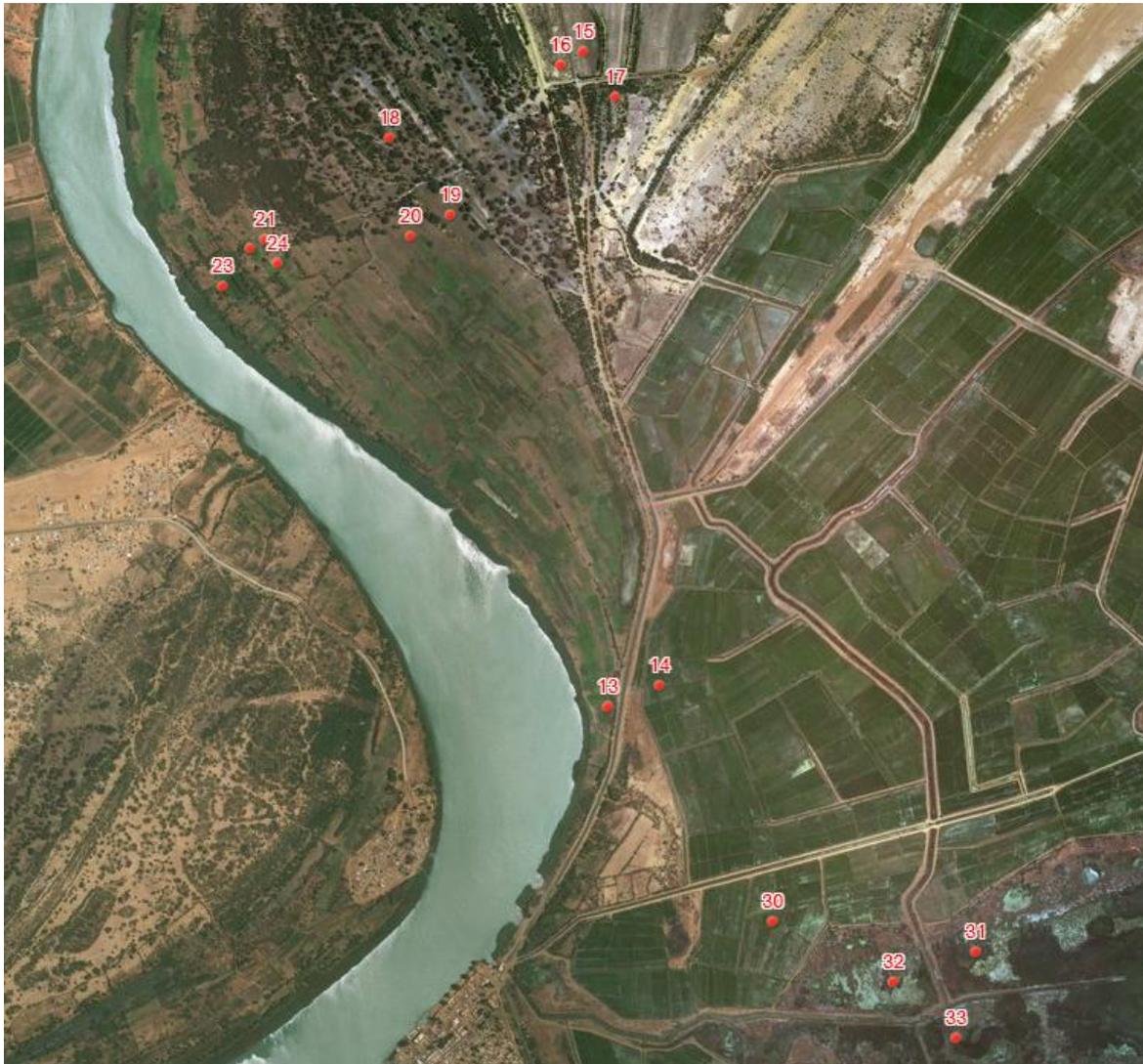


Figure 5; locations des CP13-CP33

**CP18** est situé dans une forêt classée. La forêt est classée depuis 1931 et se compose de *Faidherbia albida*, *Acacia nilotica* et autres *Acacia* spp très vieux. Un résident local dit que le niveau d'eau dans la période humide est d'au moins un mètre plus haut. Il y a aussi des palmiers (*Borassus* spp.). Les arbres accueillent *Phylloscopus bonelli*, *Phylloscopus collybita*, et différents types de *Picides*. La zone a une très haute biodiversité.

**CP19 - CP24** sont des maraîchages cultures décrues. Les maraîchages contiennent beaucoup de cultures. Il y a des tomates, patats douces, poivriers, aubergines, et des oignons. Au moment de l'année de cette visite l'eau de la rivière est amenée dans la terre. Donc, en ce moment il n'y a pas de sécheresse. Dans la période humide, ce n'est pas nécessaire, parce que l'eau d'inondation peut être utilisée pour l'agriculture.



CP23



CP23



CP23



CP23

A l'est de Dagana il y a aussi beaucoup de rizicultures récoltés (zone autour **CP30**).

**CP31**, **CP32** et **CP33** sont des endroits avec d'énormes quantités de *Typha* spp. jusqu'à trois mètres de haut. Un canal de drainage traverse les champs de *Typha*. Le *Typha* est fréquemment retiré du canal, mais la vitesse de croissance des plantes est trop élevée pour gérer le canal correctement. Dans le canal il y a *Azolla* spp. et *Salvinia molesta* aux endroits où le *Typha* est enlevé. Dans ces endroits où *Typha* est enlevé très récemment, de nouvelles plantes sont déjà visibles. La zone où *Typha* domine est très grande; probablement la domination de *Typha* couvre tout le lac. Dans le canal, il y avait de *Porphyrio porphyrio*, *Ardea purpurea*, *Jacaniidae* et un *Circus aeruginosus* au-dessus du *Typha*.



*CP31, CP32 et CP33*

### **Samedi 24 février 2018**

Sur la route vers l'ouest (Figure 6), le long de la rivière, nous nous sommes arrêtés à un champ agricole de gombo (**CP34**). Gombo est une culture à manger.



*CP34*



*CP35, CP36, CP37*

Le reste de la route longe le fleuve Sénégal. Il y a un barrage d'un côté de la route (le côté nord de la fleuve). Derrière le barrage, il y a de *Typha* dans l'eau peu profonde (**CP35**, **CP36**, **CP37**). Il n'y a pas d'autres espèces végétales ici. De l'autre côté de la route, le côté sud, il y a une plaine vide sans végétation à cause de la forte salinité. Cette teneur en sel est augmentée car les eaux souterraines salées sont imprimées à la couche supérieure du sol. Ceci est fait par la pression de l'eau de la rivière sous le barrage.

Plus loin nous arrivons à l'entrée du parc national Djoudj, et plus tard nous visitons le barrage de Diama et nous continuons à Dakar via St. Louis.

### **Dimanche 25 février 2018**

Le dimanche après-midi est utilisé pour la préparation de la présentation le lundi sur le bureau de l'OMVS.

### **Lundi 26 février 2018**

Dans le matin, Eddy Wymenga (A&W) fait une présentation (atelier démarrages) au bureau de l'OMVS. Les participants de l'OMVS: Amadou Lamine Ndiaye (Directeur de l'Environnement et du Développement Durable), Cheikh Sarr (expert SIG), Ibrahima Ba, et Abemlaye Gning.

Plus tard dans la matinée, nous avons une courte réunion avec Kandas Conde (chef de Division Gestion des Ressources en Eau et Prévention des Risques). Kandas était particulièrement intéressé par notre attention sur la relation entre les niveaux d'eau et la distribution spatiale de l'eau d'inondation. Maha Sall et NDiaye Gora sont également présents de l'OMVS. Après une brève explication de ce que nous voulons faire et ce que nous avons besoin de données, nous sommes d'accord que Maha nous enverra les données hydrologiques numériques. Il s'agit de données (cotes et débits) des différentes stations hydrologiques qui nous intéressent, à partir de 1980 environ.

## Appendix B: Rapport de mission 10-17 décembre 2018

### B. 1. Introduction

La mission de terrain dans la moyenne vallée du fleuve Sénégal était effectuée dans la période du 09 jusqu'à 17 décembre 2018 par les consultants écologiques d'Altenburg & Wymenga (Ivan Mettrop, Erik Klop & Teun Smink) et l'OMVS (monsieur Ibrahima Samba BA).

L'objectif de cette deuxième mission de terrain était d'obtenir les données du terrain concernant la disponibilité spatiale des ressources en eau (hydrologie), l'utilisation des terres, les services écosystémiques y compris la biodiversité, et d'évaluer la vulnérabilité de certains habitats. Les sites visités se trouvaient en particulier dans les environs de Podor et Matam. Ces sites s'ajoutent aux les sites visités lors de la première mission en février 2018 autour de Dagana.

En général, il y a certains types de terrain importants dans la région.

- Zones ouvertes (semi-désertique/savane), avec des arbres et arbustes
- Forêts (feuillage fermé), dominé par *Balanites aegyptiaca* et *Acacia* spp.
- Cultures endiguées et irriguées (maraîchages, rizières)
- Cultures de décrues
- Zones humides dominées par *Typha australis* et autres plantes aquatiques envahissantes
- Sol nu

### L'itinéraire

L'itinéraire est indiqué dans le tableau ci-dessous. Une description plus détaillée des activités et des principaux résultats de l'inventaire sont décrits au chapitre 2; le 'journal quotidien'. Ivan Mettrop déjà tourné retour de Podor le vendredi 14 Décembre.

Date (2018)	Endroit	Activité
Dimanche 9 décembre	Amsterdam – Dakar	Voyage, reste à Résidence Hôtelière Olympus
Lundi 10 décembre	Dakar	Réunion à l'OMVS Dakar, y compris la présentation des résultats, reste à Résidence Hôtelière Olympus
Mardi 11 décembre	Dakar – Podor	Voyage, reste à l'Auberge du Tékrou
Mercredi 12 décembre	Podor	Travail de terrain, reste à l'Auberge du Tékrou
Jeudi 13 décembre	Podor	Travail de terrain, reste à l'Auberge du Tékrou
Vendredi 14 décembre	Podor – Matam	Voyage, travail de terrain sur la route, reste Auberge Beelel Jeeri
Samedi 15 décembre	Matam	Travail de terrain, reste Auberge Beelel Jeeri
Dimanche 16 décembre	Matam – Dakar	Voyage, reste à Résidence Hôtelière Olympus
Lundi 17 décembre	Dakar – Amsterdam	Voyage

## B. 2. Journal quotidien

### Dimanche 9 décembre 2018

Pendant le vol d'Amsterdam à Dakar, nous avons fait des préparations de la mission. Le programme est préparé, nous avons énuméré les lieux à visiter, les sujets à discuter au bureau de l'OMVS et nous avons préparé la présentation des résultats intermédiaires.

### Lundi 10 décembre 2018

La majeure partie de la journée consistait en une visite très utile au bureau de l'OMVS à Dakar. Nous avons rencontré les personnes suivantes:

Avec monsieur Ibrahima Samba BA (Expert en Aménagement), nous avons discuté le programme initial pour les journées sur le terrain. Le programme, la planification et les objectifs étaient d'accord et réalisable. M. Ibrahima Samba Ba nous accompagnera pendant les journées sur le terrain.

Par la suite, monsieur Attaher A.G. Mohamed (Chef de la Division Protection de l'Environnement et Suivi Evaluation) nous a reçu. Monsieur Mohamed, qui assure l'intérim de Amadou Lamine Ndiaye (Directeur de l'Environnement et du Développement Durable, il nous a présenté plusieurs autres personnes intéressantes et importantes à l'OMVS, y compris Monsieur Mamadou Diaby (Secrétaire General).

Par la suite, nous avons tenu une présentation au bureau de l'OMVS. Peu de gens étaient présents ici: M. Mohamed, M. Ba et Madame Aminata Keita (Coordinatrice du projet d'irrigation agricole PARACI). Les diapositives de la présentation sont joints au présent rapport en Appendice I. Les souhaits de l'OMVS correspondent à les résultats présentés. Les questions posées après la présentation portaient sur l'effet d'une forte évaporation: est-ce que c'est mesurable? Cette question est difficile à répondre; il y aura un effet notable, mais il sera difficile en pratique de mesurer cet effet. Les questions concernaient également l'élevage: dans quelle mesure l'eau influence-t-elle et quel est son lien avec une période donnée (haut / bas niveau d'eau)? Y a-t-il un lien? La plupart des élevages ne sont pas transhumains (non nomades), mais sédentaires. Y a-t-il suffisamment de lieux appropriés pour l'élevage sédentaire à l'avenir? De plus, on s'interroge et discute sur la relation entre l'eau et le cadre de vie en général.

De plus, nous avons discuté la possibilité d'un atelier supplémentaire sur la validation des résultats et en particulier les possibilités d'adaptation. Les personnes présentes à l'OMVS pensent que tel atelier est une très bonne idée. Nous pouvons discuter avec un grand groupe d'experts régionaux sur les possibilités d'adaptation et d'innovation dans la région. Nous ne savons pas encore comment cela peut être organisé, pour combien de personnes et dans quelle période. Ce grand atelier ne fait pas partie du TdR de la présente étude. Si cela est convenu, ce sera un atelier supplémentaire sous la forme d'un projet supplémentaire dans l'année prochaine (2019).

De plus, nous avons montré le modèle OPIDIN et le website [www.opidin.org](http://www.opidin.org). Il y avait de l'intérêt pour un modèle comparable pour la vallée du Sénégal. Peut-être existe-t-il des possibilités de créer un tel modèle pour le fleuve Sénégal. Nous en reparlerons bientôt.

### **Mardi 11 décembre 2018**

Nous avons voyagé de Dakar à Podor. Le long voyage ça a pris une journée entière. Dans le soir à l'hôtel, nous avons discuté la planification avec Ibrahima Ba.

### **Mercredi 12 décembre 2018**

Le premier jour de travail sur le terrain. Nous avons collecté des données, et pris des notes à plusieurs checkpoints (CP's).

#### **CP 1:**

A l'ouest de Podor nous visitons des champs avec cultures de décrues. On cultive beaucoup de sorgho et on cultive des haricots supplémentaires entre le sorgho. La récolte de sorgho est effectuée une fois par an, en mars/avril. Donc, le sol retient l'eau pendant longtemps, parce que c'est un sol limoneux. Les inondations annuelles du fleuve sont donc non seulement importantes pour l'approvisionnement en eau, mais également pour la qualité du sol. Les dépôts de l'eau du fleuve causent le sol limoneux, et donc la rétention d'eau. Ca, c'est un fait important pour l'adaptation au climat. Le maïs n'est pas cultivé sur ce site. Pour cela, c'est trop sec, parce que le maïs a besoin plus de l'eau. Toute la production est pour la autoconsommation par la communauté locale, il n'y a pas de vente au marché local. Le rendement n'est pas clair. Il y a une construction locative avec un locataire. Une partie du produit appartient donc au propriétaire / locataire du terrain. L'année 2018 était une bonne année pour la culture de décrue, parce que c'était une année avec beaucoup de pluie. Enfin, nous n'avons pas vu que des insecticides étaient utilisés.

#### **CP 2:**

Sur ce site on trouve l'agriculture irriguée, c'est conforme à la carte d'utilisation des sols. Ici, les canaux d'irrigation sont visibles dans les rizières. Le riz était déjà récolté. Dans des champs comparables (pas ici), le sorgho est actuellement planté entre les riz au moment de l'année, mais seulement dans des conditions idéales et humides.

De CP2, direction CP3 était une rangée d'arbres, ce qui n'a pas été produit sur la carte des types de terrain, composé principalement d'*Acacia nilotica*. Peut-être s'agit-il d'anciennes terres agricoles, donc de forme rectangulaire, qui conduisent à une mauvaise classification.



CP1



CP1

#### **CP 3:**

Dans le village de N'Gaolé, des maraichages aux légumes se trouvent directement au bord de la rivière. Les poivrons et les oignons sont cultivés, et il y a aussi d'élevage (sédentaire). A l'origine, le village est important pour la pêche.

**CP 4:**

Avec l'aide d'un système de pompe, l'eau est laissée entrer ici quand c'est nécessaire. Les tubes étaient toujours là, donc le système a été utilisé récemment. La pompe est utilisée au début de la nouvelle saison. C'est à ce moment que le nouveau riz est semé/planté (mai/juin en la période des premières pluies). Une fois par an, ces canaux sont nettoyés par la SAED.

**CP 5:**

Sur ce site il y a des rizières irriguées (monoculture) près du village de Madiyou. Il n'y a pas beaucoup de Typha dans les canaux; ils sont relativement propres. La plupart du riz est récolté à la fin de la saison des pluies, mais il y a aussi un champ non récolté. La SAED a creusé les canaux.

**CP 6:**

Près du village de Guya il y a beaucoup de cultures de décrues sur une grande surface. Selon la carte d'utilisation des terres, il ne s'agit pas d'une zone ouverte avec de la végétation, mais il y a toujours de l'agriculture à cette période. Donc, le moment (saison) de imagerie satellite est très important pour la production de la carte d'utilisation. L'utilisation actuelle des terres ne peut pas être extraite de photos de plus tôt dans la saison. Il y a des grains de café, des haricots, de la pastèque, des courgettes et du maïs dans les endroits les plus humides. Il n'y a pas de pompes présentes. Toute la production est pour la autoconsommation par la communauté locale, il n'y a pas de vente au marché local.



CP6



CP6

**CP 7:**

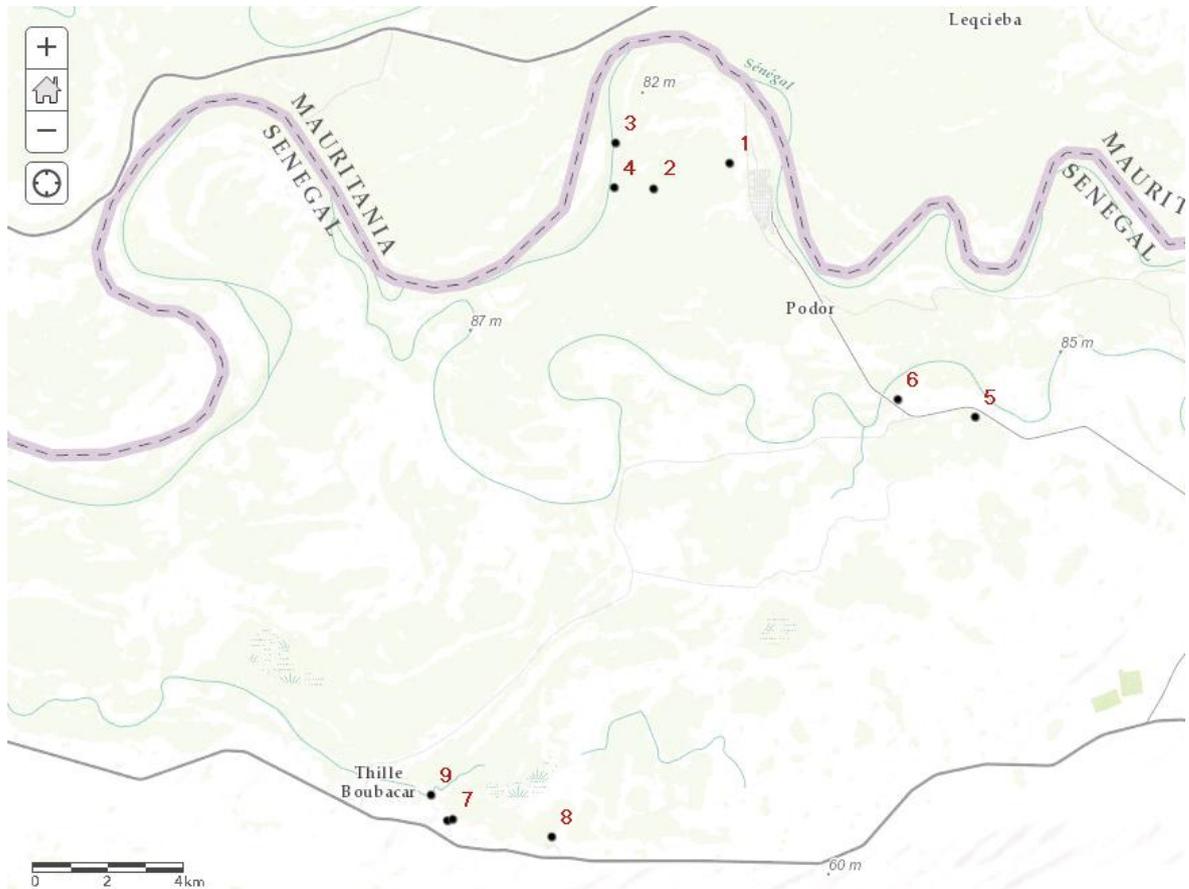
Sur ce site il y a beaucoup de *Persicaria* spp. dans le canal d'approvisionnement. Le canal est totalement dominé par cette espèce. Il y a aussi du roseau. Les champs situés de l'autre côté de la route sont des champs agricoles irrigués, mais ils ne sont pas indiqués sur la carte d'utilisation des terres. La raison est probablement la même que celle décrite sous CP6.

**CP 8:**

Selon la carte d'utilisation des terres, une vaste zone de rizières est récoltée. Les champs avec d'autres cultures ne sont pas bien classés sur la carte produite avec la télédétection. Il y avait aussi des champs d'oignons, où des pesticides étaient utilisés.

**CP 9:**

Il y avait là une belle forêt le long de l'eau N'Galanka Samba Nayel Dieri. Il y a beaucoup de filets de pêche ici, et il y avait beaucoup d'oiseaux d'eau, en particulier de nombreux hérons (biodiversité élevée). Encore beaucoup de *Persicaria* et de très hauts roseaux. La forêt se compose d'*Acacia nilotica*, d'*Eucalyptus* sp. et *Balanites* sp. Nous avons vu la *Sylvia inornata*. Il y a beaucoup de *Calotropis procera* à la lisière de la forêt. Aussi dans d'autres endroits, où le sol est perturbé, cette espèce est très commune.



Une indication des locations des CP numéros 1-9, autour de Podor.

### Jeudi 13 décembre 2018

Le deuxième jour de travail sur le terrain.

#### CP 10:

Voici les rizières près de Guedé. Plusieurs Madames 'frappent' du riz sur des barils de pétrole. Les champs étaient asséchés très récemment, juste avant la récolte. À côté des champs se trouve un grand canal d'irrigation bien entretenu (dépourvu de végétation). La récolte est faite en novembre/décembre. Il faut 3 jours pour récolter plus de 40 ares, avec un rendement pour 5 familles. La récolte sur cette surface produit 38 sacs de riz, et chaque sac pèse environ 90 kilos. Environ 12-14 sacs sont destinés au paiement des dépenses: diesel, eau, etc., et les autres sacs sont destinés à être consommés par les familles pendant environ 2-3 mois. Chaque année, ils choisissent la meilleure variété en fonction du rendement. Il n'y a pas d'exportation commerciale, seulement autoconsommation au sein de la communauté. Ils vendent quelque chose pour obtenir un peu d'argent pour les coûts quotidiens. Les femmes 'frappent' le riz, les hommes tamponneront et moudront etc. Le nettoyage des canaux est effectué par les habitants du village. Il y a un peu de Typha présent, mais ce n'est pas un problème. Il y a des champs de légumes dans un endroit différent, où sont cultivées des tomates, du chou, du concombre et du gombo. Beaucoup s'est amélioré ces dernières années.



CP10

**CP 11:**

A Jabbe Fresbe (village) se trouvent des maraichages le long de la rivière, appartenant à plusieurs familles (un quartier proche du village). Il y a de la cassave, des oignons et du poivre. L'irrigation est effectuée à l'aide d'une pompe de la rivière.

**CP 12:**

Sur ce site, il y a une zone humide avec une énorme quantité de *Scirpus littoralis*. Il y a beaucoup de chèvres. Les chèvres paissent principalement à *Acacia nilotica*. Il y a aussi quelques champs de légumes, y compris le maïs (le site est assez humide), mais il y a aussi des oignons. Les chèvres paissent également les *Scirpus* spp., mais surtout les Acacias. Il y a aussi du sorgho et des haricots. M. Ibrahima Ba explique la raison de l'absence de mil dans cette région. Le mil se dresse sur des endroits plus secs et sableux que le sorgho.



CP12



CP12

**CP 13:**

Une grande surface d'eau avec de nombreuses espèces d'oiseaux, la forêt d'*Acacia nilotica* et de nombreuses chèvres. Le lac est un vestige d'inondation (les eaux de pluie et les eaux des rivières s'évaporent lentement et se retirent de plus en plus).



CP13

**CP 14:**

Une impressionnante forêt inondable à NDioum, constituée d'*Acia nilotica*. Une grande partie de la forêt est inondée, entourée de savane sableuse ouverte. Il y a une sorte de végétation de type *Azolla* avec une inflorescence jaune sur les basses eaux. Nous avons vu la *Sylvia inornata*. La forêt est bien catégorisée par télédétection. Typha semble être absent, mais est classé sur la carte. Il semble que d'autres plantes aquatiques soient également classées comme Typha par la technique de télédétection. Une attention particulière doit être accordée à cela dans l'étude de suivi sur la fiabilité de la technique SIG.



CP14



CP14

**CP 15:**

Sur ce site, il y a des cultures décrues près du pont au village Gayo Toufndé Bali. Les gens cultivent des haricots, du sorgho et des tomates, des patates douces, et il y a aussi des champs de légumes ailleurs. Ils voulaient acheter une pompe.

**CP 16:**

De l'autre côté du village se trouve un grand complexe de riz irrigué. Ici, les femmes sont occupées à récolter ("frapper"). Il y avait déjà une récolte précédente. Celles-ci étaient les restes qui ont ensuite grandi à nouveau (cela ne se fait pas partout/toujours). Ils ne

connaissent pas du tout *Typha* (!). Donc, *Typha* n'est vraiment pas un problème ici. Les champs appartiennent à Halwar, un village plus loin. En février, ils plantaient déjà le riz (très tôt). Le reste après l'expulsion du riz est utilisé pour l'alimentation animale.

### CP 17:

Voici des rizières abandonnées (cette année non utilisées). Pourquoi ces champs sont-ils partis? Il n'y a personne, donc personne ne peut donner d'explication.

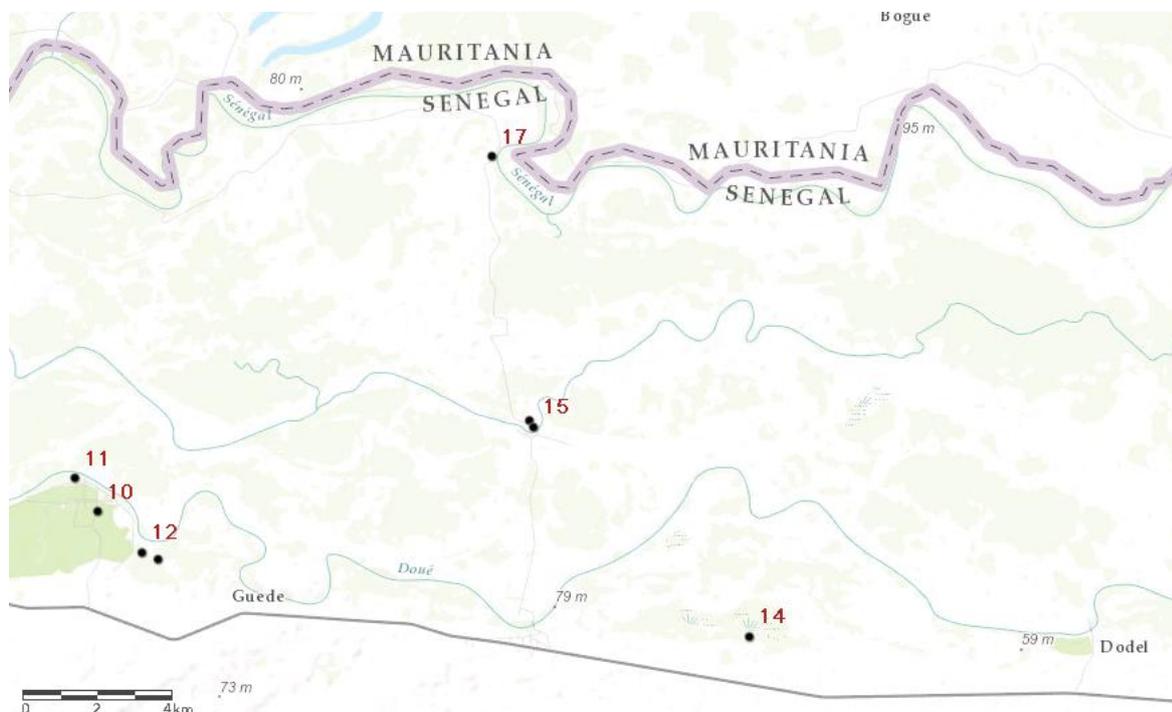
Un peu loin il y a un complexe privé. Les maraichages contiennent des oignons, des poivrons, des tomates, des courgettes et des aubergines. Les champs sont irrigués avec une pompe. Des insecticides sont utilisés. Le complexe est à grande échelle et il n'est pas inondé pendant la période humide.



CP17



CP17



Une indication des locations des CP numéros 10-17, à l'est de Podor.

### **Remarques générales après deux journées de travail autour de Podor:**

Les forêts sont principalement constituées d'*Acacia nilotica* sur les parties inondées. *Acacia nilotica* avec *Faidherbia albida* et *Balanites aegyptiaca* et beaucoup de *Leptadenia pyrotechnica* se trouvent également sur les parties les plus sèches, et il y a beaucoup de *Calotropis procera* sur les sols perturbés. L'impression générale est que Typha n'est pas très présent; en tout cas moins que dans les environs de St. Louis - Richard-Toll. Nous avons atteint la limite de l'extension de Typha.

Le pâturage concerne principalement les chèvres, les moutons et parfois le bétail (principalement sédentaire). Il y a de la pêche, mais cela ne semble pas être très important. La carte d'utilisation des terres produite avec télédétection n'est pas correcte partout. La raison est le moment de l'enregistrement des images satellites. Peut-être il est préférable d'utiliser des images d'une autre période de l'année. Les rizières sont correctes dans la classification, mais les forêts et autres unités plus diffuses s'avèrent plus difficiles. Et la végétation dans l'eau est souvent *Typha* sur la carte, mais en réalité il y a souvent de grands champs de *Scirpus littoralis* et à plus petite échelle beaucoup de végétation de *Persicaria*. Enfin, il y a encore beaucoup d'eau dans les parties les plus basses du paysage autour de Podor.

### **Vendredi 14 décembre**

#### **CP 18:**

Ce site est situé entre les villages Aere Lao et Koitel. Sur le côté est de la route, il y a d'anciennes rizières qui ne sont pas cultivées en 2018. À l'ouest, il y a une bande de forêt avec *Acacia nilotica* et *Balanites aegyptiaca*. À environ 0,5 km au nord se trouve une bande de dunes de sable recouverte de *Balanites aegyptiaca*, *Acacia* et *Leptadenia*.

#### **CP 19**

Voici un waypoint situé juste au nord des dunes de sable (voir ci-dessus). Ici se trouvent d'anciennes rizières, non cultivées en 2018. Selon un agriculteur local, il s'agit normalement de riz irrigué destiné à la consommation de la communauté locale.

#### **CP 20:**

Ici se trouve un grand complexe de champs pour la culture des oignons. Actuellement, le terrain est en préparation pour la plantation d'oignons à la fin du mois de décembre. Les champs sont utilisés conjointement par trois villages. L'irrigation est effectuée au moyen d'une pompe et d'un canal d'irrigation. Selon les populations locales, la superficie est de 12 ha, mais selon notre estimation, la parcelle est plus grande.

#### **CP 21:**

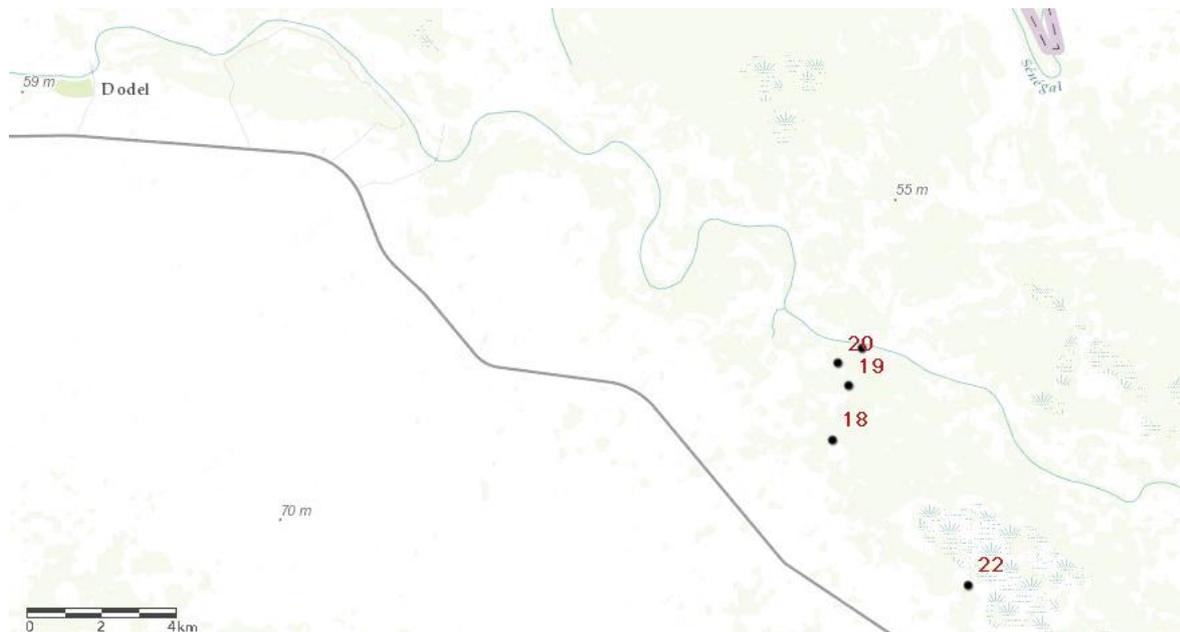
Les habitants du village de Koitel, situé au bord de la rivière, cultivent principalement des patates douces et du maïs en culture de décrue.

#### **CP 22:**

Un grand lac près du village de Neoure contient de nombreux nénuphars. Nous n'avons pas observé de typha. Autour du lac se trouve une forêt d'*Acacia nilotica*. Au moment de la visite, environ 150 à 200 vaches zébus se sont rendues à l'eau, ainsi que plusieurs charrettes à ânes. Au sud du lac, il y a un grand espace ouvert d'herbe.



CP22



Une indication des locations des CP numéros 18-22, à l'est de Dodel.

### Samedi 15 décembre

#### CP 23:

C'est une forêt inondable d'*Acacia nilotica* à l'ouest de Matam. Il y a beaucoup de déchets. Nous avons observé *Acrocephalus scirpaceus* dans la forêt avec *A. nilotica*. En outre, il y avait de broussailles, notamment *A. seyal* et *A. nilotica* avec entre autres *Sylvia inornata*.



CP23

**CP 24:**

Une zone de culture de décrue juste à côté de Matam. Ici, ils cultivent des courgettes, du maïs, des oignons, des haricots, des tomates, du chou et du poivre. C'est principalement pour un usage privé, éventuellement un surplus est vendu sur le marché. Les maraichages sont séparés par famille et mesurent environ 10 x 25 m.



CP24



CP25

**CP 25:**

Une zone avec culture de décrue (maïs) à côté du pont (Pont de Diamel) sur le bras latéral du fleuve Sénégal.

**CP 26:**

Ici il y a des champs de riz récoltés.

**CP 27:**

Une zone intéressante avec des champs entourés de très hautes digues dans lesquelles des tubes installés pour réguler l'irrigation du canal environnant. C'est le seul endroit où nous avons observé ce mode de culture. Apparemment, le riz et le sorgho sont cultivés dans les compartiments. Il y a un champ de maïs du côté ouest.



CP26



CP27

**CP 28:**

Un champ de haricots, à côté du maïs.

**CP 29:**

Un grand lac d'environ 1 km de large, entièrement recouvert de nénuphars. Beaucoup d'oiseaux aquatiques (y compris *Alopochen aegyptiaca*, *Plectropterus gambensis*). Le lac est complètement entouré par la forêt d'Acacia.



CP28



CP29

**CP 30:**

Voici des maraichages privés à côté de la rivière, avec principalement des oignons. Plus haut sont hautes dunes/collines sur le côté Mauretan de la rivière.

**CP 31:**

Sur ce site, il y a une étroite bande de culture de décrue, sur une longueur de 5 km. Seulement les patates douces sont cultivées. En plus de la autoconsommation, il y a aussi des ventes sur le marché. Le nom du village était Toufunde Tokomadji. L'un des hommes à qui nous avons parlé vivait dans le village de l'autre côté du fleuve, en Mauritanie. Il cultivait des patates douces sur le sol Sénégalais.



CP31

**CP 32:**

Ici se trouve une grande plaine avec une savane ouverte des *Balanites aegyptiaca* sur un sol sablonneux. Il y a aussi un grand lac (environ 1,5 km de long) entouré de forêt de *A. nilotica* avec beaucoup des oiseaux, y compris *Sylvia inornata* et *Phylloscopus bonelli*. Le nom de ce lac est Tiguerre Yene.

**CP 33:**

Ici il y a une haute digue (barrière anti-inondation), non praticable pour le voiture.

**CP 34:**

Voici des champs déserts (rizières autrefois irriguées) au sud de Matam. Au nord, il y a des forêts avec *Acacia seyal* et *Balanites aegyptiaca*.



CP32



CP34

**CP 35:**

Juste à côté du point ci-dessus se trouvent les rizières en cours d'utilisation (déjà récoltées). Bissap et le gombo sont également cultivés entre les rizières (quelques-unes seulement).

**CP 36:**

Les champs de riz sont maintenant récoltés, surtout pour la consommation au sein de la communauté. Aussi maïs est cultivé ici. Au niveau de la rivière se trouve une étroite bande de

légumes avec patates douces et maïs. Voici également une motopompe dans l'eau pour l'irrigation. Les arbres environnants sont principalement *Acacia seyal*, *Acacia nilotica*, *Balanites aegyptiaca* et *Eucalyptus*.

**CP 37:**

Sur le côté est de la route, il y a des champs de cultures décrues, avec des haricots et de patates douces.

**CP 38:**

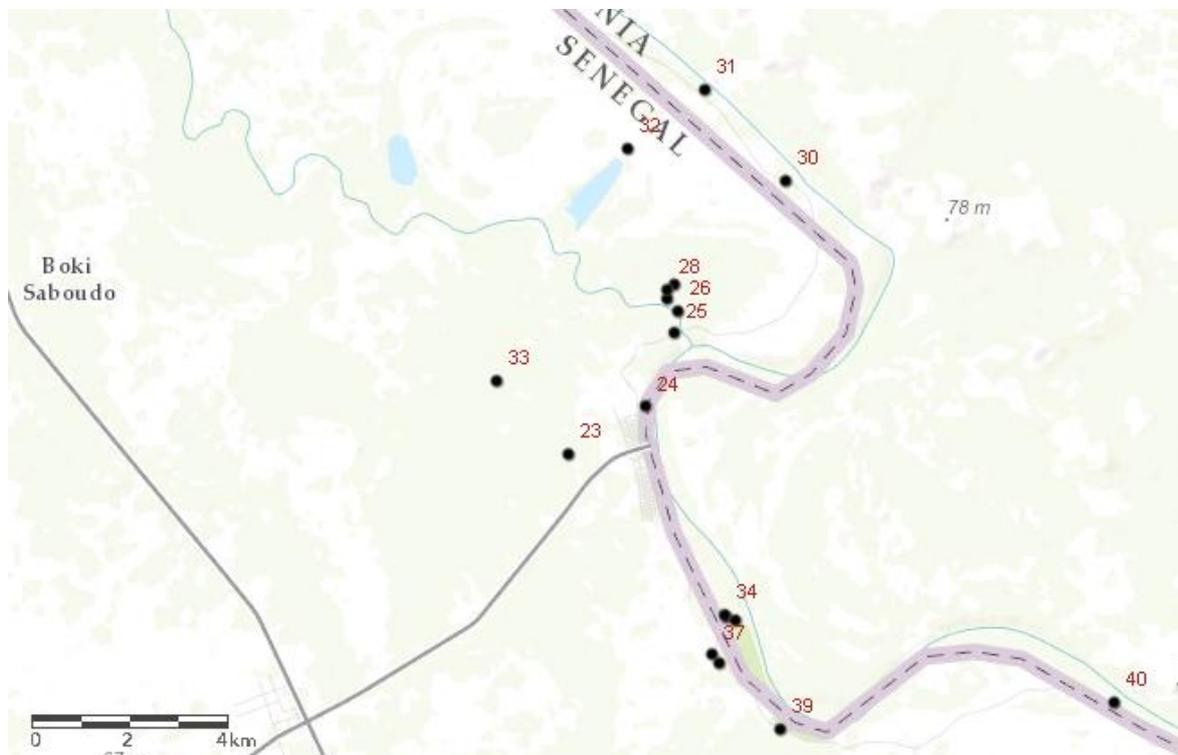
Juste à côté du point ci-dessus, il y a un lac (Sowandou, environ 17 ha), couvert de nénuphars. En outre, une bande avec du maïs et des haricots. Ce point se situe à environ 650 m après la traversée d'un canal d'irrigation propre. C'était un lac permanent, indiqué par les nénuphars qui ont besoin de plus d'un an pour s'épanouir.

**CP 39:**

Dans cette région, il y a de nombreuses rizières à grande échelle, jusqu'à environ 2 à 3 km plus à l'est du côté sud de la route. Ces champs ne sont pas visibles sur Google Maps; probablement ces champs ont été récemment effectués.

**CP 40:**

On y trouve des maraichages des légumes activement irrigués avec principalement du poivre, clôturés par une clôture. C'est apparemment un projet financé par la Suisse. À l'ouest de celle-ci (dans le méandre de la rivière) se trouve une grande savane ouverte avec *Acacia* spp. et *Balanites aegyptiaca*.



Une indication des locations des CP numéros 23-40, sud-est de Matam.

**Remarques générales après les journées de travail autour de Matam:**

La zone autour de Matam donne une impression différente de celle de Podor. En général, Matam est dans un endroit plus sec et plus ouvert, avec moins d'occupation. Le long de la

rivière se trouvent de belles zones de culture de décrue, parfois d'une longueur de plusieurs kilomètres et parfois utilisés couramment par plusieurs villages. Parfois, ces parcelles sont même utilisés par des personnes de la Mauritanie (où aussi l'abondance de la culture décrue sur les banques).

Entre les points 39 et 40, il y a de grandes rizières au sud de la route, qui n'étaient pas encore récoltées lors de la visite sur le terrain. Ces champs ne sont pas visibles sur les images satellites; peut-être ce sont des champs nouvellement créés.

Une grande partie de la région est une savane ouverte avec principalement des *Acacia* spp. et *Balanites aegyptiaca*, comme classé sur la carte de type de terrain. Il y a plusieurs lacs (mares) dans la région, souvent couverts de nénuphars et entourés par la forêt de *Acacia nilotica*. Nulle part, *Typha* n'est observé lors de la visite sur le terrain. Les résidents locaux ont confirmé: *Typha* n'est pas un problème ici. Les forêts d'inondation d'*Acacia nilotica* revêtent une grande importance pour les oiseaux migrateurs du Paléarctique, abritant beaucoup de *Sylvia inornata*, certains de *Phylloscopus bonelli* et, surprenant, aussi *Acrocephalus scirpaceus*. *Faidherbia albida* n'est pas très commun ici, mais apparemment il y a plus d'*Acacia seyal* que dans la partie occidentale. Les forêts sont principalement dominées par l'*Acacia nilotica* et *Balanites aegyptiaca*. Enfin, *Calotropis procera* est présent sur des sols perturbés.

#### **Dimanche 16 décembre**

Un travail de terrain supplémentaire était prévu le dimanche. Cependant, il fallait rentrer à Dakar à cause d'une formation imprévue pour M. Ibrahima Ba le lundi.





**Bezoekadres**

Suderwei 2  
9269 TZ Feanwâlden

**Postadres**

Postbus 32  
9269 ZR Feanwâlden  
Telefoon 0511 47 47 64  
Fax 0511 47 27 40  
info@altwym.nl

[www.altwym.nl](http://www.altwym.nl)