

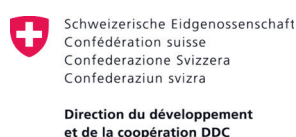
ATLAS

DES GRANDES QUESTIONS SCIENTIFIQUES SUR L'EAU EN AFRIQUE DE L'OUEST ET DU CENTRE



ATLAS _____

DES GRANDES QUESTIONS SCIENTIFIQUES SUR L'EAU EN AFRIQUE DE L'OUEST ET DU CENTRE



DIRECTED BY :

Dr. Issa SAKHO,
Associate Professor at Amadou Mahtar MBOW University, Dakar Sénégal

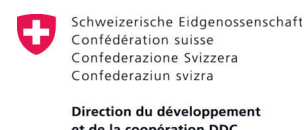
Mr. Niokhor NDOUR,
Director of the Water Resources Management and Planning Division, Minister of Water and Sanitation, Senegal, Cordinator of Dakar Water Hub Initiative (Pôle Eau Dakar)

Ms. Marie Jeanne SENGHOR,
Scientific Assistant of Dakar Water Hub Initiative (Pôle Eau Dakar), at the Water Resources Management and Planning Division, Minister of Water and Sanitation, Senegal

TO CITE THIS ATLAS :

Sakho, I., Ndour, N., Senghor, M.J., et al. 2022. Atlas des grandes questions scientifiques sur l'eau en Afrique de l'Ouest et du Centre. Editions PED, ISBN 9 7824 94 16 1009, Dakar, 199 pages.

SUPPORTED BY :



ÉDITIONS PÔLE EAU DAKAR



© Copyright PED - Mars 2022

- **GRANDS ENJEUX DE L'EAU**

- Préserver la paix et la sécurité dans les bassins partagés à travers l'hydrodiplomatie et la coopération autour de l'eau ;
- Maîtriser l'eau ;
- Prévenir les risques hydrologiques ;
- Préserver la qualité des ressources en eau ;
- Garantir un accès universel à l'eau ;
- Renforcer la disponibilité de l'eau pour le développement local.

- **DEFIS SCIENTIFIQUE & TECHNOLOGIQUE**

Produire les connaissances scientifiques et les outils technologiques nécessaires pour éclairer la décision politique.

SOMMAIRE

Préface.....	i
Avant – Propos.....	ii
Résumé.....	vii
Introduction.....	1
Chapitre 1. Hydrosystèmes, Eau, Climat & Changement climatique.....	6
Chapitre 2. Grands barrages en Afrique de l'Ouest et Impacts.....	41
Chapitre 3. Gouvernance de l'eau dans les bassins partagés & Développement.....	53
Chapitre 4. Eau : Ressource, Risque & Résilience.....	71
Chapitre 5. Qualité des eaux.....	110
Chapitre 6. Maladies liées à l'eau.....	121
Chapitre 7. Traitements de l'eau.....	139
Chapitre 8. Place de l'altimétrie spatiale dans le monitoring des eaux de surface.....	160
Chapitre 9. Management digital de l'eau.....	169

AUTEURS

1.	Kader	BA
2.	Yina	BELL
3.	Alain	BERNARD
4.	Christophe	BRACHET
5.	Laetitia	CHEVALIER
6.	Abdoulaye	CISSE
7.	Mohamed Talla	CISSE
8.	Alioune	COULIBALY
9.	Cécile	DARDEL
10.	Julien	DELOFFRE
11.	Marc	DESCLOITRES
12.	Luc	DESCROIX
13.	Blaise	DHONT
14.	Moussa	DIAKHATE
15.	Samo	DIATTA
16.	Awa	DIATTARA
17.	Mathias	DIEDHIOU
18.	Abdou Lahat	DIENG
19.	Ndeye Maguette	DIENG
20.	Serigne Ndame	DIENG
21.	Amadou	DIENG
22.	Elhadji Serigne Mamour	DIOP
23.	Codou Guèye MAR	DIOP
24.	Massamba	DIOUF
25.	Moustapha	DIOUF
26.	Ousmane Coly	DIOUF
27.	Awa Bousso	DRAME
28.	Mamadou	FALL
29.	Bakary	FATY
30.	Cheikh	FAYE
31.	Serigne	FAYE
32.	Seynabou CISSE	FAYE
33.	Amadou Thierno	GAYE
34.	Manuela	GRIPPA
35.	Aissatou	GUEYE
36.	Paul	HAENER
37.	Ousmane	HANE
38.	Mohamed	HOUSSEINI
39.	Cheikhou	KANE
40.	Alioune	KANE
41.	Grégory S.	JENKINS
41.	Laurent	KERGOAT
42.	Youssef Brahim	KOROLE

43.	Benoit	LAIGNEL
44.	Moustapha	LO
45.	Soda	LOUM
46.	Diakher Helene	MADIOUNE
47.	Moussa	MALAM ABDOU
48.	Isaac	MANGA
49.	Giovanni	MASSAZZA
50.	Maryam Khadim	MBACKE
51.	Mamadou Lamine	MBAYE
52.	Hugo	MERRIEN
53.	Ibrahim Bouzou	MOUSSA
54.	Makha	NDAO
55.	Babacar Mbaye	NDIAYE
56.	Ndiogou	NDIAYE
57.	Mouhamed	NDONG
58.	Abdoulaye	NDOUR
59.	Mouhamadou Moustapha M.	NDOUR
60.	Niokhor	NDOUR
61.	Siny	NDOYE
62.	Allassane	OUATTARA
63.	Euloge	OGOUWALE
64.	Jeremy	PANTHOU
65.	Thelma	PELLICER
66.	Issa	SAKHO
67.	Moctar	SALL
68.	Youssouph	SANE
69.	Philippe	SEGUIN
70.	Marie Jeanne	SENGHOR
71.	Sophie Gladima	SIBY
72.	Thierno Mohamadane Mansour	SOW
73.	Doudou	SOW
74.	Magatte	SOW
75.	Benjamin	SULTAN
76.	Ibrahima Ousmane	SY
77.	Khadidiatou	SY
78.	Serigne Mansour	TALL
79.	Vieri	TARCHIANI
80.	Elhadji D.	THIAM
81.	Imen	TURKI
82.	Jean Pierre	VANDERVAERE
83.	Theo	VISCHEL
84.	Expédit Wilfrid	VISSIN
85.	Aghali Ingatan	WARZAGAN

PREFACE

L'eau constitue la première ressource naturelle indispensable à la vie. Toutefois, l'eau douce disponible et utilisable pour l'humanité et la biosphère représente seulement 1% du volume total d'eau douce ou encore 0,01% de toute l'eau sur la planète. 97,5% de l'eau sur terre est salée.

La sécurité de l'eau pour la paix et le développement est l'un des plus grands défis des temps modernes. La rareté de l'eau affecte plus de 40% de la population mondiale. Les tensions et les crises liées à l'eau sont au 3ème rang des dix principaux risques pour l'économie mondiale.

Cette situation pose un grand défi à relever pour l'humanité : l'accès universel à l'eau, qui est une composante de l'Objectif de Développement Durable 6 (ODD6) des Nations Unies. L'enjeu majeur pour notre génération est de développer les stratégies nécessaires pour assurer cet accès universel sans compromettre la satisfaction des besoins des générations futures.

Dans une situation de stress hydrique et de réchauffement climatique mondial qui affectent durement l'Afrique, la question de l'accès à l'eau constitue un défi majeur en raison des enjeux qui s'y attachent, liés notamment au développement économique, aux conflits, aux migrations, aux réfugiés climatiques, à la coopération autour des bassins transfrontaliers, à la préservation des écosystèmes et à la conservation de la biodiversité.

La gestion, le partage concerté et la sécurité de l'eau doivent donc rester au cœur de nos préoccupations. Il faut, en même temps, développer les sciences et technologies nécessaires à l'utilisation écologiquement rationnelle des ressources en eau.

C'est tout le sens de l'Initiative Pôle Eau Dakar, comme un laboratoire de production de connaissances, un ThinkThank dans le domaine de l'eau pour la Paix et le Développement. Les différents volumes prévus pour l'Atlas des grandes questions scientifiques sur l'eau en Afrique de l'Ouest et du Centre s'inscrivent dans le cadre du développement des capacités, des connaissances et des innovations par des experts académiques et des professionnels de haut niveau.

L'ambition est de créer un ancrage régional de référence à portée internationale. Ce premier volume de l'Atlas est un recueil de contributions d'auteurs mettant ainsi à la disposition du lecteur, des connaissances sur les grandes thématiques sur l'eau en Afrique de l'Ouest et du Centre : hydro systèmes, eau, climat et changement climatique, grandes infrastructures hydrauliques en Afrique de l'Ouest et leurs impacts sur les eaux de

surface, gouvernance de l'eau et développement, alimentation en eau potable dans les grandes agglomérations africaines, résilience, risques et maladies liés à l'eau, qualité de l'eau, techniques de traitements des eaux polluées, monitoring des eaux de surface à partir de l'altimétrie spatiale et en fin l'intégration du digital dans le management de l'eau.

Ce volume de l'atlas lance ainsi le processus de production de connaissances et de développement d'outils innovants qui seront à la base de la formulation de politiques de gestion et de planification des ressources en eau dans la perspective d'un accès universel et durable à l'eau pour garantir sa disponibilité, sa sécurité et son utilisation durable dans des conditions pacifiques.



Macky SALL, Président de la République du Sénégal

A handwritten signature in blue ink, which appears to be 'Macky SALL', written over a horizontal line.

L'eau disponible pour l'humanité et la biosphère représente moins de 0,1% du volume d'eau total sur la planète. Plus de 40% de la population mondiale sont affectées par la problématique de la rareté de l'eau avec de fortes disparités régionales. Classées au 3^{ème} rang des 10 principaux risques pour l'économie mondiale, les tensions et les crises liées à l'eau doivent faire l'objet d'une attention particulière pour préserver la paix et la sécurité entre les peuples.

En effet, l'accès universel à l'eau, inscrit dans l'agenda 2030 des Nations unies comme un Objectif de Développement durable (ODD6) et la sécurité de l'eau pour la paix et le développement, constitue un défi majeur pour notre génération et celles futures. Relever ce défi intergénérationnel, c'est inscrire l'Afrique sur une meilleure trajectoire de croissance économique et de réduction de la pauvreté :

Devant les effets des changements climatiques et son impact en Afrique, continent déjà fragilisé, la question de l'eau est cruciale sur tous les aspects liés à la sécurité alimentaire et au développement durable. Dès lors, la gestion de l'eau et sa protection contre toutes les formes de pollution deviennent un impératif pour la satisfaction des besoins des usagers et des écosystèmes mais également pour une meilleure adaptation aux impacts de ce changement climatique.

A l'issue du panel de haut niveau sur l'eau et la paix, dont le Sénégal a assuré la vice-présidence, il a été fortement recommandé la mise en place de l'Observatoire mondial pour l'Eau et la Paix. Aussi, lors du Kick Off Meeting du Forum mondial de l'Eau Dakar 2022, le Ministère de l'Eau et de l'Assainissement du Sénégal a lancé officiellement le Pôle Eau Dakar.

C'est une initiative en cours de mise en œuvre qui a pour objectif de bâtir un cadre de référence en Afrique pour catalyser la coopération, le dialogue inclusif, la gouvernance et le développement de solutions innovantes sur l'eau. Ainsi, dans le cadre de son pilier relatif à la connaissance, le PED a lancé le projet de production d'Atlas sur les grandes questions scientifiques sur l'eau en Afrique de l'Ouest et du Centre.

Le présent volume de l'Atlas des grandes questions scientifiques sur l'eau en Afrique de l'Ouest et du Centre s'inscrit dans la philosophie de production de connaissances au service du développement. Les connaissances représentent un levier fondamental sur lequel peuvent s'appuyer les processus décisionnels une planification et une gestion durable de nos ressources en eau.

Ce premier volume de 9 chapitres met à la disposition du lecteur, des connaissances sur des grandes thématiques sur l'eau en Afrique de l'Ouest et du Centre.



M. Serigne Mbaye THIAM
Ministre de l'Eau et de l'Assainissement du Sénégal

La croissance démographique galopante, l'urbanisation et l'industrialisation accélérées, ainsi que l'accroissement des cultures à grande échelle ne cessent de faire augmenter la demande en eau douce. Cette situation impose une forte pression sur la ressource en eau dans de nombreuses régions du monde. À ce rythme croissant, la gestion de l'eau et son accès universel à tous deviennent un enjeu mondial majeur.

Afin de protéger la ressource en eau et combattre toutes ses formes de dégradation quantitative et qualitative, les gestionnaires de l'eau ont besoin de données fiables et des connaissances précises. En effet, le projet de production d'Atlas sur les grandes questions scientifiques sur l'eau en Afrique de l'Ouest et du Centre, initié par le Pôle Eau Dakar, vise à relever le défi central de disposer d'une meilleure connaissance des ressources en eau afin d'aider à la prise de décision.

Ce premier volume de l'Atlas présente les grands enjeux sur l'eau avec des thématiques structurantes. Il s'agit d'un volume conséquent, avec la participation de plus de 80 scientifiques. Leurs contributions sont réparties sur 9 chapitres, allant de la connaissance scientifique sur l'état quantitatif et qualitatif des ressources en eau jusqu'à la gouvernance.

Ainsi, les modèles de gouvernance des bassins transfrontaliers en Afrique de l'Ouest, à travers les organismes de bassins, comme l'OMVS, sont de puissants instruments de coopération autour de l'eau afin de garantir la paix et la sécurité et de promouvoir un processus solidaire de développement durables des Etats membres.



Hamed Diane SEMEGA
Haut-Commissaire de l'OMVS
Grand Officier de l'Ordre National du Mali

A stylized, handwritten signature in black ink, consisting of a long horizontal stroke followed by a series of loops and vertical strokes.

Dans de nombreuses régions du monde et particulièrement en Afrique, les pressions sur la ressource en eau et les écosystèmes aquatiques augmentent : changement climatique, urbanisation, croissance démographique, développement économique et agricole impactent les besoins et les risques liés à l'eau. Pour accélérer notre adaptation collective, le partage des connaissances est une base indispensable.

Les enjeux présentés par cet Atlas sur les grandes questions scientifiques sur l'eau en Afrique de l'Ouest et du Centre sont des préoccupations de l'OiEau depuis plus de 30 ans. La valorisation des informations et le partage des données sont au cœur de nos projets de coopération : connaître la ressource et ses usages, visualiser et localiser les enjeux, débattre sur la base d'informations fiables et partagées, sont des clés efficaces pour construire la confiance entre différents secteurs et différents territoires, pour organiser, notamment à l'échelle des bassins versants, une planification pertinente et intégrée, et pour mettre en œuvre de façon concertée les mesures utiles pour une gestion durable et équitable.

Cet Atlas apporte donc une contribution majeure à l'accélération du niveau d'ambition autour de la GIRE en Afrique en facilitant la mutualisation et l'accès à l'information. Nous espérons qu'il sera un catalyseur de changements positifs en faveur du décloisonnement des connaissances, y compris dans les bassins versants des fleuves, des lacs et des aquifères transnationaux. L'OiEau et le RIOB sont convaincus que ce dialogue, à travers la participation d'acteurs variés, permet de mieux appréhender les défis de l'eau à venir, au bénéfice des populations et de leurs besoins quotidiens.



Dr Eric Tardieu
Directeur Général de l'OiEau,
Secrétaire Général du RIOB

A handwritten signature in black ink, which appears to be 'Tardieu', written over a horizontal line.

L'eau est à la fois une source de vie mais aussi de tensions et de conflits. En tant que ressource naturelle, elle constitue l'un des piliers fondamentaux qui portent la croissance économique du monde. Toutefois, elle représente un risque ou un élément conflictogène qui menace la stabilité dans certaines régions du monde, même si, de façon naturelle, elle peut dessiner les frontières entre des Etats et constituer ainsi leur 1^{er} élément de coopération. A cet effet, l'eau doit être élevée au 1^{er} rang des principaux facteurs de coopération entre les Etats, à travers l'hydrodiplomatie (dans les bassins partagés) et entre les différents usagers pour prévenir les conflits et les risques liés à l'eau.

Dans un contexte où l'eau salée représente 97,5% de toute l'eau sur la planète, où la rareté de l'eau affecte plus de 40% de la population mondiale, où les tensions et les crises liées à l'eau sont classées au 3^{ème} rang des dix principaux risques pour l'économie mondiale, la gestion de l'eau devient un enjeu crucial pour la survie de l'humanité. Aujourd'hui, notre plus grand défis intergénérationnel est, à travers l'ingéniosité humaine, les sciences, l'innovation technologique et le numérique, de développer les stratégies nécessaires pour garantir un accès universel et durable à l'eau sans compromettre celui des générations futures et les besoins des écosystèmes. Ainsi, il est certain que la sécurité alimentaire et l'éradication de la pauvreté en Afrique et dans le monde ne peuvent être garanties sans la sécurité de l'eau et son accès universel. C'est dans cette perspective que l'UNESCO a créé le Programme Hydrologique Intergouvernemental (PHI) en 1975 à la suite de la Décennie Hydrologique internationale (1965-1974). Le PHI est un important programme de coopération intergouvernementale du système des Nations Unies. Il est orienté sur la recherche scientifique et la gestion de l'eau, mais également sur l'éducation et le développement des capacités et des compétences dans le secteur de l'eau.

Relever ce défi, c'est d'abord répondre à un enjeu fondamental, celui du développement des capacités, des connaissances et des innovations dans le secteur de l'eau, notamment en Afrique. C'est tout le sens donné au Pôle Eau Dakar avec son projet de production d'Atlas sur les grandes questions scientifiques sur l'eau en Afrique de l'Ouest et du Centre. En

effet, ce 1^{er} volume de l'Atlas, édité pour le 9^{ème} Forum mondial de l'eau ou *Forum des réponses*, représente, pour les décideurs, les gestionnaires, les élèves, les étudiants, les enseignants et le grand public de manière générale, une source importante d'informations et de connaissances sur les principales thématiques qui structurent la question de l'eau en Afrique de l'Ouest et du Centre. Ainsi, inscrire la production de connaissances, le développement d'outils technologiques et la promotion de l'innovation numérique dans le secteur de l'eau, comme 1^{er} pilier du processus de prise de décision dans la gestion et la planification des ressources, est un gage de sécurité pour garantir la paix et le développement.



Amadou Mahtar MBOW

Ancien Directeur Général de l'UNESCO
Ancien Ministre du gouvernement du Sénégal

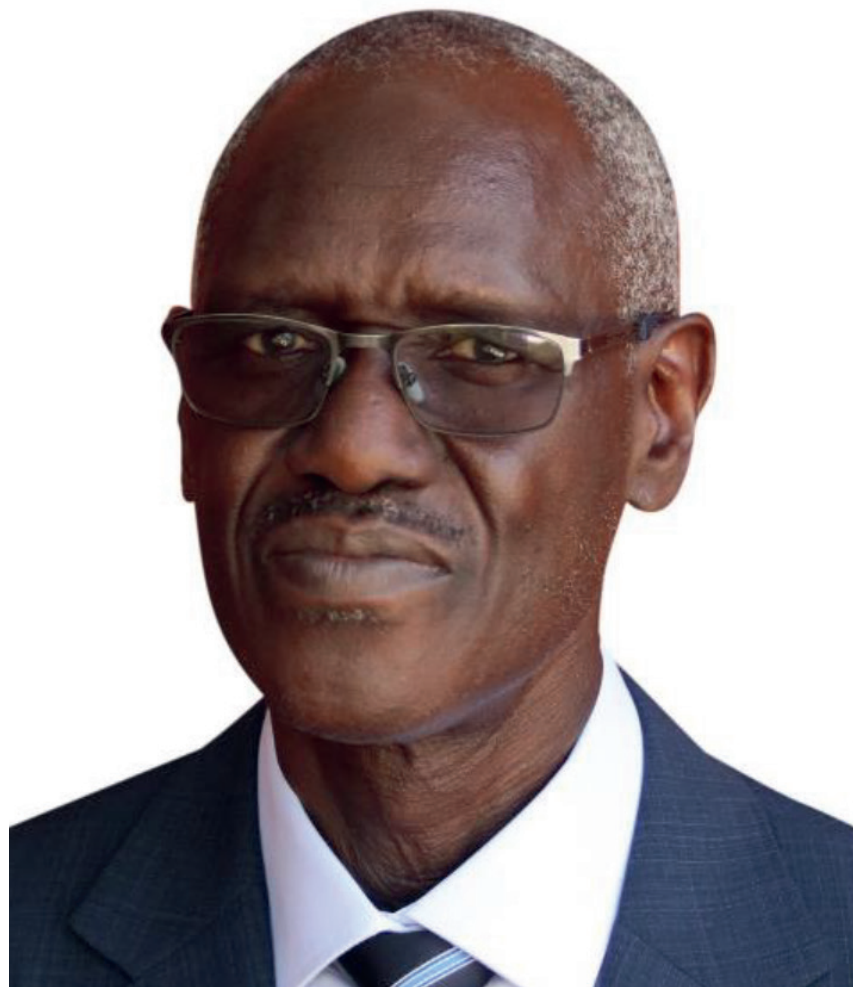
Le Sénégal, pour la première fois, accueille le forum mondial de l'eau, un événement unique qui réunit tous les trois (03) ans depuis 1997, la communauté mondiale de l'eau et les décideurs. Placé sous le signe de Forum des réponses, cette 9^{ème} édition du forum mondial de l'eau se tient à Dakar du 21 au 26 mars 2022, avec comme thème : « la sécurité de l'eau pour la paix et le développement ».

Le thème du forum est articulé autour de quatre (04) mots clés, («Sécurité», «Eau», «Paix», « Développement») qui constituent un enjeu majeur pour l'avenir de l'humanité. Les situations, actuelle et/ou future, de stress hydrique et de pénurie d'eau représentent, dans certaines régions du monde, des facteurs hautement conflictogènes auxquels la communauté mondiale de l'eau et les décideurs doivent accorder une attention toute particulière. Les tensions et les crises liées à l'eau sont classées parmi les trois (03) principaux risques pour l'économie mondiale. La rareté de l'eau affecte plus de 40% de la population mondiale. La réussite des programmes de sécurité alimentaire et de réduction de la pauvreté, passe nécessairement par la sécurité de l'eau. Aujourd'hui, le défi intergénérationnel qui se pose à nous est donc celui de l'accès universel à l'eau pour tous les usagers, comme prévu par l'agenda 2030 du programme des Nations unies portant sur l'ODD6. Toutefois, le contexte de changement climatique et le rythme actuel de la croissance économique mondiale qui entraînent ainsi une augmentation exponentielle des besoins en eau, représentent des contraintes majeures pour atteindre cet objectif de développement durable.

L'avenir de l'humanité et de la biosphère dépendra de nos capacités à gérer l'eau, à assurer sa protection contre toutes les formes de nuisances et de pollutions et à développer une économie circulaire et solidaire autour de l'eau. Ainsi, garantir un accès durable à l'eau pour tous les usages, quel que soit l'échelle considérée (bassin transfrontalier ou niveau local), c'est garantir un climat de paix entre les peuples mais également entre usagers afin de promouvoir une croissance économique durable.

La production de connaissances et le développement des capacités des acteurs de l'eau sont essentiels pour une meilleure gestion et une planification des ressources en eau. C'est tout le sens donné au 3^{ème} pilier du Pôle Eau Dakar, qui vise le décloisonnement des connaissances sur l'eau et des pratiques en matière d'hydro-diplomatie. Ainsi, ce 1^{er} volume de l'Atlas des grandes questions scientifiques sur l'eau en Afrique de l'ouest et du Centre, est une belle contribution de plus de 80 chercheurs et enseignants-chercheurs des universités africaines et d'ailleurs, pour

lancer ce processus et favoriser la coopération interuniversitaire autour de la question de l'eau. Structuré en 9 chapitres, cet atlas fourni aux lecteurs, des connaissances et des outils sur les grands enjeux actuels et futurs de l'eau en Afrique de l'Ouest et du Centre.



Secrétaire Exécutif du 9^{ème} Forum Mondial de l'Eau
Co-Président du Comité International de Pilotage

Zones Humides au Sénégal :

Préserver leurs fonctionnalités pour lutter contre la pauvreté

Les zones humides constituent des réservoirs de haute biodiversité. Elles représentent des écosystèmes aquatiques aux multiples fonctions telles que l'épuration, le ralentissement des écoulements de surface, le stockage d'eau, la disponibilité de l'eau, le développement d'activités génératrices de revenus pour les populations locales, la réduction des risques d'inondation, notamment pour les zones humides en milieu périurbain.

La recherche scientifique et l'innovation technologique et numérique pour le développement des connaissances et le renforcement des capacités des acteurs, jouent un rôle fondamental pour la gestion et la planification des zones humides. C'est ainsi que l'Union internationale pour la conservation de la nature (UICN) a mis en place le réseau des zones humides du Sénégal, dont je suis la coordinatrice nationale.

En tant qu'élément naturel structurant des zones humides, l'eau est au cœur de nos préoccupations à la fois scientifiques mais également politiques, économiques et sociales. L'enjeu majeur est de préserver leurs fonctionnalités afin de conserver leur biodiversité dans un contexte de changement climatique, de raréfaction de la ressource hydrique, de tensions sociales et d'augmentation des besoins socio-économiques. Relever ce défi, c'est lutter contre la pauvreté, car, les zones humides représentent des espaces dans lesquels, se développe toute une économie sociale et solidaire des populations locales et riveraines.

Cette perspective est en lien avec la vision stratégique de l'initiative Pôle Eau Dakar qui est le Réseautage, la Promotion de la coopération, le Développement des connaissances, des capacités et des innovations et les Dynamiques territoriales. Le projet de production d'atlas sur les

grandes questions scientifiques sur l'eau en Afrique de l'Ouest et du Centre du Pôle Eau Dakar est une excellente initiative afin de décloisonner les connaissances pour qu'elles soient au service de la décision politique pour une gouvernance durable et équitable de l'eau et de « ses territoires ».



Dr. Aïssatou Sophie GLADIMA

Ministre du Pétrole et des Energies

Coordinatrice nationale du réseau des zones humides du Sénégal

Cette année a été celle du 9^e forum mondial de l'eau avec comme titre : *La sécurité de l'eau pour la paix et le développement*. Un forum qui s'inscrit dans la dynamique *Blue Peace* entamée en 2010 au Moyen Orient et en Asie centrale. *Blue Peace* a pris une dimension globale avec le lancement en 2015 du *Panel mondial sur l'eau et la paix* ; co-parrainé par quinze pays, dont le Sénégal, et soutenu par le Strategic Foresight Group et le Geneva Water Hub, Secrétariat de ce Panel. Moins de deux ans plus tard, le Panel présente ses recommandations qui sont le premier cadrage stratégique mondial sur l'eau et la paix. Durant ces années, le mouvement *Blue Peace* s'est enrichi de plusieurs initiatives très significatives dont notamment le thème central du 9^e forum mondial, l'inclusion du lien entre l'eau et la paix au Conseil de Sécurité et la création du Pôle Eau Dakar, une structure partenaire de première ligne du Geneva Water Hub. Le Pôle Eau Dakar se profile comme une intelligence analytique sur les questions sensibles liées à l'eau au niveau de l'Afrique de l'Ouest et du Centre.

Ce premier volume de *l'Atlas des grandes questions scientifiques* est élaboré sur la base d'une quarantaine de questions s'inscrivant dans les enjeux majeurs suivants :

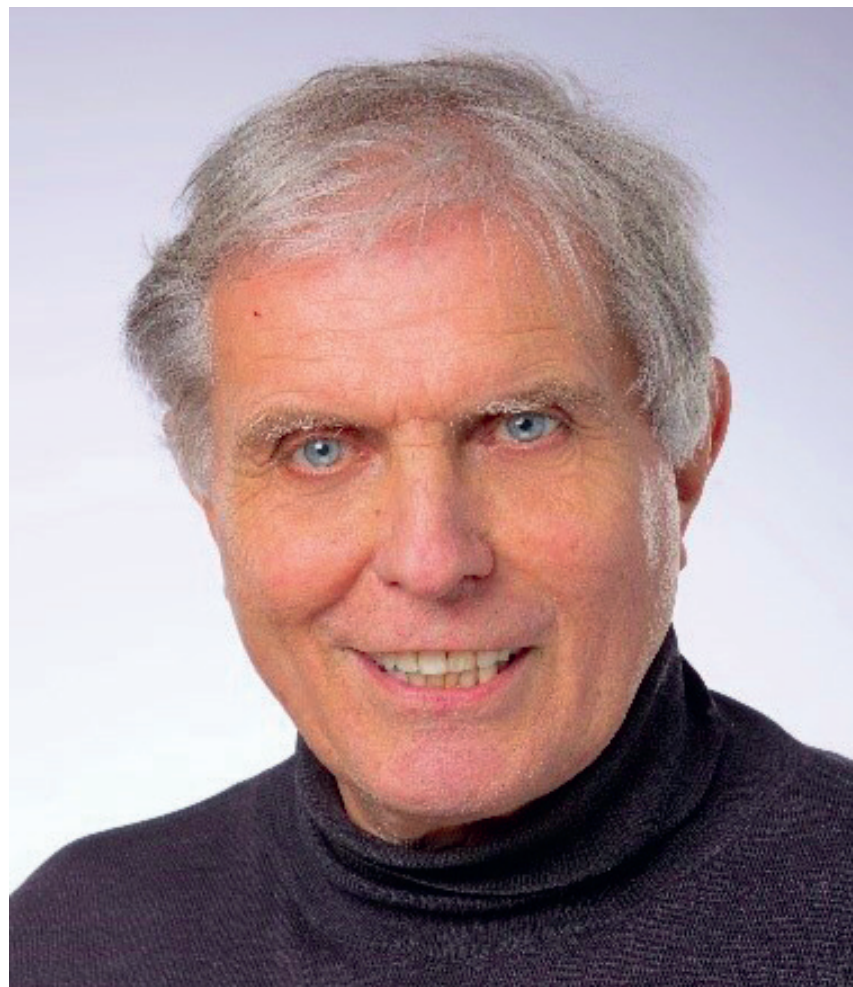
- préserver la paix et la sécurité dans les bassins partagés
- maîtriser l'eau
- prévenir les risques hydrologiques
- préserver la qualité des ressources en eau
- garantir un accès universel à l'eau
- promouvoir une gestion intégrée des ressources en eau

En une année, plus de 80 chercheurs-es, professeurs ou experts-es de terrain ont participé à la rédaction de ce document. Cela démontre la forte capacité intellectuelle et d'engagement scientifique de la région. Cet Atlas est ambitieux et construit sur sept bassins versants transfrontaliers et leurs agences de bassin, une force pour la coopération et la gouvernance de l'eau dans la région. Il couvre 21 pays et une population d'environ 163 millions de personnes.

Dans une période où les crises sanitaire, environnementale et économique mondiales se superposent, où des conflits minent plusieurs régions dont le Sahel et la région du lac Tchad, et dans un cadre multilatéral chahuté, la bonne gouvernance de l'eau et les agences de bassin sont des clés pour un futur viable.

Cet Atlas, conduit par le Dr Issa SAKHO, M. Niokhor NDOUR et Mme Marie Jeanne SENGHOR est une référence et nous sommes d'ores et déjà impatients de lire les prochaines versions.

Bonne lecture



François MÜNGER

Fondateur et ancien Directeur Général du Geneva Water Hub



AVANT PROPOS

Le Pôle Eau Dakar (PED) est une initiative dont la mission principale est de promouvoir l'hydrodiplomatie et la paix dans la sous-région ouest-africaine et au-delà. Pour atteindre cet objectif, le PED veut bâtir un cadre de référence pour favoriser la coopération entre les acteurs de l'eau et le développement de solutions innovantes pour la gestion de la ressource eau. Le PED est rattaché au ministère de l'Eau et de l'Assainissement du Sénégal. La coordination du PED est assurée par la Direction de la Gestion et de la Planification et de la Gestion des Ressources en Eau (DGPRE). Un ensemble d'institutions accompagne le PED depuis son lancement en 2019 parmi lesquelles nous pouvons citer : Geneva Water Hub, l'UICN, la Coopération Suisse, les organismes de bassin du fleuve Sénégal et du fleuve Gambie. En plus, le PED s'appuie sur un fort réseau d'universitaires et de professionnels qui animent les réflexions d'intérêt.

Dans le cadre de sa mission, le PED développe une plateforme de création d'opportunités de collaboration pour le partage et la co-construction des connaissances et d'outils pertinents. Ces connaissances et outils portent sur la recherche et le développement de la coopération et de la diplomatie de l'eau.

Par son engagement pour le développement de cette plateforme, le PED vise à contribuer à l'amélioration des connaissances sur les ressources en eau du Sénégal et au sein des bassins transfrontaliers. Dans cette perspective, le présent Atlas pose les questions majeures qui structurent la problématique de l'eau au niveau local et régional.

Au terme de ce riche processus de travail collaboratif, le Pôle Eau Dakar témoigne sa profonde reconnaissance à l'ensemble des auteurs, contributeurs et partenaires pour leur collaboration et engagement continu. Dans le cadre du forum Mondial de l'Eau qui se tiendra en mars

2022 à Dakar, ce document constitue un produit phare du PED. Nous espérons vivement, ensemble, en réunissant nos efforts et compétences, que nous pourrions continuer notre fructueuse collaboration et faire rayonner le Pôle Eau Dakar au Forum Mondial de l'eau et au-delà.



M. Niokhor NDOUR
Directeur DGPRE, Sénégal
Coordinateur PED



RESUME EXECUTIF

Les différents volumes prévus pour l'Atlas des grandes questions scientifiques sur l'eau en Afrique de l'Ouest et du Centre s'inscrivent dans le cadre du développement des capacités, des connaissances et des innovations pour répondre au pilier 3 du Pôle Eau Dakar (PED). Ce pilier, animé par des experts académiques et professionnels de haut niveau, se veut être un véritable laboratoire d'idées et de productions scientifiques « *un Think-Tank* » au service du développement. L'ambition est de créer un ancrage régional de référence avec une portée internationale. Il constitue ainsi, un pilier essentiel qui va alimenter le processus de mise en œuvre des 3 autres piliers stratégiques du Pôle Eau Dakar.

Ce premier volume de l'Atlas est un recueil de contributions d'auteurs mettant ainsi à la disposition du lecteur, des connaissances sur les grandes thématiques sur l'eau en Afrique de l'Ouest et du Centre : Hydrosystèmes, Eau, Climat et Changement climatique, Grandes infrastructures hydrauliques en Afrique de l'Ouest et leurs Impacts sur les eaux de surface, Gouvernance de l'eau et Développement, Alimentation en eau potable dans les grandes agglomérations africaines (exemple de Dakar), Résilience, Risques et Maladies liés à l'eau, Qualité de l'eau, Techniques de traitements des eaux polluées, Monitoring des eaux de surface à partir de l'altimétrie spatiale et en fin l'intégration du digital dans le management de l'eau. Ce volume de l'atlas lance ainsi, le processus de production de connaissances et de développement d'outils innovants qui seront à la base de la formulation de politiques de gestion et de planification des ressources en eau dans une perspective d'un accès universel et durable à l'eau pour garantir sa protection, sa sécurité et la paix entre les usagers.

EXECUTIVE SUMMARY

The different volumes planned for the Atlas of the major scientific questions on water in West and Central Africa are part of the development of capacities, knowledge and innovations in response to Pillar 3 of the Pôle Eau Dakar (PED). This pillar, animated by high-level academic and professional experts, aims to be a great laboratory of ideas and scientific productions «*Think-Tank*» at the service of development. The ambition is to create a regional anchor of reference with an international scope. It is an essential pillar that will feed the implementation process of the other 3 strategic pillars of the Pôle Eau Dakar.

This first volume of the Atlas is a collection of authors' contributions that provide the reader with knowledge on the major water issues in West and Central Africa: Hydrosystems, Water, Climate and Climate Change, Major Hydraulic Infrastructures in West Africa and their Impacts on Surface Waters, Water Governance and Development, Drinking Water Supply in Large African Cities (example of Dakar), Resilience, Water-related Risks and Diseases, Water Quality, Treatment Techniques of Polluted Waters, Monitoring of Surface Waters from Spatial Altimetry and finally the integration of digital in water management. This volume of the atlas launches the process of knowledge production and development of innovative tools that will be the basis for the formulation of management policies and planning of water resources in a perspective of universal and sustainable access to water to ensure its protection, security and peace among users.

« Nous ne saisissons pas la valeur de
l'eau tant que le puits ne s'est pas asséché. »

(Thomas Fuller, Gnomologia, 1732).

INTRODUCTION

L'eau est la première ressource naturelle indispensable à la vie. Le développement durable des sociétés humaines et la viabilité des écosystèmes terrestres et marins-côtières en dépendent. Ainsi, la compréhension du cycle de l'eau, à différente échelle spatiale et temporelle, sa gestion, sa protection contre toutes formes de pollution et son accès universel à tous, sont inscrits comme des enjeux de 1^{er} ordre pour la survie de l'humanité. Toutefois, le contexte actuel de course effrénée pour les besoins de développement socio-économique se traduit par une augmentation des gaz à effet de serre dans l'atmosphère, participant ainsi au dérèglement climatique. Endommager l'atmosphère et modifier le climat, c'est bouleverser l'équilibre naturel du cycle de l'eau et s'autodétruire. Cela se traduirait par plus de sécheresse, plus d'inondations, plus de réfugiés climatiques, plus de maladies hydriques, plus de pauvreté.

La sécurité de l'eau pour la paix et le développement est l'un des plus grands défis de notre génération et de celle future. La rareté de l'eau affecte plus de 40 % de la population mondiale. Les tensions et les crises liées à l'eau sont classées au 3^{ème} rang des dix principaux risques pour l'économie mondiale. Ainsi, cette situation nous pose un grand défi à relever pour l'humanité : l'accès universel à l'eau, qui est d'ailleurs inscrit comme Objectif de Développement Durable (ODD6) dans l'agenda 2030 des Nations Unies.

Dans une situation d'avenir incertain du système climatique mondial, la question du changement climatique et ses impacts sur les ressources en eau, les sociétés et les écosystèmes font l'objet d'une attention particulière au niveau économique, politique et scientifique. Au cours des 60 dernières années, certaines régions africaines (Afrique de l'Ouest, Afrique de l'Est,...) sont particulièrement touchées par des déficits pluviométriques sans précédent.

Les ressources en eau sont les plus affectées par cette variabilité hydro-climatique caractérisée par des étiages sévères et des déficits d'écoulement importants (une baisse de plus de 50% du débit du fleuve Sénégal à Bakel), un tarissement plus rapide des cours d'eau, des déficits de recharge des nappes et une baisse des niveaux piézométriques de plus en plus importants, etc. En effet, dans ces régions déjà fragilisées par le changement climatique, la question de l'eau est cruciale sur tous les aspects liés au développement économique, aux conflits, aux migrations, à la coopération, au dialogue, à la préservation des écosystèmes et à la conservation de la biodiversité pour la survie de l'humanité.

Parmi les nombreuses questions que suscitent les ressources en eau, celles de sa protection et de sa gestion durable se posent avec acuité, notamment dans les bassins partagés (échelle régionale et locale). La gestion de l'eau s'appréhende, au niveau national, à travers des cadres politique, juridique et institutionnel, liés donc à la souveraineté des États par rapport à leur territoire et leurs ressources. Toutefois, dans le cadre des cours d'eau internationaux, dont les ressources sont partagées ou appartiennent aux États transfrontaliers, la dimension de la souveraineté des États devient complexe. Les relations entre les États, les ressources en eau et les acteurs font appel à un cadre de concertation, de dialogue et de coopération pour préserver la paix, garantir un accès à l'eau pour tous les usages et promouvoir ainsi le développement durable des sociétés. C'est d'ailleurs, tout le sens qui est donné au 9^e Forum mondial de l'Eau Dakar 2022 ou le Forum des réponses avec comme thématique centrale : la sécurité de l'eau pour la paix et le développement. Etant donné l'importance des ressources en eau pour les populations et la croissance économique de l'Afrique : (i) plus de 64% de la population africaine est rurale (World Bank 2008), (ii) 95% des terres agricoles d'Afrique dépendent de l'agriculture pluviale (Wani et al. 2009), (iii) en Afrique Occidentale, 80% des emplois sont dans le secteur agricole (Barry et al. 2008), des apports réguliers d'eaux de pluie sont donc essentiels pour l'économie de ces pays. Ainsi, l'amélioration des niveaux de connaissances sur les ressources en eau est fondamentale pour accompagner le processus décisionnel dans le cadre d'une planification et d'une gestion durable de l'eau. Il s'agit, pour éviter les conflits, de promouvoir l'accès à l'eau pour tous les usages. En effet, la mise à l'échelle des connaissances sur la ressource, du dialogue et de la concertation dans sa gestion, permet de désamorcer les facteurs conflictogènes et les risques et catastrophes liés à l'eau : intensification des pénuries d'eau, stress hydrique, conditions de vie économique peu viables en milieu rural, explosion de la demande en eau dans les villes suite à une urbanisation incontrôlée et/ou peu planifiée, compétition autour de la ressource....

Le présent volume 1 de l'atlas, sur les grandes questions scientifiques de l'eau en Afrique de l'Ouest et du Centre, est le début du processus de réponses à l'objectif majeur du décloisonnement des connaissances afin qu'elles soient le pilier fondamental sur lequel repose le processus politique de prise de décision dans le cadre d'une gestion et d'une planification durables des ressources en eau et des territoires de l'eau. Les connaissances ciblent les grands enjeux suivants :

- accès universel à l'eau ;
- sécurité de l'eau, en particulier dans les bassins partagés à travers l'hydrodiplomatie et la coopération autour de l'eau ;
- maîtrise de l'eau pour le développement local ;
- disponibilité de l'eau pour les écosystèmes ;
- prévention des risques hydrologiques ;
- préservation de la qualité de l'eau ;
- intégration de l'intelligence artificielle et du digital dans le management de l'eau.

L'atlas est structuré en neuf (09) chapitres :

- Chapitre 1 : Hydrosystèmes, Eau, Climat et Changement climatique ;
- Chapitre 2 : Grands barrages en Afrique de l'Ouest & Impacts ;

- Chapitre 3 : Gouvernance de l'eau & Développement ;
- Chapitre 4 : Eau : Ressources, Risques et Résilience ;
- Chapitre 5 : Qualité de l'eau ;
- Chapitre 6 : Maladies liées à l'eau ;
- Chapitre 7 : Traitement de l'eau ;
- Chapitre 8 : Utilisation de l'altimétrie spatiale pour le monitoring des eaux de surface ;
- Chapitre 9 : Management digital de l'eau.



INTRODUCTION

Water is a vital resource that underlies the sustainable development of human societies, terrestrial and marine/coastal ecosystems. In this respect, understanding the water cycle's spatio-temporal variabilities, water resources management, conservation against pollution, and ensuring universal water supply are crucial development challenges for humanity. However, the fierce competition for socio-economic development dramatically increases greenhouse gases emission into the atmosphere resulting in significant disturbances of the Earth system, including climate change. Harming the atmosphere, modifying climate dynamics, is disturbing the natural equilibrium of the water cycle. These disruptions could increase the frequency and intensity of extreme hydroclimatic events such as droughts and floods, resulting in more water-borne diseases, poverty, and climatic refugees/migrations. With this in mind and the uncertainty of Earth climate evolution, climate change and its associated impacts on water resources, societies and ecosystems are key research, economic and political stakes that have been being investigated over the past 60 years. For instance, unprecedented/extraordinary rainfall deficits have been observed in West, Central and Eastern Africa. This hydroclimatic variability significantly affects water resources with extremely low water levels, severe deficits of discharge (greater than 50% of the Senegal river discharge in Bakel), fast-drying river networks, groundwater recharges deficits, lower hydraulic heads (...). In such regions sensitive to climate change, water is a crucial resource closely linked to economic development, conflicts, migrations, but also to cooperation and discussions to protect and conserve ecosystems biodiversity for humanity.

Among the numerous questions around water resources, conservation and sustainable management policies are key challenges, particularly in transboundary hydrosystems/watersheds (local and regional scales). Water management connects regional, national, and local scales through political, legal, and institutional frames questioning governments' sovereignty and territorial/resources control. Nevertheless, in cross-border hydrosheds, governments' sovereignty remains a complex situation, despite co-management policies or agreements with the neighbouring countries. Consequently, water resources management and inter-governmental diplomacy/relationships require a particular frame for concertation/cooperation to preserve peace, guarantee water access for all purposes in order to promote/achieve sustainable development of local communities. This is why this 9th World Water Forum – Dakar 2022, so-called the *"Forum of responses"*, focuses on water security for peace and development.

Frequent rainfalls are essential for economic growth in Africa where: (i) more than 64% of the African population lives in rural areas (World Bank 2008), (ii) 95% of agricultural lands in Africa depend on rainfalls (Wani *et al.* 2009), (iii), 80% of the employment comes from farming in West Africa. A better understanding of water resources is crucial to support decision-making, avoid conflicts and develop sustainable water management plans. Disseminating knowledge, encouraging discussions, and concertation could mitigate conflict, reduce water-related hazards like shortages, hydric stress, vulnerable living conditions in rural areas, and exploding urban water demand induced by a poorly-controlled or poorly-managed competition for water supply ...

This first Atlas volume on the Great research questions on water resources in West and Central Africa is the starting point of our main goal: breaking knowledge boundaries to support decision-making for sustainable planning and management of both territories and water resources. Results / Knowledge target the key challenges listed below:

- Universal access to water
- Water security, particularly in transboundary watersheds through hydrodiplomacy and cooperation around water-related challenges
- Water control for local development
- Water availability for ecosystems
- Water-related hazards prevention / Water-related risks reduction
- Water quality conservation
- Technology-based tools for digital water management

The Atlas is organized into nine (09) chapters:

- Chapter 1: Hydrosystems, Water, Climate and Climate change;
- Chapter 2: Great Dams in West Africa & Impacts;
- Chapter 3: Water governance & development;
- Chapter 4: Water: Resources, Risks and Resilience;
- Chapter 5: Water quality;
- Chapter 6: Water-borne diseases;
- Chapter 7: Water treatment;
- Chapter 8: The use of spatial altimetry for water monitoring;
- Chapter 9: Digital water management.



QUELQUES CHIFFRES INQUIÉTANTS DE LA PLANÈTE BLEUE :

- Volume total d'eau sur la planète : 1,4 milliard de km³ ;
- 97,5% de cette eau est salée ;
- Sur les 2,5% d'eau douce, 68,9% sont stockés à l'état solide dans les calottes glaciaires et les couvertures neigeuses permanentes ;
- 30,8% sont stockés dans les réserves souterraines, les sols, les marécages et les pergélisols ;
- En surface, l'eau douce ne représente que 0,3%. Elle concerne les rivières, les réservoirs et les lacs ;
- L'eau utilisable par la biosphère ou celle accessible à l'homme représente 1% du volume d'eau douce et 0,01% de toute l'eau sur la planète bleue.

(Diop et Rekacewicz, 2003)

Pour citer chaque article de l'Atlas :

Nom des auteurs. 2022. Titre de l'article. N° de chapitre, in Atlas des grandes questions scientifiques sur l'eau en Afrique de l'Ouest et du Centre. Editions PED, ISBN 9 7824 94 16 1009, Dakar, 199 pages.

Exemple de l'article de Diakhaté et al.

Diakhaté, M., Sow, M., Dieng, A.L., Gaye, A.T. 2022. Climat actuel et futur en Afrique de l'Ouest à l'échelle du cycle saisonnier. Chapitre 1, in Atlas des grandes questions scientifiques sur l'eau en Afrique de l'Ouest et du Centre. Editions PED, ISBN 9 7824 94 16 1009, Dakar, 199 pages.



CHAPITRE 1

HYDROSYSTEMES, EAU, CLIMAT & CHANGEMENT CLIMATIQUE

CLIMAT ACTUEL ET FUTUR EN AFRIQUE DE L'OUEST À L'ÉCHELLE DU CYCLE SAISONNIER

Moussa Diakhaté^{1,2*}, Magatte Sow², Abdou Lahat Dieng², Amadou T. Gaye²

¹ LMR Sciences, Technologies Avancées et Développement Durable (UMR STADD), Université Amadou Mahtar MBOW de Dakar à Diamniadio, Sénégal

² Laboratoire de Physique de l'Atmosphère et de l'Océan - Siméon Fongang (LPAO-SF), École Supérieure Polytechnique (ESP), Université Cheikh Anta Diop, Dakar, Sénégal.

* corresponding author : moussa.diakhate@uam.edu.sn

1. Introduction

Les ressources en eau sont fortement dépendantes du climat. Les pays d'Afrique de l'Ouest, particulièrement du Sahel, ont connu dans les années 1970 une grande période de sécheresse dont les conséquences sur la ressource en eau, ont largement contribué au retard de son développement (Giannini et al., 2003, 2013, Sylla et al., 2010). Ainsi, la compréhension de la variabilité naturelle et anthropogénique du climat actuel et des changements futurs est fondamentale pour promouvoir une meilleure planification des politiques de gestion et d'accès durable à l'eau. L'objectif de cet article est de présenter une synthèse de quelques résultats phares qui ont été produits sur le climat actuel et futur en Afrique de l'Ouest au cours de cette dernière décennie. L'échelle d'analyse est celle du cycle saisonnier.

2. La mousson d'Afrique de l'Ouest

Le fonctionnement de la mousson d'Afrique de l'Ouest repose sur un système d'interactions entre l'océan, le continent et l'atmosphère. Ces interactions très complexes, définissent la variabilité de la mousson, phénomène climatique responsable de la saison pluvieuse en Afrique de l'Ouest (Figure 1). Par ailleurs, l'économie des pays de l'Afrique de l'Ouest, fortement liée au secteur primaire, est contrôlée, en partie, par ces modes de variabilité de la mousson. L'avènement d'une longue période de sécheresse, comme celle des décennies 1970 et 1980, entraîne des conséquences dramatiques : une forte réduction de la production agricole, principalement pour l'agriculture familiale, le tarissement précoce des plans d'eau de surface et des rivières, une baisse importante, voire même une absence totale de la recharge des nappes phréatiques, une accentuation du déficit d'accès à l'eau, pouvant se traduire par des conflits d'usages, une forte diminution des ressources fourragères qui se traduit par le développement de la transhumance, une baisse de la production de lait, des conflits entre agriculteurs et éleveurs et une accentuation de la pauvreté.

Toutes ces conséquences sont des contraintes majeures dans une politique de réduction de la pauvreté, une dimension inscrite comme axe prioritaire dans les agendas du programme des Nations Unies, comme les ODD (Objectifs de Développement Durable).

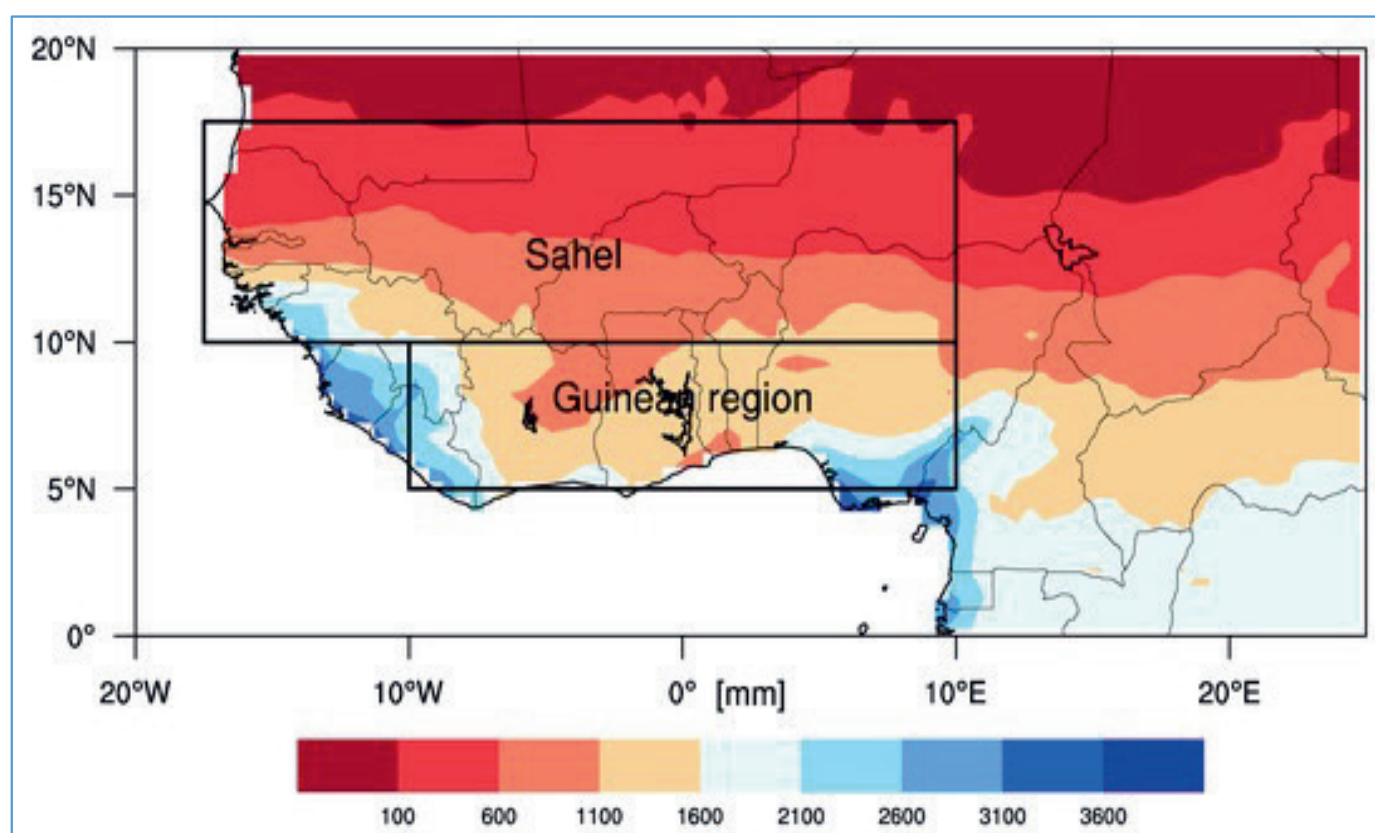


Figure 1 : Pluviosité moyenne annuelle climatologique (mm/an) sur la période 1985-2004 sur l'Afrique de l'Ouest (en utilisant les données du CHIRPS).

Les cases noires soulignent les sous-régions du Sahe Ouestl et la région guinéenne (Sow et al. 2020).

2.1 Evolution du cycle saisonnier dans le climat actuel de la mousson

L'Afrique de l'Ouest est constituée de deux zones climatiques principales avec des régimes de pluies différents : la zone du Sahel et celle du Golfe de Guinée (Figure 1). Le Sahel est marqué par une seule saison des pluies avec un pic des précipitations en Aout ou Septembre. Ce type de cycle est par ailleurs appelé cycle uni modal. Par ailleurs, la zone Guinéenne, est caractérisée par un cycle bimodal avec un premier pic en Juin et un 2nd en Septembre. La figure 2 ci-dessous présente des diagrammes latitudes-temps (ou diagrammes de Hovmöller) des moyennes mensuelles climatologiques des précipitations moyennées sur la bande de longitude 10 degrés Ouest et 10 degrés Est. Ces diagrammes de Hovmöller mettent en évidence le saut de mousson et l'évolution du cycle saisonnier des précipitations dans les observations et les simulations climatiques.

Sow et al., (2020) sont revenus largement sur le cycle saisonnier des indices climatiques en Afrique de l'Ouest. Ils ont aussi cherché à analyser les incertitudes (sur les amplitudes, moments, durées) associées aux modèles climatiques CMIP5. En effet, les modèles sont de qualité différente selon les paramètres à représenter (précipitations, températures, vents, extrêmes ...) ainsi que l'échelle temporelle. Un certain nombre d'outils objectifs ont été proposés pour évaluer la qualité des modèles.

Dans cette étude, ils se sont focalisés sur les indices climatiques en relation avec l'agriculture, tels que, les jours pluvieux, les séquences sèches, les précipitations extrêmes, les dates de démarrage et de fin de la saison des pluies, entre autres. Les données journalières de pluies de quinze simulations CMIP5, et des observations satellites ont été utilisées. Les régions Sahélienne et Guinéenne ont été étudiées séparément.

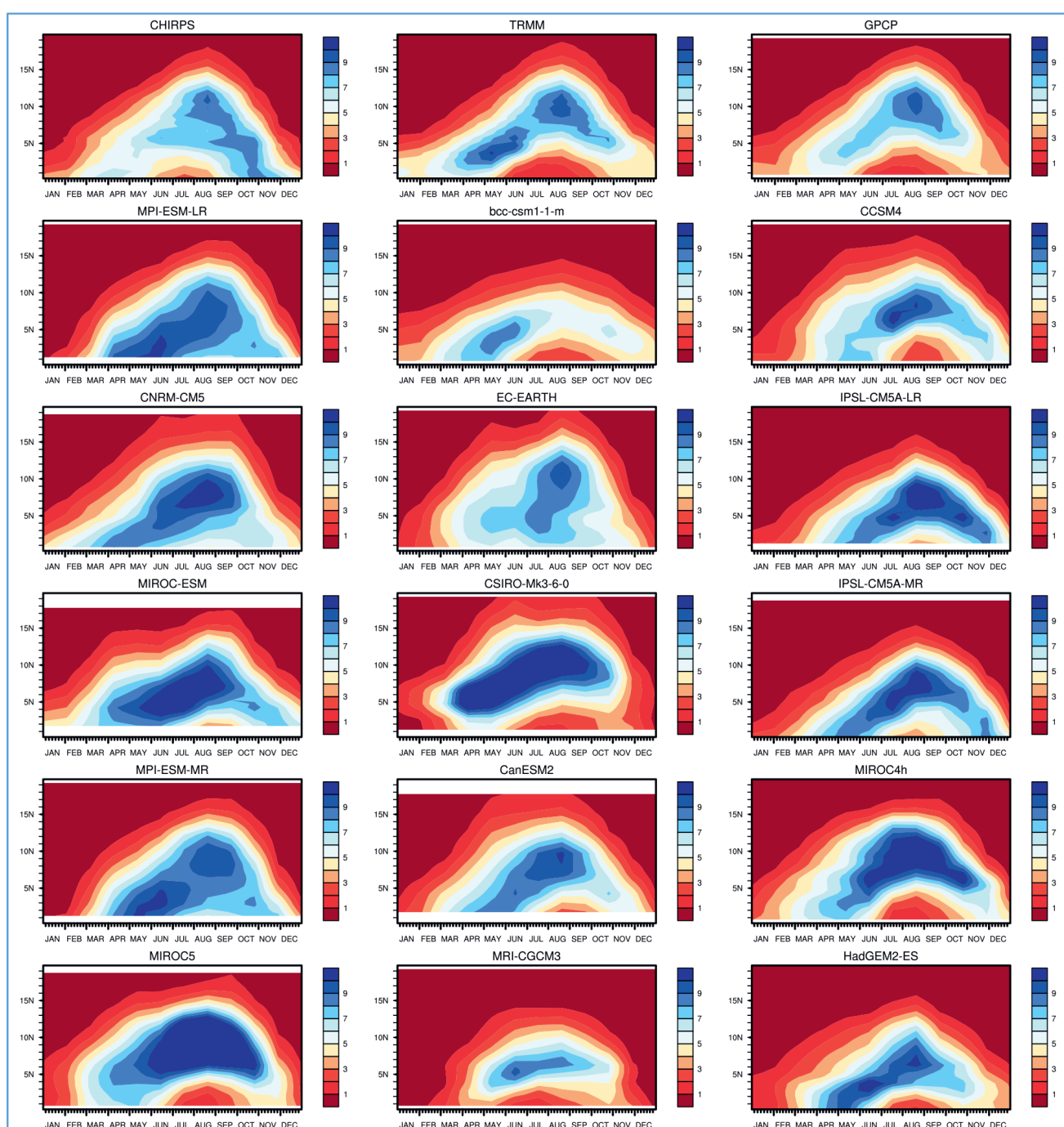


Figure 2 : Diagrammes de Hovmuller des précipitations mensuelles moyennées sur 20W-25E pour CHIRPS, TRMM et GPCP (première ligne) et 15 sorties CMIP5 (Sow et al. 2020).

Les auteurs ont remarqué que si sur le Sahel, le cycle annuel des précipitations est pratiquement bien représenté par les modèles (Figure 2), sur la

zone Guinéenne, seulement 20% des simulations utilisées arrivent à représenter les deux pics saisonniers. 40% représentent uniquement le pic du mois de Juin et 40% le second pic de Septembre. Une très forte incertitude sur l'amplitude des précipitations totales a aussi été notée sur les deux zones (Figure 2). Dans la zone Guinéenne, elle provient majoritairement de l'intensité des événements, alors qu'au Sahel, elle est partagée entre l'intensité et l'occurrence des événements pluvieux.

A l'exception des séquences humides de plus de cinq jours, de très faibles incertitudes sont observées sur les séquences sèches et l'occurrence de jours très pluvieux. Enfin, les modèles fournissent généralement des dates d'apparition trop précoces et tardives respectivement, sur le Sahel et sur la région Guinéenne. Ils surestiment aussi les précipitations pendant les phases précoces et tardives de la mousson. Ces incertitudes sont fortement couplées aux erreurs de position latitudinale de la Zone de Convergence Inter-Tropicale (ZCIT) et ne se compensent pas à l'échelle annuelle ou en considérant l'Afrique de l'Ouest dans son ensemble (Figure 3).

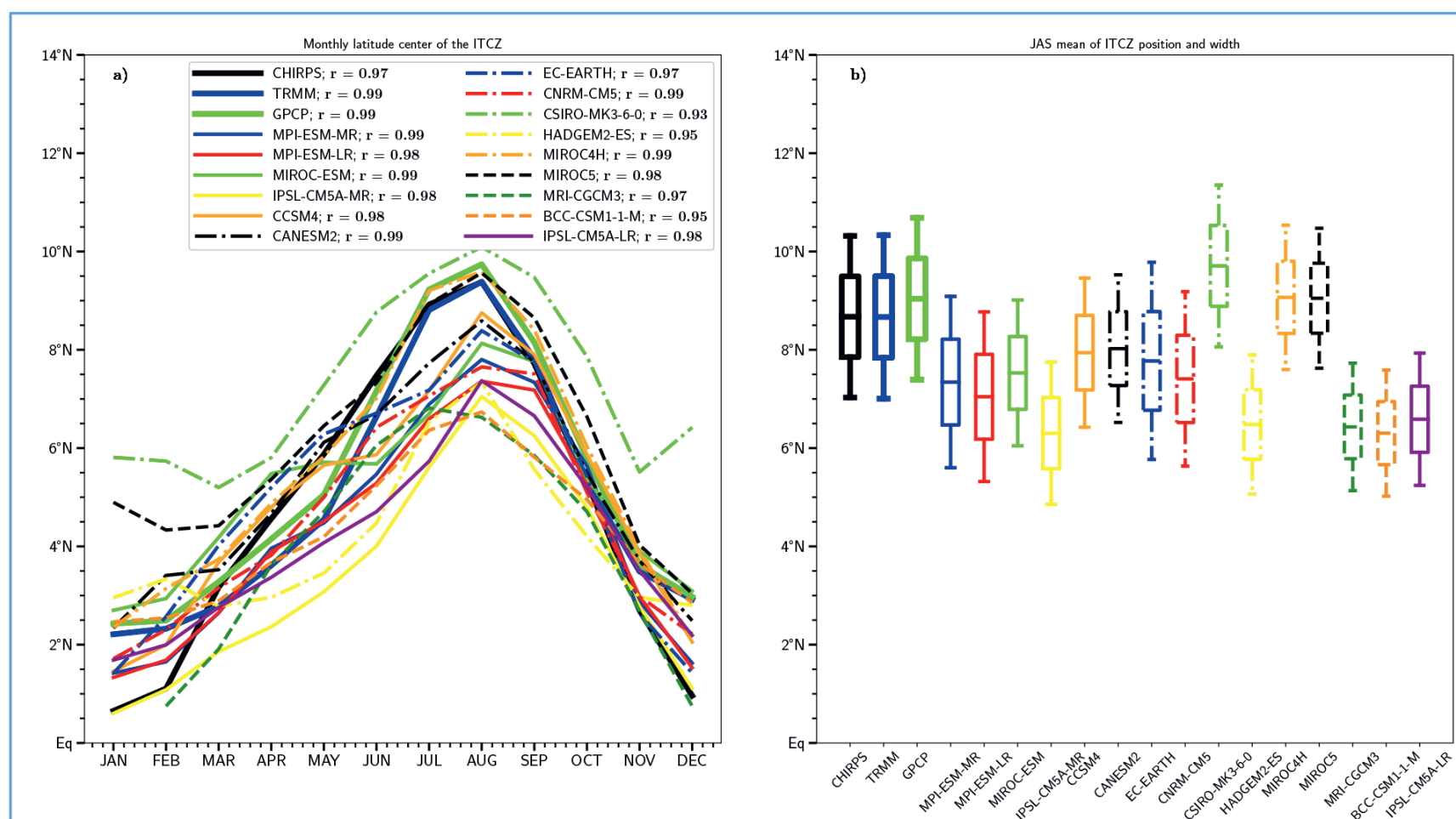


Figure 3 : Moyenne mensuelle de la latitude du centre de la ZCIT sur l'Afrique de l'Ouest (a) et moyenne JAS de la latitude du centre et de la largeur de la ZCIT (b). Les r dans la légende indiquent la corrélation entre les précipitations moyennes mensuelles et la latitude du centre de la ZCIT. Pour chaque diagramme en boîte, la distance du minimum au maximum représente la largeur et la médiane est la position de la ZCIT.

2.2. Evolution future

La réponse du cycle annuel des événements de précipitations journalières de haute intensité sur l'Afrique de l'Ouest aux gaz à effet de serre anthropiques a été étudiée par Sylla et al. (2015). Ces derniers ont utilisé des modèles climatiques régionaux à haute résolution. Ils concluent que les changements projetés à la fin du XXI^e siècle montrent un retard de la saison de la mousson, en accord avec les études précédentes. En outre, ils montrent aussi que ces projections indiquent une diminution significative et dominante de la fréquence et une augmentation de l'intensité des événements extrêmes de pluies journalières. Ces changements sont plus marqués dans les phases de pré-mousson, et ils sont plus prononcés sur le Sahel que sur le Golfe de Guinée (Figure 4). Cette situation est due à la présence d'une convergence d'humidité plus forte dans la couche limite qui soutient les précipitations intenses une fois que la convection est initiée.

La période de la pré-mousson connaît les plus grands changements dans les statistiques des précipitations journalières. Ainsi, il existe un fort risque de sécheresse associé à une diminution des précipitations moyennes et de la fréquence des jours humides. Il est noté également qu'un risque accru d'inondation associé à l'augmentation des événements extrêmes de pluies est aussi attendu. Ces deux caractéristiques peuvent produire des stress sur des secteurs importants tels que l'agriculture et les ressources en eau à une période de l'année (par exemple, le début de la mousson) où ces stress peuvent avoir des impacts considérables.

Les résultats montrent donc l'importance d'analyser les changements des caractéristiques des précipitations en fonction des cycles saisonniers et intra-

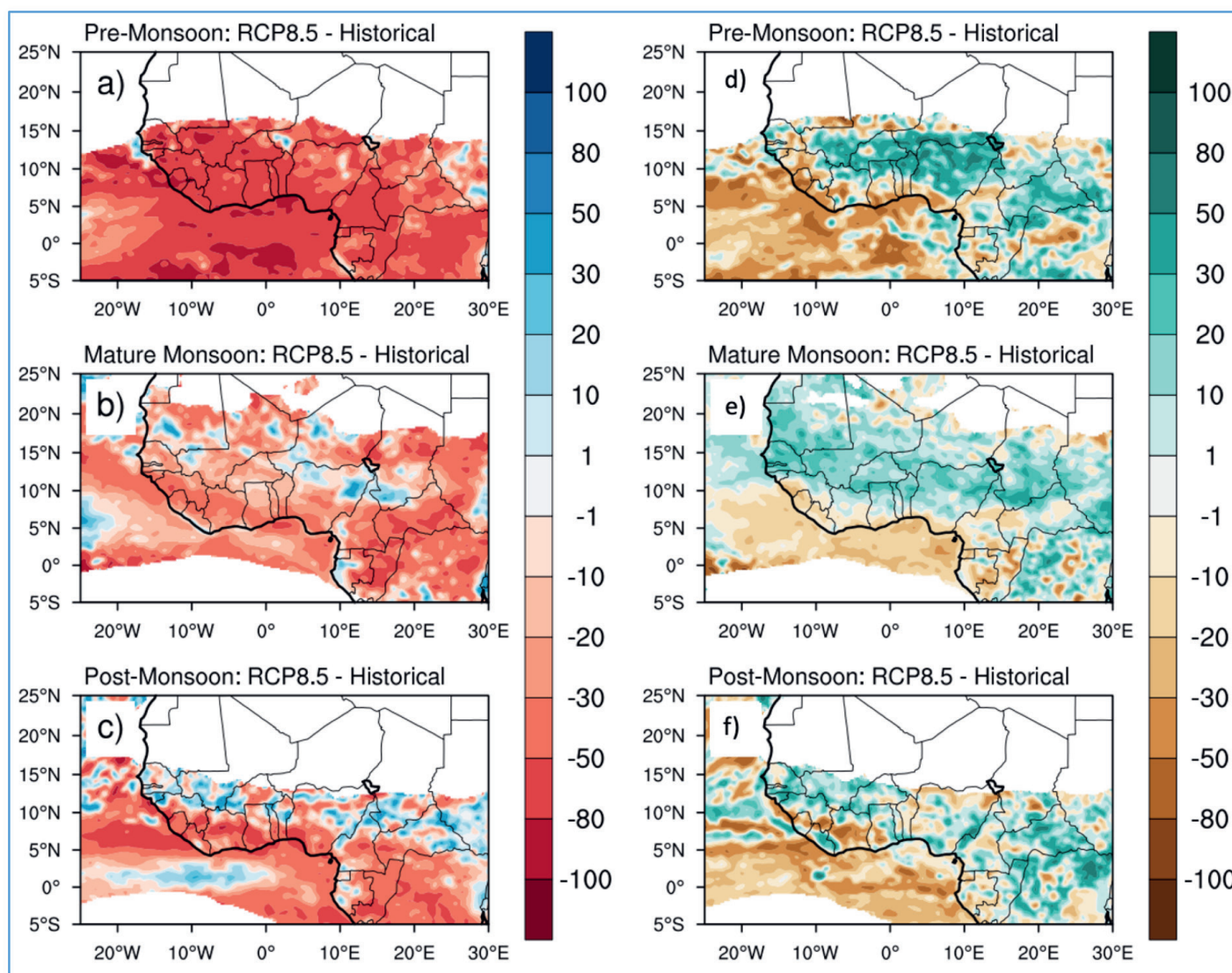


Figure 4 : Changements moyens (RCP8.5 moins les valeurs historiques en pourcentage) dans l'occurrence (gauche) et l'intensité (droite) des événements extrêmes de pluies sur l'Afrique de l'Ouest pendant les périodes suivantes : (a,d) pré-mousson (avril-juin); (b,e) pic de mousson (juillet-septembre); et (c,f) post-mousson (octobre-décembre). (source : Sylla et al. 2015).

3. A retenir

- Dans la représentation du cycle saisonnier des précipitations, les modèles climatiques montrent des incertitudes aussi bien sur l'amplitude des cumuls journaliers de précipitations que sur leurs évolutions temporelles ;
- Sur le Sahel : ces incertitudes sont plus marquées sur l'amplitude que sur l'évolution temporelle, et elles s'embtent provenir de façon partagée entre l'intensité et la fréquence des jours pluvieux ;
- Sur la zone guinéenne : en plus de l'incertitude sur l'amplitude, l'évolution temporelle est très difficile à reproduire correctement par les modèles ;
- Ces incertitudes sont fortement couplées aux erreurs de positionnement latitudinale de la ZCIT. Ainsi, dans les études d'impacts, il est nécessaire de considérer un ensemble de simulations élevées et/ou corrigées ;
- Pour les changements futurs, la projection des cumuls de précipitation montre un retard global de la mousson ;
- Sur l'ensemble de la saison, la période de la pré-mousson (Avril-Juin) est la période la plus marquée par les changements liés au changement climatique ;
- Un fort risque de sécheresse associé à une diminution des précipitations moyennes et de la fréquence des jours humides et un risque accru d'inondation associé à l'augmentation des événements extrêmes de pluies sont attendus. Ce qui peut produire des stress importants sur des secteurs importants tels que l'agriculture et les ressources en eau.

4. Perspectives de recherche

- Reprendre ces analyses avec les CMIP6 et avec les nouveaux scénarios SSP qui intègrent plus la dimension sociale que les RCP.
- Mettre en place une base de données de simulations CMIP6 corrigées prêtes à être utilisées dans les études d'impacts en hydrologie, santé, agriculture, etc.

5. Références bibliographiques

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(2), 024010.

Giannini, A., Saravanan, R., & Chang, P. (2003). Oceanic forcing of Sahel rainfall on interannual to interdecadal time scale. *Science*, 302, 1027–1030.

Sow, M., Diakhaté, M., Dixon, R. D., Guichard, F., Dieng, D., & Gaye, A. T. (2020). Uncertainties in the annual cycle of rainfall characteristics over West Africa in CMIP5 models. *Atmosphere*, 11(2), 216. <https://doi.org/10.3390/atmos11020216>.

Sylla M.B., Giorgi F., Pal J.S., Gibba P., Kebe I., Nikiema M. (2015). Projected changes in the annual cycle of high intensity precipitation events over West Africa for the late 21st century. *J. Clim.* 28:6475–6488. doi:[10.1175/JCLI-D-14-00854.1](https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00854.1)

Sylla M.B., Gaye A.T., Jenkins G.S., Pal J.S., Giorgi F. (2010). Consistency of projected drought over the Sahel with changes in the monsoon circulation and extremes in a regional climate model projections. *J. Geophys Res Atmos* 115:D16108. doi:[10.1029/2009JD012983](https://doi.org/10.1029/2009JD012983)

EVOLUTION FUTURE DES TEMPÉRATURES ET DES PRÉCIPITATIONS AU SÉNÉGAL

Youssouph SANE ^{1*}, Issa SAKHO ², Benjamin SULTAN ³

^{1*} Service Climat et Projections climatiques, Agence Nationale de l'Aviation Civile et de la Météorologie, Dakar, Sénégal.

² UMR Sciences, Technologies Avancées et Développement Durable, Université Amadou Mahtar MBOW de Dakar, Sénégal.

³ IRD, LOCEAN, Université Pierre et Marie Curie, Tour 45/55, 4 Place Jussieu, 75252 Paris cedex 05.

* Corresponding author : youssouph@gmail.com

1. Introduction

Le climat change et ses conséquences sur les sociétés, sur l'environnement et sur les écosystèmes sont visibles. L'augmentation constante des températures et l'élévation du niveau moyen de la mer au cours des 100 dernières années en sont de parfaites illustrations. Globalement, la trajectoire actuelle de l'économie mondiale entretient une augmentation des gaz à effet de serre dans l'atmosphère. L'avenir du climat global dépend de nos options de développement pour atténuer les émissions de gaz à effet de serre.

En Afrique de l'Ouest, un réchauffement d'environ 1,1 °C est observé depuis 1950 et de 2,1 °C par rapport au climat préindustriel de 1850 (Taylor et al., 2018).

Ainsi, l'objectif de cet article est de présenter des résultats sur l'évolution future des températures et des précipitations à l'échelle du Sénégal. Ces résultats sont accessibles sur le géo portail Changement Climatique de l'ANACIM qui vise à distribuer les projections climatiques en Afrique de façon intelligible, à travers des cartes et des diagrammes temporels (<http://geoportail.anacim.sn:8000/climap/proj/>).

2. Quelques résultats sur le Sénégal :

2.1. Présentation du géoportail

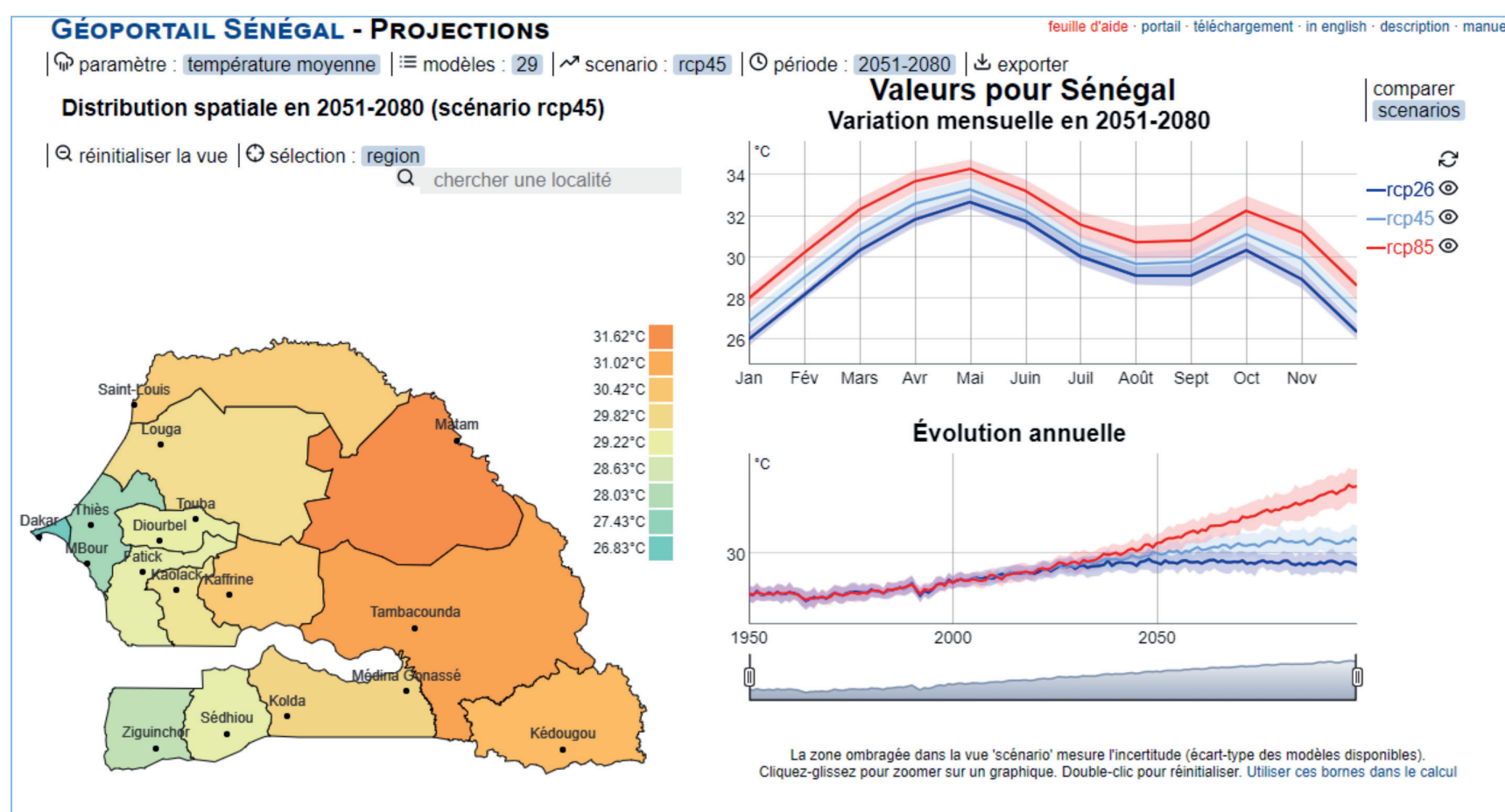


Figure 1. Aperçu du géoportail

2.2. Evolution future de la température moyenne

2.2.1. Distribution spatiale avec le rcp 4.5

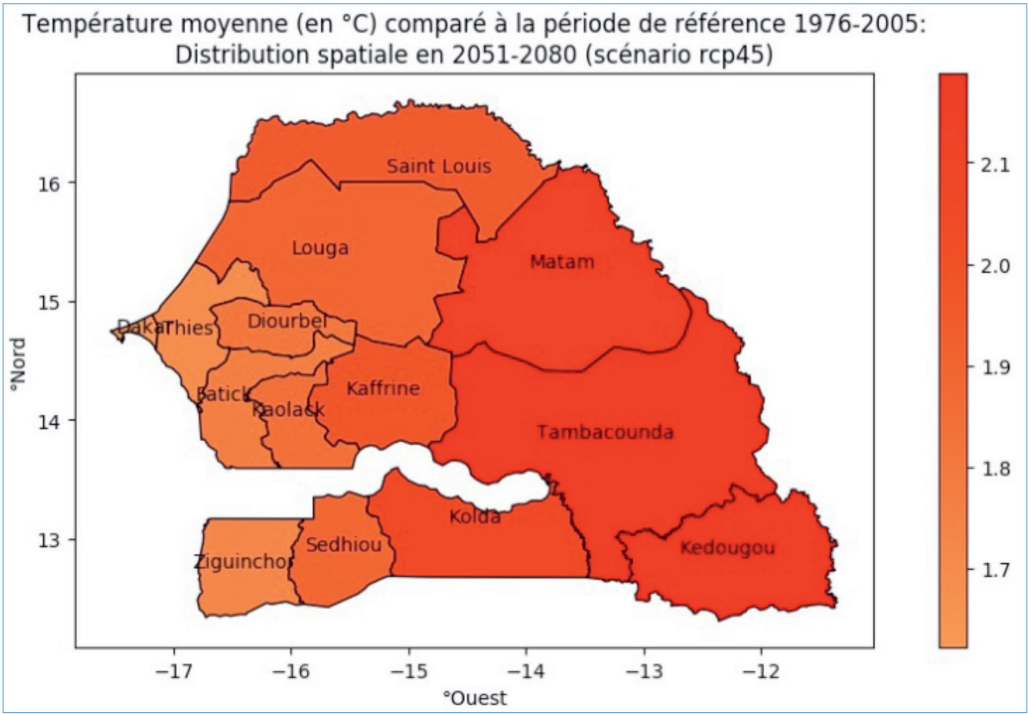


Figure 2. Projections des températures moyennes

2.2.2. Evolution temporelle de la température moyenne (rcp 2.6, 4.5 et 8.5)

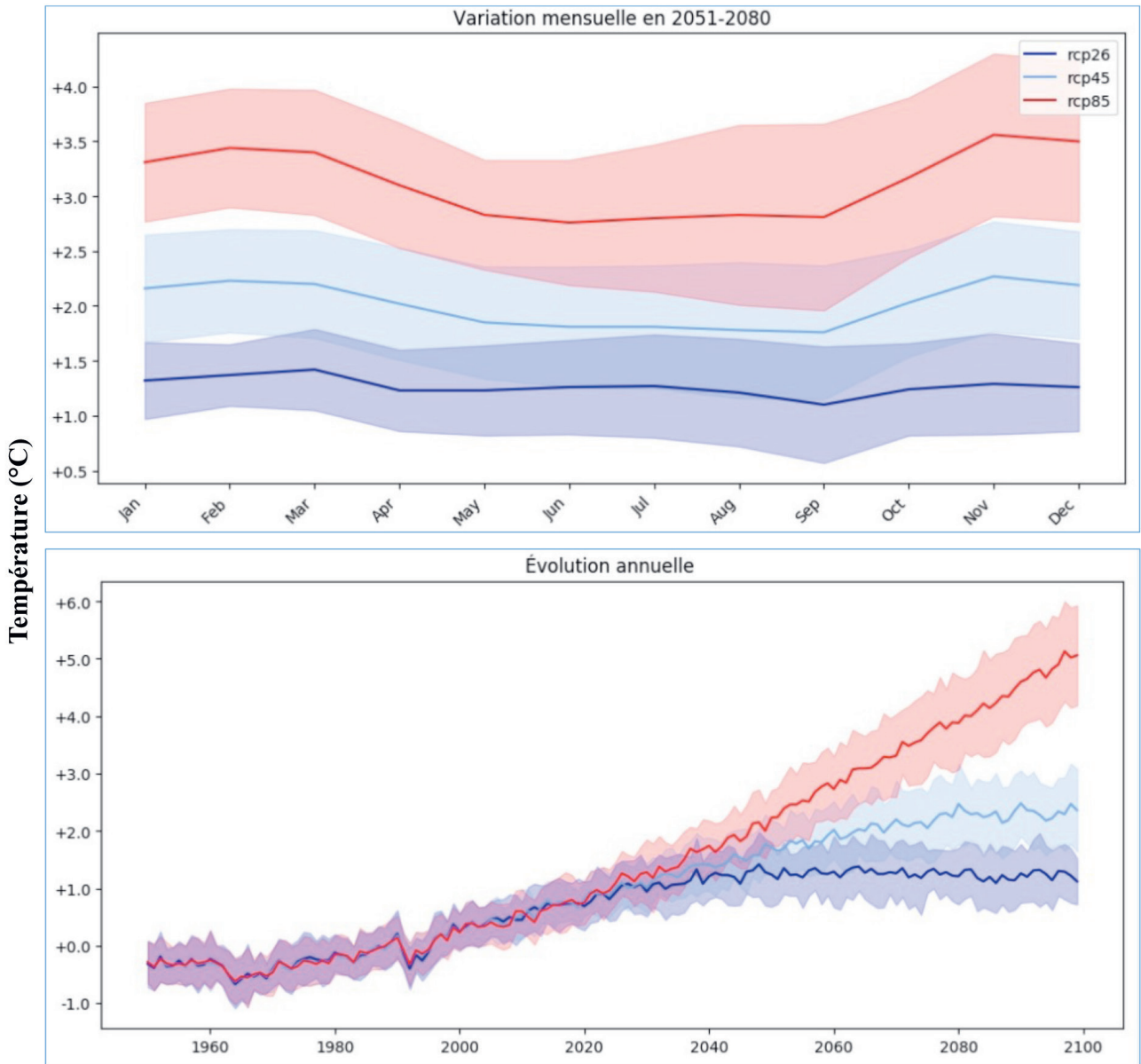


Figure 3. Evolution temporelle de la température moyenne

2.3. Evolution future des précipitations

2.3.1. Distribution spatiale du cumul des précipitations avec le rcp 4.5

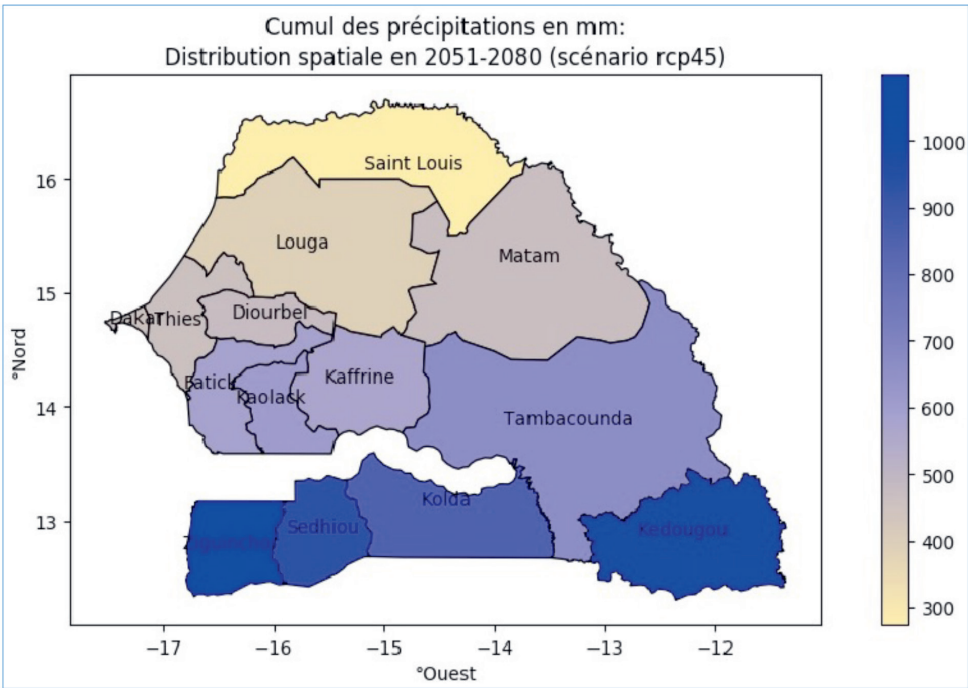


Figure 4. Distribution spatiale des projections du cumul pluviométrique

2.3.2. Evolution temporelle des cumuls moyens mensuels à l'échelle nationale

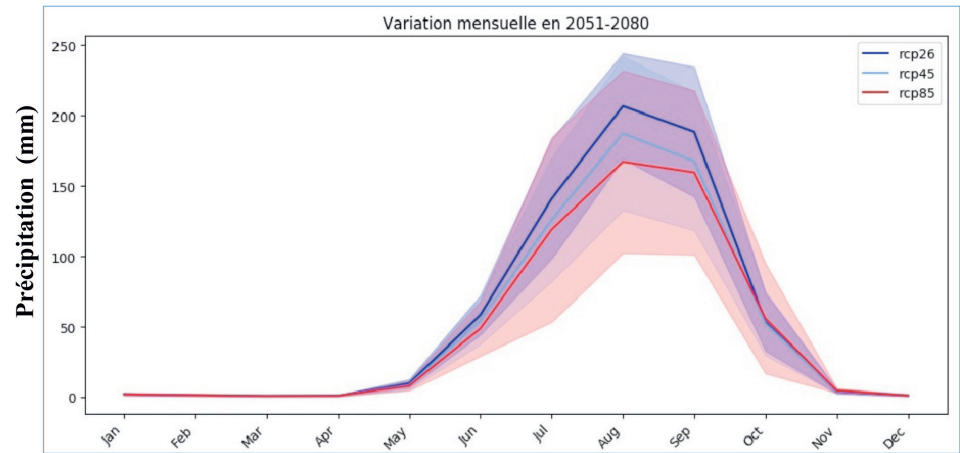


Figure 5. Evolution mensuelle des projections pluviométriques

2.3.3. Distribution spatiale comparée avec une période de référence (ex. rcp 4.5)

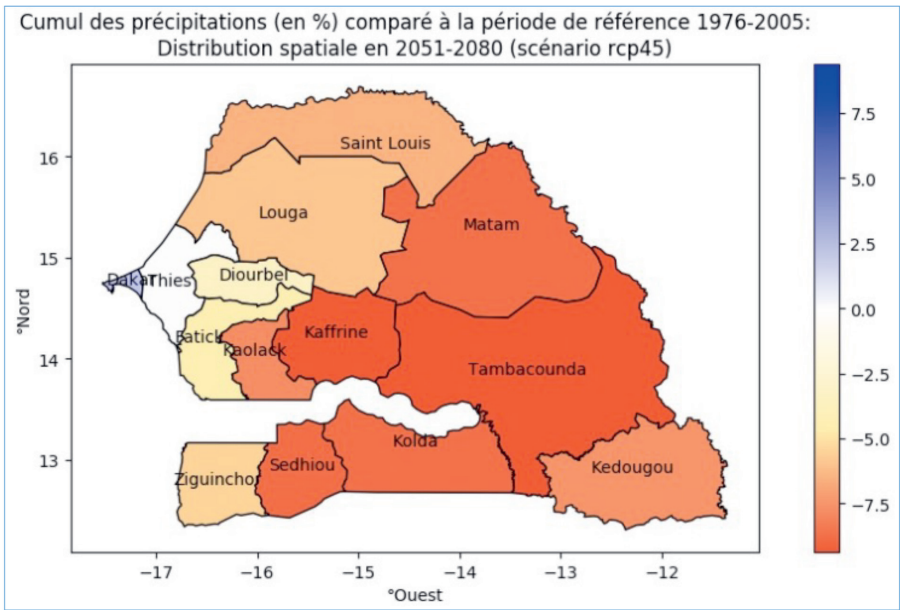


Figure 6. Projections des cumuls de précipitations

2.3.4. Evolution temporelle (rcp 2.6, 4.5 et 8.5)

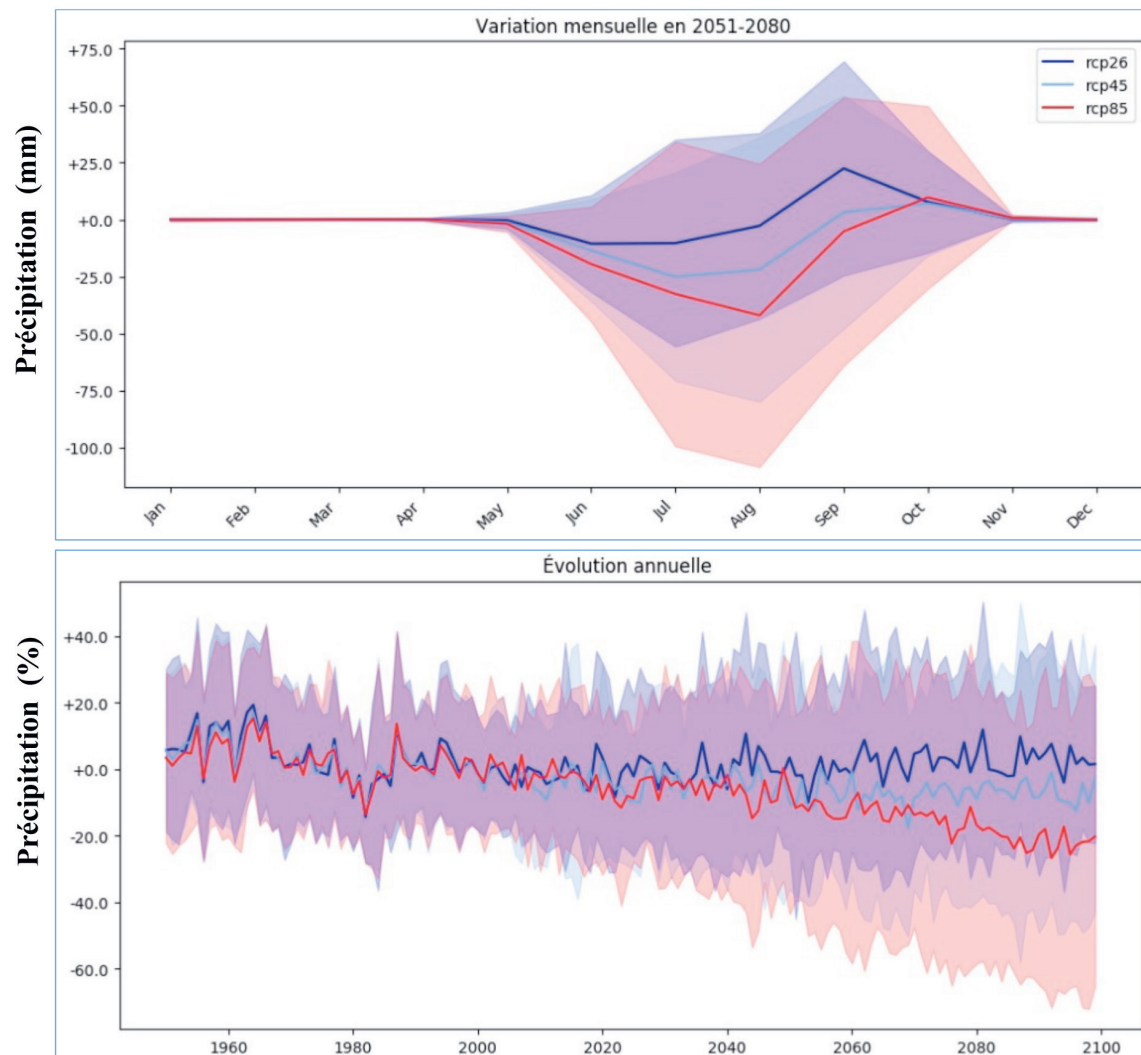


Figure 7. Evolution temporelle des précipitations

3. Perspectives pour le Sénégal :

Le géoportail est toujours en cours de développement. Ainsi, il prévoit d'intégrer les métriques en lien avec les ressources en eau telles que :

- Hauteurs d'eau (cours d'eau)
- Débits fluviaux ;
- Niveaux piézométriques ;
- Indicateurs de qualités des eaux ;
- Intensité-Durée-Fréquence des précipitations ;
- Cartographie des risques hydro-climatiques : inondation, sécheresse.

CARTOGRAPHIE DES GRANDS HYDROSYSTÈMES À DIMENSION SOUS-RÉGIONALE EN AFRIQUE DE L'OUEST

Ndiogou NDIAYE¹, Niokhor NDOUR¹, Japhet Siewe Djanni¹, Hamidou Ba¹, Bakary Faty¹, Euloge Ogouwalé³, Expédit W. Vissin³, Issa SAKHO²

¹ Direction la Gestion et de la Planification des Ressources en Eau (DGPRE), MEA, Sphère Ministérielle de Diamniadio, Dakar, Sénégal.

² UMR Sciences, Technologies Avancées et Développement Durable (UMR STADD), Université Amadou Mahtar MBOW de Dakar à Diamniadio, Sénégal

³ Département de Géographie, Université Abomey Calavi, Bénin

1. Introduction

Cette section présente une cartographie de quelques hydrosystèmes en Afrique de l'Ouest :

- Bassin du Niger
- Bassin du Sénégal
- Bassin de la Volta
- Bassin de la Gambie
- Bassin de la Kayanga - Geba

2. Cartographie des bassins hydrographiques

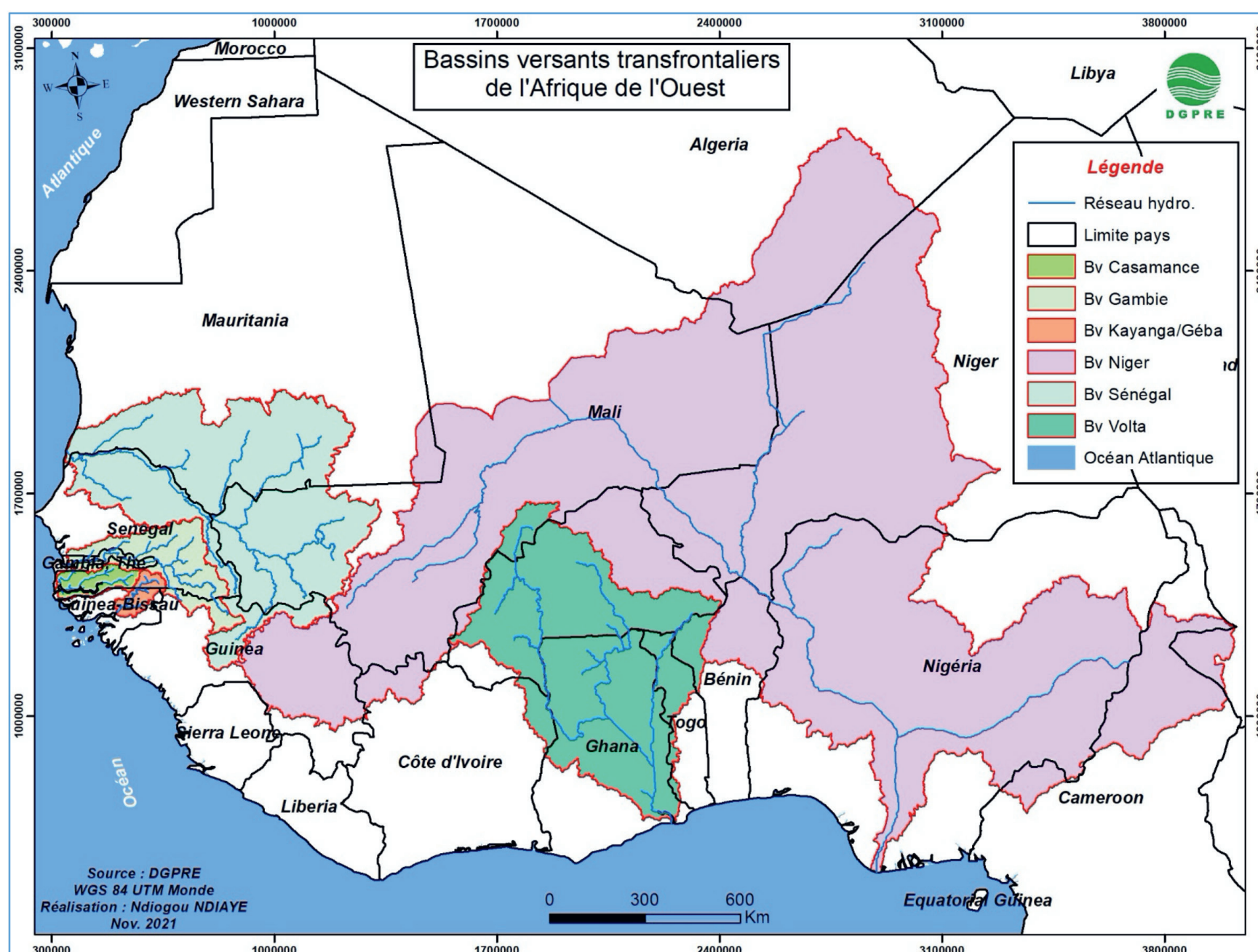


Figure 1. Bassins transfrontaliers en Afrique de l'Ouest

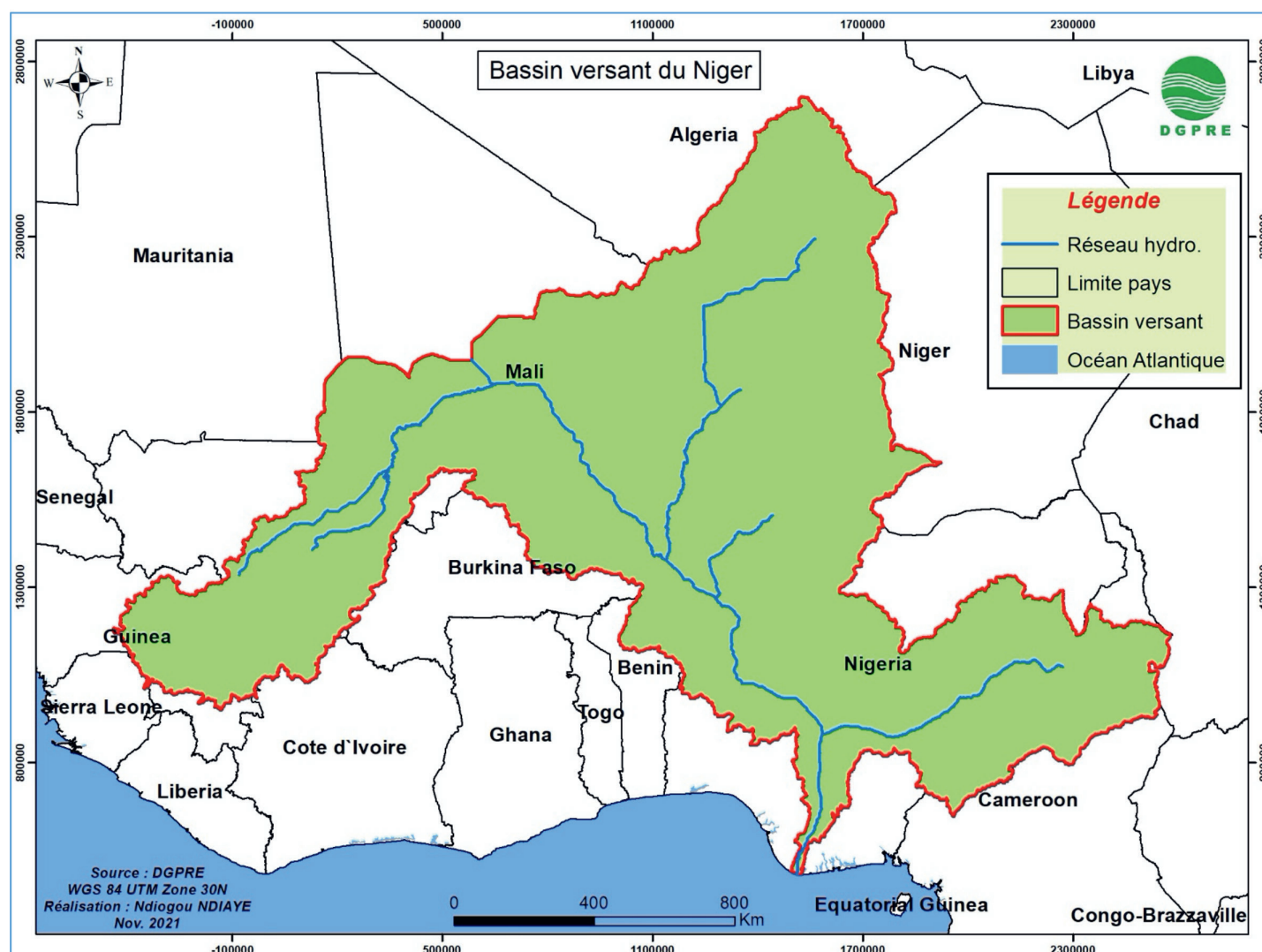


Figure 2. Bassin versant du fleuve Niger.

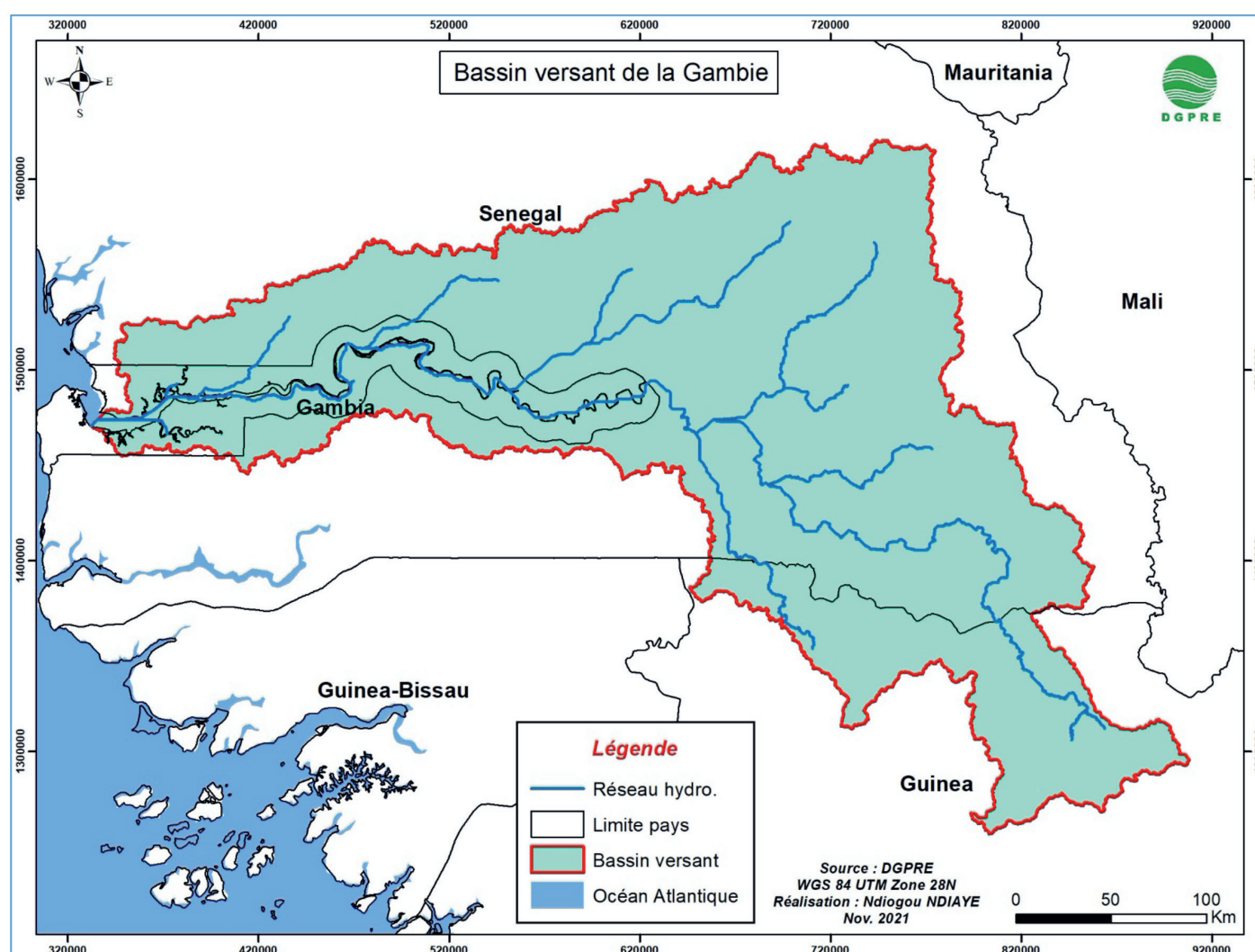


Figure 3. Bassin versant du fleuve Gambie

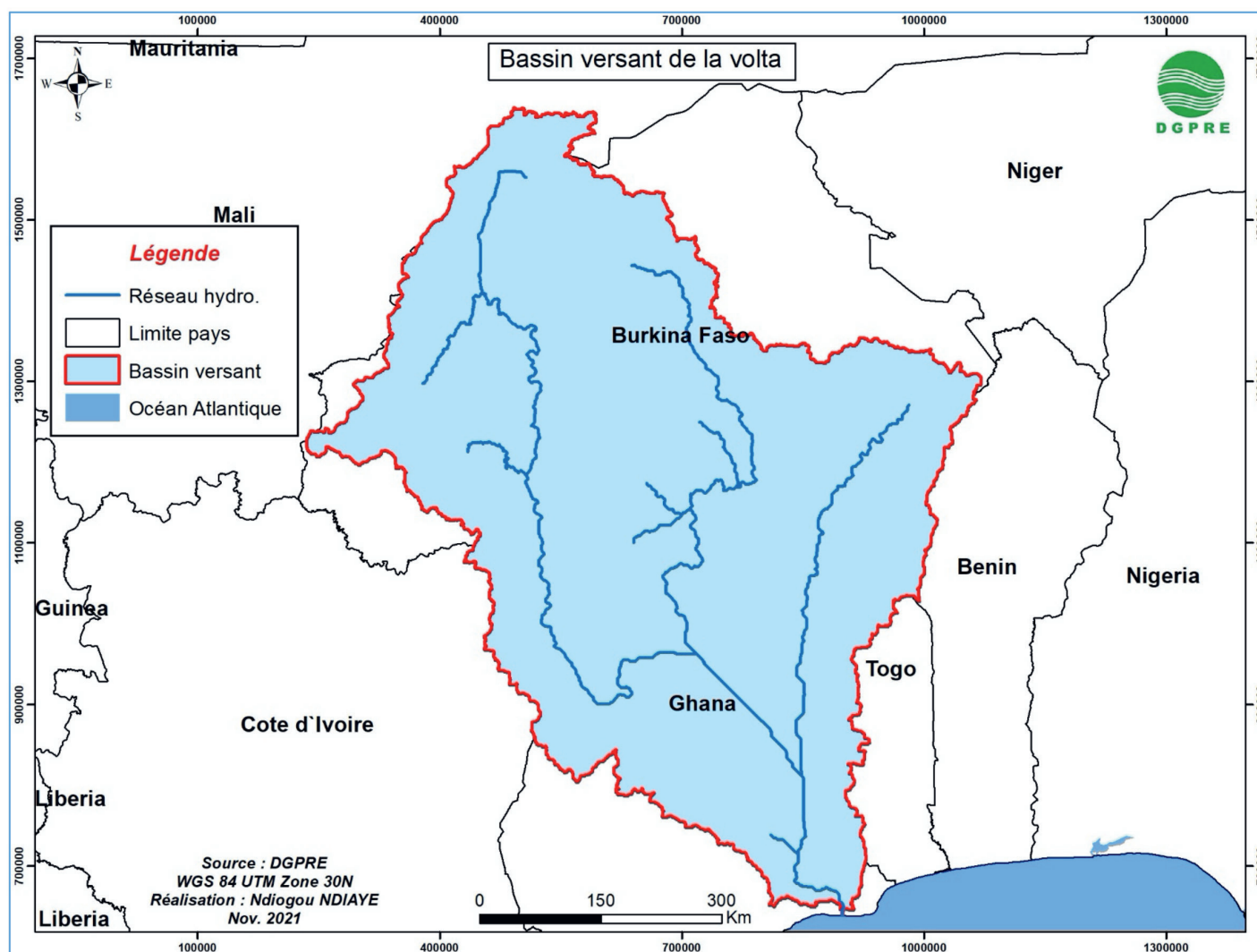


Figure 4. Bassin versant de la Volta

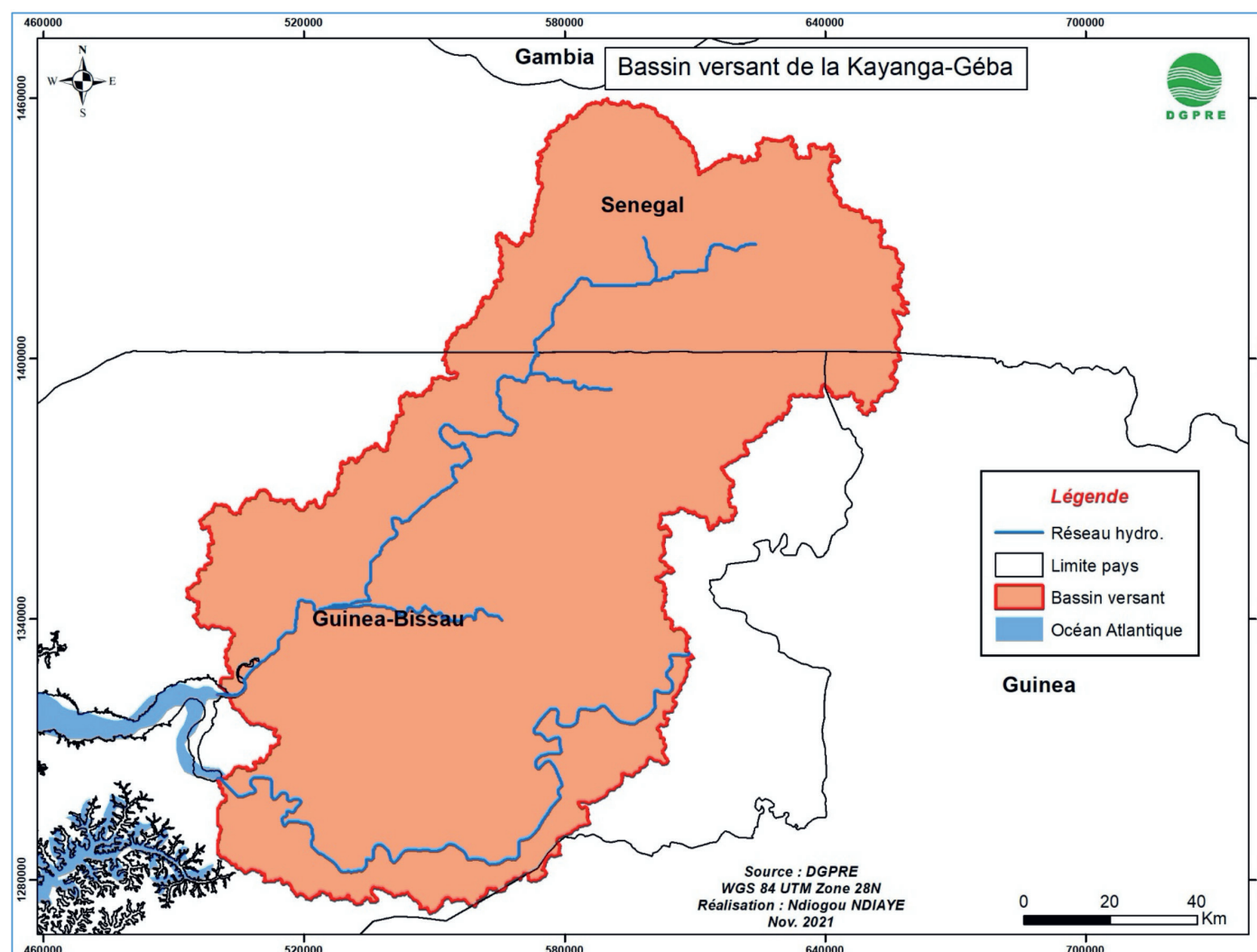


Figure 5. Bassin versant de la Kayanga - Geba

EVOLUTION DES RESSOURCES EN EAU DE SURFACE EN AFRIQUE DE L'OUEST ET DU CENTRE

Issa SAKHO¹, Youssouf Brahim Korole², Makha NDAO¹, Cheikh Faye³, Alioune Coulibaly¹, Thierno M. Mansour Sow¹, Babacar M. Ndiaye⁴,

¹ Université Amadou Mahtar MBOW, UMR Sciences, Technologies Avancées et Développement Durable, Cité Keur Gorgui, Dakar, Sénégal

² SONACIM, Ndjaména, Tchad

³ Université Assane Seck de Ziguinchor, Ziguinchor, Sénégal

⁴ Laboratoire de Mathématiques de la Décision et Analyse numérique, Université Cheikh Anta Diop de Dakar

1. Introduction

Le « bilan » des écoulements est un bon indicateur de l'évolution globale de la ressource en eau de surface dans un hydrosystème. Son évolution spatio-temporelle permet d'apprécier le fonctionnement global du système fluvial. Il permet également de comprendre et de quantifier l'impact des variations et/ou des changements du climat, des pressions anthropiques et de la modification des états de surface sur cette ressource en eau (Vörösmarty et Sahagian, 2000; Séguis et al., 2004; Descroix et al., 2012; Cissé et al., 2014; Sakho et al., 2017).

L'analyse des bilans actuels peut être directement mise en relation avec les besoins en eaux des populations et des écosystèmes afin de planifier les trajectoires de satisfaction des différents usages de l'eau.

Les bilans actuels sur les écoulements de surface sont établis sur trois (03) hydrosystèmes partagés :

- Sénégal à Bakel ;
- Gambie à Mako ;
- Chari – Logone à N'Djamena

2. FLEUVE SENEGAL



2.1. Evolution globale des écoulements

Le graphique ci-dessous présente l'évolution des débits moyens annuels de 1950 à 2020 sous forme d'anomalies d'écoulement. L'abscisse correspond au module du fleuve Sénégal calculé sur cette même période. Il est de 595 m³.s⁻¹ (Figure 1).

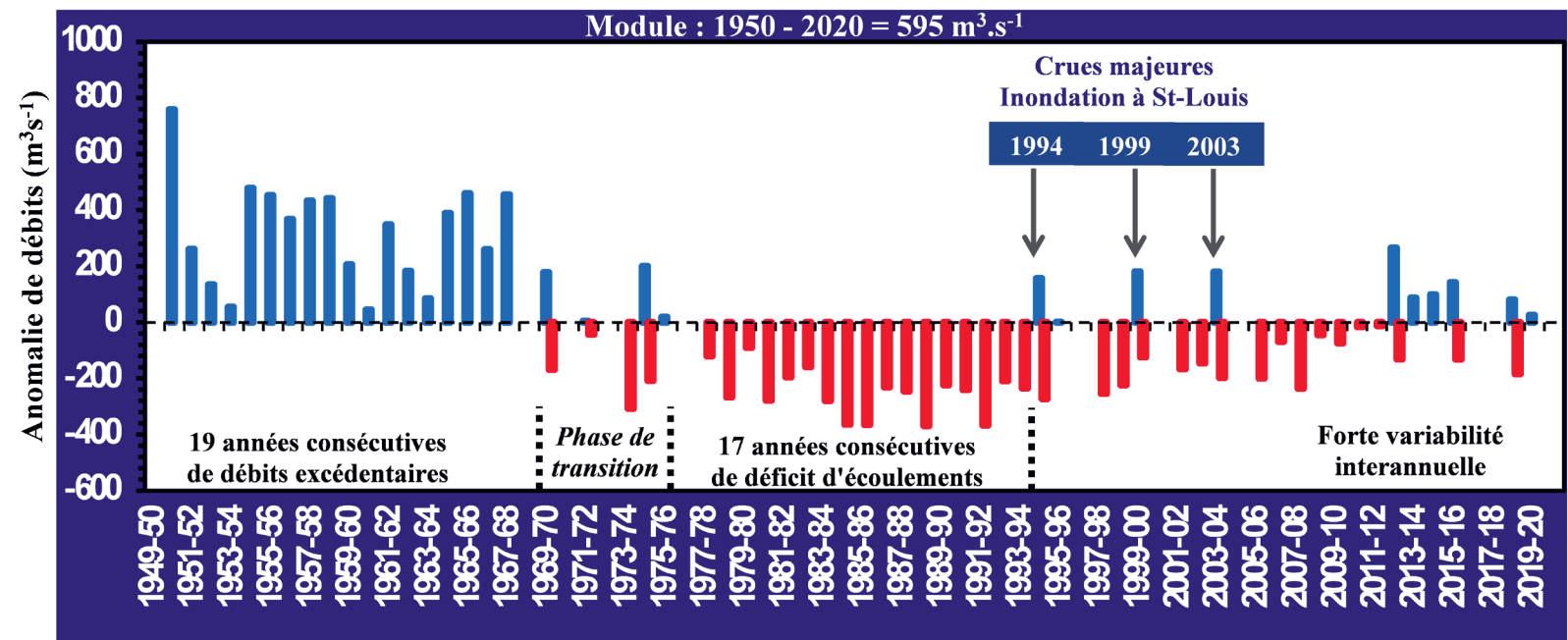


Figure 1. Anomalie d'écoulements du fleuve Sénégal de 1950 à 2020

Trois grandes périodes hydrologiques peuvent être identifiées (Figure 1 et Figure 2) :

- De 1950 à 1968: cette période est marquée par 19 années consécutives de débits excédentaires par rapport au module.
- De 1969 à 1993 : Cette période, qui correspond selon un critère pluviométrique, à la grande période de sécheresse au Sahel, a été marquée par des déficits d'écoulements sans précédent du fleuve Sénégal : 17 années consécutives de déficits d'écoulement avec un pic durant l'année hydrologique 1984-85.
- De 1994 à 2020 : La nouvelle période est marquée par une forte variabilité interannuelle des écoulements du fleuve Sénégal. Elle correspond également à la période où la ville de Saint-Louis est touchée par des inondations récurrentes jusqu'en 2003. L'année hydrologique 1950-51 a enregistré le plus important débit moyen annuel des 70 dernières années = 1 354 m3.s-1. L'année hydrologique 1984-85 a enregistré le plus faible débit moyen annuel des 70 dernières années = 230 m3.s-1.
- Lors de la grande période de sécheresse au Sahel des années 1970 – 1980, le fleuve Sénégal à Bakel a enregistré une baisse de plus de 55 % de son débit moyen annuel par rapport à la période 1950 – 1968.
- Ce déficit se situe actuellement (1994 – 2020) autour de 37 % ; ce qui traduit une amélioration des apports en eau douce dans le fleuve Sénégal.

Tableau 1. Total water budget 1950 - 2020

PERIODES	SITUATIONS	TOTAL WATER BUDGET (m3)	TOTAL WATER DEFICIT (m3)	TENDANCE
1950 - 1968	Excédentaire	516 266 394 843	Référence	
1969 - 1993	Déficitaire	336 369 376 614	179 897 018 229	↘
1994 - 2020	Forte variabilité interannuelle	456 811 851 886	59 454 542 958	↗

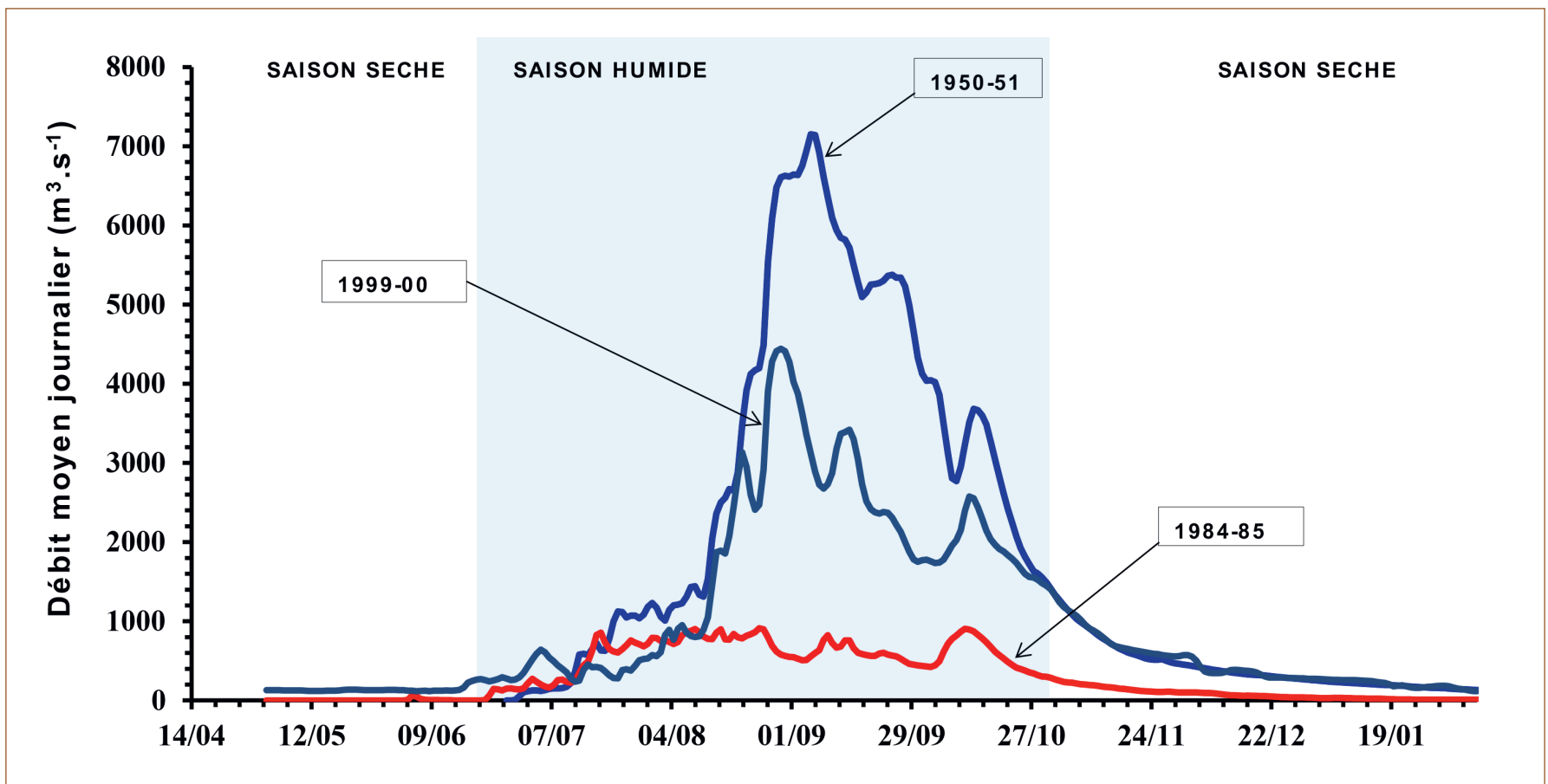


Figure 2. Hydrogrammes de crue sur 3 années hydrologiques caractéristiques de la forte variabilité des débits du fleuve Sénégal à Bakel

2.2. A retenir

- Depuis le XIX^{ème} siècle, le fleuve Sénégal a connu 19 crues majeures qui ont provoqué des inondations à Saint-Louis ;
- Ces crues majeures interviennent principalement entre Septembre et Novembre ;
- La brèche sur la Langue de Barbarie, devenue l'unique exutoire du fleuve Sénégal depuis 2015, a mis fin à ces inondations d'origine fluviale :
 - Par une réduction considérable du temps de transfert des eaux de crues dans l'océan atlantique ;
 - Par un fort écrêtage des crues lors des périodes de niveaux d'eaux extrêmes (septembre et octobre) ;
- Depuis les années 1994, le fleuve Sénégal est marqué par une augmentation des débits par rapport aux décennies 1970 et 1980. Cependant, cette période actuelle présente une forte variabilité interannuelle.

2.3 Perspectives de recherche

- Modélisation de l'évolution future des débits du fleuve Sénégal en lien avec le changement climatique ;
- Caractérisation des risques hydrologiques futurs ;
- Développement d'un plan de prévention des risques hydroclimatiques.

3. FLEUVE GAMBIE



3.1. Evolution globale des écoulements

Le graphique ci-dessous présente l'évolution des débits moyens annuels du fleuve Gambie à la station hydrométrique de Mako de 1970 à 2020. Les variations des débits sont représentées sous forme d'anomalies d'écoulement. L'abscisse correspond au module du fleuve Gambie calculé sur cette même période. Il est de $108 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (Figure 3).

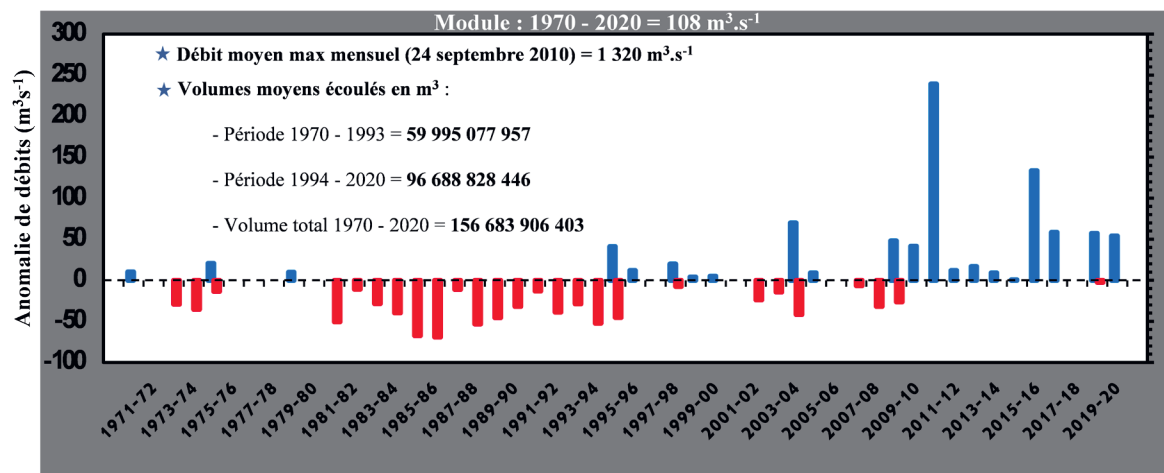


Figure 3. Anomalie des écoulements

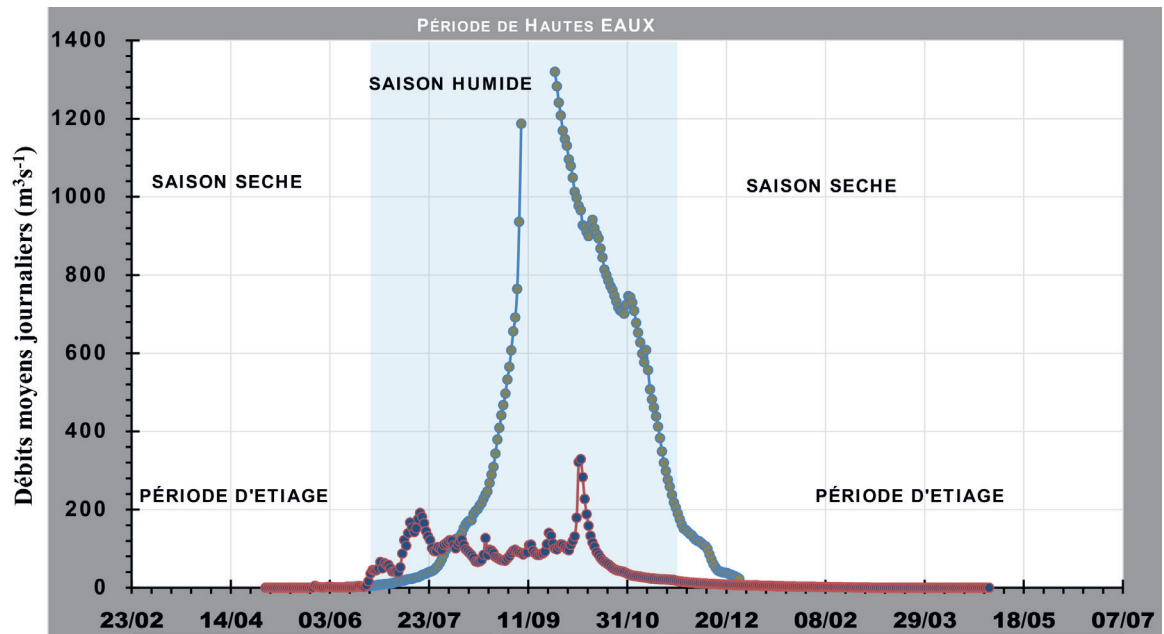


Figure 4. Hydrogrammes de crue sur 2 années hydrologiques caractéristiques de la forte variabilité des débits du fleuve Gambie à Mako : 1984-85 (ligne rouge) et 2010-11 (ligne bleue)

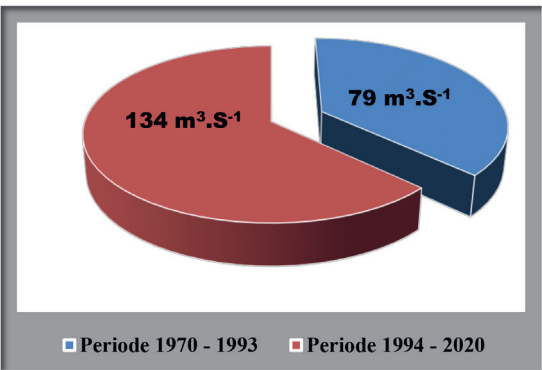


Figure 5 : Evolution du Débit moyen du fleuve Gambie à Mako

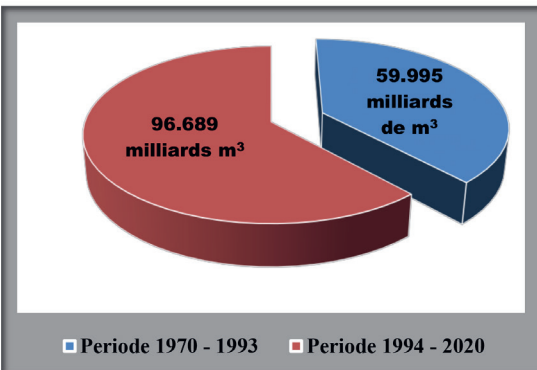


Figure 6 : Total water budget du fleuve Gambie à Mako

3.2. Perspectives de recherche

- Modélisation de l'évolution future des débits du fleuve Gambie en lien avec le changement climatique ;
- Caractérisation des risques hydrologiques futurs ;
- Développement d'un plan de prévention des risques hydroclimatiques.

4. CHARI - LOGONE



Dans la zone de transition sahélienne, entre le désert du Sahara et la forêt tropicale, entre l'Afrique occidentale et l'Afrique centrale se trouve le lac Tchad et son immense bassin endoréique de 2,4 millions km². Le Lac est un véritable poumon économique pour les pays auxquels il est à l'interface : Tchad, Niger, Nigeria et Cameroun. Il fournit des services écosystémiques considérables, ce qui est particulièrement précieux pour une région semi - aride et très marquée par l'irrégularité des précipitations et, de ce fait, il est inscrit sur la liste des zones humides d'importance internationale de Ramsar (Lemoalle & Magrin, 2017b). Il est en plus une opportunité sur le plan de l'agriculture, de la pêche et de l'élevage. Le Lac et son bassin versant sont une garantie de sécurité alimentaire et économique pour plus de 30 millions de personnes (CBLT & GIZ, 2016). D'après Olivry et al., (1996), le lac Tchad serait ce qui reste de la mer Paléotchadienne dont l'extension était considérable « les Bas-Pays du Tchad étaient submergés et la mer se serait étendue jusqu'aux limites du bassin versant du Nil ». Dans les années 1960 selon la même source, le lac Tchad était le sixième plus grand lac du monde et le deuxième de l'Afrique avec une superficie de 25 000 km². Cette superficie a été considérablement réduite, variant entre 4 000 et 5 000 km² aujourd'hui sous l'effet conjugué du changement climatique et des actions anthropiques. L'assèchement du Lac a attiré l'attention de nombreux chercheurs. Gao et al., (2011) rapportent que le lac Tchad, l'un des plus vastes étendue d'eau, a perdu plus de 90% de sa surface au cours des quarante dernières années. Mahmood & Jia, (2018) ont indiqué que les activités humaines ont beaucoup plus impacté le volume du Lac que le changement climatique surtout de 1972 à 2013.

4.1 Présentation du bassin du Lac Tchad

Dans la zone de transition sahélienne, entre le désert du Sahara et la forêt tropicale, entre l'Afrique occidentale et l'Afrique centrale se trouve le lac Tchad et son immense bassin endoréique de 2,4 millions km² (Figure 7).

Depuis 1973, le lac Tchad est partagé en deux cuvettes (Olivry et al., 1996) : une cuvette Sud régulièrement alimentée par le Chari et une cuvette Nord, alimentée par le système Komadougou - Yobé et par le Chari - Logone en période humide favorable (Figure 8). Depuis 1984, la cuvette nord est quasiment sèche pendant que la cuvette sud conserve un peu d'eau toute l'année, dépendant majoritairement des apports annuels du Chari.

Le Bassin du Lac Tchad est situé entre les latitudes 5.2° et 25.3°N et les longitudes 6.9° et 24.5°E. Il couvre environ une surface de 2,47 millions de km², soit 8 % du continent africain, à cheval entre huit états : le Tchad, le Niger, le Nigéria, le Cameroun, la République Centrafricaine, la Libye, le Soudan et l'Algérie (Figure 7). Le bassin est entouré par des bassins transfrontaliers tels que le bassin du Nil à l'Est, le bassin du Congo au Sud, le bassin du Niger à l'Ouest et le bassin de Nubie au Nord. Environ 47 millions de personnes vivent dans le bassin du lac Tchad (BLT). La majorité de la population se situe dans la partie sud - ouest du bassin où les densités de populations sont plus importantes (au Nigeria). La Commission du Bassin du Lac Tchad (CBLT), l'une des plus anciennes institutions régionales africaines, créée le 22 mai 1964. Elle regroupe six pays et œuvre pour une gestion durable et équitable des ressources en eau partagées du bassin du lac Tchad.

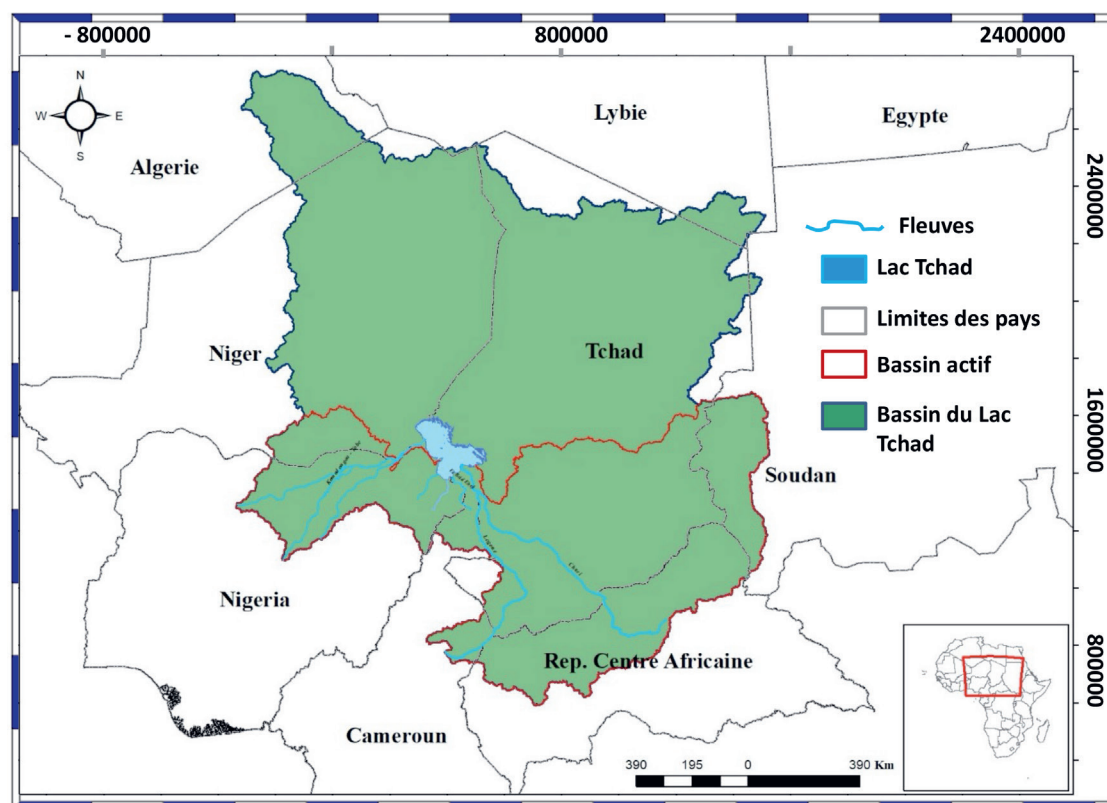


Figure 7. Bassin versant du lac Tchad

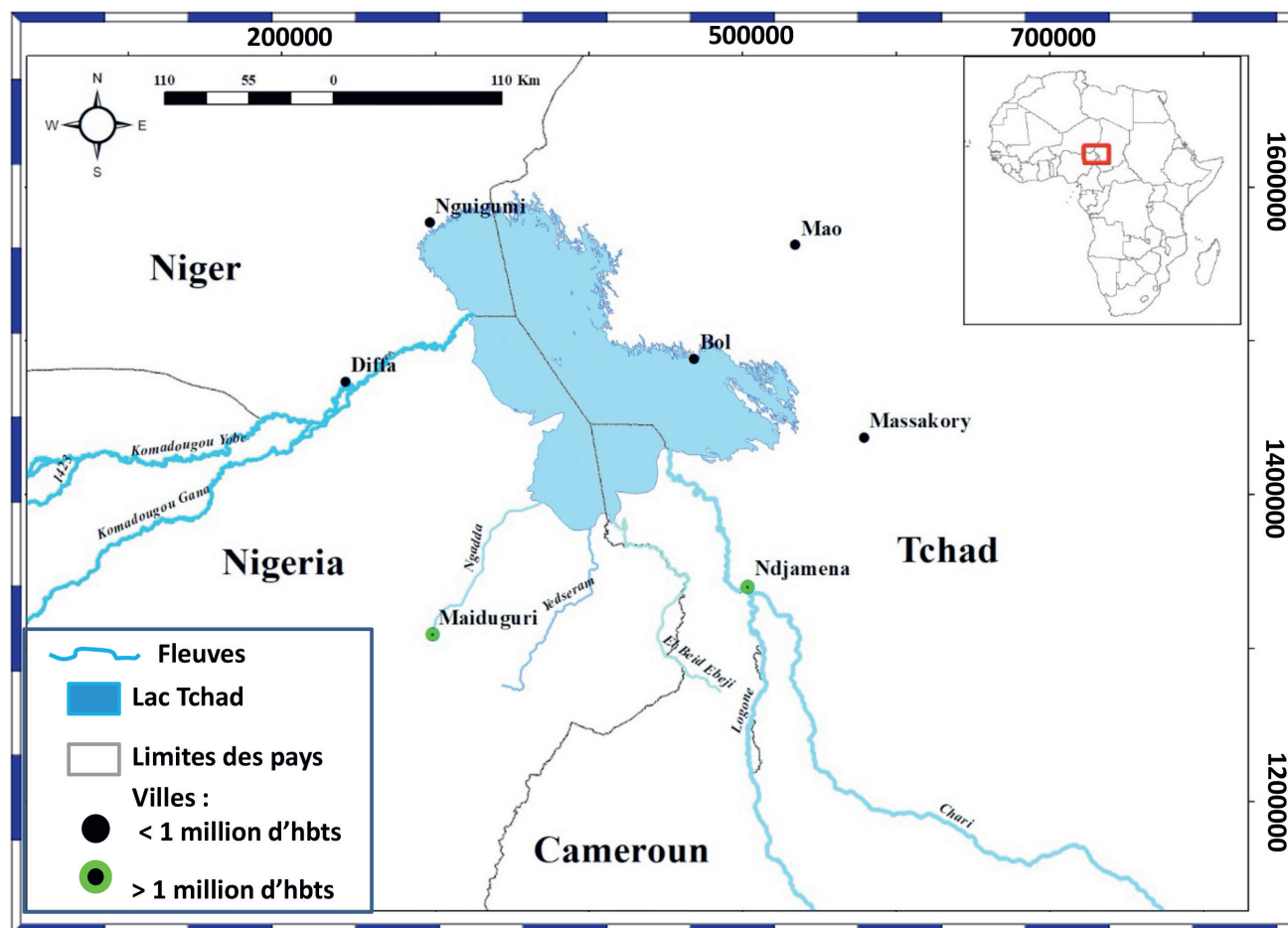


Figure 8. Système hydrologique et les populations dans le bassin du lac Tchad

4.2. Evolution du lac Tchad de 1963 à 2019

4.2.1. Lac Tchad en 1963

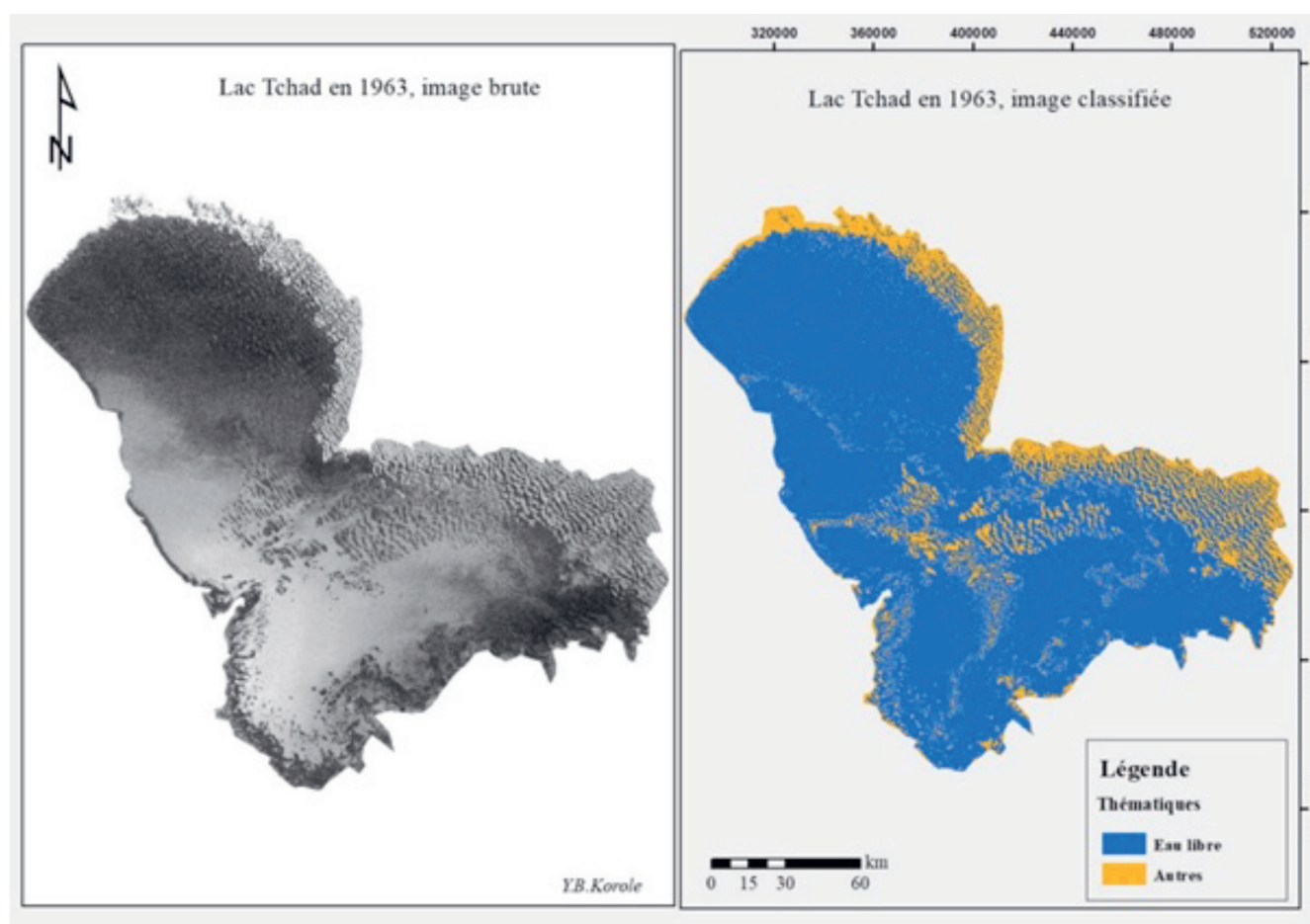


Figure 9. Situation en eau du Lac Tchad en 1963

4.2.2. Lac Tchad en 1973

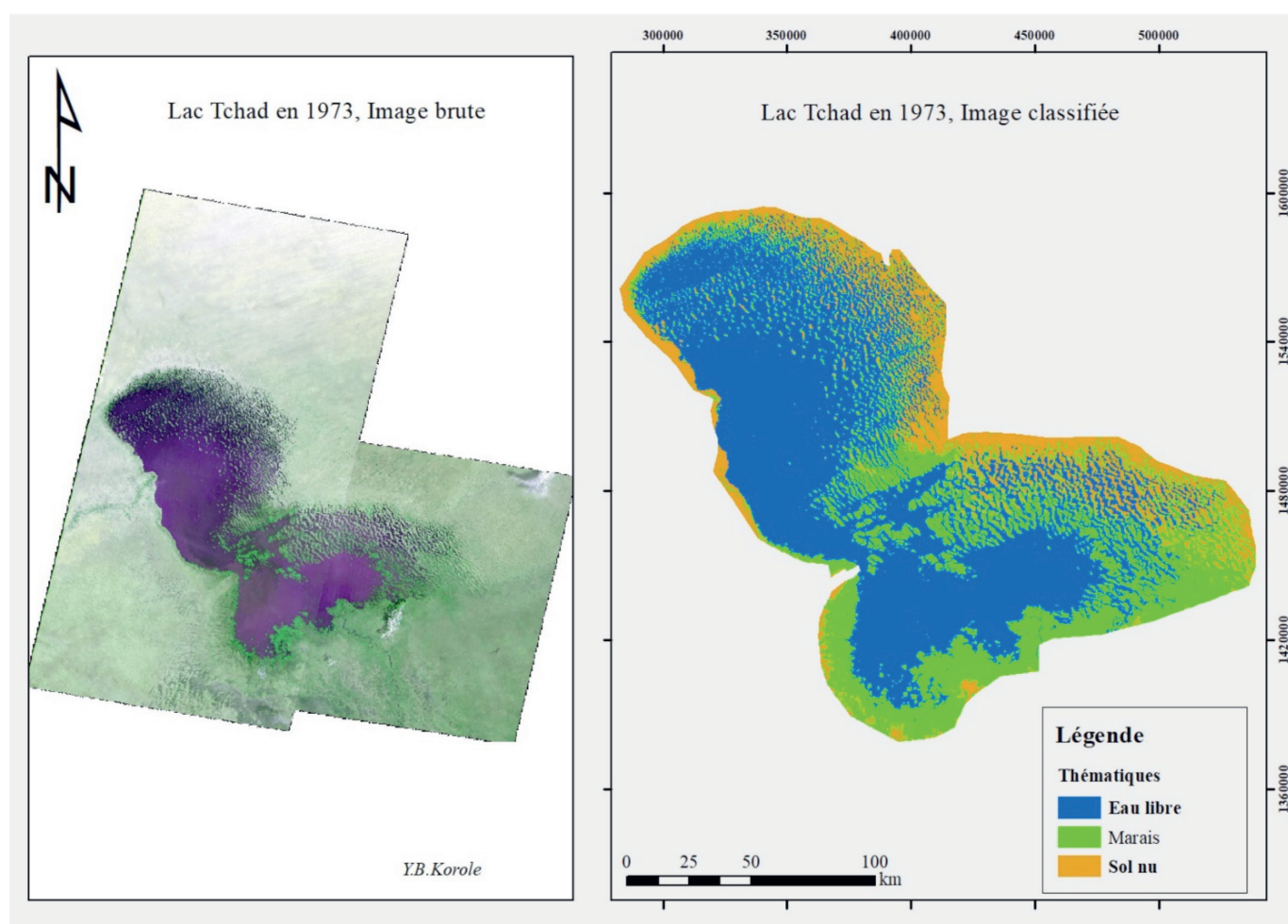


Figure 10. Situation en eau du Lac Tchad en 1973

4.2.3. Lac Tchad en 1984

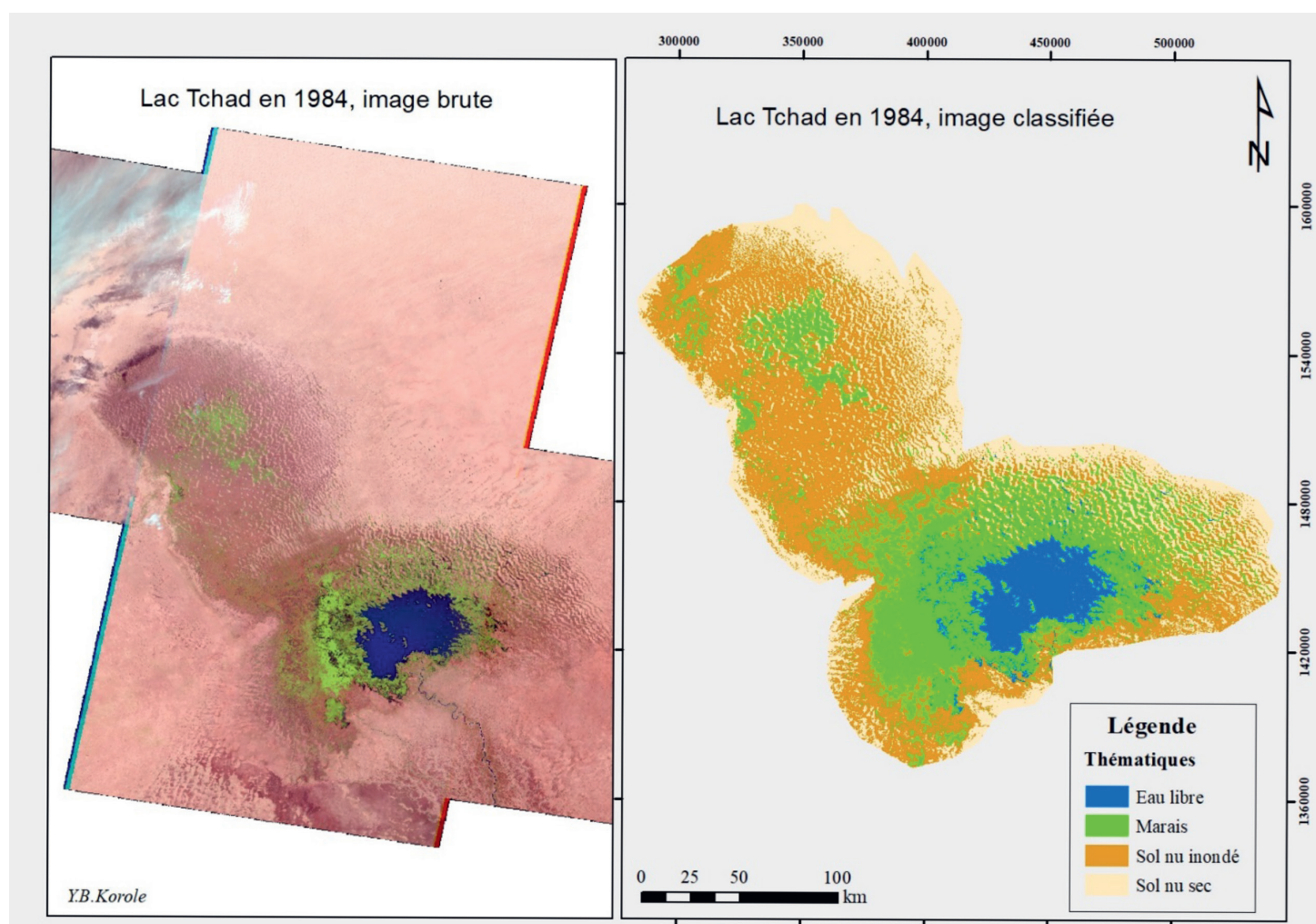


Figure 11. Situation en eau du Lac Tchad en 1984

4.2.4. Lac Tchad en 1991

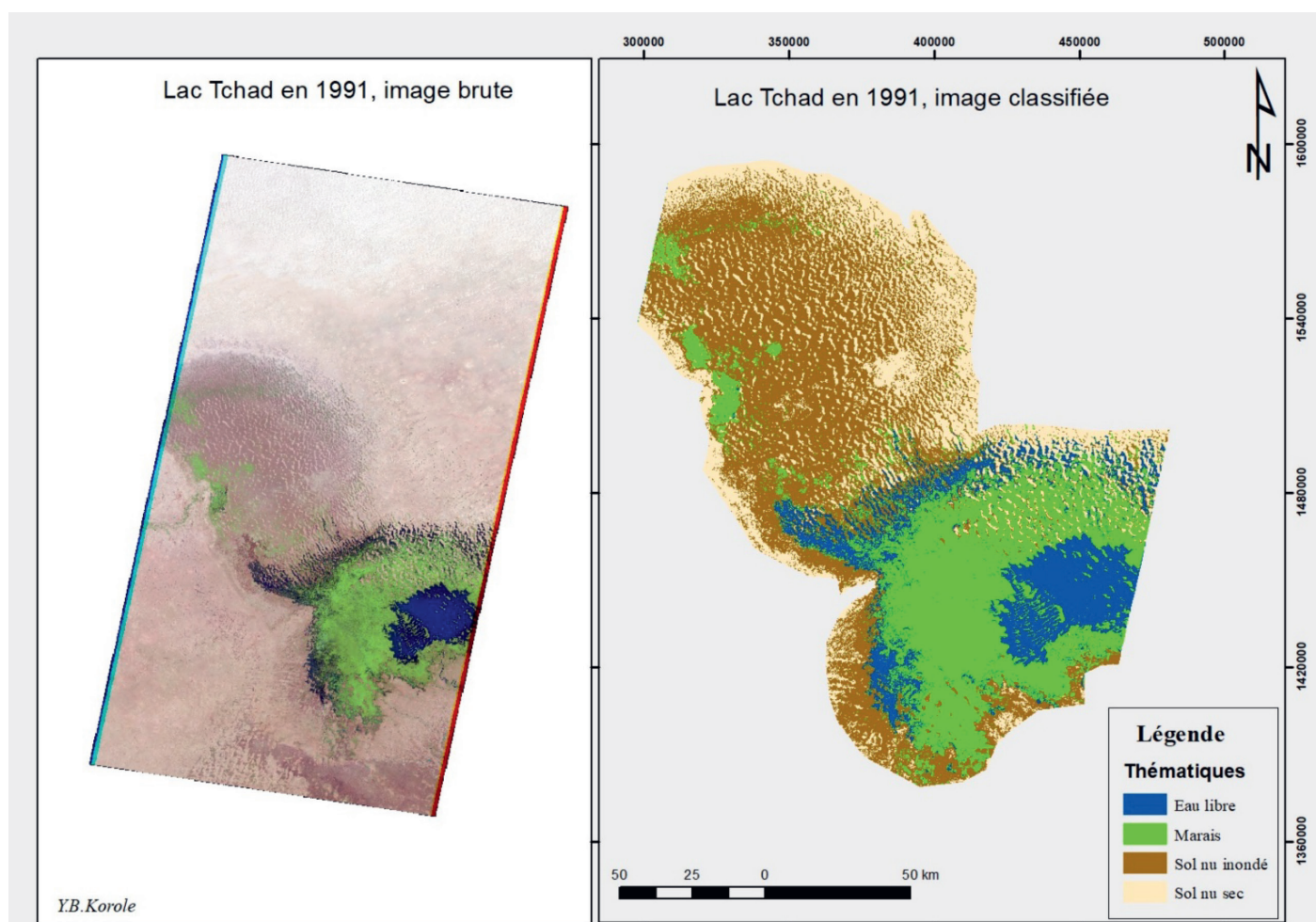


Figure 12. Situation en eau du Lac Tchad en 1991

4.2.5. Lac Tchad en 1999

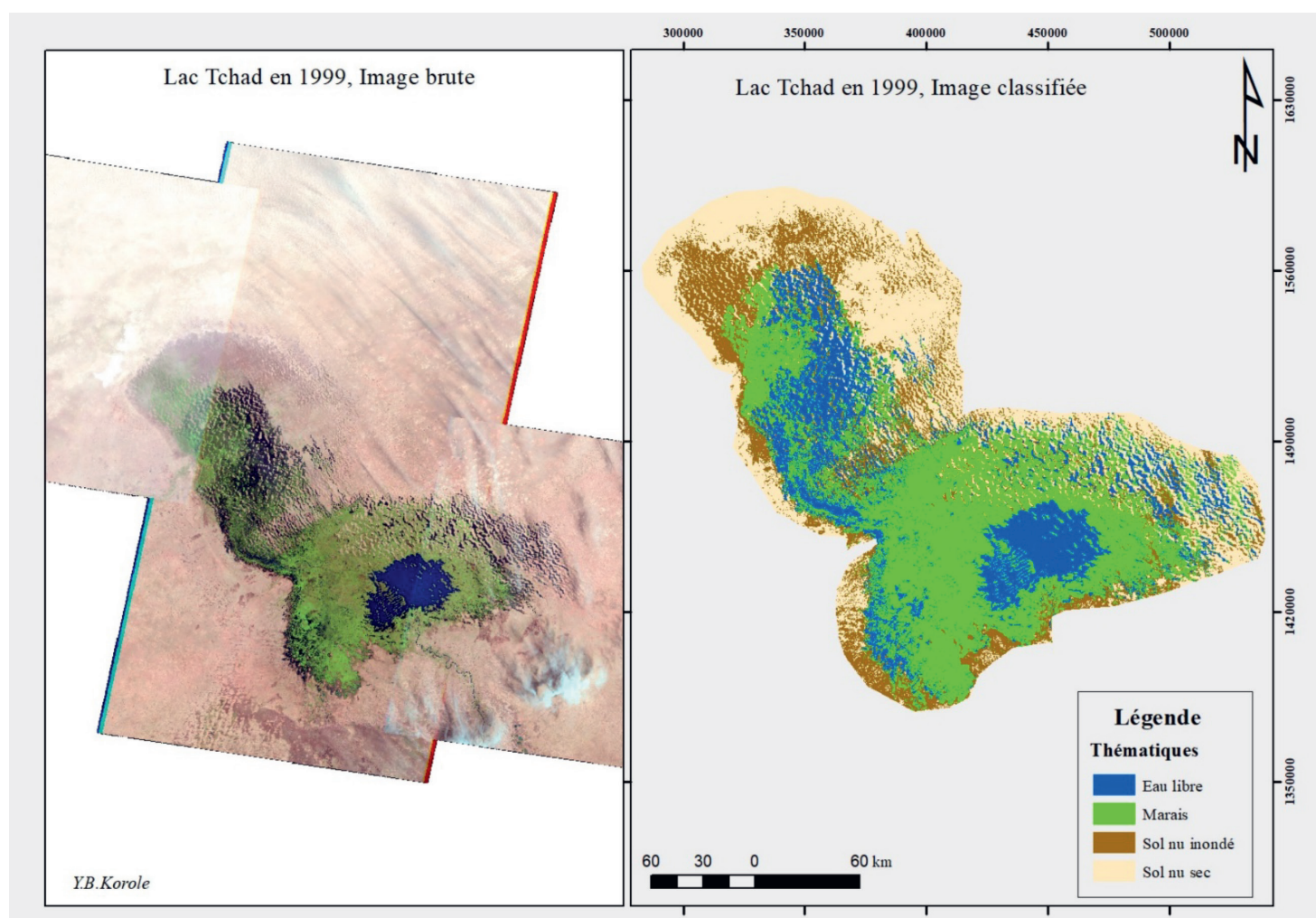


Figure 13. Situation en eau du Lac Tchad en 1999

4.2.6 Lac Tchad en 2019

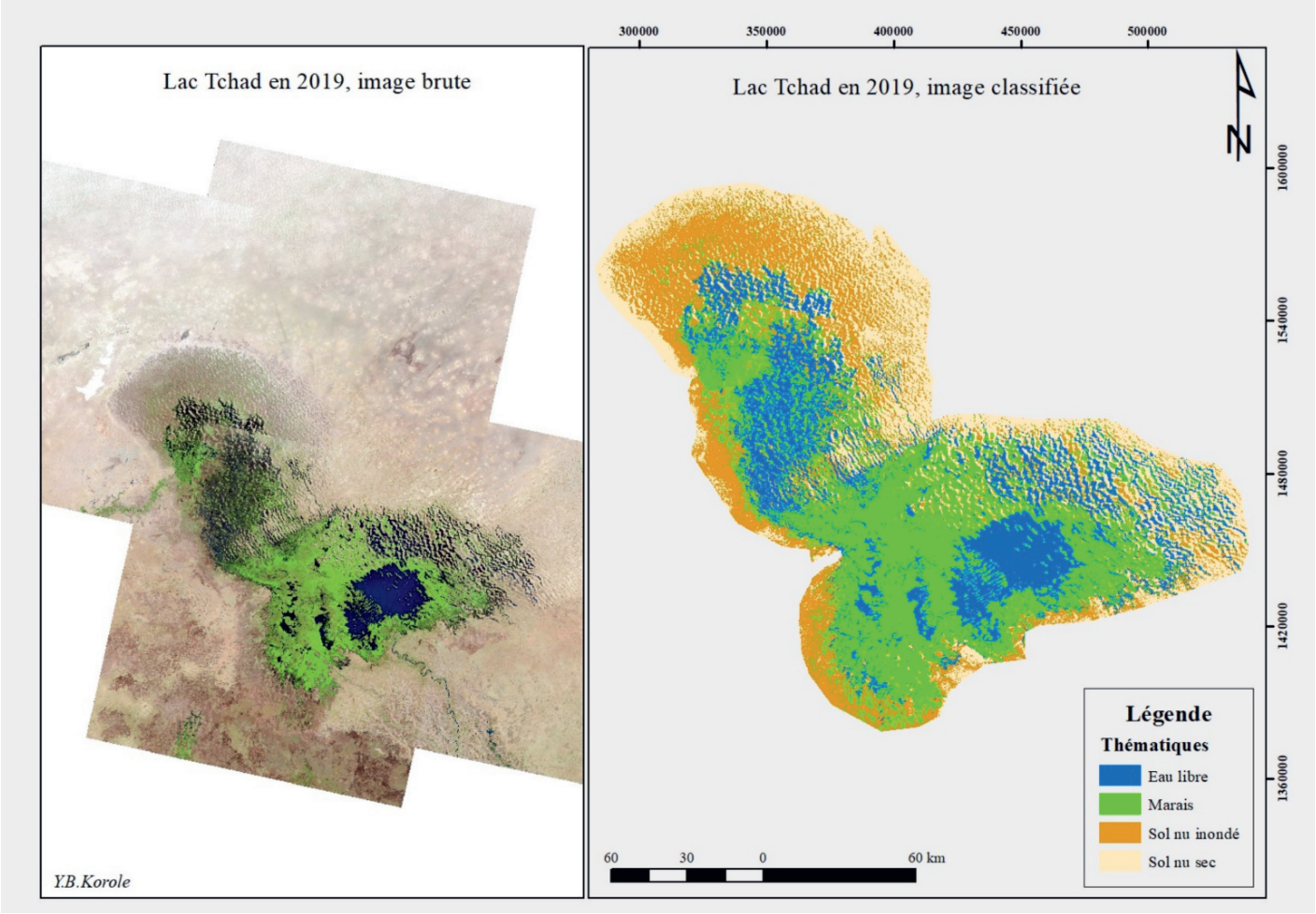


Figure 14. Situation en eau du Lac Tchad en 2019

4.2.7. Synthèse de l'évolution de la surface en eau du Lac Tchad de 1963 à 2019

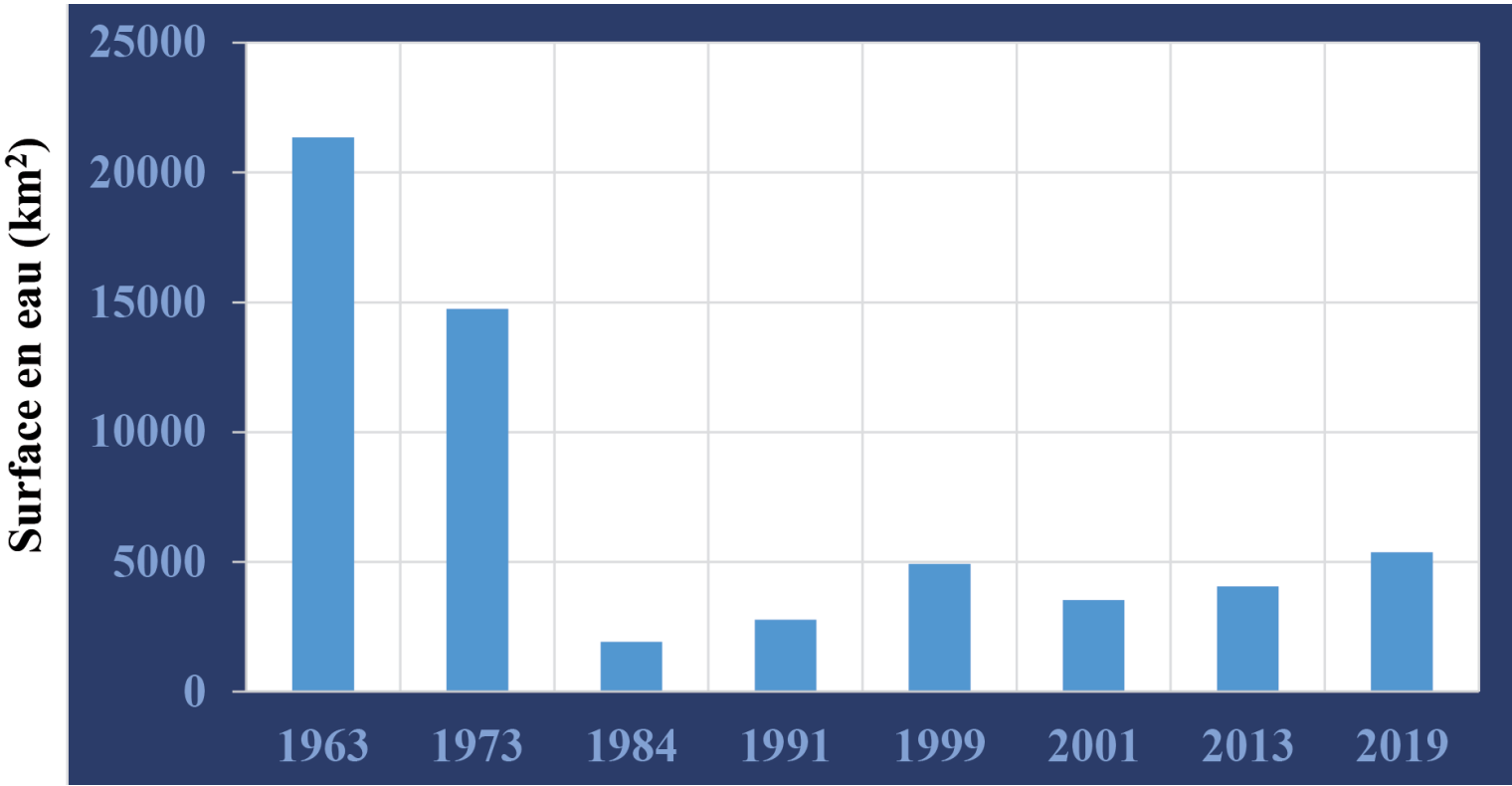


Figure 15. Evolution des surfaces du Lac Tchad de 1963 à 2019

4.3. Evolution globale en écoulement du Chari-Lagone

4.3.1. Evolution des débits moyens à la station de N'Djamena

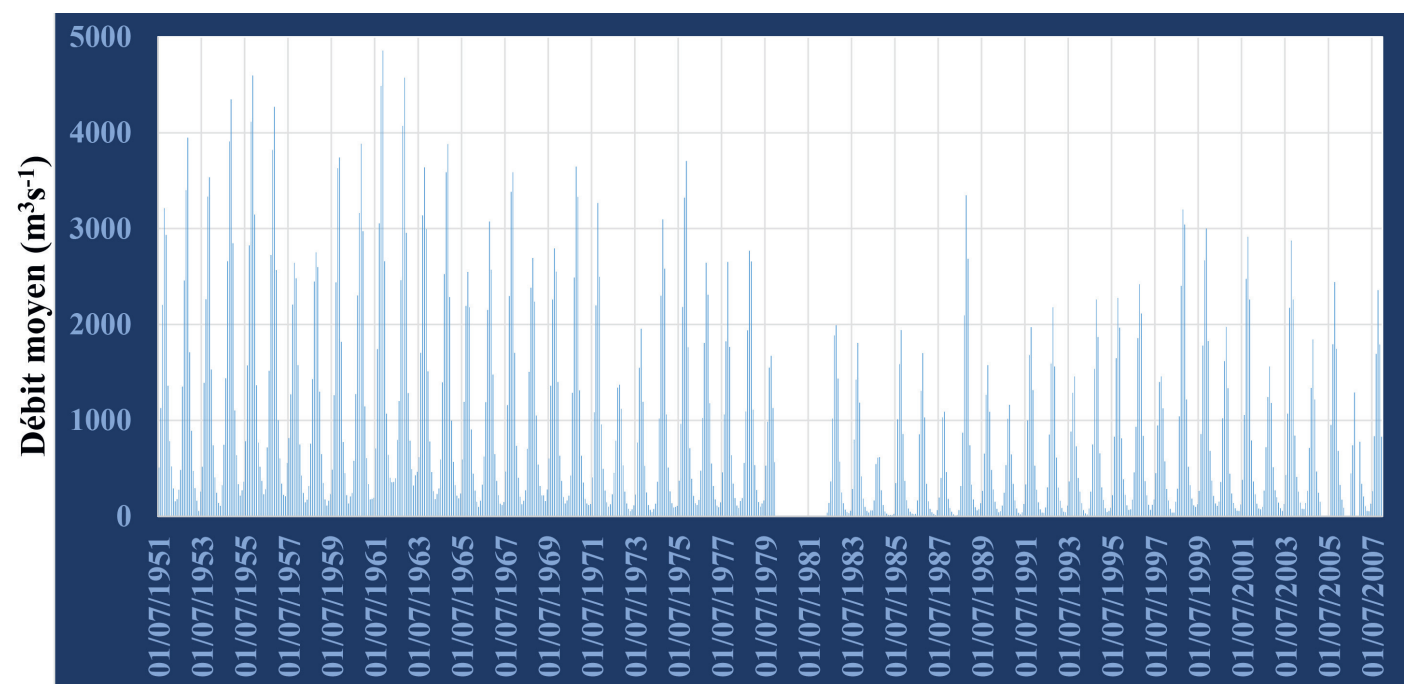


Figure 16. Evolution des débits moyens à la station de N'Djamena de 1951 à 2007

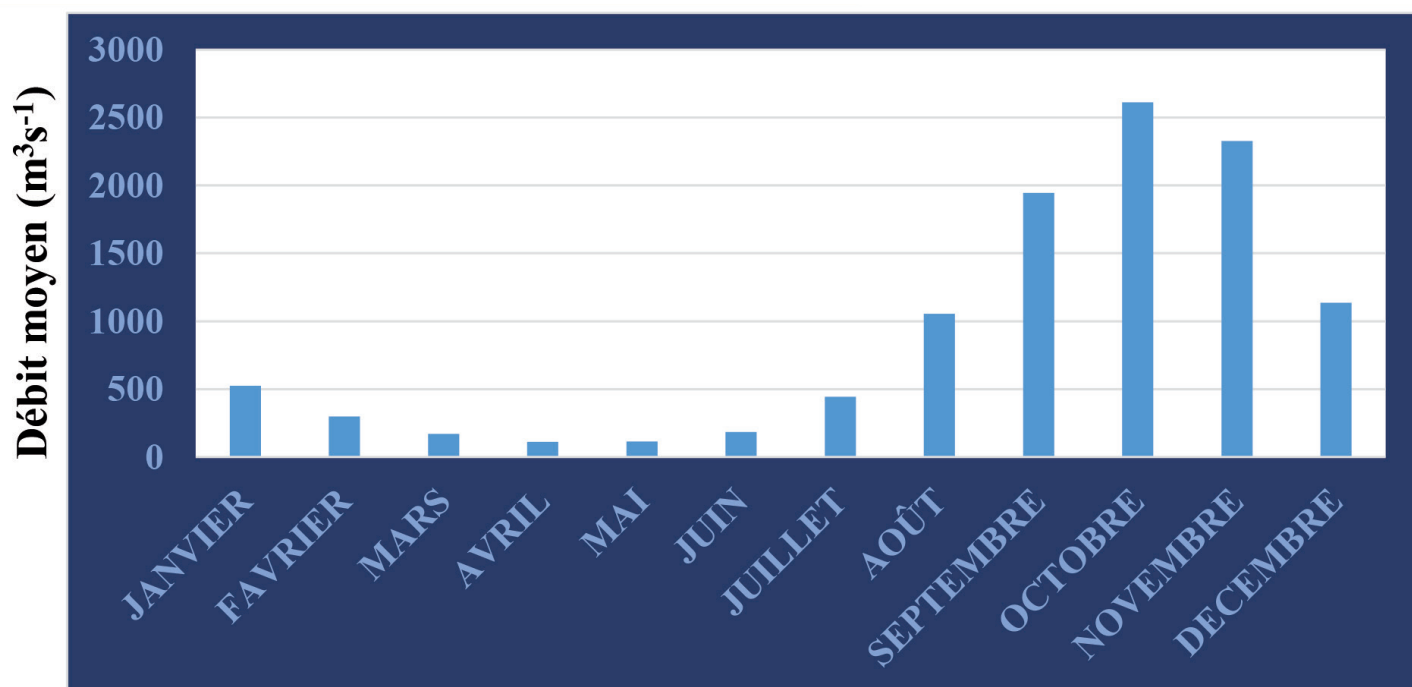


Figure 17. Variations mensuelles des débits moyens à la station de N'Djamena

4.3.2. Anomalie sur les écoulements du Chari - Logone

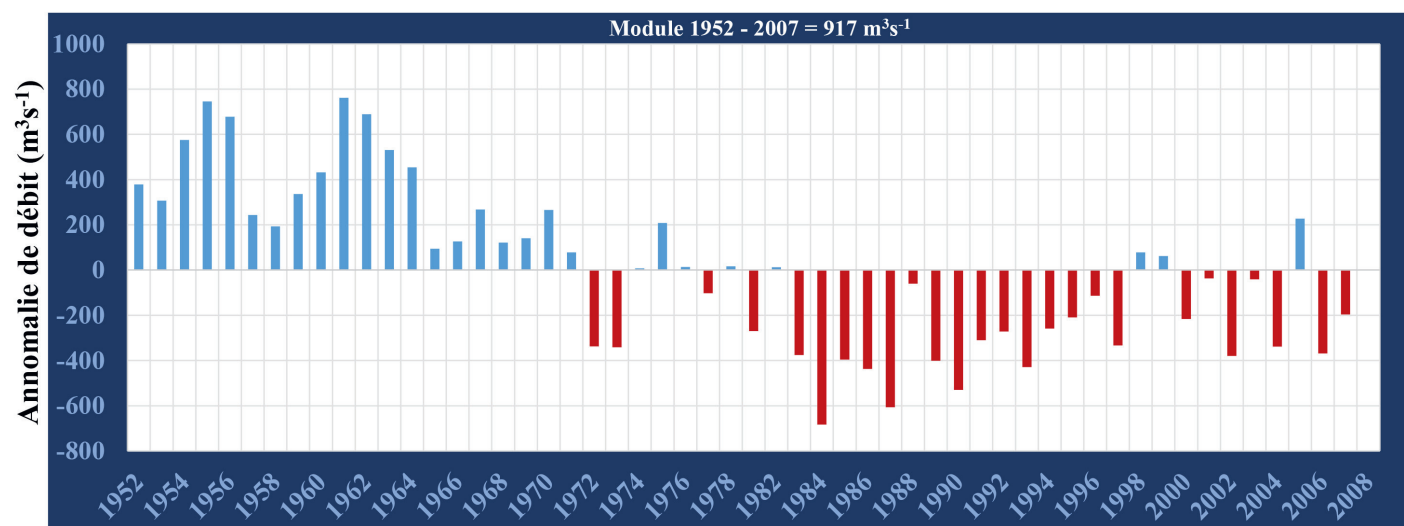


Figure 18. Anomalie des débits moyens à la station de N'Djamena

4.4. « Bilan » global des écoulements à la station de N'Djamena

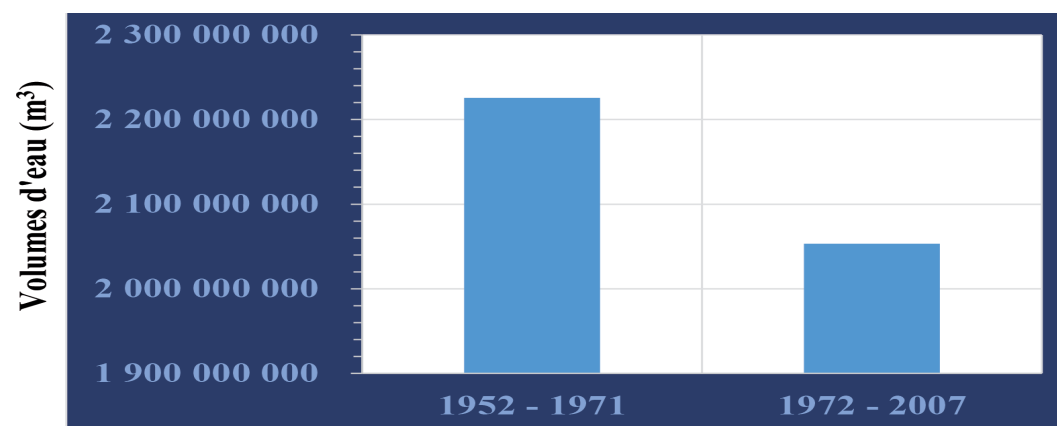


Figure 19. Cumul des débits moyens à la station de N'Djamena

4.5. A retenir

- La variabilité pluviométrique récente au Sahel a eu des conséquences sur les écoulements dans le bassin du Lac Tchad. Durant la décennie 1970 – 1980, les débits du fleuve Chari - Logone ont baissé de plus de 50 %.
- Ces variabilités hydro-climatiques ont entraîné de fortes variations interannuelles du lac Tchad. La surface en eau libre du lac a fortement diminué durant la période 1963-1984. En seulement dix (10) ans, entre 1963 et 1973, le Lac a perdu plus de 30 % de sa superficie d'eau libre.
- A partir du milieu des années 2000, une amélioration des conditions pluviométriques et hydrologiques a été constatée.
- Depuis le début des années 2000, la surface en eau libre du Lac Tchad est marquée par une tendance à l'augmentation.

4.6. Perspectives de recherche

- Modélisation de l'évolution future des débits de l'hydrosystème Chari - Logone en lien avec le changement climatique ;
- Caractérisation des risques hydro-climatiques futurs ;
- Modélisation de l'évolution future du lac Tchad.

4.7. Références bibliographiques

- CBLT, & GIZ. (2016). Rapport_sur_letat_de_lecosysteme_du_bassin_du_lac_tchad.pdf. 236. http://www.cblt.org/sites/default/files/download_documents/rapport_sur_letat_de_lecosysteme_du_bassin_du_lac_tchad
- Cisse MT, Sambou S, Dieme Y, Diatta C, Bop B. (2014). Analyse des écoulements dans le bassin du fleuve Sénégal de 1960 à 2008. *Revue des sciences de l'eau* 27(2):167-187
- Descroix L, Genthon P, Amogu O, Rajot JL, Sighomnou D, Vauclin M. (2012). Change in Sahelian Rivers hydrograph: the case of recent red floods of the River Niger in the Niamey region. *Glob Planet Change* 98-99:18-30
- Gao, H., Bohn, T. J., Podest, E., McDonald, K. C., & Lettenmaier, D. P. (2011). On the causes of the shrinking of Lake Chad. *Environmental Research Letters*, 6(3), 034021. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/6/3/034021>
- Lemoalle, J., & Magrin, G. (Éds.). (2017b). Le développement du lac Tchad / Development of Lake Chad : Situation actuelle et futurs possibles / Current Situation and Possible Outcomes. IRD Éditions. <http://books.openedition.org/irdeditions/11648>
- Mahmood, R., & Jia, S. (2018). Analysis of causes of decreasing inflow to the Lake Chad due to climate variability and human activities. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 1-42. <https://doi.org/10.5194/hess-2018-139>
- Olivry, J.-C., Chouret, A., Vuillaume, G., Lemoalle, J., & Bricquet, J.-P. (1996). Hydrologie du lac Tchad. Edition ORSTOM, Paris, 302 pages.
- Sakho, I., Dupont, J.-P., Cisse, M. T., Janyani, S. E., & Loum, S. (2017). Hydrological responses to rainfall variability and dam construction : A case study of the upper Senegal River basin. *Environmental Earth Sciences*, 76(6), 253. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6570-4>
- Séguis L, Cappelaere B, Milési G, Peugeot C, Massuel S, Favreau G. (2004). Simulated impacts of climate change and land-clearing on runoff from a small Sahelian catchment. *Hydrol Process.*, 18, 3401-3413
- Vörösmarty CJ, Sahagian D. (2000). Anthropogenic disturbance of the terrestrial water cycle. *Bioscience* 50(9):753-765

RIVER DISCHARGE MODELING OVER THE FALEME CATCHMENT AT KIDIRA

Mamadou Lamine MBAYE ^{1*}, Khadidiatou SY¹, Samo DIATTA¹

¹Laboratoire d'Océanographie, des Sciences de l'Environnement et du Climat (LOSEC), Université Assane SECK de Ziguinchor BP 523, Sénégal

*corresponding-author: mlmbaye@univ-zig.sn

Abstract

In this study we assess the hydrological simulations of the Cetemps Hydrological Model (CHYM) during the historical and the future periods under the new climate scenarios SSP1-2.6 and SSP5-8.5. The evaluation of the CHYM during the historical period shows that the mean observed flow is closer to the median simulated flow; and the observed river flow is between the simulated low flow (5th percentile) and the high flow (95th percentile). Moreover, the Faleme catchment is likely to experience a decrease of river discharge particularly from mid to end of this century. This decline of stream flow may affect negatively the socio-economic activities that use water resources of the catchment.

Keywords: *Hydrological modeling, Faleme catchment, climate change scenarios*

1. Introduction

Water management planners are facing considerable uncertainties related with the future availability of water resources and extreme events (such as floods and droughts) worldwide. In addition, climate change and its potential impacts on the hydrological system are increasingly contributing to these uncertainties. Several studies over the region have shown that river discharge variations are highly affected by rainfall fluctuations (Descroix et al., 2009, Mbaye et al., 2015, Ruelland et al., 2012, Bodian et al., 2015, etc.) have found a decrease of annual river discharge over the Sudanian areas due to the strong decline of rainfall. In the Senega river basin, hydrological droughts have reduced rainfed agriculture, decreased the seasonal flooding of wetlands, limited economic development, and in the overall, enhanced poverty (Oyebande and Odunuga, 2010). However, there is lack of studies that use hydrological models with very high spatial resolution to address the occurrence of hydrometeorological extremes in a changing climate. In this study, we use a very high resolution and distributed hydrological model (CHYM) to investigate the potential changes of river discharge and the occurrence of extreme flows in the Faleme catchment which has many socio-economic stakes. The findings of this work could be used by water resources managers and in decision making to guide adaptation strategies.

2. Study area

The Faleme catchment is located between the longitudes 11°12'W -12°15'W and the latitudes 12°11'N -14°27'N. This catchment is one of the main tributaries on the left bank of the Senegal River Basin. It covers an area of 28,900 km², it is shared between three states which are: Senegal, Mali and Guinea. The main gauged station is Kidira where our analysis will be focused. The catchment is within Guinean, South Sudanian and North Sudanian climatic domains (Faye and Sow, 2014).

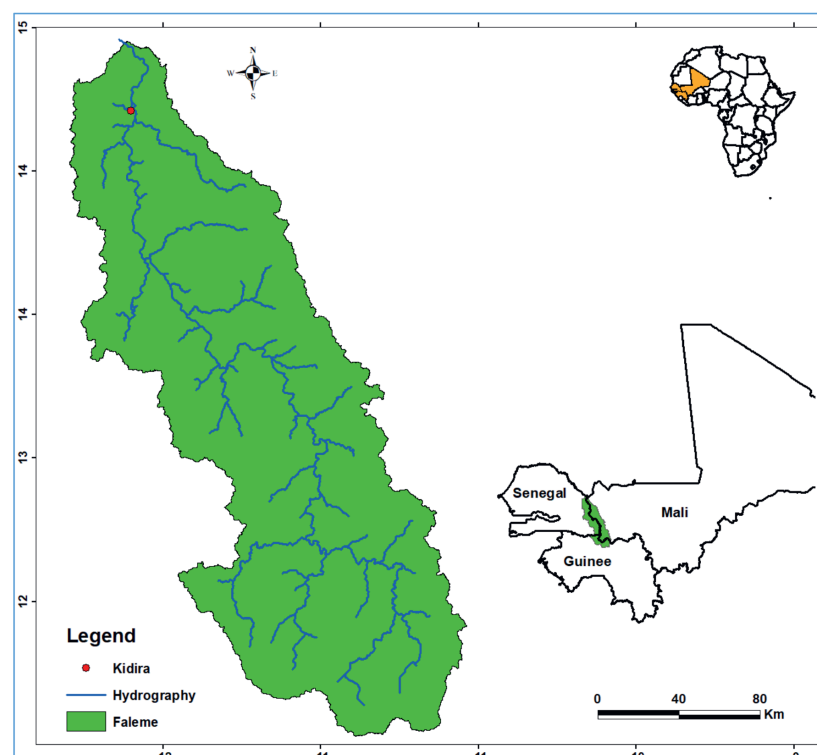


Figure 1: The Faleme catchment

3. Data and Methods

In this study, we use hydrological simulations from the CHYM (Cetemps Hydrological Model). The data cover the period 2015-2099 under two scenarios SSP1-2.6 and SSP5-8.5; the spatial resolution of the data is 6 km. Shared Socioeconomic Pathways (SSPs) are scenarios of projected socioeconomic global changes up to 2100. The CHYM hydrological is forced by output from CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 6). CHYM is a distributed grid-based hydrological model developed by Cetemps Center of Excellence at the University of L'Aquila.

We first evaluate the historical simulations by computing the low flow (5th percentile), median flows (50th percentile) and the high flow (95th percentile) from yearly maximum flow for 12 return periods (2,5,10, 20, 30,40,50,60,70,80,90,100) at the main gauged station Kidira. Three time slices are considered 1985-2014 (historical), 2041-2060 (mid future) and 2080-2099 (far future). The changes represent the difference between future period and historical.

4. Results and Discussions

Water management planners are facing considerable uncertainties related with the future availability of water resources and extreme events (such as Figure 2 shows the extreme peak flows and return periods from observations and simulations during the historical period (1981-2003)). The 5th, 50th and 95th percentiles are simulations from the CHYM hydrological model. We found that the mean observed flows and the 50th percentile are between the low flows (5th percentile) and the 95th percentile (very high flows). Furthermore, the 50th percentile is closer to the observations. This reveals that the hydrological model CHYM is able to reproduce the flow characteristics as found by Di Sante et al. (2021).

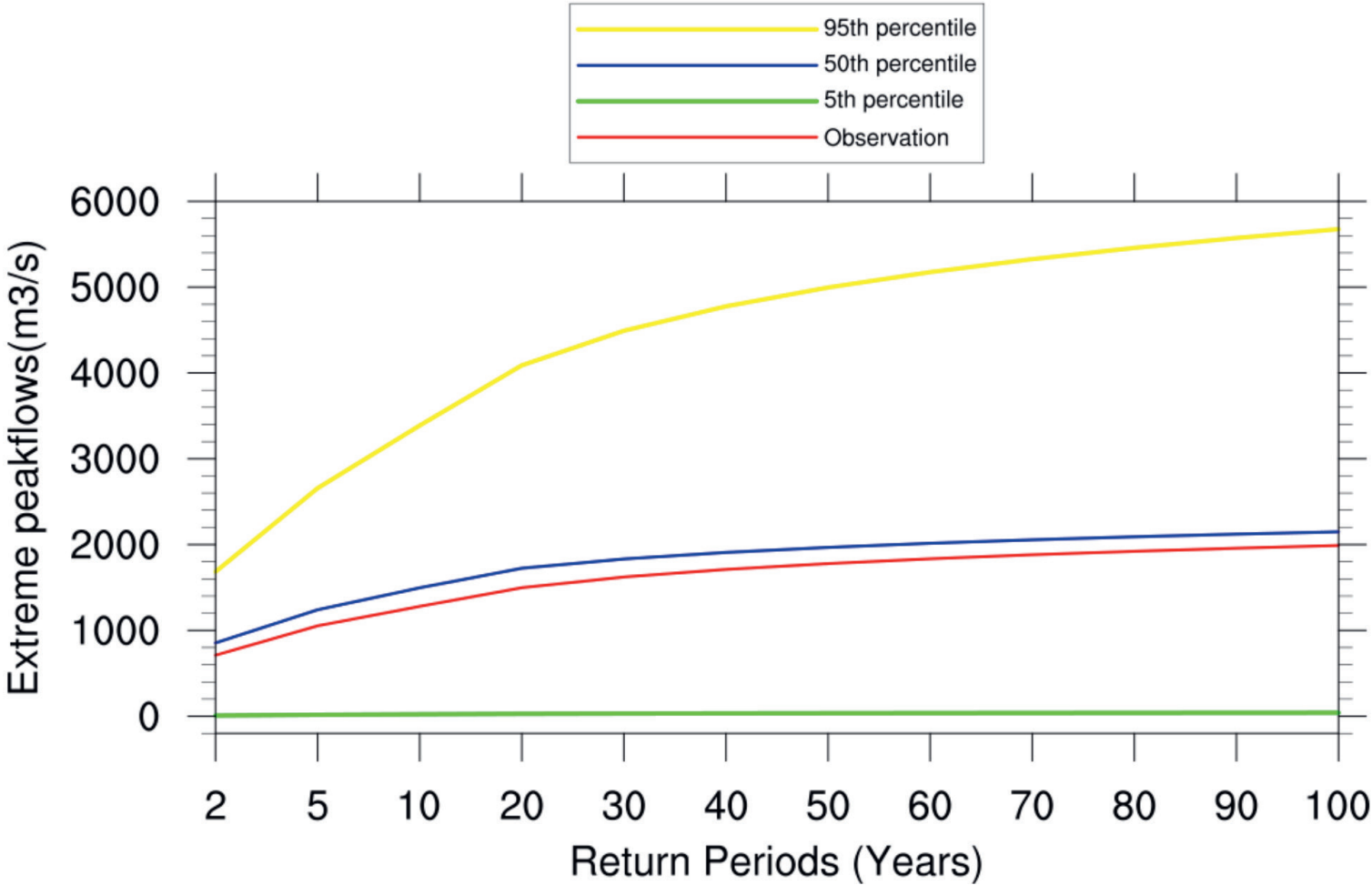


Figure 2: Extreme Peak flows and Return periods from observations and simulations (1981-2003)

During the 21st century, the faleme river basin is likely to experience an increase of river flows which is greater than the mean flows from 2015 to 205 (Figure 3). However, from mid to end of century, the river discharge is projected to decrease. This decline of streamflow can be due to an increase of potential evapotranspiration and a decrease of rainfall. In addition, it is noted a high interannual variations of river flows. These situations may impact negatively the socioeconomic activities which use the water resources of the Faleme catchment.

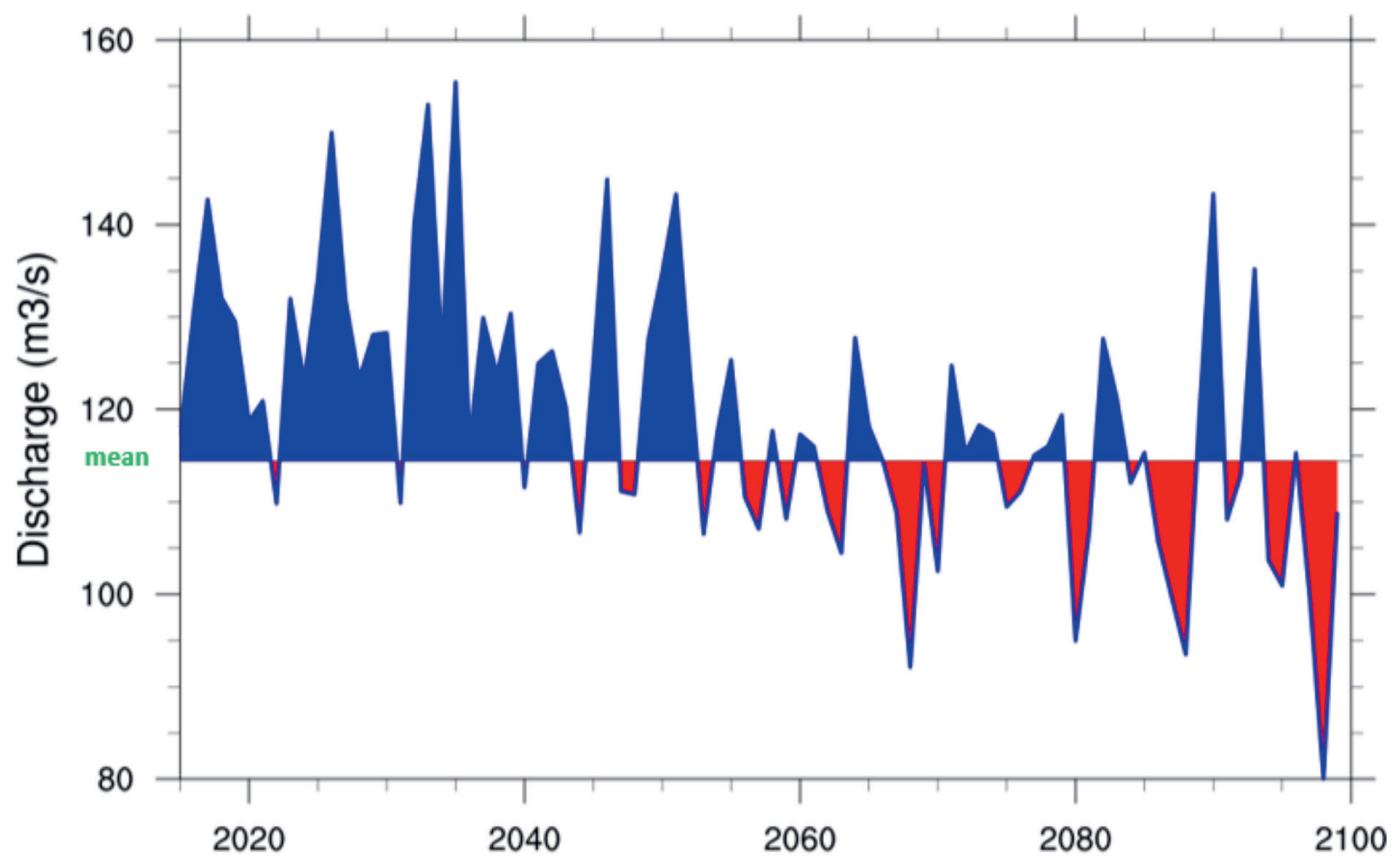


Figure 3: Interannual variations of river river discharge at Kidira (2015-2099) under ssp5-8.5

The monthly changes of river discharge under two scenarios (ssp-12.6 and ssp5-8.5) and two time slices (2041-2060, 2080-2099) are given in figure4. It can be noted that during low flows, a general decrease of river flows up to 30%. However, slight increase is found (up to 10%) during the high period flows particularly in September and October. The changes are more pronounced under the extreme high scenarios ssp5-8.5. This latest scenario is characterised by the highest GHGs emission; and a consequence by greater warming which will lead to higher evapotranspiration rates. These monthly reduction of water flow is in line with the downward trend of the interannual variations of river discharge.

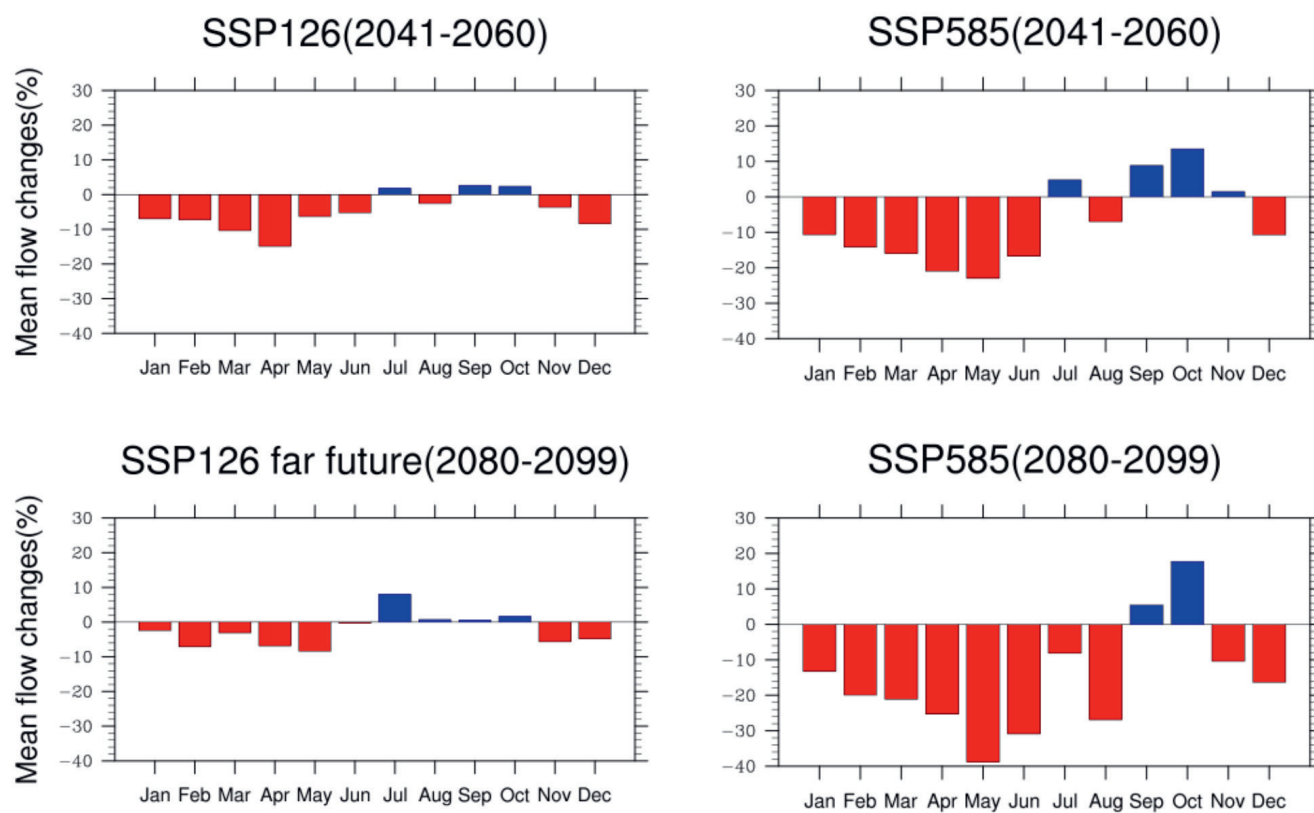


Figure 4: Monthly changes of river discharge under climate changes scenarios

5. Concluding Remarks

In this study, an assessment of hydrological simulations was done over the Faleme catchment. The hydrological simulations were obtained from the distributed hydrological model CHYM. The evaluation of the CHYM output during the historical period show that the model was able to reproduce fairly the observed mean river discharge and the low and high flow. As for the future, we found a downward trend of streamflow from 2015 to 2099; this trend is accompanied with high interannual variations of river flow. Furthermore, in the mid (2041-2060) and far (2080-2099) future, a general decrease of river discharge is found during the months of low flow, while slight increase is found in September and October. However, this work should be extended to other basin in order to see the performance of the CHYM hydrological model.

6. Outlook

Further works could address the following aspects:

- What will be the occurrence of hydrometeorological extremes and the associated uncertainties in coming decades?
- How hydrometeorological extremes will affect the availability of water resources (both quantity and quality), and water infrastructures in the basin?
- How Integrated Water Resources Management (IWRM) could be a powerful tool in the context of climate change?
- Which hydroclimate services are needed to accompany decision making?

Aknowlgement

The authors thank Fabio Di Sante and Erika Coppola from the Earth System Physics (ICTP/Trieste) for giving us the data. We are further thankful to the PED (Pole Eau de Dakar) for the great initiative.

References

- Bodian Ansoumana, Alain Dezetter & Honoré Dacosta (2015). Rainfall-runoff modelling of water resources in the upper Senegal River basin, *International Journal of Water Resources Development*, 32 (1), p. 89-101. ISSN 0790-0627.
- Descroix, L., Mahe, G., Lebel, T., G., Favreau, G., Galle, S., Gautier, E., Olivry, J-C., Albergel, J., Amogu, O., Cappelaere, B., Dessouassi, R., Diedhiou, A., Le Breton, E., Mamadou, I., and Sighomnou, D., (2009): Spatio-Temporal Variability of Hydrological Regimes Around the Boundaries between Sahelian and Sudanian Areas of West Africa: A Synthesis, *J. Hydrol., AMMA special issue.*, 375, 90-102
- Di Sante, F., Coppola, E., & Giorgi, F. (2021). Projections of river floods in Europe using EURO CORDEX, CMIP5 and CMIP6 simulations. *International Journal of Climatology*, 41(5), 3203-3221.
- Faye C., Sow A. A., (2014). Analyse de la variabilité des ressources en eau dans le bassin de la Falémé par modélisation hydrologique, 14, 12,9p.
- Mbaye, M.L., Hagemann, S., Haensler, A., Stacke, T., Gaye, A.T. and Afouda, A. (2015). Assessment of Climate Change Impact on Water Resources in the Upper Senegal Basin (West Africa). *American Journal of Climate Change*, 4, 77-93. <http://dx.doi.org/10.4236/ajcc.2015.41008>
- Oyebande, L., Odunuga, S., (2010). Climate change impact on water resources at the 129 transboundary level in West Africa: the cases of the Senegal, Niger and Volta Basins, *Open Hydr. J. Vol 4 (1). Bentham Science Publishers Ltd, UK.* 163-172.
- Ruelland, D., Ardoin-Bardin, S., Collet, L., and Roucou, P., (2012). Simulating future trends in hydrological regime of a large Sudano-Sahelian catchment under climate change, *J. Hydrol.*, 424- 20 425, 207-216, doi:10.1016/j.jhydrol.2012.01.002.

QUELLES SONT LES ZONES DE RECHARGE DU BASSIN AQUIFÈRE TRANSFRONTALIER SÉNÉGALO-MAURITANIEN ?

Serigne FAYE^{1*}, Issa SAKHO²

¹ Ecole Doctorale Eau, Qualité et Usages de l'Eau (EDEQUE), Université Cheikh Anta Diop, Dakar, Sénégal.

² Université Amadou Mahtar MBOW, UMR Sciences, Technologies Avancées et Développement Durable, Cité Keur Gorgui, Dakar, Sénégal

*Corresponding author : serigne.faye@ucad.edu.sn

1. Introduction

Le bassin aquifère transfrontalier sénégal-mauritanien (BASM) constitue un important réservoir d'eau souterraine, partagée entre les 4 Etats riverains : le Sénégal, la Mauritanie, la Gambie et la Guinée Bissau. Ainsi, le BASM représente un potentiel et un atout incommensurable dans le cadre de la politique d'accès universel à l'eau propre à chaque Etat. Cependant, la coopération transfrontalière est fondamentale pour accompagner ce cadre stratégique politique, à l'image des bassins fluviaux partagés dont la gestion est administrée à travers des organismes de bassin : exemple de l'OMVS, OMVG, etc. Ainsi, l'enjeu majeur est de promouvoir la résilience, le développement durable et la stabilité de la région à travers une gestion stratégique de cet important aquifère partagé.

Le présent article est une contribution pour une meilleure compréhension des caractéristiques du bassin aquifère sénégal-mauritanien ainsi que ses différentes zones de recharge.

2. Unités aquifères et morphologie du maastrichtien

Les unités aquifères au Sénégal sont :

- Quaternaire & Continental terminal/ sable
- Eocene / calcaire
- Paléocène / calcaire
- Maastrichtien / sable et grès

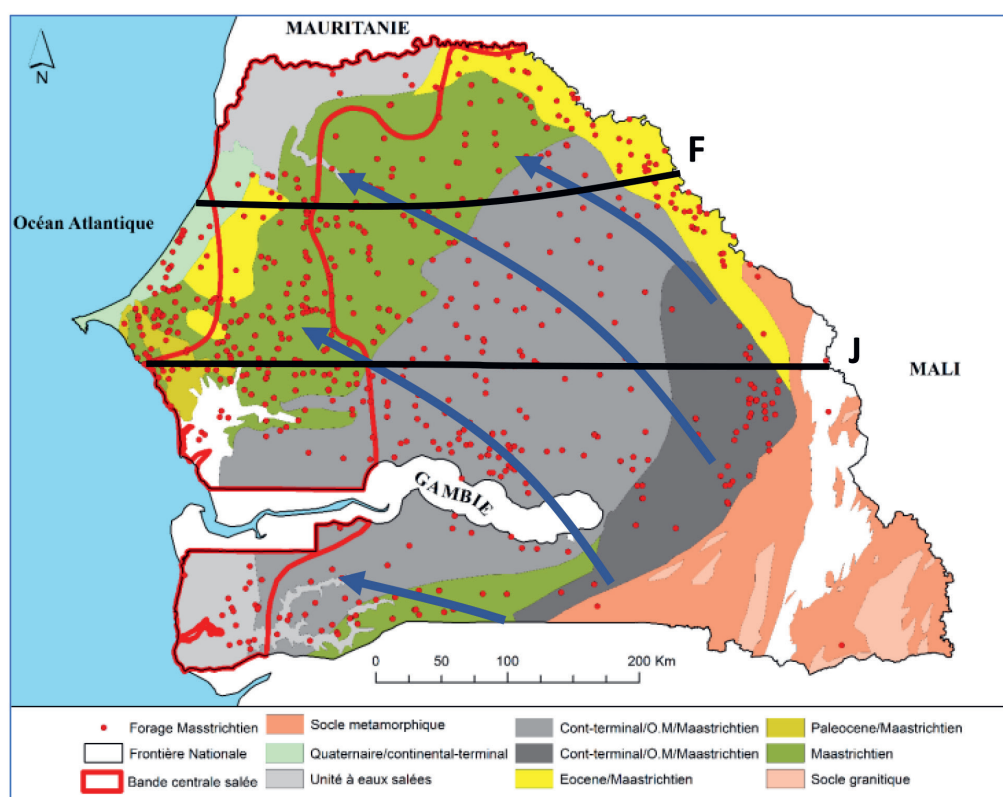


Figure 1. Les unités aquifères au Sénégal

Plus importante nappe du Sénégal, l'aquifère profond maastrichtien couvre les 4/5 du territoire du Sénégal avec une superficie de 150 000 km² (Figure 1). Il constitue un immense réservoir. La nappe est captive et se situe entre 100 et 350 m de profondeur.

Deux grandes caractéristiques de l'aquifère maastrichtien (AM) :

- L'AM s'épaissit et s'approfondit vers l'ouest (Figure 2, coupe F)
- Surrection dans la partie ouest du Horst où il affleure (Figure 2, coupe J)

3. Charge minérale des eaux de l'aquifère du maastrichtien

L'aquifère du maastrichtien est la plus importante réserve souterraine du Sénégal. Cependant, la nappe présente des niveaux de conductivité des très élevés, témoin d'une charge minérale importante (Figure 3).

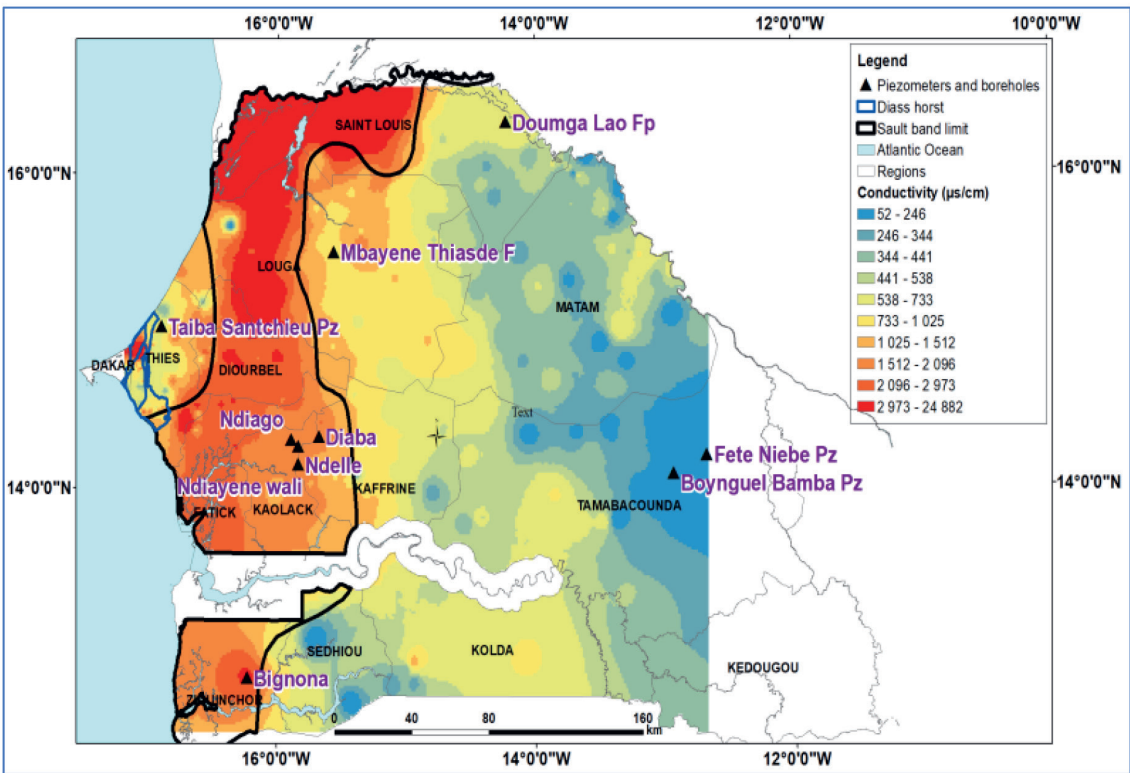


Figure 3. Charge minérale des eaux de la nappe maastrichtienne

Les valeurs les plus élevées sont localisées dans la zone appelée bande centrale salée. Elles se situent entre 1 500 et presque 25 000 µS/cm. La bande centrale salée représente également la zone de plus forte concentration en des eaux souterraines en fluor.

4. Zones de recharge de l'aquifère transfrontalier du maastrichtien

Le bassin aquifère transfrontalier du maastrichtien s'étend depuis la Mauritanie jusqu'en Guinée Bissau. Il s'agit donc d'une importante ressource en eau. Il occupe une place centrale dans le processus d'approvisionnement des populations en eau potable.

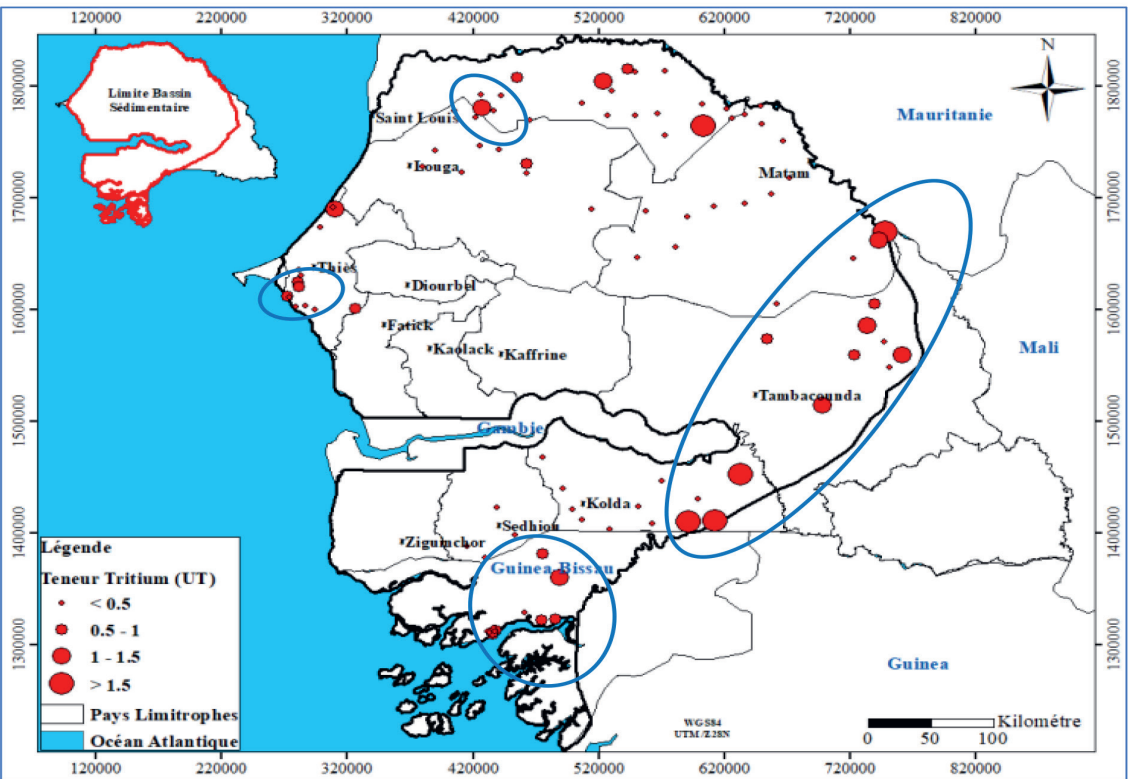


Figure 4. Cartographie des zones de recharge de l'aquifère transfrontalier du maastrichtien

5. A retenir

- L'aquifère maastrichtien couvre les 4/5 du territoire du Sénégal avec une superficie de 150 mille km²,
- Plus importante nappe du Sénégal ;
- Elle est captive et se situe globalement entre 100 et 350 m de profondeur ;
- L'aquifère s'épaissit et s'approfondit vers l'ouest
- Surrection dans la partie ouest du Horst où il affleure
- Direction d'écoulement : Sud-est → Nord-ouest
- Deux zones de recharge confirmées: zone de horst et zone Sud-Est
- Pas de recharge ou faible recharge depuis l'Est à la frontière du fleuve Sénégal
- Echanges de flux possibles au dôme de Guiers dans la zone 4
- Recharge possible à partir de la République de Guinée-Bissau où l'aquifère du Maastrichtien affleure

6. Perspectives

- Améliorer les connaissances sur l'état et le fonctionnement de BASM ;
- Développer un réseau transfrontalier de mesures automatiques avec télétransmission de données ;
- Développer des outils pour le management digital de l'eau et la diffusion de l'information en temps réel ;
- Mettre en place un cadre de coopération transfrontalière autour du BASM, comme un organisme de bassin par exemple ;
- Développer des mécanismes pour promouvoir la résilience, le développement durable et la stabilité de la région à travers une gestion stratégique de cet aquifère partagé.



CHAPITRE 2

GRANDS BARRAGES EN AFRIQUE DE L'OUEST & IMPACTS

LES GRANDES INFRASTRUCTURES HYDRAULIQUES (BARRAGES) EN AFRIQUE DE L'OUEST

Cheikh Faye¹, Soda Loum², Issa Sakho³

¹ Laboratoire de Géomatique et d'Environnement, Département de Géographie, Université Assane Seck de Ziguinchor, BP 523 Ziguinchor (Sénégal).

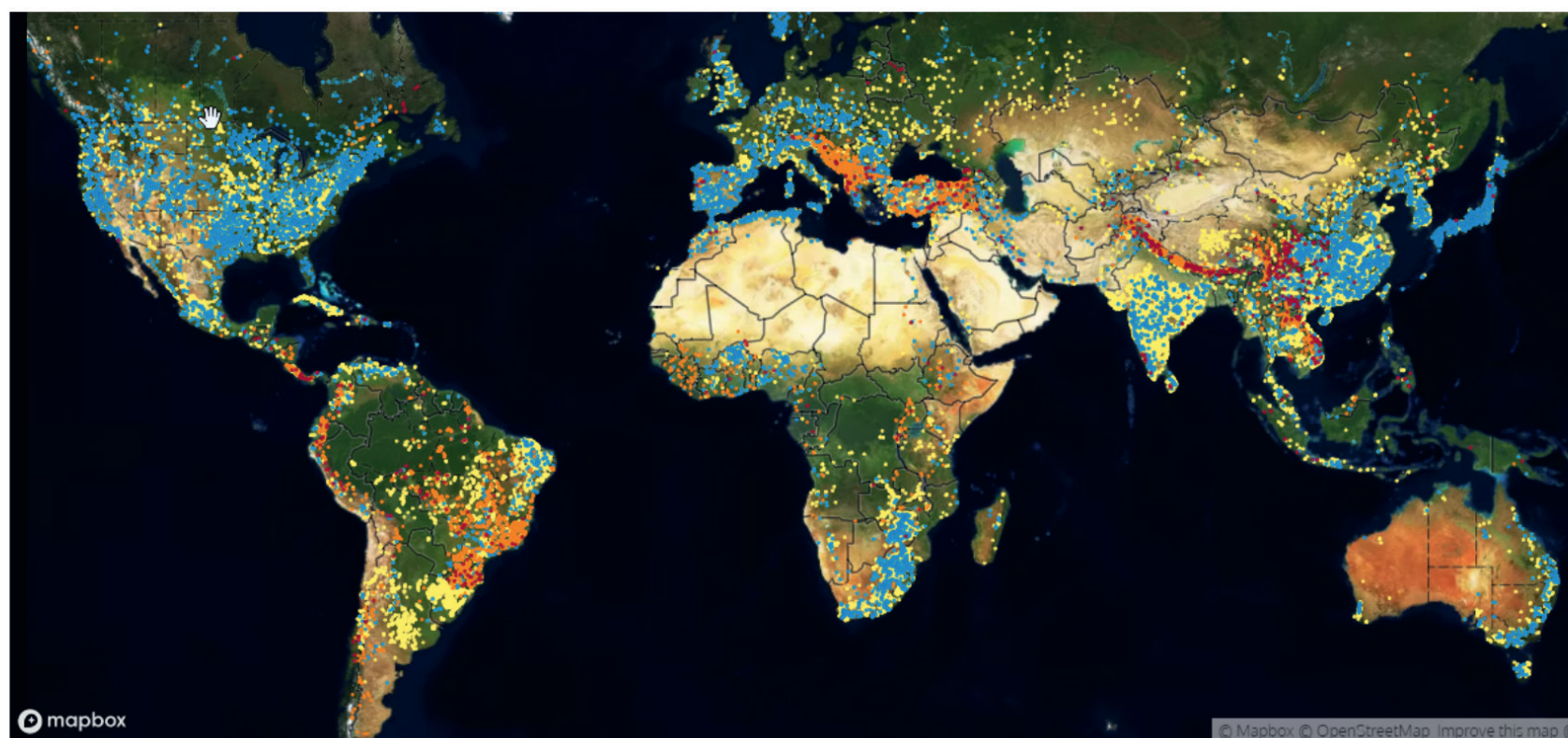
² UFR des Sciences de l'Ingénieur, Université Iba Der THIAM de Thiès, Thiès, Sénégal.

³ UMR Sciences, Technologies Avancées et Développement Durable, Université Amadou Mahtar Mbow de Dakar à Diamniadio (Sénégal).

* Corresponding author: cheikh.faye@univ-zig.sn,

1. Introduction

Dès l'antiquité, les hommes se sont déjà installés près des grands fleuves à l'image du Nil, du Tigre, ou de l'Euphrate pour bâtir les premières civilisations au monde (Nzango, 2018). C'est ainsi qu'on a retrouvé en amont du Caire, les traces des premiers barrages construits sur le Nil (Rollet, 2007). Les Egyptiens se servaient déjà de ces ouvrages pour écrêter les crues du Nil et pour irriguer des terres agricoles dans le désert. Selon le dernier rapport de l'ICOLD en 2011, on compte près de 60 000 grands barrages répertoriés dans le monde (Figure 1), et la majorité d'entre eux sont construits au XXe siècle suite à une forte demande en eau et énergie de l'après-guerre mondiale. Ces ouvrages ont commencé vraiment à émerger dans le monde à partir du XVIIIe siècle grâce à l'avènement de l'énergie hydroélectrique en Europe, comme un « symbole de développement économique, de progrès technologique et de modernisation » (Martins, 2008).



GOODD : Petits barrages visibles sur les images satellite de Google Earth dans le monde (moins de 15 m de hauteur ou avec un réservoir de moins de 0,1 km³) ; GRanD : Grands barrages de plus de 15 m de hauteur ou avec un réservoir de plus de 0,1 km³ ; FHReD construction : Futurs réservoirs et barrages hydroélectriques en construction ; FHReD planned : Futurs réservoirs et barrages hydroélectriques en phase de planification avancée ; Réservoirs : Réservoirs recensés dans le monde.

Figure 1 : Barrages visibles sur les images satellite de Google Earth dans le monde (Source : <http://globaldamwatch.org/map/>)

Depuis lors, les barrages sont considérés comme l'une des composantes principales de la civilisation industrielle. Aucun secteur du génie n'a contribué plus au développement de la civilisation que l'art et la science du contrôle des cours d'eau (Baxter et Glaude, 1980). En revanche, la construction de grands barrages en rivières nécessite de disposer de moyens financiers considérables. Cela explique le faible taux d'électrification de certains bassins tropicaux malgré leurs potentialités hydrauliques remarquables. Mais si certains voient les barrages comme des figures du progrès, ils sont pour d'autres des monuments à l'injustice sociale et au développement destructeur (Fischer, 2001).

La construction des grands barrages en Afrique de l'Ouest est l'une des réponses des gouvernements pour relever les grands défis de la gestion de l'eau afin de répondre aux besoins nationaux en matière d'irrigation et d'électricité. Cependant, leur construction a souvent engendré des impacts socio-économiques et environnementaux importants qui nécessitent aujourd'hui de lourds investissements pour les atténuer. L'Afrique de l'Ouest compte 28 bassins fluviaux transfrontaliers qui couvrent 71 % de la superficie totale de la région (Figure 1). Les plus importants sont le Niger (partagé entre 11 pays

si l'on prend en compte la partie non active du bassin), le Sénégal (4 pays), la Volta (6 pays), le lac Tchad (8 pays), et la Comoé (4 pays). La sous-région dispose aussi de réserves d'eau de plusieurs milliards de mètres cubes, emmagasinées dans des nappes profondes. Toutefois, il existe un paradoxe en ce sens que la ressource vient souvent à manquer lorsqu'elle est requise. La non-disponibilité d'eau douce en Afrique de l'Ouest se fait d'autant plus sentir qu'elle est exacerbée par la forte variation totale de telles infrastructures (Skinner et al., 2009).

Les pays d'Afrique de l'Ouest ont construit plus de 150 grands barrages sur leurs rivières (Figure 2), afin de réguler les cours d'eau et d'augmenter les capacités de stockage de l'eau pour soutenir le développement économique des pays de la région. Au cours des prochaines années, beaucoup d'autres seront construits, en partie pour répondre à une pluviométrie de plus en plus capricieuse (Skinner et al., 2009). Les deux plus grands barrages de l'Afrique de l'Ouest sont : le barrage d'Akosombo sur la Volta au Ghana d'une hauteur de 134 mètres (4ème en Afrique) et d'une capacité de 150 milliards de mètres cubes (3ème en Afrique) ; et le barrage de Kossou sur le fleuve Bandama en Côte d'Ivoire d'une capacité de 28 milliards de mètres cubes (6ème en Afrique). Plus de 50 % des grands barrages d'Afrique de l'Ouest sont prévus pour la production hydroélectrique. Le bassin du Niger est le plus exploité actuellement en Afrique de l'Ouest avec plus de 2 004 MW de capacité hydroélectrique (Autorité du bassin du Niger, 2007). Les barrages permettent aussi la régulation des débits naturels, variables selon les saisons et les années, pour satisfaire la demande en hydroélectricité, la demande industrielle, la navigation, la demande en eau potable et pour l'irrigation. C'est grâce à la construction de ces barrages qu'il est possible d'envisager que l'agriculture irriguée puisse déboucher sur l'autosuffisance alimentaire et, plus généralement, optimiser le développement en Afrique de l'Ouest.

2. Grands barrages en Afrique de l'Ouest

2.1. Distribution spatiale

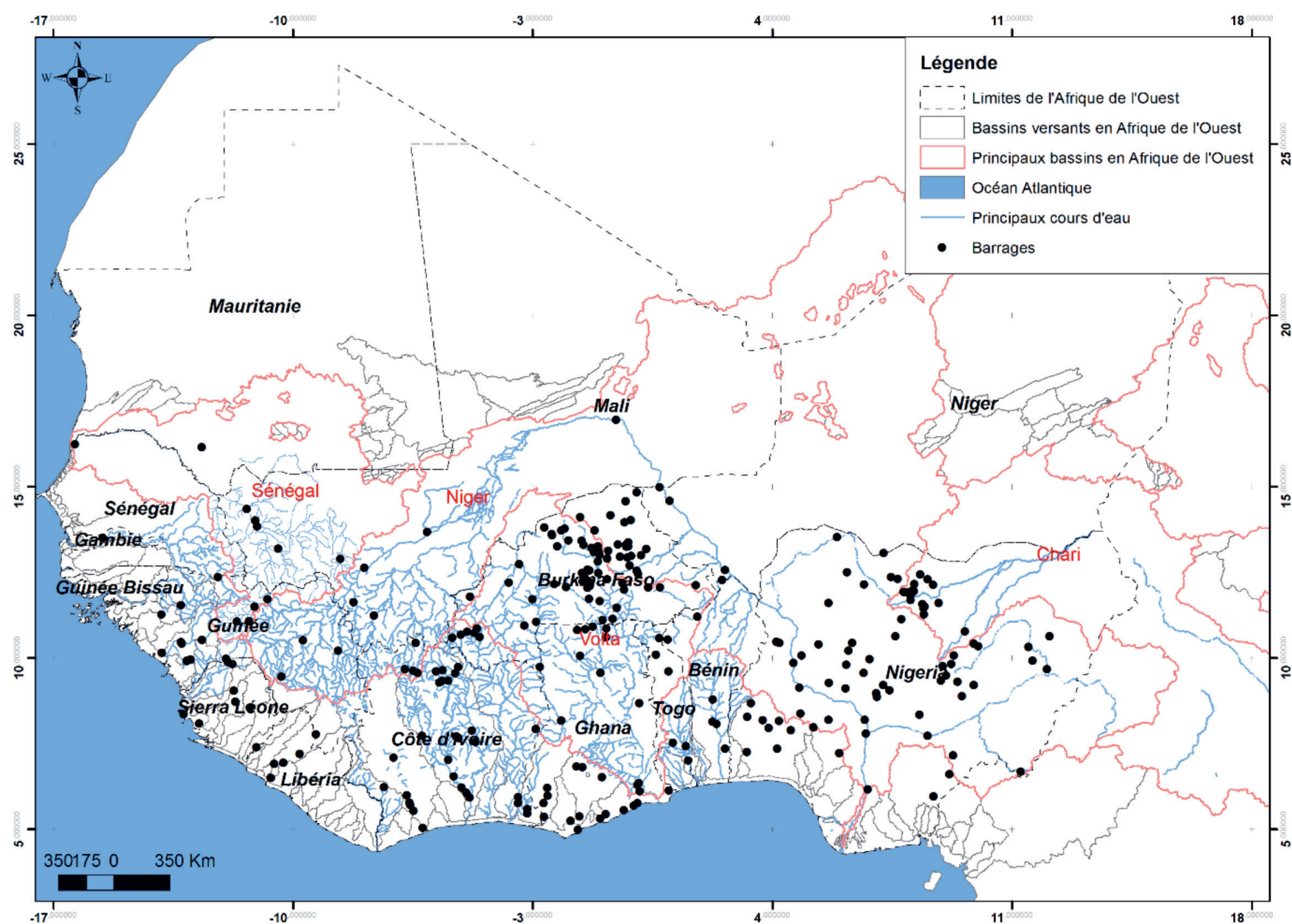


Figure 2 : Localisation des barrages en Afrique de l'Ouest (Source : FAO Aquastat)

2.2. Caractéristiques physiques

2.2.1. Hauteurs

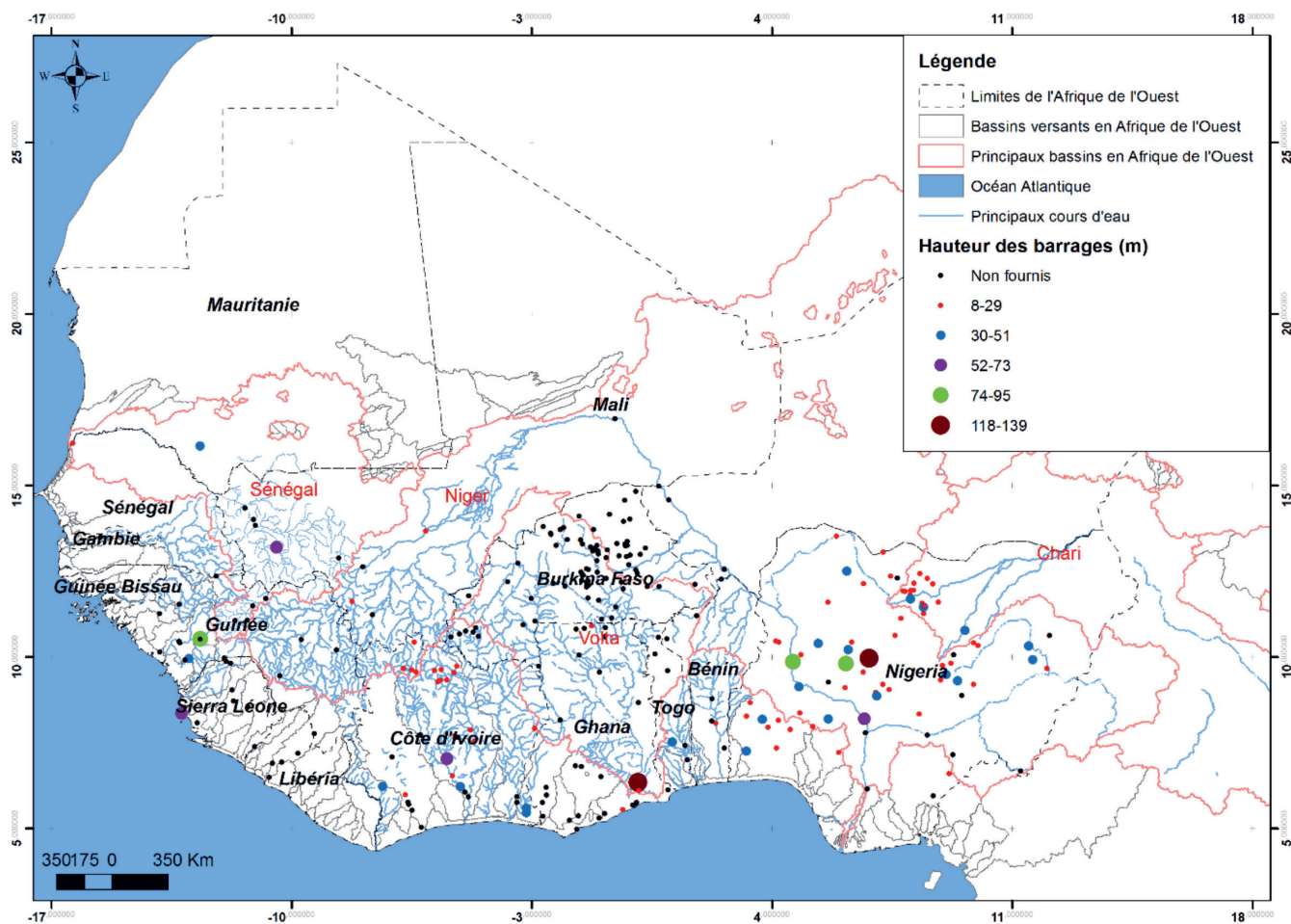


Figure 3 : Hauteur des barrages (en m) en Afrique de l'Ouest (Source : FAO Aquastat)

2.2.2. Superficie des réservoirs

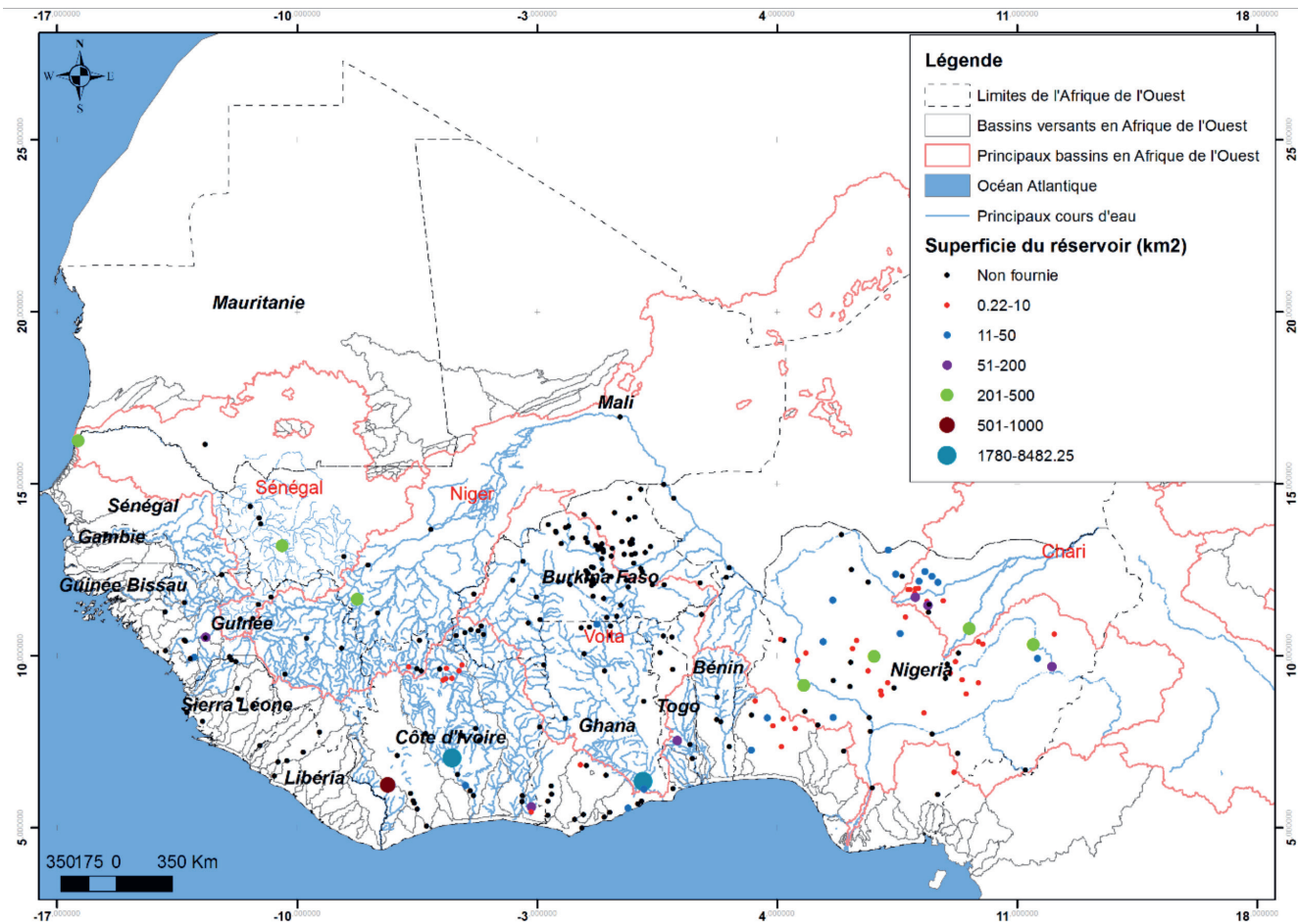


Figure 4 : Superficie des réservoirs (en km²) des barrages en Afrique de l'Ouest (Source : FAO Aquastat)

2.2.3. Capacité des réservoirs (en millions de m³) des barrages

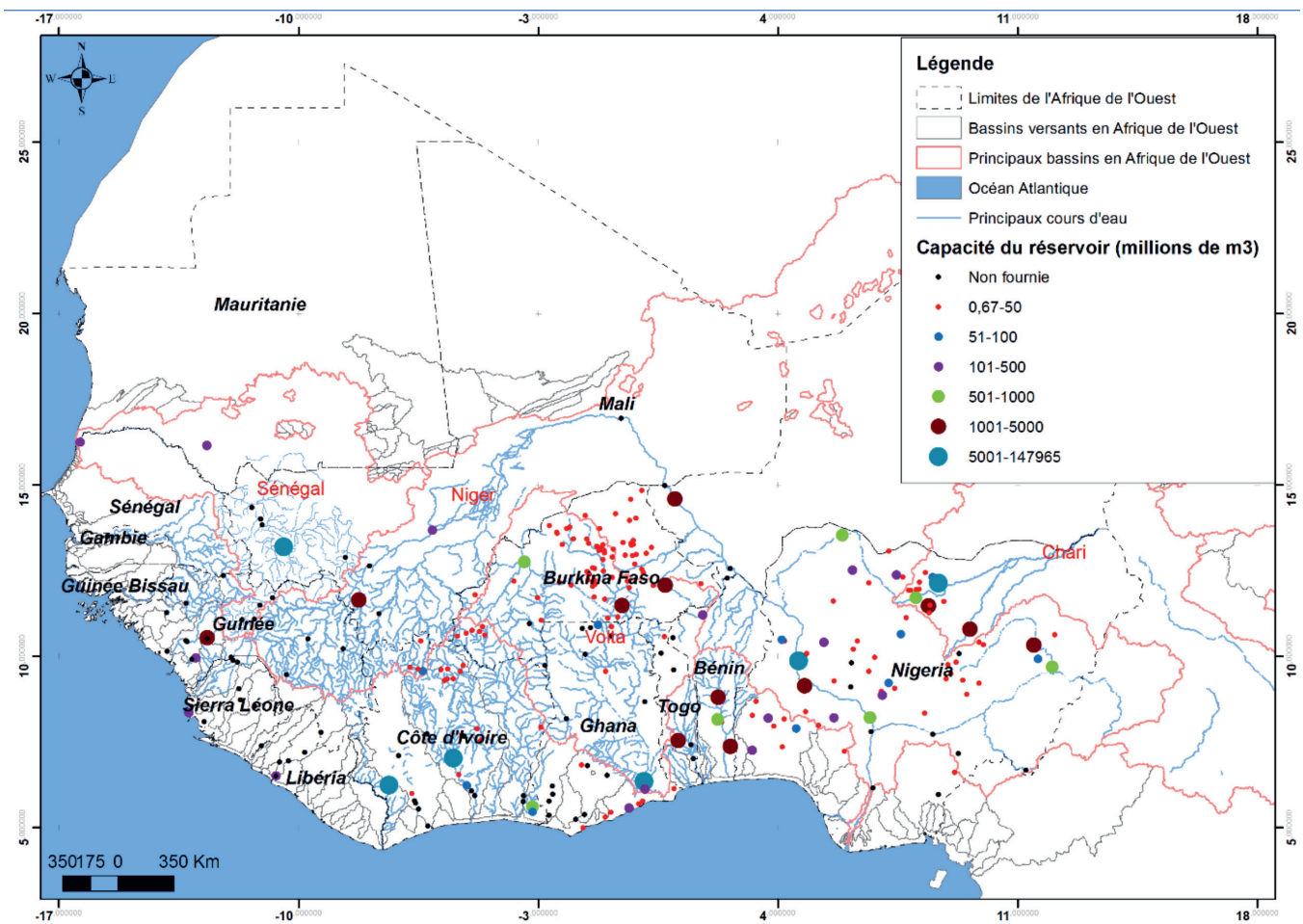


Figure 5 : Capacité des réservoirs (en millions de m³) des barrages en Afrique de l'Ouest (Source : FAO Aquastat)

2.3. Fonctions des barrages en Afrique de l'Ouest
2.3.1. Irrigation

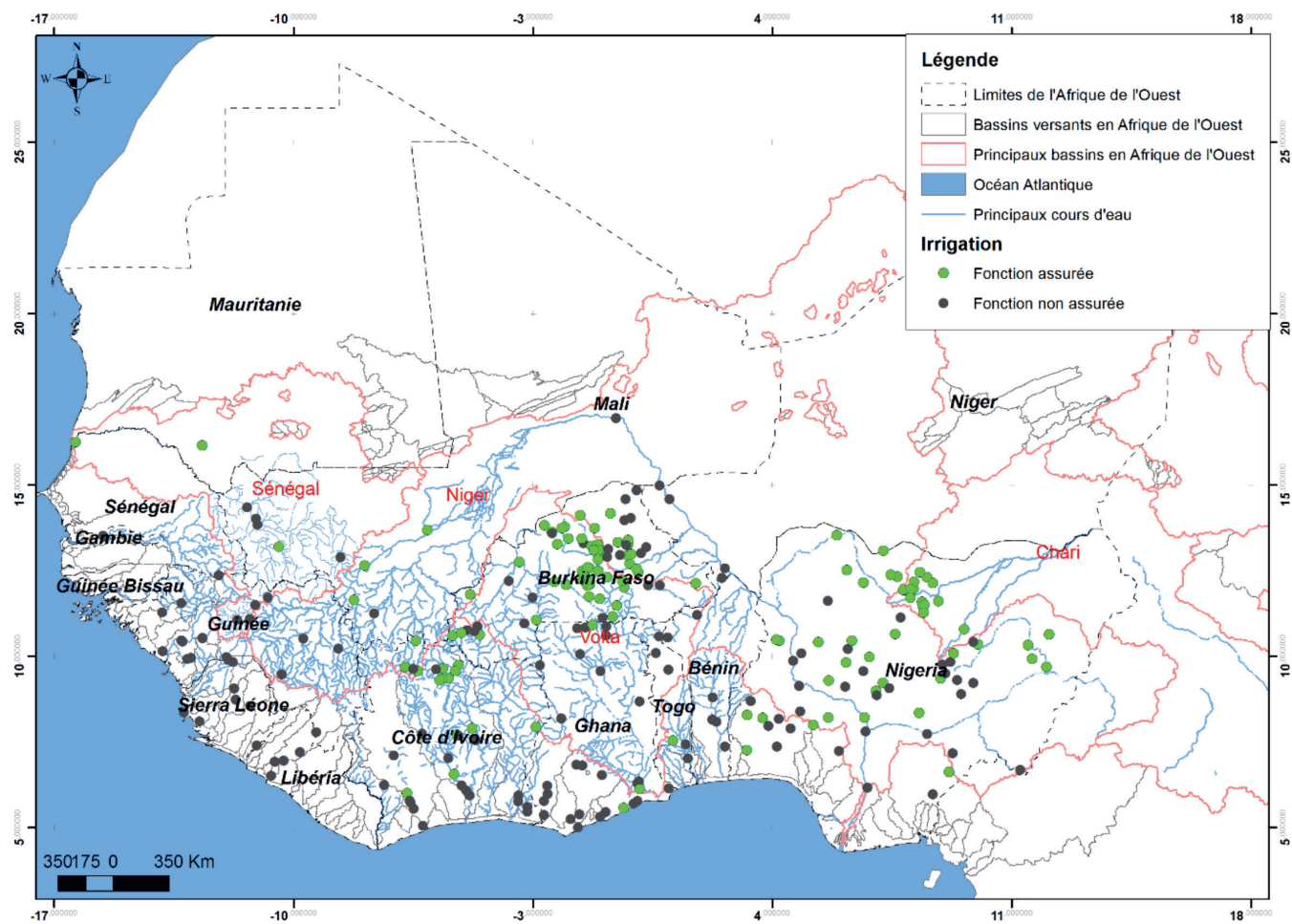


Figure 6 : Fonction d'irrigation des barrages en Afrique de l'Ouest (Source : FAO Aquastat)

2.3.2. Contrôle des crues

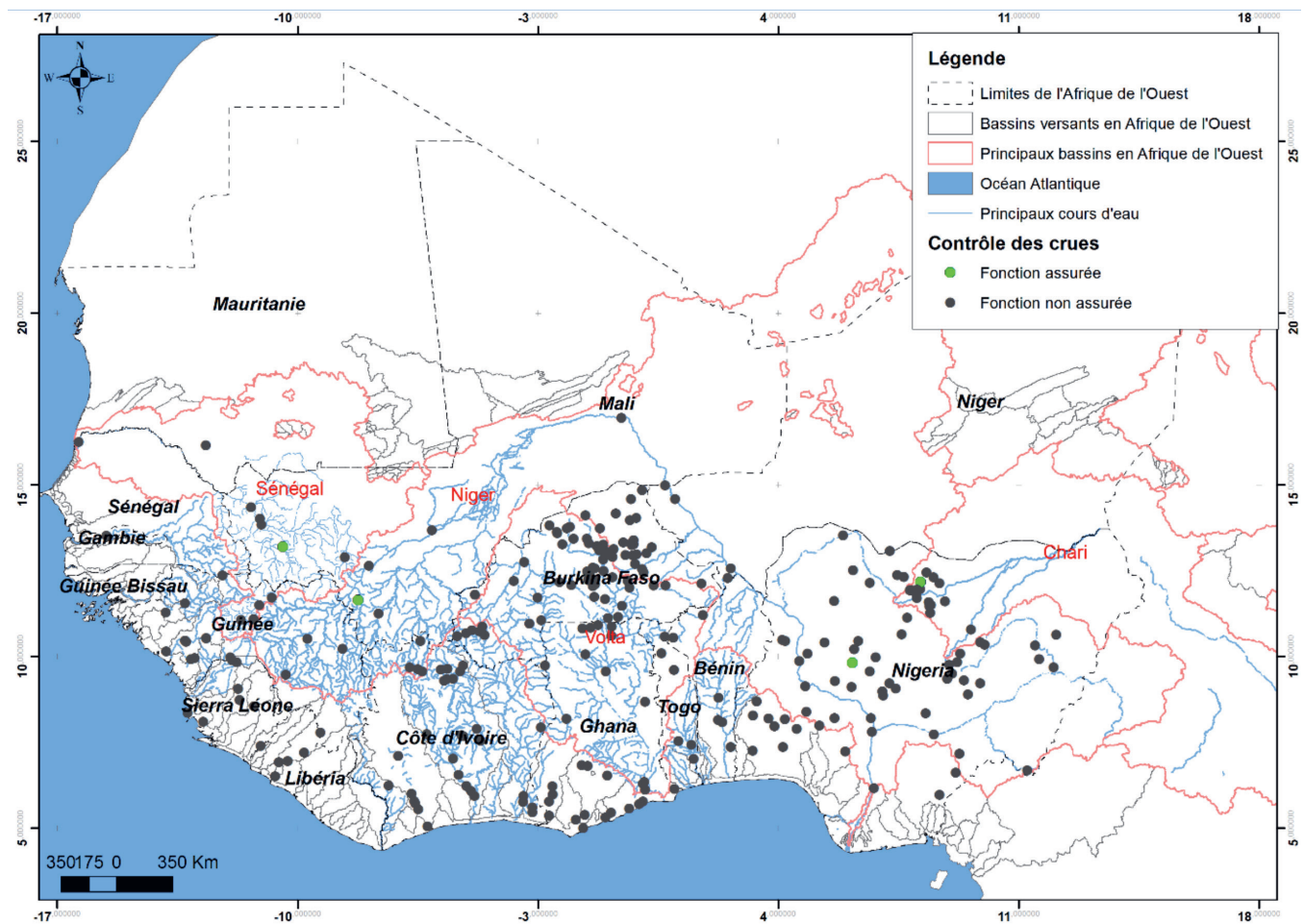


Figure 7 : Fonction de contrôle des crues des barrages en Afrique de l'Ouest (Source : FAO Aquastat)

2.3.3. Production d'énergie

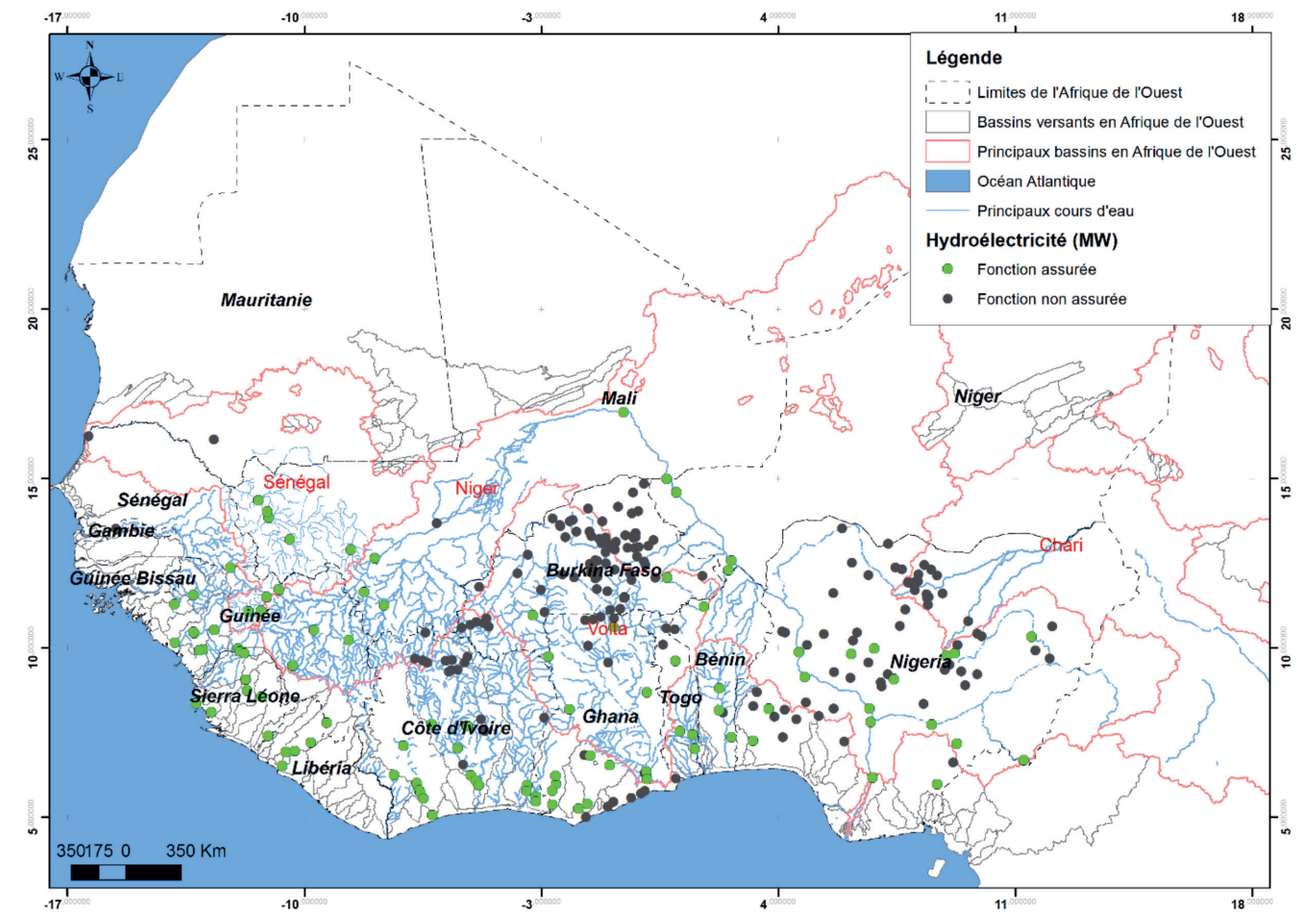


Figure 8 : Fonction de production d'énergie des barrages en Afrique de l'Ouest (Source : FAO Aquastat)

2.3.4. Elevage du bétail

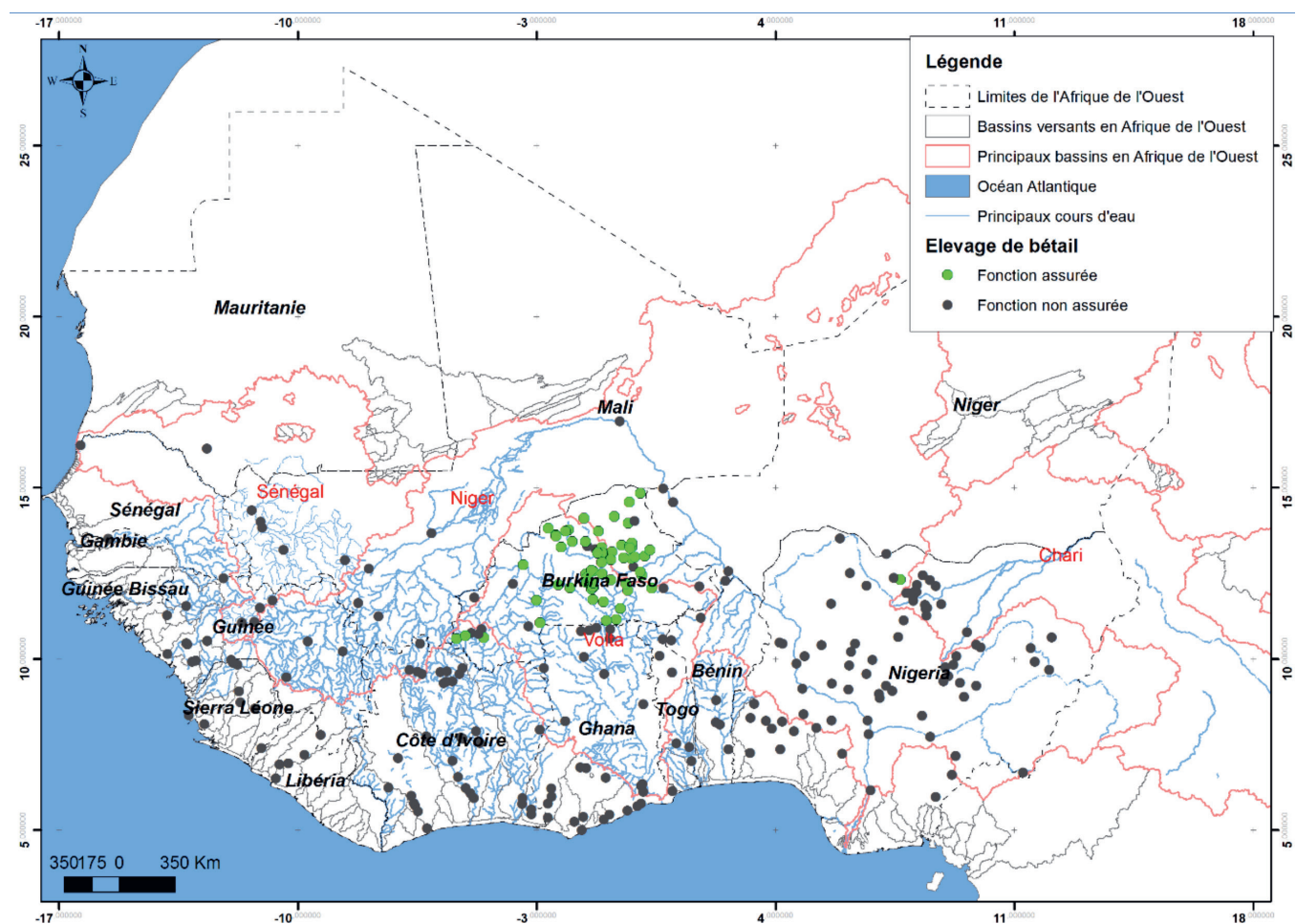


Figure 9 : Fonction d'élevage du bétail des barrages en Afrique de l'Ouest (Source : FAO Aquastat)

2.3.5. Navigation

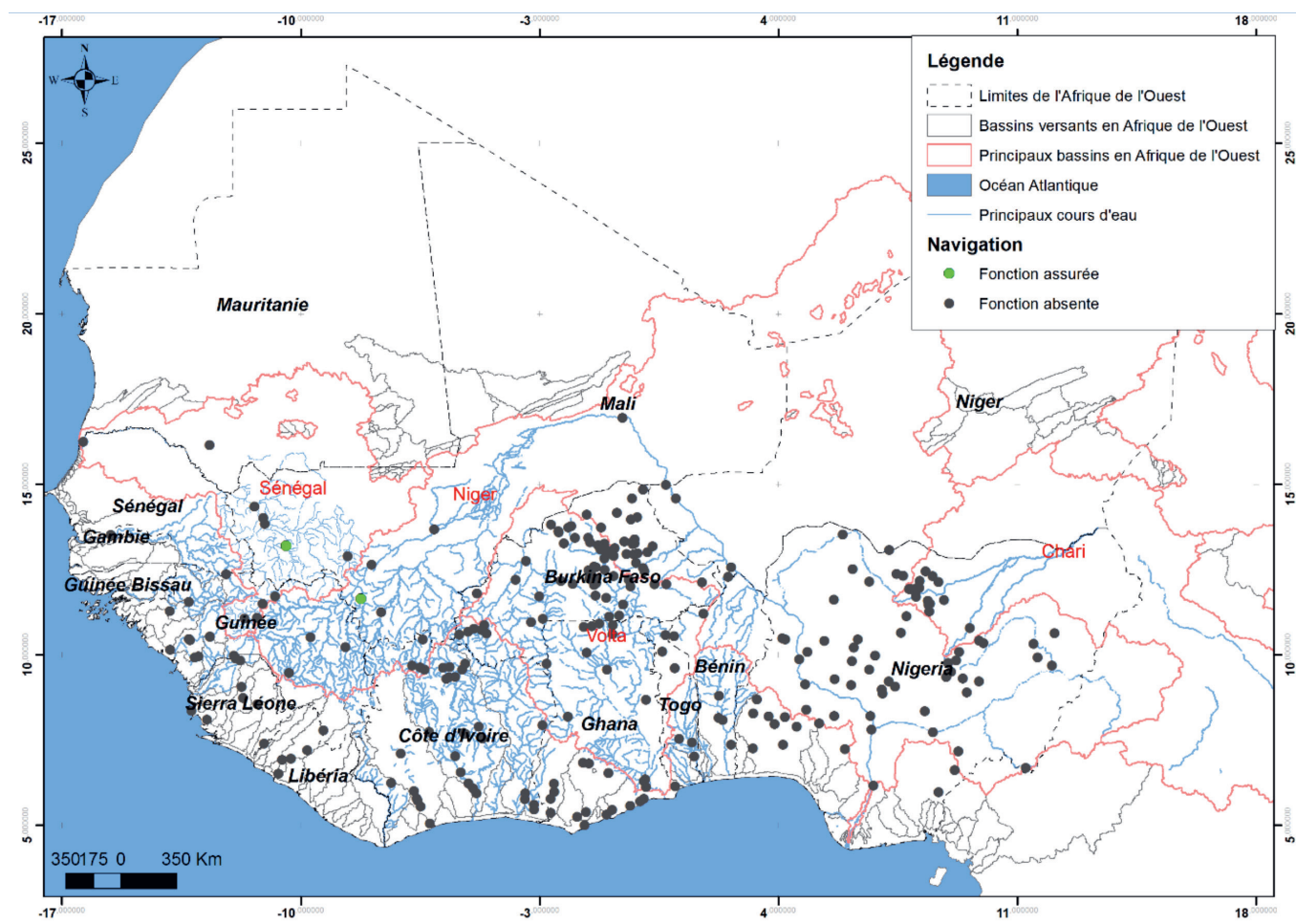


Figure 10 : Fonction de navigation des barrages en Afrique de l'Ouest (Source : FAO Aquastat)

3. A retenir

Pour la Commission internationale des grands barrages (CIGB), un grand barrage a une hauteur de 15 mètres ou plus à partir de la fondation ; ceux d'une hauteur de 5 à 15 mètres et ayant un réservoir d'un volume supérieur à 3 millions de mètres cubes sont également classés dans la catégorie des grands barrages. Sur les 291 barrages présentés, 105 présentent des données de hauteur du barrage et 88 ont une hauteur de 15 mètres ou plus à partir de la fondation et 28 ont une hauteur entre 5 à 15 mètres.

Dans la région de l'Afrique de l'Ouest comme dans plusieurs parties du monde, les hommes ne peuvent se passer de l'apport des barrages et réservoirs pour exploiter la ressource hydrique. Les pays ouest africains dont la consommation est importante mais qui disposent de ressources en eau importantes, répondent à la demande grandissante grâce aux différentes manières de conserver, recycler et réutiliser l'eau. Ainsi, ces infrastructures techniques sont mises en place et permettent de répondre à la demande grandissante due à la croissance rapide de la population.

En Afrique de l'Ouest, ces différents barrages assurent des fonctions multiples : irrigation, approvisionnement en eau, contrôle des crues, production d'énergie, navigation, élevage du bétail,.... Toutefois, les fonctions de loisirs et de contrôle de la pollution ne sont pas assurées par les barrages en Afrique de l'Ouest.

4. Perspectives scientifiques

- Caractérisation des principaux enjeux, défis et risques liés aux potentiels projets de grands barrages: reconnaissance des bénéfices en termes de développement humain et de coûts environnementaux et sociaux
- Analyse des possibles modifications des régimes fluviaux des futurs ouvrages (sédimentation dans les réservoirs et dégradation des lits fluviaux à l'aval; modifications de morphologie des lits des cours d'eau).
- Analyse des différents échecs (rupture de barrage, erreurs d'estimation des capacités hydrauliques et de la durée de vie, promesses de compensation aux populations déplacées non tenues), en marge des grands barrages qui voient le jour.

5. Références bibliographiques

Baxter R. M., and Glaude P., 1980 : Environmental effects of dams and impoundments in Canada: Experience and prospects. Can. Bull. Fish. Aquat. Sci. 205. Dept. Fish. Oceans, Ottawa. vi + 34 p. In Canada C\$2.50; elsewhere C\$3.00.

Fischer W., 2001 : Grands barrages, flux mondiaux et petites gens. *Critique internationale*, 13/4, 123-138.

GRanD, Global Reservoir and Dam database; FAO Aquastat, global water information system of Food and Agriculture Organization of the UN. <http://www.gwsp.org/products/grand-database.html>

Martins D., 2008 : Aménagements hydroélectriques et impacts sur la dynamique des flux d'eau et de sédiments. Le cas du haut Paraná, Brésil. Thèse de Doctorat de l'Université de Lumière Lyon 2. 243 p.

Nzango C., 2018 : Les barrages de l'Oubangui: de l'impact hydraulique actuel à la prospective environnementale. Géographie. Université d'Orléans, 274 p.

Rollet A-J., 2007 : Etude et gestion de la dynamique sédimentaire d'un tronçon fluvial à l'aval d'un barrage : le cas de la basse vallée de l'Ain. Thèse de doctorat de l'Université Jean Moulin (Lyon 3). 305 p.

Skinner, J., Niasse, M. et Haas, L. (dir.) 2009. Partage des bénéfices issus des grands barrages en Afrique de l'Ouest. Série Ressources Naturelles no. 19. Institut International pour l'Environnement et le Développement, Londres, Royaume-Uni, 91 p.

IMPACTS DES BARRAGES SUR L'ÉVOLUTION DES DÉBITS FLUVIAUX

Cheikh Faye¹, Soda Loum², Issa Sakho³

¹ Laboratoire de Géomatique et d'Environnement, Département de Géographie, Université Assane Seck de Ziguinchor, BP 523 Ziguinchor (Sénégal).

² UFR des Sciences de l'Ingénieur, Université Iba Der THIAM de Thiès, Thiès, Sénégal.

³ UMR Sciences, Technologies Avancées et Développement Durable, Université Amadou Mahtar Mbow de Dakar à Diamniadio (Sénégal).

* Corresponding author : cheikh.faye@univ-zig.sn,

1. Introduction

Le régime hydrologique d'une rivière est une force motrice de son écosystème (Sambou et al., 2009 ; Faye et al., 2015a ; Sakho et al., 2017). L'exploitation des barrages et des écluses a des impacts significatifs sur le comportement hydrologique des rivières. Prenant l'exemple du fleuve Sénégal, la section hydrologique du haut bassin a été choisie pour étudier l'influence du barrage de Manantali sur le régime hydrologique du Bafing.

L'objectif de cette étude est de comprendre le changement de régime d'écoulement du fleuve Sénégal causé par le fonctionnement du barrage hydroélectrique de Manantali. Une chronique de débits journaliers mesurés à la station hydrologique de Bakel sur la période 1958-2018 a été utilisée. Sur la base de l'*Indicators of Hydrologic Alteration* (IHA) et de la méthode de la *Range of Variability Approach* (RVA) (Faye 2018 ; Faye et al., 2019) l'altération hydrologique associée au fonctionnement du barrage a été quantifiée.

Les résultats ont montré une forte influence du fonctionnement du barrage de Manantali sur le régime hydrologique du fleuve Sénégal. Les résultats obtenus sur le fonctionnement éco-hydrologique du système fluvial peuvent servir de support pour la gestion intégrée des ressources en eau et des écosystèmes dans le bassin du fleuve Sénégal.

2. Barage de Manantali

2.1. Présentation du barrage de Manantali

Le bassin versant du fleuve Sénégal est un hydrosystème du domaine tropical humide dans sa partie sud et sec dans sa partie nord dont les altitudes varient de 15 m (Bakel : cours médian) à 1330 m (Fouta Djallon) pour une altitude moyenne environ 672 m. Dans le bassin en amont du Sénégal et du Mali, les hauteurs de précipitations sont élevées (> 1800 mm / an à Mamou), les pentes fortes et les roches dans l'ensemble peu perméables. La partie aval et septentrionale (zone de Bakel), est orientée vers le nord, puis l'ouest. Elle présente des pentes (indice de pente = 0,022%) et des altitudes (altitude minimale = 15 m) peu importantes. Les précipitations y sont faibles (≈ 500 mm à Bakel) (Michel, 1973 ; Rochette, 1974 ; Faye, 2015).

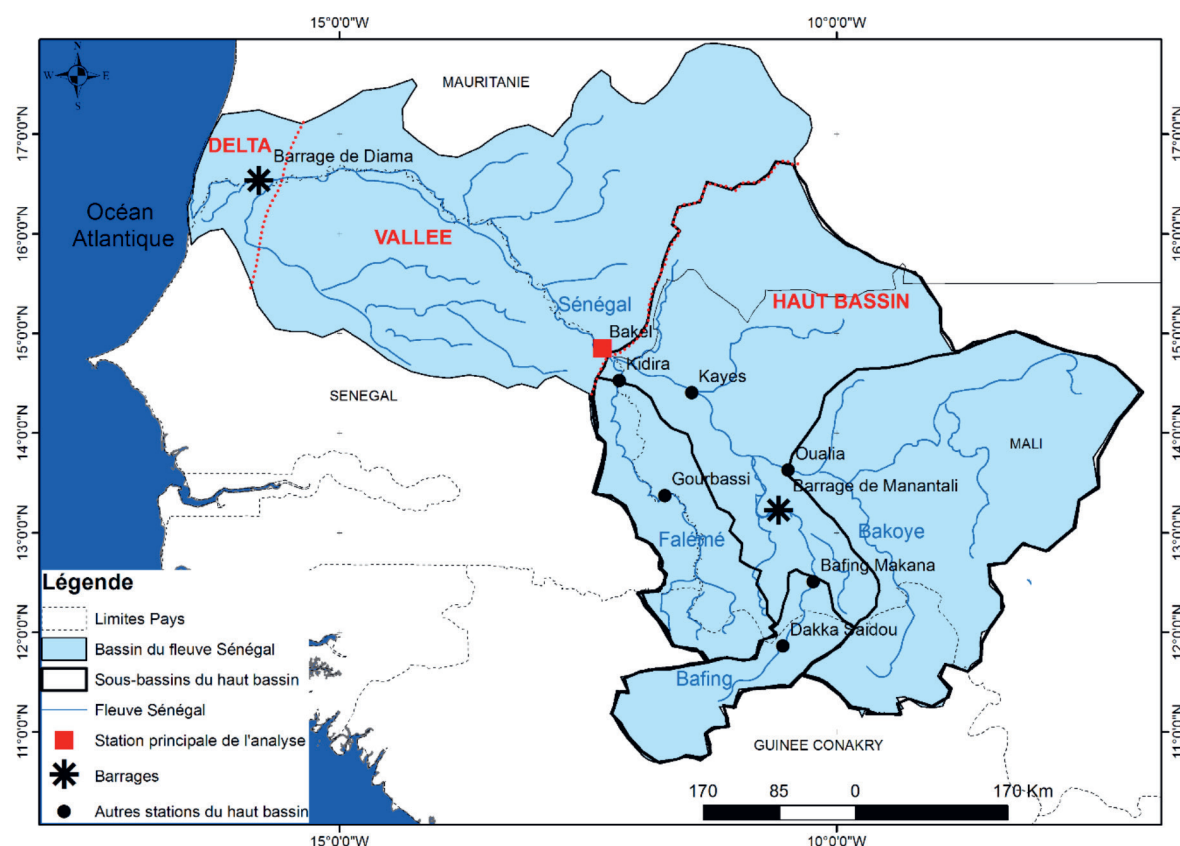


Figure 1: Localisation du bassin versant du fleuve Sénégal, du barrage et Manantali et de la station hydrométrique de Bakel

Le barrage de Manantali est situé sur le fleuve Bafing, principal affluent du fleuve Sénégal, à 90 km en amont de Bafoulabé (Figure 1). Construit entre 1982 et 1987, le barrage de Manantali est constitué d'une digue de 1 460 m de long et a une hauteur de 66 m à la fondation. A la cote de remplissage 208 mètres IGN, sa retenue a une capacité de 11,3 milliards de m³ et couvre une superficie de 477 km² (Office International de l'Eau, 2009). A son niveau minimum d'exploitation (187 m IGN), la retenue a un volume de 3,4 milliards de m³ et couvre une superficie de 275 km². Le barrage de Manantali régularise le débit du fleuve Sénégal et permet d'irriguer un potentiel de 255 000 ha de terres et à terme, devra permettre la navigabilité du fleuve sur environ 800 km à partir de l'embouchure. La gestion du barrage entre les Etats riverains du fleuve Sénégal se fait de façon concertée dans un cadre régional de coopération sous la tutelle de l'Organisation pour la Mise en valeur du Fleuve Sénégal (OMVS) dont la construction de ce barrage de Manantali est sans doute l'une de ses plus grandes réalisations.

2.2. Influence du fonctionnement du barrage de Manantali sur le régime d'écoulement du fleuve Sénégal à la station de Bakel

Tableau 1 : Niveau d'altération des 33 paramètres hydrologiques entre les périodes pré impact (1958 -1987) et post impact (1988-2018)

Groupes	Période pré impact (1958-1987)		Période post impact (1988-2018)		Limites RVA			
	Médiane	CD	Médiane	CD	Minimum	Maximum	Degré d'altération	
							%	Catégorie
Groupe 1 IHA								
Mai	111	1,75	187	0,68	13	169	22,1	Faible
Juin	192	1,01	240	0,56	132	236	3,33	Légère
Juillet	415	0,73	458	0,67	341	546	31,5	Faible
Août	1577	0,64	1031	0,74	1223	1796	-53,0	Modérée
Septembre	2190	0,76	1750	0,69	1667	2798	31,5	Faible
Octobre	1009	0,96	684	0,69	676	1300	40,9	Modérée
Novembre	373	0,99	308	0,64	285	577	12,7	Légère
Décembre	187	0,90	187	0,67	143	266	12,7	Légère
Janvier	122	0,78	164	0,66	98	168	40,9	Modérée
Février	100	0,81	166	0,46	74	130	-43,6	Modérée
Mars	67	1,17	192	0,54	47	94	-81,2	Sévère
Avril	42	2,74	218	0,56	26	131	-24,9	Faible
Groupe 2 IHA								
Minimum 1 jour	15	5,73	122	0,50	0	75	-80,3	Sévère
Minimum 3 jours	16	5,59	122	0,50	0	76	-80,3	Sévère
Minimum 7 jours	18	5,39	124	0,50	0	78	-80,3	Sévère
Minimum 30 jours	27	3,93	136	0,50	1,844	88	-62,4	Forte
Minimum 90 jours	54	2,14	153	0,51	19,83	108	-71,8	Forte
Maximum 1 jour	3421	0,73	2674	0,55	2664	4207	31,5	Faible
Maximum 3 jours	3319	0,72	2625	0,52	2582	4139	31,5	Faible
Maximum 7 jours	3097	0,77	2541	0,50	2312	3948	40,9	Modérée
Maximum 30 jours	2507	0,80	1961	0,59	1834	3110	40,9	Modérée
Maximum 90 jours	1395	0,85	1126	0,53	1183	1833	-15,5	Légère
Jours à Zéro-débit	0	0	0	0	0	12	47,6	Modérée
Indice de débit de base	0,03	4,01	0,25	0,46	0	0,09	-100	Sévère
Groupe 3 IHA								
Date du minimum	116	0,20	27,5	0,27	77	137	-43,6	Modérée
Date du maximum	254	0,05	249	0,02	251	257	-43,6	Modérée

Groupe 4 IHA								
Nombre de faibles impulsions	1	0	0	0	1	1	-88,1	Sévère
Durée de faibles impulsions	107	1,22	73,50	2,16	72,02	161	-90,6	Sévère
Nombre de fortes impulsions	1	0	1	1	1	1	-26,2	Légère
Durée de fortes impulsions	87	0,57	68	0,96	69,36	109	-15,5	Légère
Groupe 5 IHA								
Taux de montée	4,87	5,44	3,25	1,35	1,88	16,18	97,3	Sévère
Taux de descente	-3,72	-1,35	-4,12	-1,04	-5,91	-2,71	12,7	Légère
Nombre de reprises	16	0,38	21	0,49	13	18	-58,7	Modérée

Les résultats du Tableau 1 indiquent que le barrage de Manantali favorise une augmentation significative des débits d'écoulement du fleuve Sénégal à Bakel durant la période d'étiage. On observe également une diminution des débits de pointe liée au processus de remplissage de la retenue du barrage. A la cote de remplissage 208 mètres IGN, la retenue a une capacité de 11,3 milliards de m3 et couvre une superficie de 477 km² (Office International de l'Eau, 2009).

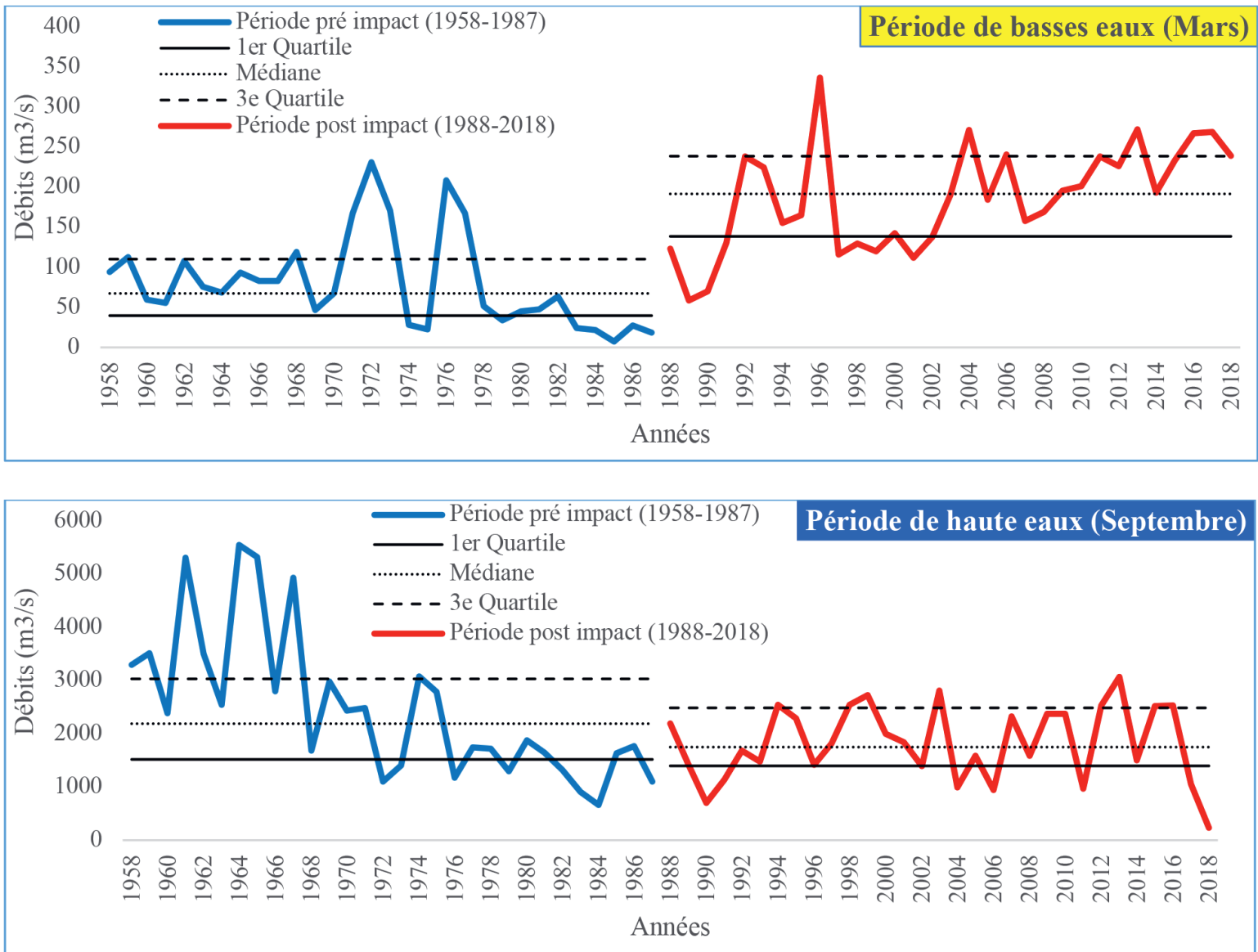


Figure 2. Variation mensuelle du débit entre les mois de Mars et de Septembre avant et après la construction du barrage hydroélectrique de Manantali dans le fleuve Sénégal.

Les résultats montrent une augmentation importante du débit médian et du débit moyen durant les périodes de basses eaux. A partir de cet exemple au mois du mars, une altération hydrologique sévère de 81% a été notée. Cependant, durant la période de hautes eaux on remarque que l'altération hydrologique reste faible : Elle est de 31,5% pour les mois de septembre.

3. A retenir

- Les écarts positifs notés sur les mois de basses eaux et les écarts négatifs sur les mois de hautes eaux résultent de la gestion du barrage de Manantali : Action de faible laminage des crues et de fort soutien des débits d'étiage ;
- La récurrence des inondations d'origine fluviale à Saint-Louis pourrait être associée à ce faible impact ;
- Les écarts positifs notés sur des mois de hautes eaux résulteraient du changement climatique et de son impact sur les déficits d'écoulements hydrologiques.

4. Perspectives scientifiques

- Modélisation des altérations hydrologiques futures du fleuve Sénégal ;
- Prédiction des extrêmes hydrologiques à différentes échelles spatio-temporelles.

5. Références bibliographiques

Faye C., 2015: Impact du changement climatique et du barrage de Manantali sur la dynamique du régime hydrologique du fleuve Sénégal à Bakel (1950-2014). *Bulletin de la Société Géographique de Liège :BSGLg, (Volume 64),* 69-82.

Faye C. et Mendy A., 2018 : Variabilité climatique et impacts hydrologiques en Afrique de l'Ouest : Cas du bassin versant de la Gambie (Sénégal). *Environmental and Water Sciences, Public Health & Territorial Intelligence*, 2 (1) 54-66.

Faye C., Diop E. S. et Mbaye I., 2015 : Impacts des changements de climat et des aménagements sur les ressources en eau du fleuve Sénégal : caractérisation et évolution des régimes hydrologiques de sous-bassins versants naturels et aménagés. *Belgeo*, 4, 1-22.

Faye C., Sow A.A., Diop E.S.D., 2019 : Caractérisation des effets du barrage de Manantali sur le régime hydrologique du fleuve Sénégal. *Rev. Roum. Géogr./ Rom. Journ. Geogr.*, 63, (1), 121-133.

Michel P., 1973 : *Les bassins des fleuves Sénégal et Gambie : Etude géomorphologique*. Mémoires ORSTOM n° 63-3 tomes, 752 p.

Office International de l'Eau (OIEau) (2009), *Développer les compétences pour mieux gérer l'eau* Dialogue autour des grandes infrastructures – Rapport de synthèse – Etape 2. Analyse des processus de décision sur les barrages de Bui (Ghana), Manantali (Sénégal, OMVS) et Kandadji (Niger), 86 p.

Rochette C., 1974 : *Monographie hydrologique du fleuve Sénégal*. Coll. Mém. ORSTOM, 1442 p.

Sakho, I., Dupont, JP., Cisse, M.T. et al. Hydrological responses to rainfall variability and dam construction: a case study of the upper Senegal River basin. *Environ Earth Sci* 76, 253 (2017). <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6570-4>

Sambou S., Diémé Y., Touré A.K., Badji A.M., Malanda-Nimy E.N. (2009), Effet du barrage de Manantali sur les modifications du régime hydrologique du fleuve Sénégal dans le bassin amont : une approche statistique. *Science et changements planétaires / Sécheresse*, 120 (1), 1, pp. 104-111.



CHAPITRE 3

GOUVERNANCE DE L'EAU DANS LES BASSINS PARTAGES & DEVELOPPEMENT

GOVERNANCE DE L'EAU DANS LES BASSINS PARTAGÉS

Christophe BRACHET, Hugo MERRIEN, Paul HAENER, Philippe SEGUIN, Alain BERNARD

Office International de l'Eau. 21 rue de Madrid 75008 PARIS

1. Introduction

Les bassins fluviaux transfrontaliers représentent 60% des écoulements superficiels et hébergent 40% de la population mondiale, et plus de 2 milliards de personnes dépendent d'aquifères partagés. De par leur diversité, on observe ainsi des spécificités propres à leur gouvernance :

- La gestion de l'eau est inscrite dans plusieurs cadres nationaux politiques, juridiques et institutionnels, correspondant ainsi à la souveraineté des Etats sur leur territoire et la gestion de leurs ressources ;
- L'utilisation des ressources est différente selon la situation amont/aval des pays, leur situation géopolitique et leurs activités socio-économiques ;
- L'implication d'un pays dans la coopération avec d'autres états est liée à la superficie de la portion de son territoire dans le bassin transfrontalier, ainsi qu'à sa puissance économique ;
- Les conflits liés à l'eau peuvent être entachés de conflits historiques, plus difficiles à gérer ;
- La diffusion et l'échange de données relatives à l'eau est plus délicate entre pays qu'au niveau national.

La gouvernance de la GIRE (Gestion Intégrée des Ressources en Eau) se caractérise par l'association des différents systèmes politiques, sociaux, économiques et administratifs influant les usages liés aux ressources en eau, leur développement, leur gestion et la fourniture des services de base (eau potable, assainissement, irrigation, électricité...) aux populations. Son objectif vise l'élaboration et l'implémentation des politiques publiques, des cadres juridiques et institutionnels. Elle clarifie également les rôles et responsabilités des différents acteurs vis-à-vis de la propriété des ouvrages hydrauliques, leur usage et leur gestion. La gouvernance est conçue sur des fondements d'équité, d'efficacité et d'équilibre entre le développement des activités anthropiques et la protection des milieux naturels.

Plusieurs niveaux de gouvernance peuvent être distingués : le niveau transfrontalier (avec les organismes de bassin transfrontalier, lorsqu'ils existent – voir les exemples ci-après), le niveau national (gouvernement, représentation de la société civile, du secteur privé) et niveau local (gouvernements locaux, communes, départements,...). La gestion de l'eau a longtemps été mise en œuvre de façon sectorielle et fragmentée, poussant les instances gouvernantes à représenter des intérêts antagoniques sans impliquer les populations locales et les acteurs concernés dans les processus de décision, parfois au détriment de la nature. Favoriser le dialogue et les échanges entre les parties prenantes, permet d'atteindre une gestion intégrée des ressources.

2. Résultats scientifiques par bassin

2.1. Autorité du Bassin du Niger (ABN)

Créée en 1964 sous la forme de la Commission du Fleuve Niger par les 9 Etats de son bassin, l'ABN est l'une des plus anciennes organisations intergouvernementales africaines. Son objectif initial était "d'encourager, de promouvoir et de coordonner les études et les programmes relatifs aux travaux de mise en valeur des ressources du bassin", notamment pour le développement des domaines de l'énergie, de l'hydraulique, de l'agriculture, de l'élevage et de la pêche. En 1980, la commission prendra le nom d'Autorité du Bassin du Niger (Convention actualisée en 1987). L'ABN est constituée de différentes instances, assurant une gouvernance à plusieurs niveaux. Ainsi, les Chefs d'Etat et Ministres sont directement impliqués au sein :

- Du Sommet des Chefs d'Etat et de Gouvernement, qui se réunit une fois tous les deux ans pour décider des orientations ;
- Du Conseil des Ministres, responsable du suivi des activités du Secrétariat exécutif ;
- Du Secrétariat Exécutif, organe exécutif permanent de l'ABN. Le Sommet des Chefs d'Etat et de Gouvernement nomme le Secrétaire Exécutif ;

Des structures focales nationales maintiennent le lien entre le niveau régional et national, favorisant la prise en compte des besoins de chaque pays membres de l'ABN. En plus de ces aspects organisationnels, l'ABN est dotée de plusieurs documents politico-juridiques, créant ainsi un environnement favorable à la coopération. De 2003 à 2008, un processus de Vision partagée a été initié aboutissant à un Plan d'Action de Développement Durable, validé par tous les Etats membres. La Charte de l'Eau de l'ABN a été élaborée en 2007 puis adoptée en 2008. Différents organes consacrés à la mise en œuvre de cette Charte ont ou doivent être mis en place pour assurer la bonne gouvernance des ressources en eau du bassin :

- Un Comité Technique Permanent (pas encore opérationnel), contribuant à la planification et à l'exécution des projets vis-à-vis du développement du bassin ;
- Un Panel d'Experts, apportant des avis techniques spécifiques sur l'aménagement du bassin ;

- Des Commissions de sous-bassin (pas encore en place) ;
- L'Observatoire du Bassin du Niger.

Par ailleurs, l'ABN a organisé en 2006 un forum des Acteurs et Usagers des ressources du bassin. 9 Coordinations Nationales et une Coordination Régionale des Usagers ont été mises en place.

L'ABN a su développer dans un laps de temps court le processus de Vision partagée conduisant à une programmation commune et l'élaboration d'outils juridiques transfrontaliers. La forte implication des dirigeants à travers ses différents organes a rendu cela possible. On note cependant un certain essoufflement de la démarche depuis une dizaine d'années. Des réformes institutionnelles et organisationnelles ont été menées en 2004 et en 2019 ; on relève qu'elles n'ont pas donné lieu à modification de la Convention de 1987.

2.2. Autorité du Bassin de la Volta (ABV)

La Volta, fleuve transfrontalier, n'a obtenu des dispositions juridiques et institutionnelles que tardivement : c'est en 2006 que les Ministres en charge de la gestion de l'eau du Bénin, Burkina Faso, Côte d'Ivoire, Ghana, Mali et le Togo, ont instauré l'ABV. Son rôle est de promouvoir la concertation des différents acteurs, pour le développement durable de l'eau sur son bassin.

La Convention a été ratifiée par l'ensemble des Chefs d'Etat, en 2007 à Ouagadougou. Les organes de gouvernance sont :

- La Conférence des Chefs d'Etat et de Gouvernements ;
- Le Conseil des Ministres en charge des ressources en eau ;
- Le Comité des Experts ;
- La Direction Exécutive de l'Autorité ;
- Le Forum des Parties prenantes.

D'autres aspects institutionnels ont été pris en compte afin de favoriser la participation de chaque pays au sein de l'ABV. Chaque Etat est représenté par un point focal, responsable des activités au niveau national. De plus, un Groupe Consultatif de Partenaires Techniques et Financiers a été créé pour inciter aux synergies en matière de support technique et financier à l'ABV.

L'ABV s'est récemment dotée d'une Charte de l'eau, mais n'a toujours pas développé de plan directeur pour l'aménagement et la gestion du bassin.

2.3. Commission Internationale du Bassin du Congo-Oubangui-Sangha (CICOS)

Le 6 novembre 1999, les Chefs d'Etat du Cameroun, de la Centrafrique, du Congo et de la République Démocratique du Congo signent un Accord pour mettre en place un régime fluvial uniforme, créant ainsi la CICOS dont le but initial est de favoriser l'intégration régionale en exploitant durablement et équitablement les voies navigables du bassin du fleuve Congo. En complément de l'accord initial, son mandat a rapidement été élargi aux questions de GIRE, à travers un Additif signé par l'ensemble des Etats membres en 2007. Le Gabon et l'Angola ont depuis rejoint la CICOS, mais les pays de l'est du bassin n'en sont pas membres.

La CICOS est constituée de 3 organes principaux :

- Le Comité des Ministres, organe décisionnel. Il se réunit une fois par an, précédé par une réunion du Comité de Direction ;
- Le Comité de Direction, organe consultatif ;
- Le Secrétariat Général, organe opérationnel permanent.

Afin d'étendre les processus de décision et de planification aux usagers du bassin, la CICOS a lancé en 2012 un projet d'approche participative. Des réunions de sensibilisation avec les différents partenaires ont été organisées, pour évaluer l'implication des acteurs non gouvernementaux dans les activités de la CICOS.

Le Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE) de la CICOS a été élaboré en 2015. Son élaboration a été l'occasion de mettre en place formellement 6 Plateformes de Concertation Nationales (PCN) et une Plateforme de Concertation Régionale (PCR). Des réunions régulières des PCN et PCR se sont tenues entre 2015 et 2020. La tenue de ces plateformes reste cependant dépendante du financement de partenaires extérieurs.

On note que la CICOS est une institution spécialisée de la Commission Economique et Monétaire des Etats de l'Afrique Centrale, qui finance son fonctionnement à travers la Taxe Communautaire d'Intégration. Des réformes successives de la CICOS ont été engagées en 2013 et 2020, qui n'ont pas encore donné suite.

2.4. Organisation pour la Mise en Valeur du Fleuve Sénégal (OMVS)

L'OMVS a été mise en place à travers la signature de la Convention de 1972, définissant sa structuration d'ensemble, et son organisation. Celle-ci a été complétée en 1978 par la Convention relative au statut juridique des ouvrages communs, puis en 1982 par la Convention relative aux modalités de financement des ouvrages communs. Ses structures principales sont :

- La Conférence des Chefs d'Etat et de Gouvernement ;
- Le Conseil des Ministres ;
- Le Haut-Commissariat, organe exécutif de l'OMVS.

En complément, la Société de Gestion et d'Exploitation du Barrage de Diama (SOGED) et la Société de Gestion de l'Energie de Manantali (SOGEM), sont en charge de l'exploitation, de l'entretien et du renouvellement de ces ouvrages communs. La SOGEM se dédie à la production et au transport de l'énergie électrique depuis Manantali et sa centrale hydroélectrique, ainsi que des ouvrages dits de seconde génération du projet énergie. Créée plus récemment en 2011, la SOGENAV a pour mission de restaurer et promouvoir une navigation pérenne sur le fleuve, dans le cadre du projet de Système intégré de Transport multimodal. Enfin, la décision de créer la SOGEOH en 2016 vise essentiellement une préparation plus rapprochée des nouveaux projets d'ouvrages programmés par l'OMVS sur le fleuve Sénégal, dont la plupart se situent dans le Haut Bassin guinéen. Ce schéma de gouvernance confère un caractère singulier à l'échelle mondiale, garantissant un partage équitable des bénéfices de ces ouvrages, gérés de façon concertée.

L'OMVS s'est doté d'un Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE) du Fleuve Sénégal pour l'horizon 2025, fixant un document de planification commun à tous ses états membres. L'élaboration du SDAGE de 2009 à 2011 a associé les acteurs du bassin à travers un processus participatif déployé à large échelle, prenant en compte les problématiques des usagers.

Une réorganisation de l'OMVS s'est opérée en 2010, et des Etudes de Revue Institutionnelle sur le Financement du Système OMVS ont été menées en 2018.

2.5. Autorité du Bassin du Mono (ABM)

L'Autorité du Bassin du Mono a été créée en 2014 par les Républiques du Bénin et du Togo avec l'appui du Centre de Coordination des Ressources en Eau de la Communauté Economique des Etats d'Afrique de l'Ouest. Sa direction exécutive a été installée officiellement le 31 octobre 2019. Les organes de l'ABM sont :

- Le Conseil des Ministres ;
- Le Comité Technique des Experts ;
- Le Forum des parties prenantes au développement du bassin du Mono ;
- La Direction Exécutive de l'Autorité, organe permanent.

Pour une gestion durable du bassin, l'ABM a pour mandat de :

- Promouvoir la concertation permanente entre les parties prenantes ;
- Promouvoir la mise en œuvre de la GIRE et le partage équitable des bénéfices découlant des différentes utilisations ;
- Autoriser la réalisation des ouvrages et des projets envisagés par les Etats Parties et pouvant avoir un impact significatif sur les ressources en eau du bassin ;
- Réaliser des projets et des ouvrages communs ;
- Contribuer à la réduction de la pauvreté, au développement durable des Etats Parties et à une meilleure intégration socio-économique sous-régionale.

2.6. Organisation pour la mise en Valeur du Fleuve Gambie (OMVG)

L'OMVG a été créé en 1978 par les Républiques du Sénégal et de la Gambie, rejointes en 1981 par la Guinée et en 1983 par la Guinée Bissau. Les différents organes de gouvernance de l'OMVG sont les suivants :

- La Conférence des Chefs d'Etat et de Gouvernement ;
- Le Conseil des Ministres ;
- Le Haut-Commissariat, organe d'exécution des projets.

Des structures ont été mises en place aux niveaux national et local, afin de réaliser et de suivre les activités techniques, socio-environnementales, administratives et financières de l'Organisation. Un Comité National de Suivi a été créé dans chacun des pays membres de l'OMVG, et un Comité Local de Coordination et de Suivi dans les 16 subdivisions administratives.

Tout comme l'OMVS, l'OMVG dispose d'une structure de gestion de ses ouvrages communs : la Société de Gestion et de l'Energie de Sambangalou et du Réseau de Transport de l'Energie Electrique. Celle-ci fut créée lors du 1^{er} sommet extraordinaire des Chefs d'Etat et de Gouvernement des Etats membres, en 2016.

3. A retenir et Perspectives scientifiques liées à la question

Le contexte global permet d'appréhender les problématiques liées à la gestion et au partage des ressources en eau, mais aussi à la relation entre cette ressource et les usages ou activités, impactant les cycles naturels hydrologiques. L'implication des pouvoirs centraux nationaux (Chefs d'Etat, Ministres) favorise considérablement la mise en place et le bon fonctionnement des organismes transfrontaliers, en impulsant les dynamiques de coopération entre les différents pays. Des axes de recherche pourraient cependant être centrés sur les atouts et faiblesses de telles organisations, comparativement à des commissions moins puissantes mais plutôt gérées au niveau régional (telles qu'à la Communauté de développement d'Afrique australe – SADC par exemple).

Les institutions et organismes mandatés pour gérer la ressource ne sont pas les seuls facteurs de gouvernance à prendre en considération. La mise en place de différents échelons de gouvernance (internationaux, nationaux, provinciaux...) permet de favoriser la réalisation des projets transfrontaliers. La participation du grand public et des usagers sont des facteurs clés pour l'atteinte d'une gouvernance inclusive en adéquation avec l'environnement qui lui est propre. Ces modes de fonctionnement ne sont cependant pas réellement institutionnalisés, malgré diverses tentatives : des approfondissements scientifiques pourraient être axés sur la réelle participation (et non seulement consultation) des acteurs non étatiques.

Enfin, les réformes institutionnelles et organisationnelles doivent s'appuyer sur les caractéristiques inhérentes au secteur de l'eau, afin de répondre aux besoins des usagers et à la nécessité de préserver le milieu naturel. L'arsenal de documents juridiques définissant le rôle et les mandats des acteurs impliqués dans la coopération, définissent ainsi un cadre propice au bon fonctionnement des organismes transfrontaliers. Les schémas ou plans directeurs stratégiques transfrontaliers sont une base indispensable à une bonne coopération, les « Chartes de l'eau » servant de garde-fou, mais pas toujours utilisées. Des recherches intéressantes pourraient être menées sur les réels bénéfices engrangés sur le terrain grâce aux organismes de bassin transfrontaliers.

4. Références bibliographiques

- Manuel sur la gestion intégrée des ressources en eau dans les bassins des fleuves, des lacs et des aquifères transfrontaliers, RIOB-GWP-UNECE-UNESCO-GEF-AFD, 2012
- Bilan des expériences d'organismes de bassins transfrontaliers en Afrique, bonnes pratiques et recommandations, OiEau-AFD-RAOB, 2014
- Gouvernance transfrontalière du Sénégal et du Niger : analyse historique et identification des facteurs déterminant, Bolognesi T., Bréthaut C., 2016
- L'eau dans nos régions, Observatoire du Sahara et du Sahel, 2020
- Une question de survie, rapport du Panel mondial de haut niveau sur l'eau et la paix, Geneva Water Hub, 2017

RESSOURCES EN EAU EN CÔTE D'IVOIRE : UN REGARD SUR LEUR GOUVERNANCE

Allassane OUATTARA

Laboratoire d'Environnement et de Biologie Aquatique, Université Nangui Abrogoua,
02 BP 801 Abidjan 02, Côte d'Ivoire : allassane_ouattarahotmail.com

1. Introduction

Les changements globaux et leurs influences sur les ressources en eau et la société sont partout au centre des préoccupations politiques et scientifiques actuelles. Pour des régions déjà fragilisées par le changement climatique comme l'Afrique de l'Ouest (GIEC, 2014), la question de l'eau est cruciale dans tous les aspects du développement économique et dans l'approvisionnement en eau d'une population sans cesse croissante (Banque Mondiale, 2021).

De par sa position géographique en Afrique de l'ouest, la Côte d'Ivoire bénéficie d'un climat tropical humide caractérisée par des précipitations importantes particulièrement favorables à l'alimentation des débits des cours d'eau et à la recharge efficace des aquifères de socle (Assemian et al., 2013). En effet, on y retrouve une multitude de cours d'eau permanents, de milieux lagunaires et marins ainsi que des eaux souterraines. Cependant, les dernières décennies ont été marquées par des anomalies pluviométriques importantes dans le pays. Les ressources en eau, qu'elles soient souterraines ou de surface, ont subi une diminution non négligeable ; des tarissements des cours d'eau sont parfois observés (Bigot et al., 2005; Assemian et al. 2013). A ce déficit global des précipitations, s'ajoutent les fortes pressions anthropiques qui dégradent l'environnement, altèrent les bassins versants et fragilisent les ressources en eau disponibles.

Parmi les nombreuses questions que suscitent les ressources en eau, celles de sa protection et sa gestion durable se posent avec acuité en Côte d'Ivoire. Or, en dépit de quelques efforts de protection, les menaces qui pèsent sur les ressources en eau se sont nettement aggravées du fait de pratiques dommageables (agricoles, industrielles, minières), aggravées par la pauvreté sans qu'une réponse conséquente et efficace n'y ait été apportée.

L'objectif de ce chapitre est de présenter les limites de la gouvernance des ressources en eau dans le pays. Une grande partie des réflexions livrées ici, limitées à la thématique des enjeux et gouvernance des ressources en eau en Côte d'Ivoire, ont été alimentées par la littérature consultée, les nombreuses discussions qui ont eu lieu lors des ateliers et aussi de nos propres observations de terrain.

2. L'Eau en état d'urgence

Des changements majeurs de la qualité et de la quantité des ressources en eau sont déplorés depuis quelques décennies, non seulement du fait de l'intensification des activités anthropiques mais également par le fait du changement climatique.

Au cours de nos observations sur le terrain, nous avons pu constater combien les eaux en Côte d'Ivoire subissent de nombreuses agressions de la part d'un grand nombre de secteurs de développement économique (agriculture, aquaculture, barrage-hydroélectrique, mines, navigation, tourisme et loisir, rejets domestiques...) (Figure 1).

Parmi les activités touchant aux ressources en eaux et/ou à leur qualité, l'agriculture, pilier de l'économie ivoirienne, constitue une menace très prioritaire avec une liste impressionnante de dégradations des eaux (pollution chimique, eutrophisation, envahissement des eaux de surface par les végétaux, sédimentation des particules érodées par l'eau de ruissellement, destruction d'habitats...). Pour ses besoins en eau, l'agriculture industrielle a même étendu ses plantations jusqu'aux abords des cours d'eau et plans d'eau. Elle consomme un très grand volume d'eau pour l'irrigation et rejette d'importantes quantités d'effluents non traités particulièrement chargés en matières organiques, pesticides et engrais. Leurs impacts s'ajoutent à ceux des eaux de ruissellement qui en lessivant les sols se chargent de matières minérales et polluent gravement les cours d'eau et plans d'eau, ressources essentielles pour l'alimentation en eau potable des populations.

Les usages domestiques de l'eau, les industries et l'orpaillage clandestin sont les trois autres menaces majeures entraînant de graves dégradations de la qualité de l'eau. En effet, les grandes quantités d'eaux chargées d'impuretés que les ménages produisent (matières organiques, composés azotés et phosphorés, microorganismes dont certains sont pathogènes...) participent à la dégradation de la qualité de certaines eaux de surface (fleuves, rivières, ruisseaux, lacs et lagunes) mais aussi à l'altération des nappes aquifères par percolation dans le sol. La plupart des villes ivoiriennes ne disposent pas de dispositifs d'épuration, et quand elles en disposent, bon nombre ne sont pas fonctionnels. A cette situation, s'ajoute la mauvaise gestion des déchets solides produits par les ménages (plastiques, matières organiques...). Quant aux rejets d'eaux usées industrielles, ils peuvent être très variables d'une usine à l'autre (papeterie, agro-alimentaire, brasserie, abattoirs...). Leurs effluents sont rejetés sans traitement préalable dans la plupart des cas vers les égouts ou directement dans le milieu naturel polluant ainsi l'environnement aquatique. L'orpaillage clandestin est un réel fléau depuis ces dernières années dans

le pays et mérite par conséquent une attention particulière. La majorité des cours d'eau et plans d'eau sont aujourd'hui atteints. L'une des manifestations les plus visibles de l'orpaillage sauvage est la forte turbidité des eaux. Les cours d'eau et les plans d'eau ont perdu leur limpidité naturelle et sont devenus pour la plupart totalement turbides voire franchement boueux entraînant des désagréments esthétiques, un bouleversement de la vie aquatique normale des écosystèmes (avec parfois des mortalités de poissons), la destruction d'habitats et l'envasement des milieux. S'y ajoutent la pollution des eaux par les produits chimiques utilisés dans l'extraction des minerais (mercure, cyanure,...), et le rejet dans l'eau d'huiles et de carburant utilisés par les machines, qui tous présentent un danger pour la santé humaine et pour l'environnement en raison de leur toxicité.

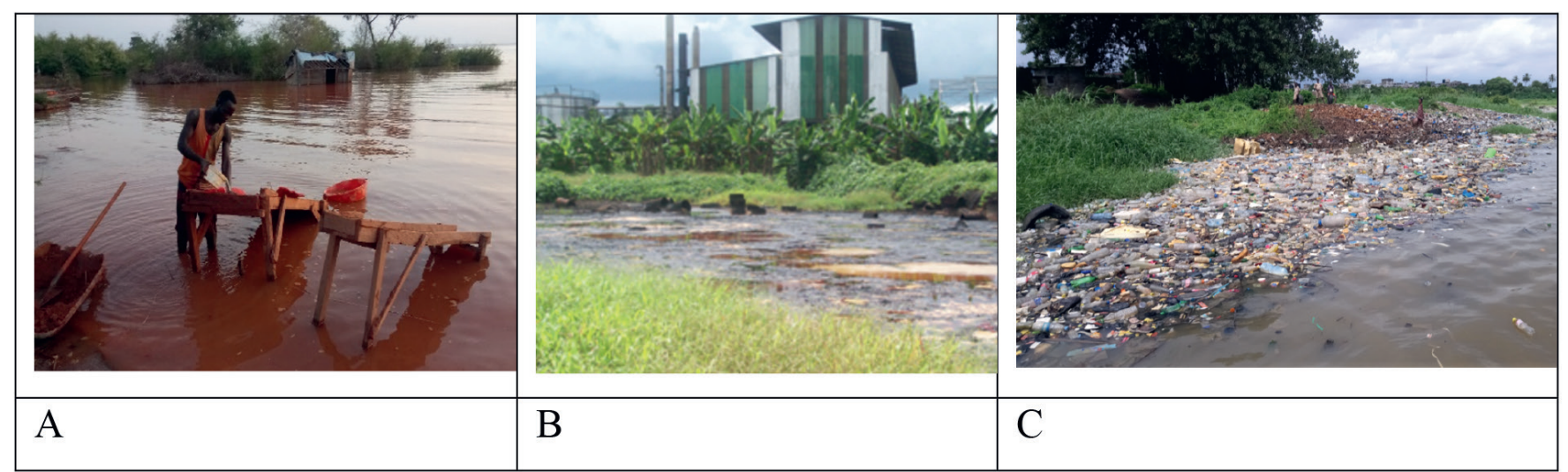


Figure 1. Formes de pollution sur les ressources en eau
A : Orpaillage clandestin ; B : Drainage des eaux usées industrielles sans traitement C : Décharge flottants de déchets plastiques

À priori, les activités comme la navigation, l'aquaculture, le tourisme et loisir, les barrages hydroélectriques ne constituent pas encore une menace alarmante pour les ressources en eaux. Cependant, les usages considérés comme très prioritaires comme l'agriculture, l'industrie et l'orpaillage peuvent mettre en péril ces activités. L'artificialisation croissante des réseaux hydrographiques (barrages petits et grands) s'accompagne généralement d'une dégradation des eaux en modifiant les caractéristiques physiques, chimiques, biologiques ou bactériologiques surtout en aval des réservoirs.

Le changement climatique est un facteur aggravant. L'une des manifestations du changement climatique est la variabilité des précipitations incluant des périodes de déficit pluviométrique marqués et à l'inverse des épisodes hydrologiques paroxysmiques par ailleurs entretenus par l'artificialisation croissante des bassins versants à des fins agricoles ou urbaines. Qu'ils soient d'origine naturelle et/ou anthropique, ces effets s'exercent sur la disponibilité des ressources en eau, notamment par la baisse des débits des rivières et le tarissement des nappes, avec pour corollaire la réduction des plans d'eau. La situation catastrophique de pénurie d'eau potable qu'a vécu la ville de Bouaké, la deuxième ville de Côte d'Ivoire en 2019 (près d'un million et demi d'habitants) pendant plusieurs semaines du fait de l'assèchement précoce du barrage de la Loka en est un exemple des effets conjugués du changement climatique et des divers usages de l'eau.

Par ailleurs, les risques associés aux différents usages et leurs impacts à court, moyen et long termes sur la santé humaine et sur les écosystèmes aquatiques ainsi que sur la vie sociale constituent des défis majeurs différents.

L'un de ces défis sera d'offrir aux populations une qualité de vie durable tout en préservant autant que possible leur environnement. Malheureusement, de nombreuses populations vivent en dessous du seuil de pauvreté et auront peu de chance d'améliorer leur vie dans un environnement où les eaux sont polluées (métaux lourds, engrais, microorganismes pathogènes, déchets solides ...) et où les réserves d'eaux souterraines s'épuisent.

De plus, les effets de la détérioration des ressources en eau en réduisant les offres de services ont des répercussions dans les sphères économique et sociale. En effet, la proximité des ressources en eau dans des zones à usages multiples suscite le plus souvent des conflits d'intérêts. Nos investigations sur les conflits entre usagers d'une même ressource en eau et porteurs d'intérêts contradictoires nous ont permis de déterminer quatre types de rapport conflictuels : conflits entre pêcheurs artisanaux et exploitants miniers illégaux, conflits entre pêcheurs artisanaux et aquaculteurs, conflits entre pêcheurs artisanaux et communautés locales et conflits entre éleveurs et agriculteurs.

3. Les ressources en eau, une gouvernance négligée

Les problèmes liés aux ressources en eau sont connus, les constats de dégradation des eaux sont là : les rejets d'eau usées domestiques et industrielles dans le milieu naturel sans traitement efficient, les effets perceptibles de l'eutrophisation et de détérioration par l'orpaillage sauvage des eaux de surface, les décharges aquatiques flottantes (plastiques, détritus..), sans compter le dépérissement des cours d'eau marqué par la baisse de leurs régimes ou

leur disparition et du niveau des nappes phréatiques (MINEF, 2003). Les menaces qui pèsent sur les ressources en eau se poursuivent à un rythme sans précédent, du fait que le développement de la quasi-totalité des secteurs de l'économie nationale est tributaire des ressources en eau. Mais il reste difficile de comprendre que l'eau ne bénéficie pas de toute l'attention prioritaire dont elle devrait bénéficier. La question de l'efficacité actuelle de la gouvernance nationale se pose. Les raisons sont à rechercher à divers niveaux :

- (i) Le foisonnement d'institutions intervenant dans le domaine de l'eau du fait de son caractère multisectoriel et transversal. Au total, une quinzaine d'acteurs institutionnels publics et privés dont 13 ministères ayant des pouvoirs et des objectifs différents interviennent directement ou indirectement en rapport avec des questions touchant aux ressources en eaux et/ou à leur qualité. Cela conduit à la mise en œuvre d'actions fragmentées et souvent non concertées. Cette gestion sectorielle de l'eau menée jusqu'à présent a montré ses limites.
- (ii) L'instabilité des structures nationales du secteur de l'eau, notamment la structure chargée de la gestion des ressources en eau, qui n'a pas permis de faire progresser le processus de la GIRE, vingt-quatre années après son adoption en 1998.
- (iii) L'absence de décrets d'application des différents codes et textes réglementaires existant relatifs au domaine de l'eau, notamment le code de l'environnement (adopté depuis 1996) et le code de l'eau (adopté depuis 1998). Ceci constitue une entrave à la gestion durable de l'eau.

Les eaux se meurent d'abord à cause de l'immobilisme des pouvoirs publics. Plutôt que de continuer sur cette voie, ne serait-il pas important, dans un tel contexte, d'impliquer les sociétés aux modes de gestion locale pour une meilleure protection. Etant donné que nos sociétés africaines ont des relations très anciennes avec les écosystèmes aquatiques, elles ont su développer un ensemble de pratiques et de comportements qui ont toujours permis de protéger et gérer les ressources en fonction des saisons et du type d'écosystèmes exploités (lotique ou lentique). Les divers usages de l'eau ont ainsi été réglementés et les zones protégées ont été décidées par les acteurs sociaux eux-mêmes (comme les maîtres des eaux, dépositaires des ressources en eau et de leur qualité).

Pour ce faire, des approches intégrées, dynamiques, interactives et multisectorielles de la gestion et de l'utilisation des ressources en eau devraient être appliquées. Des modèles d'exemples de gestion intégrée locale existent sur le continent. Il s'agit de voir comment s'inspirer des expériences d'approches de gestion en réponse à la détérioration de la qualité des ressources en eaux. C'est le cas du contrat de rivière au Burkina Faso (sur la rivière Sourou) où aux côtés des acteurs publics et privés rassemblés au sein de comités de rivière, les scientifiques ont à participer à l'animation et à la coordination des programmes d'actions mise en œuvre (Rosillon et al. 2006). C'est également le cas de l'approche ILLBM (Integrated Lentic Lotic Basin Management ou Aménagement intégré des bassins lenti-ques et lotiques) mis en œuvre au Kenya (TWAP, 2016) qui a connu un succès.

Au niveau des eaux transfrontalières en partage entre les Etats parties, la gestion est d'une grande importance pour l'Afrique comme cela a été souligné dans la Vision Africaine de l'Eau 2025 (Anonyme, 2015). L'intérêt d'une telle gestion est de favoriser la coopération entre Etats-Parties en vue de préserver la quantité et la qualité des ressources en eau et de promouvoir l'utilisation durable des eaux transfrontalières de façon à prévenir les conflits liés à l'eau dans les espaces transfrontaliers.

La Côte d'Ivoire partage huit bassins versants internationaux (Comoé, Sassandra, Cavally, Niger, Volta, Bia, Nuon, et Tanoé). Le pays est signataire de plusieurs Conventions et partie prenante de la création d'Autorités de Bassin. Pour certains bassins, des cadres institutionnels sont déjà mis en place. C'est le cas par exemple de l'Autorité du bassin du Niger et l'Autorité du bassin de la Volta. Malheureusement, la volonté de quitter la gestion sectorielle de l'eau par chaque Etat pour s'orienter vers une gestion plus concertée des eaux partagées n'est toujours pas véritablement d'actualité. Il est clair que l'accent doit être mis sur une coordination des politiques de l'eau avec les pays voisins (Bidi, 2000). Pendant ce temps, les eaux continuent de se dégrader au grand dam de la Côte d'Ivoire, en aval de la plupart des grands fleuves transfrontaliers. Seul le Bandama est intégralement ivoirien, ce qui malheureusement ne se concrétise pas par une gouvernance privilégiée (fleuve le plus artificialisé du pays).

4. A retenir

La Côte d'Ivoire abrite d'importantes ressources en eau, qui sont aujourd'hui sérieusement menacées par l'accroissement des activités humaines et le changement climatique. Ces eaux essentielles à notre vie, constituent un patrimoine naturel à l'origine de nombre de nos valeurs culturelles, spirituelles, esthétiques et récréatives mais aussi et surtout indispensables à notre développement économique. Si rien n'est fait pour inverser la tendance, le rythme de dégradation devrait augmenter considérablement au cours des prochaines années sous l'effet de l'accroissement de la population.

Il est urgent de prendre conscience des dangers que ces ressources en eau encourent en mettant un accent particulier sur leur gestion efficace pour les conserver et les protéger durablement.

Il nous faut aujourd'hui faire un effort pour rendre opérationnelles les politiques de gestion des ressources en eau que le pays s'est dotées (e.g. le plan Gestion Intégrée des Ressources en Eau (GIRE)) ainsi que le respect des lois et réglementations. La conservation et l'utilisation durable des eaux doivent devenir des

parties intégrantes du développement économique et social du pays.

5. Perspectives de recherche

Les défis scientifiques liés à l'exploitation et à la préservation durables des ressources en eau sont considérables. Les scientifiques ont besoin de données ou de savoirs pour orienter les politiques de préservation et de gestion. Les points suivants dressent l'inventaire des questions et les besoins les plus urgents à notre sens.

- Quel est l'état actuel des ressources en eau ?

Les ressources en eau dont nous disposons restent pour l'essentiel inconnues de la science. Les ressources en eau pourraient bientôt disparaître plus rapidement que nous ne les étudierons. Il est dès lors impératif que soient mises au point des approches et des technologies nouvelles permettant d'explorer, de comprendre et de prédire l'état actuel et les tendances des ressources en eau mais aussi les causes et les conséquences écologiques, économiques, sociales et sanitaires et les moyens d'assurer leur conservation, leur protection et leur utilisation durables.

- Quelles sont les solutions pour atténuer/mitiger les risques liés à l'eau (inondation, sécheresse, pollution) ?

Par rapport aux besoins de développement de nos pays, il y a nécessité d'identifier des solutions pour minimiser les incertitudes et risques liés au changement climatique et aux activités anthropiques.

- Quel type d'outils d'aide à la prise de décision ?

Des avancées ont été accomplies dans le domaine de l'acquisition des données sur les ressources en eau ces dernières années même si les réseaux de suivis souffrent de déficits chroniques tant en ressources matérielles qu'humaines. Leur renforcement est absolument nécessaire. La mise en place d'un outil centralisé par bassin de recueil de données, d'information, de communication et d'aide à la décision, sur le modèle d'un observatoire de l'eau (disponibilité et qualité), est absolument nécessaire comme moyen de suivi des ressources en eau. L'amélioration de la gestion passera aussi par l'amélioration de la connaissance et le renforcement des systèmes académiques est également incontournable.

6. Références bibliographiques

Anonyme. 2015. Intégration de la gestion des eaux souterraines pour les Organismes de Bassins

Transfrontaliers en Afrique - Un manuel de formation produit par AGW-Net, BGR, IWMI, Cap Net, RAOB, IGRAC, 20 p.

Assemian, A. E., Kouame K. F., Djagoua V. E., Affian K., Jourda R. P. J., Adja M., Lasm T. & Biemi J. 2013. Étude de l'impact des variabilités climatiques sur les ressources hydriques d'un milieu tropical humide. Cas du département de Bongouanou (Est de la Côte d'Ivoire) *Revue des sciences de l'eau*. 26(3) : 247-261

Banque Mondiale. 2021. Population total – Côte d'Ivoire. Consulté le 11/02/2022 sur <https://www.banquemondiale.org/fr/country/cotedivoire>.

Bidi T. J. 2000. La gestion de l'eau et ses contraintes en Côte d'Ivoire. *Présence africaine*, 161/162 : 147-169.

Bigot S., Brou Y., Oszwaid J. & Diedhou A. 2005. Facteurs de la variabilité pluviométrique en Côte d'Ivoire et relations avec certaines modifications environnementales. *Sécheresse*, 16, 5-13.

GIEC 2014. Changements climatiques : Rapport de synthèse, 161p.

Ministère des Eaux et Forêts (MINEF). 2003. Gestion Intégrée des Ressources en Eau en Côte d'Ivoire. Bilan et perspectives, 68 p.

Rosillon F., Ouattara A. & Emmanuel E. 2006. Des chercheurs pour la GIRE, comment travailler en réseau ? Conférence Paper, 12p.

Transboundary Waters Assessment Programme (TWAP). 2016. Transboundary Lakes and Reservoirs. Status and Future Trends. UNEP/GEF/ILEC, 20P.

RESSOURCES EN EAU ET BESOINS DE DÉVELOPPEMENT : QUELS COMPROMIS ?

Cheikh Faye¹, Soda Loum², Issa Sakho³

¹ Laboratoire de Géomatique et d'Environnement, Département de Géographie, Université Assane Seck de Ziguinchor, BP 523 Ziguinchor (Sénégal).

² UFR des Sciences de l'Ingénieur, Université Iba Der THIAM de Thiès, Thiès, Sénégal.

³ UMR Sciences, Technologies Avancées et Développement Durable, Université Amadou Mahtar Mbow de Dakar à Diamniadio (Sénégal).

* Corresponding author : cheikh.faye@univ-zig.sn,

1. Introduction

L'eau douce est une ressource vitale. Elle est indispensable à la survie des écosystèmes naturels et aux activités humaines. Jusqu'au milieu du XXe siècle, l'eau était considérée comme une richesse inépuisable que chaque usager pouvait s'approprier, posséder et exploiter en fonction de ses besoins (Honegger et Tabarly, 2011). Cette situation a entraîné une utilisation sectorielle et concurrentielle de la ressource, une gestion qui est à l'origine de nombreux problèmes tels que les conflits, la dégradation de la qualité de l'eau et les problèmes environnementaux, l'inégale répartition et la baisse des ressources en eau (Batcho, 2008). Dans une nation, les ressources en eau et les systèmes d'économie de l'eau déterminent largement son développement socio-économique durable, l'accès à l'eau pour tous, la fiabilité et la durabilité des approvisionnements en eau pour répondre aux besoins de l'économie, la qualité des ressources en eau, et la capacité à prévoir et à prévenir les dommages causés par les situations d'urgence liées à l'eau, représentent des enjeux importants de sécurité nationale de tout Etat (Thipperudrappa et Dhananjaya, 2020). Les effets combinés de la croissance démographique, de l'augmentation des revenus et de l'expansion des villes entraînent une hausse exponentielle de la demande en eau, alors que la disponibilité de la ressource devient de plus irrégulière et incertaine (Camara et Bangoura, 2017) entraînant ainsi un accès limité avec des situations de vulnérabilités en eau (Sinarinzi, 2010 ; Faye, 2017 ; Faye et Dieye, 2019 ; Faye et al., 2019).

Malgré son caractère crucial dans le développement socio-économique, l'eau représente un risque pour les populations : conflits, inondations, maladie hydriques, etc. En effet, en Afrique l'eau est le premier vecteur des maladies des enfants : plus de 70 à 80% des maladies sur le continent sont liées à la mauvaise qualité de l'eau. Son inégale répartition géographique, la raréfaction de l'eau exacerbée par le changement climatique pourrait (i) amener certaines régions du monde à accuser un recul du PIB de l'ordre de 6 % et (ii) provoquer des migrations et déclencher des conflits (Camara et Bangoura, 2017).

Au Sénégal, le potentiel en ressources en eau est important. Toutefois, la question de l'eau est devenue une préoccupation majeure compte tenu de la série d'enjeux auxquels est confronté le secteur : rareté, caractère aléatoire des pluies, vulnérabilité des ressources en eau, disparité dans leur répartition spatiale, conflits actuels ou potentiels que pose leur exploitation et surexploitation, dégradation de leur qualité, l'inéquité dans l'accès à la ressource en eau entre les zones, les groupes sociaux, les différentes activités socioéconomique, etc. (Sané, 2015).

Dans une perspective d'éviter la crise de l'eau et les conflits associés, il est fondamental de promouvoir (i) l'hydrodiplomatie, notamment dans les bassins transfrontaliers, mais également (ii) la Gestion intégrée des Ressources en Eau et leur gouvernance dans les différents territoires de l'eau.

Les problèmes liés aux ressources en eau sont connus, les constats de dégradation des eaux sont là : les rejets d'eau usées domestiques et industrielles dans le milieu naturel sans traitement efficient, les effets perceptibles de l'eutrophisation et de détérioration par l'orpaillage sauvage des eaux de surface.

2. Situation actuelle des ressources en eau au Sénégal

La carte ci-dessous présente les bassins versants au Sénégal.

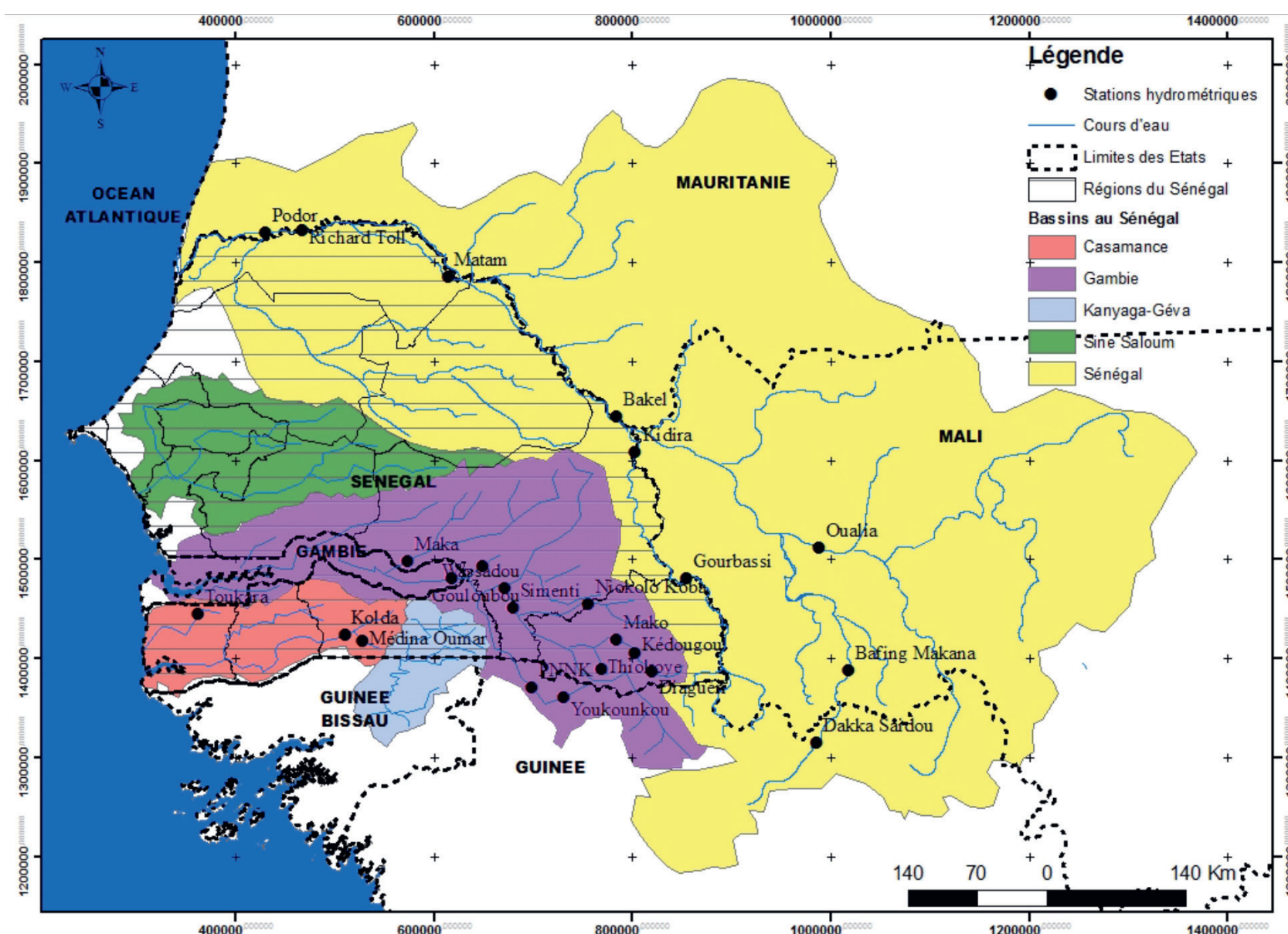


Figure 1 : Bassins versants drainant le territoire sénégalais (Source : DGPPE)

L'essentiel des réserves en eau de surface est localisé dans les bassins des fleuves Sénégal et Gambie dont les eaux proviennent du massif du Fouta Djallon, en République de Guinée (Sané, 2015). A côté de ces deux grands fleuves, il existe des cours d'eau de moindre envergure caractérisés par des écoulements intermittents. Il s'agit de la Casamance, de la Kayanga avec son principal affluent l'Anambé, le Sine, le Saloum et les marigots côtiers (Figure 1). Un certain nombre de lacs et mares répertoriés complètent ce réseau hydrographique ; les plus importants étant : le lac de Guiers, les bolongs des zones estuaires et les mares de la région des Niayes du littoral nord et du Ferlo (Faye et Diéye, 2018).

Les eaux souterraines ont toujours été une composante essentielle du potentiel en eau du Sénégal, mais encore plus prépondérantes depuis le début de la sécheresse. Le pays dispose de quatre grands systèmes aquifères correspondant aux principales formations hydrogéologiques : le système aquifère superficiel (réserves estimées à 50-75 km²) ; le système aquifère intermédiaire (réserves estimées à 100 km²) ; le système aquifère profond (réserves estimées entre 300 et 500 km²) ; le système aquifère du socle (réserves faibles) (Faye et al., 2019).

Les ressources en eau renouvelables totales (eaux de surface, eaux souterraines, eaux intérieures et eaux extérieures) sont estimées à 38,97 km³/an en 2017 (FAO, 2020). Les ressources en eaux renouvelables superficielles sont estimées à 36,97 km³/an. Les ressources en eaux superficielles renouvelables internes sont estimées à 25,8 km³/an, soit un indice de dépendance d'environ 39 % (Tableau 1).

Tableau 1: Ressources en eau renouvelables disponibles de 1992 à 2017 au Sénégal (Source: FAO, 2020)

Paramètres	1992	1997	2002	2007	2012	2017
Population totale (1000 habitants)	8030	9197	10397	11874	13704	15851
Population rurale (1000 habitants)	4899	5540	6175	6931	7832	8825
Population urbaine (1000 habitants)	3131	3657	4222	4943	5872	7026
Densité de population (habitants /km ²)	40,82	46,75	52,85	60,36	69,67	80,58
Ressources en eau renouvelables intérieures totales (10 ⁹ m ³ /an)	25,8	25,8	25,8	25,8	25,8	25,8
Ressources en eau renouvelables extérieures totales (10 ⁹ m ³ /an)	13,17	13,17	13,17	13,17	13,17	13,17
Ressources en eau superficielle renouvelables totales (10 ⁹ m ³ /an)	36,97	36,97	36,97	36,97	36,97	36,97
Ressources en eau souterraine renouvelables totales (10 ⁹ m ³ /an)	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
Ressources en eau renouvelables totales (10 ⁹ m ³ /an)	38,97	38,97	38,97	38,97	38,97	38,97
Indice de dépendance (%)	33,8	33,8	33,8	33,8	33,8	33,8
Ressources en eau renouvelables totales par habitant (m ³ / habitant/an)	4853	4237	3748	3282	2844	2459
Ressources en eau renouvelables intérieures par habitant (m ³ / habitant/an)	3213	2805	2481	2173	1883	1628
Prélèvement d'eau douce total (10 ⁹ m ³ /an)			2,221			
Indice d'exploitation (en %)			5,71			
Capacité totale des barrages (km ³)	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
Capacité des barrages par habitant (m ³ / habitant)	31,13	27,18	24,05	21,05	18,24	15,77
Population totale ayant accès à l'eau potable (%)	61,4	65,2	68,9	72,6	76,3	78,5
Population rurale ayant accès à l'eau potable (%)	43,4	48,6	53,8	59,0	64,2	67,3
Population urbaine ayant accès à l'eau potable (%)	89,4	90,2	90,9	91,7	92,5	92,9

Estimées au prorata de la taille de la population, à partir des prélèvements sur les ressources en eau au Sénégal qui s'élevaient à 2221 millions de m³ en 2002 (FAO, 2020), les projections des prélèvements d'eau de divers secteurs de l'économie sénégalaise sont indiquées dans le Tableau 2. Ces prélèvements d'eau sont estimés à 4655 et 7167 millions de m³ respectivement en 2030 et 2050.

Tableau 2: Projection des prélèvements d'eau de divers secteurs de l'économie sénégalaise (Source: FAO, 2020)

Paramètres	2002	2010	2030	2050	2012	2017
Population totale (habitants)	10 283 694	12 678 142	21 551 461	33 186 850	13704	15851
Ressources en eau renouvelables totales (10 ⁹ m ³ /an)	39	39	39	39	7832	8825
Ressources en eau renouvelables totales par habitant (m ³ / habitant/an)	3789	3074	1808	1174	5872	7026
Prélèvement d'eau pour l'agriculture (10 ⁹ m ³ /an)	2,065	2,546	4,328	6,664	69,67	80,58
Prélèvement d'eau pour les usages industriels (10 ⁹ m ³ /an)	0,058	0,072	0,122	0,187	25,8	25,8
Prélèvement d'eau pour les municipalités (10 ⁹ m ³ /an)	0,098	0,121	0,205	0,316	13,17	13,17
Prélèvement d'eau total (somme des secteurs) (10 ⁹ m ³ /an)	2,221	2,738	4,655	7,167	36,97	36,97
Indice d'exploitation (en %)	5,70	7,03	11,94	18,39	3,5	3,5

3. Ressources en eau et développement durable

Il existe trois règles opérationnelles qui définissent la condition de la durabilité écologique (Smith et Zhang, 2007) : (i) Les ressources renouvelables telles que les poissons, les sols et les eaux souterraines ne doivent pas être utilisées plus vite que le rythme de leur régénération ; (ii) les ressources non renouvelables telles que les minéraux et les combustibles fossiles ne doivent pas être utilisées plus vite que des substituts renouvelables pouvant être mis en place ; (iii) la pollution et les déchets ne doivent pas être émis plus vite que les systèmes naturels pouvant les absorber, les recycler ou les rendre inoffensifs. Pour décrire la durabilité, il faut au moins que l'activité humaine n'utilise les ressources de la nature qu'à un rythme permettant leur reconstitution naturelle. Une façon de mettre en œuvre ces règles est d'examiner comment l'utilisation des ressources renouvelables peut être comparée au taux de renouvellement, comme suit :

Tableau 3 : Définitions de la durabilité (source : Smith et Zhang, 2007)

Consommation de ressources renouvelables	État de l'environnement	Durabilité
Plus que la capacité de la nature à reconstituer	Dégradation de l'environnement	Non durable
Égale à la capacité de la nature à reconstituer	Équilibre environnemental	État stable
Moins que la capacité de la nature à reconstituer	Renouvellement de l'environnement	Développement durable

4. A retenir

- Selon la FAO (2020), les ressources en eau douce renouvelables par habitant ne cessent de diminuer. Elles sont ainsi passées de 1 1612 m3 au Sénégal en 1958-62 à seulement 2 459 m3 en 2017. Ces résultats montrent que le Sénégal se situe déjà dans une situation de vulnérabilité en eau (< 2 500 m3/habitant/an), une évolution qui pourrait le conduire dans le futur d'abord vers une situation de stress hydrique (< 1 700 m3/habitant/an) et ensuite de pénurie d'eau (< 1 000 m3/habitant/an) ;
- Bien que le pays dispose de systèmes fluviaux avec des volumes importants estimés à plus de 26 milliards de m3 par an), de vastes zones, jadis traversées par des cours d'eau, sont devenues presque totalement dépourvues d'eau de surface et/ou marquées par des écoulements intermittents par suite de longues épisodes de sécheresse répétitives ;
- Une situation préoccupante du fait que la consommation d'eau augmente de manière exponentielle par rapport à la croissance démographique du Sénégal alors que la disponibilité par habitant ne cesse de diminuer. Cette situation est un vecteur de compétition autour de la ressource en eau et une source potentielle de conflits d'usages ;
- Le Sénégal pourrait chercher à réduire sa propre incertitude vis-à-vis de la ressource en eau en mettant l'accent sur l'hydrodiplomatie et la coopération autour de l'eau tout en sauvegardant les intérêts des autres pays riverains sur cette question de sécurité nationale.

5. Perspectives scientifiques

Faire une analyse de la qualité de cette précieuse ressource en eau dans un contexte de changement global et une caractérisation des sources de pollution et les processus qui affectent la quantité et la qualité de l'eau au Sénégal
Faire une modélisation hydraulique et une gestion de la ressource en eau dans la perspective du développement durable.

6. Références bibliographiques

Batcho K. A., 2008 : *Analyse de la contribution de la gestion intégrée des ressources en eau (GIRE) dans la résolution des problèmes environnementaux liés à la gestion de l'eau dans l'espace CEDEAO*. Rapport de projet personnel, master spécialisé, 2iE, 34 p.

Camara S. et Bangoura A., 2017 : Valorisation des ressources en eau en Guinée en vue d'un développement économique et social durable. *J. Wat. Env. Sci.* Vol. 1, (Numéro spécial COP22), 106-114.

Faye C. Gomis E.N. and Dieye S., 2019: Current situation and sustainable development of water resources in Senegal. *Ecological Engineering and Environment Protection*, 1, 5-16.

Faye C. and Dieye S., 2018: Valorization of water resources in Senegal for economic, social and sustainable development. *African Journal of Environmental Science and Technology*, 12(12), 449-460.

Faye C., 2017 : Les défis de la pollution de l'eau, une menace pour la sante publique : atouts et défauts des lois et politiques de l'eau au Sénégal. *Larhyss Journal*, 107-126.

Honegger A. et Tabarly S, 2011: *La «gestion durable des ressources en eau» dans le bassin du Rhône, de la théorie à la pratique*. Université de Lyon, UMR / CNRS 5600 EVS) pour Géoconfluences, 12 p.

Sané M., 2015 : Note sur les ressources en eaux du Sénégal : zones potentielles pour le transfert d'eau. Directeur de l'hydraulique, République du Sénégal, 8 p.

Smith E. T. and Zhang H. X., 2007 : Evolution of sustainable water resources indicators. Copyright 2007 Water Environment Federation. All Rights Reserved, 2624-2649.

Thipperudrappa E, Dhananjaya K.B., 2020 : Impact of water resources and sustainable development in India: an overview. *Journal of the Maharaja Sayajirao University of Baroda*, Volume-54, No.2 (X), 36-42.

LES TERRITOIRES DE L'EAU : UN EXEMPLE DE GOUVERNANCE LOCALE DE L'EAU AU SÉNÉGAL

Niokhor Ndour ^{1*}, Soda Loum ², Thelma Pellicer ^{1,3}, Blaise Dhont ³, Moctar Sall ¹, Marie Jeanne Senghor ^{1,4}, Serigne Mansour Tall ⁵, Alioune Kane ⁵

¹ Direction la Gestion et de la Planification des Ressources en Eau (DGPRE), MEA, Sphère Ministérielle de Diamniadio, Dakar, Sénégal.

² UFR Sciences de l'Ingénieur, Université Iba Der Thiam de Thiès, Thiès, Sénégal.

³ Office International de l'Eau, Paris, France.

⁴ Institut de Gouvernance de l'Environnement et Développement Territorial (GEDT), Université de Genève, Suisse.

⁵ UMR Sciences, Technologies Avancées et Développement Durable, Université Amadou Mahtar Mbow de Dakar à Diamniadio, Sénégal.

⁵ Département de Géographie, Université Cheikh Anta DIOP de Dakar, Sénégal.

* Corresponding author : Niokhor.NDOUR@eau-assainissement.gouv.sn

1. Introduction

L'eau est la première ressource naturelle indispensable à la vie. Le développement durable des sociétés humaines et la viabilité des écosystèmes terrestres et marins-côtières en dépendent (Sakho et al, 2017). Dans une situation d'avenir incertain du système climatique mondial, la question du changement climatique et ses impacts sur les ressources en eau, les sociétés et les écosystèmes font l'objet d'une attention particulière au niveau économique, politique et scientifique. Parmi les nombreuses questions que suscitent les ressources en eau, celles de sa protection et de sa gestion durable se posent avec acuité, notamment dans les bassins partagés. La gestion de l'eau s'appréhende donc à différentes échelles spatiales (du régional au local) (Loum, 2015 ; Faye et al, 2018 ; Faye et al, 2019). Ainsi, au niveau national, elle se fait à travers des cadres politiques, juridiques et institutionnels, liés à la souveraineté des États par rapport à leur territoire et leurs ressources. C'est dans ce cadre, que le Sénégal a défini une stratégie de gouvernance locale de l'eau à travers le concept de territoires de l'eau.

2. Contexte national de la GIRE

Le concept de territoires de l'eau évoqué ci-dessus illustre l'engagement du Sénégal depuis le début des années 2000 dans une politique de Gestion Intégrée des Ressources en Eau (GIRE) dans un contexte de pressions anthropiques croissantes sur la ressource (développement économique et démographique) et de changements climatiques.

Ainsi, en parallèle du processus de réforme du Code de l'Eau, la Direction de Gestion et de Planification des Ressources en Eau (DGPRE) du Ministère de l'Eau et de l'Assainissement a développé différents outils dont le Plan d'Action pour la Gestion Intégrée des Ressources en Eau (PAGIRE) décliné autour de cinq objectifs stratégiques pour la période 2018-2030 :

- 1) Renforcer la gouvernance et les instruments de gestion des ressources en eau.
- 2) Préserver l'intégrité des masses d'eau et améliorer durablement la qualité de l'eau et des services.
- 3) Promouvoir la gestion intégrée et durable des eaux dans un contexte de changement climatique.
- 4) Promouvoir la valorisation des eaux.
- 5) Améliorer et diffuser les connaissances sur les ressources en eau.

Par ailleurs, le Plan Stratégique de Mobilisation des Ressources en Eau (PSMRE) découpe le territoire national en 5 unités et 28 sous-unités de gestion et de planification (UGP) conçues comme des espaces homogènes pour la gestion de la ressource.

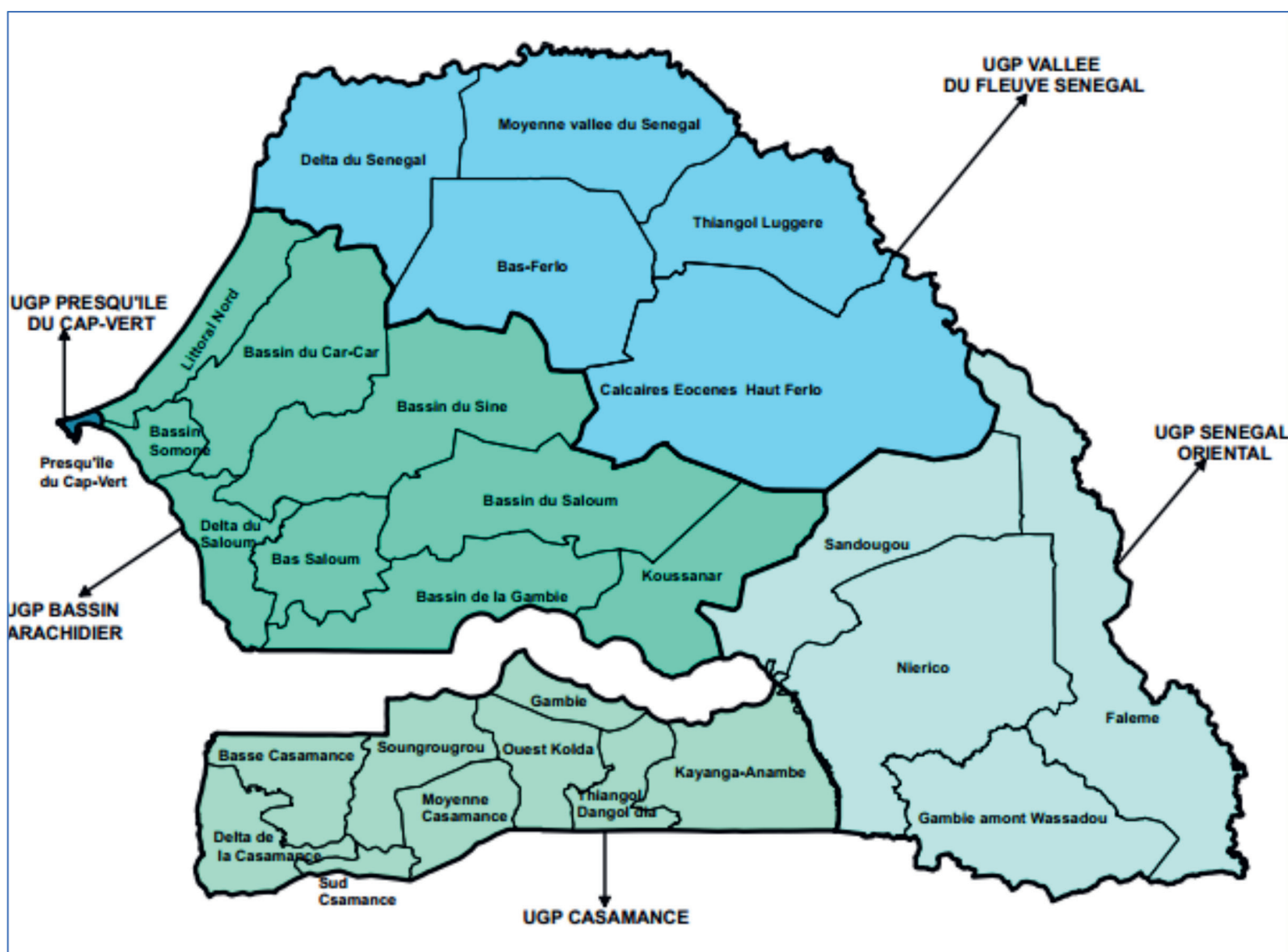


Figure 1. Les territoires de l'eau au Sénégal : les Unités de Gestion et de Planification

Les cinq (05) principales UGP sont (Figure 1) :

- le bassin arachidier ;
- la Casamance ;
- le Sénégal Oriental ;
- la rive gauche de la vallée du Fleuve Sénégal ;
- la presqu'île du Cap-Vert ;

Les UGP correspondent à des espaces territoriaux pratiquement homogènes en termes de caractéristiques des eaux souterraines et de surface, qu'on appelle souvent territoire de l'eau. Elles servent de cadre physique pour la gestion, la planification et la mise en valeur des ressources en eau, à l'échelle régionale ou interrégionale, entre plusieurs collectivités territoriales. Elles respectent néanmoins les contours des collectivités territoriales afin de faciliter leur participation dans le processus de gestion des ressources en eau à travers une approche d'intercommunalité.

Les subdivisions de ces UGP en sous-UGP respectent les contours des communes et sont de taille limitée afin de faciliter la participation des collectivités territoriales dans le processus de gestion intégrée des ressources en eau. Ainsi, 27 sous-unités de gestion ont été définies comme base pour l'analyse de l'impact sur le bilan des ressources en eau des scénarios de mobilisation des ressources en eau envisagés (Figure 1).

Les facteurs pris en compte pour l'identification de zones homogènes sont le niveau de précipitation et les caractéristiques des ressources en eau. Lorsque cela est pertinent, le contour des bassins versants au 3ème degré est pris en compte.

Tableau 1. Echelles de planification de la gestion l'eau

Échelle	Instrument de planification	Cadre de gouvernance
UGP (5)	SDAGE	Comité de Gestion et de Planification de l'Eau (CGPE)
sous UGP (28)	Plan de Gestion des Eaux (PGE)	sous-Comité de Gestion et de Planification de l'Eau (SCGPE)
Communale	Plan Local de GIRE (PLGIRE)	Comité Communal de l'Eau (CCE)

La mise en œuvre de cette politique ambitieuse de GIRE est aujourd'hui un défi pour la DGPRE.

3. L'expérience pilote de la Somone

L'organisation du territoire en unités et sous-unités de gestion et de planification, chacune dotée d'un cadre de concertation et d'outils de planification, pose la question de comment animer et opérationnaliser la GIRE dans ces espaces. Ainsi, la DGPRE a identifié en 2019 un bassin pilote pour expérimenter des solutions fondées sur une approche participative : la Sous-UGP de la Somone (figure 2). Cette initiative bénéficie du soutien technique et financier de l'agence de l'eau Seine-Normandie et de l'Office International de l'Eau et s'articule autour des quatre piliers de la GIRE : Gouvernance, Planification, Connaissance, Financement.

La carte ci-dessous, présente la sous-UGP de Somone. Elle est le premier bassin pilote de gouvernance locale de l'eau.

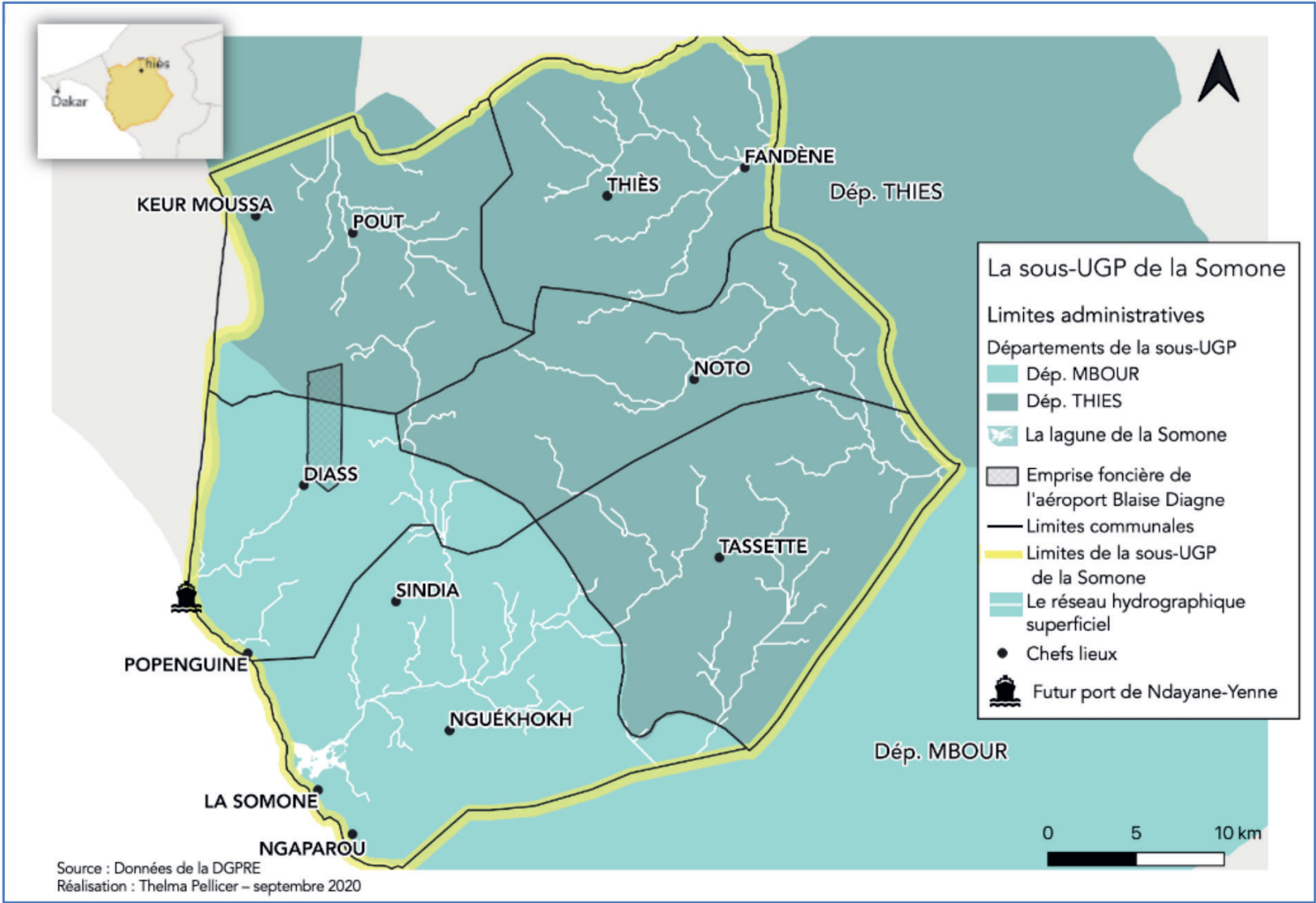


Figure 2. Les territoires de l'eau au Sénégal : la Sous-UGP de Somone

La Sous-UGP de la Somone est au cœur d'une région clé pour l'économie du Sénégal, le triangle Dakar-Thiès-Mbour. La croissance démographique de la zone est soutenue et la partie littorale bénéficie d'une forte attractivité touristique. Le territoire est par ailleurs structuré par une forte activité économique, diversifiée et dispersée sur l'ensemble de la Sous-UGP. On y rencontre des activités traditionnelles d'élevage, d'agriculture vivrière et maraîchère, agro-industrielles avec la présence de grandes exploitations exportatrices de fruits et légumes, et industrielles avec notamment deux grandes cimenteries mais également par la production d'eau de consommation. Les ressources en eau de surface dans la Sous-UGP sont limitées (cours d'eau intermittents) mais la potentialité des nappes souterraines (superficielles, intermédiaires et profondes) est importante. Ainsi, la quasi-totalité des ressources utilisées pour la satisfaction des besoins en eau dans la Sous-UGP est prélevée dans les eaux souterraines. Or la recharge est limitée et on estime que les prélèvements représentent actuellement le double de la capacité de renouvellement des nappes. En 50 ans, le toit des nappes a baissé de 20 à 50 m dans certaines zones.

L'eau est un bien précieux et limité, essentiel pour l'alimentation en eau potable des populations, le développement de l'activité économique et le maintien des écosystèmes. Face à ce constat, l'expérience de la Somone portée par la DGPRE a pour objectif la création d'un cadre de concertation et de gouvernance de la ressource qui aura pour objectif d'améliorer le dialogue entre les acteurs et favoriser l'émergence de solutions pour une utilisation plus rationnelle de l'eau diminuant la pression sur la ressource (priorité entre les usages et les ressources, règlement d'eau, réinfiltration, etc.).

Le Sous-Comité de Gestion et Planification des Eaux (SCGPE) de la Somone a ainsi été créé de manière participative avec un groupe de travail ad hoc constitué des représentants des services techniques déconcentrés ministériels sénégalais. Cette approche, en s'appuyant sur les acteurs du territoire, a permis de préparer l'appropriation du comité par les parties prenantes et de lui donner l'architecture suivante.

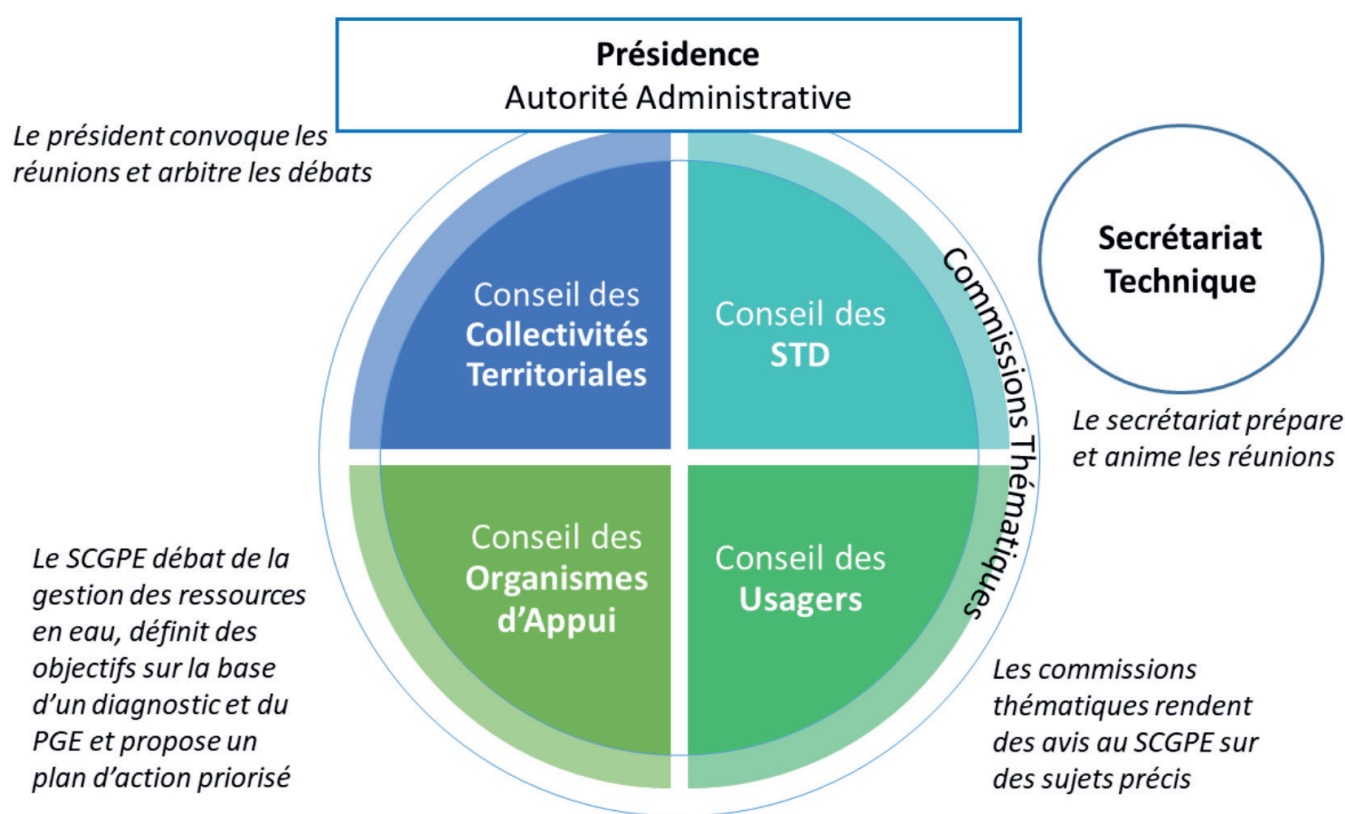


Figure 3 : Schéma de l'architecture institutionnelle du SCGPE de la Somone

- Le Président du comité, à savoir M. le Gouverneur de Thiès, convoque et anime le comité pour les réunions plénières (biennuelles, ou au besoin).
- Les quatre conseils sont le cœur du comité. Leurs membres pourront exprimer leur positionnement sur les problématiques liées à la gestion de l'eau présentées. Ils proposent des avis, émettent des décisions sur les questions prioritaires.
- Les commissions thématiques, ou géographiques, permettront d'approfondir les connaissances sur des problématiques territoriales ou des enjeux particuliers qui seront discutés en assemblée plénière.
- Enfin, le Secrétariat Technique a un rôle primordial pour le bon fonctionnement du SCGPE. Il assure le suivi et la pérennité de ce comité. Son efficacité repose sur la motivation et l'investissement des membres qui le composent.

Le SCGPE de la Somone a été instauré suite à la signature de son arrêté de création par Monsieur le Gouverneur de Thiès le 27 janvier 2021. Il constitue le premier cadre de concertation pour l'expérimentation d'une politique de GIRE au Sénégal et a vocation à venir alimenter la réflexion autour de la GIRE et de sa mise en œuvre au Sénégal.

Le SCGPE crée, l'enjeu est de faire fonctionner cette nouvelle instance et de la faire reconnaître à la fois au niveau local (sous UGP, communes) et au niveau supérieur (UGP, national), en particulier dans l'UGP du Bassin arachidier. Le mandat du SCGPE est d'initier un premier cycle de GIRE sur son territoire, consisté des étapes suivantes :

- Diagnostic du bassin et identification des enjeux prioritaires
- Élaboration d'un plan d'action pour la planification des ressources en eau
- Suivi et évaluation de la mise en œuvre du plan d'action
- Démarrage d'un nouveau cycle de planification.

4. A retenir

Actuellement, le SCGPE de la Somone œuvre à l'actualisation du diagnostic de l'état de la ressource en eau dans le bassin en travaillant sur des thèmes prioritaires. Le partage de ce diagnostic entre les acteurs du bassin, aux intérêts parfois contraires, permettra de définir conjointement les objectifs prioritaires et de construire un plan d'action opérationnel en phase avec les moyens et les initiatives déjà en cours. En procédant ainsi, par cycles de planification itératifs, en répondant progressivement aux problématiques du bassin en fonction des ressources disponibles et en associant les acteurs locaux, la dynamique de GIRE insufflée par la DGPPE pourra se pérenniser et inspirer d'autres expériences, et ailleurs sur le territoire.

5. Perspectives

- Développement des expériences de GIRE sur des Sous-UGP pilotes comme celle de la Somone (en cours d'expérimentation) ;
- Articulation entre les échelles et les outils de planification ;
- Mise en place d'un SDAGE dans chaque UGP et d'un CPGE ;
- Mise en place de comités de l'eau ou de plateformes locales de l'eau ;
- Partager les connaissances, notamment à travers le Système d'Information Intégrée sur les Ressources en Eau du Sénégal (SIRES), et établir des guides de bonnes pratiques ;
- Identifier des mécanismes de financement pérennes ;
- Mettre à l'échelle les modèles réussis de GIRE pour des territoires de l'eau viables, durables et plus résilients face aux effets du changement climatique.

6. Références

Faye C. Gomis E.N. and Dieye S., 2019: Current situation and sustainable development of water resources in Senegal. *Ecological Engineering and Environment Protection*, 1, 5-16.

Faye C. and Dieye S., 2018: Valorization of water resources in Senegal for economic, social and sustainable development. *African Journal of Environmental Science and Technology*, 12(12), 449-460.

Sakho, I., Dupont, J.-P., Cisse, M. T., Janyani, S. E., & Loum, S. 2017. Hydrological responses to rainfall variability and dam construction : A case study of the upper Senegal River basin. *Environmental Earth Sciences*, 76(6), 253. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6570-4>

Loum, S. 2015. Gouvernance de l'eau en région semi-aride : gestion technocratique ou politique sociale ? : Le cas du delta du fleuve Sénégal. Thèse de Doctorat, Université de Rouen, France, 307 pages.



CHAPITRE 4

EAU : 3 R RESSOURCES, RISQUES & RESILIENCE

LA PROBLÉMATIQUE DE L'ALIMENTATION EN EAU POTABLE DE LA VILLE DE DAKAR : CONTRIBUTION DES RESSOURCES EN EAUX SOUTERRAINES ET DE SURFACE

Ousmane Coly Diouf^{1*}, Aissatou Gueye¹, Mathias Diedhiou¹, Ndeye Maguette Dieng¹, Moustapha Diouf², Seynabou Cissé Faye¹, Sérigne Faye¹

¹ Département de Géologie, Faculté des Sciences et Techniques, University Cheikh Anta Diop, Dakar, B.P 5005, Dakar-Fann, Senegal

² CEO ProSE SARL, Dakar, Sénégal

* Corresponding author : ousmanecoly.diouf@ucad.edu.sn

Résumé

L'étude sur l'alimentation en eau de Dakar montre que les eaux de surface et les eaux souterraines contribuent respectivement pour 39% et 61% à l'approvisionnement en eau potable de la région de Dakar au cours des vingt (20) dernières années (2000 à 2019). En effet, les 61% sont répartis entre 23%, 19%, 12%, 6% et 1% respectivement par les nappes du Maastrichtien, de l'Eocène, du Paléocène, des sables infrabasaltiques et de Thiaroye. L'estimation des besoins en eau des populations dans la région de Dakar révèle que ceux-ci évoluent progressivement avec la croissance démographique. L'analyse comparative de la demande en eau en rapport avec les volumes d'eau consommés à des fins domestiques indique un déficit perpétuel dans la région.

Mots clés : *Prélèvement, Maastrichtien, Paléocène, Eocène, infrabasaltique, nappe*

1. Introduction

Le Sénégal, à l'instar de plusieurs pays en voie de développement, connaît d'énormes difficultés liées à l'approvisionnement en eau potable des populations particulièrement dans les grandes agglomérations comme la région de Dakar. Ainsi, la ville de Dakar, qui est le principal siège des institutions gouvernementales, est le plus grand centre urbain du Sénégal et un important centre financier, commercial, manufacturier et de transport. La ville, qui compte actuellement environ 3 millions d'habitants, reçoit de nombreuses migrations rurales, ce qui entraîne à son tour des problèmes typiques d'une mégapole tropicale. L'expansion démographique a entraîné une augmentation de la demande en eau. Depuis les années 1970, l'approvisionnement en eau de Dakar à partir des aquifères les plus proches n'était plus suffisant, il a fallu trouver d'autres ressources pour combler le déficit en eau potable de la ville de Dakar et de ses environs. Malgré l'exploitation des nappes calcaires paléocènes de Pout et de Sébikotane, du littoral nord et du Maastrichtien mais aussi du fleuve Sénégal via un pipeline d'environ 250 km depuis le lac de « Guiers » (KMS1, 2), la région de Dakar connaît toujours des problèmes d'approvisionnement en eau potable. Face à cette demande croissance en eau, un programme à moyen-long terme consistant à la réalisation d'une nouvelle station de pompage (Keur Momar Sarr 3, KMS3) et de dessalement d'eau de mer sont mises en place pour apporter une solution durable à ce problème d'approvisionnement en eau potable de la ville de Dakar. C'est dans ce contexte d'une exploitation intensive des ressources en eau que s'inscrit cette étude qui a comme objectif d'évaluer la contribution des ressources en eaux souterraines et de surface à l'AEP de Dakar.

2. Présentation de la zone d'étude

La zone d'étude est située entre les longitudes 16°55' et 17°30' Ouest et les latitudes 14°55' et 14°35' Nord. Elle se trouve à l'extrême ouest du Sénégal, avec une superficie de 550 Km² environ 0,28% du territoire national. Cette région occupe la presqu'île du Cap-Vert et est limitée au nord, au sud et à l'ouest par l'océan atlantique et à l'est par la région de Thiès qui est sa seule ouverture au continent (Figure 1).

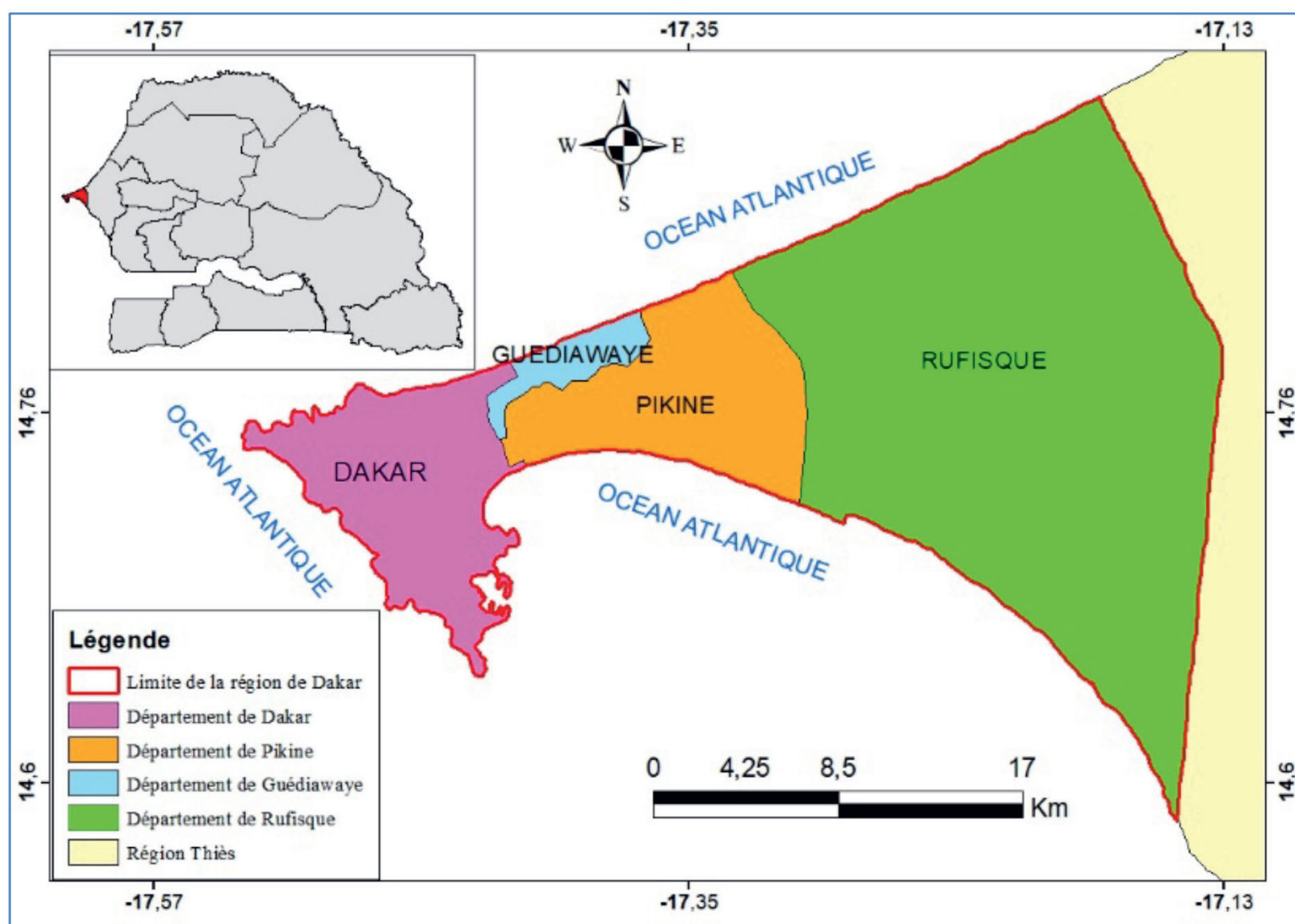


Figure 1: Localisation de la zone d'étude

La région de Dakar est caractérisée par une très grande variété de sols, ce qui explique l'abondance de la végétation dans certaines zones. Elle est caractérisée par un relief peu accidenté distingué par la présence de deux horsts séparés par un graben : la tête de la presqu'île à l'Ouest avec une altitude maximale de 105 m ; le horst de Diass situé à l'Est avec une altitude maximale de 127 m ; et le graben de Rufisque (OMS, 1972). Le recensement Général de la Population et de l'Habitat (RGPH, 2019) du Sénégal et les résultats des projections démographiques indiquent que la population de Dakar est passée de 1 561 848 habitants en 1990 à 2 323 370 habitants en 2000, 2 956 023 habitants en 2013 et 3 732 284 habitants en 2019. De nos jours, le territoire de la région de Dakar compte plus de 3 millions d'habitants. En plus la projection du PDU (Plan Directeur d'Urbanisme) estime que la région aura plus de 5 millions habitants en 2025 (GRDR et IFAN, 2014).

Sur le plan climatique, la région de Dakar se trouve plus précisément dans le domaine sahélien. Les mesures de précipitation recueillies à la station de Yoff montrent que les pluies sont caractérisées par une grande variabilité inter annuelle. Sur la période 1990 - 2019, la hauteur de pluie la plus élevée est de 663,4 mm (2005). Tandis que le minimum de précipitation est de 161,3 mm en 2014 avec une moyenne interannuelle de 378 mm.

La géologie de la région de Dakar, s'inscrit dans celle du bassin sédimentaire Sénégal-Mauritanien qui s'étend sur une superficie de 340 000 Km². La majorité des affleurements de la zone d'étude consiste en des formations du Quaternaire (recouvrements sableux récents). Cependant, le Paléocène et l'Eocène affleurent aussi de même que la partie terminale du Crétacé (le Maastrichtien). Dans la région de Dakar, les Formations du Maastrichtien passent latéralement à une série entièrement argileuse reconnue au voisinage du lac Retba (Bellion, 1987). Le Paléocène est assimilé à la formation marno-calcaire des Madeleine dont l'épaisseur moyenne dans les sondages est de 75 à 100 m (Castelain et al., 1965 ; in Bellion 1987).

L'Eocène correspond essentiellement aux argiles silicifiées tandis que l'Oligocène équivaut à des calcaires qui sont conservés à l'état de blocs enveloppés dans les tufs volcaniques miocènes de l'Anse Bernard et de la Plage Pasteur (Bellion, 1987). Le Néogène est rencontré au toit des coulées volcaniques du système du Cap Manuel sous forme de curasse latéritique (Bellion 1987). Le Quaternaire est caractérisé essentiellement par une alternance des épisodes de transgressions et de régressions de la mer qui déterminent essentiellement les dépôts de sables coquilliers qui caractérisent une période appelée l'Inchirien, l'accumulation d'alluvions graveleuses (sables, graviers, galets de quartz, de basalte) dans les bas-fonds qui correspond à l'Acheuléen, la

mise en place des dunes Ogolien et l'accumulation de dépôts de coquillages dans les dépressions interdunaires et les zones déprimées qui correspondent au Nouakchottien (Hébrard, 1966 ; Martin, 1970).

Le système hydrogéologique de la région de Dakar est essentiellement constitué des sables du Quaternaire qui renferment deux réservoirs d'eau de type différent : l'aquifère des sables infrabasaltiques recouvert par les coulées volcaniques quaternaires des Mamelles localisé à la tête de la presqu'île du Cap-Vert ; au-delà de la limite d'extension des coulées basaltiques, l'aquifère devient libre et se confond avec l'aquifère des sables quaternaires de Thiaroye qui se limite aux lac Tanma.

3. Méthodologie de l'étude

Les données utilisées dans cette étude concernent les prélèvements tirés de la base de données du projet de la DGPPE intitulé « *mise en place d'une base de données des statistiques sur l'eau du Sénégal* ». Quant aux données de consommation en eau de la région de Dakar, elles sont fournies par la SONES. La chimie des eaux a été recueillie au niveau de la Direction Gestion de la Planification des Ressources en Eau (DGPPE). Les données démographiques utilisées sont tirées des rapports de projections de l'Agence Nationale de la Statistique et de la Démographie (ANSD).

Les prélèvements destinés à approvisionner la région de Dakar concernent la période allant de 2000 à 2019. Les sources de production d'eaux potables sont les nappes des sables infrabasaltiques, de Thiaroye, de l'Eocène, du Maastrichtien et du Paléocène mais également les eaux de surface (lac de Guiers). Pour évaluer les prélèvements destinés à alimenter la région de Dakar, on a calculé les volumes annuels fournis par chaque aquifère et les volumes produits par chaque type d'eau (eau de surface, eau souterraine) dans le but d'étudier leurs variations entre 2000 et 2019. La contribution annuelle de chaque source d'eau a été déterminée pour en déduire les moyennes sur 20 ans.

Les données de consommation en eau dans la région de Dakar sont obtenues pour la période 2009 à 2019 à partir des volumes d'eau facturés par la SDE (actuelle SEN'EAU). Les volumes d'eau consommés par an ont été calculés pour déterminer l'évolution de la consommation en eau durant cette période. La problématique de l'AEP (Alimentation en eau Potable) dans la région de Dakar est étudiée en déterminant les volumes d'eau consommée et le besoin en eau dans la région. Ce qui nous a permis de déterminer le déficit en eau. C'est ainsi que :

- le besoin en eau (B_e) est la quantité d'eau nécessaire qui permet aux populations de satisfaire leurs besoins et de pouvoir vivre dans de meilleures conditions ;
- la consommation en eau (C_e) représente la quantité d'eau consommée par les populations c'est-à-dire la partie des prélèvements qui est facturée. ;
- le déficit en eau (D_e) représente la quantité d'eau qui manque aux populations pour satisfaire leurs besoins. Il est estimé en utilisant l'équation suivant :

$$D_e = B_e - C_e \quad (1)$$

Si $D_e > 0$ alors il y'a un déficit en eau ;
Et si $D_e < 0$ il y'a suffisamment d'eau.

Les données chimiques ont été obtenues suite aux campagnes d'échantillonnages qui ont été effectuées sur la nappe des sables infrabasaltiques en juin 2019, la nappe du maastrichtien en décembre 2019 et celle du Paléocène en décembre 2019. Les échantillons d'eau recueillis ont été acheminés au laboratoire d'hydrologie et d'hydrochimie du département de géologie de l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar pour les analyses chimiques.

4. Résultats et interprétations

4.1. Ressources en eau qui alimentent Dakar en eau potable

4.1.1. Historique de l'alimentation en eau potable de Dakar

En l'absence de ressource locale suffisante pour assurer l'approvisionnement en eau potable de Dakar, plusieurs aquifères de même que le lac de Guiers ont été sollicités au cours du temps.

La région de Dakar a toujours été confrontée à des difficultés liées à l'AEP bien avant la découverte de la nappe infrabasaltique en 1925. L'exploitation de cette dernière a connu de nombreux vicissitudes, dont l'intrusion saline (Gaye, 1983) détectée vers les années 1950 et qui a conduit à l'arrêt de certains forages pour éviter l'avancée du front salé. Ainsi, en 2014, il n'y avait que 15 forages fonctionnels captant la nappe infrabasaltique. Cependant, entre 2015 et 2018, il y'a 14 nouveaux forages qui ont été réalisés captant cette nappe. Ceci montre que l'exploitation de cette nappe devient de plus en plus intense de même que les risques d'intrusion saline.

La nappe de Thiaroye fut la première ressource en eau souterraine (1945) à part la nappe infrabasaltique à être mise à contribution pour l'AEP de Dakar. L'exploitation de cette nappe a été arrêtée en raison de sa pollution nitratée (concentration > 50 mg/l). Seuls quelques forages (F19 et F22) sont fonctionnels durant l'hivernage pour rabaisser le niveau de la nappe et « palier » aux inondations récurrentes dans la zone péri-urbaine.

A partir de 1957-1958, la nappe du Paléocène dans la zone de Sébikotane est sollicitée avec 4 forages. Ils sont mis en service en Décembre 1958 avec un débit de 28 000 m³/j (Martin, 1970). Ces forages sont actuellement à l'arrêt à cause des venues d'eaux saumâtres.

Les eaux de surface du Lac de Guiers, situé au nord du pays à 250 km de la région de Dakar, ont été sollicitées depuis les années 1970. L'eau pompée au niveau du lac est traitée d'une part dans l'usine de traitement des eaux de Ngnith mise en place en 1971 avec une capacité de production de 64 000 m³/j, et d'autre part celle de Keur Momar Sarr 1 (KMS1) mise en service en 2004 dans le cadre du Projet « *Eau à Long Terme* » avec une capacité de production de 65 000 m³/j (DH, 2015). Le KMS2 est implanté en 2008 avec la même capacité que KMS1 ce qui renforce la production de l'usine à 130 000 m³/j. Cette eau est acheminée vers Dakar à l'aide de deux conduites souterraines dénommées le Système ALG (Adduction du Lac de Guiers).

En 1976, la nappe de l'Eocène du littoral Nord a été sollicitée avec la réalisation du champ captant de Kelle/Kébémér construit dans le cadre du Projet Sectoriel Eau (DH, 2015). Ce champ était constitué de 5 forages (F1 Kébémér, Kelle F1, Kelle F2, Kelle F3 et Kelle F4). Ces derniers fournissaient un débit de 27 000 m³/j qui est injecté dans la conduite du système ALG. Ce champ de captage compte aujourd'hui 9 forages, en plus du F1 Guéoul qui a été réalisé en 2014.

En 1998, un nouveau champ de captage appelé FLN (Forages du Littoral Nord) composé de 11 forages (FLN 1 à FLN11) a été réalisé dans la zone de Guéoul. Il capte la même nappe que celui de Kelle/Kébémér. L'étude hydrogéologique du BRGM en 1992, avait autorisé à ce champ de produire un débit global de 35 000 m³/j (SONES, 2015). Ainsi, la contribution de la nappe du littoral nord à l'AEP de Dakar s'élève à 62 000 m³/j. Actuellement les FLN comptent 9 forages fonctionnels.

La nappe du Maastrichtien et celle du Paléocène commencent à être exploitées au niveau du horst de Diass pour renforcer l'approvisionnement en eau de la région de Dakar (SONES, 2015 ; DH, 2015) :

- en 1978, au centre de captage de Pout Nord (PN) avec des forages qui produisent un débit de 48 000 m³/j dont quatre (4) forages totalisent 15 000 m³/j dans les calcaires paléocènes et neuf (9) captent les sables Maastrichtien avec un débit de 33 000 m³/j ;
- en 1984, dans le centre de pompage de Pout Sud (PS) dont cinq forages captent la nappe du Maastrichtien et deux exploitent la nappe des calcaires paléocènes. Ces forages fournissent en moyenne 4 000 m³/j. La production de ces derniers a été réduite depuis une trentaine d'année afin d'éviter les menaces d'intrusion saline. Les eaux du centre de captage de Pout Sud sont injectées dans la conduite BONNA qu'il partage avec les forages de Sébikotane ;
- en 1993, au niveau du centre de captage de Pout Kirène (PK) qui dénombre cinq forages dans le Maastrichtien totalisant 18 000 m³/j. Actuellement, ce centre de captage compte onze (11) forages avec celui de Keur Séga implanté en 1997.

Récemment en 2018, deux nouveaux centres de captage ont été implantés l'un dans la zone de Bayakh l'autre dans celle de Tassette. Le champ de Bayakh compte treize (13) forages captant tous le Paléocène. Celui de Tassette compte six (6) et quatre (4) forages captant respectivement les calcaires du Paléocène et le Maastrichtien (FM3, FM4, FM7 et FM8). Les débits d'exploitation des forages sont variables et compris entre 130 et 200 m³/h à la station de Bayakh et 40 et 150 m³/h à celle de Tassette.

Actuellement, la troisième usine de traitement d'eau (KMS3) d'une capacité de 100 000 m³/j est mise en service en juillet 2021. Elle a pour objectif de satisfaire les besoins en eau des populations de Dakar, de la petite Côte et des localités traversées par la conduite ALG. Le projet de l'usine de dessalement de l'eau de mer au niveau des mamelles est en cour de réalisation. Il permettra de couvrir les besoins en eau potable d'une partie de la population de la région de Dakar.

4.1.2. Contribution des eaux de surface (lac de Guiers) (2000 – 2019) à l'AEP de Dakar

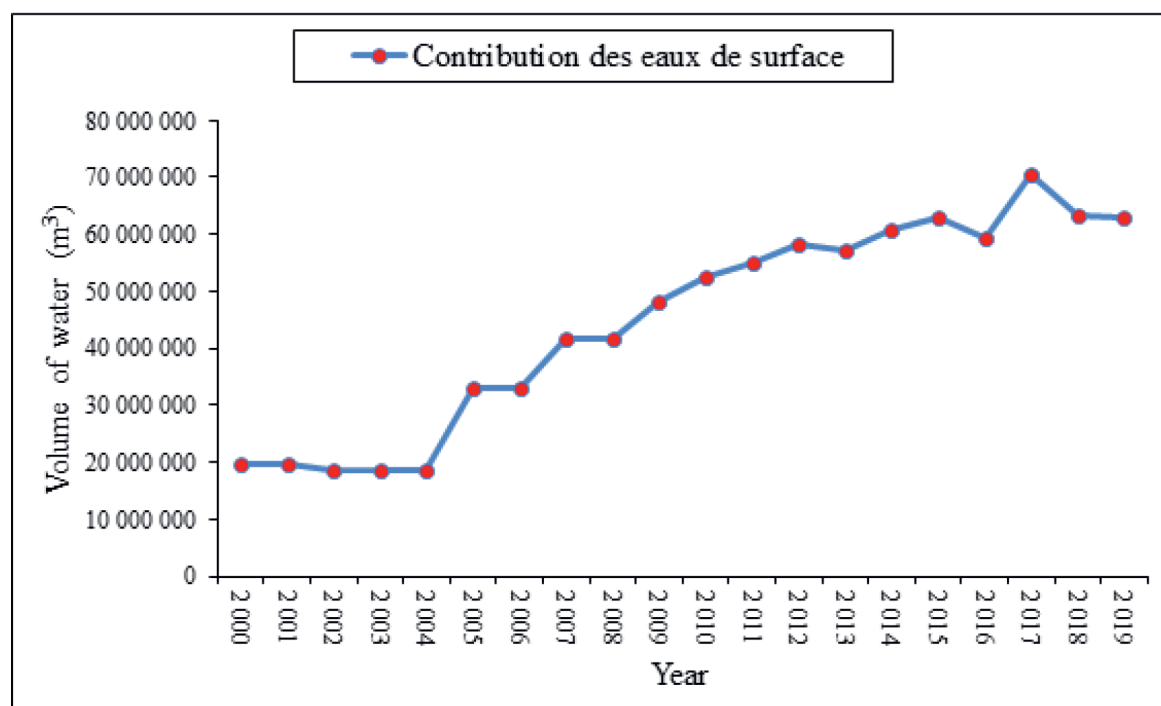


Figure 2 : Variation des volumes d'eau prélevés au niveau du lac de Guiers pour approvisionner la région de Dakar (2000 – 2019).

Le lac de Guiers contribue à l'approvisionnement en eau potable de Dakar depuis 1971. L'eau qui est prélevée au niveau du lac est traitée au niveau des usines de Ngnith et de KMS avant d'être transportée à Dakar à l'aide de deux conduites ALG 1 et ALG 2. L'étude de la variation des prélèvements des eaux du lac entre 2000 à 2019 montre une augmentation qui n'est pas constante (Figure 2). En effet, de 2000 à 2004, la contribution des eaux de surface varie entre 19 et 18 millions de m³/an. Cependant, au-delà de cette période, on observe d'une part une évolution des pompages jusqu'à atteindre 70 millions de m³ en 2017 et d'autre part une légère diminution des prélèvements en 2018 (63 millions de m³) et 2019 (62 millions de m³). Cette augmentation des pompages pourrait être liée à la mise en œuvre de l'usine KMS 1 en 2004 et son extension en 2008.

4.1.3. Contribution des eaux souterraines (2000 – 2019) à l'AEP de Dakar

La contribution des eaux souterraines à l'approvisionnement en eau potable de Dakar est composée des volumes d'eau prélevés, au niveau des nappes des sables infrabasaltiques et de Thiaroye se localisant dans la région de Dakar, ceux tirés au niveau des nappes du Maastrichtien et du Paléocène se trouvant au niveau du horst de Diass et ceux produit par la nappe de l'Eocène au niveau de la région de Louga. Entre 2000 et 2019, les pompages sur les ressources en eau souterraines sont variables (Figure 3). De 2000 à 2004, ils augmentent de 61 à 67 millions de m³ et entre 2005 et 2014 les volumes d'eau pompés diminuent et varient entre 54 et 58 millions de m³. Au-delà de cette période, les volumes d'eau prélevés augmentent jusqu'à atteindre 91 millions de m³ en 2019. La situation de la période 2005 – 2014 pourrait être liée probablement par le fait que depuis 2005, une stratégie de baisse importante des prélèvements des nappes souterraines dans le cadre de l'approvisionnement en eau de Dakar était en application au profit d'une augmentation des prélèvements sur le lac de Guiers, suite à l'étude Diagnostic de ICEA (SONES, 2008). L'augmentation des pompages entre 2015 et 2019 est liée au fait que beaucoup de forages captant le Maastrichtien ont été réhabilités au niveau des centres de captage de Pout Kirène et Pout Nord mais également à la réalisation de nouveaux forages captant la nappe infrabasaltique et celle du Maastrichtien au centre de pompage de Tassette et de Bayakh.

La contribution des différentes ressources en eau à l'AEP de Dakar entre 2000 et 2019 montre que 39 % des eaux sont produites par les eaux de surface plus précisément le lac de Guiers. La contribution globale des eaux souterraines s'élève à 61% dont le Maastrichtien fournit la plus grande quantité 23%. Il est suivi de l'Eocène qui fournit 19% et du paléocène qui produit 12%. Les nappes de la région de Dakar ont fourni seulement 7% réparti entre les sables infrabasaltiques (6%) et les sables quaternaires de Thiaroye (1%) (Figure 4).

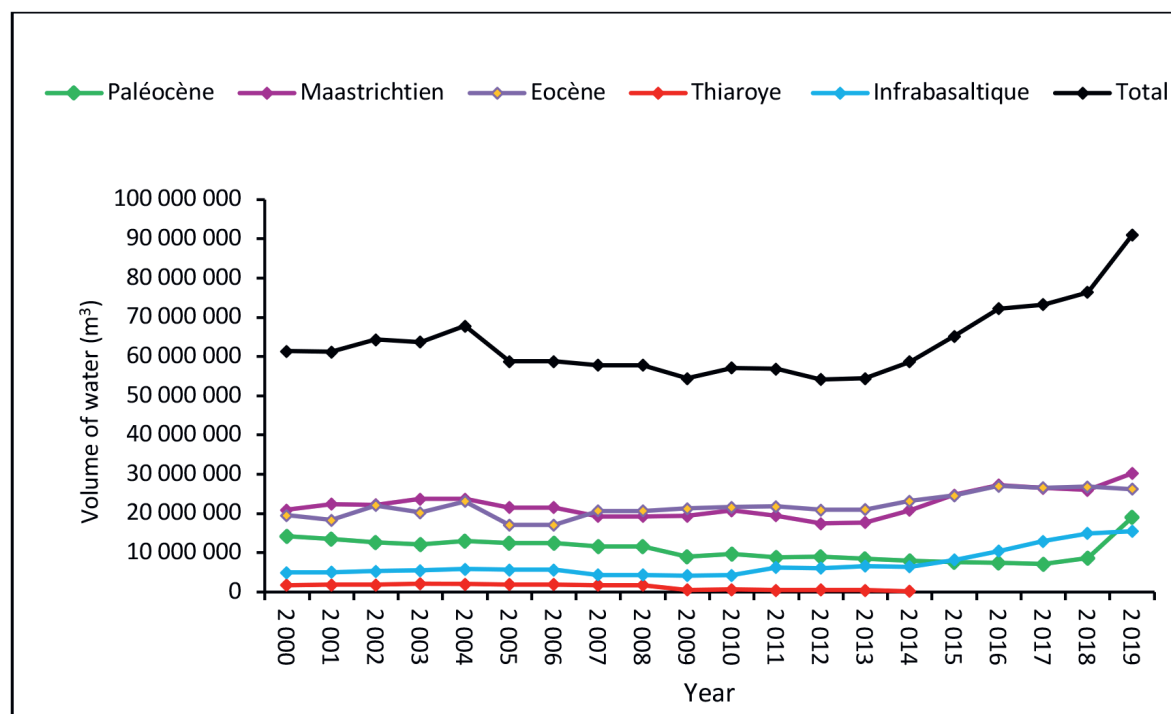


Figure 3 : Variation des volumes d'eau prélevés sur les ressources en eau souterraine pour approvisionner la région de Dakar (2000 - 2019).

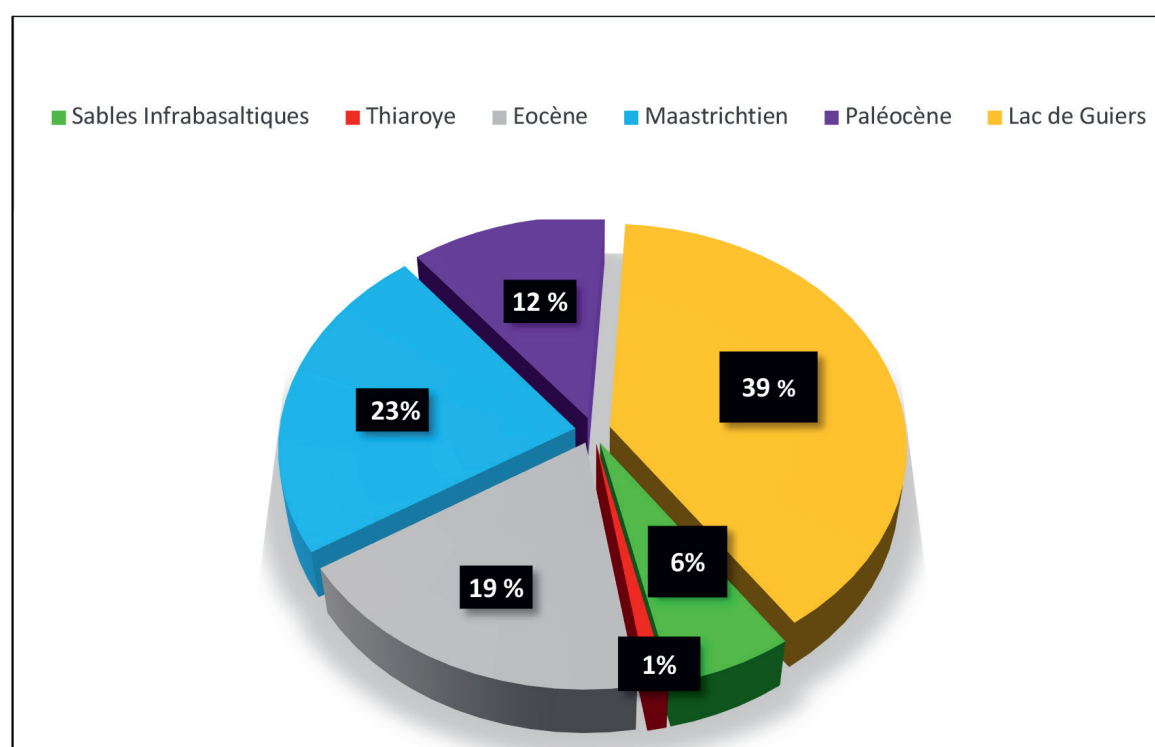


Figure 4 : Contribution des eaux de surface et souterraine à l'AEP de Dakar (2000 - 2019).

4.2. Evolution de la demande en eau en rapport avec la démographie

L'approvisionnement en eau pour la consommation humaine (usage AEP) est toujours considéré partout comme étant l'usage prioritaire, car il correspond à la satisfaction des besoins indispensables à la vie humaine. Pour ce type d'usage, une personne a besoin de 35 litres d'eau par jour lorsqu'elle vit en milieu rural et de 60 litres d'eau par jour lorsqu'elle vit en milieu urbain. Ainsi, les besoins en eau de la population de la région de Dakar sont estimés en se basant sur cette information et les projections démographiques de l'ANSD (2009 à 2019). La figure 5 représente l'évolution de la démographie, des besoins en eau, de la consommation en eau (usage AEP) et du déficit en eau. Elle montre que les besoins et les consommations en eau augmentent progressivement avec l'évolution de la population dakaroise. Les besoins en eau des populations sont estimés à 55 559 380 m³/an, 68 704 592 m³/an et 81 737 019 m³/an respectivement en 2009, 2013 et 2019 (Figure 5). Ainsi les volumes d'eau consommés s'élèvent à 51 197 658 m³/an, 66 253 680 m³/an et 76 555 247 m³/an respectivement 2009, 2013 et 2019. Les consommations en eau restent toujours en dessous des besoins en eau entre 2000 et 2019 montrant ainsi un déficit en eau qui est perpétuel durant cette période. Ce déficit est faible entre 2009 et 2013 surtout en 2012 où la valeur était de l'ordre de 1 920 315 m³. A partir de 2014, malgré la réalisation de forages pour renforcer l'alimentation en de Dakar, le déficit en eau reste toujours élevé jusqu'à 2018 (9 453 964 m³/an en 2014, 7 988 351 m³/an en 2016 et 9 055 527 m³/an en 2018). Néanmoins, depuis 2019 avec l'implantation des deux centres de pompage à Bayakh et à Tassette, ce déficit commence à diminuer pour atteindre 5 181 773 m³/an.

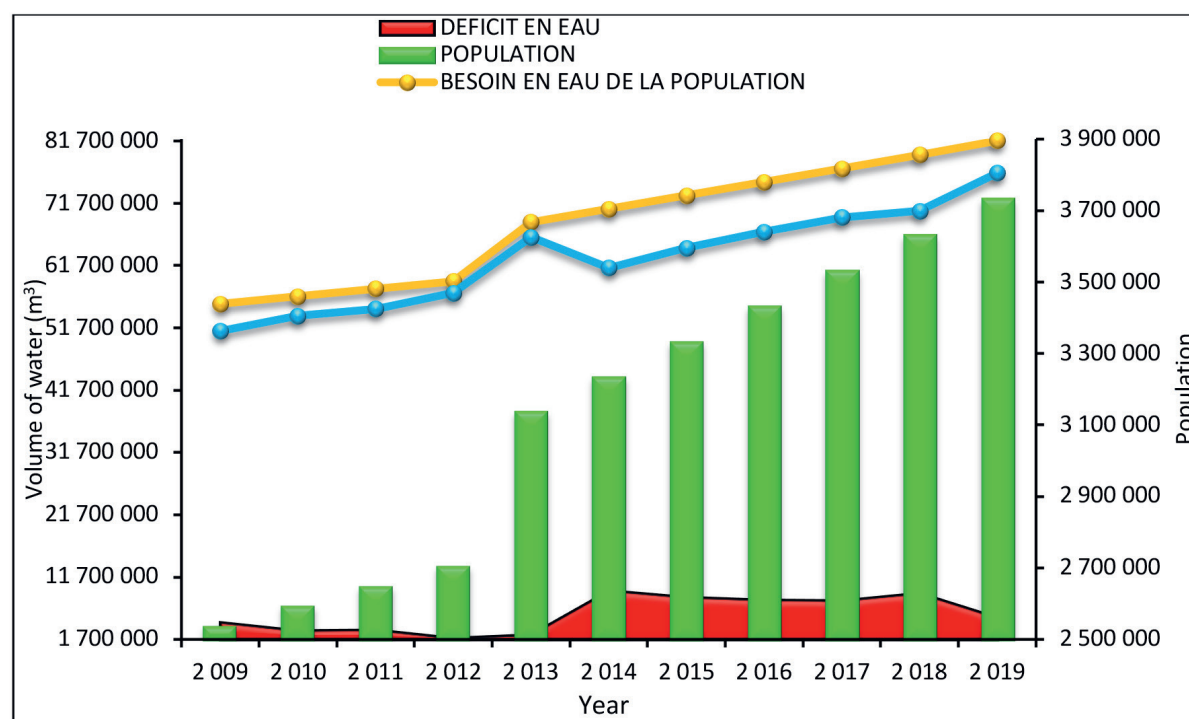


Figure 5 : Relation entre évolution démographique, besoins en eau des populations, consommation en eau et déficit en eau de 2009 à 2019.

5. A retenir

L'exploitation des ressources en eau pour approvisionner la région de Dakar devient de plus en plus intense et problématique, du fait de l'augmentation des populations et de la diversification des activités économiques. L'analyse des prélèvements destinés à la région de Dakar entre 2000 et 2019 montre que les eaux souterraines restent la principale source d'approvisionnement des populations. Cette contribution est estimée à 61% malgré l'importante contribution des eaux de surface (39 %).

Les besoins en eau des populations évoluent avec l'accroissement de la démographie. La comparaison entre les besoins en eau et les quantités d'eaux consommées renseigne qu'il existe un déficit de l'approvisionnement en eau malgré les efforts effectués par le gouvernement dans ce domaine.

La protection des ressources en eau dans le but d'assurer l'approvisionnement en eau potable des populations dans la région de Dakar, nécessite :

- un maximum de maîtrise sur les prélèvements pour éviter la surexploitation des ressources en eau ;
- la réalisation d'unités de dessalement de l'eau de mer pour combler le déficit en eau dans la région de Dakar ;
- la délocalisation de certaines administrations hors de la région de Dakar pour diminuer la concentration démographique dans cette région afin de diminuer la demande en eau ;
- de sensibiliser les populations et les initier à la gestion des ressources en eau.

6. Bibliographie

Bellion, Y. J. C., (1987). Historique géodynamique post-paléozoïque de l'Afrique de l'ouest d'après l'étude de quelques bassins sédimentaires (Sénégal, Taoudenni, Iullemmeden, Tchad).

Thèse de Doctorat des Sciences, Université d'Avignon (Paris, France), 302 p.

Direction de l'Hydraulique (D.H.), (2015). Audit technique et financier des installations dédiées à l'alimentation en eau potable de Dakar. Rapport provisoire, 185p.

Gaye C. B., (1983). La nappe des sables infrabasaltiques de la tête de la presqu'île du Cap-Vert (Sénégal). Bulletin de l'IFAN, Tome 45, Série A, 1-2, 48 p.

GRDR et IFAN., (2014). La dimension locale de la dialectique Migration et développement : monographie de Dakar. Version finale. Rapport. p 16.

HEBRARD, L., (1966). Les formations tertiaires et quaternaires de l'isthme de la presqu'île du Cap-Vert (feuille THIAROEY ; SENEGAL). Rapt. Geol. Fac. Sc. Dakar n°. 16,75p.

OMS., (1972). Approvisionnement en eau et assainissement de Dakar et ses environs. Etude des eaux souterraines. Nappe des sables quaternaires. Projet Sénégal 3201 (EX 22). Tome II.

SONES., (2008). Note sur l'exploitation de la nappe du littoral Nord. Note, p 2.

SONES., (2015). Etude de schéma directeur de mobilisation des ressources en eau de la région de Dakar et de la zone de la petite côte. Rapport de phase 1 définitif, p18.

LA QUESTION DE L'EAU DANS LES GRANDES AGGLOMÉRATIONS COMME DAKAR : RESSOURCES, RISQUES ET RÉSILIENCE

Serigne Mansour Tall ^{1*}, Mouhamadou Moustapha Mbacké Ndour², Niokhor Ndour³, Ibrahima Ousmane Sy⁴, Issa Sakho¹

^{1*} UMR Sciences, Technologies Avancées et Développement Durable, Université Amadou Mahtar Mbow de Dakar à Diamniadio, Sénégal.

² UFR des Sciences de l'Ingénieur, Université Iba Der Thiam de Thiès, Thiès, Sénégal.

³ Direction la Gestion et de la Planification des Ressources en Eau (DGPRE), MEA, Sphère Ministériel de Diamniadio, Dakar, Sénégal.

⁴ Laboratoire de Géomorphologie, Département de Géographie, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, Fann, Dakar, Sénégal.

* Corresponding author : mansour.tall@uam.edu.sn

1. Introduction

L'eau est une ressource vitale, une denrée indispensable dans le processus de développement socio-économique des nations. Elle constitue l'élément structurant des paysages et des écosystèmes naturels mais également du cadre de vie. En effet, l'accès universel à l'eau et sa disponibilité pour les écosystèmes sont l'un des enjeux majeurs de ce siècle (Gleick, 1993; Shiklomanov, 1999; Diop et Rekacewicz, 2003; Sakho et al, 2017). Cependant, le contexte actuel de changement climatique rend extrêmement complexe la prise en charge de ces défis. A cela s'ajoute certaines contraintes naturelles majeures liées à une « planète d'eau salée » : (i) à l'échelle mondiale, 97,5 % de l'eau est salée, (ii) sur les 2,5 % d'eau douce, 68,9 % sont stockés dans les glaciers, 30,8 % dans les réservoirs souterrains et seulement 0,3 % dans les lacs et les cours d'eau. La quantité d'eau douce disponible pour les populations et les écosystèmes représente moins de 1% du volume total des ressources en eau et seulement 0,01 % de l'eau sur la planète (Gleick, 1993 ; Shiklomanov, 1999).

Cette situation globale se traduit par une inégale répartition avec des disparités régionales fortes. Dans les pays du Sahel, la disponibilité de l'eau et son accès universel représentent un enjeu majeur dans le processus de développement durable. En effet, dans les grandes agglomérations, comme Dakar, la demande en eau ne cesse d'augmenter du fait de la forte croissance démographique mais également d'une urbanisation extrêmement rapide. Ce processus est le résultat d'un déséquilibre territorial au profit ou au détriment de la Région de Dakar : (i) un taux d'urbanisation de 97,2%, (ii) une conurbation de Dakar à Rufisque, sur plus de 25 Km, (iii) une population urbaine passée de 23% en 1960 à 39,9% en 1988 et à 42% en 2009 (Gueye et al., 2009). L'accès universel à l'eau et la maîtrise du cycle de l'eau en milieu urbain sont les deux impératifs de la gestion durable de l'eau dans l'agglomération de Dakar.

Comment satisfaire la demande en eau de l'agglomération de Dakar dans un contexte d'urbanisation peu planifiée, de croissance démographique rapide et donc d'une augmentation exponentielle des besoins en eau ? Comment prendre en compte la demande en eau potable dans les quartiers non desservis par un réseau d'AEP ? Comment transformer les risques liés à l'eau en une opportunité de développement afin de promouvoir des territoires urbains durables et plus résilients ?

2. L'eau potable, une ressource vitale

L'approvisionnement en eau potable de la ville de Dakar est un challenge depuis les premières années de son développement. Les systèmes d'approvisionnement en eau ne cessent de se diversifier et de se complexifier passant d'un réseau de puits à une usine de dessalement de l'eau de mer en cours de construction aux Mamelles.

Dakar s'est appuyée sur un réseau de puits le long de ce qui est devenue l'avenue Bourguiba et qui était nommée la route des puits. La capitale sénégalaise est un paradoxe car, les villes sont souvent situées à proximité des sources d'approvisionnement en eau. Cependant, Dakar dépend, pour l'essentiel de ses besoins en eau potable, du Lac des Guiers, situé à 250 km au Nord (Figure 1).

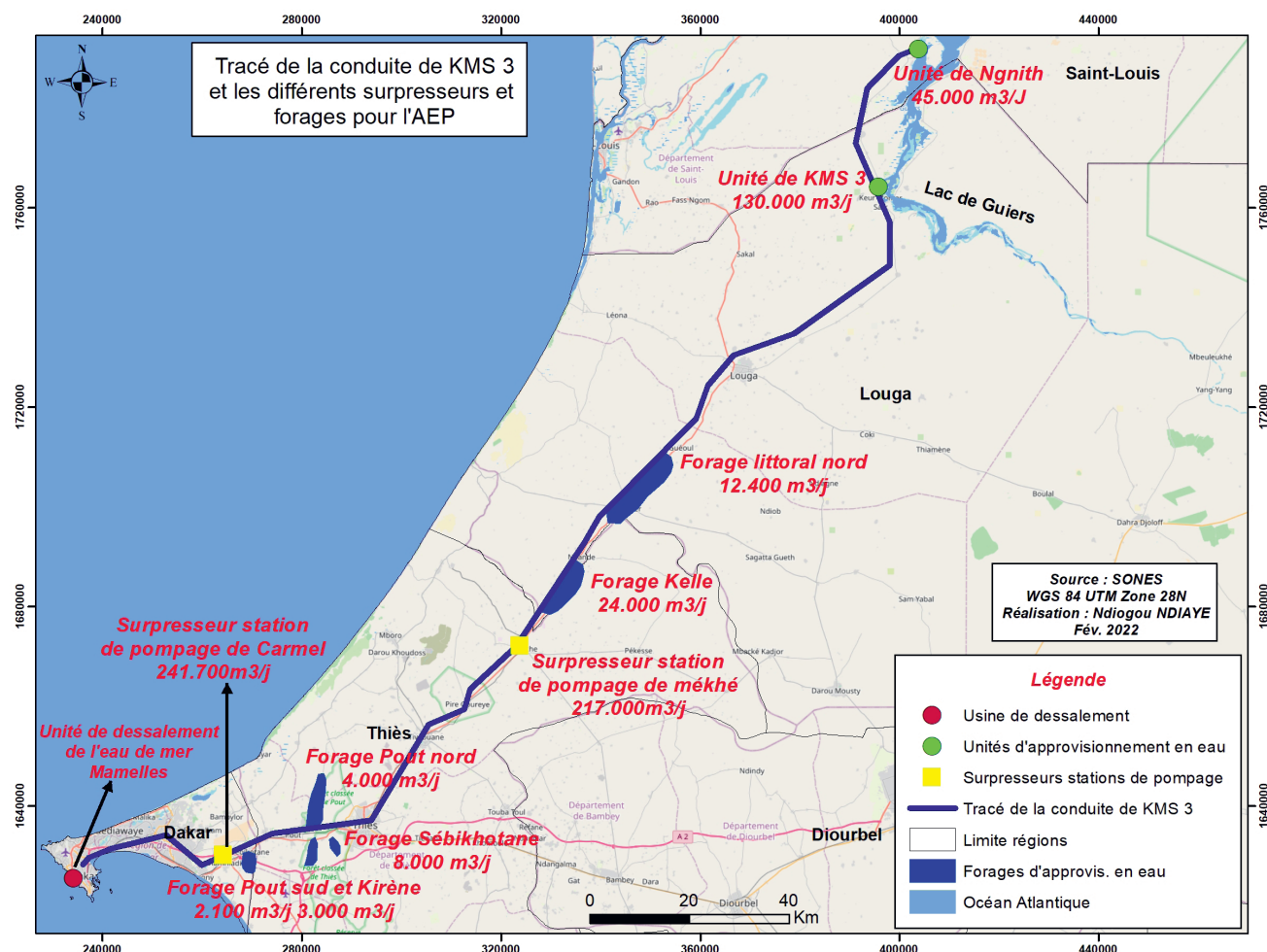


Figure 1. Sources d'approvisionnement en eau potable de Dakar

Les usines de potabilisation des eaux installées sur le lac de Guier à Ngnith et à Keur Momar Sarr représentent la principale source pour l'approvisionnement en eau de l'agglomération de Dakar. Cette eau traitée est convoyée par des conduites enterrées vers des réservoirs de stockage de grande capacité à Dakar. Le long du tracé des conduites, les volumes d'eau convoyés sont renforcés par un réseau de forages de soutien pour atténuer les déficits (Figure 2).

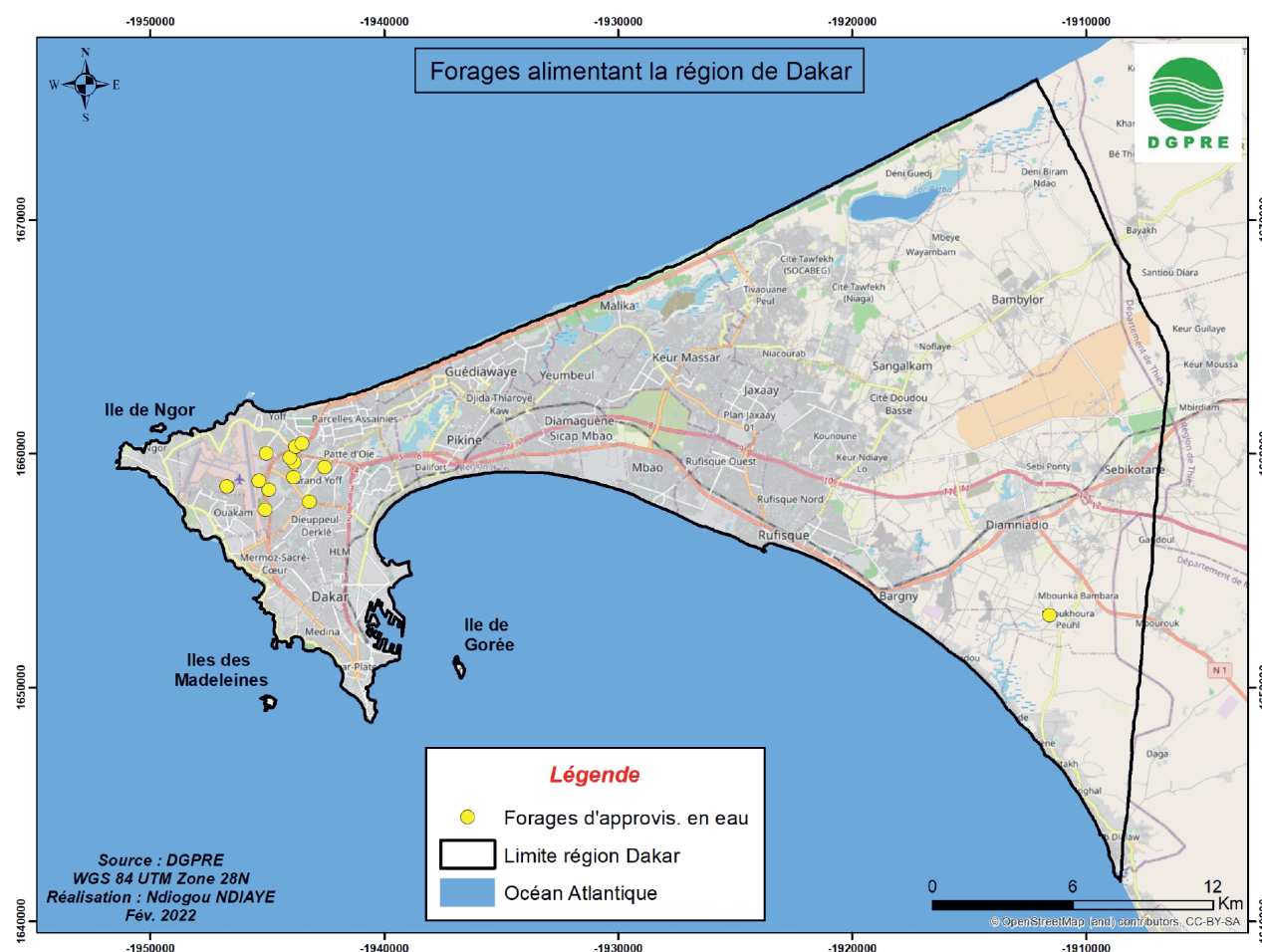


Figure 2. Quelques forages à Dakar pour l'approvisionnement en eau potable

L'augmentation des besoins a justifié la nécessité de doubler puis de tripler la conduite avec le grand projet KMS 3 mis en service en 2021. Malgré les investissements réalisés, les besoins en eau ne sont pas totalement couverts et l'accès universel à l'eau reste toujours un objectif à atteindre, notamment pour Dakar. Une option est faite sur un renforcement du dispositif d'approvisionnement en eau potable à Dakar par la réalisation d'une usine de dessalement de l'eau de mer aux Mamelles.

La construction de forage, permet certes de renforcer le dispositif d'approvisionnement en eau potable, mais elle peut constituer une menace pour les réserves souterraines en cas de surexploitation, notamment en zone littorale. La figure ci-dessous est une illustration par rapport à une augmentation des prélèvements dans la nappe des sables quaternaires du littoral nord pour la satisfaction des besoins en eau des usagers.

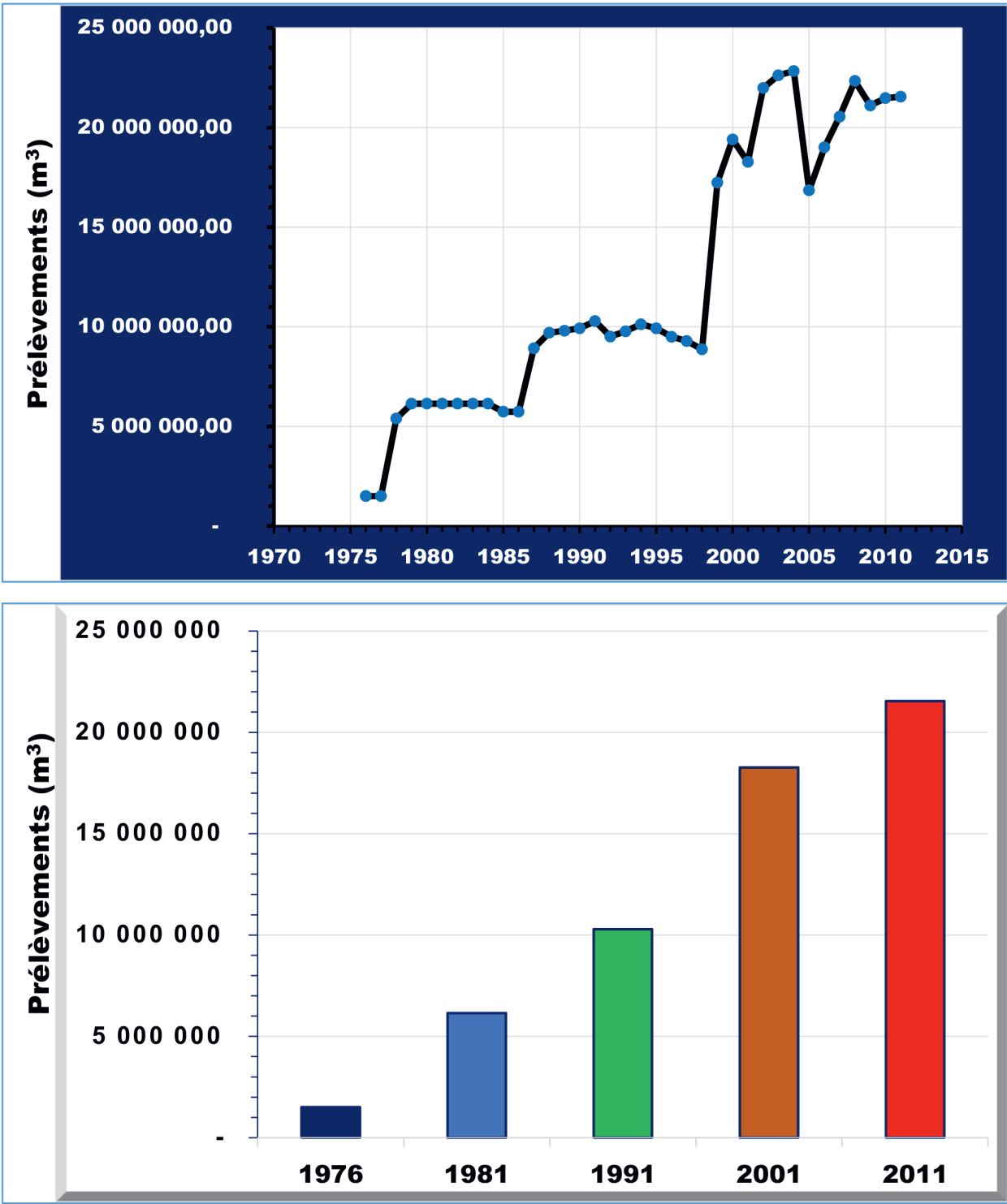
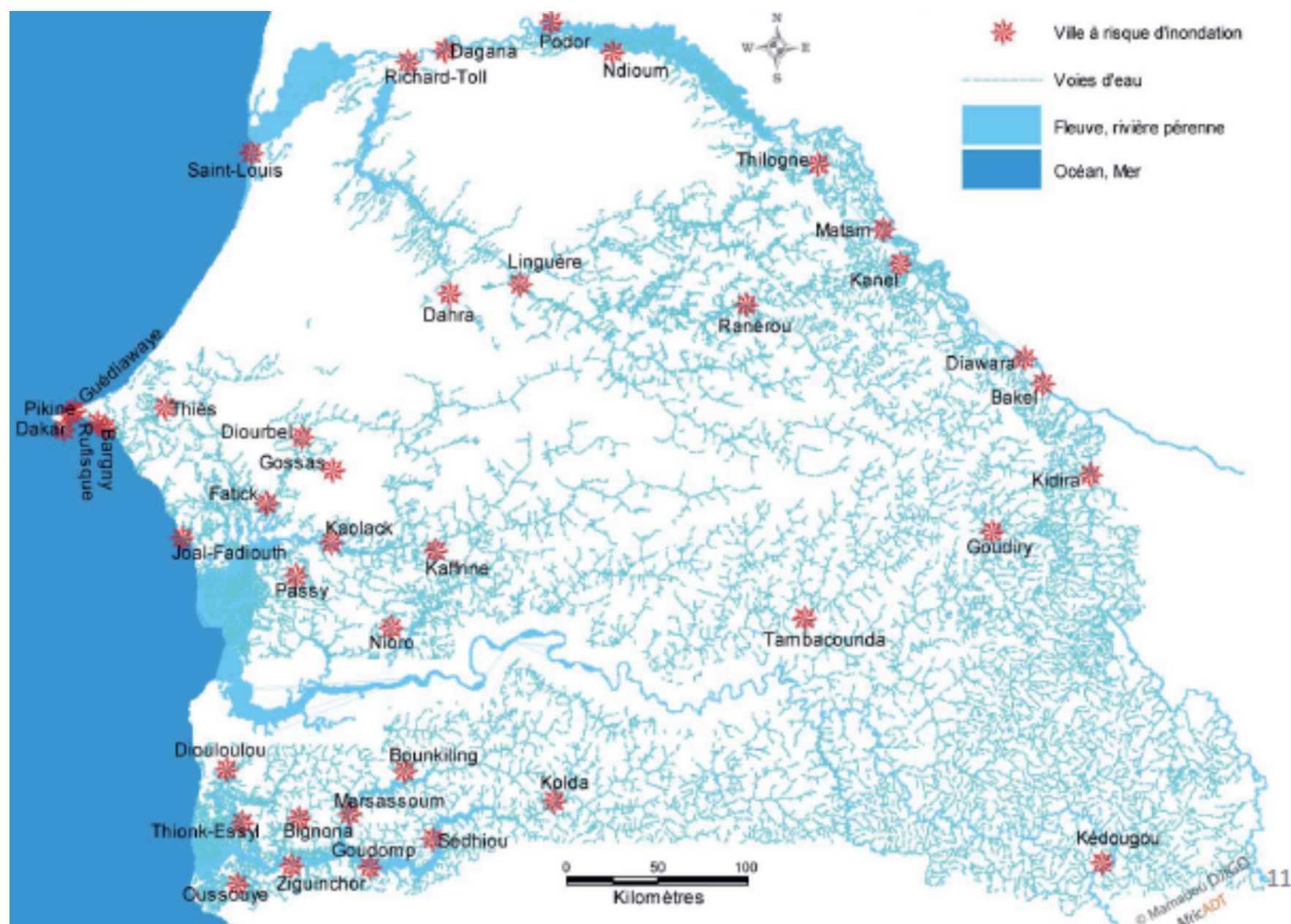


Figure 3. Evolution des prélèvements dans la nappe des sables quaternaires du littoral nord (Sénégal, Source des données Kaba 2017)

3. L'eau, un risque urbain de plus en plus présent dans les quartiers sous équipés de la capitale

Au Sénégal, les inondations d'origine pluviale sont une grande problématique urbaine au niveau national (Figure 3).



Toutefois, Dakar reste la région la plus affectée par ce phénomène.

Depuis 2005, l'agglomération de Dakar est frappée par des inondations récurrentes. Ces inondations sont liées à plusieurs déficiences :

- Déficit de planification, d'équipements de drainage et d'application des règles d'urbanisme ;
- Processus d'urbanisation accéléré, notamment dans des espaces non aedificandi (Figure 5) ;
- Récurrence d'évènements de pluies extrêmes liée au changement climatique ;
- Retard dans le sous-secteur de l'assainissement des eaux pluviales : absence ou insuffisance des systèmes d'assainissement et de réseaux de drainage ;
- Occupation anarchique de zones vulnérables ;
- Obstruction des voies d'eaux et/ou sous-dimensionnement des infrastructures de drainage ;
- Imperméabilisation des surfaces (impacts des constructions) et augmentation du ruissellement ;
- Difficultés dans la gestion des ouvrages (certains servant de dépotoirs d'ordures) ;

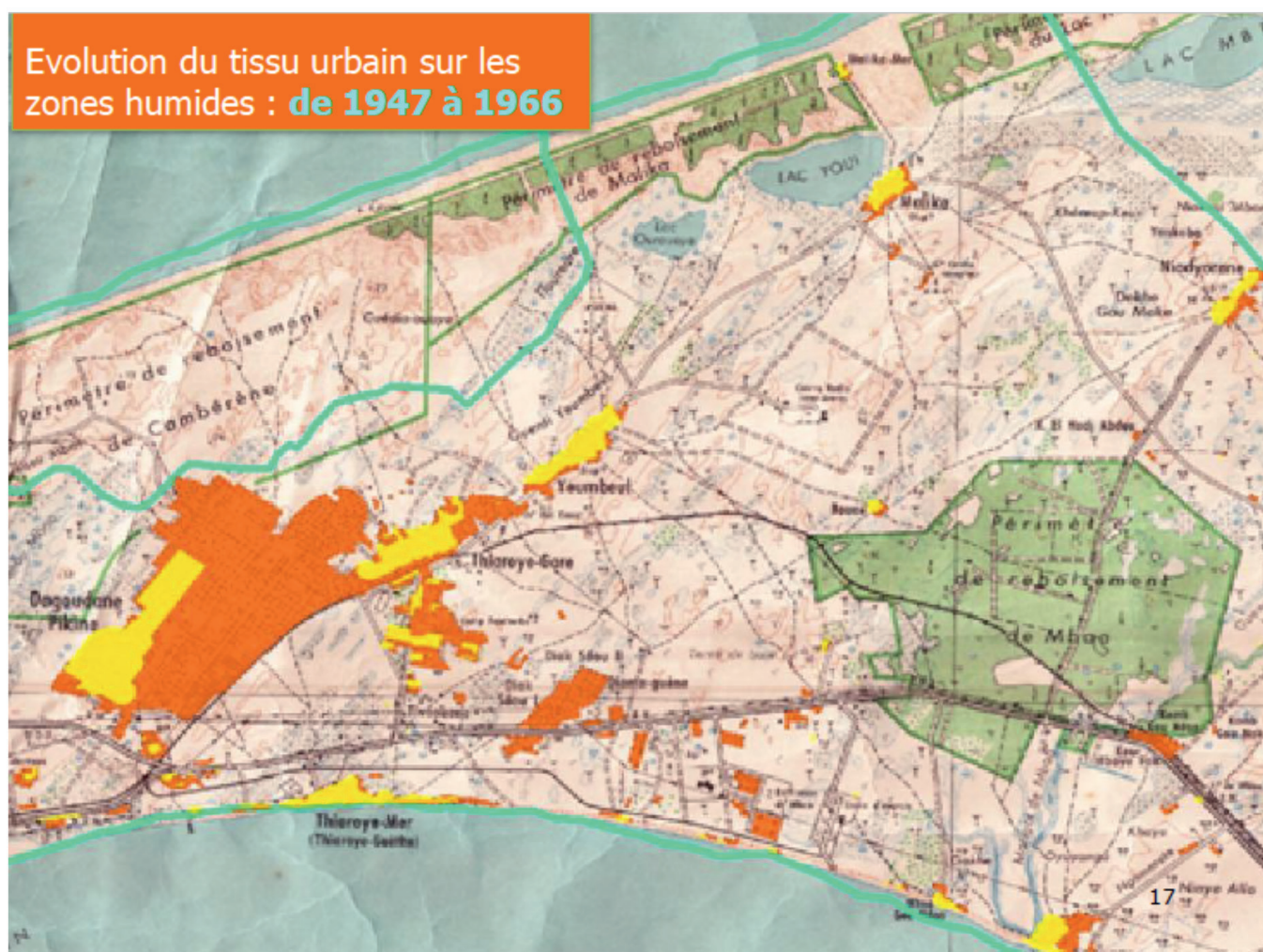


Figure 5. Evolution du tissu urbain (Gueye et al., 2012)

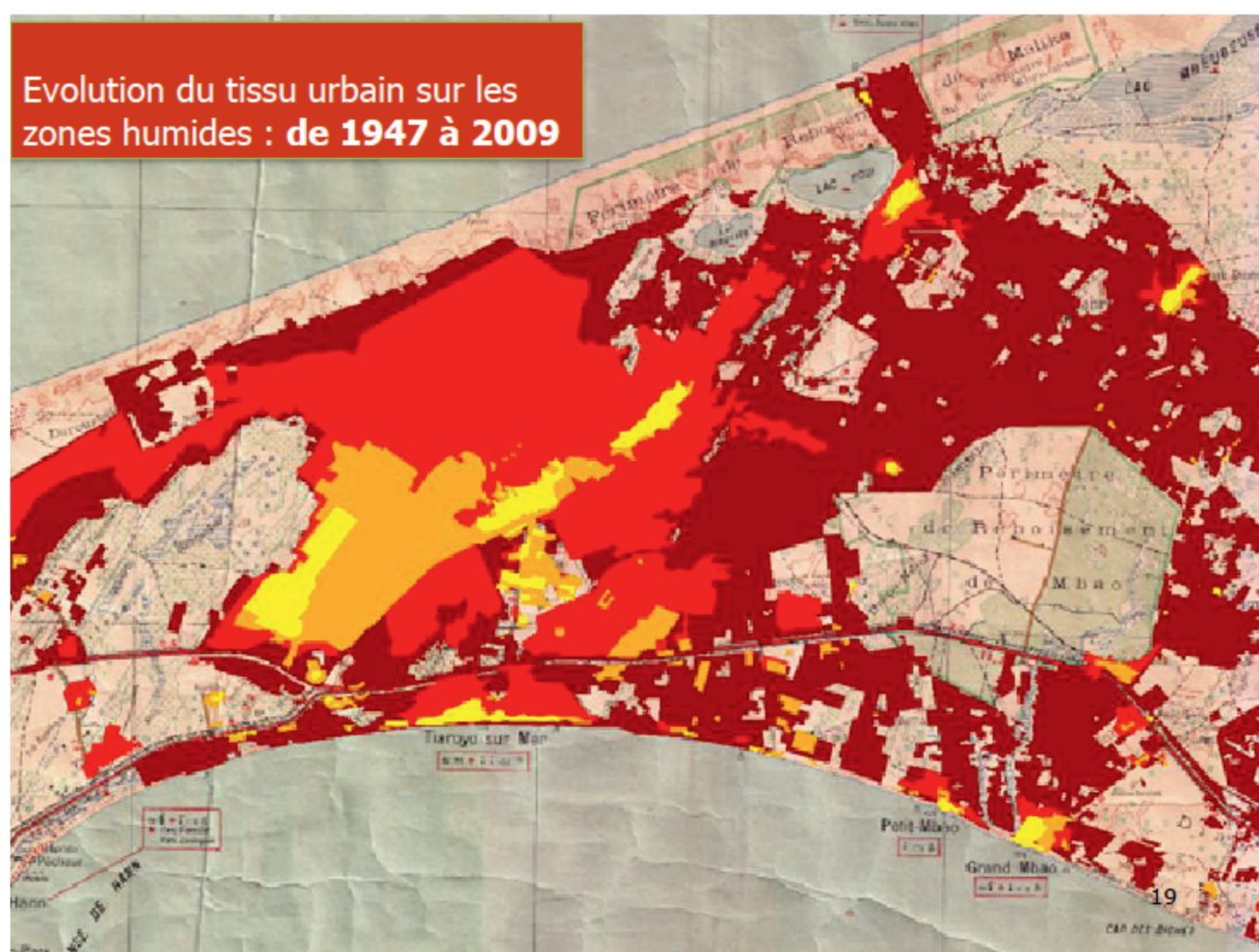


Figure 6. Urbanisation et inondation (Gueye et al., 2012)

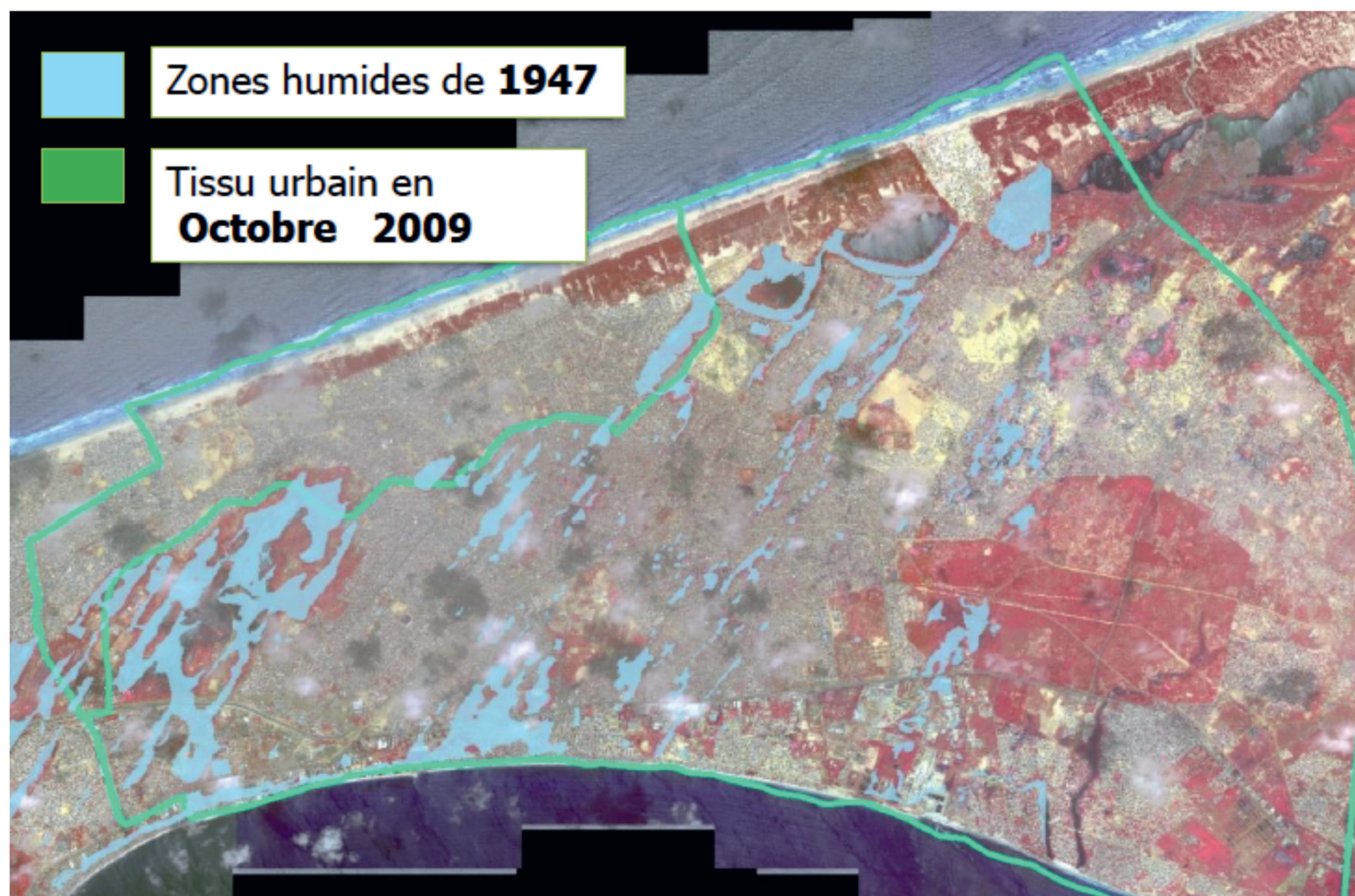


Figure 7. Expansion du tissu urbain sur des zones humides (Gueye et al., 2012)

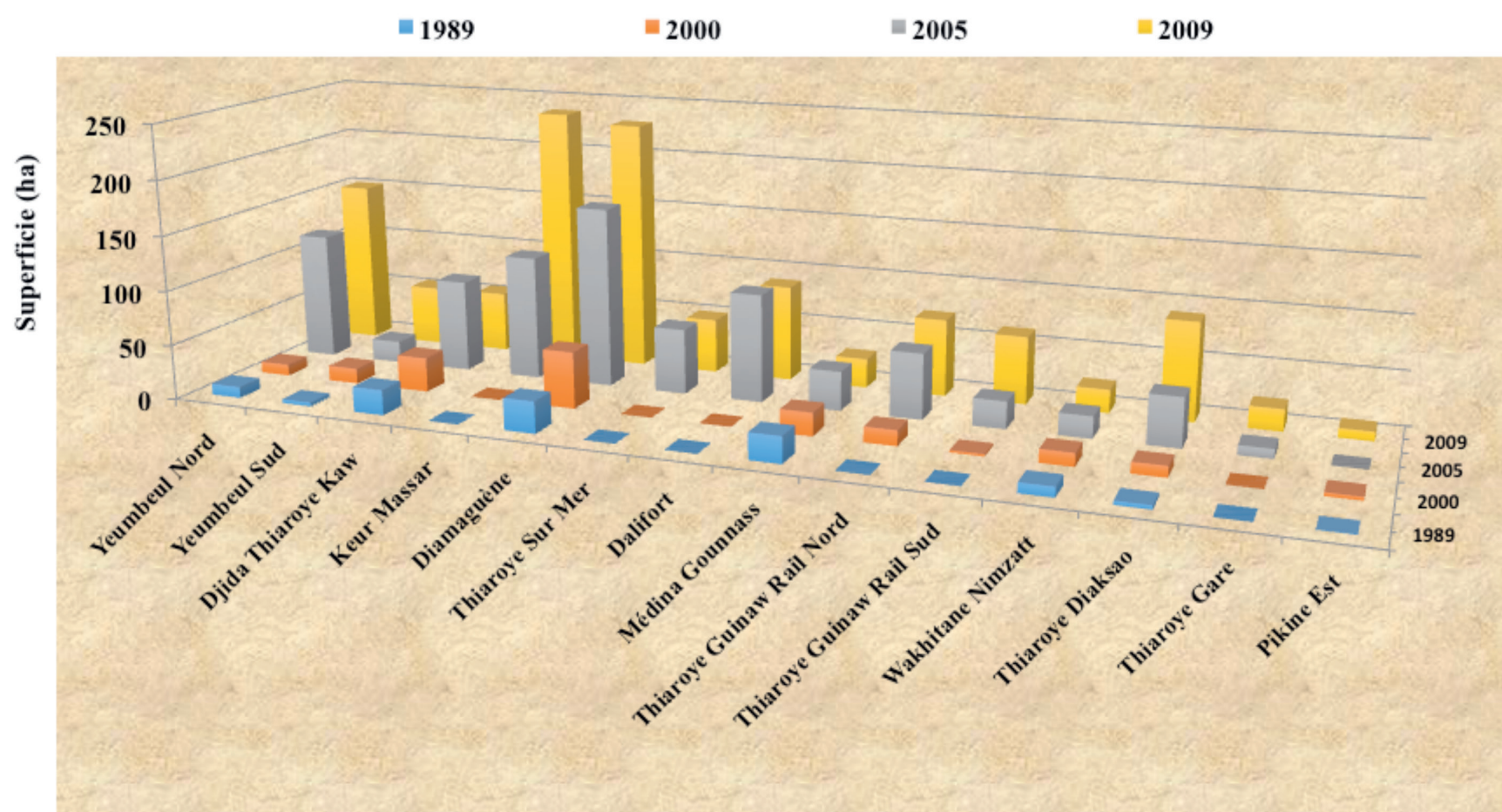


Figure 8. Evolution des superficies inondées dans des zones vulnérables entre 1989 et 2009

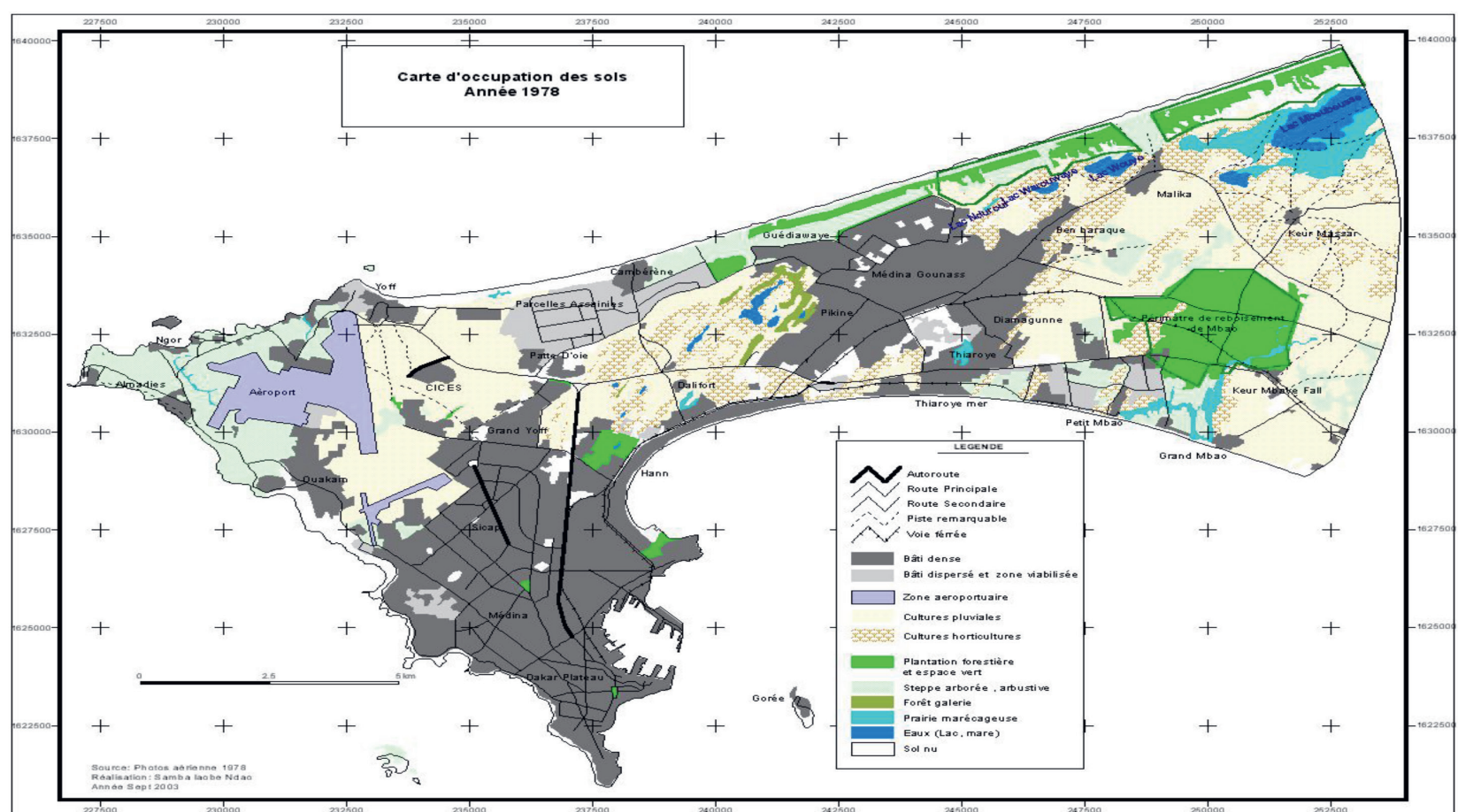


Figure 9. Cartographie de l'occupation des sols à Dakar en 1976

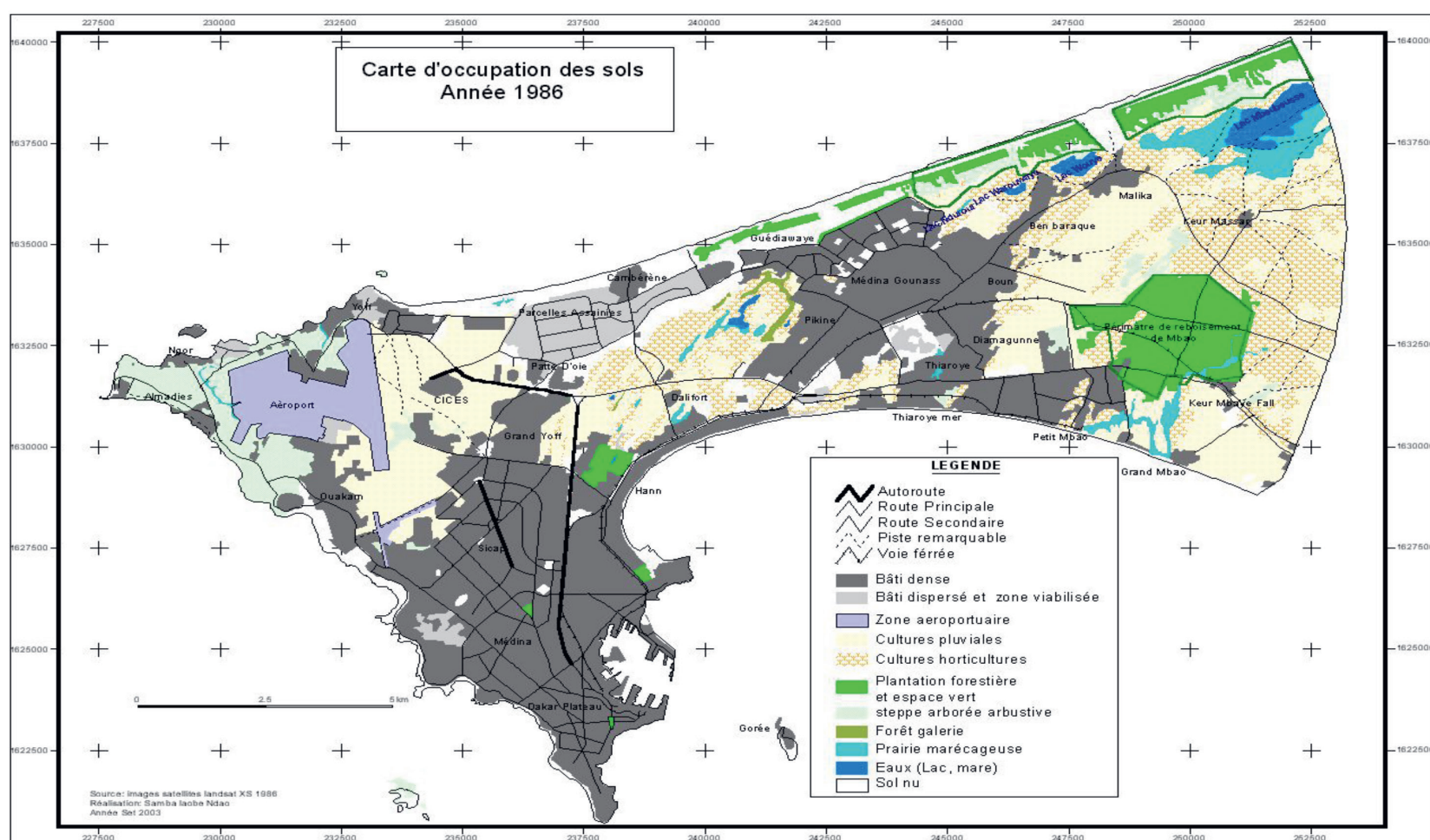


Figure 10. Cartographie de l'occupation des sols à Dakar en 1986

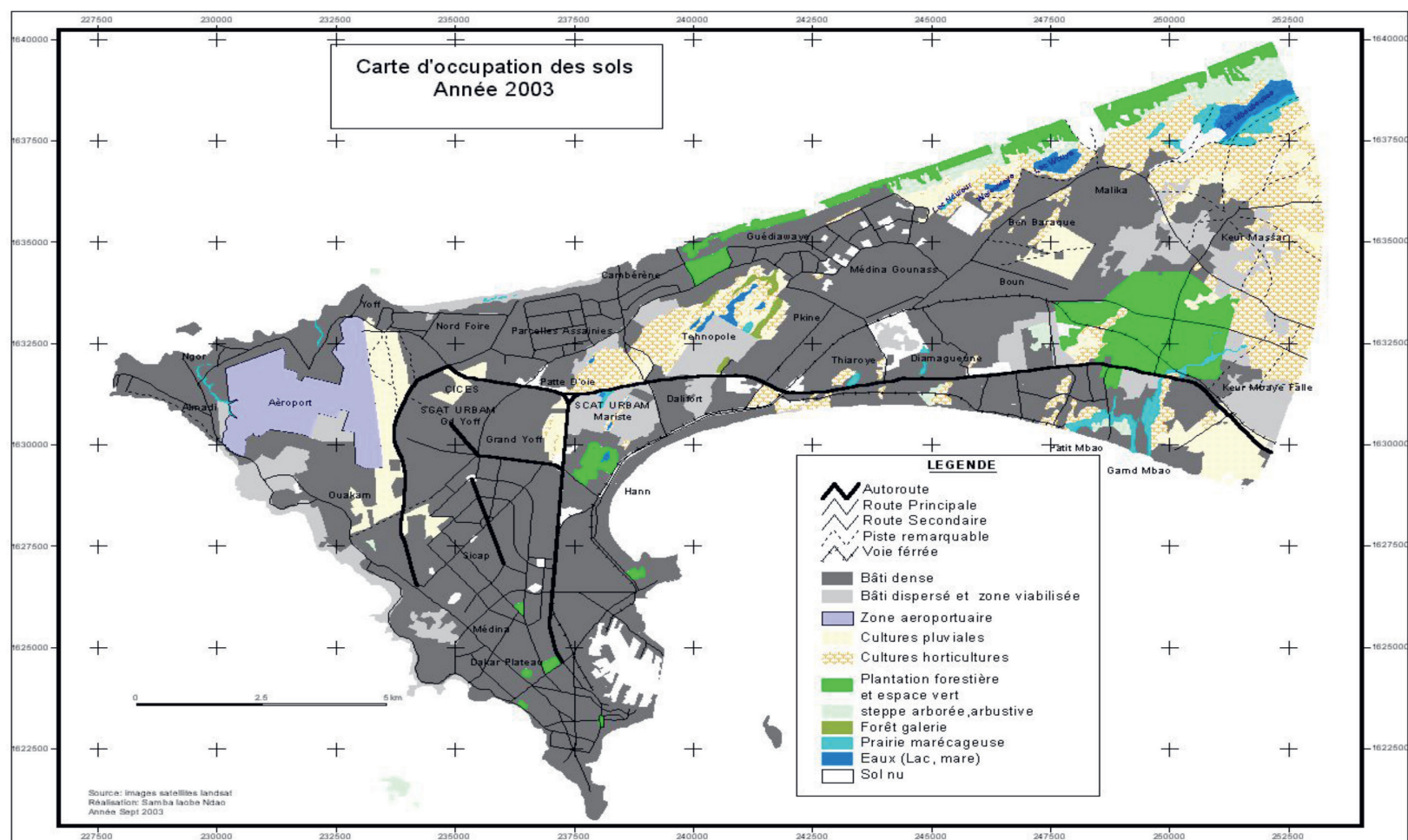


Figure 11. Cartographie de l'occupation des sols à Dakar en 2003

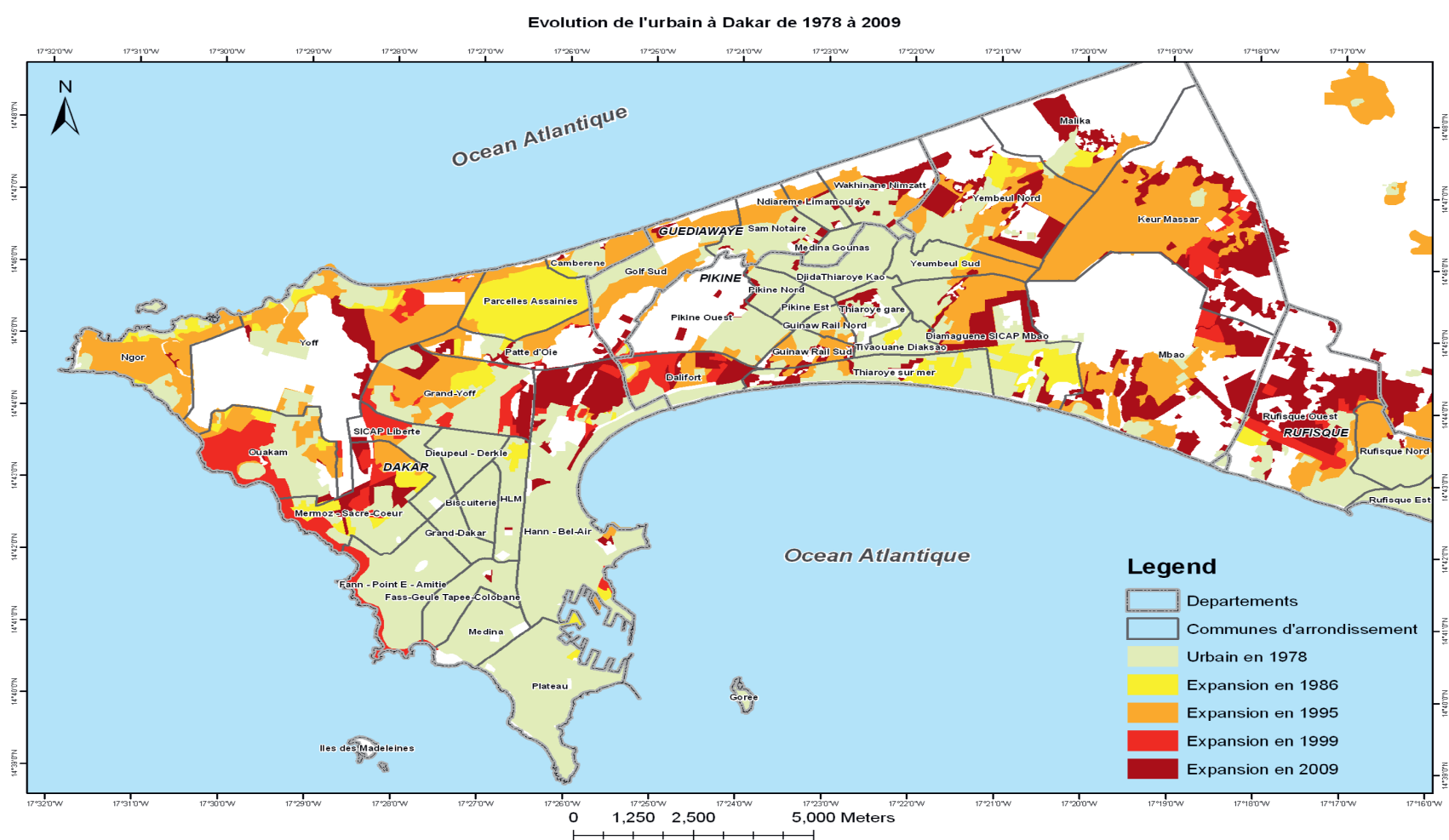


Figure 12. Cartographie de la dynamique d'expansion du tissu urbain de Dakar entre 1976 et 2000



Figure 13. Illustrations sur les inondations à Dakar (Sy, 2012)

4. L'eau : référentiel de résilience

La pollution des eaux est une réalité à Dakar. Les eaux usées des fosses septiques sont mélangées à celle de la nappe phréatique qui affleure posant un sérieux hypothèque sur la qualité des eaux. Ceci a justifié la fermeture d'un des forages d'appoint de la SDE, le forage de Thiaroye. La teneur en nitrate des eaux de ce forage était très élevée parce qu'elles sont souillées par des fosses septiques, moyen le plus fréquent de traitement des eaux usées dans les quartiers environnants. La réutilisation des eaux de ce forage (avec une analyse de la qualité de l'eau et des risques sanitaires associés) dans le cadre d'un réseau d'irrigation spécifique pourrait faire contribuer à la baisse de la nappe phréatique et à réduire sensiblement les risques d'inondation. En outre ce serait une contribution sensible à l'emploi des jeunes dans l'agriculture urbaine et à la croissance verte des villes.

La mise en place de systèmes de production et de distribution différenciés de l'eau dans les villes rendrait l'accessibilité de l'eau en ville plus durable et les usages plus flexibles. Le même système d'approvisionnement est utilisé pour tous les usages domestiques, agricoles, industriels et paysagers. Seule la tarification est modulée aux usages avec un tarif maraîcher et industriel. A Dakar 75% des eaux consommées sont utilisées pour la lessive, le nettoyage et l'évacuation des toilettes. Un usage différencié des besoins domestiques serait une source d'économie d'eau potable.

Les risques d'inondation sont exacerbés par un déficit de planification et d'équipements hydrauliques dans les quartiers. Il y a aussi une faible prise en compte de la collecte de l'eau dans les plans architecturaux. L'eau qui ruisselle sur les toits est évacuée dans les rues. La surface non constructible dans les parcelles définie par les règlements d'urbanisme (patios, cours) ne sont pas souvent mis à profit pour une stratégie de récupération des eaux de pluie.

La digitalisation de la gestion de l'eau dans les usages domestiques pourrait faciliter une gestion intelligente et une réduction sensible des gaspillages. Grâce à des chasses d'eaux intelligentes ; un réseau domiciliaire dissociant les circuits d'eau à usage d'alimentation et de services.

Il faut mettre à niveau les branchements vétustes et assurer une maintenance des réseaux domiciliaires pour réduire les pertes surtout auprès de consommateurs comme : écoles, universités, armées, marchés.

Des programmes d'éducation et de sensibilisation pour une gestion durable de la consommation d'eau dans les villes devraient mettre à profit les sites internet, les médias sociaux et les programmes scolaires.

Les plans d'aménagement urbains n'intègrent pas assez les plans d'eau et la trame bleue. Les infrastructures vertes sont un moyen de résilience face aux inondations mais aussi d'adaptation aux changements climatiques en créant des îlots de fraîcheur et des réceptacles des eaux de ruissellement. L'aménagement du site partiel de l'ancien aéroport devrait être un moyen de promotion des infrastructures vertes avec la création d'un parc de 10 ha équipé d'une trame verte et d'une trame bleue.

5. A retenir

La faible articulation entre les connaissances en matière d'hydrologie urbaine, de gestion des eaux pluviales et les mécanismes de prise de décision représente une contrainte majeure.

La restructuration et la régularisation des quartiers non planifiés ont amélioré la situation. Cette approche urbanistique est lente et chère produisant ainsi des résultats effectifs mais, avec des impacts limités.

L'évolution du tissu urbain sur des zones inondables est la première cause d'aggravation du risque : les zones humides naturelles d'hier sont devenues, aujourd'hui, des zones urbaines inondables. Cette vulnérabilité naturelle est renforcée par le changement climatique qui se manifeste par la récurrence d'événement de pluies extrêmes, difficilement prise en charge par les modèles de prévision.

Le risque d'inondation dans nos villes est donc le résultat (i) d'une urbanisation non planifiée et non maîtrisée, (ii) d'une absence ou insuffisances de systèmes d'assainissement et de réseaux de drainages opérationnels des eaux de pluies et, (iii) des impacts du changement climatique.

L'eau est au cœur des stratégies de résilience et le référentiel majeur de la quête d'un meilleur cadre de vie. L'eau potable est une ressource à préserver. Les inondations sont un risque récurrent. Pour la résilience des villes les trames bleues sont un référentiel pour la mise en place d'infrastructures vertes. Les réseaux sont une composante majeure des politiques d'aménagement urbain et d'architecture. La collecte de l'eau de pluie (water harvesting) est un moyen de diversifier les sources d'approvisionnement en eau à usage domestique et de réduire les risques d'inondation.

La gestion de l'approvisionnement en eau et celle des risques liés aux inondations vont contribuer à renforcer les capacités humaines à faire face aux conflits, aux maladies et aux risques sanitaires.

6. Perspectives de recherche

- Développer un manuel de procédure pour la planification du processus d'urbanisation au Sénégal, avec l'eau, comme principale variable structurante ;
- Développer des modèles hydrologiques sur le cycle de l'eau en milieu urbain ;
- Développer des modèles de plan de prévention des risques d'inondation dans les territoires vulnérables en lien avec le changement climatique et l'occupation du sol.

7. Références bibliographiques

Diop, E.H.S., et Rekacewicz, P. 2003 Atlas mondial de l'eau. Editions Autrement, Collection Atlas/Monde, Paris, 67 pages. .

Gleick, P. 1993. Water in Crisis: A Guide to the World's Fresh Water Resources. Oxford University Press, New York.

Sakho, I., Dupont, J.-P., Cisse, M. T., Janyani, S. E., & Loum, S. 2017. Hydrological responses to rainfall variability and dam construction : A case study of the upper Senegal River basin. Environmental Earth Sciences, 76(6), 253. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6570-4>

Shiklomanov, I.A. 1999. World Water Resources: Modern Assessment and Outlook for the 21st Century. St Petersburg, Federal Service of Russia for Hydrometeorology and Environment Monitoring, State Hydrological Institute UNCSD.

LES INONDATIONS DES CRUES ROUGES À NIAMEY : UNE OCCURRENCE EN FORTE AUGMENTATION

Luc DESCROIX, IRD, UMR PALOC IRD/MNHN, Paris
Giovanni MASSAZZA, Interregionale per il Fiume Po (AIPO), 10024 Moncalieri (TO) and 26100 Cremona, Italie;
Vieri TARCHIANI, Istituto per la BioEconomia-Consiglio Nazionale delle Ricerche (IBE-CNR), 50019 Sesto Fiorentino (FI), Italie;
Mohamed Housseini IBRAHIM, Direction Nationale de l'Hydraulique, Niamey, Niger
Jean Pierre VANDERVAERE, UGA, Institut des Géosciences de l'Environnement (IGE), Université Grenoble Alpes, CNRS, IRD, Grenoble INP, IGE, Grenoble, France
Jeremy PANTHOU, Institut des Géosciences de l'Environnement (IGE), Université Grenoble Alpes, CNRS, IRD, Grenoble INP, IGE, CNAM, Grenoble, France
Theo VISCHÉL, UGA, Institut des Géosciences de l'Environnement (IGE), Université Grenoble Alpes, CNRS, IRD, Grenoble INP, IGE, Grenoble, France
Moussa MALAM ABDOU, Département de Géographie, Université de Zinder, Zinder, Niger
Laurent KERGOAT, CNRS, GET Toulouse CNRS/IRD/UPS, Toulouse, France
Manuela GRIPPA, CNRS, GET Toulouse CNRS/IRD/UPS, Toulouse, France
Cécile DARDEL, CNRS, GET Toulouse CNRS/IRD/UPS, Toulouse, France

1. Introduction

Après une période hyper humide de 1950 à 1967 (Figure 1), l'Afrique de l'Ouest et en particulier le Sahel ont connu une longue période de déficit pluviométrique de 1968 à 1993. Depuis 1994, les précipitations sont revenues aux alentours voire légèrement au-dessus de leur moyenne de long terme 1921-2020. On observe une forte augmentation de l'occurrence des inondations du fleuve Niger à Niamey ; elles ont lieu depuis quelques décennies durant l'hivernage (crue rouge) plutôt que durant la saison sèche quand la crue guinéenne arrive à la capitale nigérienne.

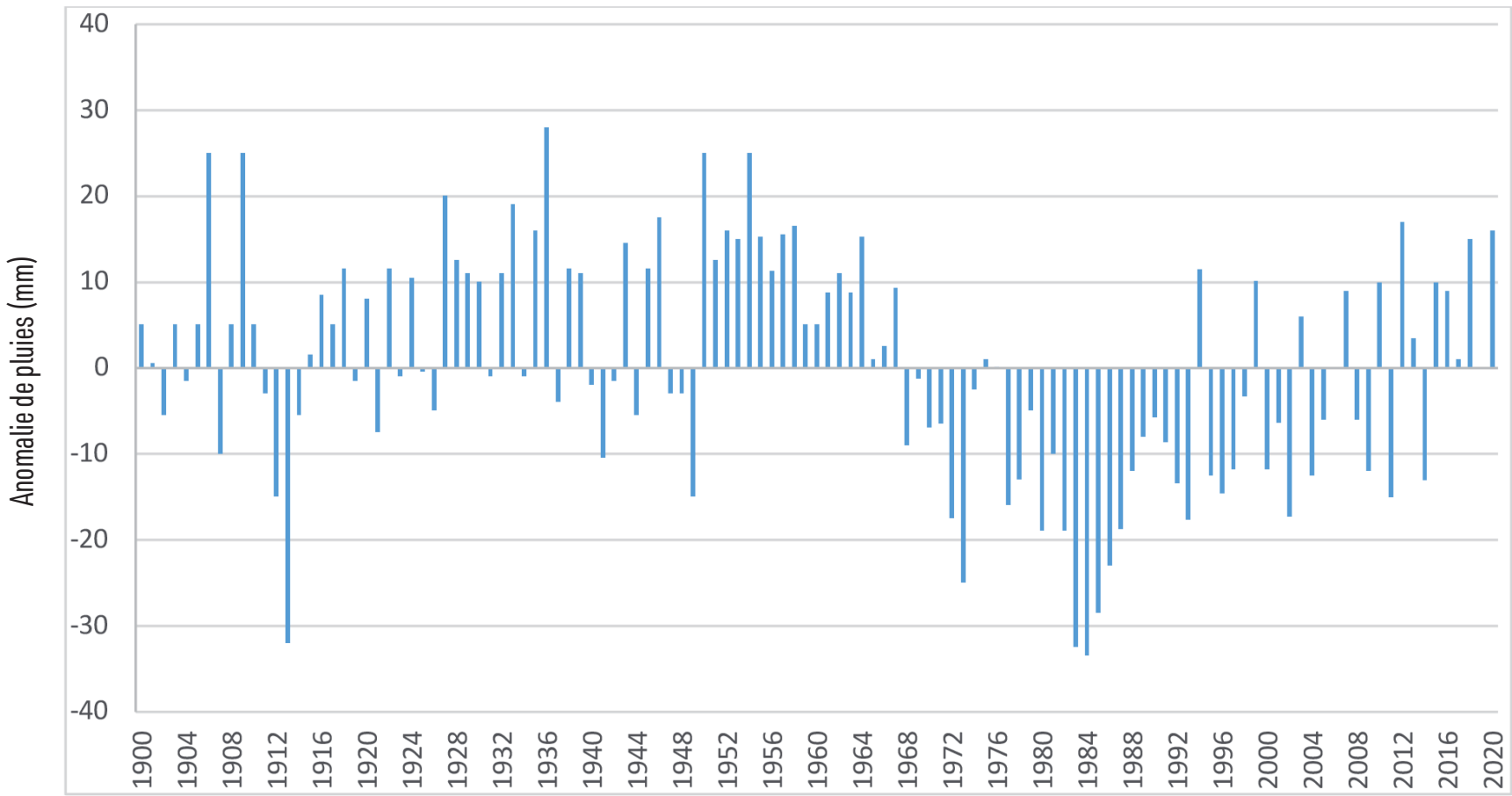


Figure 1 : Evolution de la pluviométrie dans le Bassin du fleuve Niger ((Descroix, et al., 2020)

L'hydrologie sahélienne a été touchée durant la deuxième moitié du 20^{ème} siècle par deux processus paradoxaux. Le premier paradoxe hydrologique du Sahel (Descroix, et al., 2012) (Descroix, 2018) (Descroix, Processus et enjeux d'eau en Afrique de l'Ouest Sahélo-Soudanienne., 2018) est apparu durant la longue sécheresse : on s'est rendu compte alors que les coefficients d'écoulement et les débits augmentaient. Le second paradoxe a été mis en évidence après le retour des pluies à leur niveau de long terme, à la toute fin du 20^{ème} siècle. En effet, le reverdissement général du Sahel n'a pas produit la baisse attendue des écoulements : les coefficients d'écoulement ont continué à croître malgré le reverdissement observé, qui aurait dû favoriser l'infiltration (Dardel, et al., 2014).

Le bassin du fleuve Niger moyen (BFNM) est caractérisé par un régime hydrologique bimodal lié à l'occurrence de deux crues annuelles. La région est comme toute l'Afrique de l'Ouest sous le régime de la Mousson Ouest-Africaine, avec des pluies tombant du 15 juin au 15 octobre et une longue saison sèche de novembre à mai. On observe successivement :

- Une crue dite « rouge » (liée à la couleur de l'eau, chargée de sédiments d'origine latéritique, elle est aussi appelée crue locale ou crue sahélienne), de juillet à septembre, liée aux pluies tombées sur le Bassin du moyen Niger ;
- Vient ensuite, d'octobre à janvier, la crue « noire » (appelée aussi crue « guinéenne », du fait qu'elle amène, avec 2-3 mois de latence, l'eau des massifs du Fouta Djallon) dont l'eau, claire car peu chargée d'origine (ces montagnes sont constituées de roches de socle ou assimilées) (Descroix, et al., 2020), est en outre filtrée par sa traversée du vaste Delta Intérieur du Niger, une zone humide de plus de 50000 km² que le fleuve parcourt en territoire malien (Figure 2).

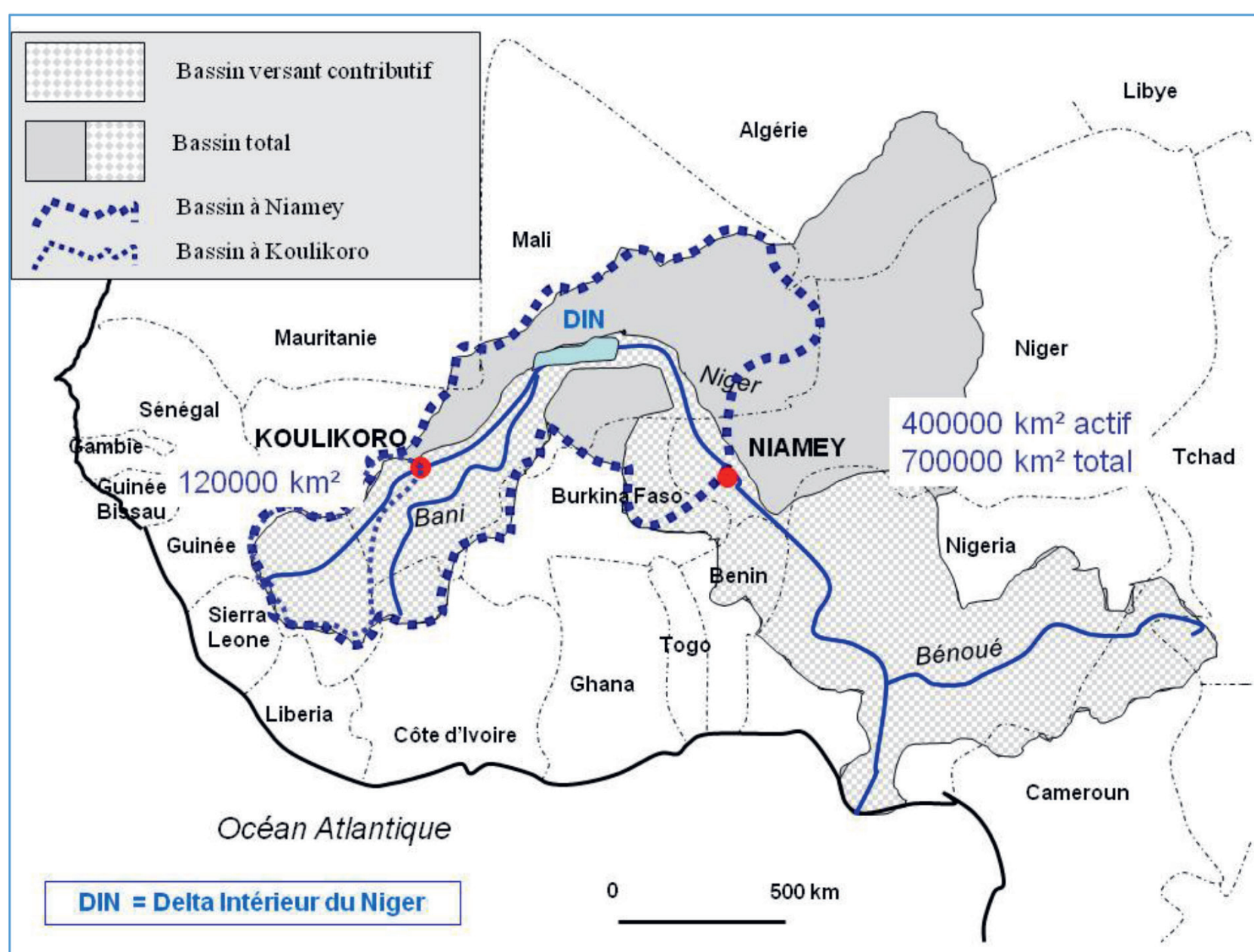


Figure 2 : Le Bassin du fleuve Niger, du Fouta Djallon au Golfe de Guinée (Descroix, Processus et enjeux d'eau en Afrique de l'Ouest Sahélo-Soudanienne., 2018)

Traditionnellement, la crue guinéenne était de loin la plus importante en débits et volumes écoulés, et elle venait en continuité de la crue locale qui amorçait une grande crue annuelle ; souvent, c'est surtout la couleur de l'eau qui permettait d'en connaître l'origine, locale (rouge) ou lointaine (noire). En 1984, pour la première fois depuis le début des observations en 1929 à la station de Niamey, le pic de la crue rouge a dépassé celui de la crue noire. Depuis, la crue rouge prend de plus en plus d'importance, et la crue noire semble marquer le pas.

L'augmentation des écoulements observée pendant et après la grande sécheresse a eu des conséquences sur les eaux de surface en zone endoréique. Elle a

provoqué un accroissement du nombre, de la taille et du volume des mares saisonnières, un nombre croissant d'entre elles devenant permanentes (Descroix, et al., 2012) (Gardelle, Hiernaux, Kergoat, & Grippa, 2010) (Descroix, Processus et enjeux d'eau en Afrique de l'Ouest Sahélo-Soudanienne., 2018). En fin de compte le premier paradoxe hydrologique a entraîné une élévation du niveau de la nappe phréatique du bassin sédimentaire des lullemeden. La plupart des zones de terrains sédimentaires au Sahel sont des secteurs endoréiques, du fait de leur faible hydraulicité (pentes faibles, sols et roches perméables). Le relèvement du niveau de la nappe a conduit en maints endroits à l'affleurement de la nappe dans les bas-fonds et les plus grandes vallées. C'est l'émergence des « mares noires » liée à l'apparition d'eau souterraine en surface, par opposition aux mares rouges liées au ruissellement durant l'hivernage.

2. Résultats scientifiques

2.1. L'évolution de l'hydrologie du fleuve Niger dans son cours moyen

La crue rouge se produit de plus en plus tôt ; de ce fait, le creux entre les deux crues est plus marqué et leur séparation est bien plus visible qu'auparavant sur l'hydrogramme (Descroix, et al., 2012) (Descroix, 2018) (Descroix, Processus et enjeux d'eau en Afrique de l'Ouest Sahélo-Soudanienne., 2018). Dans la dernière décennie 2011-2020, on voit s'installer un nouveau régime où le pic de la crue rouge est systématiquement plus élevé que celui de la crue noire. La figure 3 (Massazza, et al., 2021) illustre bien l'évolution des deux crues du fleuve dans son bassin Moyen, aux latitudes sahéliennes. Si habituellement il y avait une petite décrue, fin septembre et début décembre (période 1929-1970) entre la crue rouge et la crue noire, ce répit disparaît durant la sécheresse (période 1971-1990), pour réapparaître ensuite, de manière de plus en plus prononcée, du fait de l'avancée dans le temps de la crue rouge, de plus en plus précoce. L'hydrogramme de la décennie 2011-2020, ainsi que ceux des années de plus fortes crues (2012 et 2020) illustrent bien cette avancée et la claire séparation des deux crues qu'elle entraîne avec le temps.

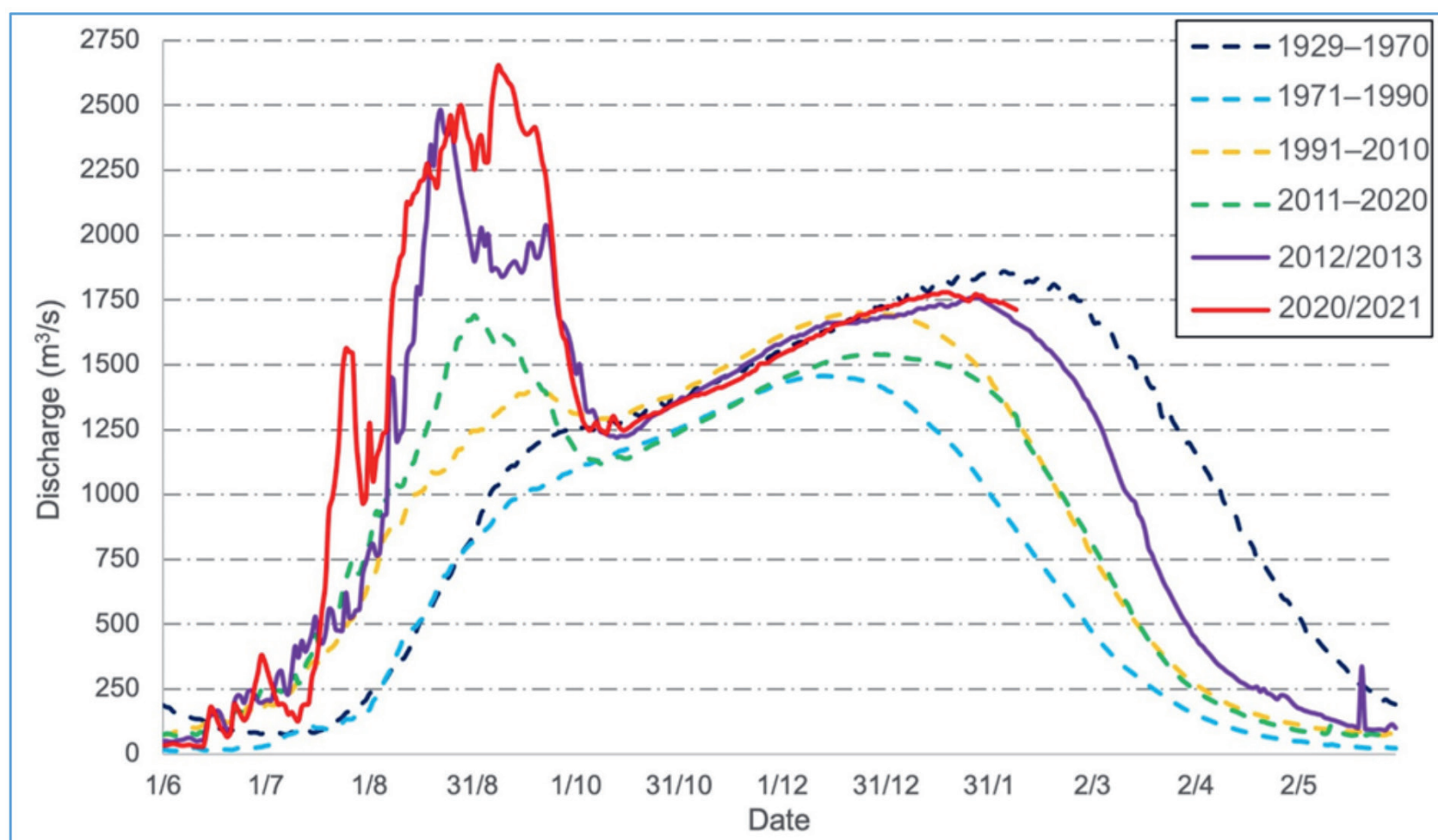


Figure 3 : Evolution de l'hydrogramme annuel du fleuve Niger à la station de Niamey (Massazza, et al., 2021)

Le premier paradoxe hydrologique du Sahel est illustré par la Figure 4 (Massazza, et al., 2021) qui montre comment les coefficients d'écoulement augmentent le plus vite durant la période de sécheresse (Gorouol à Alcongui et Dargol à Kakassi) ou à la fin de celle-ci (Sirba à Garbey Korou) (Tamagnone, Massazza, Pezzoli, & Rosso, 2019). De fait, c'est ce dernier bassin qui est le plus marqué par le second paradoxe du Sahel : les débits y augmentent encore plus depuis le retour des précipitations à leur niveau moyen de long terme. Or la figure 5 montre que le bassin de la Sirba, pas plus que ceux du Dargol et du Gorouol, n'ont subi de perte de leur couverture végétale ; l'évolution y est faible mais plutôt positive (Figure 5). Il semble donc que ce léger reverdissement ne suffise pas à accroître sensiblement l'infiltration et à diminuer le ruissellement. Le même paradoxe a été observé dans le Gourma Malien, où il avait été décrit auparavant (Dardel, et al., 2014) (Gardelle, Hiernaux, Kergoat, & Grippa, 2010).

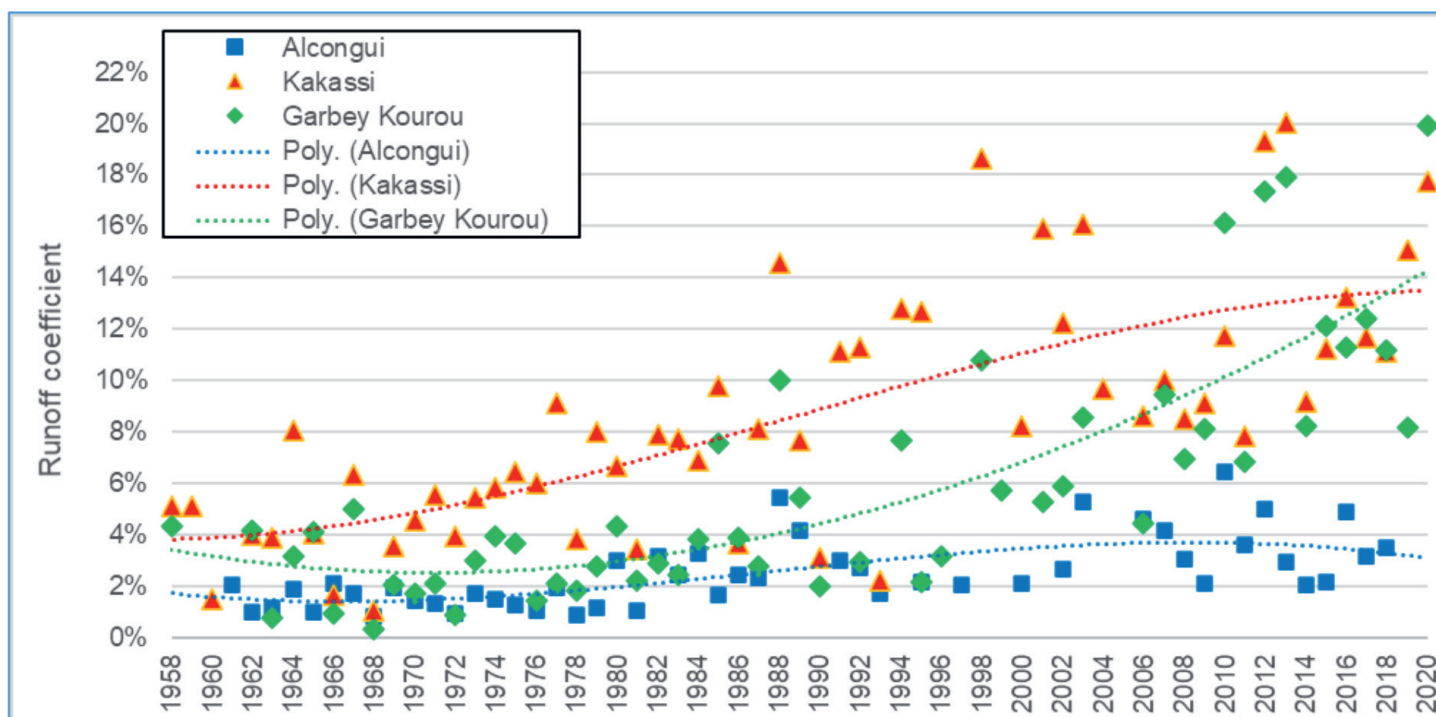


Figure 4 : Evolution des coefficients d'écoulement des trois principaux affluents sahétiens du Niger (Massazza, et al., 2021)

2.2. Comment expliquer ces évolutions ?

Facteurs explicatifs : On peut distinguer des causes anciennes, telles que l'encroûtement des sols mis en culture et laissés nus 8 à 9 mois par an, le déboisement, la mise en culture, l'ensablement des lits des cours d'eau du fait du ruissellement et de l'érosion liée (Descroix, et al., 2012) et les modifications de propriétés des sols peu profonds suite aux grandes sécheresses des années 70 et 80 (Gal, Grippa, Hiernaux, Pons, & Kergoat, 2017).

Des explications plus récentes sont d'une part les ratés de l'urbanisation galopante et comme corollaire la construction en zone inondable. Comme rien n'indique que les sols aient continué à se dégrader depuis la fin de la sécheresse, l'évolution récente des débits et régimes pourrait résider dans l'évolution des pluies. Celles-ci ont sensiblement augmenté à la fin de la sécheresse. Par ailleurs, le réchauffement climatique se traduit, certes, par une augmentation constante des pluies depuis 1986, mais également, depuis le début des années 2000, par une intensification de celles-ci, incluant une occurrence plus forte des événements pluvieux extrêmes (Panthou, Vischel, & Lebel, 2014) (Panthou, et al., 2018).

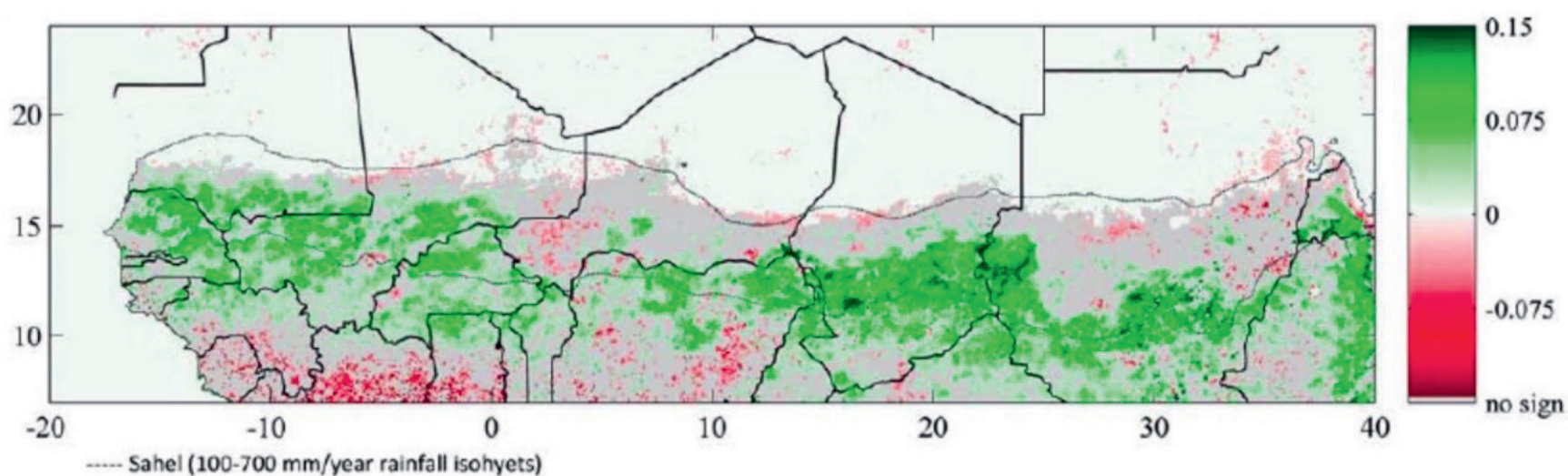


Figure 5 : Tendence du NDVI GIMMS 3g entre 1981 et 2011 : un reverdissement généralisé (sauf Ouest du Niger) (Dardel, et al., 2014)

L'augmentation de l'intensité des pluies et de la fréquence des pluies extrêmes (Panthou, et al., 2018) renforce la tendance au changement vers la prépondérance de la crue sahélienne sur la crue guinéenne dans le BFMN, évolution des pluies qui s'ajoutent aux facteurs déjà remarqués auparavant (baisse de la conductivité hydraulique des sols par encroûtement de la surface ou de subsurface, disparition des sols là où la végétation avait déjà disparu).

Les figures 6a, 6b et 6c illustrent la faiblesse des valeurs de conductivité hydraulique sur des états de surface bien souvent encroûtés du Sahel ((Descroix, Processus et enjeux d'eau en Afrique de l'Ouest Sahélo-Soudanienne., 2018) (Descroix, Laurent, Vauclin, Amogu, & et al, 2012) (Malam Abdou, Vandervaere, Descroix, & Bouzou Moussa, 2021). La figure 6a montre que c'est souvent les organisations pelliculaires de surface (croûtes) qui sont la cause de la faible infiltration. La conductivité s'accroît d'un ordre de grandeur quand le terrain est cultivé, c'est-à-dire travaillé et labouré (Figure 6b).

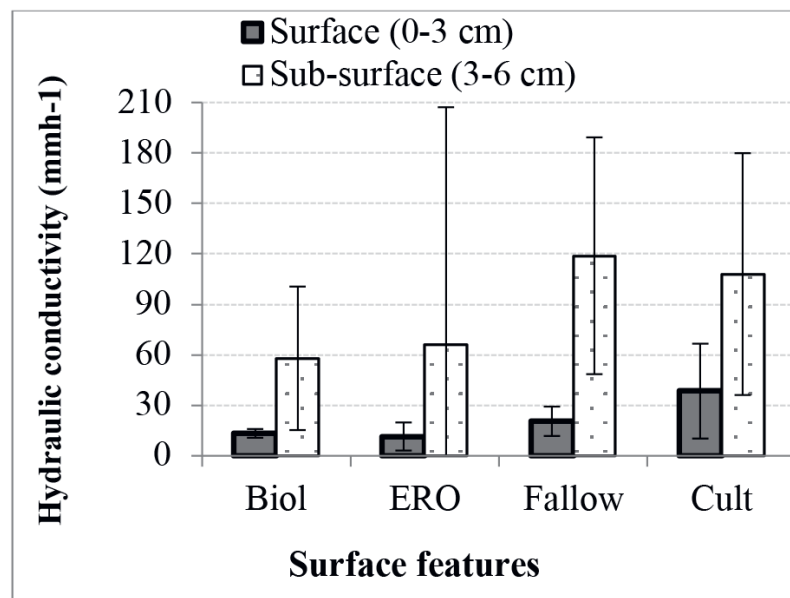


Figure 6a : Conductivité hydraulique en surface

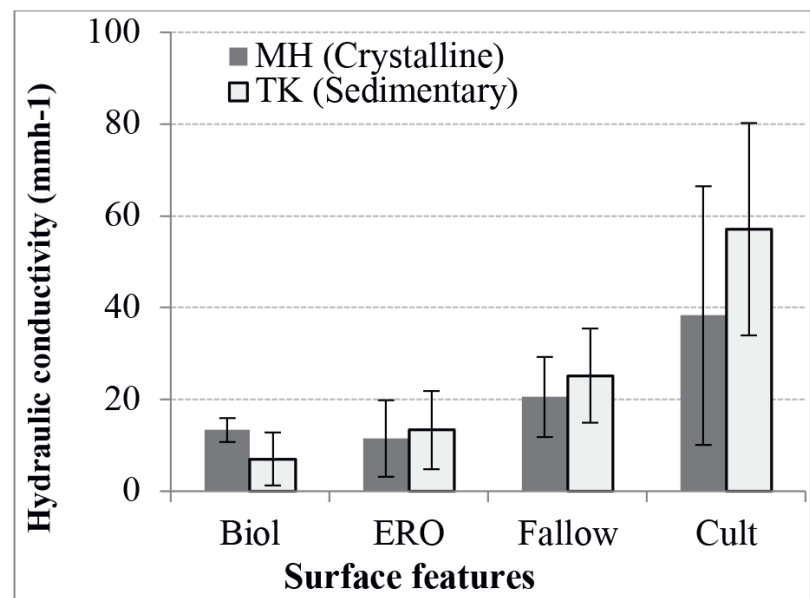


Figure 6b : Conductivité hydraulique

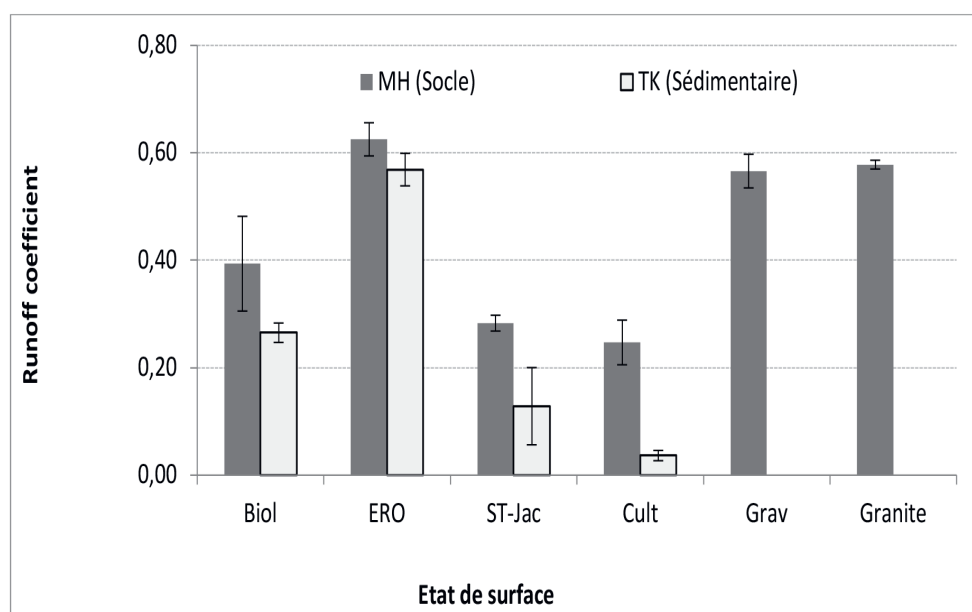


Figure 6c : relation entre coefficients d'écoulement et conductivité hydraulique suivant lithologie (Malam Abdou, Vandervaere, Descroix, & Bouzou Moussa, 2021)

Fig 6 abc : The considered surface features are the following :
 Biol : Biological crust
 ERO : Erosion crust
 Fallow,
 Cult : Cultivated
 Grav-crust : Gravelly crust
 Granite ; Altered granite
 ST-Jac : Structural crust (on fallow)
 Experimental sites : MH : Mellé Haoussa ; TK : Tondi Kiboro

La figure 6c montre la relation logique entre la diminution de la conductivité et l'accroissement des coefficients d'écoulement. Lors de la grande sécheresse, ce sont très souvent les sols cultivés qui se sont encroûtés, contribuant largement au premier paradoxe du Sahel.

3. A retenir

Le retour des pluies à leur niveau moyen de long terme au milieu des années 1990 a eu comme conséquence logique un reverdissement général du Sahel et de l'Afrique de l'Ouest en général, malgré quelques exceptions comme l'Ouest du Niger (Figure 5). Ce reverdissement n'a pas provoqué de baisse notable des coefficients d'écoulement. Au contraire, on observe leur augmentation, a priori paradoxale. Celle-ci est probablement liée à la persistance de l'encroûtement des nombreux sols cultivés ou en jachère et à la disparition totale de certains sols et à l'augmentation de l'intensité des pluies et de l'occurrence des événements pluvieux extrêmes.

4. Les perspectives scientifiques

Les travaux de recherche des prochaines années doivent se pencher sur la persistance de ce deuxième paradoxe, en analysant et modélisant l'hydrologie modifiée par l'intensification des pluies et l'accroissement de l'occurrence des pluies extrêmes. Ces éléments et la persistance de l'encroûtement des sols expliquent l'accroissement notable des débits du Niger à Niamey durant l'hivernage et la primauté croissante de cette crue dite rouge sur celle liée aux précipitations tombées dans le Haut bassin du fleuve en Guinée surtout et au Mali.

Les projections climatiques prévoyant une activation de la Mousson et un accroissement des pluies jusqu'à au moins 2100, il est urgent et important de pouvoir planifier et modéliser ce que seront le régime et les débits du fleuve dans les prochaines décennies.

5. Références bibliographiques

- Dardel, C., Kergoat, L., Hiernaux, P., Grippa, M., Mougin, E., Ciais, P., & Nguyen, C.-C. (2014). Rain-Use-Efficiency: What it Tells us about the Conflicting Sahel Greening and Sahelian Paradox. *Remote Sensing*(6), 3446-3474. doi:doi:10.3390/rs6043446
- Descroix, L. (2018). *Processus et enjeux d'eau en Afrique de l'Ouest Sahélo-Soudanienne*. Paris, France: EAC Editions Archives Contemporaines. doi:doi : 10.17184/eac.9782813003140.
- Descroix, L., Faty, B., Manga, S. P., Diedhiou, A. B., Lambert, L. A., & et al. (2020). Are the Fouta Djallon highlands still the water tower of West Africa ? *Water MDPI, special issue* 12, p. 20. doi:10.3390/w12112968.
- Descroix, L., Genthon, P., Amogu, O., Rajot, J.-L., Sighomnou, D., & Vauclin, M. (2012). Change in Sahelian Rivers hydrograph: The case of recent red floods of the Niger River. *Global and Planetary Change*(98-99), 18-30. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.gloplacha.2012.07.009
- Descroix, L., Guichard, F., Grippa, M., Lambert, L. A., Panthou, G., & et al. (2018). Evolution of surface hydrology in the Sahelo-Sudanian stripe: An updated synthesis. (MDPI, Éd.) *Water MDPI*. doi:10.3390/w10060748
- Descroix, L., Laurent, J.-P., Vauclin, M., Amogu, O., & et al. (2012). Experimental evidence of deep infiltration under sandy flats and gullies in the Sahel. *Journal of Hydrology*(424-425), 1-15. doi:doi:10.1016/j.jhydrol.2011.11.019
- Gal, L., Grippa, M., Hiernaux, P., Pons, L., & Kergoat, L. (2017). The paradoxical evolution of runoff in the pastoral Sahel. *Hydrology and Earth Systems Sciences*, 21, 4591-4613. doi:https://doi.org/10.5194/hess-21-4591-2017
- Gardelle, J., Hiernaux, P., Kergoat, L., & Grippa, M. (2010). Less rain, more water in ponds: a remote sensing study of the dynamics of surface waters from 1950 to present in pastoral Sahel (Gourma region, Mali). *Hydrology and Earth Systems Sciences*, 14, 309-324.
- Malam Abdou, M., Vandervaere, J.-P., Descroix, L., & Bouzou Moussa, I. (2021). Comparative hydrodynamic study of granitic and sedimentary catchments in Western Niger. *Hydrological Sciences Journal*. doi:https://doi.org/10.1080/02626667.2021.1921181
- Massazza, G., Bacci, M., Descroix, L., Housseini Ibrahim, M., Fiorillo, E., & et al. (2021). Recent Changes in Hydroclimatic Patterns over Medium Niger. *Water*(13), 39. doi:doi.org/10.3390/w13121659
- Panthou, G., Lebel, T., Viscel, T., Quantin, G., Sané, Y., Ba, A., . . . Diopkane, M. (2018). Rainfall intensification in tropical semi-arid regions: the. *Environmental Research Letters*, 10. doi:https://doi.org/10.1088/1748-9326/aac334
- Panthou, G., Viscel, T., & Lebel, T. (2014). Recent trends in the regime of extreme rainfall in the Central Sahel. *International Journal of Climatology*, 34, 3998-4006.
- Tamagnone, P., Massazza, G., Pezzoli, A., & Rosso, M. (2019). Hydrology of the Sirba River: Updating and Analysis of Discharge Time. *Water (MDPI)*(11), 156.

QUEL EST L'ÉTAT ACTUEL DES RISQUES CÔTIERS AUX DÉBOUCHÉS DES SYSTÈMES FLUVIAUX ?

Issa SAKHO^{1*}, Makha NDAO¹, El Hadji Serigne Mamour DIOP², Kader BA³, Abdoulaye NDOUR³, Awa Bousso DRAME¹, Julien DELOFFRE⁴

¹ Université Amadou Mahtar MBOW, UMR Sciences, Technologies Avancées et Développement Durable, Cité Keur Gorgui, Dakar, Sénégal.

² Université Gaston BERGER, UFR de Sciences Appliquées et de Technologies, Sanar, Saint-Louis, Sénégal

³ Département de Géologie, UCAD

⁴ UMR CNRS 6143 M2C, Université de Rouen Normandie

1. Introduction

L'embouchure des systèmes fluviaux est soumise à trois principaux risques côtiers :

- L'érosion côtière : phénomène qui se caractérise par le déplacement des sédiments d'une zone A (secteur en érosion) vers une zone B (secteur en accrétion) sous l'effet des courants cross-shore ou longshore. Elle affecte tous les littoraux sableux du monde.
- Les inondations d'origine fluviale : l'évolution du cycle hydrologique dans les hydrosystèmes se manifeste parfois par des crues importantes qui provoquent des inondations, par débordement du fleuve, des zones basses estuariennes situées dans la zone en aval du bassin. La vallée du fleuve est une zone qui est également concernée par ce problème.
- Les inondations d'origine marine : plus connu sous le nom de submersion marine, ce phénomène est lié aux événements de tempêtes qui favorisent un surplus d'eau à la côte.

Remarque : Dans les zones d'embouchure, le risque d'inondation est maximal lorsqu'une période de tempête coïncide avec une crue majeure et une période de vive-eau (fort marnage).

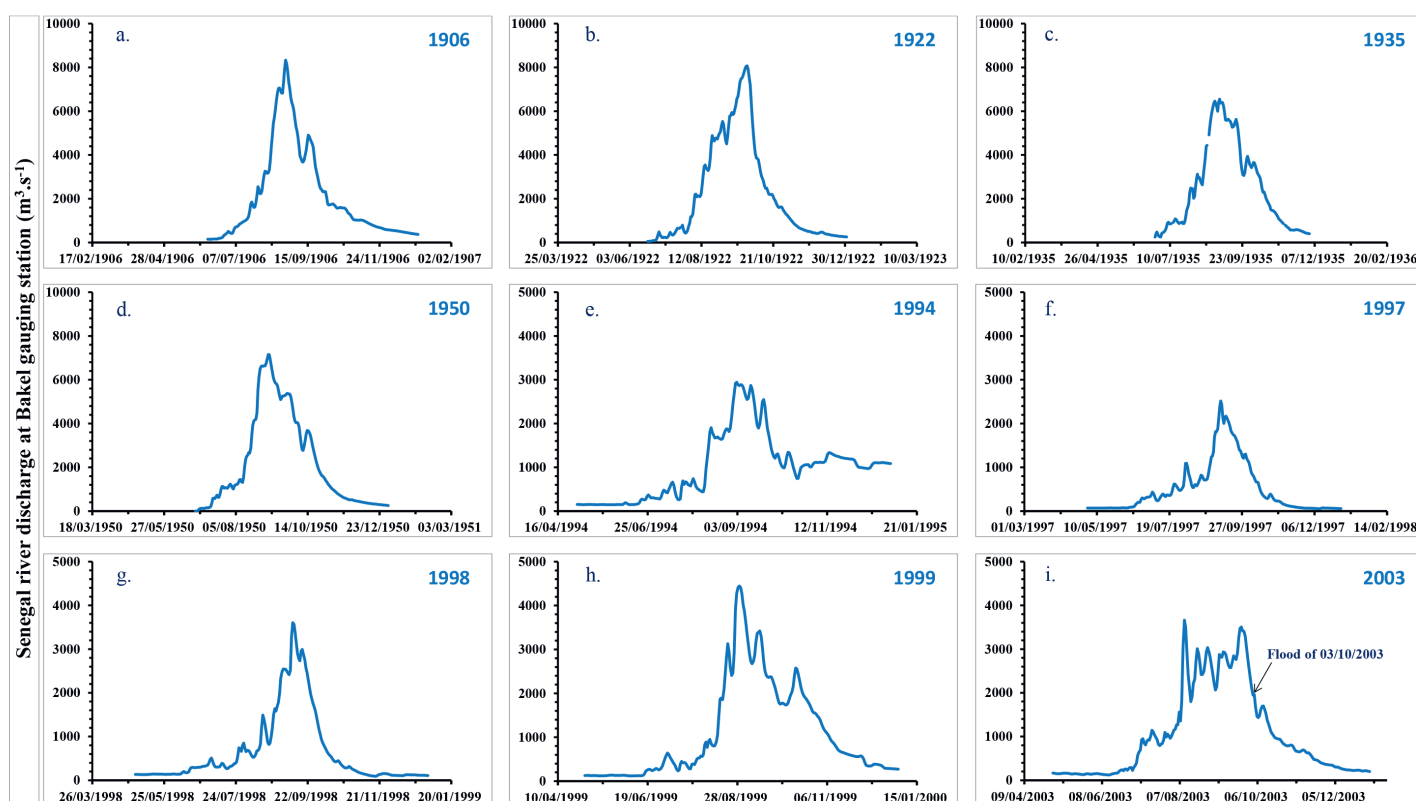


Figure 1. Hydrogramme de certaines crues majeures du fleuve Sénégal (données de la station de Bakel)

19 CRUES MAJEURES DU FLEUVE SENEGAL AYANT ENTRAINEES DES INONDATIONS DE LA VILLE HISTORIQUE DE SAINT-LOUIS

- XIXe siècle : 1827, 1841, 1843, 1854, 1855, 1858, 1866, 1871, 1890 ;
- XXe siècle : 1906, 1922, 1924, 1935, 1950, 1994, 1997, 1998, 1999 ;
- XXIe siècle : 2003
- Réduction importante des débits de pointes à partir de 1994 : serait-elle liée à la variabilité climatique récente et/ou à la mise en fonction du barrage réservoir de Manantali ?
- Malgré les deux barrages, le risque d'inondation d'origine fluviale à Saint-Louis demeurerait jusqu'en 2003 : 5 crues majeures depuis 1994.

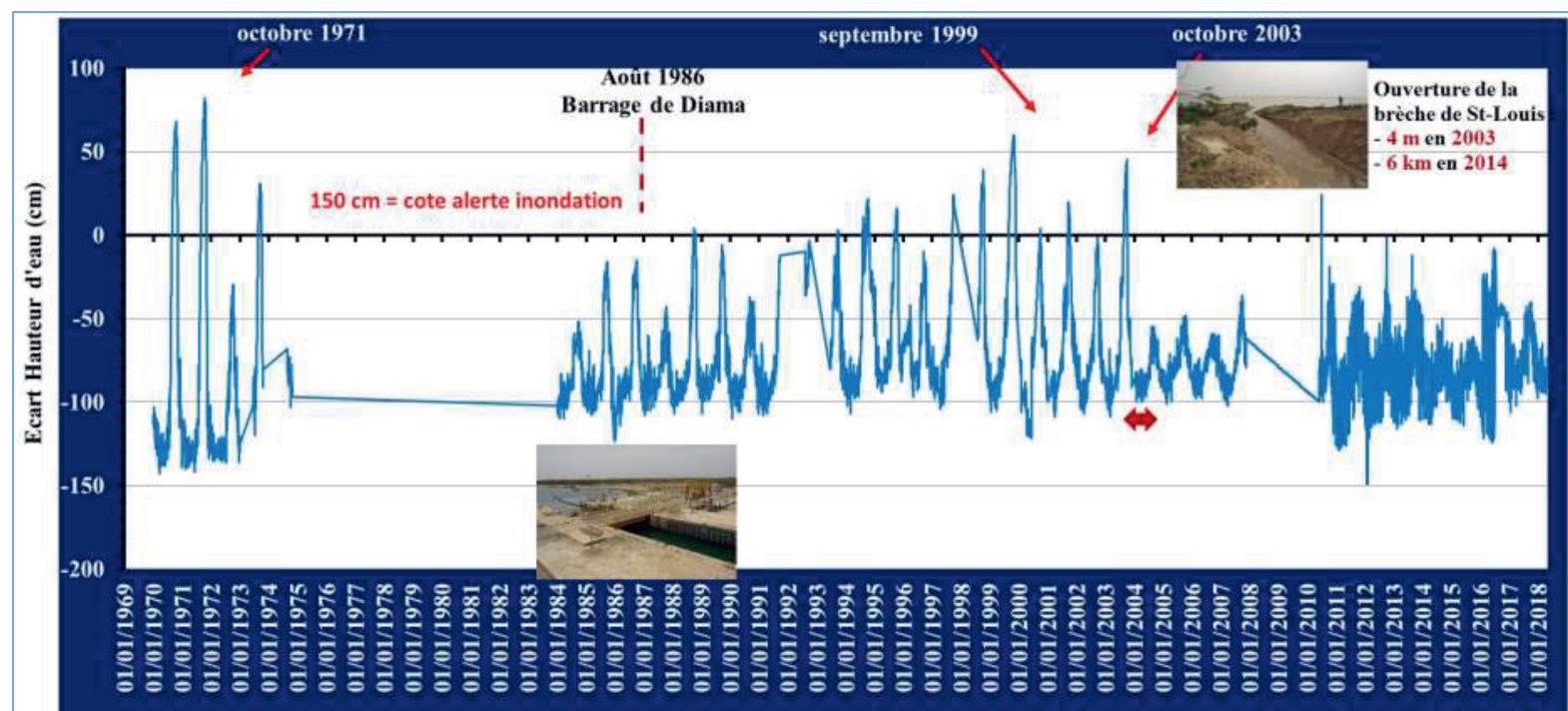
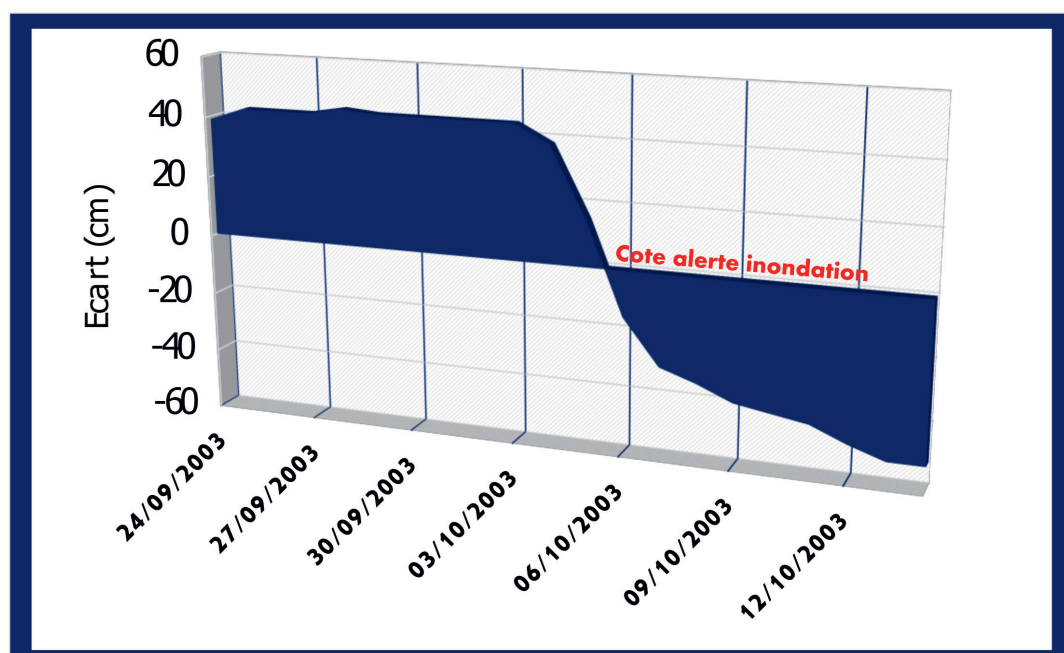


Figure 2. Evolution des hauteurs d'eau à la station de Saint-Louis de 1970 à 2018

2. Efficacité de la nouvelle embouchure dans la lutte contre les inondations fluviales à Saint Louis:

- 5 crues majeures ont été notées après la mise en service des barrages de Diama (sur le fleuve Sénégal) et de Manantali (sur le Bafing) : 1994, 1997, 1998, 1999 et 2003 ;
- Jusqu'en Octobre 2003, les variations de hauteurs d'eau observées à Saint-Louis sont caractéristiques du fonctionnement d'un système estuarien sur un bief fluvio-maritime ;
- Les crues de 1971 et de 1999 ont coïncidé avec une période de vive-eau : Marnage de 1,59 m et 1,50 m, respectivement, occasionnant des niveaux d'inondation plus forts ;
- La crue de 2003 s'est produite en période de morte-eau : Marnage de 0,61 m ;
- Depuis Octobre 2003, l'embouchure du fleuve Sénégal est sous contrôle quasi exclusif du régime tidal.
- Le risque d'inondation d'origine fluviale semble contenu.
- Le risque d'inondation d'origine marine (submersion marine) est présent et sera accentué avec les événements extrêmes de tempêtes. Ce risque sera maximal lorsqu'une tempête se produira en vive-eau associée à une période de lâchés au barrage de Diama ou en période d'évacuation des eaux du fleuve en cas de crue majeure.



EFFICACITE DE LA NOUVELLE EMOUCHURE DANS LA LUTTE CONTRE L'INONDATION DE SAINT-LOUIS :

- Forte réduction du temps de transfert des eaux de crues vers l'océan ;
- Une baisse extrêmement rapide de la hauteur d'eau à Saint-Louis : 59 cm en 48 heures
- Depuis l'ouverture de la brèche, le niveau du fleuve Sénégal est inférieur à la côte d'alerte «Inondation de Saint-Louis.

Figure 3. Variation des hauteurs d'eau à la station de Saint-Louis 9 jours avant l'ouverture de la brèche (03 octobre 2003) et 9 jours après.

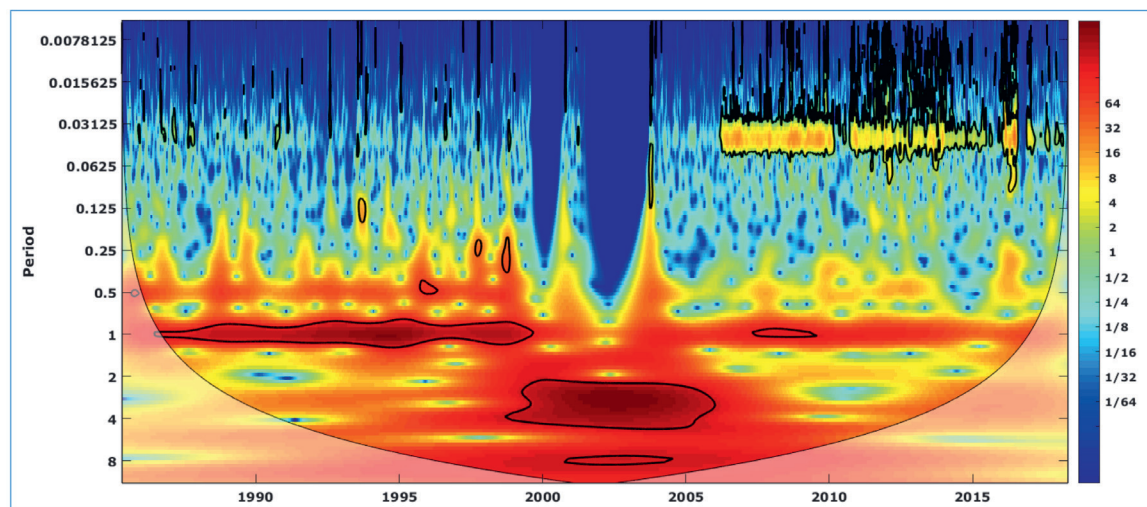


Figure 4. Modification du régime hydrologique dans le bas estuaire du fleuve Sénégal depuis l'ouverture de la brèche le 03 octobre 2003.

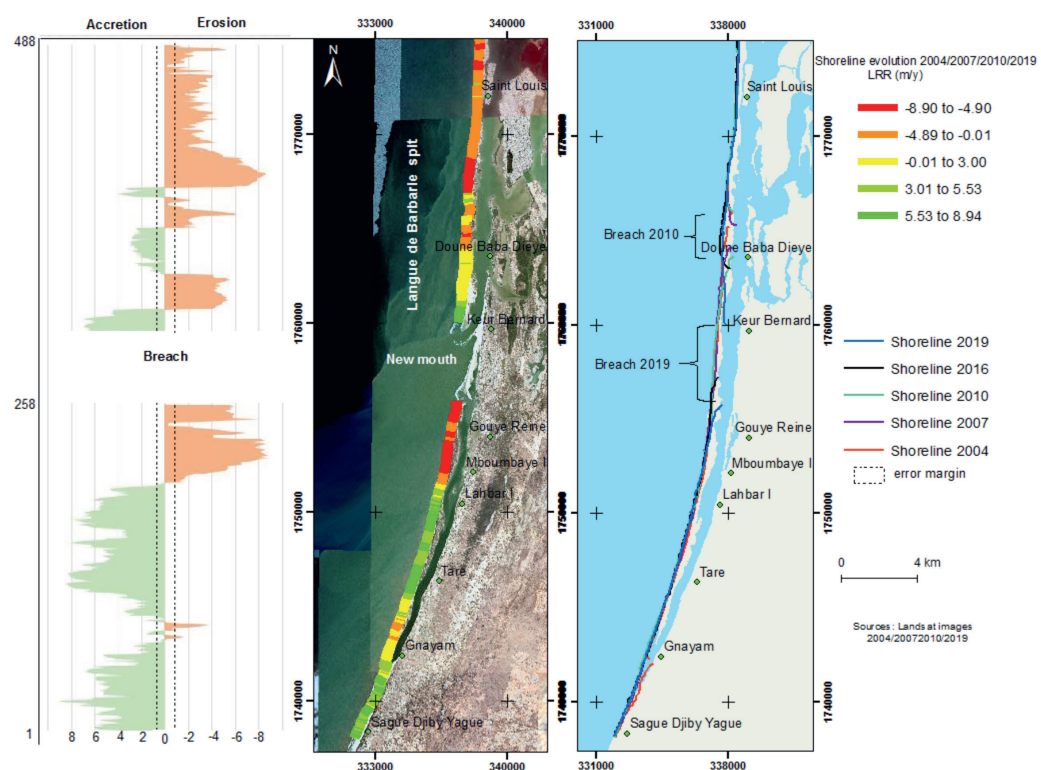
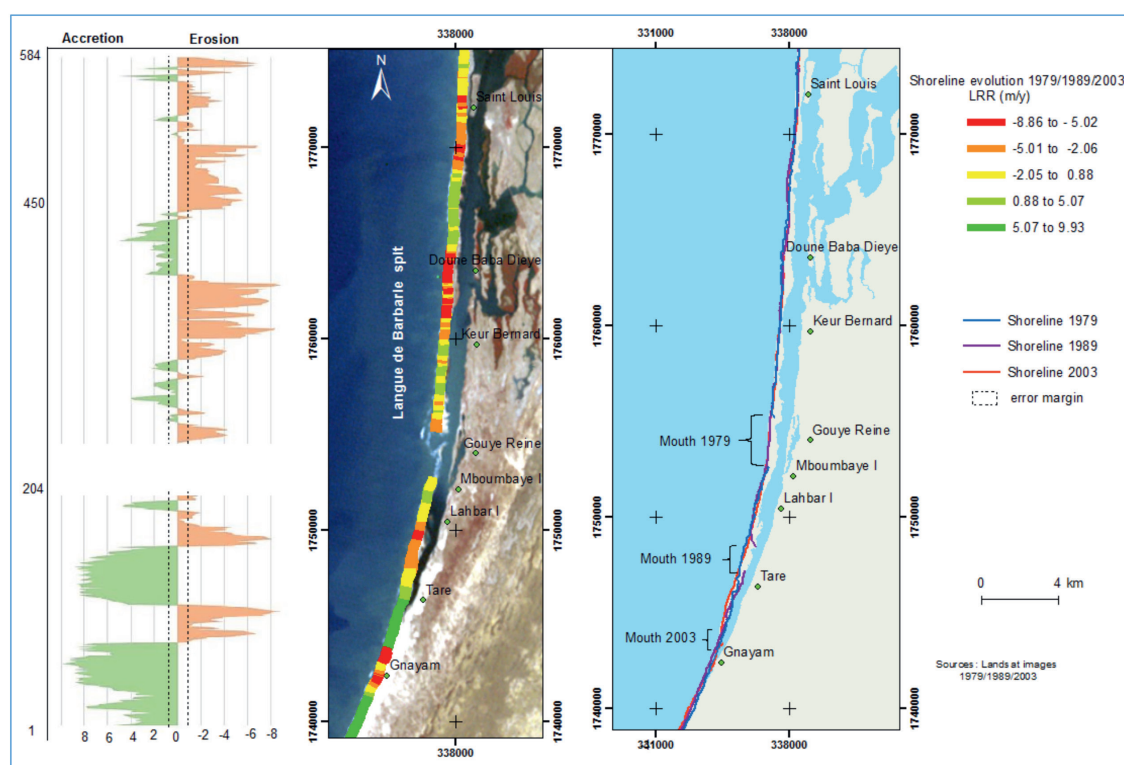
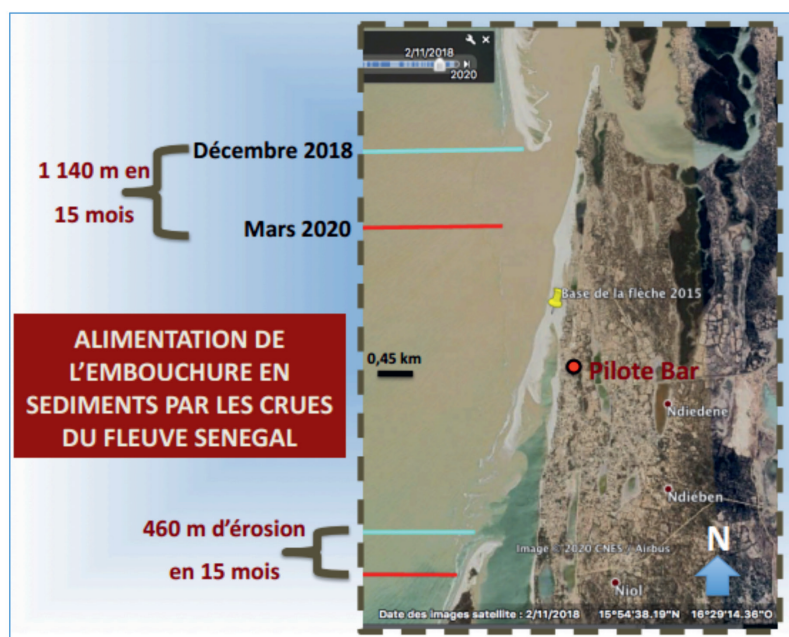


Figure 5. Dynamique du trait de côte de la langue de Barbarie et évolution de l'embouchure du fleuve Sénégal de 1979 à 2019



Commentaires : La brèche de Saint-Louis, Une particularité mondiale :

- Avant l'ouverture de la brèche en octobre 2003, l'embouchure du fleuve Sénégal se situait à Gnyam à environ 30 km au Sud de l'île de Saint-Louis ;
- Le littoral de Guet Ndar, hydrobase et de Doune Baba Dièye constituaient les hot spots de l'érosion : plus de 8 m.an-1 (Figure 5a) ;
- Depuis l'ouverture de la brèche au droit de Doune Baba Dièye, le processus d'érosion s'est installé sur le tout segment côtier. La partie distale de la flèche Nord prograde vers le Sud, tandis que la pointe Sud enregistre des taux d'érosion élevés (Figure 5b) ;
- L'extension maximale de la largeur de l'embouchure s'est produite entre 2003 (à l'ouverture) et 2015 avec un taux d'élargissement de plus de 500 m.an-1 ;

- En 2021, l'embouchure du fleuve Sénégal se situe à 11,65 km de l'île de Saint-Louis contre seulement 7 km en 2003. Ce déplacement vers le Sud, s'est traduit par la formation d'une nouvelle flèche sableuse qui a isolé une lagune côtière dans la zone de Pilote Bar ;
- Cette importante dérive littorale est un élément favorable à la réduction de la vulnérabilité de l'île par rapport aux risques d'inondations, notamment d'origine marine.

3. A retenir

- Depuis le XIXème siècle, le fleuve Sénégal a connu 19 crues majeures qui ont provoqué des inondations à Saint-Louis ;
- Ces crues majeures interviennent principalement entre Septembre et Novembre ;
- La brèche sur la Langue de Barbarie, devenue l'unique exutoire du fleuve Sénégal depuis 2015, a mis fin à ces inondations d'origine fluviale :
 - Par une réduction considérable du temps de transfert des eaux de crues vers l'océan atlantique ;
 - Par un fort écrêtage des crues lors des périodes de niveaux d'eaux extrêmes (septembre et octobre) ;
- Les hot spots de l'érosion se situent actuellement entre Gokhou Mbath et Doune Baba Dièye (Figure 5b) ;
- Le littoral de Guet Ndar est le plus menacé par le risque de submersion marine ;
- Le niveau très élevé de longshore drift de la flèche sableuse de Barbarie (environ 400 m.an-1) éloigne l'île de St-Louis d'un risque de submersion marine (embouchure située à 11,65 km) ;
- Cependant, cette dynamique pourrait, à moyen terme, exposer à nouveau l'île de Saint-Louis aux phénomènes d'inondations lors de crues majeures.

4. Perspectives scientifiques : Acquisition de données nécessaires à la modélisation des écoulements entre Diama et l'embouchure

- Bathymétrie du cours d'eau : de Diama jusqu'à l'ancienne embouchure ;
- Topographie de l'île de Saint-Louis, de la Langue de Barbarie et du bas estuaire ;
- Automatisation de la station hydrométrique de Saint-Louis avec télétransmission de données avec une acquisition à haute fréquence (1 mesure toutes les 15 mn)
- Développement du modèle hydrodynamique ;
- Modélisation des risques d'inondation en lien avec les scénarios du changement climatique ;
- Etablissement des cartes à risques ;
- Développement de plans de prévention des risques hydro-climatique (PPR) ;
- Développement d'outils pour le mangement digital du fleuve Sénégal et de son embouchure

LES AMÉNAGEMENTS EN BANQUETTES DE LA ZONE SAHÉLIENNE SONT-ILS UN MOYEN EFFICACE POUR AMÉLIORER L'INFILTRATION DE L'EAU ET RÉDUIRE LES RUISSELLEMENTS ÉROSIFS ?

Jean Pierre Vandervaere, UGA, Institut des Géosciences de l'Environnement (IGE), Université Grenoble Alpes, CNRS, IRD, Grenoble INP, IGE, Grenoble, France
Aghali Ingatan Warzagan, Département de Géographie, Université Abdou Moumouni, Niamey, Niger
Ibrahim Bouzou Moussa, Département de Géographie, Université Abdou Moumouni, Niamey, Niger
Marc Descloitres, IRD, Institut des Géosciences de l'Environnement (IGE), Université Grenoble Alpes, CNRS, IRD, Grenoble INP, IGE, Grenoble, France
Moussa Malam Abdou, Département de Géographie, Université de Zinder, Zinder, Niger
Luc Descroix, IRD, UMR PALOC IRD/MNHN, Paris

1. Introduction

Dans une grande partie de la zone sahélienne, les aménagements hydro-agricoles sont un usage de plus en plus répandu de conservation des eaux et des sols (CES). Banquettes, demi-lunes, zaïs, cordons pierreux, sous-solage, constituent divers moyens de lutte contre les ruissellements érosifs, soutenus par les pouvoirs publics et les ONGs (Ousseini & Bender, 1995), (Nasri, Lamachère, & Albergel, 2004), (Albergel & Diop, 2012), (GIZ-KFW, 2015) mais leur efficacité n'a été que très peu quantifiée par des mesures jusqu'à présent (Zouré C., 2019), (Zouré, et al., 2019). De plus, dans un contexte de changement climatique sous lequel la bande sahélienne pourrait se retrouver soumise à des événements pluvieux de plus en plus intenses (Panthou, Vischel, & Lebel, 2014), cette efficacité pourrait être réduite, conduisant les décideurs à se tourner vers de nouvelles options. Dans cet article, nous présentons les résultats d'une étude expérimentale (Ingatan Warzagan, 2020) visant à quantifier l'efficacité des banquettes, tant au niveau du gain en infiltration sous les parcelles aménagées qu'au niveau de la réduction des débits des petits bassins versants. Le premier aspect sous-tend de larges possibilités de ressources en eau locales pour l'agriculture tandis que le second permet d'envisager un moyen de lutte contre les crues et inondations.

2. Résultats scientifiques

2.1. Site, matériels, et méthodes

Le site expérimental de Tondi Kiboro (Figure 1) est situé à l'Ouest du Niger en zone sédimentaire endoréique (Malam Abdou, Vandervaere, Descroix, & Bouzou Moussa, 2021). Il a fait l'objet de nombreuses investigations liées au cycle de l'eau, appuyées par le Service National d'Observation (SNO) Ammacatch (Galle, et al., 2018). Le paysage sédimentaire est en grande partie occupé par des plateaux latéritiques (dénnotés «TK Amont» sur la Figure 1) où se développe une végétation de type brousse tigrée (Galle, Ehrmann, & Peugeot, Water balance in a banded vegetation pattern, 1999) consistant en une alternance de bandes arbustives et de bandes nues. En fonctionnement normal, la densité de la brousse tigrée est en équilibre avec la quantité d'eau reçue annuellement et le plateau ne produit pas de ruissellement. Cependant, depuis quelques années, en raison de l'accroissement des défrichements, les bandes de végétation dégradées ne suffisent plus à arrêter les écoulements, conduisant ainsi à des débits érosifs depuis les plateaux vers les points bas des bassins. C'est ainsi que des mesures de réhabilitation ont été prises afin de restaurer les écosystèmes et limiter les ruissellements. Parmi ces mesures, les banquettes ont été très largement développées pendant ces dix dernières années. Une banquette consiste en un fossé en forme de trapèze (Figures 2 et 3) s'ouvrant vers l'amont pour délimiter un impluvium de l'ordre de 200 m². Vers l'aval, le sol excavé permet de construire un bourrelet qui arrête l'écoulement, forçant l'eau à stagner en amont pendant une durée de l'ordre de 24 heures, bien que variable suivant les ouvrages. L'eau ainsi immobilisée, ne peut que s'infiltrer, majoritairement, ou s'évaporer. Toutefois, si l'événement est intense et/ou de fort cumul, l'eau peut parvenir à franchir le bourrelet, voire le rompre, ce qui conduit à des pertes en volume limitant l'efficacité de l'ouvrage.

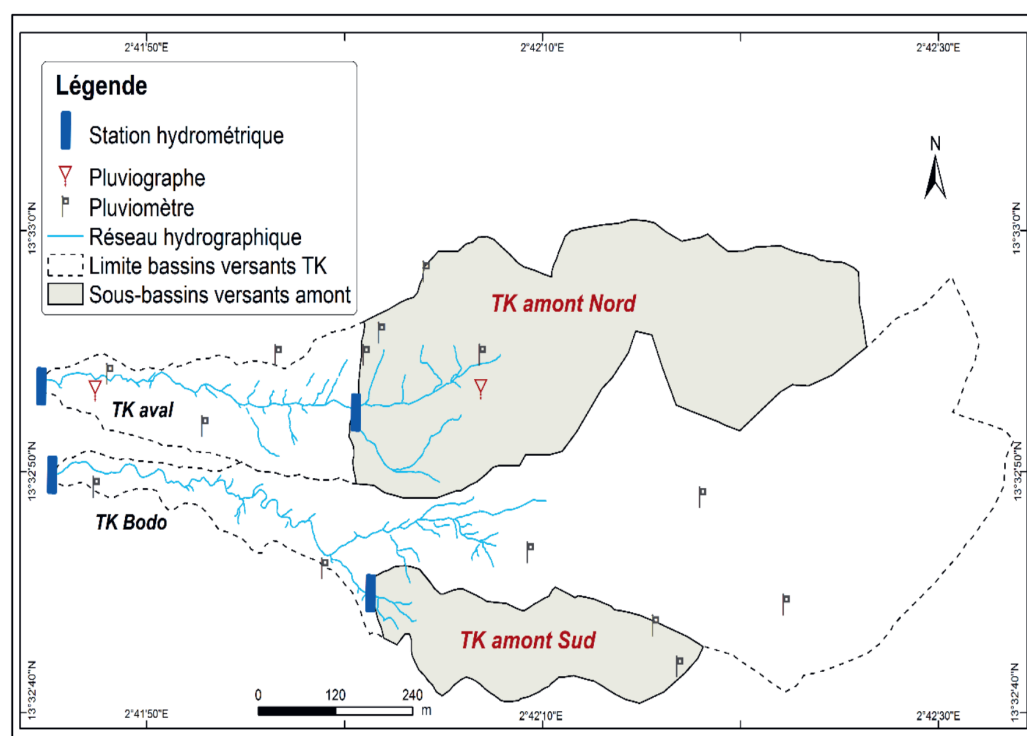


Figure 1 : Carte schématique des bassins versants de la zone d'étude, Tondi Kiboro, Niger (Ingatan Warzagan, 2020)

Afin de quantifier le gain en infiltration apporté par les banquettes, nous avons réalisé un suivi hydrologique de trois ouvrages (banquettes B1, B2 et B3) pendant deux ans. Chaque événement pluvieux a été caractérisé par son cumul et son hyétogramme mesuré par un pluviographe à augets. La quantité d'eau du sol a été indirectement mesurée, quotidiennement, pendant les deux saisons pluvieuses grâce à un conductivimètre EM38. Un site Témoin a été suivi selon le même protocole de manière à chiffrer le bénéfice apporté par les ouvrages.

Le conductivimètre EM38 mesure la conductivité électrique apparente (CEA) du milieu sous le point considéré. Ces points de mesure sont représentés en rouge sur la Figure 3 et sont en nombre allant de 84 à 135 selon les banquettes (165 pour le Témoin). Ceci permet non seulement de cartographier l'infiltration mais aussi de disposer d'une estimation moyenne de stock hydrique très précise en raison de la taille de l'échantillon.

Cependant, le conductivimètre mesure le stock hydrique de manière indirecte et nécessite donc un étalonnage. Pour cela, trois tubes d'accès neutronique ont été implantés, dans l'impluvium (T1), dans le fossé (T2) et à l'aval (T3), permettant d'avoir un profil quotidien d'humidité volumique du sol, grâce à des mesures tous les 10 cm de profondeur jusqu'à 130 cm puis tous les 20 cm jusqu'à 190 cm (Figure 4). Le stock hydrique est ensuite calculé par intégration verticale de ces mesures. De manière classique, les mesures neutroniques ont elles-mêmes été étalonnées par des prélèvements de sol non remanié au cylindre suivi de pesées avant et après séchage à l'étuve. Grâce au grand nombre de points de mesure EM38, les estimations quotidiennes de stock hydrique sont suffisamment précises pour disposer, après chaque pluie, d'une bonne mesure de la variation de stock ΔS provoquée par l'infiltration. De plus, ces variations sont cartographiées au sein de chaque parcelle (Figure 5), permettant de repérer d'éventuels points remarquables.



Figure 2 : A gauche : réalisation d'une banquette, impluvium (côté amont, à gauche), fossé (au centre) et bourrelet (côté aval, à droite). En haut à droite : mesure à la sonde à neutrons dans le fossé. En bas à droite : conductivimètre EM38. (Ingatan Warzagan, 2020)

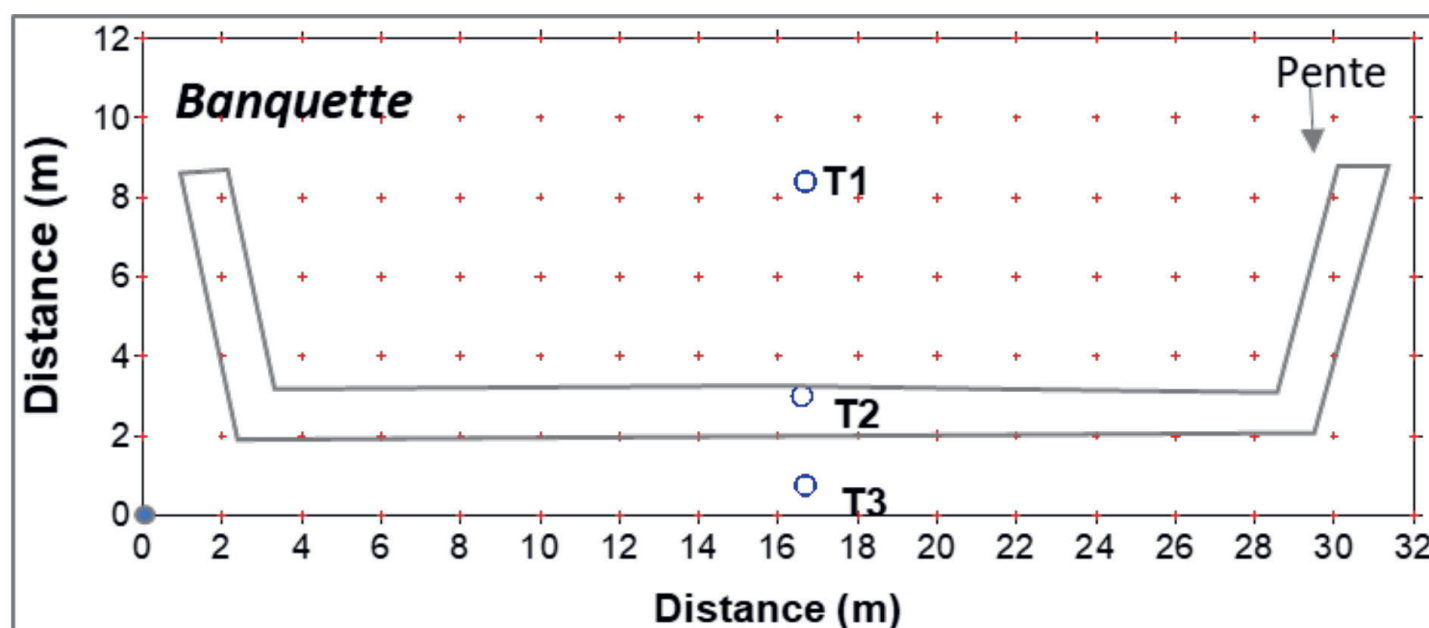


Figure 3 : Protocole des points de mesure sur l'une des banquettes ; T1, T2 et T3 désignent les tubes d'accès neutronique ; les croix rouges représentent les mesures au conductivimètre EM38, espacées de 2m. (Ingatan Warzagan, 2020)

2.2. Variation de stock hydrique avec et sans aménagement

Sur le Témoin, le stock ne dépasse jamais 240 mm d'eau (sur 2 m de profondeur) au cours des deux saisons tandis que la valeur maximale sur les trois banquettes varie entre 330 et 410 mm. Les variations de stock ΔS induites par les pluies sont représentées Figure 6 pour le Témoin et pour la banquette B1. Bien entendu, ΔS est plus important pour les pluies de plus fort cumul. Sur le Témoin, ΔS est toujours très inférieur à la pluie en raison du ruissellement non retenu et plafonne à environ 12 mm pour les pluies supérieures à 30 mm environ. Sur la banquette, les pluies de petit cumul s'infiltrent en totalité, voire même, produisent une variation de stock supérieure à la pluie en raison des écoulements venant de l'amont au-delà de l'ouvrage. Pour les fortes pluies, ΔS peut atteindre 30 mm, soit la moitié de la hauteur de pluie environ, l'ouvrage ayant alors débordé. On remarque que la variation de stock ne plafonne pas et pourrait donc être encore augmentée pour des pluies de cumul supérieur à 70 mm.

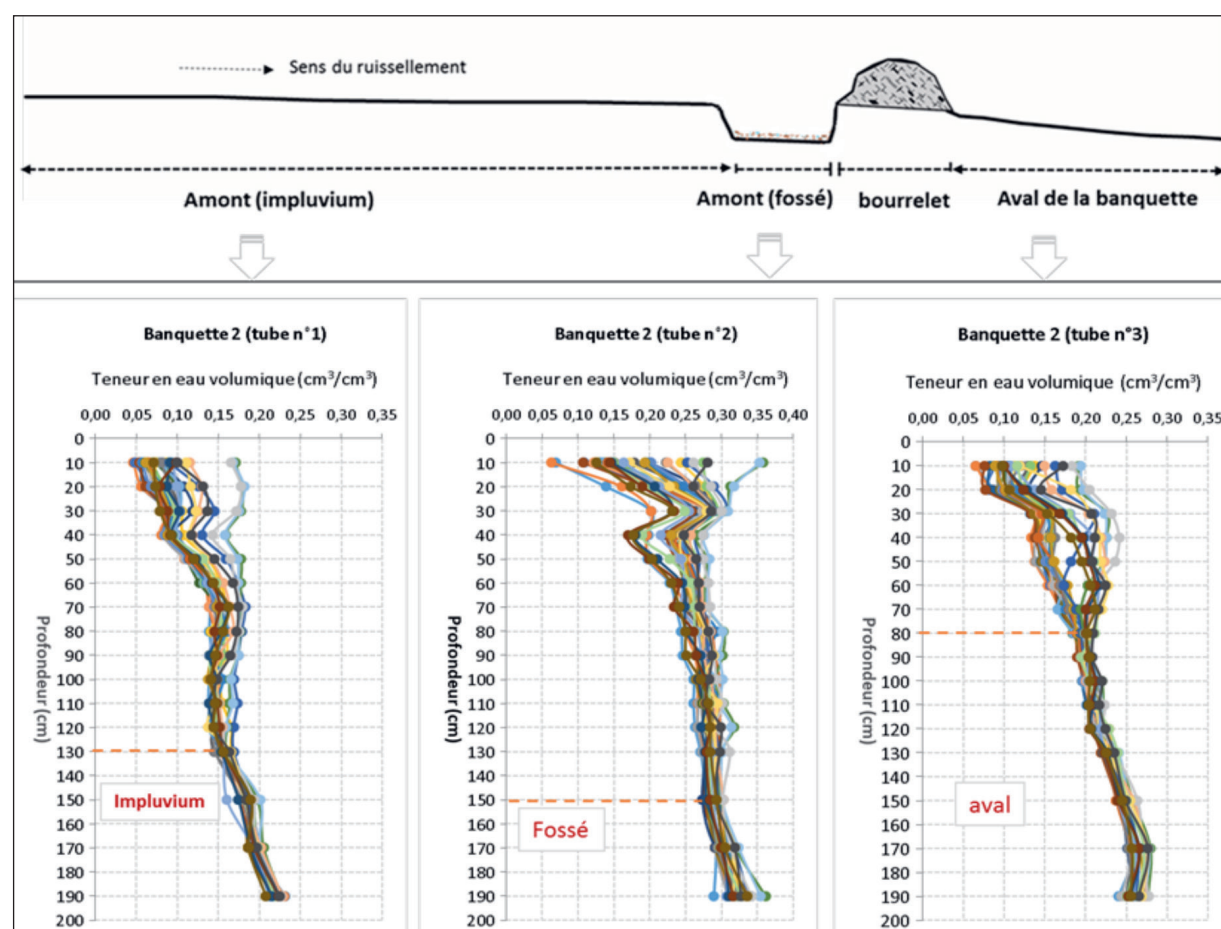


Figure 4 : Profils d'humidité volumique par sondage neutronique en amont, dans le fossé et en aval de la banquette B2. Les mesures représentées sont espacées de deux jours (périodes humides) à vingt jours (périodes sèches) (Ingatan Warzagan, 2020)

Puisque les variations de stock sont connues pour le Témoin, d'une part, et pour trois banquettes, d'autre part, il est facile de calculer le facteur de gain apporté par l'aménagement en divisant la valeur de ΔS moyenne des trois banquettes par la valeur de ΔS du Témoin (Figure 7) en fonction du cumul de pluie. Pour les petites pluies (1-10 mm), les stocks hydriques varient peu, ce qui rend l'estimation des variations ΔS imprécises et donc bruitées. Pour les pluies moyennes (10-35 mm), le facteur de gain est de 2 environ. Pour les fortes pluies (35-70 mm), le gain augmente progressivement atteignant la valeur de 3.6. Ceci s'explique par le plafonnement de la valeur ΔS du Témoin tandis que celle des banquettes ne plafonne pas. L'efficacité de l'aménagement en banquettes est donc encore meilleure pour les très fortes pluies, telle qu'attendues avec le changement climatique au Sahel (Descroix, 2018).

2.3. Effet hydrologique à l'échelle du petit bassin

Le bassin versant TKAmont Nord a connu un aménagement en banquettes progressif entre 2009 (2% de la surface) et 2016 (9% de la surface), permettant de mesurer la réduction des écoulements annuels découlant de ces modifications (Ingatan Warzagan, Bouzou Moussa, Vandervaere, Malam Abdou, & Faran Maiga, 2019), (Ingatan Warzagan, 2020). Ainsi, le coefficient d'écoulement annuel (rapport de la lame écoulée à la lame précipitée) est passé de 16-17% en moyenne à 8% en fin de période (2016-2018) soit une baisse d'un facteur deux. On en déduit qu'il n'est pas utile de couvrir la totalité des plateaux de brousse tigrée en aménagements pour réduire drastiquement les écoulements à la sortie du bassin..

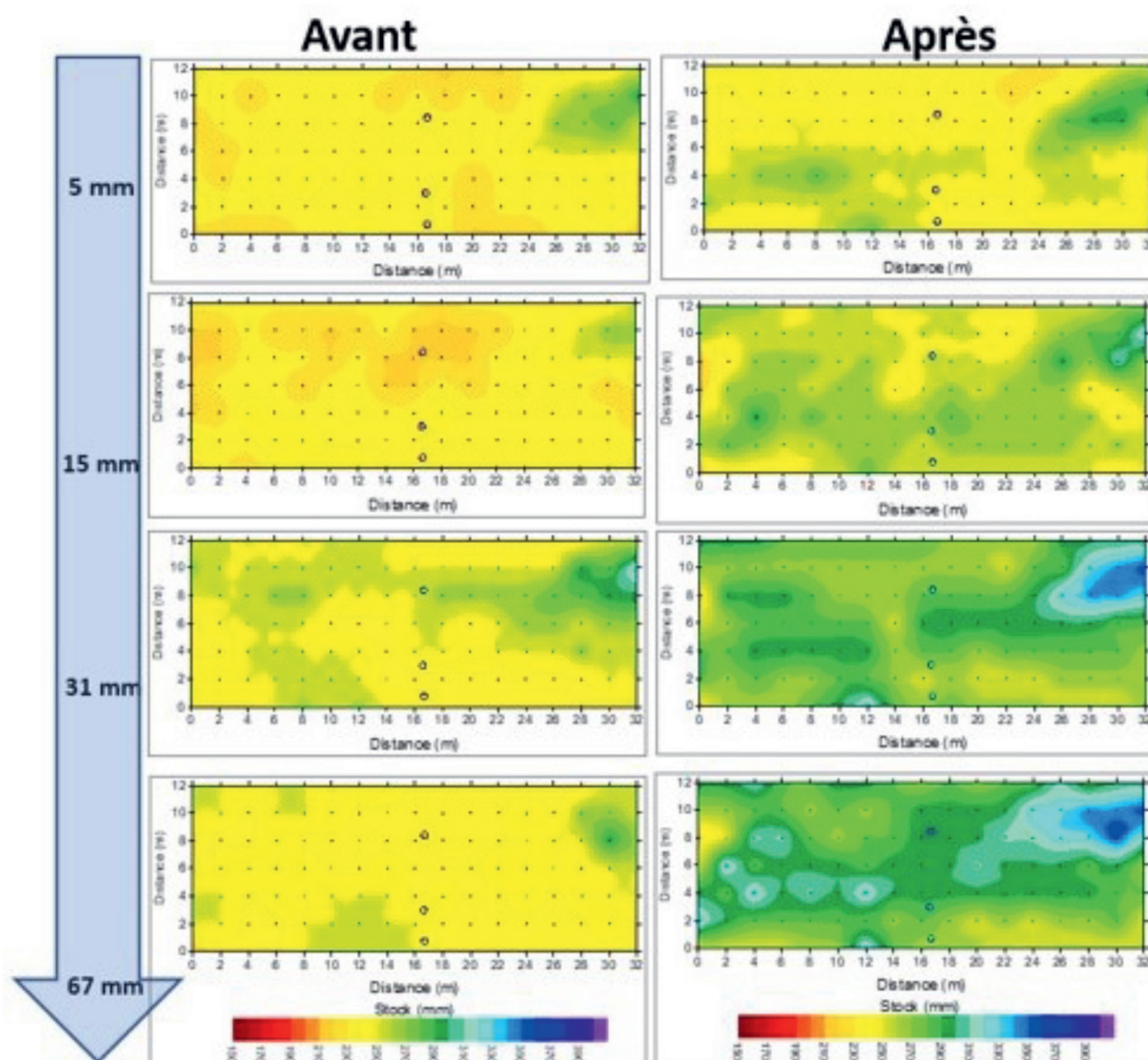


Figure 5 : Cartes de stock hydrique ponctuel calculé par conductivimétrie EM38. Avant (à gauche) et après pluie (à droite), pour des pluies de cumul croissant de haut en bas, indiqué à gauche, pour la banquette B2. Le conductivimètre est étalonné grâce aux mesures neutroniques. (Ingatan Warzagan, 2020)

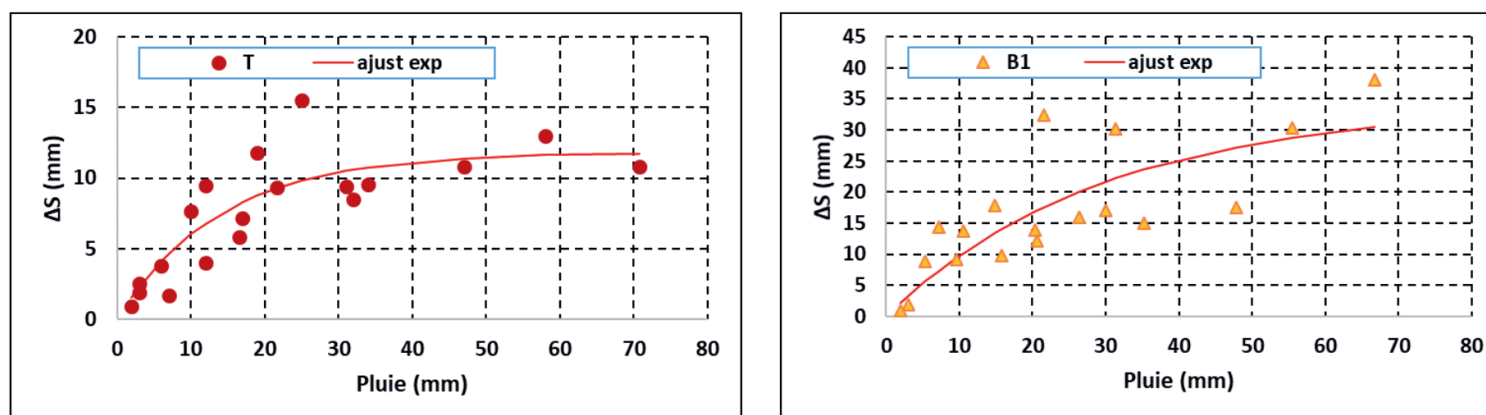


Figure 6 : Variation de stock hydrique ΔS , par événement pluvieux, en fonction du cumul de pluie, pour le site Témoign (à gauche) et pour la banquette B1 (à droite). (Ingatan Warzagan, 2020)

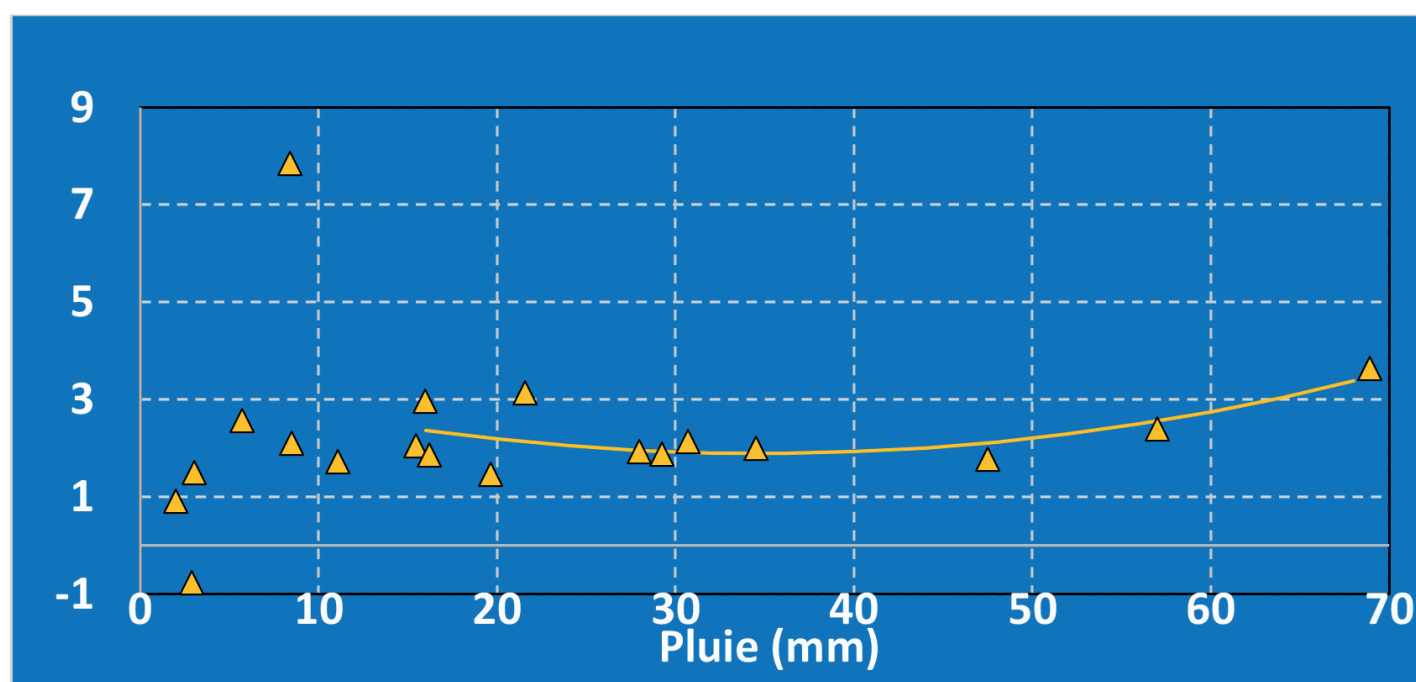


Figure 7 : Gain en variation de stock ΔS exprimé selon le rapport du ΔS des banquettes (moyenne des banquettes B1, B2 et B3) par le ΔS du Témoign (Ingatan Warzagan, 2020).

3. A retenir

Les banquettes constituent un mode d'aménagement de CES peu coûteux à mettre en œuvre et qui permet de doubler, voire tripler, l'infiltration de l'eau au droit de l'ouvrage, limitant donc drastiquement les ruissellements érosifs. Cette efficacité est encore meilleure lors des pluies de fort cumul ce qui constitue une perspective encourageante en cas d'intensification pluvio-climatique. Cependant, il n'est pas nécessaire d'aménager la totalité de la surface des sites ruisselants, comme les brousses tigrées, pour réduire les écoulements à l'échelle du bassin versant.

4. Perspectives scientifiques

La présente étude a été réalisée en zone sédimentaire, endoréique, où les écoulements des petits bassins s'infiltrent dans les réseaux hydrographiques avant de rejoindre les fleuves (Malam Abdou, Vandervaere, Descroix, & Bouzou Moussa, 2021). Des études similaires en zone de socle, exoréique, pourraient quantifier le potentiel des aménagements en termes de prévention des crues des grands fleuves, tels que le fleuve Niger, et dont l'ampleur a fortement augmenté ces dernières années.

5. Références bibliographiques

- Albergel, J., & Diop, S. (2012). Aménagements hydrauliques innovants pour la gestion conservatoire des eaux et des sols sur le tracé de la Grande Muraille Verte. *Dans La Grande Muraille Verte* (Vol. 1, pp. 321-349). Bondy, France: IRD. Récupéré sur https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers14-01/010058318.pdf
- Descroix, L. (2018). *Processus et enjeux d'eau en Afrique de l'Ouest Sahélo-Soudanienne*. Paris, France: EAC Editions Archives Contemporaines. doi:doi : 10.17184/eac.9782813003140.
- Galle, S., Ehrmann, M., & Peugeot, C. (1999). Water balance in a banded vegetation pattern. (Elsevier, Éd.) *Catena*(37), 197-2016.
- Galle, S., Grippa, M., Peugeot, C., Bouzou Moussa, I., Cappelaere, B., & et , a. (2018, juin). AMMA-CATCH, a Critical Zone Observatory in West Africa Monitoring a Region in Transition. *Vadose Zone Journal*, 24. doi:doi:10.2136/vzj2018.03.0062.
- GIZ-KFW. (2015). *25 ans de réhabilitation et de conservation des sols au Sahel* (éd. GIZ KFW). Bonn: GIZ KFW. Récupéré sur <https://www.inter-reseaux.org/ressource/25-ans-de-rehabilitation-et-de-conservation-des-sols-au-sahel/>.
- Ingatan Warzagan, A. (2020). *Evaluation de l'efficacité d'ouvrages antiérosifs sur la rétention d'eau et l'hydrologie des bassins versants du Sud-Ouest du Niger : cas des banquettes et du sous-solage*. Niamey: Université Abdou Moumouni.
- Ingatan Warzagan, A., Bouzou Moussa, I., Vandervaere, J., Malam Abdou, M., & Faran Maiga, O. (2019). Reducing runoff by increasing landscaped areas. *Environmental and Water Sciences, Public Health & Territorial Intelligence*, 3(1), 36-46.
- Malam Abdou, M., Vandervaere, J.-P., Descroix, L., & Bouzou Moussa, I. (2021). Comparative hydrodynamic study of granitic and sedimentary catchments in Western Niger. *Hydrological Sciences Journal*. doi:<https://doi.org/10.1080/02626667.2021.1921181>
- Nasri, S., Lamachère, J., & Albergel, J. (2004). Impact des banquettes sur le ruissellement d'un petit bassin versant. *Revue des Sciences de l'Eau*, 265-289. Récupéré sur http://www.rse.inrs.ca/art/volume17/v17n2_133.pdf.
- Ousseini, I., & Bender, H. (1995). *Conservation des eaux et des sols au Niger : mesures simples de protection antiérosive des écosystèmes au Niger*. (Vol. 4). Niamey, Niger: Programme de Conservation et Gestion des Eaux et des Sols au Niger (PCGES),.
- Panthou, G., Vischel, T., & Lebel, T. (2014). Recent trends in the regime of extreme rainfall in the Central Sahel. *International Journal of Climatology*, 34, 3998-4006.
- Zouré, C. (2019). *Etude des performances hydrologiques des techniques culturelles dans un contexte de changement climatique en zone sahélienne du Burkina Faso*. Ouagadougou: Thèse, Institut international d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement.
- Zouré, C., Queloz, P., Koita, M., Niang, D., Fowé, T., Yanaba, R., . . . Karambiri, H. (2019). Modelling the water balance on farming practices at plot scale: Case study of Tougou watershed in Northern Burkina Faso. *Catena*. doi:10.1016/j.catena.2018.10.002.

IMPACT DES ÉVÉNEMENTS CLIMATIQUES EXTRÊMES SUR LA ZONE CÔTIÈRE SÉNÉGALAISE : CAS DE L'OURAGAN FRED DU 31 AOÛT 2015

Siny Ndoye ^{1,2*}, Abdou Lahat Dieng ², Moussa Diakhaté ^{1,2}, Gregory S. Jenkins ³

¹ UMR Sciences, Technologies Avancées et Développement Durable (UMR STADD), Université Amadou Mahtar MBOW de Dakar à Diamniadio, Sénégal

² Laboratoire de Physique de l'Atmosphère et de l'Océan - Siméon Fongang (LPAO-SF), École Supérieure Polytechnique (ESP), Université Cheikh Anta Diop, Dakar, Sénégal.

³ Department of Meteorology, The Pennsylvania State University, University Park, PA, USA

* Corresponding author : siny.ndoye@uam.edu.sn

1. Introduction

Une bonne partie de la pluviométrie en Afrique de l'Ouest provient des systèmes convectifs de méso échelle couplés à des Ondes d'Est Africaines (OEA). Ces derniers sont généralement générés dans le continent, principalement dans les zones accidentées (Montages du Darfour, d'Éthiopie, du Cameroun, de Guinée, plateau de Jos au Nigeria etc.) et suivent une trajectoire Est-Ouest pour atteindre les côtes ouest africaines. A la fin de leur parcours, la majeure partie de ces systèmes s'affaiblissent et se dissipent en arrivant aux côtes, pendant que d'autres se renforcent et peuvent se transformer en dépressions tropicales (phénomène communément appelé cyclogenèse). Ces dernières peuvent alors être la cause de pertes de vie humaines et de matérielles lorsqu'elles se développent à proximité des côtes ouest africaines. Un tel phénomène s'est malheureusement produit au cours de la soirée du 30 au 31 août 2015 suite au passage de l'ouragan Fred au large des côtes sénégalaises. Les populations de Thiaroye à Palmarin en passant par Bargny, ont ainsi subi des inondations côtières avec d'énorme dégâts. L'objectif de ce travail est de faire une description des conditions de naissance de l'ouragan Fred et d'estimer les quantités d'eaux déplacées de la mer vers les côtes sénégalaises lors de son passage.

2. L'ouragan Fred : D'une ligne de grain sur les montagnes guinéennes à l'ouragan de catégorie 1 au large des côtes ouest africaines

Dans la nuit du 27 au 28 août 2015, une ligne de grain en provenance du Mali atteint le sud-est du Sénégal. Il se renforce très vite en traversant le relief guinéen et arrive à la côte dans la matinée du 28 août 2015 (figure 1).

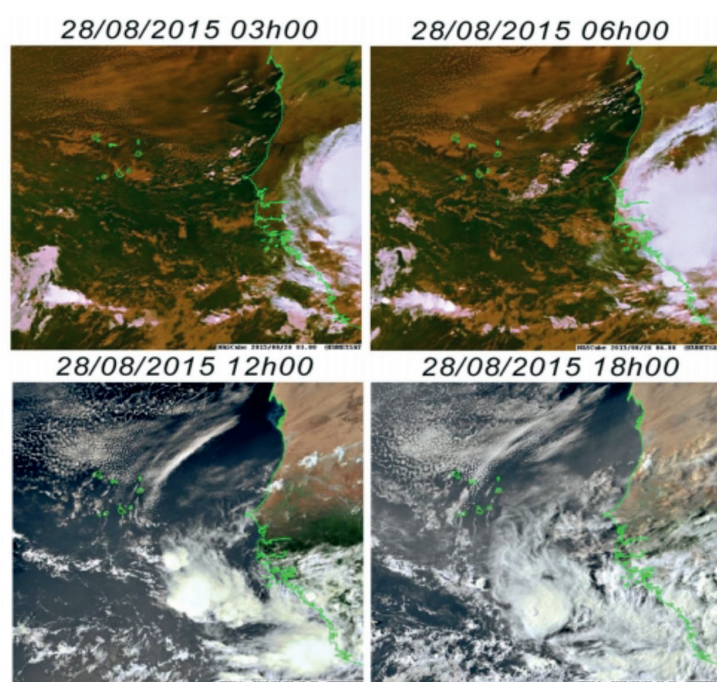


Figure 1 : Images satellite de Meteosat Second Generation (Canal visible et infrarouge) du 28 août 2015 entre 03h00 et 18h00 UTC montrant l'évolution de la perturbation qui a donné naissance à la tempête tropicale Fred au large des côtes sénégalais-guinéennes

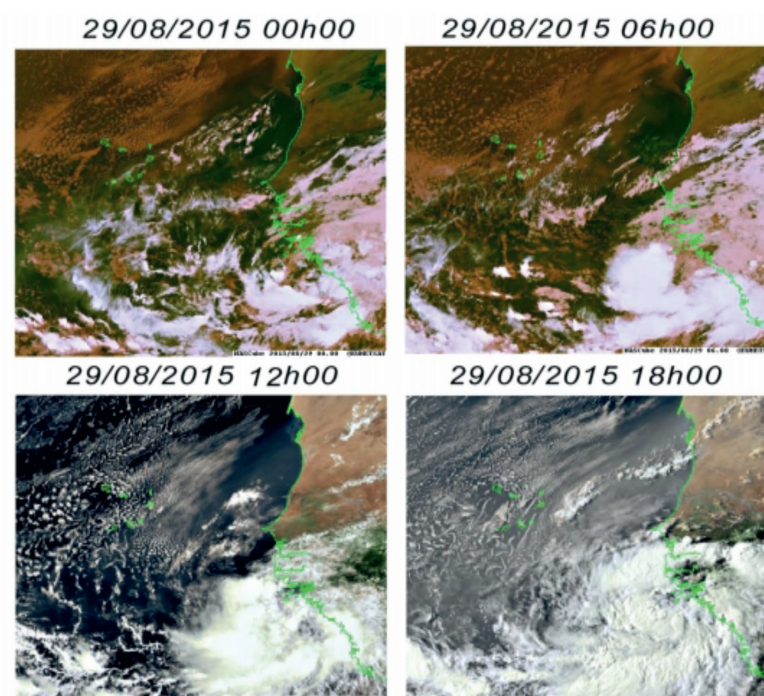


Figure 2 : Images satellite de Meteosat Second Generation (Canal visible et infrarouge) du 29 août 2015 entre 00h00 et 18h00 UTC montrant l'évolution de la perturbation qui a donné naissance à la tempête tropicale Fred au large des côtes sénégalais-guinéennes

Il s'affaiblit progressivement pendant l'après-midi du 28 août 2015 mais reste quasi immobile non loin des côtes sénégalais-guinéennes et y développe un vortex intense dans les moyennes couches (vers 3 Km d'altitude) de l'atmosphère. A partir du 29 août 2015 vers 06h00, le système commence à se régénérer, son vortex se renforce davantage (figure 2).



Figure 3: Photos prises à Thiaroye (en haut) et à Bargny (en bas) après le passage de l'Ouragan Fred au large des côtes sénégalaises

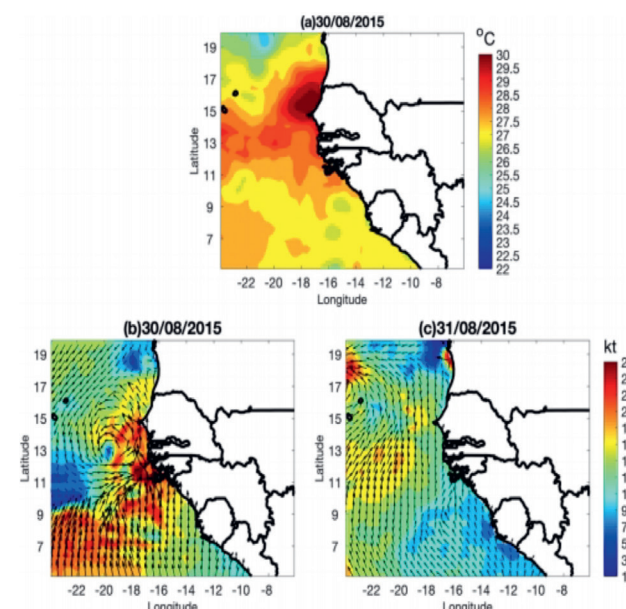


Figure 4: En haut, température de surface de la mer du 29 août 2015, en bas, vent de surface en nœud (en couleur pour l'intensité, les flèches indiquent la direction du vent) du 30 et du 31 août 2015

Les observations satellites montrent que la circulation cyclonique de surface a débuté le même jour et le système est très vite classé dépression tropicale par le centre national des ouragans (ou National Hurricane Center, NHC) le 30 août 2015 vers 05H30 du matin. La figure 5 montre que le capteur de la bouée Melax, localisée à 30 km au large de Mbour à 14°20'N 17°14'W et à plus de 400 km au nord de la perturbation a également perçu ses effets avec des enregistrements de vitesses de vent de surface avoisinants les 12m/s (environ 65 Km/h), témoignant la violence rare de la perturbation.

Évoluant dans un environnement très favorable à son développement (température de la surface de la mer supérieure à 28°C (figure 4) et avec un faible cisaillement vertical des vents horizontaux (figure non montrée), le système s'intensifie davantage pour atteindre le stade d'ouragan de catégorie 1 sur l'échelle de Saphir-Simpson avant d'atteindre les Iles du Cap-Vert. Le passage de Fred engendre une hausse du niveau de la mer d'au moins 1,35 m, une hauteur jamais enregistrée par le marégraphe de Dakar depuis plus de vingt-cinq ans (figure 5). L'ouragan Fred a ainsi causé d'importants dégâts matériels et de victimes humaines sur les côtes Ouest africaines. Sept marins (trois Sénégalais, deux Bissau-guinéens, un Cap-Verdien et un Sierra-Léonais) ont été portés disparus, plusieurs dizaines de maisons ont été détruites sur la côte sénégalaise, les transports aériens et les télécommunications dans l'archipel du Cap-Vert ont été interrompus pendant plusieurs jours.

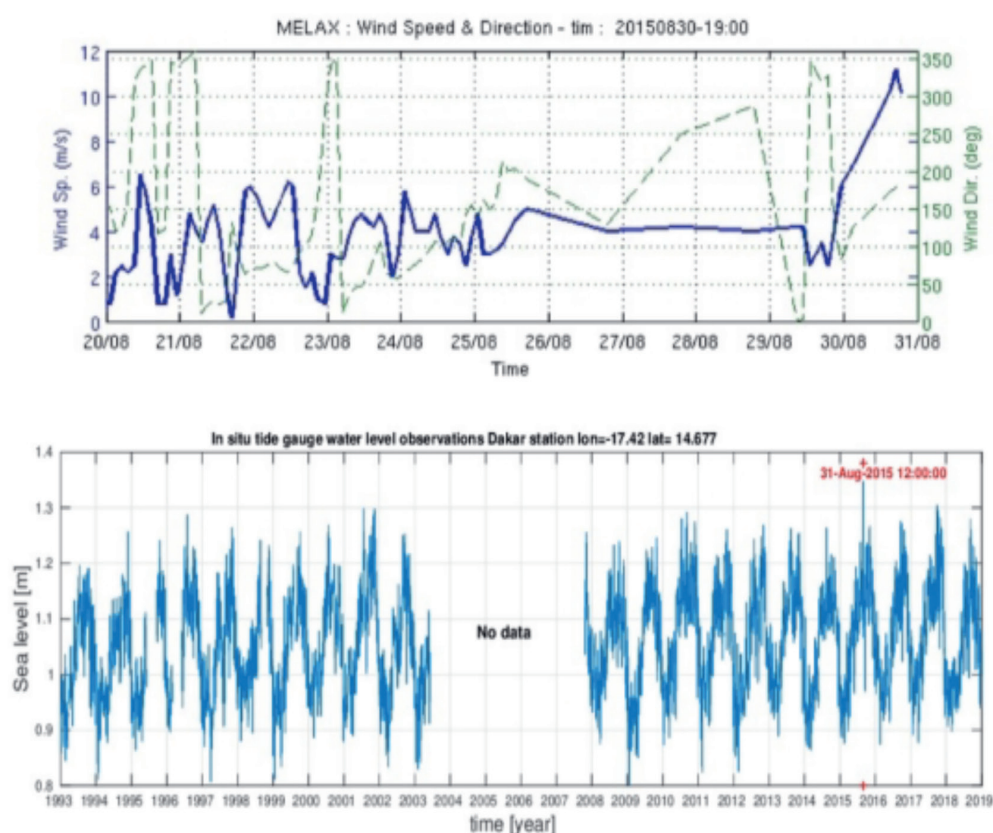


Figure 5: En haut, série temporelle de l'intensité et de la direction du vent mesurées à la surface de l'océan par la bouée «Melax» entre le 20 et le 31 août 2015. En bas, série temporelle de hauteurs d'eau (marée) mesuré par le marégraphe de Dakar entre 1993 et 2019

D'après les analyses du modèle opérationnel américain GFS (Model Analyses and Guidance), la ligne de grain a évolué dans un système de train d'OEA qui lui aurait fourni des conditions dynamiques et thermodynamiques favorables à son intensification. Le système était logé dans un thalweg d'une OEA elle-même précédée d'une autre plus à l'ouest, une configuration très favorable à la genèse des dépression tropicales au large des côtes ouest africaines d'après Dieng et al. 2017.

3. Fred, une tempête exceptionnelle

Les dépressions tropicales qui prennent naissance à proximité des Iles du Cap-Vert se renforcent généralement au-delà de la longitude 30°W, comme on peut le voir sur la figure 6 qui montre les trajectoires des dix dernières tempêtes observées par la NHC. La tempête Fred quant à elle s'est brusquement renforcée avant même de s'éloigner des côtes sénégal-guinéennes, une situation jamais rencontrée dans cette région depuis 1892 selon les archives du NHC. Ce brusque renforcement pourrait s'expliquer par l'augmentation de la température de surface de la mer (ou Sea Surface Temperature (SST) en anglais) observée pendant cette période (figure 4)

4. Estimation quantitative du transport d'Ekman

Le transport d'Ekman est défini comme étant le déplacement horizontal des couches d'eaux superficielles de l'océan par la seule action de la friction du vent à la surface. Le modèle Weather Research and Forecasting (WRF) est utilisé pour étudier le rôle du transport d'Ekman le long de la côte du Sénégal le 30 août 2015, lorsque la perturbation tropicale associée à l'ouragan Fred était située à l'ouest du Sénégal. Les composantes zonales et méridiennes du vent de surface provenant de trois simulations du modèle WRF sont utilisées pour calculer le transport d'Ekman selon l'équation suivante :

$$\vec{U}_{ek} = \frac{1}{f} \cdot \vec{\tau} \wedge \vec{k}$$

La configuration comprend une grille haute résolution 4km (D1) couvrant le Sénégal et l'extrême Est de l'Atlantique imbriquée dans une grille de plus basse résolution à 12km (D2) couvrant une grande partie de l'Afrique de l'Ouest et l'extrême Est de l'Atlantique. Les caractéristiques de la configuration développée ainsi que les détails de calcul du transport d'Ekman sont décrits dans Dieng et al. 2021.

Les résultats montrent que les forts vents méridiens au large des côtes sénégalaises se traduisent par une augmentation du transport d'Ekman vers la côte, le 30 août et sont en grande partie responsable des inondations côtières. Le transport d'Ekman le long de la côte contribue ainsi de manière significative aux variations du niveau d'eau pendant les événements de houle (Figure 5). La figure 7 montre la variation du cumul de transport d'Ekman entre le 30 et le 31 août à partir des trois simulations. Cette figure montre que le transport total d'Ekman est dirigé dans la direction perpendiculaire à la côte. Les simulations associées à cette perturbation tropicale montrent que les vagues dévastatrices pourraient se former même si la tempête n'était pas proche des côtes du Sénégal.

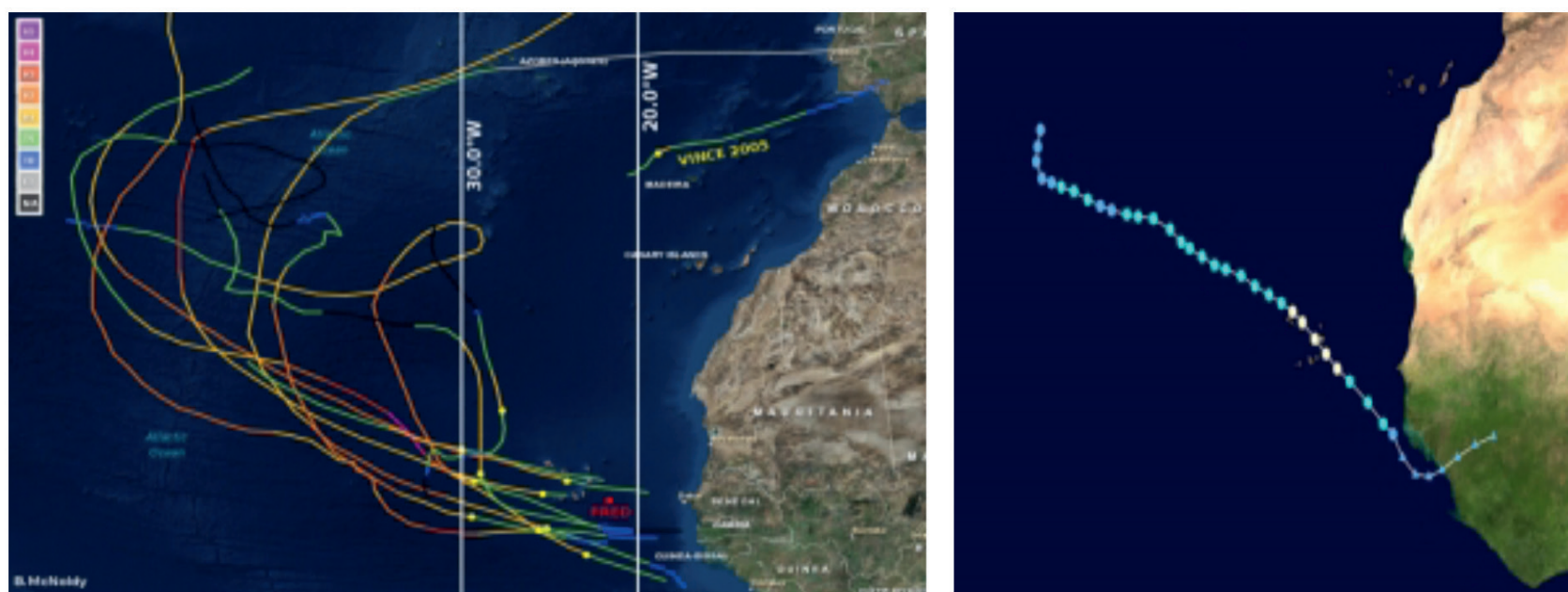


Figure 6 : A gauche, trajectoires des dix dernières tempêtes tropicales ayant pris naissance entre la côte ouest africaine et la longitude 30°W. A droite, trajectoire de la tempête tropicale Fred. Les couleurs des trajectoires représentent les stades des perturbations : bleu pour les dépressions tropicales, jaune pour les tempêtes tropicales, violet et rouges pour les ouragans de catégorie 1 et de catégorie 2 (source <http://www.nhc.noaa.gov>)

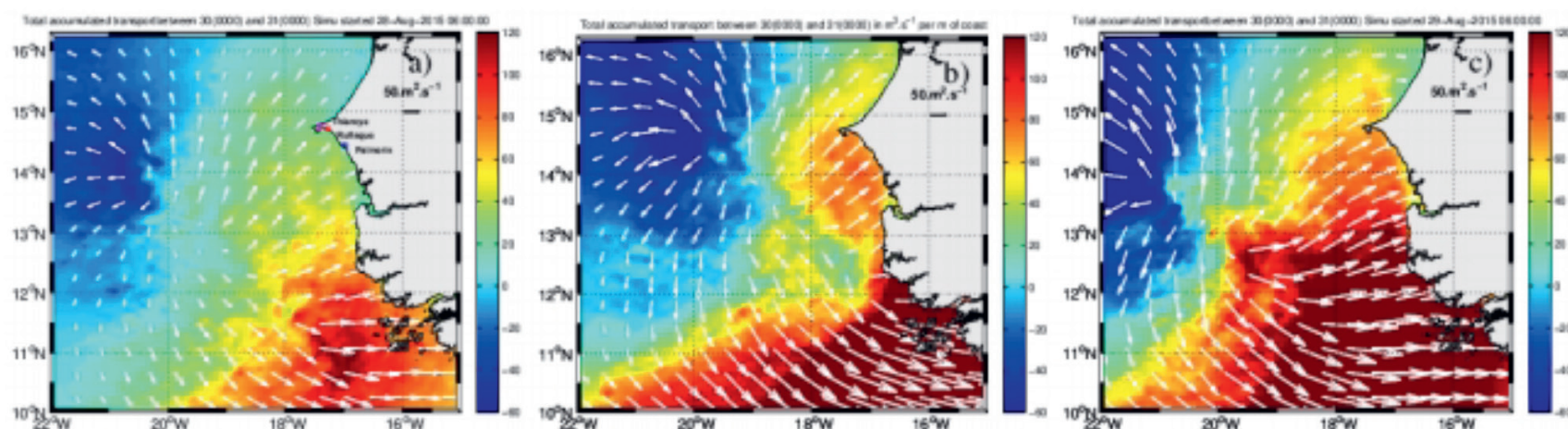


Figure 7 : En couleur, la composante zonale du transport d'Ekman (cumul du 30 au 31 août 2015) pour les simulations D2A (a), D2B (b) et D2C © (Dieng et al, 2021) ; En vecteur, Le transport d'Ekman total (cumul du 30 au 31 août 2015).

5. A retenir

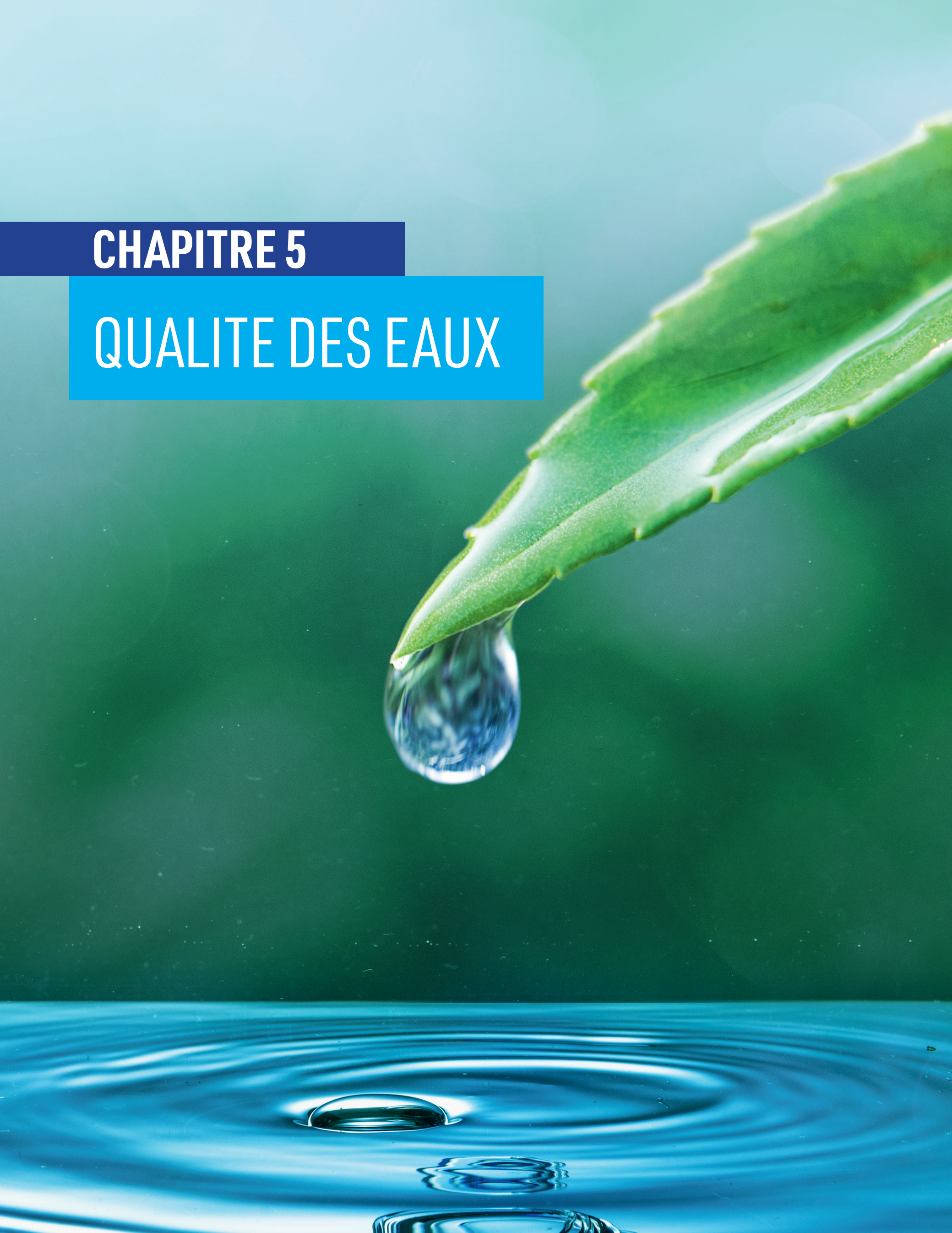
- L'ouragan Fred est le sixième système tropical, le second à atteindre brièvement le niveau d'ouragan, de la saison cyclonique 2015 dans l'océan Atlantique, et il a causé d'énormes dégâts sur le littoral sénégalais.
- La tempête Fred s'est brusquement renforcée en ouragan de catégorie 1 (vents associés supérieurs à 118 km/h) avant même de s'éloigner des côtes sénégalaises, une situation jamais rencontrée dans cette région depuis 1892 selon les archives du NHC.
- Le transport d'Ekman est le déplacement horizontal des couches d'eaux superficielles de l'océan par la seule action de la friction du vent à la surface.
- Les forts vents générés par la tempête Fred au large des côtes sénégalaises se traduisent par une augmentation du transport d'Ekman vers la côte, le 30 août et sont en grande partie responsables des inondations côtières observées.
- Le transport d'Ekman le long de la côte contribue de manière significative aux variations du niveau d'eau pendant les événements de houle.
- Les simulations associées à cette perturbation tropicale montrent que les vagues dévastatrices pourraient se former même si la tempête n'était pas proche des côtes du Sénégal.
- De par leur forme et configuration, les côtes sénégalaises sont vulnérables aux vents forts du Sud avec un long fetch et sur une longue période.
- Ces événements météorologiques peuvent être prédits avec un certain degré de réalisme même si la prévision de la cyclogenèse tropicale reste difficile dans la partie Est de l'océan Atlantique

6. Références

- Dieng, A.L., Ndoeye, S., Jenkins, G.S. et al. Estimating zonal Ekman transport along coastal Senegal during passage of Hurricane Fred, 30–31 August 2015. SN Appl. Sci. 3, 588 (2021). <https://doi.org/10.1007/s42452-021-04578-5>
- Dieng, A.L., S.M. Sall, L. Eymard, M. Leduc-Leballeur, and A. Lazar, 2017: Trains of African Easterly Waves and Their Relationship to Tropical Cyclone Genesis in the Eastern Atlantic. , Monthly Weather Review , Vol. 145, ISSN-ISBN , 599–616,, doi: <https://doi.org/10.1175/MWR-D-15-0277.1>
- Ndoeye S (2016) Fonctionnement dynamique du centre d'upwelling sud-sénégalais : approche par la modélisation réaliste et l'analyse d'observations satellite de température de la mer. PhD Thesis, Université Pierre et Marie Curie

CHAPITRE 5

QUALITE DES EAUX



QUALITÉ DE L'EAU DE LA PLUS IMPORTANTE NAPPE D'EAU SOUTERRAINE DU SÉNÉGAL

Issa Sakho¹, Niokhor Ndour², Sophie G. Siby³, Diakher H. Madioune⁴, Makha Ndao¹, Abdoulaye Cissé², Mamadou Fall², Sérigne Faye³.

¹ UMR Sciences, Technologies Avancées et Développement Durable, Université Amadou Mahtar Mbow de Dakar à Diamniadio, Sénégal.

² Direction la Gestion et de la Planification des Ressources en Eau (DGPRE), MEA, Sphère Ministérielle de Diamniadio, Dakar, Sénégal.

³ Département de Géologie, Faculté des Sciences et Techniques, University Cheikh Anta Diop, Dakar, B.P 5005, Dakar-Fann, Senegal

⁴ Institut des Sciences de la Terre, Université Cheikh Anta DIOP de Dakar, Sénégal

1. Introduction

L'agenda 2030 des Nations Unies s'articule sur une vision universelle pour éradiquer la pauvreté et promouvoir une transition vers le développement durable. Cette vision est déclinée autour de 17 objectifs à l'horizon 2030, dits : Objectifs de Développement Durable (ODD). En effet, la question de l'eau concerne l'ODD 6 qui vise à garantir l'accès de tous à l'eau et à l'assainissement et à assurer une gestion durable des ressources en eau.

A l'instar de beaucoup de pays en voie de développement, le Sénégal est dans une situation de vulnérabilité hydrique (Faye et al, 2020). Malgré, la diversité des sources d'approvisionnement en eau et de l'importance des unités aquifères au Sénégal, la problématique de l'accès universel à l'eau se pose toujours avec acuité. L'approvisionnement en eau pour les populations et les activités économiques se basent sur la disponibilité des ressources en eau ; marquées par des disparités régionales très fortes. L'essentiel de la ressource en eau de surface est localisé dans les bassins hydrographiques du Sénégal et de la Gambie (Figure 1). La ressource en eau souterraine concerne les unités aquifères du Quaternaire & Continental terminal (sable), de l'Eocene (calcaire), du Paléocène (calcaire) et du Maastrichtien (sable et grès) (Figure 2). Toutefois, la nappe maastrichtienne est la plus importante réserve d'eau souterraine du Sénégal. Cette nappe captive couvre les 4/5 du territoire national, avec 150 000 km² (Figure 3)..

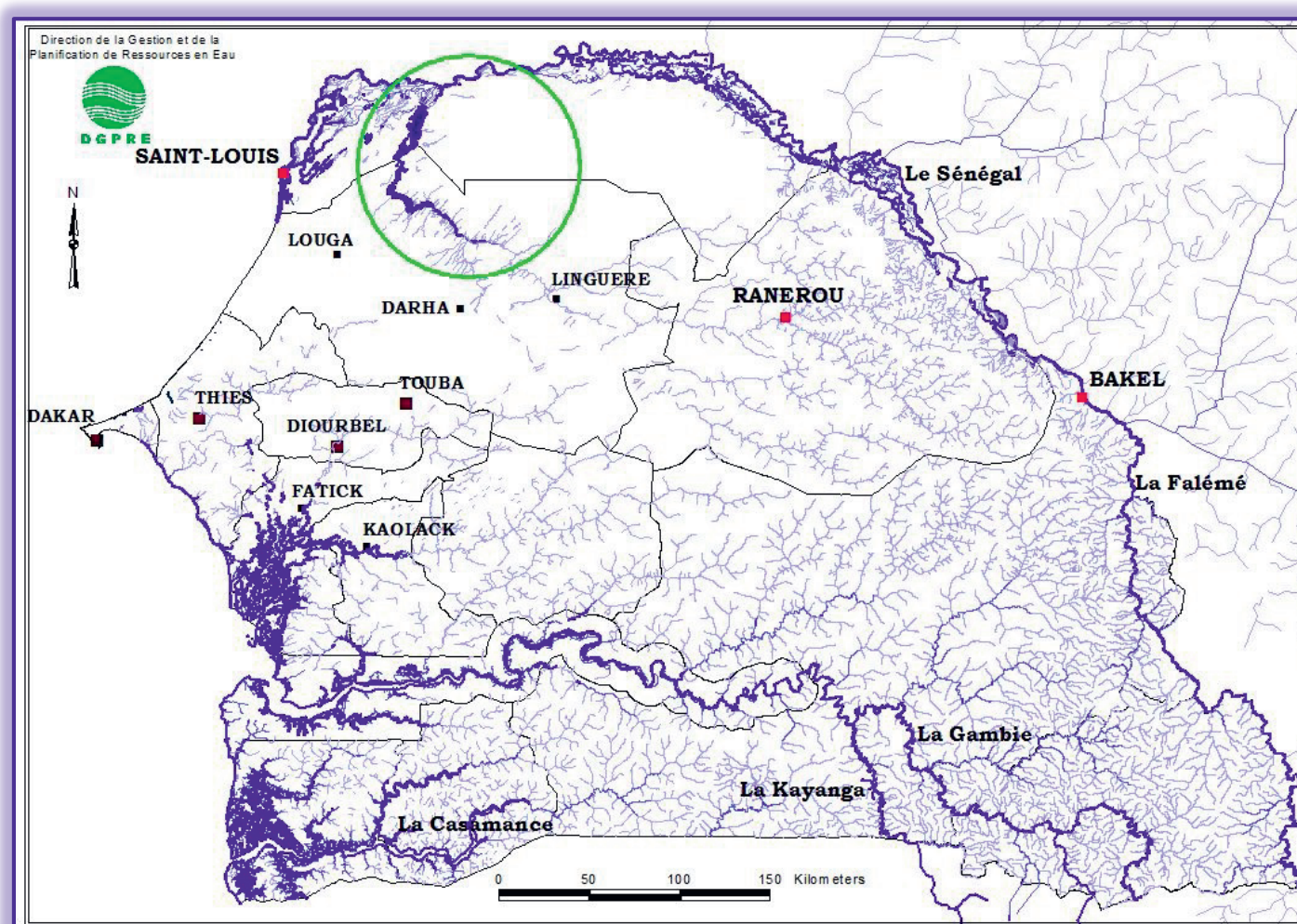


Figure 1. Unités hydrographiques au Sénégal.

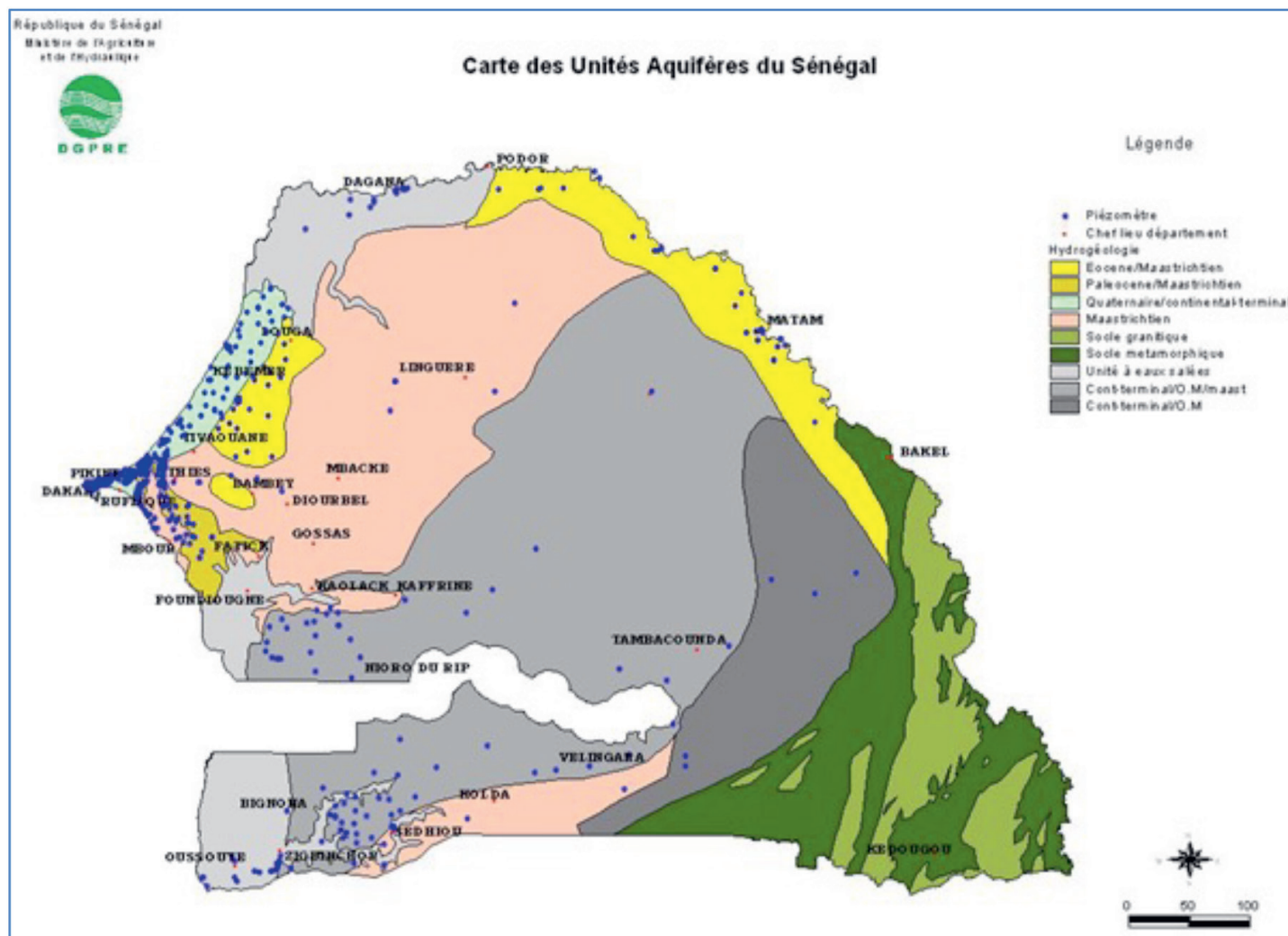


Figure 2. Unités aquifères au Sénégal

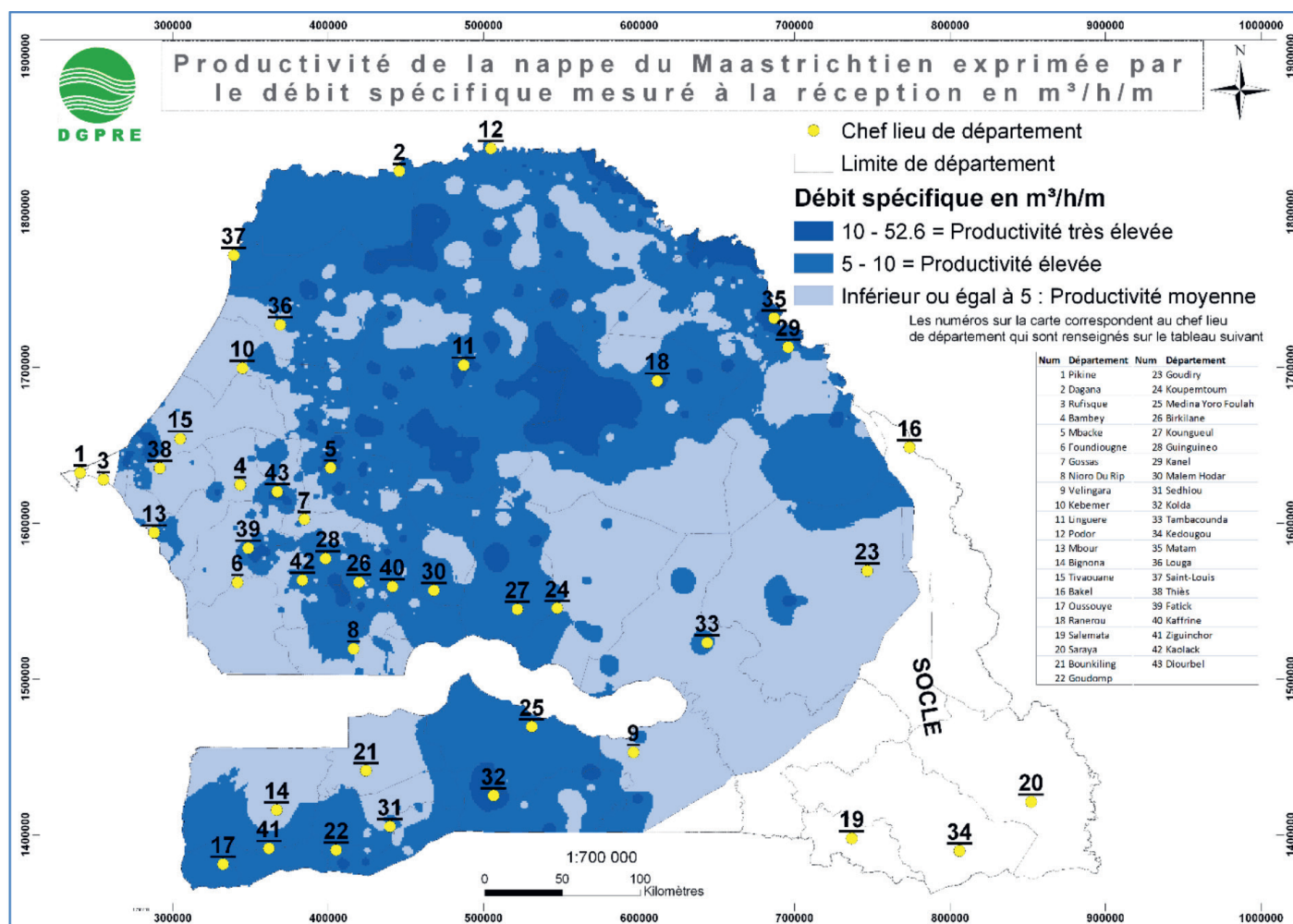


Figure 3. Productivité de la nappe du Maastrichtien

2. L'importance des eaux souterraines dans l'alimentation en eau potable de Dakar

Au cours des 20 dernières années, l'alimentation en eau potable de l'agglomération de Dakar est assurée principalement par les eaux souterraines. Les résultats montrent une contribution de 61% contre 39 % pour les eaux de surface. La part de chaque unité aquifère se présente comme suit (Coly et al., 2022) :

- Maastrichtien : 23 %
- Eocène : 19 %,
- Paléocène : 12 %,
- Infrabasaltique : 6 % et
- « Nappe de Thiaroye » : 1 %

3. Problème de la qualité des eaux de l'aquifère du maastrichtien

3.1. Des teneurs élevées en fluor

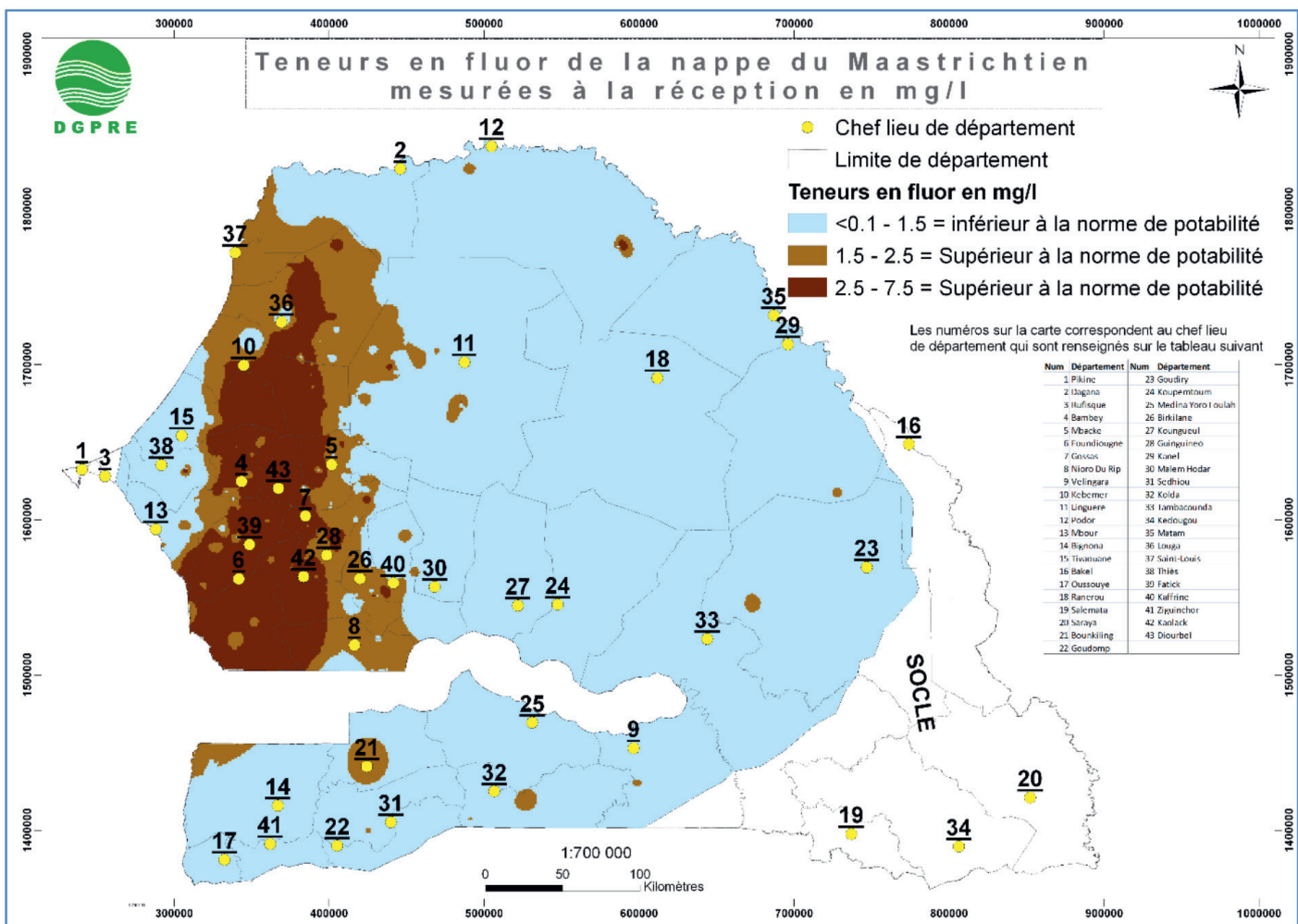


Figure 4. Teneurs en fluor de la nappe du Maastrichtien

3.2. Charge minérale de la nappe du Maastrichtien

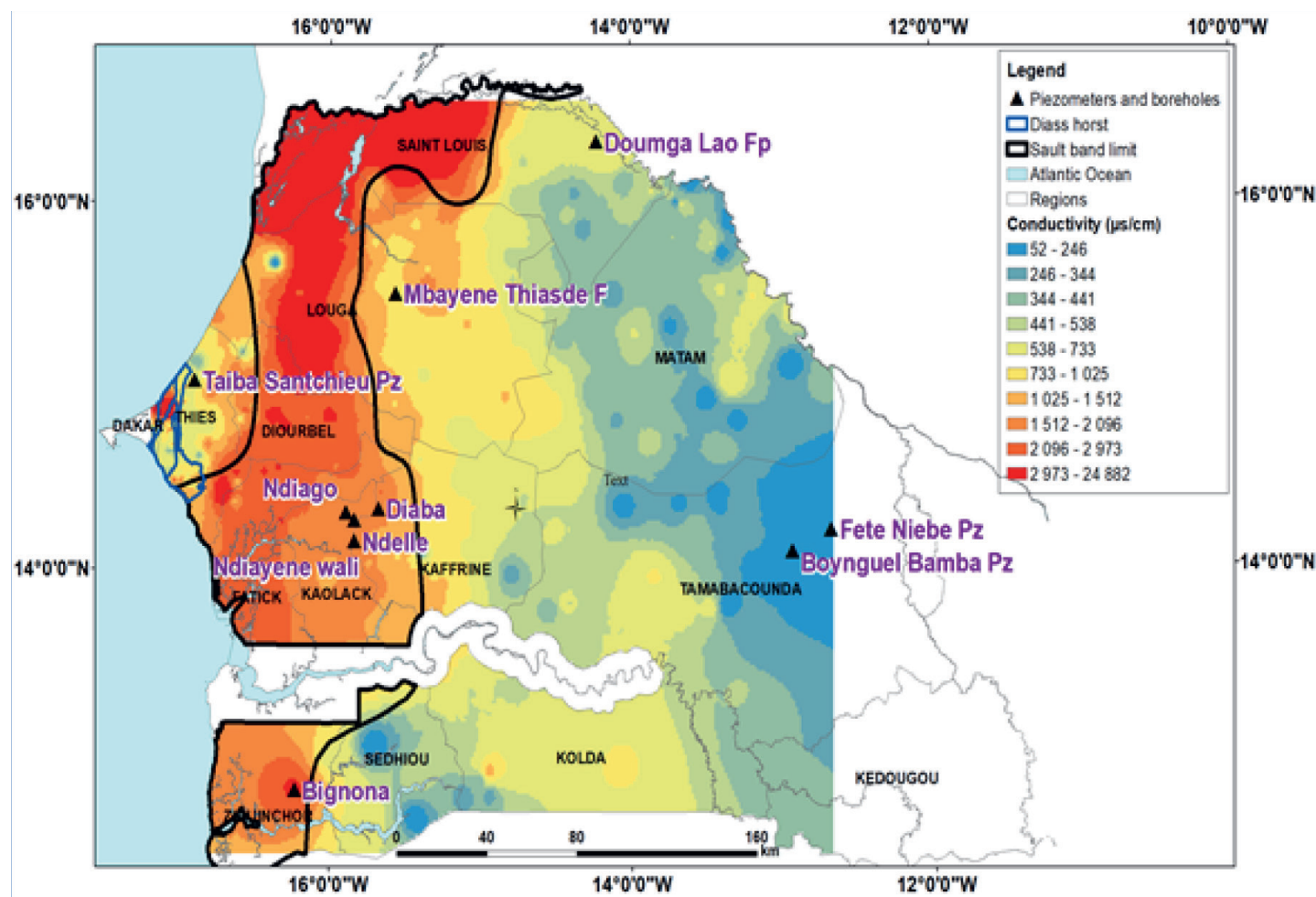


Figure 5. Charge minérale de la nappe du Maastrichtien

3.3. Des teneurs élevées en fer

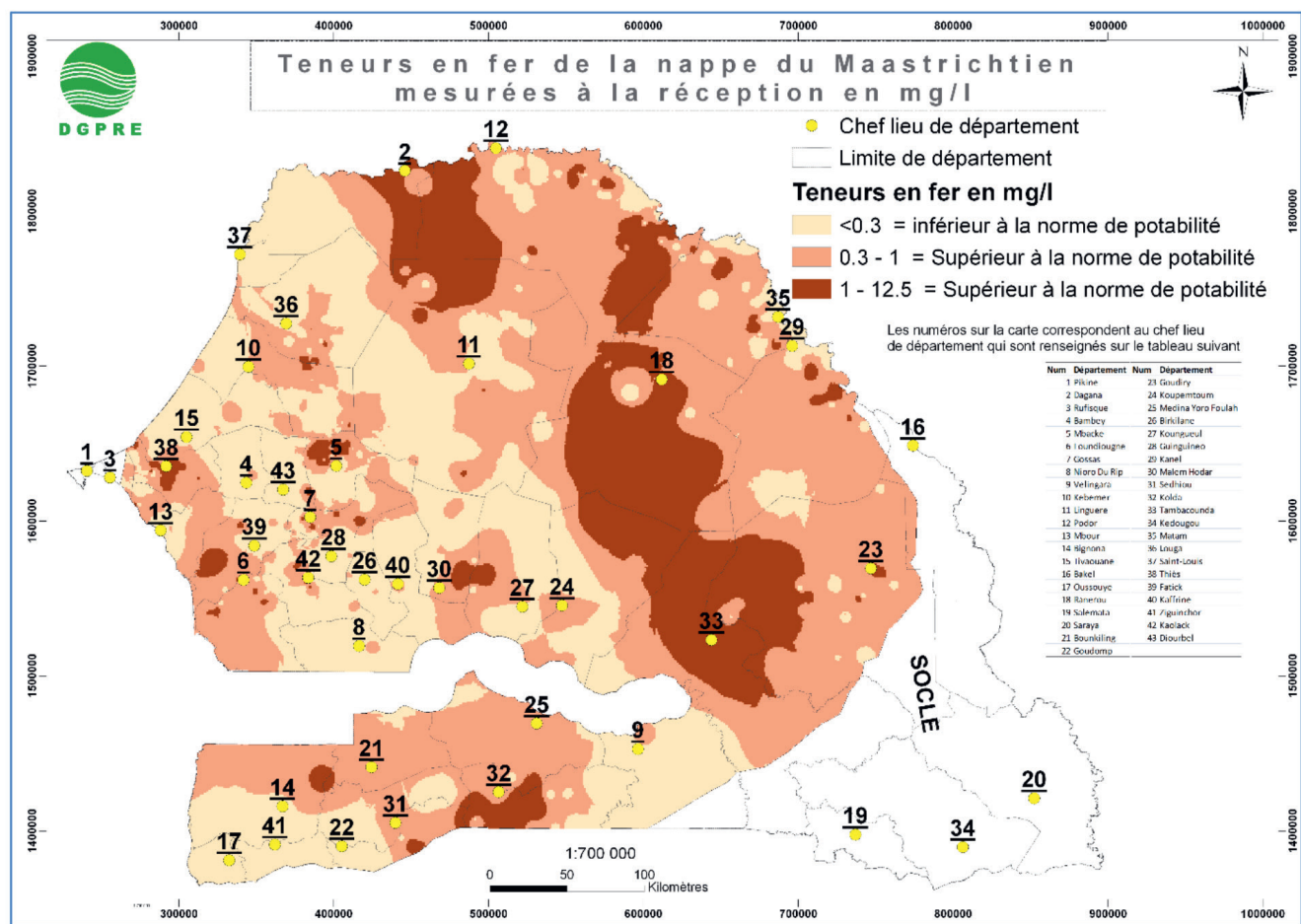


Figure 6. Teneurs en fer de la nappe du Maastrichtien

4. A retenir

- La nappe du Maastrichtien est la plus importante ressource en eau souterraine du Sénégal ;
- Elle occupe une place importante dans le dispositif de la politique nationale d'accès universel à l'eau. Elle contribue à hauteur de 23 % dans l'alimentation en eau potable de Dakar ;
- Toutefois, elle présente, par endroit, des teneurs élevées en fluor et en sel : la bande centrale salée. Elle est caractérisée également par des teneurs élevées en fer, principalement sur le corridor Nord-Est – Sud-Est (Figure 6).

5. Perspectives

- Développer un réseau intelligent de surveillance de la qualité des eaux au niveau national ;
- Expérimenter et/ou développer des techniques de traitements des eaux pour leur utilisation humaine ;
- Développement des stratégies et des outils pour la gestion des déchets issus du traitement de ses eaux.

EVALUATION DE LA QUALITÉ DES EAUX SOUTERRAINES ALIMENTANT LA VILLE DE DAKAR EN RAPPORT AVEC LES NORMES D'USAGES

Ousmane Coly Diouf^{1*}, Aissatou Gueye¹, Mathias Diedhiou¹, Ndeye Maguette Dieng¹, Moustapha Diouf², Seynabou Cissé Faye¹, Sérigne Faye¹

¹ Département de Géologie, Faculté des Sciences et Techniques, University Cheikh Anta Diop, Dakar, B.P 5005, Dakar-Fann, Senegal

² CEO ProSE SARL, Dakar, Sénégal

* Corresponding author : ousmanecoly.diouf@ucad.edu.sn

Résumé

Des échantillons d'eau souterraine ont été prélevés dans 19 ; 12 et 20 points (forages et piézomètres) respectivement au niveau des aquifères du Maastrichtien, du Paléocène et de l'infrabasaltique pour analyser la qualité hydrochimique de ces aquifères qui alimentent la ville de Dakar en eau potable. L'analyse hydrochimique de la qualité de l'eau destinée à la boisson montre que les eaux de la nappe des sables infrabasaltiques, du Maastrichtien et du Paléocène ne présentent pas de risque majeur pour la consommation humaine. Ainsi, une comparaison de la qualité des eaux souterraines par rapport aux normes OMS a montré que 87 ; 75 et 86% de l'eau prélevée respectivement au niveau des nappes infrabasaltique, paléocène et du Maastrichtien est potable.

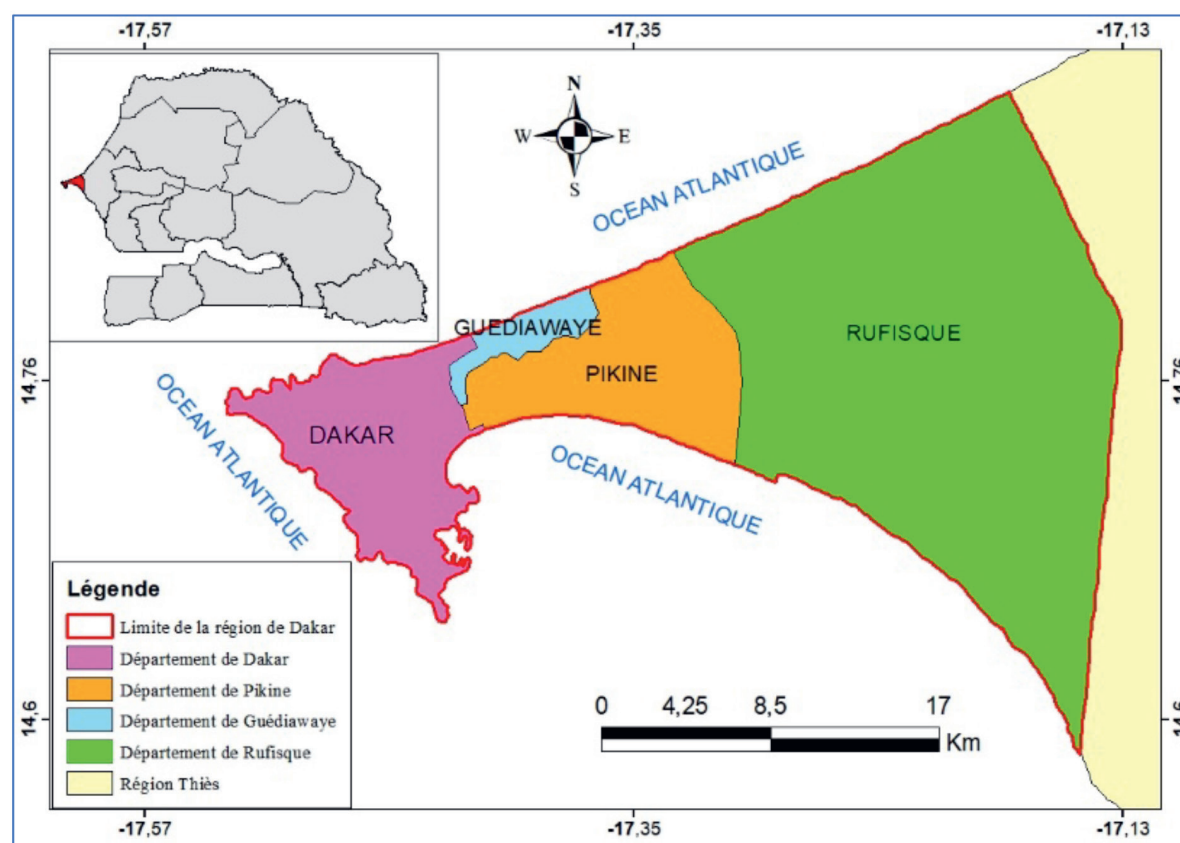
Mots clés : Prélèvement, Maastrichtien, Paléocène, Eocène, infrabasaltique, nappe, hydrochimie

1. Introduction

Les eaux souterraines sont une ressource vitale pour la consommation, en particulier dans les zones arides et semi-arides. Pendant ces dernières années, l'urbanisation intense a exercé une forte demande sur les ressources en eaux souterraines. La qualité de l'eau en tant que ressource mondiale diminue rapidement en raison des augmentations substantielles de l'industrialisation et de l'urbanisation et de l'expansion des activités agricoles (Jalali, 2005 ; Isa et al., 2012). Le Sénégal, à l'instar de plusieurs pays en voie de développement, connaît d'énormes difficultés liées à l'approvisionnement en eau potable des populations particulièrement dans les grandes agglomérations comme la région de Dakar. Cet approvisionnement en eau est assuré en partie par les eaux souterraines dont la qualité pose souvent problème. C'est dans ce contexte d'une exploitation intensive des ressources en eau souterraine que s'inscrit cette étude qui vise à étudier la qualité des nappes qui alimentent Dakar en eau en rapport avec les normes d'usages.

2. Présentation de la zone d'étude

La zone d'étude est située entre les longitudes 16°55' et 17°30' Ouest et les latitudes 14°55' et 14°35' Nord. Elle se trouve à l'extrême ouest du Sénégal, avec une superficie de 550 Km² environ 0,28% du territoire national. Cette région occupe la presqu'île du Cap-Vert et est limitée au nord, au sud et à l'ouest par l'océan atlantique et à l'est par la région de Thiès qui est sa seule ouverture au continent (Figure 1).



La région de Dakar est caractérisée par une très grande variété de sols, ce qui explique l'abondance de la végétation dans certaines zones. Elle est caractérisée par un relief peu accidenté distingué par la présence de deux horsts séparés par un graben : la tête de la presqu'île à l'Ouest avec une altitude maximale de 105 m ; le horst de Diass situé à l'Est avec une altitude maximale de 127 m ; et le graben de Rufisque (OMS, 1972). La zone d'étude est marquée aussi par l'existence de zones dunaires, de zones déprimées et des lacs. Le recensement Général de la Population et de l'Habitat (ANSD, 2019) du Sénégal et les résultats des projections démographiques indiquent que, la population de Dakar est passée de 1 561 848 habitants en 1990 à 2 323 370 habitants en 2000, 2 956 023 habitants en 2013 et 3 732 284 habitants en 2019. De nos jours, le territoire de la région de Dakar compte plus de 3 millions d'habitants. En plus la projection du PDU (Plan Directeur d'Urbanisme) estime que la région aura plus de 5 millions d'habitants en 2025 (GRDR et IFAN, 2014).

Sur le plan climatique, la région de Dakar se trouve plus précisément dans le domaine sahélien. Elle est couverte par le climat de la grande côte. Les mesures de précipitation recueillies à la station de Yoff, montrent que les pluies sont caractérisées par une grande variabilité inter annuelle. Sur la période 1990 - 2019, la hauteur de pluie la plus élevée est de 663,4 mm (2005). Tandis que le minimum de précipitation est de 161,3 mm en 2014 avec une moyenne interannuelle de 378 mm. A Dakar, les températures moyennes mensuelles enregistrées entre 1990 et 2019 sont inférieures à 30°C. Les températures augmentent pendant la saison des pluies et les maxima de température sont enregistrés au mois d'octobre (28,4 °C). Tandis que, les minima thermiques sont notés au mois de février (21,9 °C). L'humidité relative augmente à partir du mois d'avril et atteint les maxima au mois de septembre (82 %) au cœur de l'hivernage, puis elle commence à diminuer progressivement à la fin de la saison des pluies. Contrairement à l'humidité relative, l'évaporation est minimale durant la saison de pluie car la durée d'ensoleillement est minimale en ce moment.

La géologie de la région de Dakar, s'inscrit dans celle du bassin sédimentaire Sénégal-Mauritanien qui s'étend sur une superficie de 340 000 Km². La majorité des affleurements de la zone d'étude consiste en des formations du Quaternaire (recouvrements sableux récents). Cependant, le Paléocène et l'Eocène affleurent aussi de même que la partie terminale du Crétacé (le Maastrichtien) (Figure 2). Dans la région de Dakar, les Formations du Maastrichtien passent latéralement à une série entièrement argileuse reconnue au voisinage du lac Retba (Bellion, 1987). Le Paléocène est assimilé à la formation marno-calcaire des Madeleine dont l'épaisseur moyenne dans les sondages est de 75 à 100 m (Castelain et al., 1965 ; in Bellion 1987).

Le système hydrogéologique de la région de Dakar est essentiellement constitué des sables du Quaternaire qui renferment deux réservoirs d'eau de type différent : l'aquifère des sables infrabasaltiques recouvert par les coulées volcaniques quaternaires des Mamelles localisé à la tête de la presqu'île du Cap-Vert ; au-delà de la limite d'extension des coulées basaltiques, l'aquifère devient libre et se confond avec l'aquifère des sables quaternaires de Thiaroye qui se limite aux lac Tanma.

3. Résultats et interprétations

3.1. Méthodologie de l'étude

Les données chimiques ont été obtenues suite aux campagnes d'échantillonnages qui ont été effectuées sur la nappe des sables infrabasaltiques en juin 2019, la nappe du maastrichtien en décembre 2019 et celle du Paléocène en décembre 2019. Les échantillons d'eau recueillis ont été acheminés au laboratoire d'hydrologie et d'hydrochimie du département de géologie de l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar pour les analyses chimiques.

3.2. Caractérisation générale des eaux souterraines

Les paramètres physico-chimiques (T°, pH, CE) mesurés in-situ lors des campagnes d'échantillonnage qui ont été effectuées au niveau des nappes infrabasaltique (Juin, 2019), du Maastrichtien (décembre, 2019) et du Paléocène (décembre, 2019) et celles issues des analyses hydrochimiques effectuées au laboratoire ont permis de déterminer la qualité des eaux.

- le pH est mesuré sans unité et il permet de déterminer l'acidité ou la basicité de l'eau. Pour un usage AEP, le pH doit se situer entre 6,5 et 8,5 (OMS, 2017). Ainsi le pH des eaux des sables infrabasaltiques, du Maastrichtien et du Paléocène, varient respectivement entre 6 et 8 ; 7.7 et 12.6 et 7.5 et 9.6. Ces valeurs montrent que les eaux de ces nappes sont en majorités basiques.
- la température est un paramètre qui donne des indications sur la profondeur de l'écoulement souterraine. Les valeurs de températures obtenues varient entre 29°C et 32°C pour les eaux de la nappe infrabasaltique, 28,1 °C et 31,8 °C pour celles du Maastrichtien et 27,9 °C et 31,2 °C pour les eaux du Paléocène ;
- la conductivité électrique est un paramètre qui permet d'évaluer le degré de minéralisation de l'eau. Les eaux des sables infrabasaltiques, du Maastrichtien et du paléocène montrent des valeurs de conductivité électrique comprises respectivement entre 365 et 37181,9 µS/cm, 173 et 4770 µS/cm et 366 et 7040 µS/cm. Selon Saxena et al., (2004) et Mondal et al., (2009), les eaux peuvent être classées en trois catégories en se basant sur le degré de minéralisation : eau douce (CE < 1500 µS / cm), eau saumâtre (1500 µS / cm < CE < 3000 µS / cm) et eau saline (CE > 3000 µS / cm). Cette classification montre que 75 et 84.21% respectivement des eaux des nappes infrabasaltiques, du Maastrichtien et du paléocène sont douces et aptes pour un usage AEP. Cependant, 10 ; 16.6 et 5.27% des eaux échantillonnées respectivement des nappes infrabasaltiques, du Maastrichtien et du paléocène sont des eaux salées.

Tableau 1 : Statistique descriptive des paramètres physico-chimiques de la nappe des sables infrabasaltiques (Juin, 2019) du Maastrichtien (Décembre, 2019) et du Paléocène (Décembre, 2019).

Nappe	Paramètre in situ	Nombre d'échantillon	Moy	Min	Max	Norme OMS (2017)	Pourcentage d'échantillon respectant la norme (%)
Infrabasaltique	CE (µS/cm)	20	3270,2	365,0	37181,9	1500	75
	T° (°C)	20	30,6	29,0	32,0	25	0
	Ph	20	7,2	6,4	8,4	6,5-8,5	95
Maastrichtien	CE (µS/cm)	19	1020,2	173,0	4770,0	1500	84.21
	T° (°C)	19	30,0	28,1	31,8	25	0
	Ph	19	8,7	7,7	12,6	6,5-8,5	47
Paléocène	CE (µS/cm)	12	1651,3	366,0	7040,0	1500	75
	T° (°C)	12	29,6	27,9	31,2	25	100
	Ph	12	8,2	7,5	9,6	6,5-8,5	67

Le report des résultats des analyses chimiques dans le diagramme de Piper montre que la nappe infrabasaltique est caractérisée par un faciès chloruré calcique et magnésien celle du Paléocène par un faciès bicarbonaté calcique et magnésien (Figure 2), quant à la nappe du Maastrichtien, elle présente une codominance des faciès chloruré sodique et potassique et bicarbonaté calcique et magnésien.

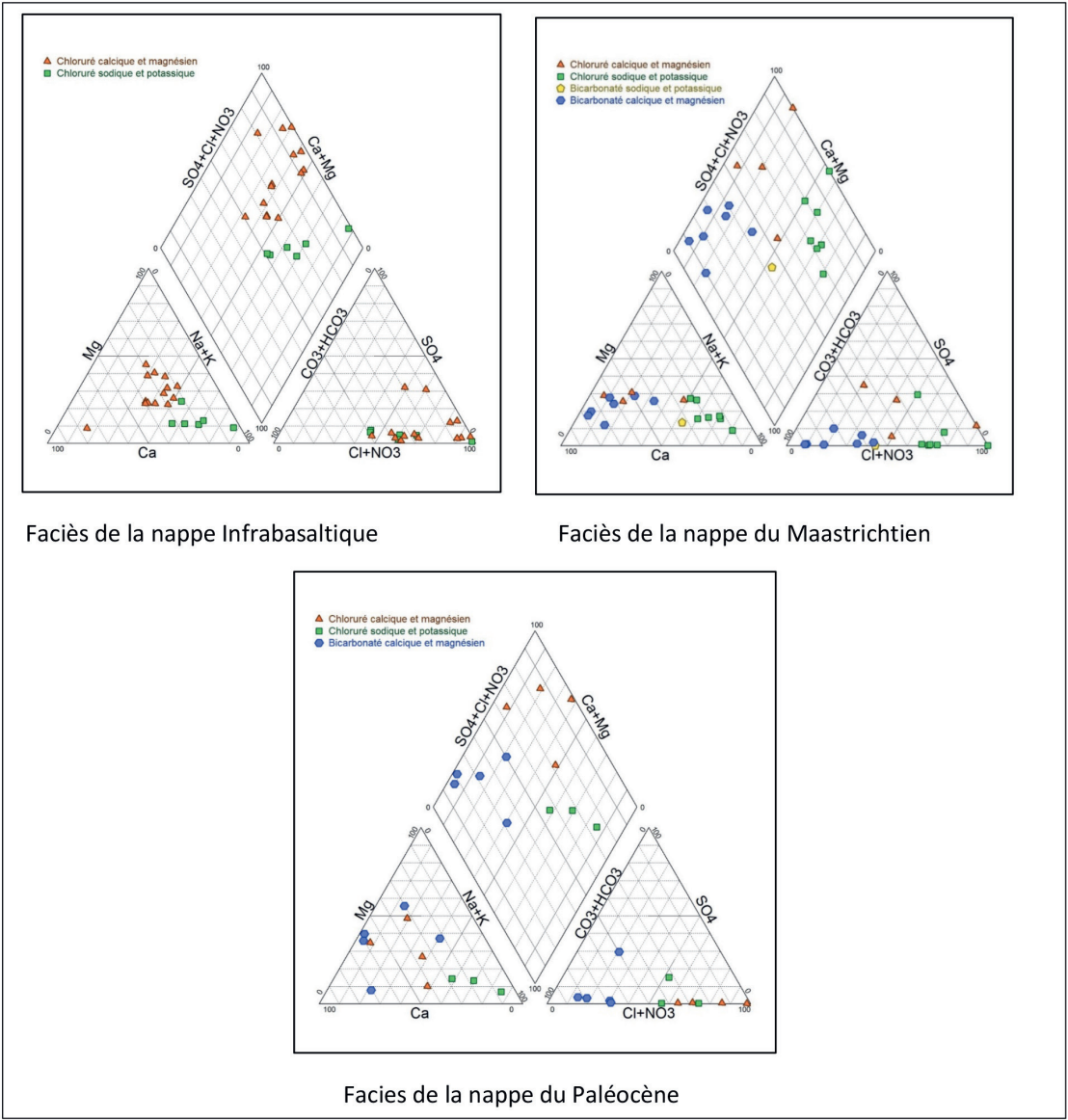


Figure 2 : Faciès chimiques des eaux des nappes infrabasaltique (Juin,2019), du Maastrichtien (Décembre, 2019) et du Paléocène (Décembre, 2019).

3.3. Qualité des eaux en rapport avec l'usage domestique

La présence en quantité excessive de certains éléments chimiques dans l'eau destinée à un usage AEP peut engendrer des effets nuisibles à la santé humaine. C'est dans ce cadre que l'OMS a établi des normes à respecter dans le but de mieux gérer les risques liés aux dangers qui peuvent affecter la sécurité sanitaire de l'eau de boisson afin de garantir la santé publique.

• **Dureté totale de l'eau en CaCO3 (TH)**

La dureté totale de l'eau en CaCO3 (TH) indique sa teneur en ions alcalino-terreux tels que le calcium (Ca2+) et le magnésium (Mg2+). La dureté est un indicateur du taux de formation de tartre dans les ustensiles de chauffage domestique. La limite acceptable de dureté totale pour les eaux de consommation est de 200 mg/l qui peut être étendue jusqu'à 600 mg/l en cas d'indisponibilité de toute autre source d'eau (OMS, 1998). Elle est déterminée selon Todd (1980) par l'équation suivante :

$$TH (CaCO_3)_{mg/l} = (2,497) * [Ca^{2+}] + (4,115) * [Mg^{2+}]$$

Les valeurs de dureté des eaux calculées à partir des résultats d'analyses chimiques varient entre 81 et 2700 mg/l dans les eaux de la nappe infrabasaltique, 55 et 1278 mg/l dans les eaux du Maastrichtien et 98 et 1124 mg/l dans les eaux du Paléocène avec des moyennes qui s'élèvent respectivement à 447, 294 et 425 mg/l.

Tableau 2 : Classification des eaux de la nappe infrabasaltique, du Maastrichtien et du Paléocène par rapport à la dureté totale en CaCO3 (TH) selon Sawyer et McCarty (1967).

Nappe	Gamme de TH (mg/l)	Qualité des eaux	% des eaux	Nombre d'échantillon
Infrabasaltique	< 75	Douce	0	20
	75 - 150	Modérément dure	25	20
	150 - 300	Dure	45	20
	> 300	Très dure	30	20
Nappe	Gamme de TH (mg/l)	Qualité des eaux	% des eaux	Nombre d'échantillon
Maastrichtien	< 75	Douce	16	19
	75 - 150	Modérément	11	19
	150 - 300	Dure	42	19
	> 300	Très dure	32	19
Nappe	Gamme de TH (mg/l)	Qualité des eaux	% des eaux	Nombre d'échantillon
Paléocène	< 75	Douce	0	12
	75 - 150	Modérément	8	12
	150 - 300	Dure	33	12
	> 300	Très dure	58	12

La classification des eaux souterraines en fonction de la dureté totale en CaCO3 effectuée par Sawyer et McCarty (1967) indique 4 types d'eau : une eau douce (TH < 75 mg/l), une eau modérément dure (75 < TH < 150 mg/l), une eau dure (150 < TH < 300 mg/l) et une eau très dure (TH > 300 mg/l). Ainsi selon cette classification, les eaux de la nappe infrabasaltique sont caractérisées par 25% d'eau modérément dure, 45% d'eau dure et 30% d'eau très dure. Les eaux de la nappe du Maastrichtien se répartissent par 16% d'eau douce, 11% d'eau modérément dure, 42% d'eau dure et 32% d'eau très dure. Les eaux de la nappe du Paléocène sont caractérisées par 8% d'eau modérément dure, 33% d'eau dure et 58% d'eau très dure (Tableau 2).

• **Comparaison de la teneur des éléments chimiques en rapport avec les normes OMS**

La chimie des eaux souterraines peut être liée à plusieurs processus comme la dissolution de certains minéraux présents dans la roche et dans le sol, les interactions entre les minéraux dissouts, l'intrusion saline, le piégeage des anciennes eaux marines et la pollution anthropique (Top, 2018). Les résultats d'analyses chimiques montrent que dans les eaux des nappes infrabasaltique, du Maastrichtien et du Paléocène présentent des concentrations en éléments chimiques sont variables (Tableau 3). En effet, les valeurs de la concentration en chlorure varient respectivement entre 67.9 et 14 574 mg/l, 16.3 et 1972.8 mg/l et 41.5 et 2074 mg/l dans les eaux des nappes infrabasaltique, du Maastrichtien et du Paléocène. 80 % des eaux de la nappe infrabasaltique, 84 % des eaux de la nappe du Maastrichtien et 58% des eaux de la nappe du Paléocène présentent des concentrations en en chlorure (Cl-) qui ne dépassent pas

la norme de potabilité préconisée par l'OMS (2017) (250mg/l). Les valeurs de la teneur en nitrate (NO₃⁻) varient entre 1.2 et 292 mg/l dans les eaux de la nappe infrabasaltiques, 0.9 et 354.2 mg/l dans les eaux de la nappe du Maastrichtien et 0.4 et 50.8 mg/l dans les eaux de la nappe du Paléocène. 88 %, 84 % et 92 % des échantillons respectives des nappes infrabasaltiques, du Maastrichtien et du Paléocène indiquent des concentrations en nitrate qui sont en deçà de la limite autorisée par l'OMS (2017) (50 mg/l). Quant à l'élément fluor (F⁻), il est absent dans les eaux de la nappe infrabasaltique, cependant les valeurs de sa concentration varient entre 0 et 0.8 mg/l dans les eaux de la nappe du Maastrichtien et 0.1 et 1.4 mg/l dans les eaux de la nappe du Paléocène. Tous les échantillons de ces deux nappes (100 %) présentent des teneurs en fluor qui sont inférieurs à la norme de potabilité conseillée (1,5 mg/l), (OMS, 2017). Les valeurs de la concentration en sodium (Na⁺) oscillent entre 23 et 8 557 mg/l dans les eaux de la nappe infrabasaltique, 4.4 et 691.1 mg/l dans les eaux de la nappe du Maastrichtien et 3.5 et 1149.9 mg/l dans les eaux de la nappe du Paléocène. 90 %, 89 % et 67 % des échantillons, respectivement des eaux des nappes infrabasaltiques, du Maastrichtien et du Paléocène, montrent des teneurs en sodium qui sont en dessous de la norme de potabilité recommandée (200 mg/l), (OMS, 017).

Tableau 4 : Statistique descriptive des éléments chimiques présents dans les eaux des nappes infrabasaltique (juin, 2019), du Maastrichtien (Décembre, 2019) et du Paléocène (Décembre, 2019).

Nappe	Paramètre	Nombre d'échantillon	Min (mg/l)	Max (mg/l)	Moy (mg/l)	Norme OMS (2017) (mg/l)	Echantillons respectant la norme (%)
Infrabasaltique							
	HC03-	20	18,0	378,0	132,8	300	90
	Cl-	20	67,9	14 574,0	1 096,4	250	80
	SO42-	20	6,0	232,0	55,2	250	100
	NO3-	16	1,2	292,0	43,1	50	88
	Na+	20	23,0	8 557,0	539,3	200	90
	Ca2+	20	17,6	410,8	79,1	100	85
	Mg2+	20	7,0	479,0	60,6	50	85
	K+	20	1,8	213,0	17,3	12	80
Maastrichtien	HC03-	17	61,0	475,8	216,4	300	71
	Cl-	19	16,3	1972,8	221,7	250	84
	SO42-	19	0,7	156,9	29,4	250	100
	NO3-	19	0,9	354,2	29,2	50	84
	PO42-	19	0,1	0,4	0,2	3	100
	F-	19	0,0	0,8	0,2	1,5	100
	Na+	19	4,4	691,1	104,3	200	89
	Ca2+	19	11,9	218,5	72,1	100	74
	Mg2+	19	5,1	178,0	27,7	50	89
	K+	19	1,7	18,5	5,3	12	95
	Fe2+	19	0,0	0,7	0,2	0,3	74
Paléocène							
	HC03-	12	24,4	2253,8	427,2	300	50
	Cl-	12	41,5	2074,0	396,7	250	58
	SO42-	12	1,1	820,8	85,2	250	92
	NO3-	12	0,4	50,8	15,6	50	92
	F-	12	0,1	1,4	0,3	1,5	100
	PO42-	12	0,2	0,4	0,3	3	100
	Na+	12	3,5	1149,9	191,1	200	67
	Ca2+	12	19,9	258,3	106,6	100	58
	Mg2+	12	9,7	116,5	38,5	50	83
	K+	12	1,7	23,4	7,2	12	83
	Fe2+	12	0,1	6,3	1,2	0,3	42

4. A retenir

- L'étude hydrochimique montre que les eaux des sables infrabasaltiques, du Maastrichtien et du Paléocène sont de bonne qualité pour un usage AEP ;
- Toutefois, certains échantillons présentent des teneurs en élément chimique qui dépassent les normes de potabilité préconisées par l'OMS ;
- Donc il est nécessaire de contrôler les nappes et de bien traiter les eaux avant de la mettre à la disposition des populations.

5. Bibliographie

ANSD., (2019). Population du Sénégal. Rapport, 20 p.

Bellion, Y. J. C., (1987). Historique géodynamique post-paléozoïque de l'Afrique de l'ouest d'après l'étude de quelques bassins sédimentaires (Sénégal, Taoudenni, Iullemeden, Tchad).

Thèse de Doctorat des Sciences, Université d'Avignon (Paris, France), 302 p.

GRDR et IFAN., (2014). La dimension locale de la dialectique Migration et développement : monographie de Dakar. Version finale. Rapport. p 16.

Isa, N. M., Aris, A. Z. and Sulaiman, W. N. A. W. (2012). "Extent and severity of groundwater contamination based on hydrochemistry mechanism of sandy tropical coastal aquifer," Science of the Total Environment, vol. 438, pp. 414–425.

Jalali, M. (2005). Nitrates leaching from agricultural land in Hamadan, western Iran. Agriculture, Ecosystems & Environment, 110, 210–218.

Mondal NC, Singh VS, Rangarajan R (2009). Aquifer characteristics and its modeling around an industrial complex, Tuticorin, Tamil Nadu, India: a case study. J Earth Syst Sci 118(3):231–244.

OMS., (1972). Approvisionnement en eau et assainissement de Dakar et ses environs. Etude des eaux souterraines. Nappe des sables quaternaires. Projet Sénégal 3201 (EX 22). Tome II.

Sawyer, G.N., & McCarty, D.L. (1967). Chimie du sanitaire ingénieurs (2e éd.p. 518). New York : McGraw Hill.

Saxena VK, Mondal NC, Singh VS (2004). Evaluation des paramètres hydrogéochimiques pour délimiter les zones d'eau douce dans les aquifères côtiers. J Appl Geochem 6: 245–254.

Todd, K., (1980). Hydrologie des eaux souterraines, 2e éd. John Wiley & Fils, New York.

Top, A., (2018). Etude hydrochimique des nappes du système aquifère du horst de Diass. Mémoire de Master Géoscience. Faculté des sciences et techniques, université Cheikh Anta Diop de Dakar. 96 p.



CHAPITRE 6

MALADIES LIEES A L'EAU

QUELLES SONT LES CONNAISSANCES ACTUELLES SUR LES MALADIES LIÉES À L'EAU AU SÉNÉGAL ET DANS LES BASSINS TRANSFRONTALIERS, AFRIQUE DE L'OUEST ET DU CENTRE ?

Massamba DIOUF^{1*}, Serigne Ndam DIENG¹, Amadou DIENG¹, Mouhamed NDONG², Isaac MANGA³, Doudou SOW³, Issa SAKHO⁴.

¹ Service de santé publique/Institut d'odontologie et stomatologie, Faculté de Médecine de Pharmacie et d'Odontologie/Université Cheikh Anta DIOP

² Laboratoire d'électrochimie et procédés membranaires/Ecole supérieure Polytechnique de Dakar/université Cheikh Anta DIOP

³ Service de parasitologie et mycologie/ Faculté de Médecine de Pharmacie et d'Odontologie/Université Cheikh Anta DIOP

⁴ UMR Sciences, Technologies Avancées et Développement Durable, Université Amadou Mahtar Mbow de Dakar à Diamniadio (Sénégal).

* Corresponding author : massamba.diouf@ucad.edu.sn

1. Introduction

Le Sénégal, à l'instar de beaucoup de pays d'Afrique subsaharienne, a connu des épisodes de maladies liées à l'eau. L'eau est souvent sujette à diverses formes de contamination. Elles peuvent être bactériologiques, virales, parasitaires ou chimiques et d'origine humaine, animale ou environnementale, de façon directe ou indirecte [1-4]. L'utilisation d'une eau contaminée comme boisson ou dans la préparation des aliments, peut être une source de conséquences sanitaires. Ces conséquences peuvent être bénins (par exemple, diarrhée), alors que d'autres peuvent être graves (par exemple, choléra, syndrome hémolytique et urémique associé à *Escherichia coli* ou au cancer). De 1971 à 2012, des épisodes de choléra sont notés au Sénégal. Ces maladies peuvent provenir des eaux de production et/ou de distribution (forages, puits, robinets) et des eaux de ressources surtout celles superficielles (rivières, fleuves, lacs...).

Nous présenterons quelques exemples de bactérioses, de viroses, de parasitoses et d'autres maladies liées à l'eau au regard des données disponibles et actuelles pour le Sénégal et en zone transfrontalière.

2. Maladies liées à l'eau

2.1. Le choléra

C'est une maladie infectieuse diarrhéique aiguë, transmissible, provoquée par l'ingestion d'aliments ou d'eau contaminés par le bacille *Vibrio cholerae*. Le choléra reste à l'échelle mondiale une menace pour la santé publique et un indicateur de l'absence d'équité et d'un développement social insuffisant. On estime qu'il y a globalement chaque année, 1,3 à 4 millions de cas et 21 000 à 143 000 décès dus au choléra dans le monde. Le nombre de cas de choléra notifiés à l'OMS à l'échelle mondiale a pratiquement doublé entre 2018 (499 447) et 2019 (923 037). Toutefois, le nombre total de décès imputables au choléra est passé de 2 990 en 2018 à 1 911 en 2019, soit une baisse de 36% en un an. En Afrique, le nombre annuel de cas et de décès signalés était à son niveau le plus bas depuis le début du 21^e siècle [5-7].

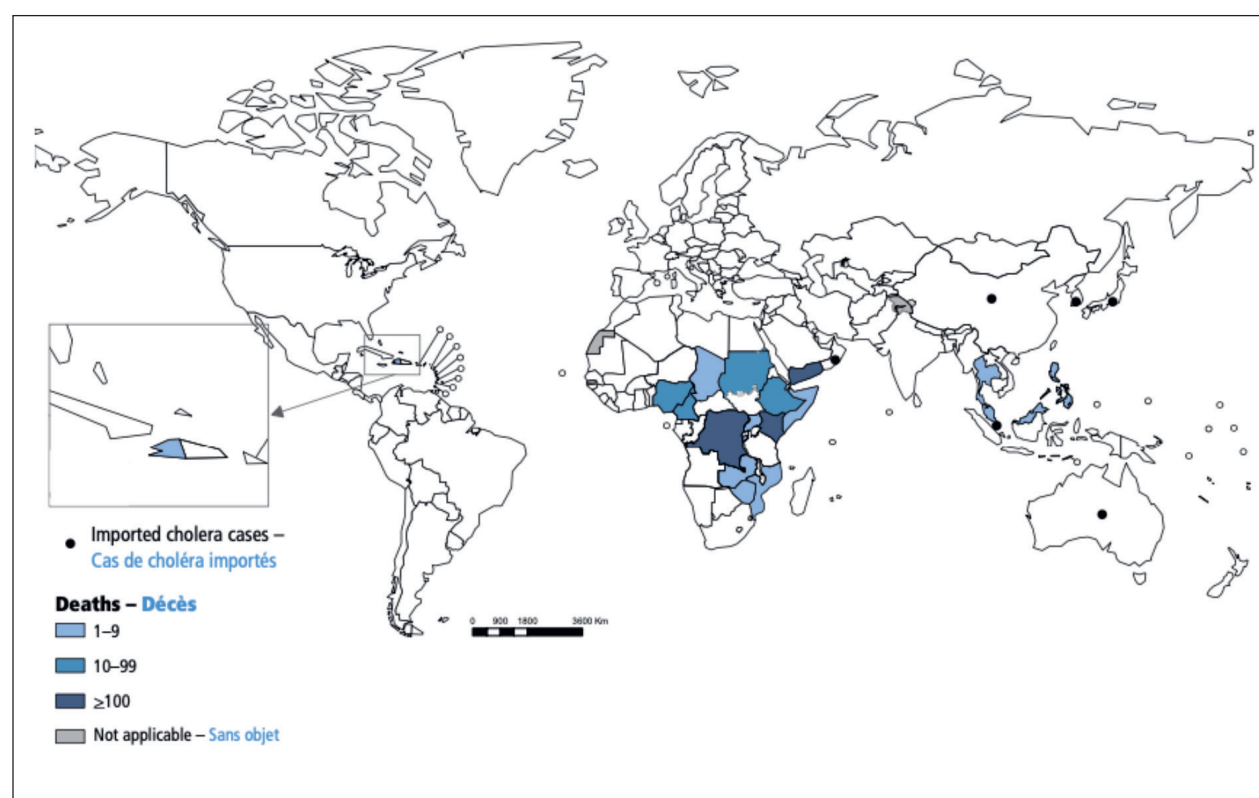


Figure 1. Cartographie des décès déclarés dus au choléra et des cas importés en 2019
(Source: Organisation mondiale de la santé / Département de lutte contre les maladies épidémiques [5]).

La figure 2, ci-dessous, présente la situation du choléra dans les pays transfrontaliers en Afrique de l'Ouest.

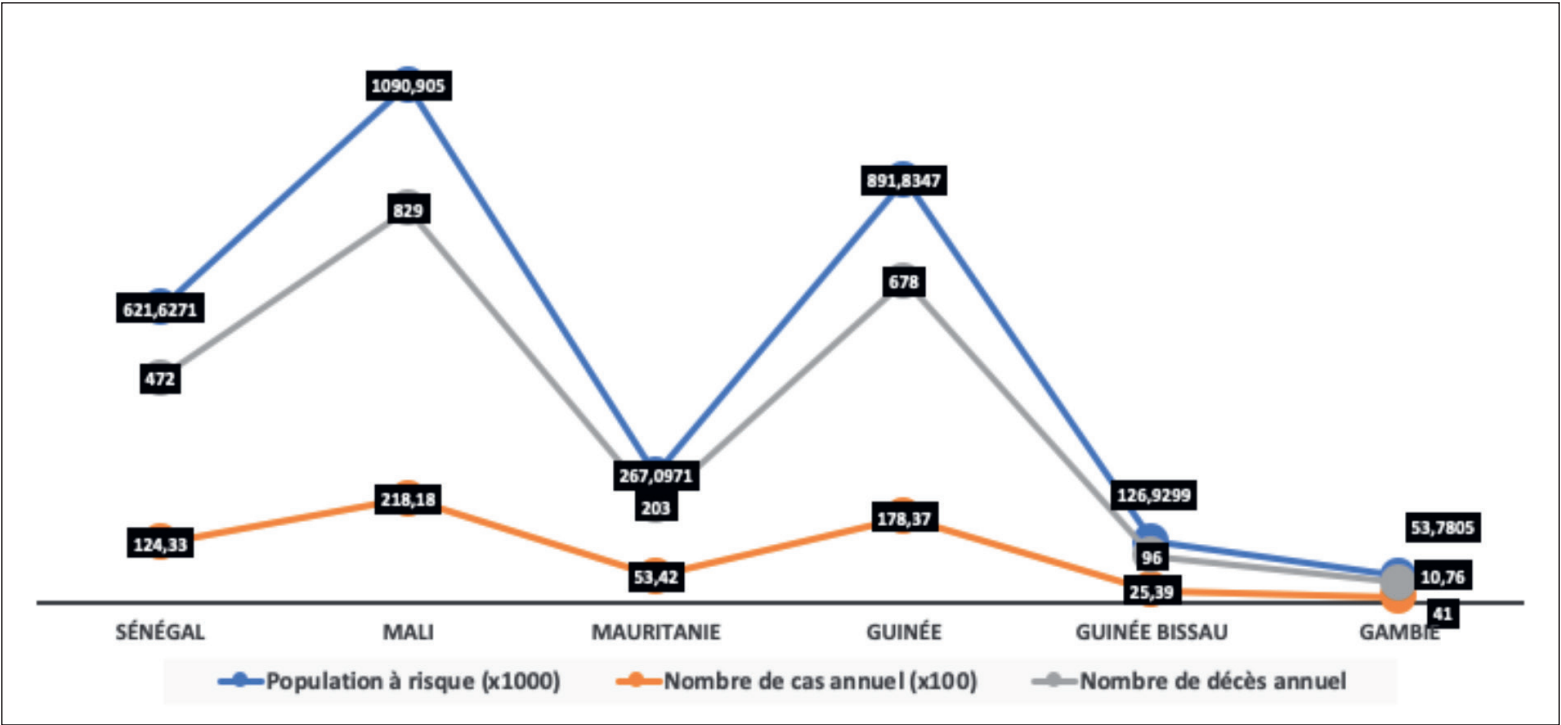


Figure 2 : Situation du choléra dans les pays frontaliers en Afrique de l'Ouest.

A partir de l'exemple de l'année 2015, il est constaté dans les pays limitrophes, une évolution asymptotique du nombre de cas de choléra et de décès annuels en fonction de la population à risque qui est plus importante au Mali et en Guinée. Ceci pouvant aussi être un facteur d'exposition pour le Sénégal

Au Sénégal, des années 1980 jusqu'à nos jours, trois poussées épidémiques majeures sont enregistrées (Figure 3)

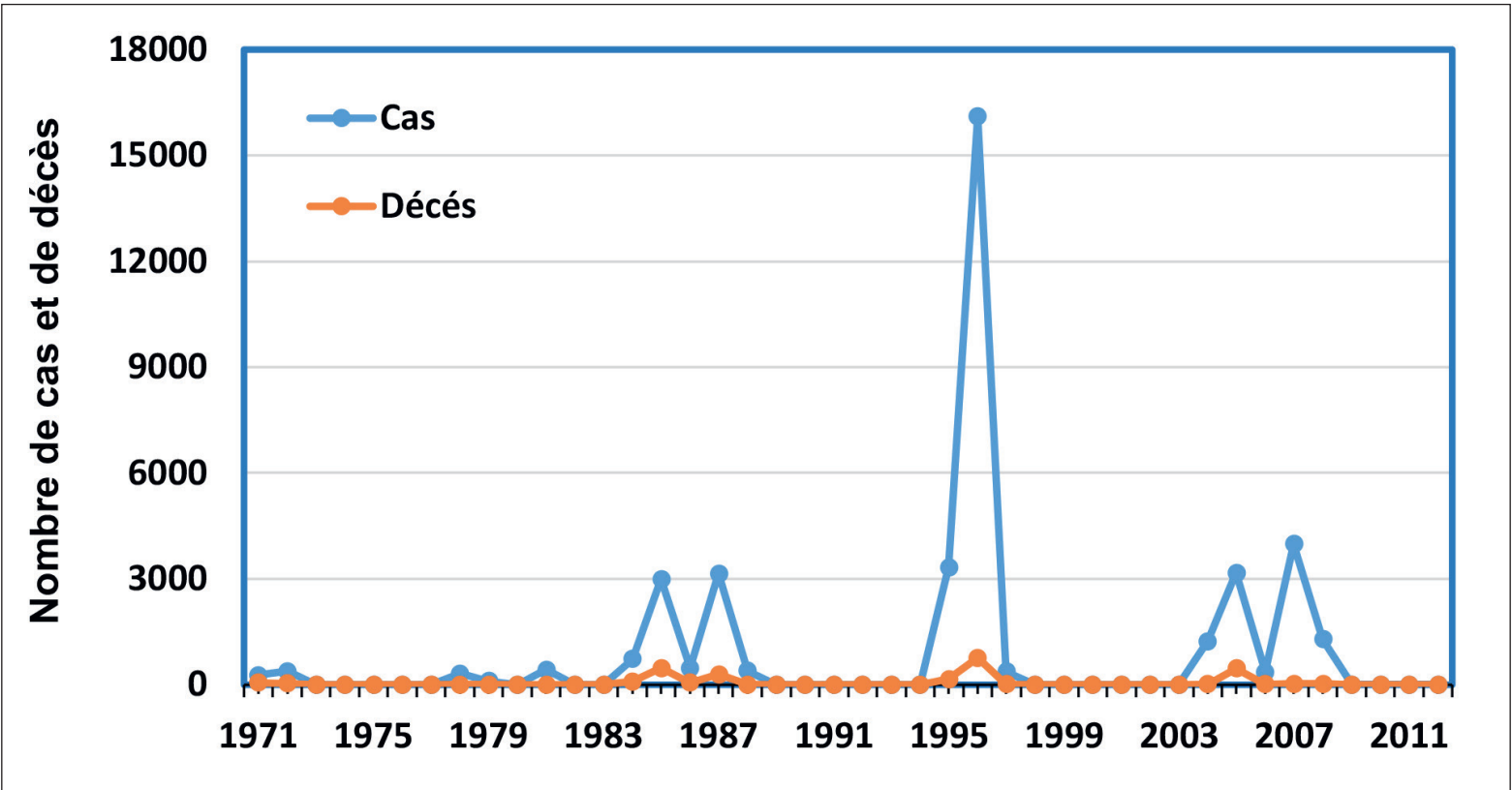


Figure 3 : Nombre de cas de choléra avec les décès subséquents notifiés au Sénégal de 1971 à 2012 [7]

Plusieurs épisodes épidémiques ont été notés avec un cumul annuel de cas incidents allant de 1 000 à presque 4 000 cas, comme en 2005. En 1971, 265 cas ont été répertoriés, contre 2 988 cas déclarés en 1985. En 1987, 1995 et 2005, 3 000 à 4 000 cas par an de choléra étaient signalés. Le nombre de décès augmentait proportionnellement au nombre de cas.

2.2. La diarrhée

La diarrhée est un trouble digestif qui consiste en une émission de selles généralement liquides ou molles, dans une quantité et à une fréquence plus élevée que la normale. Elle peut être aiguë ou chronique. Ce trouble est avéré au-delà de 300 g et de plus de 3 selles par jour.

La plus part des études menées en Afrique subsaharienne sur les maladies diarrhéiques concernaient les enfants de moins de 5 ans résidant en zone rurale. Les facteurs sous-jacents qui favoriseraient ces diarrhées ne sont pas suffisamment documentés [8].

Au Sénégal, une étude portant sur les facteurs de risque des maladies diarrhéiques sur un échantillon de 7 416 enfants à Dakar avec une analyse multi niveaux des variables a conduit aux résultats suivants (Tableau 1)

Tableau I : Facteurs de risque pour les maladies diarrhéiques (modèle sur trois multi-niveaux) [8].

Variable	N	%	OR	95% CI
Constante			0,31***	(0,22 – 0,43)
Genre (masculin)	3665	49,42		
Genre féminin	3751	50,58	0,97	(0,85 – 1,11)
Age de l'enfant	5,6 (moyenne)		0,84***	(0,82 – 0,87)
Age de la mère/tutrice	35 (moyenne)		1,00	(1,00 – 1,01)
SSE de la mère/tutrice (élevé)	1907	47,39		
SSE bas	2117	52,61	0,91	(0,78 – 1,06)
Pratiques médicales (adéquates)	2226	75,41		
Pratiques inadéquates	726	24,59	1,30***	(1,09 – 1,54)
Installations sanitaires (adéquates)	1280	43,36		
Installations inadéquates	1672	56,64	0,91	(0,74 – 1,11)
Niveau de vie du ménage (riche)	1459	49,42		
Niveau pauvre	1493	50,58	1,32***	(1,12 – 1,54)
Assainissement du quartier (bon)	17	34,00		
Assainissement en mauvais état	33	66,00	1,31**	(1,03 – 1,66)

*p<0.1 ; **p<0.05 ; ***p<0.001

Ce tableau indique que les diarrhées sont influencées à la fois par des facteurs liés à l'individu, au ménage et au quartier. En somme, on peut retenir que l'âge de l'enfant semble jouer un rôle protecteur contre la diarrhée contrairement aux pratiques inadéquates, au niveau de vie du ménage (pauvreté) et le mauvais état d'assainissement impliquant alors la qualité de l'eau.

Tableau II : Prévalence de la diarrhée chez l'enfant et pourcentage d'enfants traités au Sénégal [9].

Région	Pourcentage ayant eu la diarrhée	Effectif d'enfants	Parmi les enfants ayant eu la diarrhée :	
			Pourcentage pour lesquels des conseils ou un traitement ont été recherchés ¹	Effectif d'enfants ayant eu la diarrhée
Dakar	13.4	2 638	42.8	354
Ziguinchor	26.8	313	46.6	84
Diourbel	12.7	1 626	40.3	207
Saint-Louis	9.1	699	46.2	63
Tambacounda	12.3	560	61.1	69
Kaolack	15.5	1 053	41.5	164
Thiès	16.8	1 341	40.7	225
Louga	8.6	683	41.6	59
Fatick	16.2	588	41.2	95
Kolda	25.1	560	55.5	141
Matam	8.1	470	39.4	38
Kaffrine	14.3	764	37.4	109
Kédougou	11.9	138	64.1	16
Sédhiou	27.2	358	46.2	97
Ensemble	15.3	11 261	45.5	1 724

¹ Sont inclus les conseils ou traitement des sources suivantes : secteur public, secteur médical privé, boutique, marché et vendeur de médicaments ambulant. Non compris les conseils ou traitements fournis par un praticien traditionnel

Quelques exemples de viroses liées à l'eau

Dans ses relations avec l'hôte, les virus développent des variétés de mécanismes par lesquels ils se transmettent d'un hôte à l'autre. Certains virus associés à la transmission d'origine hydrique font partie du groupe des virus entériques qui infectent principalement les cellules du tractus gastro-intestinal et sont généralement transmis par voie fécale-orale [10]. Pour ces virus, la contamination humaine survient lorsque de l'eau contaminée est utilisée pour boire, cuisiner ou se divertir et, surtout, lorsque des mollusques bivalves filtreurs sont consommés [11]. Les pathologies virales dont le vecteur de contamination passe, dans sa maturation, par une phase aqueuse peuvent aussi être considérées comme des maladies liées à l'eau. Ces dernières constituent une menace majeure pour des millions de personnes qui vivent dans des conditions précaires et informelles, qui sont déplacées ou affectées par des conflits et catastrophes.

Les principales maladies liées à l'eau sont les gastro-entérites virales, les hépatites A et E, la dengue et la polio entre autres.

2.3. Gastro-entérites virales

Les gastro-entérites virales (GEV), maladies liées à l'eau les plus fréquentes, représentent 80% des cas de gastro-entérites aiguës. Elles sont causées par des virus de type Rotavirus, Norovirus, adénovirus, Sapovirus ou Astrovirus humains [12]. Elles sont une cause importante de morbidité et de mortalité infantiles dans le monde. Depuis 2006, suite à la mise en œuvre d'un programme de vaccination contre le Rotavirus dans plus de 100 pays, la charge de morbidité des GEV associées au Rotavirus est considérablement réduite ; le Norovirus devenant ainsi la principale cause de GEV [13]. Le tableau III présente la prévalence de la gastro-entérite virale dans sept pays en Afrique de l'Ouest.

Tableau III : Prévalence de la gastro-entérite virale et agents viraux en cause

	GEV	Rotavirus	Norovirus	Adénovirus	Année	Auteurs
Sénégal	-	41%	-	-	2011-2014	Diop et al 2018 [14]
	-	13%	-	-	2011-2017	
Nigéria	58,6%	39,3%	10,6%	-	2012-13	Japhet et al 2019 [15]
	36%	16,6%	5,1%	5,1%	2015-2017	Arowolu et al 2019 [16]
Ghana	58%	23%	-	-	2011	Binga et al 2011 [17]
	-	48%	-	-	2008- 2017	Lartey et al 2020 [18]
Côte-d'Ivoire	-	29,6%	-	-	2013	Akoua-Koffi et al 2013 [19]
Burkina Faso	-	44%	23%	-	2012-13	Bonkougou et al 2018 [20]
	-	14%	20%	-	2015	Rönnelid et al 2020 [21]
Togo	-	48%	-	-		Tsolenyanyu et al 2014 [22]
Niger	-	30,6%	-	-	2010-12	Page et al 2014 [23]

Dans la sous-région ouest africaine, la prévalence des GEV varie entre 36 et 58%. Il est observé une prédominance des GEV associées aux Rotavirus jusqu'à 48% au Ghana et 44% au Burkina. Aujourd'hui, la prévalence semble diminuée de 14%.

2.4. Hépatite A et E

Les virus de l'hépatite virale se transmettent principalement par la transfusion sanguine, les contacts sexuels et la consommation d'eau ou d'aliments contaminés par des matières fécales. Les virus de l'hépatite entérique utilisent cette dernière voie de contamination. Il existe actuellement deux virus de l'hépatite entérique distincts : l'hépatite A et l'hépatite E [24]. Ils partagent les mêmes voies et mécanismes de propagation et provoquent deux des épidémies de même gravité.

Les Virus des hépatites A et E sont les principales causes d'hépatites virales entéro-transmissibles, en particulier dans les zones où les conditions d'hygiène et le niveau socioéconomique sont souvent précaires.

Au Sénégal et dans quelques pays limitrophes (Gambie et Guinée), les données de séroprévalence recueillies (tableau IV) démontrent un pourcentage pouvant aller de 80 à 100% de présence d'anti HAV IgG en fonction de certains groupe d'âge (84% chez les 15-20 ans en Guinée ; 82% chez les 15 ans en Gambie et 100% chez les 18-19 ans à Dakar et 2-13 ans à Niakhar toujours au Sénégal [25].

Tableau IV : Données de séroprévalence de l'hépatite A en fonction des groupes d'âge au Sénégal et quelques pays limitrophes

Pays	Site	Année d'étude	Population	Taille échantillon	Données de séroprévalence		Référence
					Groupe d'âge (années)	% avec anti- VHA IgG	
Guinée	Région Kindia	1987-1988	Résidents ruraux et urbains sans maladie hépatique apparente	4	1-5	75	Ivanov, [26]
				39	6-10	82	
				50	11-15	74	
				82	15-20	84	
				242	21-30	74	
				189	31-40	57	
				101	41-50	61	
				27	51-60	41	
				16	61-70	19	
				17	≥71	18	
Gambie	Fajara, Banjul	1970	Patients sans maladie du foie	14	1-2	7	Ajdukiwicz [27]
				29	3	43	
				21	~5	56	
				32	~10	60	
				53	~15	82	
				22	~20	73	
				15	~30	38	
				21	≥40	37	
Sénégal	Dakar	MILIEU 1970	Patients hospitalisés urbains et ruraux atteints de maladies non hépatiques	8	18-19	100	Szmuness [28]
				24	20-29	92	
				24	30-39	67	
				24	40-49	71	
				22	≥50	55	

	Ziguinchor, région Fleuve	–	Résidents ruraux	56	0-4	66	Baylet [29]
				116	5-9	95	
				75	10-14	100	
				266	≥15	96	
	Niakhar, région Fatick	1970	Enfants ruraux	52	1-1,4	25	Barin [30]
				32	1,5-1,9	47	
				56	2-3	80	
				33	4-5	100	
				33	6-7	100	
				31	8-9	100	
				26	10-11	100	
				25	12-13	100	

Quelques exemples de parasitoses liées à l'eau

2.5. Paludisme

Le paludisme est une maladie provoquée par des parasites du genre Plasmodium. Selon l'Organisation mondiale de la Santé (OMS), cette maladie a touché environ 229 millions de personnes dans le monde en 2019, et causé 409 000 décès. La situation est d'autant plus préoccupante que depuis plusieurs années les parasites développent des résistances aux molécules antipaludiques et les moustiques craignent de moins en moins les insecticides.

Le paludisme touche une centaine de pays dans le monde, particulièrement les zones tropicales défavorisées d'Afrique, d'Asie et d'Amérique Latine. La région Africaine est, de loin, la plus touchée avec 94% des cas de paludisme recensés dans cette région. Des épidémies peuvent survenir lors de mouvements de populations peu exposées au paludisme vers des zones hautement endémiques.

Au Sénégal, les indicateurs montrent une inégale répartition entre les régions (tableau V)

Tableau V: Indicateurs du Paludisme par région médicale au Sénégal en 2019 [31]

Régions	Nombre de cas de paludisme confirmés	Nombre cas de paludisme confirmés (Chez les moins de 5 ans)	Nombre cas de paludisme confirmés (Chez les femmes enceintes)	Nb. de cas de paludisme GRAVES	Décès liés au Paludisme Tout Age	Décès liés au Paludisme Chez les Enfants de Moins 5 Ans
Saint Louis	812	42	10	154	12	0
Fatick	981	57	8	35	0	0
Louga	1 758	98	15	237	11	0
Ziguinchor	3 757	174	35	313	9	0
Kaolack	4 518	360	56	181	24	1
Matam	5 580	407	104	182	7	1
Sédhiou	5 678	518	84	206	12	2
Kaffrine	5 702	559	62	188	18	5
Thiès	5 722	263	34	480	12	0
Diourbel	15 641	1 036	271	1 007	21	14
Dakar	18 558	1 031	115	2 087	32	3
Kédougou	67 941	8 532	1 662	1 095	22	11
Tamba	101 077	10 462	2 192	1 549	37	10
Kolda	116 983	14 402	2 507	1 638	43	15
National	354 708	37 941	7 155	9 352	260	62

Les régions Kédougou, Tamba et Kolda portent l'essentiel de la charge du paludisme. Elles couvrent au total 11% de la population sénégalaise : 1 822 372 habitants contre 16 209 119. En 2019, elles ont enregistré 81% des cas de paludisme confirmés au Sénégal, avec 286 001 sur 354 708 cas. Ces trois régions ont enregistré également des cas de paludisme, notamment chez les enfants de moins de 5 ans et chez les femmes enceintes, avec respectivement 88% (33 396 sur 37 941 cas) et 89% (6 361 sur 7 155 cas) en 2019.

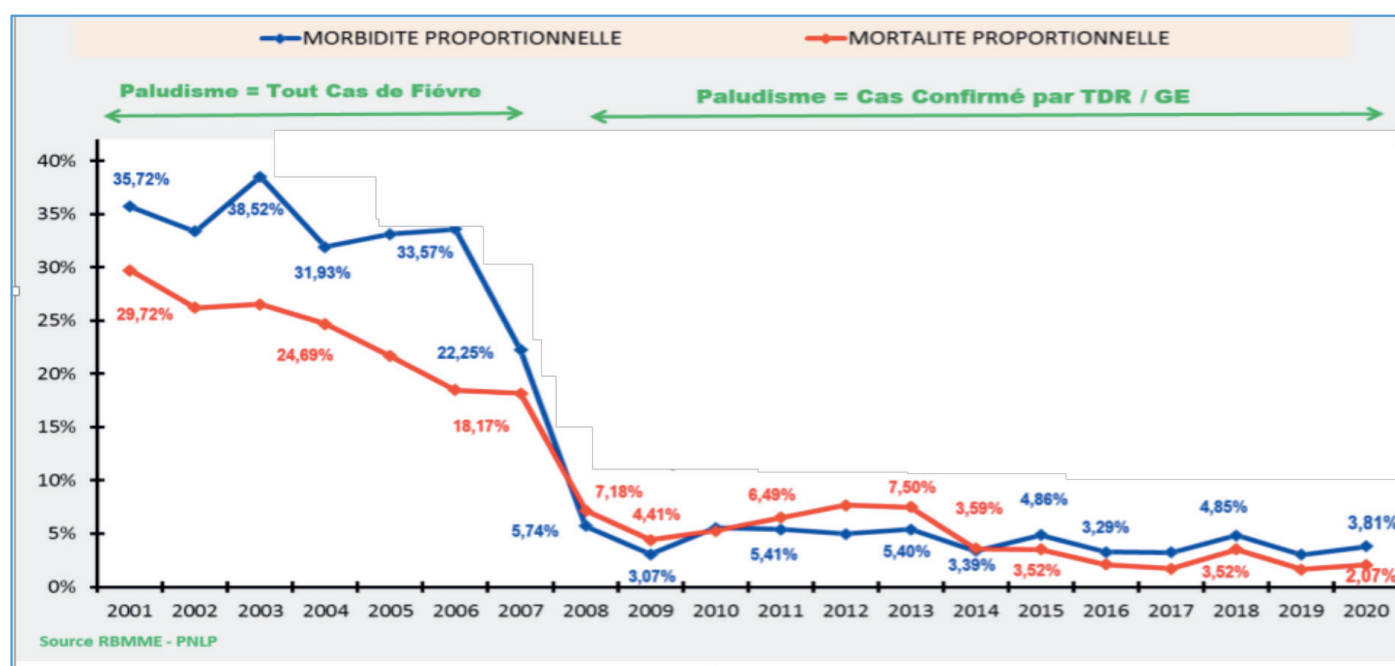


Figure 4 : Evolution de la morbidité et de la mortalité liée au paludisme au Sénégal de 2001 à 2020 [31].

A partir de 2009 jusqu'en 2020, la morbidité proportionnelle ainsi que la mortalité restent peu variables et se situe entre 5 et 2%. Ceci peut être expliqué par l'implémentation des interventions majeures avec les tests de diagnostic rapides, les moustiquaires imprégnées à longue durée d'action, les visites et prise en charge à domicile et les ACT entre autres

2.6. Bilharziose

La schistosomiase ou bilharziose est une maladie parasitaire qui affecte plus de 230 millions de personnes dans le monde dont 80% en Afrique subsaharienne [32]. C'est une parasitose eau dépendante touchant principalement les enfants âgés de 7 à 14 ans. Au Sénégal, la maladie existe sous la forme intestinale due à *S. mansoni* essentiellement localisée dans la vallée du fleuve Sénégal et la forme uro-génitale due à *S. haematobium* plus prévalent et existant dans toutes les régions du pays (Figure 5).

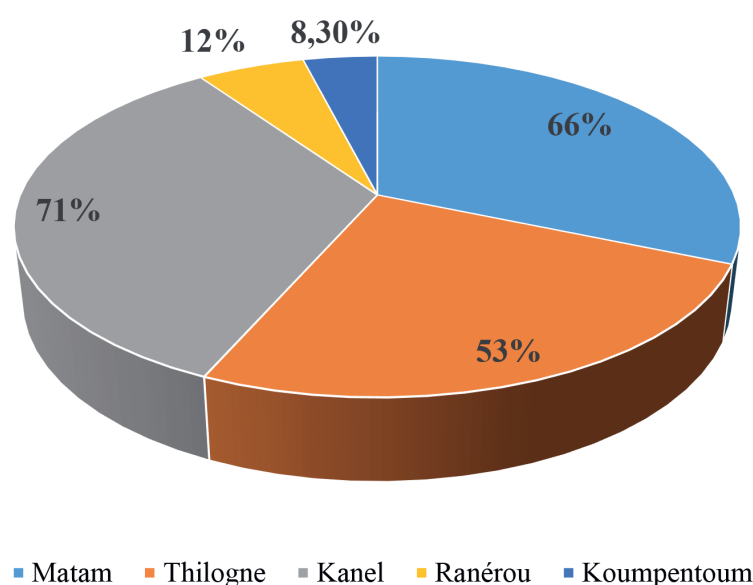


Figure 5 : Prévalence de la bilharziose dans 5 sites témoins au Sénégal [33]

Elle est due à des vers plats appelés schistosomes vivant dans les vaisseaux sanguins. Les êtres humains contractent cette maladie au cours des contacts avec une eau douce contaminée dans laquelle se trouvent les mollusques qui sont les hôtes intermédiaires à l'origine des larves infectantes et sans lesquelles les parasites ne peuvent effectuer leur cycle.

Elles touchent plus particulièrement les populations pauvres d'agriculteurs et de pêcheurs. Les enfants restent la cible la plus exposées et la plus infectée par ces maladies.

2.7. Dracunculose ou ver de Guinée

La dracunculose est une nématodose tissulaire et sous-cutanée due au développement dans l'organisme des femelles du ver *Dracunculus medinensis* [34].



Figure 6 : Larve de *Dracunculus medinensis*

Cette image représente un type de gastropodes d'eau douce, dans l'eau (ou ils peuvent survivre 48 heures) et dans leurs hôtes humains. Ils entrent dans le corps de ceux qui se baignent dans de l'eau contaminée. Ils causent des infections pouvant endommager le foie, les intestins, les poumons et les vessies.

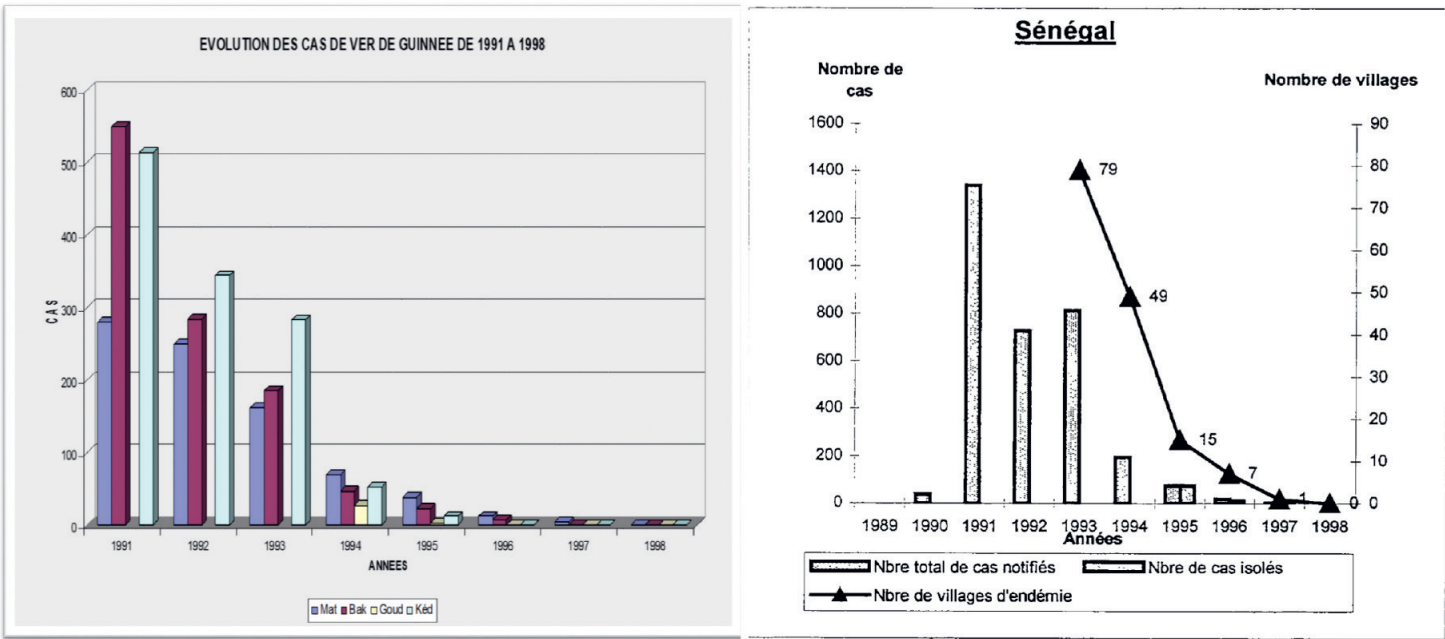


Figure 7 : Evolution de la dracunculose de 1991 jusqu'à son déclin au Sénégal [35]

La dracunculose est l'une des parasitoses les plus anciennement décrites dans le monde. La contamination se fait par l'ingestion de l'hôte intermédiaire, le cyclops avec de l'eau de boisson.

L'évolution classique se fait par l'issue spontanée du ver à la peau, avec des risques de complications infectieuses.

Des aberrations de déplacement du ver dans l'organisme peuvent être à l'origine de complications en rapport avec la localisation de cette migration. La prophylaxie de la maladie repose sur l'accès à une eau potable.

2.8. Fluorose

La fluorose dentaire résulte de la surconsommation de fluor pendant la période de l'enfance [36]. Toute surexposition durant la phase de minéralisation (entre 0 et 6 ans) à des doses élevées (supérieures ou égales à 0,1 mg par kg de poids / par jour) dans l'organisme, peut causer la fluorose dentaire et osseuse lorsque cette concentration augmente [37-39]. L'OMS a fixé à 0,05 mg/jour/Kg de poids corporel chez l'enfant (tout apport confondu sans dépasser 1 mg par jour) comme la dose de fluor à ne pas dépasser pour éviter tout risque de fluorose.

Il est établi que l'eau est la principale source d'exposition au fluor. Plus de 70 millions de personnes pourraient être affectées de fluorose dans le monde [40].

Au Sénégal, il a été défini une zone de fluorose endémique (ZFE) recouvrant les régions de Fatick, Diourbel, Kaolack, une partie de la région de Thiès et le long du fleuve Sénégal (Matam). L'étude de Rabier (année) renseigne sur quelques cas retrouvés dans ces localités de fluorose dentaire et osseuse (illustrations 1 et 2).



Illustration 1 : Fluorose dentaire dans le centre du Sénégal, en zone endémique
Source : photos prises par Rabier et al [41].



Illustration 2 : Aspects cliniques et radiologiques avec raideur du rachis cervico-dorso-lombaire et déformation osseuse, une raideur articulaire et interphalangienne (Rabier et al) [41].

En général, une fluorose dentaire grave s'accompagne d'une atteinte des os. Outre la fluorose dentaire, celle osseuse résulte de l'accumulation progressive de fluor dans le tissu osseux. Elle est habituellement asymptomatique au début et ne se voit qu'à l'âge adulte car, elle nécessite de longues années d'exposition à des doses de fluor très élevées. L'intoxication survient exclusivement par ingestion excessive et prolongée de fluor.

2.9. Maladie «des pêcheurs» du Sénégal

Cette pathologie a fait son apparition le 12 novembre 2020 au Sénégal. Elle a été d'abord découverte à Thiaroye-Sur-Mer, puis dans d'autres localités, comme Joal, Cayar, Rufisque, Yène, Fass Boye.

Elle se manifeste par des lésions dermatologiques sur le visage, les membres et même parfois sur les parties intimes avec des yeux larmoyants chez les personnes affectées (illustration 3).

Au total, ce sont plus de 1 300 pêcheurs qui avaient été infectés par cette maladie. Mais à ce jour, il n'y a plus de malade dans les structures sanitaires.

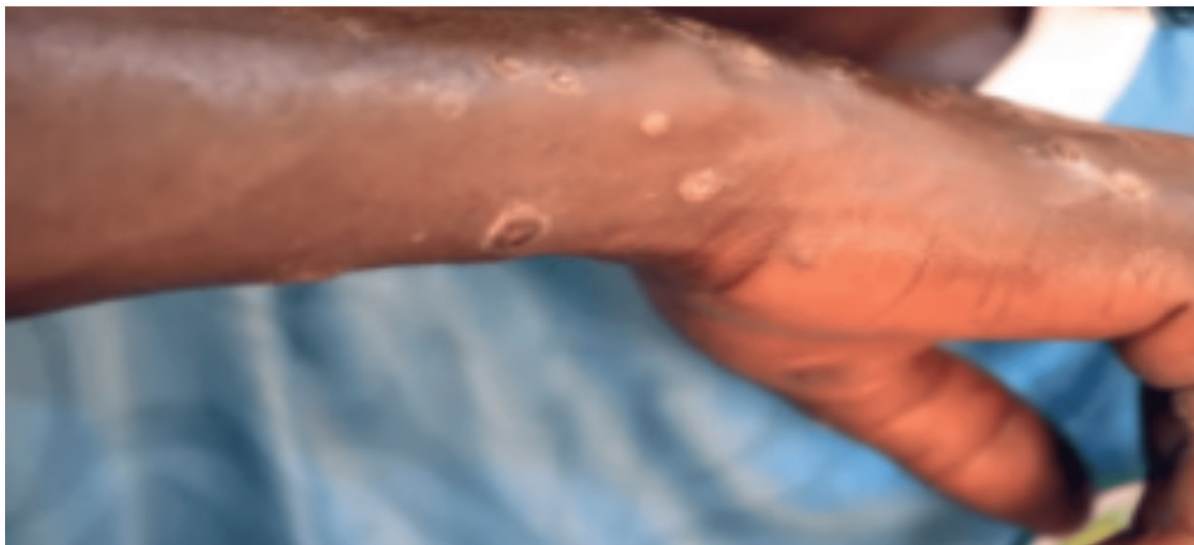


Illustration 3 : Le bras d'un pêcheur contaminé par la maladie. Crédit image: Oumar Ka

Cependant, il est apparu ces derniers jours des cas de réinfection et de rechute qui suscitent des inquiétudes auprès des pêcheurs et autres acteurs du secteur de la pêche.

Les résultats des prélèvements de l'eau de mer révèlent la présence quasi-permanente de soufre même si aucune indication exacte sur l'origine de la maladie n'est à ce jour disponible.

3. Les perspectives scientifiques liées à la question

La question sur les connaissances actuelles sur les maladies liées à l'eau au Sénégal et dans les bassins transfrontaliers, Afrique de l'Ouest et du Centre, présente des enjeux majeurs pour nos pays.

Les données de la littérature scientifiques font état d'une problématique réelle relative à plusieurs pathologies bactériennes, virales, parasitaires ou autres. Pour comprendre amplement cette problématique, il est nécessaire de maîtriser les facteurs de risque mais surtout contrôler les déterminants pouvant agir sur l'eau de manière néfaste.

Le choléra tout comme les maladies diarrhéiques pour la plupart découlent d'un défaut dans l'approvisionnement en eau des populations ou d'une défaillance de l'assainissement avec un réseau vétuste ou inexistant pouvant drainer convenablement les eaux usées sources de contamination. Dans le même ordre d'idées, certaines maladies virales ou parasitaires procèdent également d'une consommation directe ou indirecte d'une eau souillée ou la présence de gîtes larvaires dans les périmètres habités. Ce qui relève aussi d'un problème environnemental dont la prise en charge limiterait l'ampleur et la gravité de ces maladies. Aussi, le développement d'activités industrielles est un fait marquant en ce début du 21ème siècle en Afrique subsaharienne. Ce qui participe, le plus souvent, à une pollution massive des écosystèmes alentours impactant ainsi la qualité de l'eau. D'autres contrées souffrent d'une nappe assez chargée en métaux et/ou en minéraux comme le fluor, le sodium dont l'exposition prolongée provoque des maladies générales à l'instar de l'hypertension artérielle, la fluorose dentaire ou osseuse pouvant être évitée par des techniques de défluoration ou désalinisation modernes ou traditionnelles et accessibles même dans les pays en développement. A cela, s'ajoutent les habitudes d'hygiène, d'alimentation et de vie ou les comportements et pratiques hostiles à une bonne santé. Le contrôle de ces déterminants exige, une approche individuelle et collective mais aussi multisectorielle et intégrée car allant au-delà du secteur de la santé et impliquant non pas seulement l'individu mais aussi la communauté.

En substance, nos pays bien que conscients de la problématique de l'eau, doivent augmenter les investissements pour améliorer la prise en charge de la question de l'eau en considérant que l'eau est une ressource de la vie et non une source qui prive la vie.

4. Références bibliographiques

- Besancenot JP, Handschumacher P, Ndione JA, Mbaye I, Laaidi K. Climat, eau et santé au Sahel ouest- africain. *Sécheresse* 2004;15(3):33-41.
- Copeland CC, Beers BB, Thompson MR, Fitzgerald RP, Barrett LJ et al. Faecal contamination of drinking water in a Brazilian shanty town: importance of household storage and new human faecal marker testing. *J Water Health*. 2009 Jun;7(2):324-31.
- Dégbey C, Makoutode M, Ouendo EM, Fayomi B, De Brouwer C. La qualité de l'eau de puits dans la commune d'Abomey-Calavi au Bénin. *Environnement, Risques & Santé* 2008;7(4):279-83.
- Mihdhdhir AA. Évaluation of bacteriological and sanitary quality of drinking water stations and water tankers in Makkah Al-Mokarama. *Pak J Biol Sci* 2009 Feb 15;12(4):401-5.
- World Health Organization. Weekly epidemiological record. Geneva; 2020, 37 (95) 441–448 <http://www.who.int/wer>
- Harris JB, LaRocque RC, Qadri F, Ryan ET, Calderwood SB (2012). Cholera. *Lancet* 379: 2466–76.
doi: 10.1016/S0140-6736(12)60436-X PMID: 22748592
- World Health Organization. WHO Cholera surveillance and number of cases. Geneva: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/cholera>
- Rautu L, Dos Santos S, Schoumaker B. Facteurs de risque pour les maladies diarrhéiques chez les enfants à Dakar : une analyse multi niveaux avec variables latentes. *African Populations Studies*, 2016 ; 30 (1) 1-10
- Agence Nationale de la Statistique et de la Démographie (ANSD) Sénégal, et ICF. 2019. Sénégal : Enquête Démographique et de Santé Continue (EDS-Continue 2019). <https://dhsprogram.com/pubs/pdf/FR368/FR368.pdf>
- Grabow WOK. Chapter 1 Overview of Health-Related Water Virology. *Perspect Med Virol*. 2007;17:1-25.
- Upfold NS, Luke GA, Knox C. Occurrence of Human Enteric Viruses in Water Sources and Shellfish: A Focus on Africa. *Food Environ Virol*. 2021;13(1):1-31.
- Bányai K, Estes MK, Martella V, Parashar UD. Viral gastroenteritis. *Lancet*. 2018;392(10142):175-186.
- Chen CJ, Wu FT, Huang YC, Chang WC, Wu HS, Wu CY et al. Clinical and Epidemiologic Features of Severe Viral Gastroenteritis in Children: A 3-Year Surveillance, Multicentered Study in Taiwan With Partial Rotavirus Immunization. *Medicine (Baltimore)*. 2015;94(33):e1372.
- Diop A, Thiongane A, Mwenda JM, Aliabadi N, Sonko MA, Diallo A, et al. Impact of rotavirus vaccine on acute gastroenteritis in children under 5 years in Senegal: Experience of sentinel site of the Albert Royer Children's Hospital in Dakar. *Vaccine*. 2018;36(47):7192-7.
- Japhet MO, Famurewa O, Adesina OA, Opaleye OO, Wang B, Höhne M, et al. Viral gastroenteritis among children of 0-5 years in Nigeria: Characterization of the first Nigerian aichivirus, recombinant noroviruses and detection of a zoonotic astrovirus. *J Clin Virol*. févr 2019;111:4-11.
- Arowolo KO, Ayolabi CI, Lapinski B, Santos JS, Raboni SM. Epidemiology of enteric viruses in children with gastroenteritis in Ogun State, Nigeria. *J Med Virol*. 2019;91(6):1022-29.
- Binka E, Vermund SH, Armah GE. Rotavirus diarrhea among children less than 5 years of age in urban Ghana. *Pediatr Infect Dis J*. août 2011;30(8):716-8.
- Lartey BL, Quayle O, Damanka SA, Agbemabiese CA, Armachie J, Dennis FE, et al. Understanding Pediatric Norovirus Epidemiology: A Decade of Study among Ghanaian Children. *Viruses* [Internet]. 18 nov 2020 [cité 22 nov 2021];12(11):1321.
- Akoua-Koffi C, Asse Kouadio V, Yao Atteby JJ. Surveillance hospitalière des gastro-entérites à rotavirus chez les enfants de moins de 5 ans en République de Côte d'Ivoire : une étude transversale. *BMJ ouvert*. 31 janvier 2014;4(1):e003269
- Bonkougou IJO, Ouédraogo N, Tamini L, Teguer RK, Yaméogo P, Drabo MK, Medah I, Barro N, Sharma S, Svensson L, Nordgren J. Rotavirus and norovirus in children with severe diarrhea in Burkina Faso before rotavirus vaccine introduction. *J Med Virol*. 2018 Sep;90(9):1453-1460.
- Rönnelid Y, Bonkougou IJO, Ouédraogo N, Barro N, Svensson L, Nordgren J. Norovirus and rotavirus in children hospitalised with diarrhoea after rotavirus vaccine introduction in Burkina Faso. *Epidemiol Infect* [Internet]. [cité 22 nov 2021];148:e245.
- Tsolenyanyu E, Seheri M, Dagnra A, Djadou E, Tigossou S, Nyaga M, et al. Surveillance for rotavirus gastroenteritis in children less than 5 years of age in Togo. *Pediatr Infect Dis J*. janv 2014;33 Suppl 1:S14-18.
- Page A-L, Jusot V, Mamaty A-A, Adamou L, Kaplon J, Pothier P, et al. Rotavirus Surveillance in Urban and Rural Areas of Niger, April 2010–March 2012. *Emerg Infect Dis* [Internet]. avr 2014 [cité 22 nov 2021];20(4):573-80.
- Tahaei SM, Mohebbi SR, Zali MR. Enteric hepatitis viruses. *Gastroenterol Hepatol Bed Bench*. 2012;5(1):7-15.
- Jacobsen KH. Hepatitis A virus in West Africa: Is an epidemiological transition beginning? *Nigerian Medical Journal*, 2014 ; 55(4): 279-284
- Ivanov AP, Ivanova OE, Pozdniakov SV, Andzhaparidze AG, Kusov Iulu, Donets MA. [The results of serological research to determine hepatitis A and B markers in the blood sera of the population of the Republic of Guinea]. *Vopr Virusol* 1990;35:382-4.

- Ajdukiewicz A, Mosley JW. Hepatitis-A-virus exposure in the Gambia. *Lancet* 1979;2:966.
- Szmuness W, Dienstag JL, Purcell RH, Stevens CE, Wong DC, Ikram H, et al. The prevalence of antibody to hepatitis A antigen in various parts of the world: A pilot study. *Am J Epidemiol* 1977;106:392-8.
- Baylet R, Lemaire JM, Ridet J. [Sero-epidemiology of hepatitis A. Results obtained in Senegal (Fleuve and Casamance regions) (author's transl)]. *Pathol Biol* 1981;29:217-21.
- Barin F, Denis F, Chotard J, Paulin R, Chiron JP, Maupas P, et al. Early asymptomatic hepatitis A in Senegalese children. *Lancet* 1980;1:212-3.
- Programme national de lutte contre le paludisme. Bulletin épidémiologique annuel 2019 du paludisme au Sénégal. Février 2020, 54P. <https://pnlp.sn/wp-content/uploads/2020/11/Bulletin-Epidemiologique-ANNUEL-2019-du-Paludisme-au-SENEGAL-VFinale.pdf>
- Daniel G Colley et al. Human schistosomiasis. *Lancet* 2014; 383: 2253-64
- Programme national de lutte contre les bilharzioses et géohelminthiases. Rapport annuel 2019, 15 pages.
- Organisation mondiale de la Santé. Eradication de la dracunculose 2019. <https://www.who.int/fr/activities/eradicating-dracunculiasis>
- Ministère de la santé et de l'action sociale. Plan stratégique de lutte contre intégrée contre les maladies tropicales négligées 2016-2020. 2016 ; 167 pages. https://espen.afro.who.int/system/files/content/resources/SENEGAL_NTD_Master_Plan_2016_2020.pdf
- Horowitz HS. Indexes for measuring dental fluorosis. *J Public health Dent* 1986 ; 46 :179-183.
- Allart N. La fluorose dentaire : étiologies, diagnostics et prise en charge au cabinet 2014. Thèse : Chir. Dent. Paris, 2014 N°77
- Amiard J-C. Les risques chimiques environnementaux : méthodes d'évaluation et impacts sur les organismes Paris : Lavoisier, 2011.
- Arbab CR, Foray H. Dental fluorosis: etiological diagnosis. *Archives de pédiatrie : organe officiel de la Société française de pédiatrie*. 2005 ;12(3):284-7
- Iheozor Ejiofor Z, Worthington HV, Walsh T, O'Malley L, Clarkson JE, Macey R, and al. Water fluoridation for the prevention of dental caries. *Cochrane database of systematic reviews*. 2015;12 (6):1-277
- Rabier C, Some N.A, Faye A, Sy M.H, YAM A.A, Biagui E.P, Thiam B. Enquête épidémiologique : impact du fluor ingéré via les eaux de boisson sur la santé des populations de cinq communautés rurales du Sénégal. *Journal des Sciences et Technologie* -2008 ;7 ; 2 : 7-12
- Diba PB. Le mystère persiste sur une maladie qui touche les pêcheurs sénégalais <https://www.scidev.net/afrique-sub-saharienne/news/le-mystere-sepaissit-sur-une-maladie-qui-touche-les-pecheurs-senegalais/>

POTENTIELS DE VALORISATION DES EAUX USÉES ET LES RISQUES SANITAIRES LIÉS À LEUR RÉUTILISATION ?

Ousmane HANE^{1*}, Issa SAKHO², Makha NDAO²

¹ Expert - Ingénieur Instrumentation- Métrologie environnementale, Paris, France.

² UMR Sciences, Technologies Avancées et Développement Durable, Université Amadou Mahtar Mbow de Dakar à Diamniadio, Sénégal.

* Corresponding author : omhane@gmail.com

1. Introduction

Le monde est confronté à des problèmes croissants de ressources en eau en quantité et en qualité. D'une part, la demande en eau croît avec l'accroissement des populations, la concentration des populations dans les villes et le développement d'usages récréatifs. D'autre part, la qualité des ressources en eau conventionnelle diminue avec la salinisation des aquifères littoraux surexploités et avec la décharge d'eau non ou insuffisamment traitée. Des tensions et des conflits pour la ressource en eau peuvent en résulter. La réutilisation des eaux usées en irrigation peut permettre de faire face à ces problèmes en ajoutant une ressource en eau et en limitant les rejets d'eaux usées dans les rivières, les aquifères et la mer (Takashi, 1998). Cette ressource contient des éléments fertilisants (N, P ...). L'avantage de cette pratique est non seulement d'apporter une ressource additionnelle mais apporte des fertilisants et contribue à économiser l'eau. La réutilisation des eaux usées est déjà bien implantée dans plusieurs pays après traitement (Israël, Chypre, Espagne, Italie ...), ou sans traitement préalable (Mexique, Pakistan ...). A l'opposé, la réutilisation des eaux usées reste anecdotique dans plusieurs pays, notamment au Sud du Sahara.

Toutefois, les eaux traitées peuvent contenir des pathogènes dont des virus entériques qui sont difficilement éliminés par les traitements classiques effectués dans les stations d'épuration. Lorsque ces eaux sont réutilisées pour des applications agricoles, le devenir de ces virus dans l'environnement est encore mal connu. Certaines études ont montré qu'il pouvait y avoir une contamination des cultures, des nappes voire une aérosolisation suite à l'irrigation de cultures par aspersion avec des eaux usées.

2. Les eaux usées : Un potentiel non encore exploré?

Au Sénégal, le déficit d'assainissement est le premier facteur limitant dans le processus de valorisation à grande échelle des eaux usées. Le figure ci-dessous présente les différentes stations d'épuration au Sénégal et les volumes d'eau journalier produits.

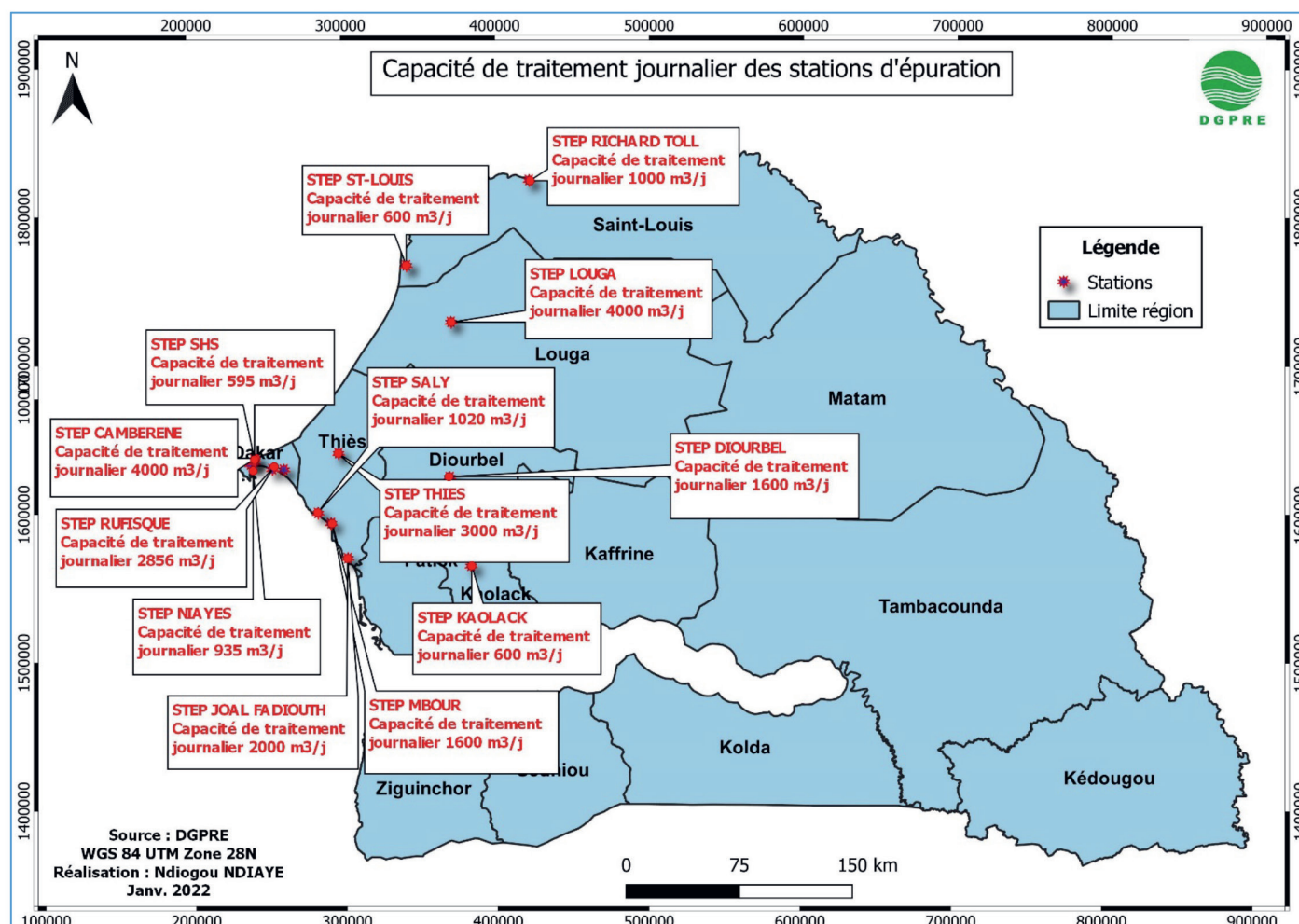


Figure 1 : Facteurs influant sur la survie des virus dans les sols (d'après BITTON and GERBA (1984))

Ces ressources en eau peuvent renforcer le dispositif actuel d'approvisionnement en eau pour le développement d'activités génératrices de revenu pour les populations, notamment locales. Toutefois, ces eaux peuvent présenter des risques sanitaires liés à la présence de virus.

3. Les virus dans les eaux usées

Qu'elles soient traitées ou non, les eaux usées contiennent divers polluants dont des pathogènes entériques de l'homme (OMS, 2009). De nombreux articles traitent des risques associés aux pathogènes contenus dans ces eaux : œufs d'helminthes (Salgot et al., 2003), protozoaires, bactéries et virus (Petrinca et al., 2009 ; Carducci et al., 2000). Les virus les plus couramment mentionnés dans les pays développés sont le virus de l'hépatite A, les Calicivirus et plus particulièrement le genre Norovirus, les Rotavirus et les Enterovirus. Les traitements classiques sont moins efficaces sur les virus que sur les autres pathogènes, notamment parce qu'il s'agit de virus nus: l'absence d'enveloppe lipidique leur confère une grande résistance dans l'environnement (Mattison and Bidawid, 2009). Ces virus sont respectivement responsables d'hépatites (Villar et al., 2007) et de gastro-entérites (Le Guyader et al., 2010 ; Da Silva et al., 2007). Les gastro-entérites à Norovirus ou 'winter vomiting disease's représentent un problème de santé publique majeure. Il s'agit de parasites obligés contaminants à très faible dose: environ 10 virus suffiraient à provoquer une infection contre 10 000 à 100 000 bactéries. Leur présence dans l'environnement résulte d'apports pouvant être massif lors des épidémies de gastro-entérites. Une personne infectée amène entre 10^{10} et 10^{12} (voire jusqu'à 10^{13}) particules virales par gramme de selles) pendant la période symptomatique et jusqu'à 3 semaines après cette période. Par ailleurs, certaines personnes peuvent être sujettes à des infections asymptomatiques avec des excréctions virales similaires en quantité. Ces virus se retrouvent dans les eaux usées arrivant aux stations d'épuration (STEP).

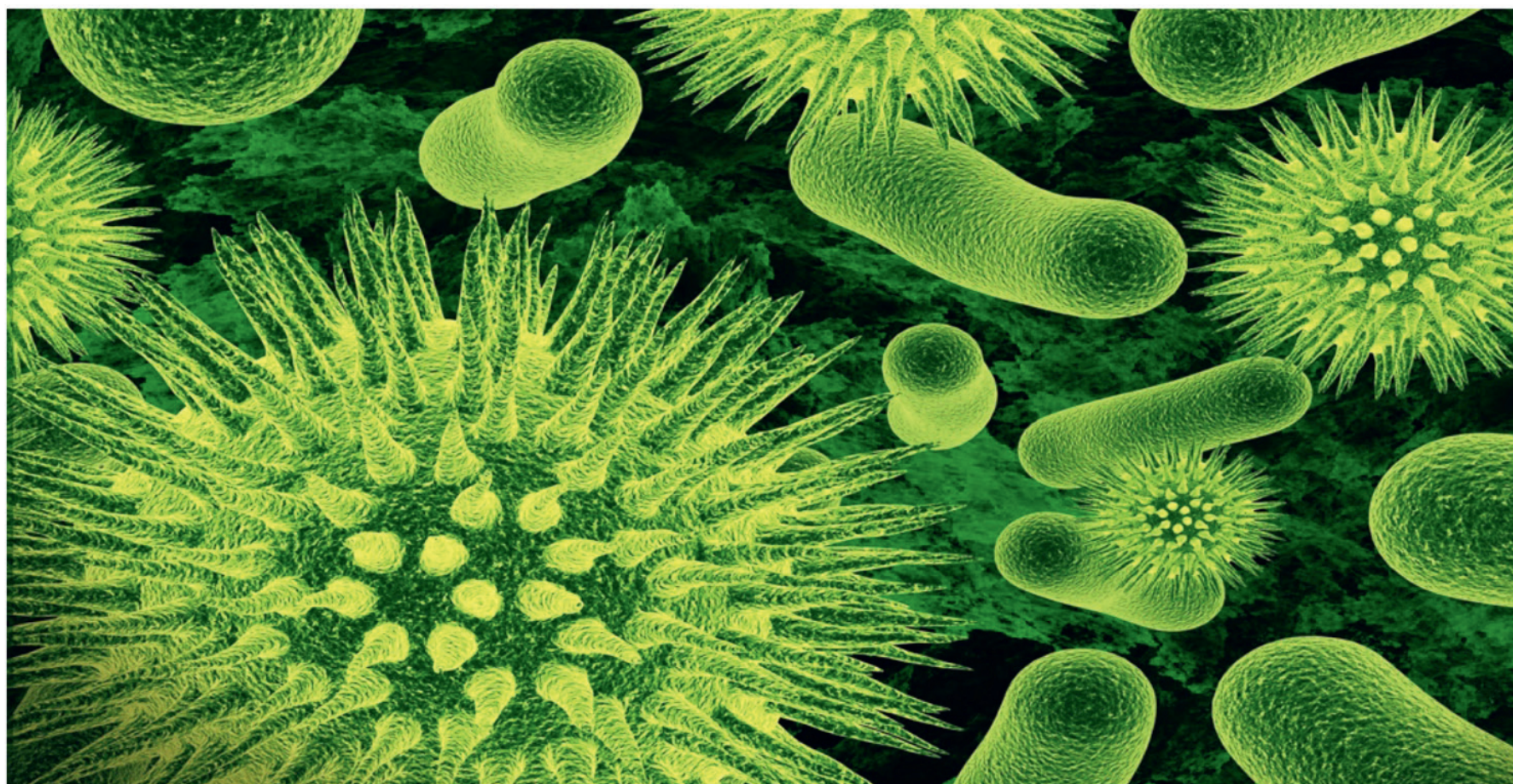


Image : Wikimedia Commons

Tableau 1. Virus pathogènes pour l'homme susceptibles d'être rencontrés dans le milieu hydrique (VIRUS HUMAINS ET SANTE PUBLIQUE : CONSEQUENCES DE L'UTILISATION DES EAUX USEES ET DES BOUES EN AGRICULTURE ET CONCHYLICULTURE, Louis SCHWARTZBROD)

Familles	Nature de l'acide nucléique	Genres	Taille	Espèces	Sérotypes	Maladie provoquée
<i>Picornaviridae</i>	ARN	<i>Entérovirus</i>	20 à 30 nm	Virus Poliomyélitique	3	Paralysie, méningite, fièvre, poliomyélite. Méningite, infection respiratoire, herpangine.
				Virus <i>Coxsackie</i> A	23	
				Virus <i>Coxsackie</i> B	6	
				Echovirus	30	
				<i>Entérovirus</i> 68 à 71	4	Méningite, encéphalite, atteinte des voies respiratoires, conjonctivite hémorragique.
		<i>Hépatovirus</i>	27 nm	Virus de l'hépatite A	1	Hépatite infectieuse.
<i>Reoviridae</i>	ARN (bicaténaire et fragmenté)	<i>Réovirus</i>	75 nm	Réovirus humains	3	Non établie. Gastro-entérite.
		<i>Rotavirus</i>		<i>Rotavirus</i> humains	6 (groupes)	
<i>Caliciviridae</i>	ARN	<i>Norwalk-like virus</i> (NLV)	20 à 35 nm	Genogroupes I et II	> 15	Gastro-entérite.
		<i>Sapporo-like virus</i> (SLV)		Genogroupe III	> 3	Gastro-entérite.
<i>Astroviridae</i>	ARN	<i>Astrovirus</i>	27 à 30 nm	Astrovirus humains	7	Gastro-entérite.
<i>Coronaviridae</i>	ARN	<i>Coronavirus</i>	120 nm	Coronavirus humains	2	Entérocolite.
	ARN	<i>Torovirus</i>	120 nm	Torovirus	?	Gastro-entérite.
<i>Adenoviridae</i>	ADN	<i>Mastadénovirus</i>	70 à 90 nm	Adénovirus humains	49	Infection respiratoire, conjonctivite et gastro-entérite.
?	ARN	?	20 à 35 nm	Virus de l'hépatite E	1	Hépatite infectieuse.

4. Les risques sanitaires liés à la réutilisation des eaux usées

Plus de 70% des boues issues des stations de traitement des eaux usées sont utilisées en agriculture, dans le but d'apporter aux sols de la matière organique et des éléments fertilisants comme de l'azote et du phosphore. Ces boues de stations de traitement des eaux usées produites peuvent contenir et disséminer des virus lors des épandages agricoles. En effet, ces virus entériques contenus dans ces boues et les eaux usées sont ainsi déposés sur les cultures et sur le sol au niveau duquel ils sont susceptibles de survivre. Il y a alors la création d'un risque pour la santé publique soit à la suite de la contamination de nappes d'eaux souterraines par migration des virus à travers les sols, soit par consommation de produits maraîchers contaminés. Après apport au champ avec les eaux usées, les virus peuvent être transportés sur des distances variables et contaminer les eaux souterraines, les plantes et l'atmosphère. Ils peuvent ainsi atteindre les personnes manipulant les eaux usées comme les populations à proximité des lieux d'épandage, et les consommateurs de produits issus de l'agriculture irriguée.

Les durées de survie des virus entériques dans le sol, rapportées dans la littérature sont très variables : entre 11 à 180 jours. Sur les végétaux, la durée de vie des virus entériques est variable et peut aller de quelques jours à près de quatre semaines en fonction des conditions environnementales. Carducci et al. (2000) ont mentionné le risque d'inhalation des pathogènes pour les personnes à proximité de STEP. Des suivis sanitaires montrent que plus de 50% des ouvriers des stations d'épuration présentent des anticorps pour l'hépatite A (Brugha et al, 1998). Au champ, l'irrigation par des eaux usées peut aboutir à une contamination des cultures et des eaux souterraines, voire à une aérosolisation des virus pour les systèmes d'irrigations par aspersion (Metcalf et al. 1995). Les risques sont conditionnés par la présence ou non d'un traitement des eaux avant recyclage et par la nature et le degré du traitement (Simonet et Gantzer, 2006). Des résultats bien que préliminaires nous montrent que sous certaines conditions (surface sèche et vent fort) les virus repartent dans l'air en quantité plus importante que sous des conditions de vent faible. Ils apparaissent satisfaisants et représentent une première contribution qui nous permet d'attirer l'attention des utilisateurs des eaux usées, des riverains et au-delà des pouvoirs publics sur les risques liés à la réutilisation d'eaux usées par les systèmes d'aspersion.

Tableau 2 : Facteurs influant sur la survie des virus dans les sols (d'après BITTON and GERBA (1984))

Facteurs	Commentaires
Température	L'élévation de température est facteur le plus préjudiciable
Dessication	Facteur très préjudiciable aux virus. La dessication augmente l'inactivation virale dans les sols.
Ensoleillement	Peut être préjudiciable directement au niveau de la surface du sol et indirectement par augmentation de la température.
pH	Affecte indirectement la survie des virus en contrôlant leur adsorption et leur désorption des particules de sol.
Cations	Certains cations (Mg) ont un effet de thermostabilisation des virus. Les cations peuvent aussi favoriser l'adsorption des virus sur les sols. Or, les virus semblent survivre plus longtemps à l'état adsorbé.
Nature du sol	Les argiles et les substances humiques augmentent la rétention d'eau par les sols et de ce fait augmentent la survie des virus sensibles à la dessication.
Facteurs biologiques	Pas de notion claire en ce qui concerne l'action de la microflore du sol alors que, il y a quelques évidences de synthèse de substances virucides par la microflore des eaux.



Agriculture, arrosage des espaces verts, les usages sont multiples. En France, 0,6 % des eaux usées traitées sont réutilisées.
© Sura Nualpradid, Adobe Stock

5. Perspectives

La réutilisation des eaux usées se présente comme une alternative intéressante pour faire face aux problèmes croissants des ressources en eau en qualité et en quantité. Une vulgarisation de cette pratique bien que prometteuse, nécessite une évaluation des risques sociétaux, technologiques, sanitaires, agricoles et environnementaux. Sur le plan sanitaire, il est hautement souhaitable :

- Evaluer d'une manière claire les conséquences éventuelles de l'utilisation de boues d'épuration et d'eaux usées en agriculture,
- Promouvoir des enquêtes épidémiologiques pour déterminer si la détection de plus en plus fréquente dans le milieu hydrique de génome de Caliciviridae (Norwalk like virus) se traduit par une augmentation réelle du taux de gastroentérite.
- Evaluer le degré de contamination des eaux souterraines à la suite d'irrigation par des eaux usées (ou de surface polluées) et/ou d'utilisation de boues en amendement agricole.

Ces préalables permettront d'adapter la réglementation, le partage du coût des traitements qui sont autant de goulots qui confinent cette pratique dans un caractère marginal, voire anecdotique. On pourrait ainsi promouvoir, une réutilisation d'une eau intelligente au service de l'intelligence de l'eau.

En revanche, les virus présents dans les eaux usées sont utilisés aujourd'hui comme traceur par des groupes de recherche. De façon très synthétique, ces chercheurs développent un outil capable de détecter de manière fiable la circulation des virus. Il s'agirait alors de détecter les prochaines vagues de covid-19, mais aussi d'autres virus, celui de la gastro-entérite, celui de la grippe et peut-être les prochaines menaces, dont on ne sait encore rien.

6. Références bibliographiques

Bedos, C., M. F. Rousseau-Djabri, et al. 2002. «Rate of pesticide volatilization from soil: an experimental approach with a wind tunnel system applied to trifluralin.» *Atmospheric Environment*, 36(39-40): 5917-5925.

Brugha R., Heptonstall J., Farrington P., Andren S., Perry K., Parry J., 1998., Risk of Hepatitis A Infection in Sewage Workers. *Occup Environ Med*, vol. 55, no. 8, 567-569.

Carducci, A., E. Tozzi, et al. 2000. «Assessing airborne biological hazard from urban wastewater treatment.» *Water Research* 34(4): 1173-1178.

Costafreda, M.I., Bosch, A. and Pinto, R.M., 2006. Development, evaluation, and standardization of a real-time TaqMan reverse transcription-PCR assay for quantification of hepatitis A virus in clinical and shellfish samples. *Applied and Environmental Microbiology*, 72(6): 3846-3855.

Da Silva A.K., Le Saux J.C., Parnaudeau S., Pommepuy M., Elimelech M., Le Guyader F.S. 2007. Evaluation of Removal of Noroviruses during Wastewater Treatment, Using Real-Time Reverse Transcription-PCR: Different Behaviors of Genogroups I and II. *Applied and Environmental Microbiology* 73(24), 7891-7897

Lazarova, V., Brissaud, F., 2007. Intérêt, bénéfices et contraintes de la réutilisation des eaux usées en France. *L'eau, l'industrie, les nuisances*, (299), 23-39.

Le Guyader F.S., Krol J., Ambert-Balay K., Ruvoen-Clouet N., Desaubliaux B., Parnaudeau S., Le Saux J.C., Ponge A., Pothier P., Atmar R.L., Le Pendu J., 2010. Comprehensive analysis of a norovirus-associated gastroenteritis outbreak, from the environment to the consumer. *Journal of Clinical Microbiology* 48(3), 915-920. (doi:10.1128/JCM.01664-09).

Loubet, B., Cellier, P., Flura, D. and Genermont, S., 1999. An evaluation of the wind-tunnel technique for estimating ammonia volatilization from land: Part 1. Analysis and improvement of accuracy. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 72(1): 71-81.

Louis SCHWARTZBROD Centre Collaborateur OMS., 2000. Virus humains et santé publique : conséquences de l'utilisation des eaux usées et des boues en agriculture et conchyliculture, 289-290

Mattison K., Bidawid S., 2009. Analytical Methods for Food and Environmental Viruses. *Food and Environmental Virology*, 107-122.

Petrinca A.R., Donia D., Pierangeli A., Gabrieli R., Degener A.M., Bonanni E., Diaco L., Cecchini G., Anastasi P., Divizia M. 2009. Presence and environmental circulation of enteric viruses in three different wastewater treatment plants.

OMS 2009 PNRH GEOPHYSIQUE – HYDROLOGIE 99 : un premier compte-rendu des expérimentations sur le site INRA d'AVIGNON, 1999.

Salgot M., Vergés C., Angelakis A.N., 2003. Risk assessment in wastewater recycling and reuse. *Water Science and Technology: Water Supply* 3(4), 301-309.

Simonet J., Gantzer C., 2006. Degradation of the Poliovirus 1 genome by chlorine dioxide. *Journal of Applied Microbiology*, 100, 862-870.

Takashi A., 1998. Wastewater reclamation and reuse (water quality management library, 10). 1528p.



CHAPITRE 7

TRAITEMENTS DE L'EAU

DÉFLUORURATION ET DESSALINISATION PAR LES PROCÉDÉS MEMBRANAIRES AU SÉNÉGAL : DÉFIS ET PERSPECTIVES ?

Mouhamed Ndong^{a,c,*}, Maryam Khadim Mbacké^{b,c}, Elhadji D. Thiam^a, Cheikhou Kane^{a,c}, Codou Guèye Mar Diop^{a,c,d}

- a. Département Génie Chimique et Biologie Appliquée, École Supérieure Polytechnique de Dakar, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, Corniche Ouest, BP 5085, Dakar, Sénégal)
- b. Université Amadou Mahtar Mbow, Lot No75R VDN, Cité Keur Gorgui, BP 45 927, Dakar (Sénégal)
- c. Membre de l'association Africaine des membranes
- d. Membre de l'Académie Nationale des Sciences et Techniques du Sénégal

1. Introduction

La problématique de la disponibilité de l'eau potable n'est plus à démontrer. Les pays en voie de développement comme le Sénégal font face à une forte croissance démographique. Cet état de fait implique de rendre accessible en quantité et en qualité les eaux de boisson pour la consommation. La qualité de l'eau et sa disponibilité sont des préoccupations majeures qui nécessitent des réflexions axées sur les techniques de traitement les plus viables. Il existe très peu de sources d'eau qui pourraient être utilisées directement comme eau de boisson sans aucun traitement préalable. Les deux grandes catégories de traitement les plus répandues à travers le monde sont : les traitements physico-chimiques et les traitements membranaires.

Les traitements membranaires ont été dans le passé jugés onéreux pour les pays en voie de développement compte tenu de leur coût énergétique. Cependant, l'amélioration des performances énergétiques des procédés membranaires à booster leur usage au Sénégal. Les premières recherches au Sénégal dans le domaine du traitement membranaire ont débuté dans les années 1988 avec l'équipe du professeur Codou Mar au laboratoire d'Électrochimie et des Procédés Membranaires de l'École Supérieure Polytechnique de Dakar.

2. Technologies membranaires

Depuis quelques années, les technologies membranaires telles que l'osmose inverse et la nanofiltration (comparaison en Tableau 1) sont expérimentées au Sénégal à travers des initiatives telles que le PEPAM (Figure 1).

Tableau 1 : Comparaison des différentes techniques membranaires

	Osmose inverse	Nanofiltration
Diamètre de pore	Membrane dense	0,4 à 1 nm
Rétention des sels ($R=1-C_p/C_0$)	quasi-totale ($R >95\%$)	Sélectivité ($20 < R < 95\%$)
Pression	>30 bars	<20 bars
Prétraitement et Post-traitement	Indispensables (limitation du colmatage physique et chimique)	Simplifiés (Pas d'étape de Reminéralisation)
Production	10 à 60 L.h-1.m-2	50 à 100 L.h-1.m-2
Consommation Énergétique	2 à 10 kwh.m-3	1 à 2 kwh.m-3



Usine de Thiadiaye (32 m3/h)
installé en 2009



Usine de Ngékikh (capacité : 8 m3/h)
installé en 2013



Unité installé avec une capacité de
0,5 m3/h à : Keur Mariama et Dankh
Sene (avait été prévu pour
Ndiagate, Ndiago, Sibassor, Diaoulé,
Somb, Patar, Taiba Mouthoupha,
Ndiindy et Dalla
(entre 2012 et 2014)



Unité à Thiakhar (10 m3/h)
installé en 2008



Système particulier avec une capacité de 0,16
m3/h à : Fatick, Diamniadio, Famb.ne, Maya,
Ngadior, Diarrène, Djirnda, Niakhar, Wakhaldiam,
Ngayokhém (entre 2011 et 2014)

Figure 1 : Quelques unités de traitement recensées (Fluor et sel dans l'eau: défis et solutions : PEPAM AQUA, 2013)

Rappelons également que le gouvernement du Sénégal a déjà réfléchi sur la stratégie d'amélioration de la qualité de l'eau à travers un document publié en 2016¹. Cette étude relève les problématiques de qualité de l'eau et les différentes zones concernées (Tableau 2).

Tableau 2 : Répartition des problématiques de qualité de l'eau sur le territoire Sénégalais

Type problème	Éléments indésirables ou type de pollution	Zone ou phénomène concerné	système hydrologique concerné
Physico-chimique	Forte turbidité	Vallée du fleuve Sénégal et lac de Guiers	Fleuve Sénégal, Lac de Guiers
	Présence de pesticides (parathion, Trifuraline, méthamidophos)	Lac de Guiers et éventuellement zones alimentées par les eaux du lac de Guiers	Lac de Guiers
	Forte teneur en sel	Zones deltaïques et basse vallée du fleuve Sénégal	Toutes les nappes de ces zones et l'aval du fleuve Sénégal
	Forte teneur en sel et fluor	Bande centrale salée du Maastrichtien et eaux saumâtres des aquifères Eocène et Paléocène	Nappes du Maastrichtien, du Paléocène et de l'Eocène
	Teneur en fer supérieure à la norme	Presque tout le pays	Presque dans toutes nappes
	Forte teneur en nitrate	zones d'intenses activités agricoles peu encadrées : Vallée du Fleuve Sénégal, zone des Niayes, bassin de l'Anambé et éventuellement périmètres PRODAC, ANIDA	Nappes superficielles
	Risque de teneur élevée en mercure et arsenic	Zones d'orpaillage du sud-est	Cours d'eau et nappes du socle
	Hydrogène sulfurée	Zone Sud (Ziguinchor)	Nappe de l'Oligo-Miocène
Bactériologique	Pollution bactériologique	manque de systèmes d'assainissement appropriés, mauvaise qualité des branchements eau potable et assainissement, présence de nappe peu profonde, rejets d'eau usée,	Nappes peu profondes et cours d'eau
	Pollution bactériologique	défaut d'entretien des ouvrages et réseaux hydrauliques, mauvais comportement, manque d'hygiène	Réseaux, ouvrages hydrauliques, dispositifs de transport et stockage d'eau à domicile
	Consommation d'eau impropre (puits, cours d'eau, sachets d'eau)	Zones à puits peu profonds et avec cours d'eau de surface et avec forages avec prix de l'eau relativement élevé	
	Consommation d'eau impropre (en sachets)	Partout dans le pays en particulier dans les grandes agglomérations (milieu urbain et péri urbain)	

¹Ministère de l'Hydraulique et de l'Assainissement, Direction de la Gestion et de la Planification des Ressources en Eau, Étude pour l'élaboration d'une Stratégie Nationale d'Amélioration de la Qualité de l'eau potable au Sénégal (2016), 94p

Afin d'évaluer l'expérience du Sénégal en termes d'utilisation des technologies membranaires dans le service d'approvisionnement en eau de boisson, l'unité d'osmose inverse de Thiakhar est prise en exemple. Il s'agit d'une unité (Figure 2) dont les eaux présentent des teneurs élevées en chlorures et en fluor.



Tableau 3 : Classification de la minéralisation globale

■ 142

Tableau 4 : Paramètres physico-chimiques des eaux issues du système de traitement

	Eau brute	perméat	concentrât
TA en °f	0,8	0	2,5
TAC en °f	44,2	1,3	87,1
TH en °f	36	1,3	48
Ca ²⁺ en mg/L	15,36	0,61	-----
Mg ²⁺ en mg/L	8,76	0	-----
Cl ⁻ en mg/L	610,6	22,4	1136
NO ₃ ⁻ en mg/L	36	2,552	94,28
SO ₄ ²⁻ en mg/L	55	1,167	61,67
F ⁻ en mg/L	2,874	0,0867	5,677
HCO ₃ ⁻ en °f	42,6	1,3	84,6
HCO ₃ ⁻ en mg/L	519,72	15,86	1032,12
pH	8,65	7,07	8,75
Conductivité en µs/cm	1570,5	44,6	3007,99
Salinité en mg/L	779,71	20,82	1693,64
Température en °C	38,4	39,06	38,77

- **L'eau brute** : Les résultats montrent qu'elle contient plusieurs paramètres physico-chimiques qui dépassent largement les Recommandations de l'OMS tels que : le fluor (la Valeur Maximale Admissible (VMA) est de 1,5 mg/L) ; la dureté totale (la VMA est de 10 °f), la conductivité (la VMA est de 250 µs/cm), les chlorures (la VMA est de 250 mg/L). Au vu de ces résultats, on peut dire que la consommation à long terme de cette eau peut avoir une conséquence néfaste sur la santé de la population.
- **L'eau osmosée** : Les propriétés physico-chimiques de l'eau osmosée confirment en effet l'efficacité du traitement, car tous les paramètres ont des valeurs très inférieures aux VMA fixées par l'OMS. C'est ainsi qu'on a une réduction de 96,98 % du fluor, 98,57% des solides dissous, de 96,39% de la dureté totale et de 96,95% des bicarbonates. La conductivité est inférieure à 100 µs/cm, ce qui signifie que c'est une eau qui est très faiblement minéralisée d'après la littérature. Ceci est d'ailleurs confirmé par les teneurs des minéraux qui sont très inférieures aux teneurs optima pour une eau de boisson d'une valeur nutritive satisfaisante.
- **Le concentrât** : Les paramètres physico-chimiques du concentrât ont des teneurs très élevées, ce qui rend son utilisation directe par les animaux ou les végétaux très difficile. Nous allons cependant essayer de voir dans les détails ses impacts environnementaux ainsi que ses éventuels débouchés.

Ces résultats permettent de conclure qu'on a une eau osmosée de bonne qualité physico-chimique et organoleptique mais qui reste faiblement minéralisée. Il serait alors important de mener une étude de rééquilibrage des minéraux afin de donner à l'eau osmosée une valeur nutritive plus considérable.

• Impacts environnementaux :

- **Le Sodium** : Une fois sous forme liquide, l'hydroxyde de sodium pénètre rapidement dans le sol sous forme de lixiviation, souillant probablement des sources d'eau.
- **Les Sulfates** : Les animaux sont sensibles aux niveaux élevés de sulfate. Pour les jeunes animaux, des teneurs élevées de sulfate dans l'eau peuvent créer des diarrhées sévères et dans certains cas la mort.
- **Le Fluor** : Pour les plantes qui sont sensibles aux expositions de fluorures, même à des concentrations faibles peuvent entraîner des dommages et gêner la croissance.
- **Les Chlorures** : à concentration élevée, sont absorbés par les racines des végétaux et accumulés dans les feuilles. Ils provoquent ainsi des brûlures débutant à la pointe des feuilles âgées et progressant vers l'arrière en suivant les bords du limbe. Une forte concentration de chlorures confère à l'eau un goût désagréable (trop salé) qui rend son utilisation directe impossible pour l'abreuvement des animaux. Une corrosion des conduites et des réservoirs est observée à partir d'une concentration de 50 mg/L, surtout pour les éléments en acier inoxydables.

• Valorisation de l'eau de rejet :

Au cours de la production, une grande quantité de concentrat est rejetée dans la fosse (environ 50% de la quantité d'eau brute). Pour une meilleure rentabilité de l'installation il serait intéressant de voir les perspectives pour la valorisation de cette eau. Par conséquent, nous proposons : Une dilution du concentrat au niveau des abreuvoirs avec de l'eau brute ; La production de saumure, avec comme sous-produit l'eau distillée qui peut être utilisée lors de la dilution du rejet pour l'abreuvement des animaux ou vendue aux industriels. Des études technico- économiques permettront d'avoir une vision plus nette sur la faisabilité de ces procédés.

3. Études de rééquilibrage de l'eau osmosée

L'apport des minéraux se fait par ajout d'eau brute qui permettra alors le rééquilibrage minéral de l'eau osmosée et son confort gustatif. Le rééquilibrage consiste en un mélange de l'eau brute à l'eau osmosée suivant des proportions à déterminer tout en tenant compte de la teneur en fluor du mélange obtenu, autrement dit, de l'eau osmosée équilibrée.

Tableau 5 : Caractéristiques de l'eau osmosée équilibrée

F- (mg/L)	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
TA (°f)	0	0	0	0	0	0	0
TAC (°f)	1,7	2,1	2,5	3,1	3,5	4,1	4,7
TH (°f)	1,5	1,6	1,8	2,1	2,4	2,7	3
Na+ (mg/L)	14,5	30,1	45,6	65,2	81,4	93,1	97,5
K+ (mg/L)	0,4	0,7	1,1	1,1	1,4	1,4	1,7
Cl- (mg/L)	22,8	41,3	60,4	73	109	137	139
NO3- (mg/L)	5,7	8,4	12,3	15	17,2	20,7	23
SO42- (mg/L)	2	2,2	2,25	2,4	2,7	3,7	5,2
HCO3- (°f)	1,7	2,1	2,5	3,1	3,5	4,1	4,7
HCO3- (mg/L)	20,74	25,6	30,5	37,8	42,7	50,0	57,3
Résidu sec à 180°C (mg/L)	20	160	160	280	320	380	420
Salinité (mg/L)	22,3	40,1	50,7	67,3	87,3	123,3	140,5
Conductivité (µs/cm)	47,6	85,4	106,4	143,2	188,9	259	297
pH	7,47	7,56	7,71	7,77	7,91	8,07	8,10

On note suivant la valeur de la conductivité, une faible minéralisation pour des concentrations en fluor allant de 0,1 mg/l à 0,5 mg/L (conductivité inférieure à 200 µs/cm). En outre, de 0,5 mg/L à 0,7 mg/L on a une minéralisation globale moyenne. Cependant, les Recommandations de l'OMS sur la conductivité de l'eau potable nous limitent à 250 µs/cm, ce qui exclut la concentration de 0,7 mg/L. Concernant les autres paramètres physico-chimiques les Recommandations de l'OMS pour une eau potable sont respectées. En guise de conclusion, on peut dire qu'une minéralisation moyenne peut être obtenue pour une plage de concentration en fluor située entre 0,5 mg/L à 0,6 mg/L, donnant ainsi à l'eau osmosée une valeur nutritive considérable et un confort gustatif.

4. Perspectives de recherche

L'ensemble des observations et résultats tirés de cette expérience de Thiakhar doivent être pris en considération afin de consolider les arguments sur le choix de cette technologie de traitement membranaire d'osmose inverse et d'anticiper les éventuelles problématiques qui devront trouver réponse à travers des initiatives de recherche. Notons également que ces technologies membranaires peuvent être utilisées en traitement des eaux usées mais aussi dans la chaîne de valorisation des fruits locaux durant leur processus de transformation en jus et autres sous-produits.

QUELLES SOLUTIONS DE TRAITEMENT POUR DES EAUX POLLUÉES ?

Makha NDAO1*, Issa SAKHO1, Elhadji Serigne Mamour DIOP2

¹Université Amadou Mahtar MBOW, UMR Sciences, Technologies Avancées et Développement Durable, Cité Keur Gorgui, Dakar, Sénégal

²Université Gaston BERGER, UFR de Sciences Appliquées et de Technologies, Sanar, Saint-Louis, Sénégal

* Corresponding author : makha.ndao@uam.edu.sn

1. Introduction

L'accès universel à l'eau et sa disponibilité pour les écosystèmes sont l'un des enjeux majeurs pour les générations actuelles et futures. Cependant, le contexte actuel de changement climatique rend extrêmement complexe la prise en charge de ces défis. Certaines contraintes naturelles majeures liées à une « planète d'eau salée » renforcent cette complexité : (i) à l'échelle mondiale, 97,5 % de l'eau est salée, (ii) sur les 2,5 % d'eau douce, 68,9 % sont stockés dans les glaciers, 30,8 % dans les réservoirs souterrains et seulement 0,3 % dans les lacs et les cours d'eau. La quantité d'eau douce disponible pour les populations et les écosystèmes représente moins de 1% du volume total des ressources en eau et seulement 0,01 % de l'eau sur la planète (Gleick, 1993 ; Shiklomanov, 1999). Au vu de nos besoins en eau potable, les organisations telles que l'ONU et l'OMS prédisent un stress hydrique à partir de 2025.

A cela s'ajoute la grande problématique de la qualité des eaux. Dans certaines zones du Sénégal, les eaux souterraines sont caractérisées par des teneurs très élevées en chlorure, en nitrate et/ou en fluor. Ces eaux représentent un potentiel très important pour renforcer le processus de satisfaction des besoins en eau pour la consommation humaine et le développement d'activités génératrices de revenus pour la réduction de la pauvreté.

Cette question, dont l'enjeu sociétal est majeur, fait l'objet de nombreuses recherches fondamentales et appliquées. En effet, l'amélioration des connaissances sur les mécanismes de transport de l'eau et des ions à travers des membranes d'osmose inverse permettrait de proposer de nouvelles membranes telles que la perméabilité à l'eau et la rétention des sels seraient largement améliorées. L'effet direct, serait un abaissement des coûts énergétiques des installations de dessalement conventionnelles et une technologie accessible à tous.

2. Solutions de traitement

2.1. Eaux salées

Objectif : dessalement de l'eau de mer et/ou des eaux saumâtres (eaux estuariennes, les nappes) pour diversifier et renforcer le dispositif d'approvisionnement en eau des populations.

Technologies : traitement membranaire par Osmose inverse (Reverse Osmosis- R. O).

Les technologies conventionnelles de dessalement présentent de gros inconvénients :

- Couteuse : quantités d'énergie nécessaire au chauffage et à la pompe trop élevées
- Faible rentabilité, faible volume d'eau produit, faible perméabilité des membranes.

L'osmose inverse (R. O) et la nanofiltration sont devenues l'un des procédés les moins coûteux. Ces deux procédés sont de plus en plus améliorés grâce à de nombreux types de matériaux membranaires développés ces dernières années. Parmi ces matrices poreuses, nous avons les matériaux nanoporeux à 2 dimensions (monocouche) tel que le graphène qui présente une perméabilité 10 fois plus élevées que celle des membranes traditionnelles (polyamides,...). Ces membranes peuvent atteindre des taux de rejet du sel jusqu'à presque 100% (Figure 1).

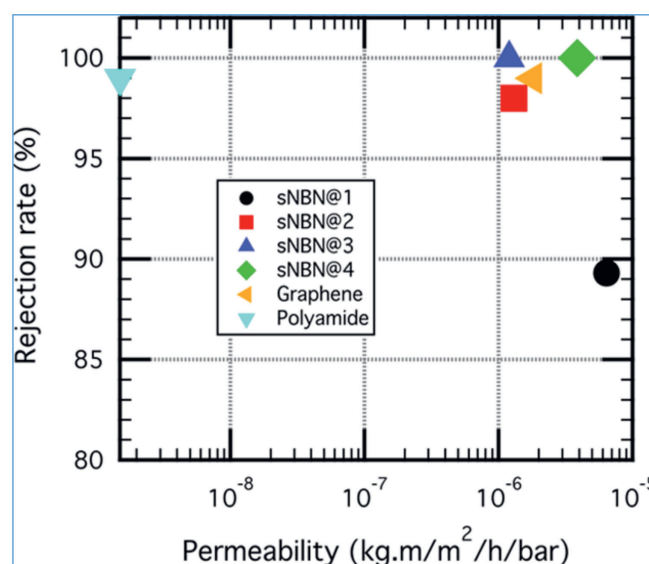


Figure 1 : Taux de rejet du sel en fonction de la perméabilité et du type de membre

Xavier Davoy et al., ACS Omega 2018, 3, 6305–6310

L'Osmose inverse (OI) : C'est un procédé de filtration permettant le passage de l'eau d'une solution aqueuse plus concentrée vers une solution aqueuse moins concentrée séparées par une membrane poreuse. Il permet le passage du solvant à travers la membrane sous l'effet de la concentration et du gradient de pression (Figure 2).

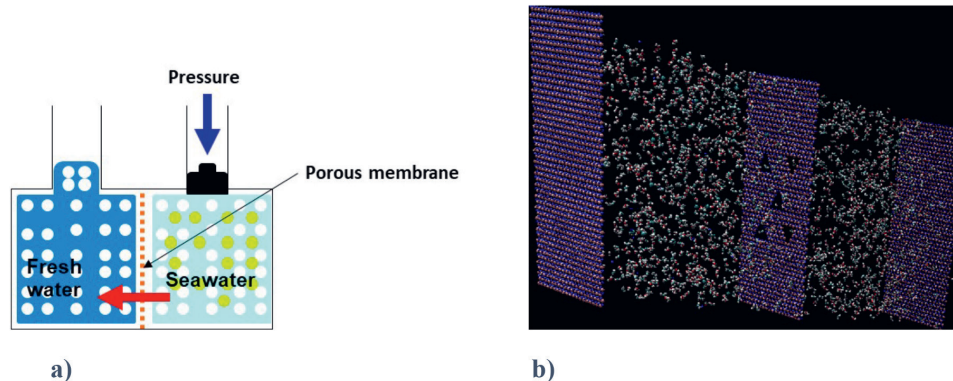


Figure 2 : a) procédés d'osmose inverse ; b) modèle de dessalement d'une eau de mer

En résumé, les applications de l'OI sont :

- Le dessalement des eaux
- L'adoucissement
- La potabilisation
- La production d'eau de process
- La production d'eau ultra- pure (pour l'industrie électronique)

2.2. Eaux polluées par les nitrates

Pour traiter les eaux souterraines et/ou de surface polluées par les nitrates, deux techniques sont souvent utilisées et combinées avec la nanofiltration.

a). Adsorption sur Carbone actif en grain (CAG) ou en poudre (CAP) :

Ce procédé d'adsorption des nitrates sur la CAG et/ ou sur le CAP est plus efficace à un pH acide ($\text{pH} < 4$). La dénitrification des eaux polluées par le nitrate avec le CAG et le CAP devient plus efficace avec l'augmentation de la teneur initiale en nitrates. Son efficacité par atteindre des rendements satisfaisants.

b). Coagulation- floculation au sulfate d'aluminium: cette technique est très pratique si l'eau brute (à traiter) est fortement chargée en nitrate. Pour plus d'efficacité, ce procédé nécessite de forte dose en sulfate d'aluminium.

Ces deux procédés peuvent être améliorés par un ajout du charbon actif en poudre comme adjuvant de coagulation.

Ces techniques de traitement s'appliquent au niveau du traitement primaire des eaux alors que la nanofiltration est un traitement tertiaire comme nous pouvons le constater sur la figure 3 ci- dessous.

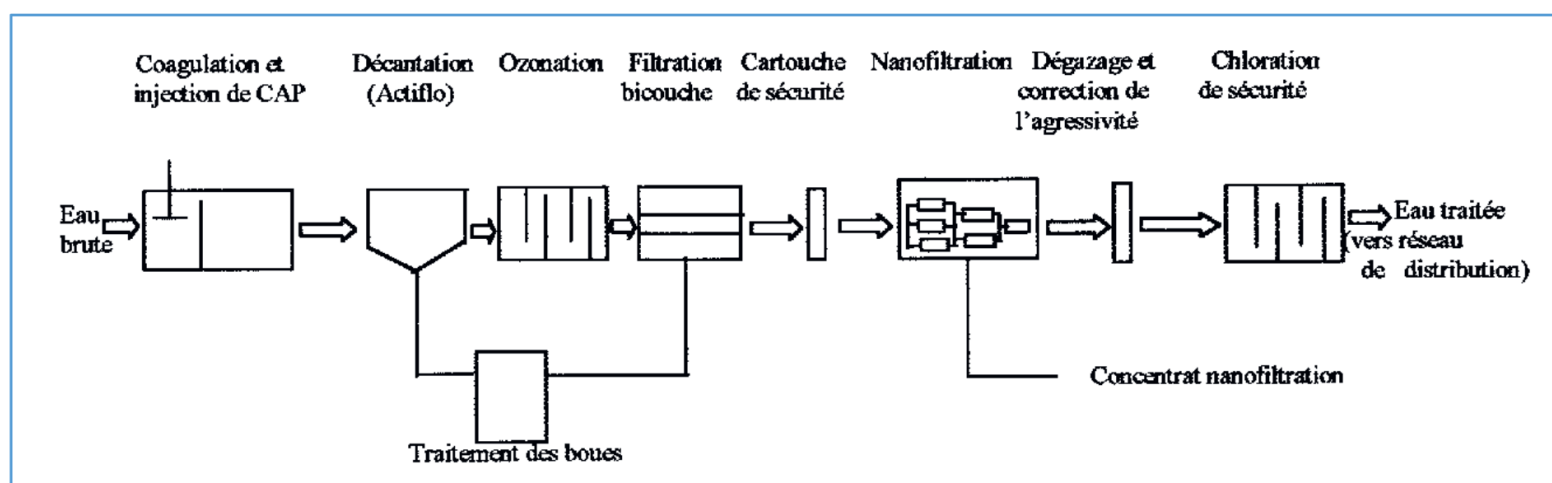


Figure 3 : Cycle traitement d'une eau polluée- traitement primaire par coagulation et injection de CAP et tertiaire par nanofiltration.

2.3. Eaux contaminées par le fer

Plusieurs techniques existent :

- Le Crystal Right (cristaux de silice) : il élimine la dureté (calcaire), le Fer, le Manganèse et augmente le pH. Cependant, pour une efficacité optimale, $\text{pH} > 5.7$ et dureté ($\text{TH} < 40^\circ\text{F}$).
- Le MTM (Manganèse Greensand) : Il combine oxydation et filtration pour le traitement des eaux polluées par la présence de fer. La technique consiste à révéler et précipiter le Manganèse et le Fer à l'état soluble au contact du Greensand. Il faut rincer ensuite les éléments captés sur le filtre pour les détasser.
- Le Deferriseur au BIRM : Produit filtrant économique qui accélère la réaction entre le fer dissout et l'oxygène. Il se forme l'hydroxyde de fer qui est facilement filtrable (voir figure 4).

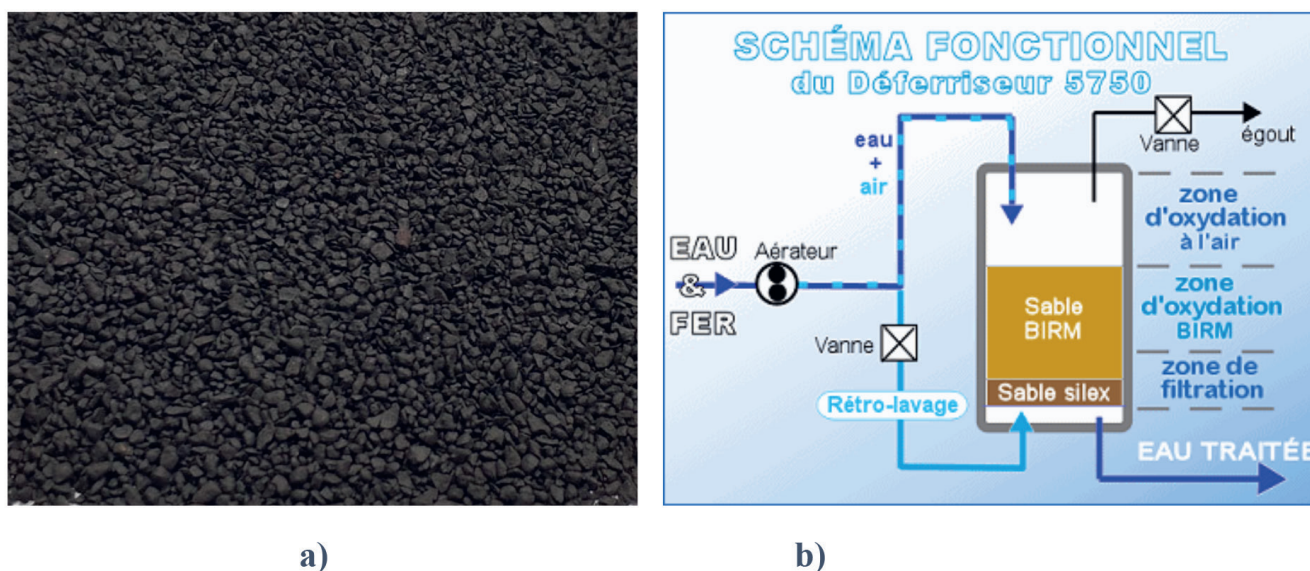


Figure 4 : a) Birm sable medias pour enlèvement du fer et b) Schéma fonctionnel du Déferriseur

- **Oxydation** : Procédé très efficace pour enlever le fer présent dans l'eau. Injecter de l'air pour précipiter et oxyder le fer dissout dans l'eau pour le capter dans un media catalyseur;
- **La nanofiltration (NF)** : elle est le dernier développement des membranes. Elle se trouve entre l'Osmose inverse (OI) et l'Ultrafiltration (UF). Les membranes utilisées ont une taille de l'ordre du nanomètre (nm).

3. A retenir

- On peut retenir pour traiter une eau caractérisée par des teneurs élevées en fer, il faut principalement deux étapes : l'oxydation et la filtration. L'une des technologies de filtration les plus innovantes est la nanofiltration. Elle a beaucoup prospéré ces dernières années. Elle est très utilisée, principalement, dans les procédés de purification d'eau, tels que l'adoucissement, la décoloration et surtout pour l'élimination des micros et nanopolluants.
- Le fer et les nitrates: combiner les techniques spécifiques pour chaque type paramètres à la technique de nanofiltration pour une meilleure dépollution des eaux contaminées.
- Le sel: l'Osmose inverse est le procédé le plus adapté et le plus efficace.
- Nitrates + sel: l'osmose inverse reste aussi une technique efficace.
- Quel que soit la technologie utilisée pour la dépollution ou le dessalement des eaux, un meilleur prétraitement augmenterait l'efficacité du procédé utilisé.
- Le niveau de traitement de l'eau définit son domaine de valorisation future: sanitaire, alimentaire, agricole, industrielle, BTP,...)

4. Perspectives

Développer des expérimentations en couplant des techniques de traitement traditionnel avec des techniques modernes pour la potabilisation des eaux.

QUELLES SONT LES POSSIBILITÉS DE GESTION ET DE VALORISATION DES RÉSIDUS ISSUS DU TRAITEMENT DES EAUX USÉES ?

Makha NDAO^{1*}, Ousmane HANE², Issa SAKHO¹

¹ Université Amadou Mahtar MBOW, UMR Sciences, Technologies Avancées et Développement Durable, Cité Keur Gorgui, Dakar, Sénégal.

² Expert - Ingénieur Instrumentation- Métrologie environnementale, Paris, France.

* corresponding author : makha.ndao@uam.edu.sn

1. Introduction

L'entretien des réseaux de collectes, les traitements des stations d'épuration et l'assainissement des eaux usées génèrent plusieurs types de sous produits donc des déchets. Le vaste potentiel des eaux usées en tant que source de ressources, demeure sous exploité. Le traitement amélioré des eaux usées, l'augmentation de la réutilisation de l'eau, et la récupération de produits dérivés utiles favorisent la transition vers une économie circulaire, en contribuant à la réduction des prélèvements d'eau et à la perte de ressources dans les systèmes de production et les activités économiques.

Les stations d'épuration génèrent des déchets de plusieurs ordres :

- Des déchets solides de toute nature : bois, bouchons en plastique, feuilles
- Matière grasse de dégraissage- déshuilage
- Mais surtout des boues qui sont principalement constituées de particules solides non retenues par les prétraitements en amont de la station d'épuration, soit des matières organiques non dégradées, des matières minérales et des micro-organismes. Les principales filières proposées dans le cadre de la valorisation des boues sont :
 - L'épandage
 - Le compostage
 - Méthanisation
 - Co-incinération dans les industries (cimenteries) comme combustibles de substitution.

Le schéma ci- dessous résume les techniques de traitement et de valorisation des différents types de déchets issus du traitement des eaux usées.

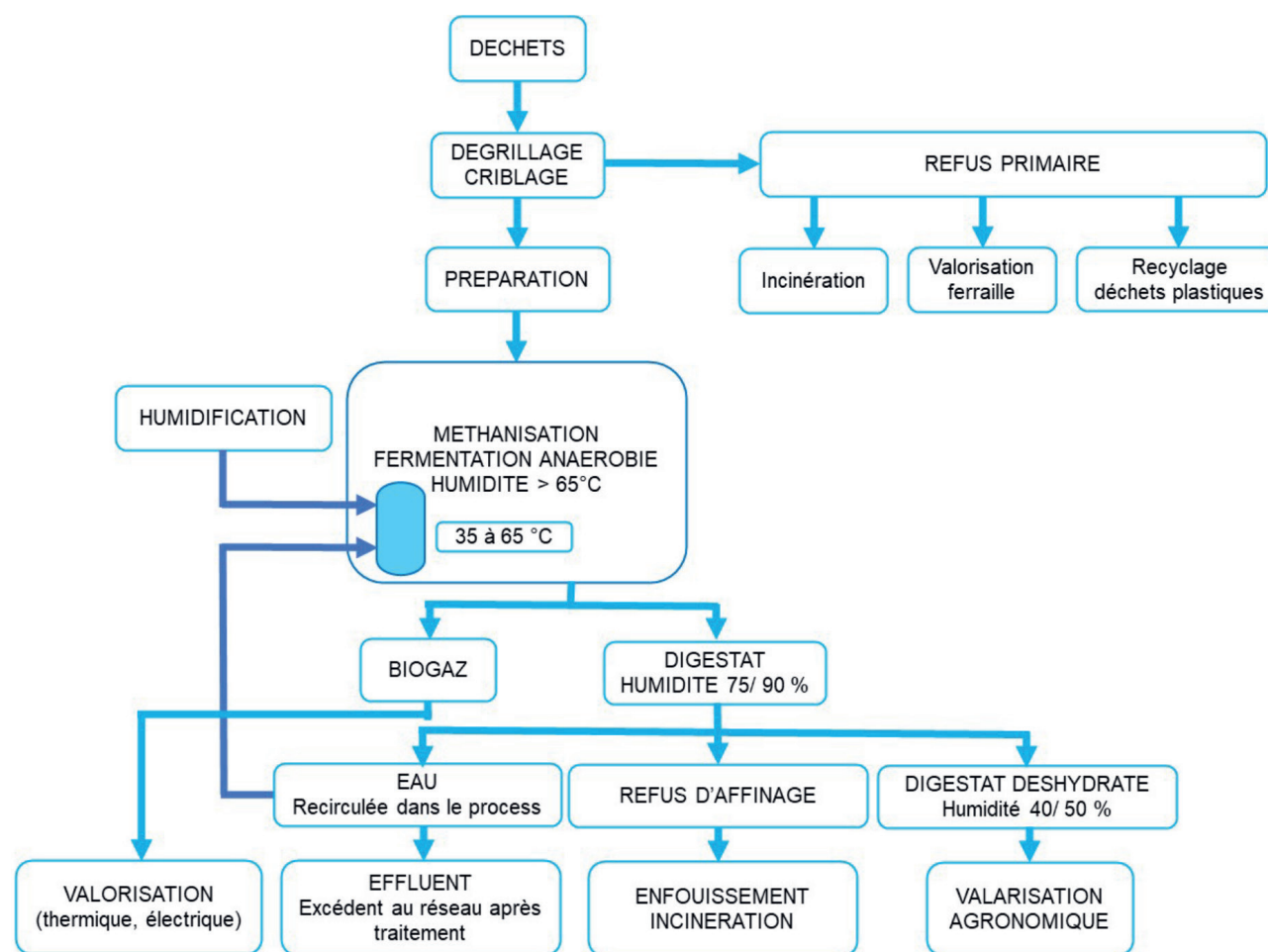


Figure 1. Synthétique d'une filière de technique de traitement des résidus issus du traitement des eaux usées
(Source : fnsa panorama des techniques de traitement des déchets d'assainissement 2009)

2. Traitement et valorisation des boues

Un mètre cube d'eaux usées traitées produit 350 à 400 grammes de boues. Ces boues sont souvent très liquides et contiennent généralement une proportion importante de matières organiques. Elles sont très fermentescibles et peuvent être à l'origine de certaines nuisances.

Le traitement des boues a pour but de les conditionner en fonction des filières d'élimination :

Les filières d'élimination au niveau du traitement des boues (issues du traitement des eaux usées) permettent de :

- réduire leur volume par épaissement, déshydratation, séchage thermique, ou incinération.
- diminuer leur pouvoir de fermentation par stabilisation biologique, chimique ou thermique (rajout de chaux par exemple).

La gestion des boues est devenue une impérative aussi bien pour les usines de traitement, les collectivités locales et les décideurs. Aujourd'hui, plusieurs débouchés sont trouvés à la question de la gestion et/ ou de la valorisation des boues issues du traitement des eaux usées. Nous pouvons retenir, entre autres, une utilisation agricole, le compostage, l'incinération, la récupération d'énergie ou l'envoi en centre d'enfouissement technique.

■ Types de boues

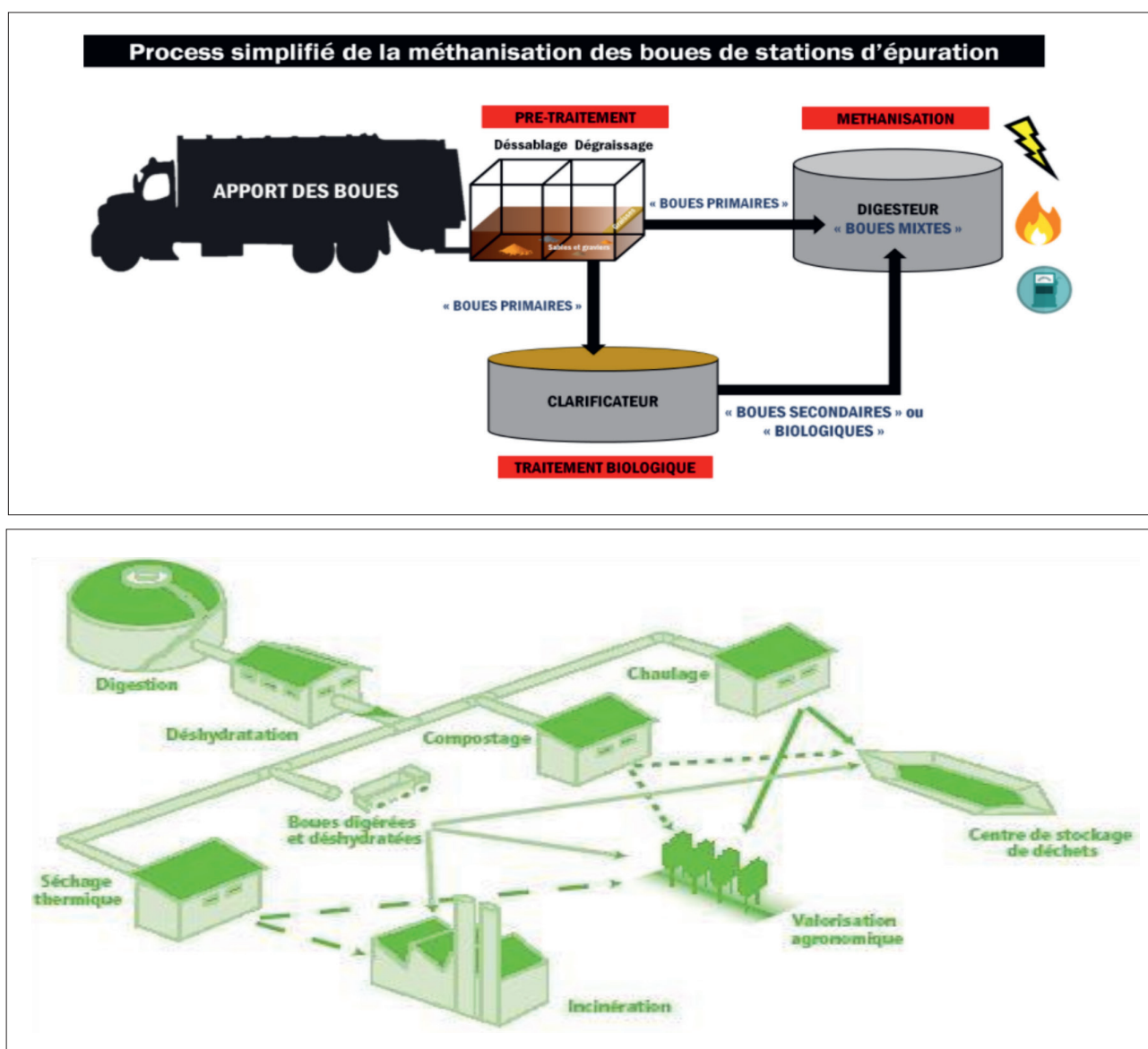
Il existe deux types de boues de station d'épuration qui constituent de bons substrats pour la méthanisation :

- Les boues primaires issues de la décantation directe de l'effluent brut dont on a enlevé les gros débris solides et les graisses après une étape de dessablage et dégraissage. Ce sont généralement les boues les plus faciles à dégrader en méthanisation. Elles sont en effet plus fortement chargées en matière organique que les boues secondaires issues de la clarification.
- Les boues secondaires (ou « boues biologiques ») qui sont issues de l'étape de clarification située après le bassin biologique.

La plupart du temps, les boues secondaires et primaires sont mélangées pour optimiser la production de biogaz, elles forment alors les « boues mixtes ».

L'épandage agricole demeure la filière traditionnelle principale de valorisation des boues. Cette valorisation organique constitue une solution intéressante pour les collectivités. L'usage des boues d'épandage s'articule autour des différents points :

- Le déchargement,
- Le transfert,
- L'éventuel séchage
- Le stockage



À l'issue des 21 jours de digestion, le gaz produit n'est pas encore du biométhane mais du biogaz brut. Il est composé de 60 à 70 % de méthane mais aussi de 30 à 40 % de CO₂, de l'H₂S et d'autres composés organiques volatils.

• Conséquences de la méthanisation

La méthanisation des boues permet :

- de réduire de 40 % en moyenne les quantités de boues à traiter dans la station ;
- d'éliminer fortement les nuisances olfactives ;
- de produire un digestat «stabilisé», débarrassé en grande partie des germes pathogènes et présentant un pouvoir fertilisant ;
- de réduire les teneurs en composés organiques volatils ;
- de produire une matière bien acceptée en agriculture (le digestat) facilitant l'élaboration d'un plan d'épandage ;
- de faciliter la récupération de l'azote et du phosphore qu'elles contiennent ;
- de valoriser énergétiquement du biogaz en chaudière, cogénération (chaleur et production d'électricité) ou en injection.

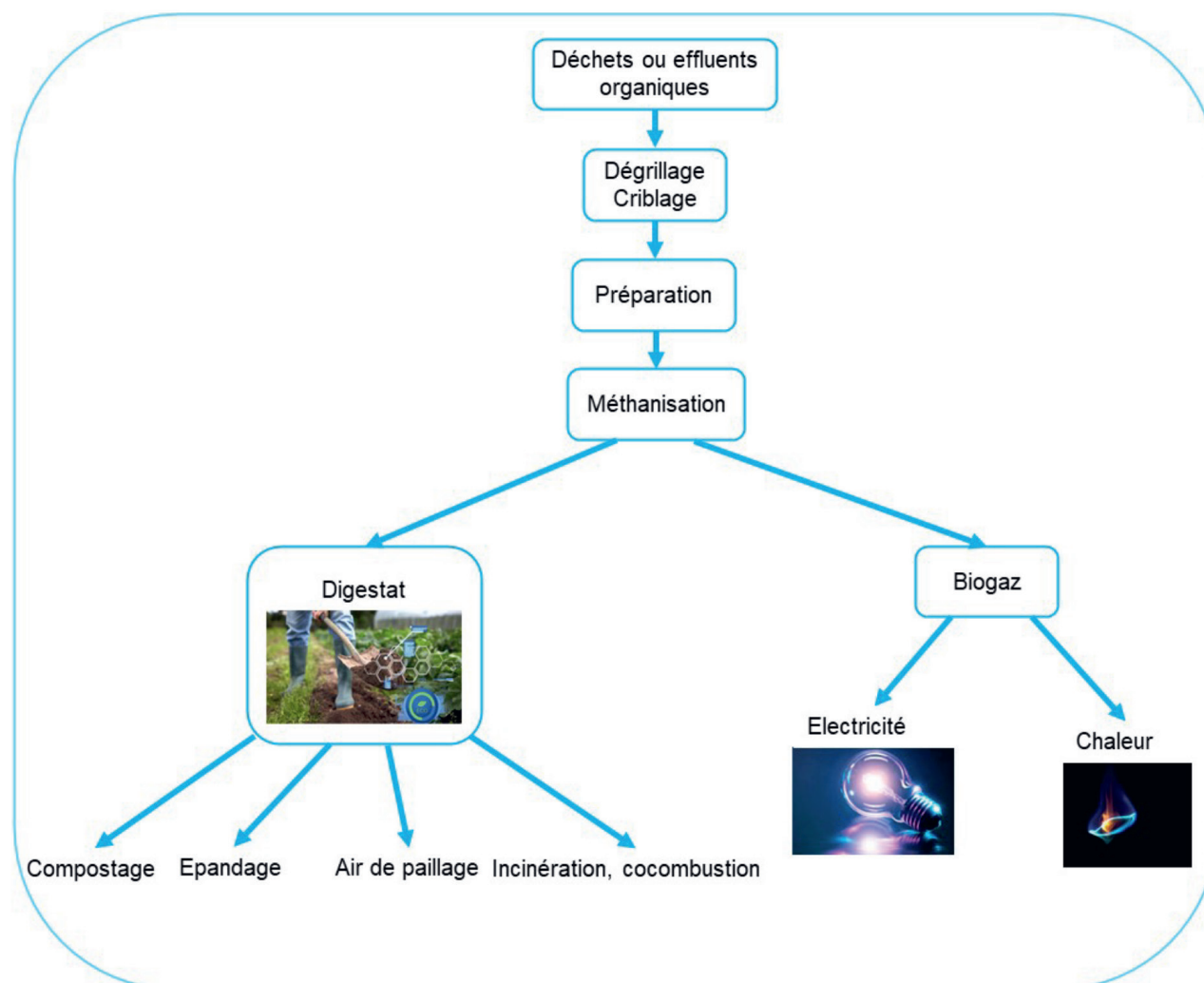


Figure 2. Schéma de principe de la Méthanisation (Source : fnsa panorama des techniques de traitement des déchets d'assainissement 2009)

■ Compostage

Riche en potassium, phosphates, azote et matière organique, ce compost est ensuite vendu aux agriculteurs pour nourrir leurs sols. Incorporées aux déchets verts, elles sont assainies et transformées en un fertilisant naturel à fort potentiel agronomique.

Fortement sollicités par l'agriculture moderne et productive, les sols sont souvent dans des situations critiques liées à des faibles teneurs en matières organique (inférieures à 3%). L'épandage de ce compost permet aux agriculteurs de lutter contre ce phénomène en limitant le recours aux fertilisants chimiques.

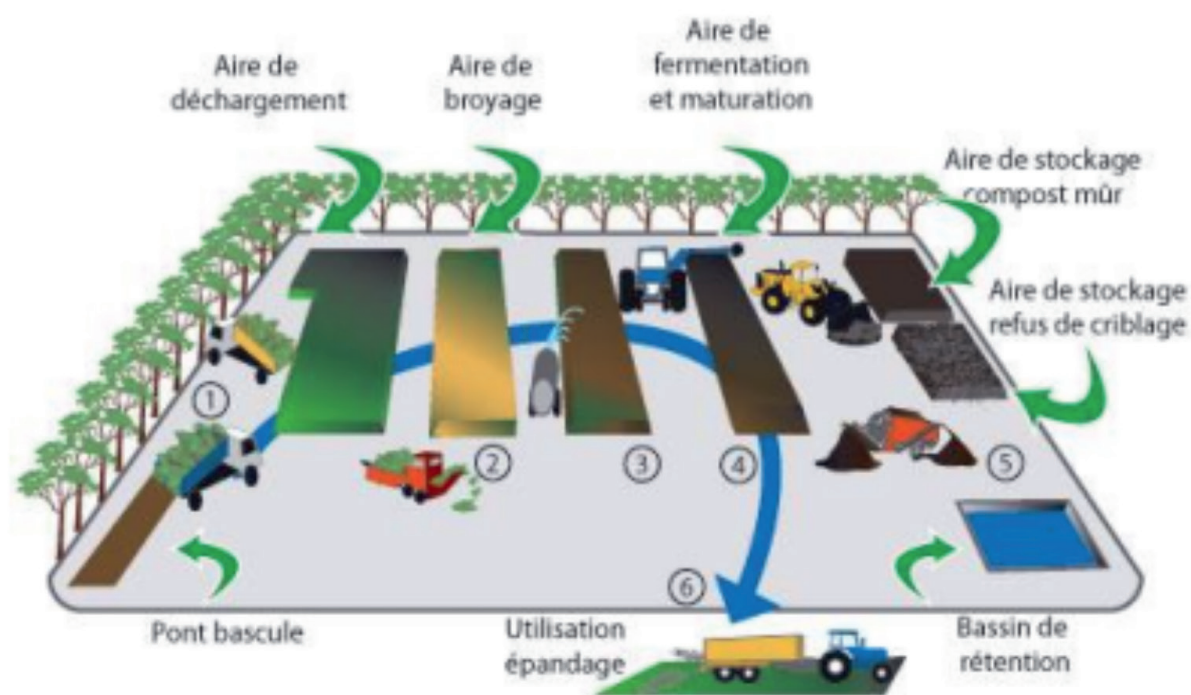


Figure 3. Schéma d'une usine de compostage (source : agricompost.eu)

■ Aire paillage et épandage

Le principe du paillage consiste à déposer la paille dans une cuvette étanche. Cette paille reçoit régulièrement, par arrosage, les matières de vidange (MV). Le fumier sera obtenu après plusieurs mois de décomposition anaérobie.

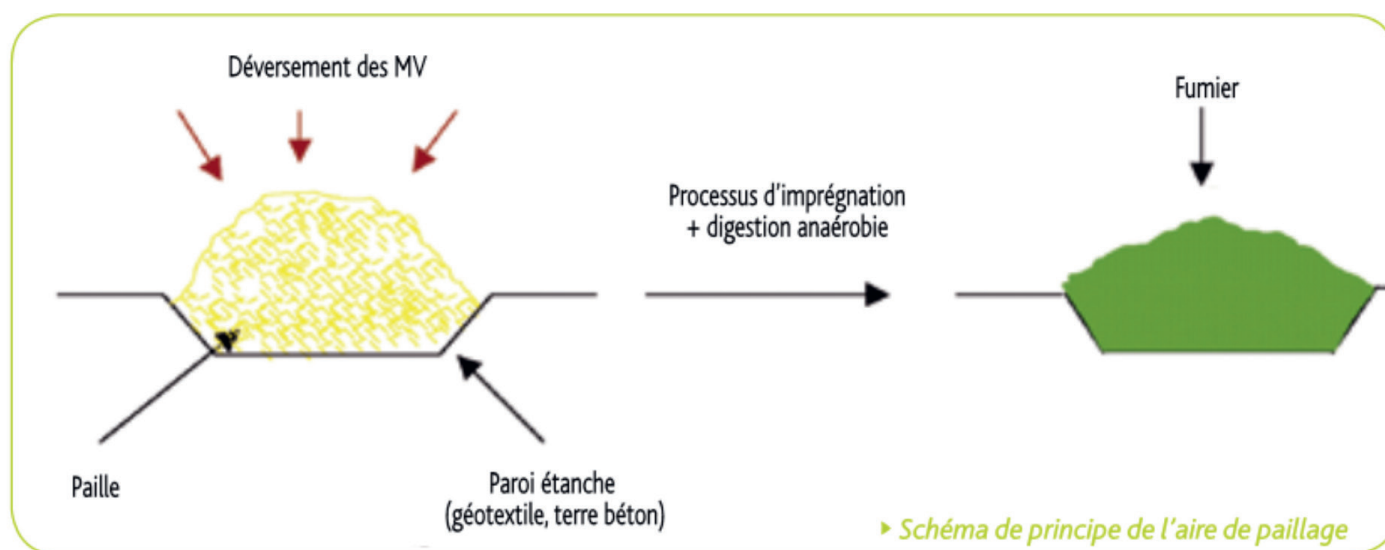


Figure 4. Principe de l'aire de paillage

La composition en valeur moyenne agronomique du fumier est résumée dans le tableau suivant :

Tableau 1. Valeur agronomique du fumier (Source : fnsa panorama des techniques de traitement des déchets d'assainissement 2009)

	pH	Matière Sèche (%MB)	Rapport C/N	Matière organique (%MS)	P ₂ O ₅ (%MS)	K ₂ O (%MS)	MgO (%MS)	CaO (%MS)	NTK (%MS)	N-NH ₄ + (%MS)	N-NO ₃ ⁻ (%MS)	Norg (%MS)
VALEUR MOYENNE*	8.84	17.06	15.14	70.58	14.58	21.09	4.03	81.09	23.91	0.85	0.11	23.05

Ce fumier obtenu est valorisé par épandage sur des terrains agricoles dans le cadre d'un plan d'aménagement agricole.

■ La cocombustion

La cocombustion par incinération est une solution efficace d'élimination et de valorisation des boues. Elle s'applique aux boues de vidange déshydratées. La cocombustion permet de détruire les agents pathogènes et d'assainir les boues. Le processus permet de produire de l'énergie qui peut ensuite être utilisée pour le chauffage ou la production d'électricité.

3. A retenir

Le traitement des eaux usées génère différents types de déchets.

- Les « gros » déchets retenus en prétraitement au niveau des stations d'épuration. Ces déchets sont principalement composés des solides (la ferraille, du bois, des déchets plastiques ...)
 - La ferraille peut être valorisée dans l'industrie de la métallurgie.
 - Les déchets plastiques peuvent être recyclés dans l'industrie caoutchoutique (réservoir d'eau dans nos domiciles, sacs poubelle, matériels de maison...) ou de manière artisanale (formation des GIE de femme et/ ou des jeunes dans la fabrication de pavés artisanaux...).
- Les déchets organiques (boues) issus du traitement primaire et secondaire peuvent être méthaniser. La méthanisation ouvre la voie à deux principaux types de valorisation (énergétique et agricole).
 - Energétique : la méthanisation permet d'avoir du biogaz qui est valorisable comme électricité ou de la chaleur qu'on peut utiliser dans nos domiciles.
 - Agricole : le digestat obtenu après la méthanisation peut être valorisé en milieu agricole comme du compost, en aire de paillage, en épandage dans les champs...
 - Les déchets résiduels du digestat peuvent aussi être valorisés en milieu industriel (co- incinération) sous forme de combustible de substitution notamment dans les cimenteries. Car ces déchets sont très riches en huiles et très combustibles.
- A la suite du traitement des déchets, il peut toujours rester des résidus non valorisables pour le moment. Ces résidus peuvent être incinérés, ou envoyés au centre d'enfouissement technique via un plan d'enfouissement.

4. Perspectives

Dans le cadre du développement durable, une série de questionnement se pose sur :

- le devenir de l'environnement et de la santé des populations environnantes des zones où ces filières de valorisation se développent. Il est donc urgent de poursuivre les analyses et les études afin de déterminer ce qui est dangereux pour la santé et l'environnement et ce qui ne l'est pas. L'objectif c'est le zéro déchet rendu racine. C'est-à-dire : pas de toxique sur la plante elle-même.
- la valorisation et l'utilisation des eaux issues du traitement des eaux usées ?

TRAITEMENT DES EAUX USÉES INDUSTRIELLES AU SÉNÉGAL : CAS DE L'ÉLECTROCOAGULATION

Maryam K. Mbacké ^{a,b,c*}, Cheikhou Kane^{b,c}, Mouhamed Ndong^{b,c}, Codou Mar Diop^{b,c,d},

- a. Université Amadou Mahtar Mbow, Lot No75R VDN, Cité Keur Gorgui, BP 45 927, Dakar (Sénégal)
- b. Laboratoire d'électrochimie et des procédés membranaires, École Supérieure Polytechnique de Dakar, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, Corniche Ouest, BP 5085, Dakar (Sénégal)
- c. Membre de l'association Africaine des membranes
- d. Membre de l'académie des Sciences du Sénégal

1. Introduction

L'objectif 6 de développement durable portant sur l'accès à une eau propre et aux services d'assainissement a fait ressortir au niveau mondial que plus de 80% des eaux usées résultant des activités humaines sont déversées dans les rivières ou la mer sans aucune dépollution.

Pour les pays en voie de développement, une bonne gestion des ressources hydriques est une étape incontournable pour garantir l'atteinte de cet objectif. Cette gestion devra adresser, entre autres, la question du contrôle des rejets industriels d'eaux usées.

A la suite du conseil interministériel sur la baie de Hann tenu en 2002, le Sénégal a pris conscience des enjeux liés à la gestion des effluents industriels. L'étude de la mise en place d'une redevance assainissement des eaux industrielles (SOGREAH, 2012) effectuée dans le cadre du projet de dépollution de la baie de Hann a révélé que les industries localisées au niveau de la baie de Hann totalisent un débit annuel de rejet d'environ 1.5 1,5 millions de m³ d'eau usées (Tableau 1).

2. Rejets industriels

Les tableaux ci-dessous présentent les volumes de rejets ainsi que leur charge polluante.

Tableau 1 : volumes d'effluents industriels et sanitaires rejetés par les industries sur la baie de Hann

TYPES DE REJETS	Volumes rejetés m3/an
Industries rejetant uniquement des effluents sanitaires	98 396
Industries rejetant effluents mixtes et/ou industriels	1 362 772
Total rejets	1 461 168

Ces eaux usées ont une très forte charge polluante telle que montrée dans le tableau 2 ci-dessous

Tableau 2- Charges polluantes rejetées par les industries de la Baie de Hann (1) avant prétraitement

	DCO	DB05	MES	AZOTE	PHOSPHORE
Industries à effluents sanitaires (kg/an)	49 198	24 599	24 599	3 936	984
Concentration (mg/l)	500	250	250	40	10
Industries à effluents mixtes (kg/an)	4 215 602	1 335 655	1 040 657	436 036	46 522
concentration (mg/l)	3 093	980	764	320	34
Total (kg/an)	4 264 800	1 360 254	1 065 256	439 972	47 506

Dans le cadre du projet de dépollution de la baie de Hann, les industriels doivent procéder à une phase de prétraitement des effluents avant rejet au niveau du collecteur prévu par le projet. Certaines industries sont en train de se conformer à la demande des autorités avec la mise en place de dispositifs de surveillance et/ou de prétraitement tels qu'illustrés à la Figure 1.

		
<i>réduire les pollutions à la source (Tank à sang SOGAS)</i>	<i>Prétraitement (Bassin de prétraitement SENARH)</i>	
		
<i>Mesures des rejets (Débitmètre SOBOA)</i>	<i>Mesures des rejets (Débitmètre SAIL)</i>	<i>Mesures des rejets (Débitmètre SOCHIM)</i>

Figure 1 : Dispositif de surveillance et/ou de prétraitement

Lorsqu'une industrie est confrontée à un problème de traitement d'effluents, une réflexion multi-critique est nécessaire car la «méthode universelle et simple» n'existe pas. En général, les rejets industriels présentent des propriétés physico-chimiques, biologiques et écologiques très variables. Cette extrême diversité explique les efforts entrepris par les industriels dans la recherche de technologies de traitement adaptées à chaque situation. Des méthodes physicochimiques, biologiques et électrochimiques sont étudiées et leur couplage est souvent envisagé.

Afin d'accompagner les industriels dans la mise en œuvre d'unité de prétraitement des effluents, la méthode d'électrocoagulation a été étudiée.

3. Procédé d'électrocoagulation : Principe et résultats obtenus

L'électrocoagulation est un procédé électrochimique qui utilise la dissolution des anodes lors de l'imposition d'un courant pour traiter les eaux usées riches en métaux lourds (ex : effluents de tanneries riche en chrome trivalent ou hexavalent), mais également en matières organiques.

En effet, les ions métalliques mis en solution lors du passage du courant se complexent pour former des hydroxydes, et ce sont ces composés qui jouent le rôle d'agents coagulants. Les hydroxydes réagissent avec les matières en suspension ainsi qu'avec certains composés dissouts et permettent leur coagulation et la floculation de ces agglomérations de particules.

Après traitement, l'effluent est décanté afin de séparer le liquide clair, qui pourra être recyclé pour un second traitement puis envoyé dans une station d'épuration biologique. En fonction des effluents et du traitement d'électrocoagulation, les boues décantent ou flottent à des vitesses différentes. L'électrocoagulation est une technologie à fort potentiel pour le traitement des eaux usées en particulier pour des mélanges complexes comprenant diverses pollutions (pollution organique, minérale, substances colorées et des métaux lourds ; ex : effluents de teintures). Ce procédé a la capacité d'éliminer un large spectre de polluants (2).

Le principe général du procédé est présenté en figure 2.

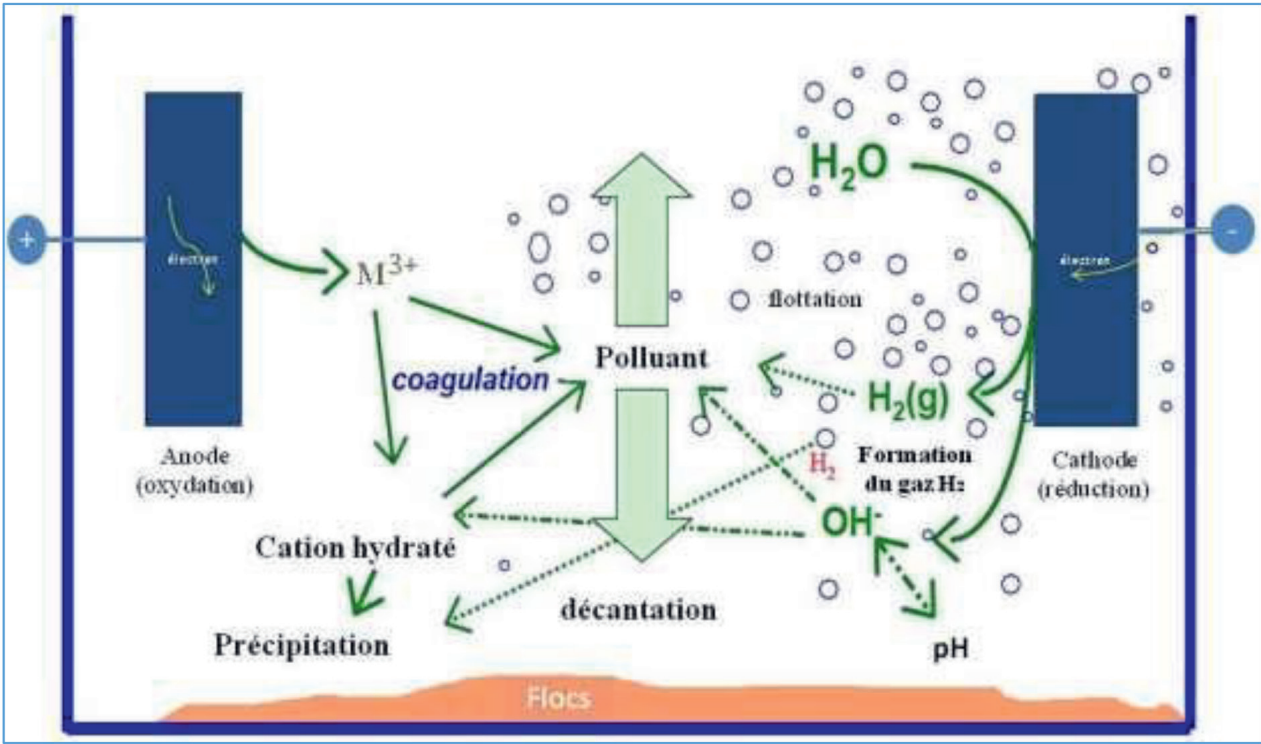


Figure 2: Schéma de principe de l'électrocoagulation (3)

Le fonctionnement optimal d'une unité d'électrocoagulation repose sur les paramètres opératoires et la configuration de l'unité. Les paramètres opératoires suivants ont été optimisés :

- la densité de courant;
- la distance interelectrode;
- le type d'électrode;
- la conductivité et le pH du milieu.

Tableau 3 : Conditions opératoires

Paramètres	Valeurs
Densité de courant (A/m2)	100 ;150 ; 200 ;250
Tension (V)	entre 1 et 2
pH	3 ; 5 ; 7 ; 9 ; 10
Conductivité (mS/cm)	0,9 ; 1,76 ; 2,48 ; 3,38 ; 4,27
Distance inter-électrode (cm)	0,5 ; 1 ; 1,5 ; 2
Concentration initiale (mg/L)	5 ; 20 ; 40 ; 60 ;100

Une densité de courant de 250A/m2, une distance inter-électrodes de 0,5 cm, une conductivité initiale de 4,27mS/cm et un temps de traitement de 60 min ont permis d'atteindre en mode batch et sur des solutions de colorant, un taux de décoloration de 99,75% et un abattement de la DCO de 98% (4). La conception de l'unité d'électrocoagulation s'est appuyée sur des critères tels que :

- la température d'opération;
- le régime opératoire;
- la technique d'agitation;
- le contrôle du flux énergétique;
- la source d'alimentation;
- la configuration et la géométrie des électrodes;
- l'espacement entre les électrodes;
- la technique de séparation des solides.

Tenant compte de ces critères, une unité de traitement en continu a été conçue. L'unité est constituée d'un réacteur d'électrocoagulation muni de ses électrodes et supports d'électrodes, de l'effluent à traiter ainsi que de composés annexes au réacteur permettant le fonctionnement du procédé.



Figure3 : Unité d'électrocoagulation en mode continu



Figure 4: Bloc d'électrodes et support

La chambre de distribution d'un volume de 1,37 L comprend une face avec plusieurs perforations pour faciliter une distribution homogène du liquide. (5)
La cellule électrochimique d'un volume totale de 6,37L présente une base conique servant de chambre d'accumulation des boues. Les boues sont récupérées par purge à la fin du traitement. L'alimentation électrique est assurée par un générateur de courant continu de type KERT 60V 5A. L'effluent est introduit dans la cellule à l'aide d'une pompe péristaltique d'alimentation HEIDOLPH 5201.

Selon le type d'effluent à traiter, les floccs formés peuvent décanter ou flotter. Pour récupérer les floccs entraînés par l'effluent traité et récupéré à la sortie, il est prévu un système de décantation.

La chambre d'accumulation des floccs permet de récupérer les floccs qui se forment au cours du traitement et selon le type d'effluent.

Une configuration d'électrodes bipolaires a été retenue (figure 3). En effet, le bloc d'électrodes est muni d'une anode (-), d'une cathode (+) et de quatre électrodes bipolaires, aussi appelées électrodes sacrificielles. N'étant pas branchées au bloc d'alimentation, ces dernières se chargent d'elles-mêmes au passage du courant électrique produit entre l'anode et la cathode. Par conséquent, chaque électrode sacrificielle est chargée positivement d'un bord et négativement de l'autre. L'anode ainsi que les électrodes sacrificielles sont en aluminium tandis que la cathode est en acier inoxydable.

Pour accomplir les essais, un bloc d'électrodes a été construit. Les électrodes sont toutes de dimensions égales avec une longueur de 460 mm et une largeur de 60 mm. Le support en bois permet de maintenir une distance inter électrodes de 1 cm ; choisie faible pour limiter la chute ohmique mais suffisamment large pour éviter le colmatage et les surtensions.

En tenant compte des 4 électrodes sacrificielles et de l'anode, la surface électroactive totale est estimée à 1,38.105 mm².

L'unité de traitement conçue a été testée sur des effluents de la SENTA et de IMPERIAL TOBACCO.

3.1. Résultats pour SENTA

Les résultats sont présentés dans les tableaux ci-dessous :

Tableau 4 : Paramètres de traitement

Paramètres	Valeurs effluent brute	Valeurs vidange chrome
Temps de rétention (min)	60	120
Intensité du courant (A)	2	2
Surface électroactive (mm ²)	1,38.105	1,38.105
Distance inter-électrodes (mm)	10	10
Densité de courant (A/m ²)	250	250
Débit d'alimentation (ml/s)	1,73	0,868
Volume du réacteur (L)	6,37	6,37

Tableau 5 : Traitement des effluents prélevés à l'entrée de la station d'épuration

Paramètres	Effluent brute			
	Avant traitement		Après traitement	
	résultats	Norme NS	résultats	Normes NS
pH	8,829	6 - 9	7,829	
Conductivité (mS/cm)	20.4			
Turbidité (NTU)	193		101	
DCO (mg/L)	3588	2000	881	200
DBO (mg/L)	700	800	200	50
Chrome (mg/L)	17,78		1,05008	1
Indice de biodégradabilité	5.12	2.5	4,405	4

Tableau 6 : Traitement des effluents prélevés au niveau vidange bain de chrome

Paramètres	Effluent brute			
	Avant traitement		Après traitement	
	résultats	Norme NS	résultats	Normes NS
pH	3.465	6 - 9	7.658	
Conductivité (mS/cm)	69.9			
Turbidité (NTU)	61		44	
DCO (mg/L)	7623	2000	2833	200
DBO (mg/L)	200	800	100	50
Chrome (mg/L)	17.01		2.8079	1
Indice de biodégradabilité	38.11	2.5	28.33	4

3.2. Résultats Imperial Tobacco

Les résultats sont présentés dans les tableaux ci-dessous :

Tableau 7 : Paramètres opératoires

Paramètres	Valeurs
Temps de traitement (min)	15; 30; 60
Intensité du courant (A)	0.35
Surface électroactive (mm ²)	1400
Distance inter-électrodes (mm)	5
Densité de courant (A/m ²)	250
Volume de l'échantillon (ml)	1000

Tableau 8 : Eaux brutes et eaux décantées avec électrocoagulation

Paramètres analyses	Effluent brut (avant décanteur)	Effluent sortie décanteur	Norme (NS05-061)
MEST en mg/L	1572	82,35	600
DCO en mg/L	5280	1440	2000
DBO5 en mg/L	1750	330	800
Azote total en mg/L	198	22,4	150
Phosphore total en mg/L	22,02	3,84	50
pH	5,67	7,1	6-9
DCO/DBO5	3,017	4,36	2.5
DCO/N	53,877	64,285	
DCO/P	239,78	375	

Tableau 9 : Eaux brutes et eaux décantées après traitement par électrocoagulation

Paramètres	Eaux brutes			Eaux décantées			Norme (NS05-061)
	Temps de traitement (min)			Temps de traitement (min)			
	15	30	60	15	30	60	
DCO (mg/L)	2640	2544	2112	96	96	153,6	200
DBO5 en mg/L	320	290	170	55	50	40	50
Azote total (mg/L)	140	128,8	112	14	22,4	16,8	20
Phosphore (mg/L)	0,72	0,97	0,95	1,87	1,42	1,28	10
pH	5,8	6,24	6,37	7,06	7,29	7,1	6-9
Indice de biodégradabilité	8.25	8.77	12.4	1.74	1.92	3.84	4

Les essais sur les effluents industriels ont donné des résultats satisfaisants en termes de taux de traitement. Les effluents de la SENTA qui, de prime abord, sont difficilement biodégradables ont été testés en modes batch et continu avec des résultats concluants qui permettent de préconiser une installation du procédé d'électrocoagulation après mélange de l'ensemble des effluents. Une première décantation avant traitement permettrait de réduire la charge en MES et donc le temps de traitement par électrocoagulation nécessaire. Les essais batch réalisés sur les effluents de IMPERIAL TOBACCO ont donné de bons résultats notamment au niveau des eaux qui ont subi une seconde décantation. Il convient de souligner que le type de séparations des boues d'électrocoagulation à mettre en œuvre sera fonction du type d'effluent. En effet, si pour les effluents de la SENTA les boues décantent au cours du traitement, le comportement est différent pour les effluents de IMPERIAL TOBACCO où les boues sortent par flottation.

Pour les deux industries pour lesquelles le procédé a été testé, nous avons noté des rendements épuratoires satisfaisants. Une phase de traitement primaire (décantation) s'avère nécessaire pour abaisser la charge polluante avant le traitement par électrocoagulation notamment pour des effluents tels que ceux de la SENTA qui présentent des charges importantes en métaux lourds (chrome).

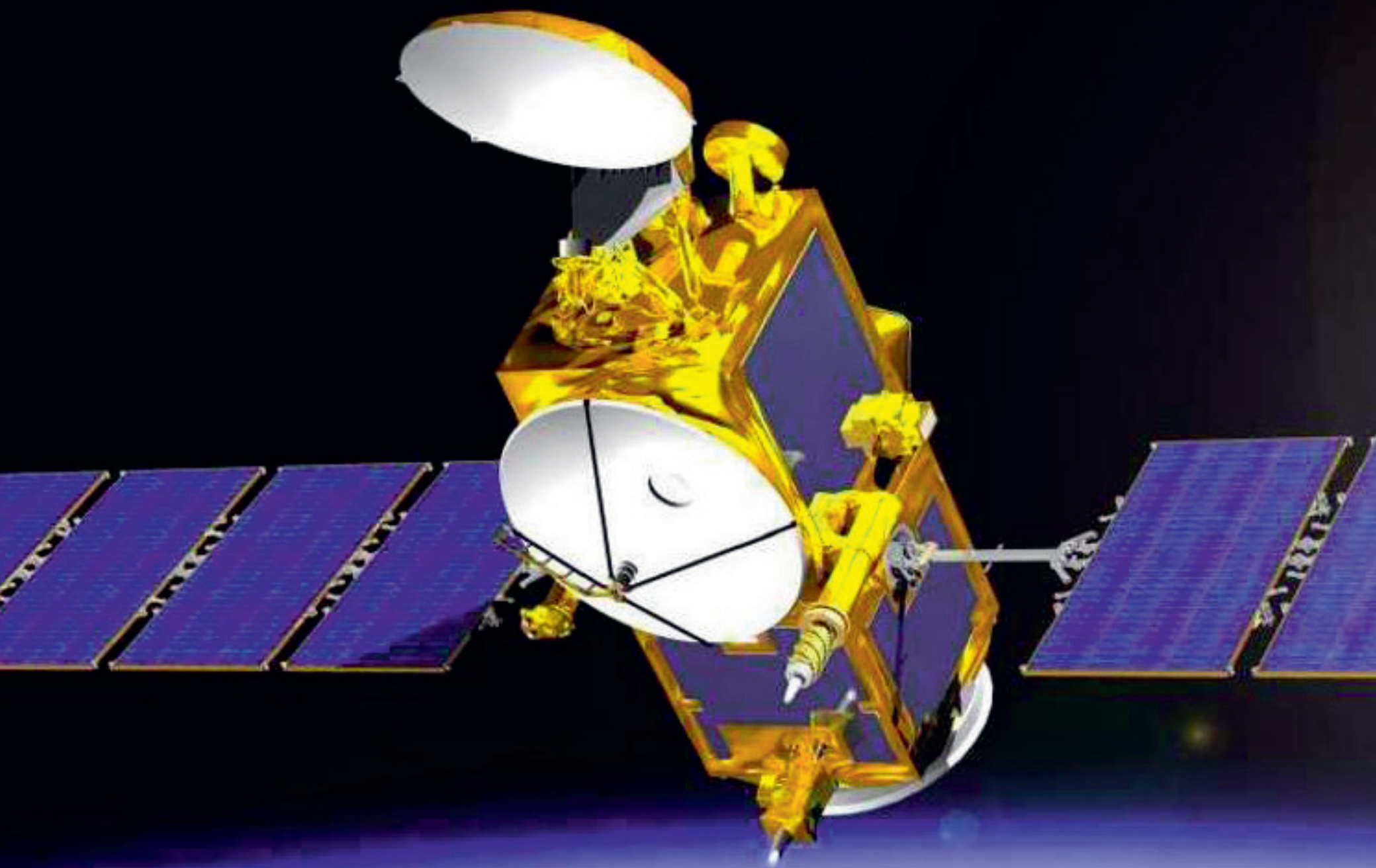
4. Perspectives

Les limites de la recherche dans le cadre de l'application du procédé d'électrocoagulation aux traitements des effluents sont liées à la gestion des boues issues du procédé. Ces boues bien qu'étant en faibles quantités comparées à celles générées par les procédés physico-chimiques sont considérées comme des déchets chimiques jusqu'ici destinés à l'incinération.

Dans le but de leur valorisation, des essais sont en cours pour la conception d'une pile à combustible microbienne fonctionnant avec les boues d'électrocoagulation.

5. Références bibliographiques

- Bréthaut C. et Pflieger G. 2015. De la définition d'une ressource aux idéaux de la gestion communautaire [vidéo]. Genève, Suisse : Université de Genève.
- Chevalier L. 2014. Caractérisation et modélisation de la variabilité hydrologique de l'estuaire de Seine dans le cadre de la future mission spatiale SWOT. Thèse de doctorat : Hydrologie. Rouen : Université de Rouen, 363 p.
- Chevalier L., Laignel B., Turki I., Lyard F., Lion C., 2017. Hydrological variability from gauging stations and simulated SWOT data, for major French rivers. *Journal of Geoscience and Environment Protection, Special Issue Hydrogeology and Water Cycle*, 5, doi.org/10.4236/JGEP/2017.
- Chevalier L., Laignel B., Turki I., Lyard F., Lion C., 2018. Time variability of hydrodynamics and potential use of SWOT mission in estuarine macrotidal system: Example of Seine Estuary. *Journal of Applied Remote Sensing*, 12(3), 036008, DOI : 10.11017/1.JRS.12.036008
- De Stefano L., Duncan J., Dinar S., Stahl K. et al. 2010. Mapping the Resilience of International River Basins to Future Climate Change-Induced Water Variability. Washington, USA : The Bank World, 88 p. <http://www.transboundarywaters.orst.edu/publications/publications/De%20Stefano%20et%20al%202010.pdf>
- Fu L., Alsdorf D., Morrow R., Rodriguez E., N. Mognard N., Eds., 2012. SWOT: The surface water and ocean topography mission. Wide-swath altimetric elevation on Earth, Jet Propuls. Lab., Pasadena, CA, USA, Tech. Rep. JPL-Publ-12-5, 2012.
- Gangbazo G. 2004. Gestion intégrée de l'eau par bassin versant: concept et application. Québec, Canada : Agri Réseau, 58 p. [14/07/2016]. <https://www.agrireseau.net/agroenvironnement/documents/concepts.pdf>
- GWP et RIOB. 2009. Manuel de Gestion Intégrée des Ressources en Eaux par Bassin. Stockholm, Suède : GWP, 112 p. [10/06/2016].
- Morrow R, Fu L-L, Ardhuin F, Benkiran M, Chapron B, Cosme E, d'Ovidio F, Farrar JT, Gille ST, Lapeyre G, Le Traon P-Y, Pascual A, Ponte A, Qiu B, Rascle N, Ubelmann C, Wang J and Zaron ED (2019). Global Observations of Fine-Scale Ocean Surface Topography With the Surface Water and Ocean Topography (SWOT) mission. *Frontiers in Marine Science*, 6, 232.
- Turki I., Laignel B., Chevalier L., Costa S., Massei N., 2015. Coastal Sea Level Changes in the Southeastern Side of the English Channel: Potentialities for Future SWOT Applicability, *Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*.
- World Bank. 1996. Sourcebook for Gender Issues at the Policy Level in the Water and Sanitation Sector. Washington, USA : World Bank, 112 p.



CHAPITRE 8

PLACE DE L'ALTIMETRIE SPATIALE DANS LE MONITORING DES EAUX DE SURFACE

APPLICATIONS DU FUTUR SATELLITE SWOT POUR L'ÉTUDE DE LA VARIABILITÉ HYDROLOGIQUE DANS LE BASSIN DU FLEUVE SÉNÉGAL

Yina BELL^{a,b}, Issa SAKHO^{b,c}, Laetitia Chevalier^b, Imen TURKI^b, Mohamed Talla CISSE^d, Benoit LAIGNEL^b

^a. ISTOM - 4 rue Joseph Lakanal, 49000 Angers, France

^b. UMR CNRS 6143 Morphodynamique continentale et côtière, Université de Rouen, 76821 Mont-Saint-Aignan cedex, France

^c. UMR Sciences, Technologies Avancées et Développement Durable, Université Amadou Mahtar Mbow de Dakar à Diamnadio, Sénégal.

^d. UFR Sciences et Technologies, Université Iba Der THIAM de Thiès, Sénégal.

1. Introduction

En 1992, lors de la conférence internationale sur l'eau et l'environnement à Dublin, l'eau douce a été définie comme étant «une ressource limitée et vulnérable, indispensable à la vie, au développement et à l'environnement» (World Bank, 1996). Depuis le début du XXème siècle, cette ressource subit de fortes pressions dues à la croissance démographique, à l'urbanisation, à l'essor de l'agriculture et de l'industrie, etc. Ces pressions multiples se manifestent par une augmentation exponentielle des prélèvements d'eau et des rejets d'eaux usées dans la nature, ce qui entraîne la pollution des milieux aquatiques. Selon GWP & RIOB (2009). Ces pressions mettent en avant l'interdépendance entre les populations, l'hydrologie, l'économie et l'écologie au sein d'un même bassin versant.

La gestion de l'eau est une réponse pour concilier tous les enjeux liés à l'eau. Ainsi, les gestionnaires ont pour objectif d'atténuer les impacts des pressions anthropiques multiples et de fournir un accès à l'eau pour les différents usages tout en protégeant les milieux naturels. Toutefois, pour répondre au mieux à ces enjeux, ces acteurs ont besoin de comprendre la dynamique des retenues et des cours d'eau notamment grâce à la collecte de données fiables sur l'ensemble des bassins versants. Cette compréhension est indispensable pour favoriser une gestion durable des ressources en eaux (Gangbazo, 2004). Bien commun et mobile, cette eau peut dépasser les frontières politiques et intégrer un bassin transfrontalier (Bréthaut, *et al.*, 2015). Environ 40% de la population mondiale vit dans un bassin fluvial international, où la gestion peut s'avérer parfois très complexe à cette échelle (De Stefano, *et al.*, 2010). Dans ce contexte, la production de données transfrontalières constitue le premier pilier de la gestion de cette eau partagé. Cette dernière est *in fine* une des composantes qui limite l'apparition de conflits et permet d'appréhender certaines problématiques environnementales. Un système de mesure efficace et fiable apparaît donc impératif à maintenir pour suivre l'évolution quantitative de la ressource. La mise en place, le suivi et la maintenance de stations hydrométriques pour garantir des observations à long terme, reste extrêmement difficile, notamment sur les fleuves internationaux (bassin partagé). Ainsi, le suivi satellitaire des ressources en eau est apparu comme une alternative. Cependant, le suivi des hauteurs d'eau en altimétrie (faible résolution spatiale) se limite actuellement aux plus grands fleuves mondiaux.

Face à ce constat global et dans la volonté d'améliorer le suivi des ressources en eau de surface et des océans, un nouveau satellite à interférométrie radar SWOT (Surface Water and Ocean Topography) a été élaboré. Il s'agit d'une mission très innovante de 1 Ga \$ portée principalement par des agences spatiales française (CNES) et américaine (NASA), avec la participation des agences spatiales canadienne (ECSA) et du Royaume Uni (UKSA) (Fu *et al.*, 2021 ; Morrow *et al.*, 2019). SWOT est une nouvelle génération d'altimètre à double fauchée qui permettra de mesurer les hauteurs d'eau dans les océans, rivières, lacs et le long des côtes, avec une résolution spatiale jusqu'ici inégalée, avec une couverture quasi-totale du globe en 21 jours (lancement fin 2022) : 1 km pour les océans, 100 à 50 m de largeur pour les rivières et 250m x 250m pour les lacs.

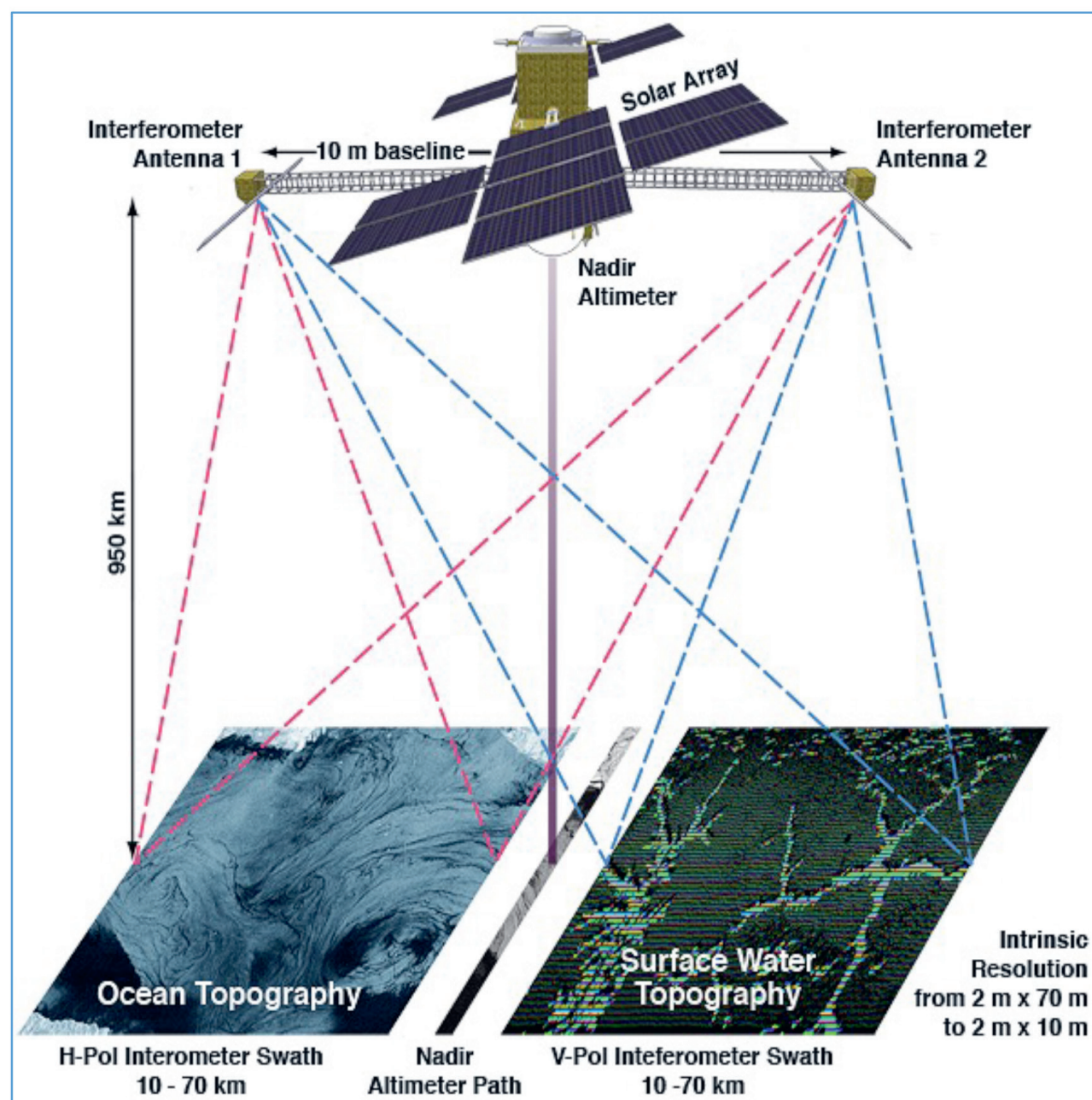


Figure 1. SWOT : Un radar interféromètre en bande Ka avec 2 fauches (Laignel, 2016)

2. Les bassins transfrontaliers à l'ère du satellite SWOT

Les fleuves et les zones côtières en Afrique sont marqués par un faible niveau d'observation et de mesure en continu des processus physiques. Le changement climatique affecte régulièrement les variations de niveaux d'eau sur les cours d'eau, les océans et les mers. Actuellement, il existe différents outils de mesure in situ des hauteurs d'eau. Toutefois, ils ne permettent pas de suivre et comprendre, à grande échelle par exemple, les évolutions qui s'exercent sur la ressource en eau de surface pour des raisons d'accessibilité ou encore de problèmes d'entretien et de maintenance des stations hydrométriques. Avec l'aide de satellites en orbite, des travaux de recherche scientifique sont effectués pour la comprendre et quantifier les variations de hauteurs d'eau sur de plus vastes zones continentales et côtières. Les altimètres Topex/Poséidon, Jason 1 et Jason 2 sont des satellites mesurant les variations du niveau de la mer, mais à l'approche des environnements côtiers, la précision des données se dégrade. En plus, ces observations couvrent peu les eaux continentales.

Ainsi, le satellite SWOT permet de lever ces contraintes et de résorber le déficit de données d'observation des eaux continentales et côtières, notamment au niveau des zones difficiles d'accès dans les bassins partagés en Afrique.

SWOT va donc permettre l'observation des surfaces en eau avec des mesures régulières de hauteurs d'eau afin de mieux comprendre et de suivre la dynamique des cours d'eau dans les bassins versants. En effet, il fournira des cartes d'élévation des eaux de surface, à haute résolution et de façon répétitive : 1 à 7 passages dans un cycle de 21 jours. Les mesures des hauteurs d'eau et des pentes au niveau des fleuves, des lacs, des zones inondées, des océans, des côtes et des estuaires seront fournies. Les pays en développement pourraient donc davantage tirer bénéfice de cet outil que les pays développés qui disposent déjà d'outils performants pour gérer leurs ressources.

Dans une dynamique de poursuivre les travaux préalables au lancement du satellite SWOT, le fleuve Sénégal et son estuaire ont été considérés comme un cas d'application pertinent.

3. Le fleuve Sénégal et son bassin transfrontalier

Long d'environ 1 800 km, le fleuve Sénégal est le 2^{ème} plus grand fleuve de l'Afrique de l'Ouest, après le fleuve Niger. Contenu dans un bassin versant d'environ 290 000 km², ce cours d'eau international prend sa source en Guinée dans le Massif du Foutah-Djalon. Il traverse le Mali, puis constitue la frontière entre la Mauritanie et le Sénégal avant de se jeter dans l'océan Atlantique au Sud de Saint-Louis (au Sénégal) (Figure 1). La notion de « bassin transfrontalier » est adaptée dans un contexte où ce cours d'eau parcourt différents pays (Tableau 1).

Tableau 1: Répartition géographique du bassin du fleuve Sénégal par pays (UNESCO, 2003)

Pays	Superficie (km ²)
Guinée	31 000
Mali	155 000
Mauritanie	75 500
Sénégal	27 500

Les largeurs du fleuve Sénégal et de ses différents affluents sont marquées par des variations spatiales assez importantes. Le lac de Guiers représente la plus importante étendue d'eau douce de surface dans le bassin aval du système hydrologique du Sénégal (Figure 1).

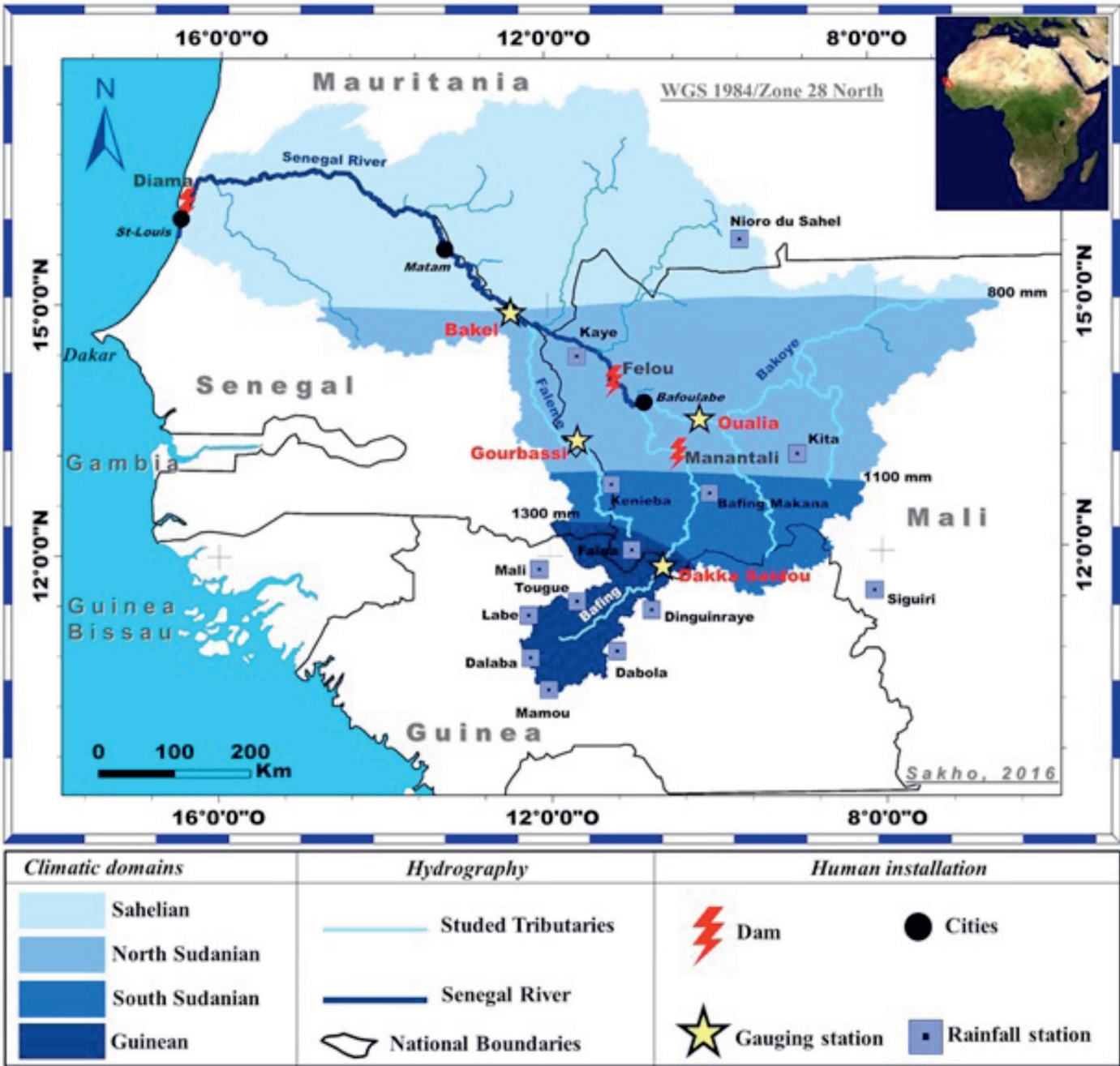


Figure 1. Bassin versant du fleuve Sénégal (Sakho et al., 2017)

L'objectif de cette étude est d'analyser la capacité du futur satellite SWOT à reproduire la variabilité hydrologique temporelle du fleuve Sénégal jusqu'à son embouchure, à Saint-Louis.

Six stations hydrologiques sont considérées (Figure 1): Dakka Saïdou, Bakel, Podor, Diama amont, Diama aval et Saint Louis. L'étude s'est faite sur la période de sécheresse (1976-1980) et sur la période « récente » (2000-2004). Des données SWOT ont été simulées sur chaque station en fonction du nombre de passages par SWOT au cours de son cycle de 21 jours. Les mesures in situ et les mesures simulées SWOT ont été comparées par des analyses statistiques et spectrales.

4. Simulation et extraction des données SWOT

La simulation des données nécessite une extraction des données *in-situ* des stations hydrométriques en fonction de l'orbite, du nombre et heures de passage du satellite (Chevalier, 2014; Turki *et al.*, 2015; Chevalier *et al.*, 2017, 2018). La simulation des hauteurs d'eau de SWOT est calculée à partir des données journalières des sept stations (Tableau 2), définies par des coordonnées géographiques, sur une période de 5 ans en tenant compte de la cyclicité et de l'orbite de la mission. En effet, pour l'application sur le fleuve Sénégal, l'étude s'appuie sur la dernière orbite choisie par le comité scientifique de SWOT : altitude 891 km ; cyclicité de l'ordre de 20.86460 jours (NASA, 2016).

Tableau 2. Tableau 4: Nombre et heures de passage de SWOT par cycle sur l'ensemble des stations simulées

Stations	Latitude	Longitude	N° de passage	Heures de passage		Périodes simulées
				N°1	N°2	
Dakka Saïdou	11°57 N	10°37 W	2	231.45	386.767	1976-1981
2000-2005						
Bakel	14°54 N	12°27 W	2	410.7917	493.8167	1976-1981
2000-2005						
Podor	16°39 N	14°57 W	2	17.067	493.817	1976-1981
2000-2005						
Diama Amont	16°217 N	16°417 W	2	196.4361	279.450	2000-2005
Diama Aval	16°03 N	16°01W	2	279.4472	458.8167	2000-2005
2004-2008						
Saint-Louis	16°02 N	16°30 W	2	196.43	279.45	2000-2005
2004-2007						
Dakar	14°40 N	17°25 W	2	41.0861	458.8083	2000-2003

5. Capacité de SWOT à restituer la variabilité hydrologique du fleuve Sénégal aménagé jusqu'à l'embouchure (2000-2005)

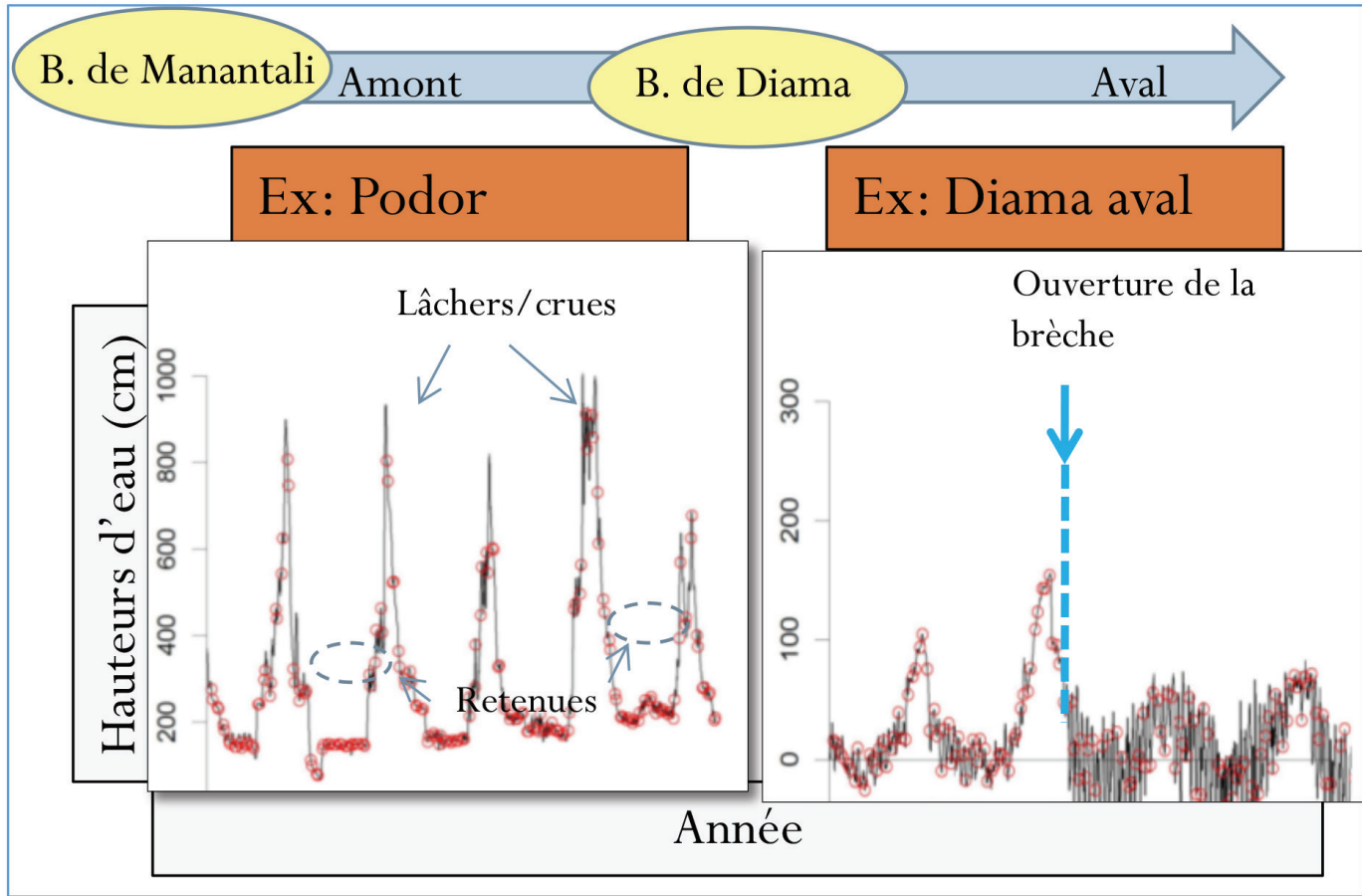
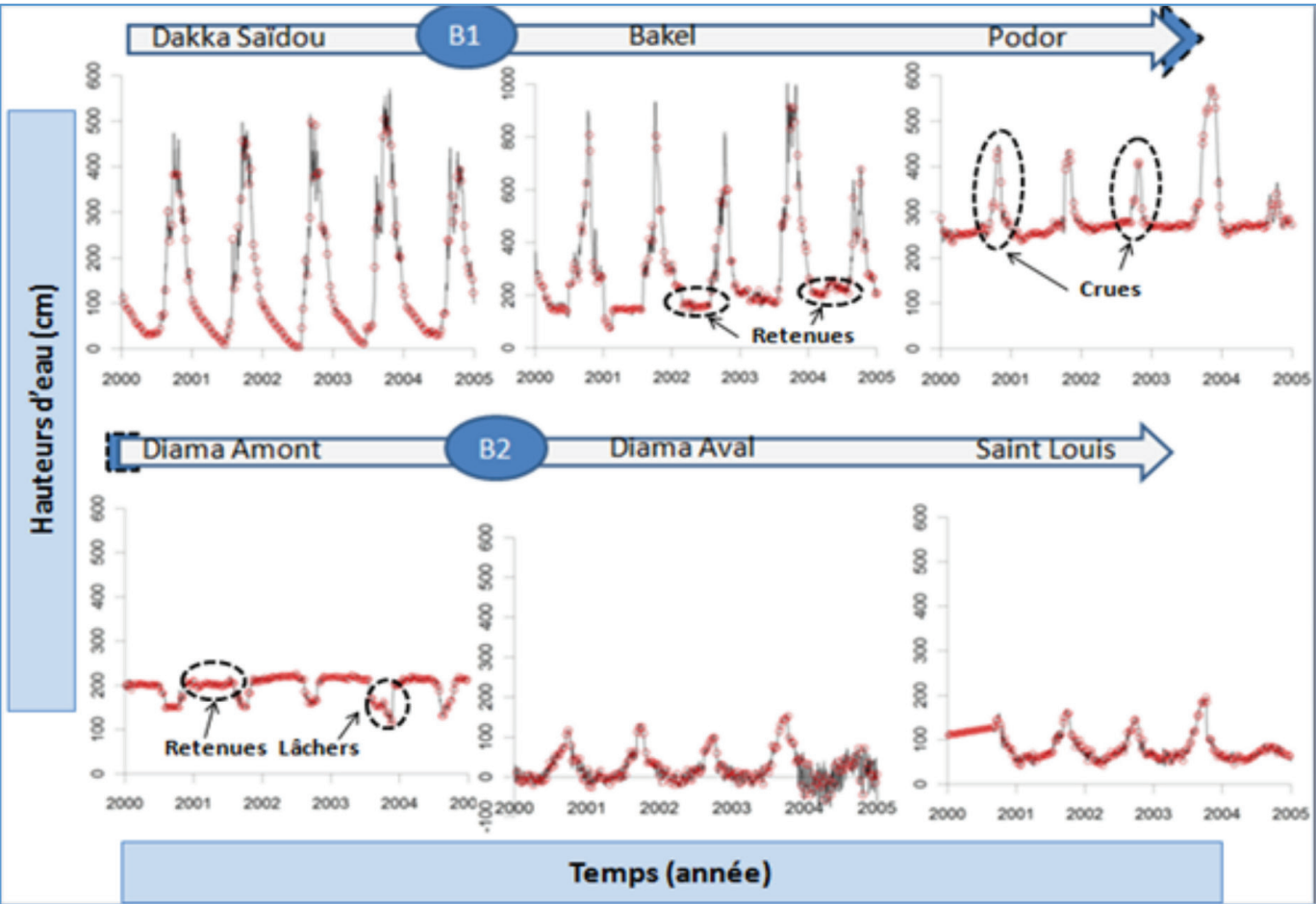


Figure 2. Echantillonnage des données SWOT simulées (en rouge) comparées aux données in-situ (en noir)

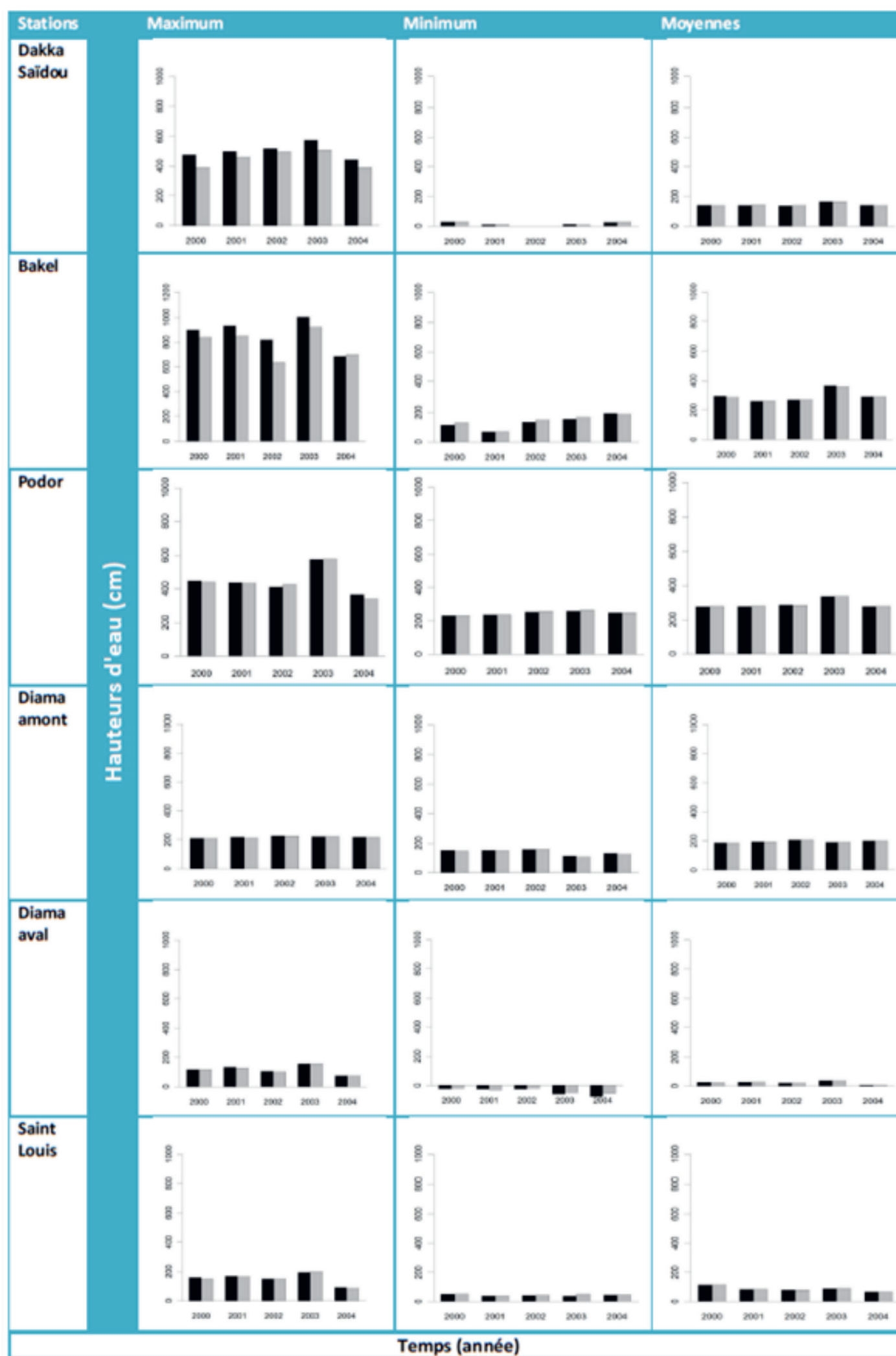


Figure 3: Histogramme des hauteurs d'eau *in-situ* (en noir) et données SWOT simulées (en gris) maximales, minimales et moyennes annuelles des stations pour la période 2000-2005

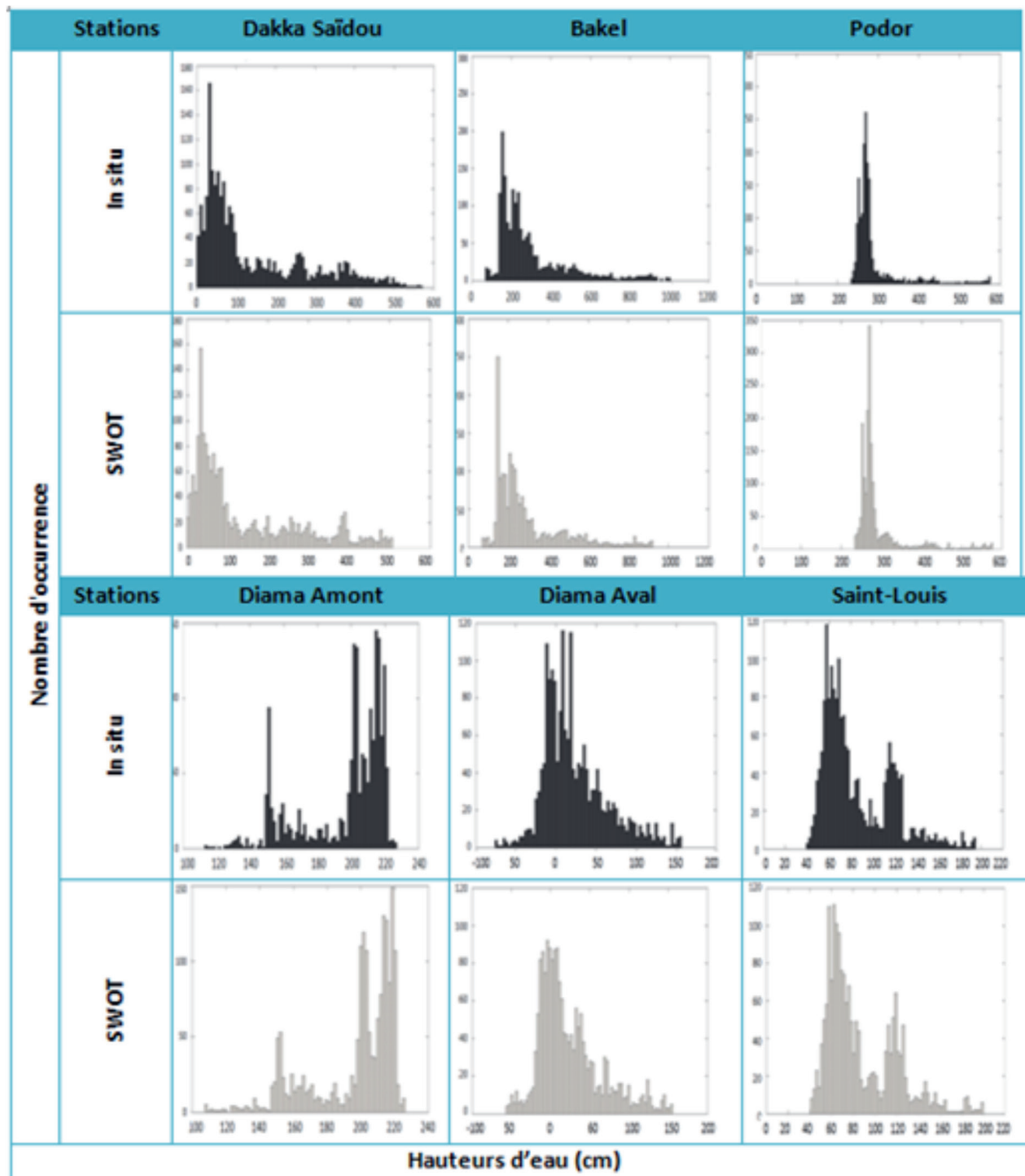


Figure 4: Fonctions de densité de probabilité des hauteurs d'eau *in-situ* (noir) et SWOT simulées (gris) de 2000 à 2005

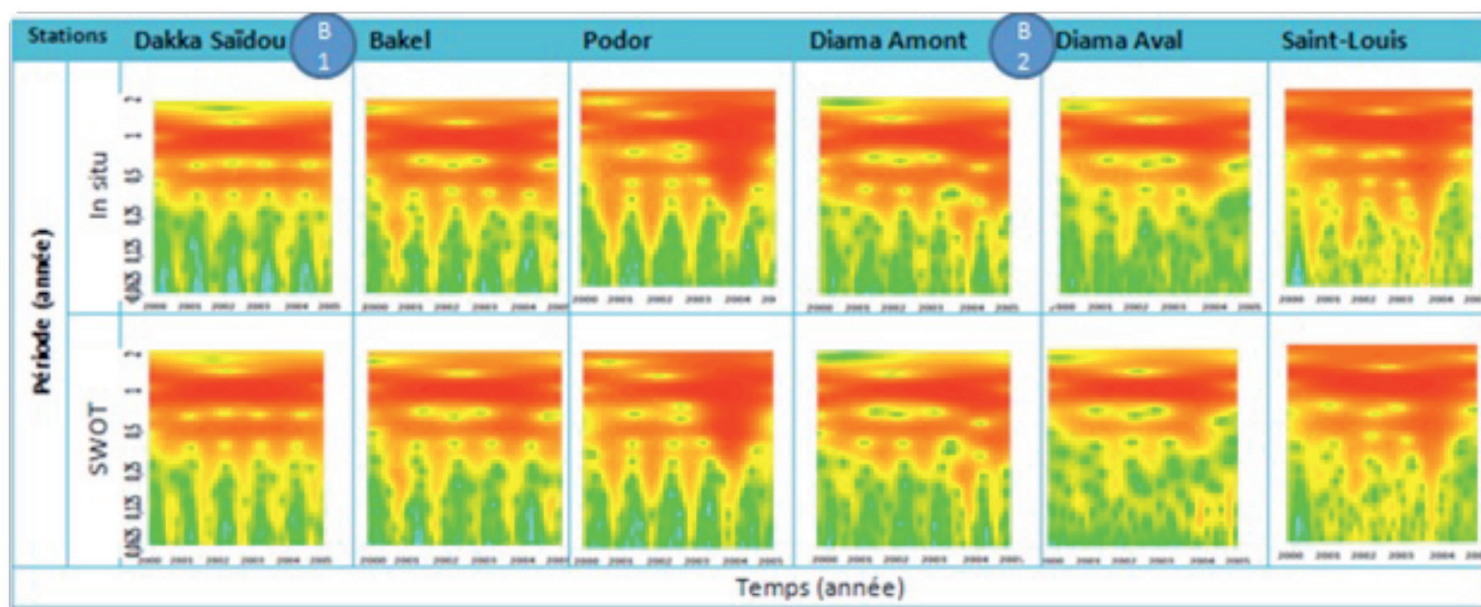


Figure 5: Transformées en ondelettes continues des hauteurs d'eau journalières des 6 stations de 2000 à 2005

6. A retenir

- Les hauteurs d'eau moyennes annuelles simulées par SWOT sont identiques à celles issues de l'observation in-situ. Cependant, les données SWOT simulées ont tendance à sous-estimer et surestimer, respectivement les maxima et les minima de hauteurs d'eau ;
- L'analyse des ondelettes montrent principalement deux modes de variabilité : annuel et saisonnier ;
- L'énergie simulée par SWOT semble être reproduite avec une certaine modulation qui est plus significative en aval (St Louis) où l'effet de la marée pourrait affecter le signal des niveaux d'eau par aliasing ;
- Ces modes de variabilité sont correctement reproduits par les simulations SWOT avec des cohérences supérieures à 94%. (entre les données SWOT et les mesures in-situ) ;
- L'énergie associée à ces fréquences semble similaire au niveau des stations, ce qui montre l'effet dominant du fleuve Sénégal en amont de Diama
- La reconstitution des modes de variabilité par SWOT démontre sa capacité à reproduire la variabilité hydrologique temporelle dans le bassin versant du fleuve Sénégal.

7. Références bibliographiques

Chevalier L. 2014. Caractérisation et modélisation de la variabilité hydrologique de l'estuaire de Seine dans le cadre de la future mission spatiale SWOT. Thèse de doctorat : Hydrologie. Rouen : Université de Rouen, 363 p.

Bréthaut C. et Pflieger G. 2015. De la définition d'une ressource aux idéaux de la gestion communautaire [vidéo]. Genève, Suisse : Université de Genève.

De Stefano L., Duncan J., Dinar S., Stahl K. *et al.* 2010. Mapping the Resilience of International River Basins to Future Climate Change-Induced Water Variability. Washington, USA : The Bank World, 88 p. <http://www.transboundarywaters.orst.edu/publications/publications/De%20Stefano%20et%20al%202010.pdf>

Gangbazo G. 2004. Gestion intégrée de l'eau par bassin versant: concept et application. Québec, Canada : Agri Réseau, 58 p. [14/07/2016]. <https://www.agrireseau.net/agroenvironnement/documents/concepts.pdf>

GWP et RIOB. 2009. Manuel de Gestion Intégrée des Ressources en Eaux par Bassin. Stockholm, Suède : GWP, 112 p. [10/06/2016].

World Bank. 1996. Sourcebook for Gender Issues at the Policy Level in the Water and Sanitation Sector. Washington, USA : World Bank, 112 p.



CHAPITRE 9

MANAGEMENT DIGITAL DE L'EAU

QUELLE EST LA PLACE DU NUMÉRIQUE DANS LE MANAGEMENT DE L'EAU ? : LE CAS DES EAUX USÉES

El hadji Serigne Mamour DIOP^{1*}, Awa DIATTARA¹, Makha NDAO², Issa SAKHO²

¹ Université Gaston BERGER, UFR de Sciences Appliquées et de Technologies (SAT), Saint-Louis, Sénégal

² Université Amadou Mahtar MBOW, UMR Sciences, Technologies Avancées et Développement Durable, Cité Keur Gorgui, Dakar, Sénégal.

*Corresponding author : serigne-mamour.diop@ugb.edu.sn

1. Introduction

« Dans un monde où la demande en eau douce augmente sans cesse, et où les ressources en eau limitées subissent de plus en plus des contraintes du fait de la surexploitation, de la pollution et des changements climatiques, il est tout simplement impensable de négliger les opportunités qu'offre l'amélioration de la gestion des eaux usées » [UNESCO]. En effet, une volumétrie considérable et croissante d'eaux usées est soit rejetée directement dans la nature, soit réutilisée sans traitement préalable à des fins agricoles. Ce qui se traduit par des problèmes de santé publique et dégradation de l'environnement, etc. Un management optimal des eaux usées passe nécessairement par la transformation digitale au cœur du développement des secteurs phare de notre société.

2. Solution IoT

Dans le cadre d'une gestion plus intelligente des eaux usées orientée sur la donnée, la station d'épuration écologique de l'Université Gaston Berger de Saint-Louis (UGB), décrite dans la Figure 1, a été renforcée avec une technologie IoT (Internet of Things pour Internet des Objets). Cette station, illustrée par la Figure 1, consiste en des filtres plantés (horizontaux et verticaux) de roseaux pour le traitement et la réutilisation des eaux usées par une reconstitution contrôlée des phénomènes d'auto-épuration naturelle. Notre solution automatisée de contrôle et de management à distance permet de fournir des informations en temps réel sur (i) la qualité de l'eau traitée et (ii) les niveaux de performance de la station en terme d'épuration à chaque étape du processus de traitement (par filtre par exemple). Cette solution de surveillance à distance est constituée des couches suivantes :

- **Une couche de perception** : elle consiste en des capteurs à faible coût et basse consommation permettant de collecter des paramètres relatifs à la qualité de l'eau : pH, Ammonium ; Nitrate, Phosphore, Conductivité, DBO, DCO,... Cette couche intègre également des actionneurs qui agissent sur le système. Le déclenchement du repassage de l'eau traitée dans le système d'épuration en cas de non-conformité avec les normes requises, par l'ouverture automatique des vannes correspondantes, en est un parfait exemple.
- **Une couche de communication** : elle est en charge de la remontée vers une gateway des données collectées par les capteurs, sur de longues distances et sans aucun coût opérateur. Unique dispositif du système habilité à disposer de connexion Internet, la passerelle s'occupe de la transmission des données vers le Cloud pour d'éventuels traitements.
- **Une couche applicative** : responsable de la fourniture de services applicatifs spécifiques aux différents acteurs.

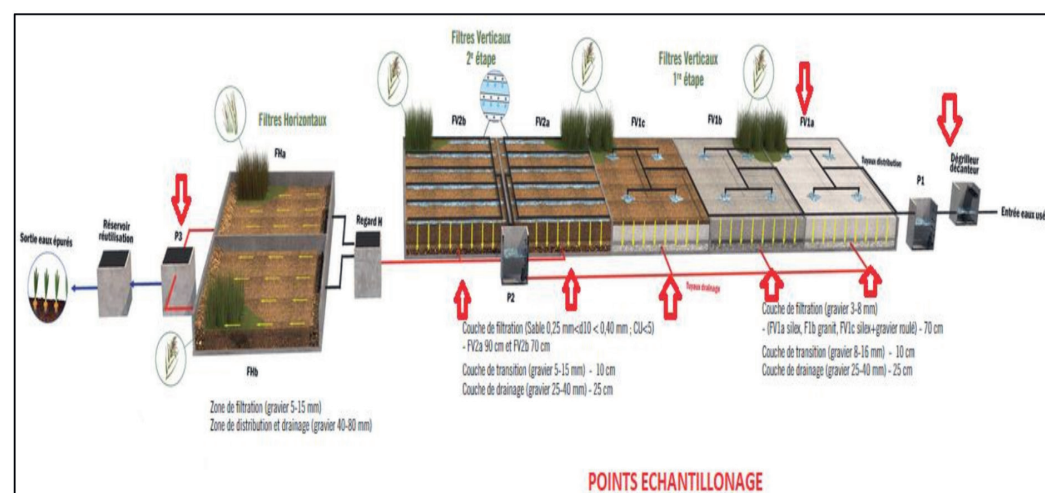


Figure 1 : Schéma globale de la station d'épuration écologique de l'Université Gaston Berger

3. Solution Edge AI

Le Cloud Computing occupe une place incontestable dans la croissance du secteur de l'IoT. Selon les chiffres 2020 de Gartner, 91% des données actuelles sont traitées de manière centralisée dans Datacenters et nécessitent de grandes capacités de calcul. Avec une estimation, à l'orée 2025, de 5 milliards d'objets connectés et une quantité de données échangées et sauvegardées de l'ordre 175 milliards de Téraoctets, il devient alors urgent de réduire drastiquement la quantité de données générées par ces appareils. En effet, cette volumétrie croissante des données demeure le principal facteur des risques de saturation de la bande passante mondiale. Ce phénomène conduit ainsi à une augmentation du temps latence dans le traitement de la donnée qui peut s'avérer problématique pour certaines applications. A cela s'ajoute les problèmes de confidentialité et de fiabilité, et plus spécifique à nos contrées, à l'intermittence de la connexion Internet et sa cherté, voire son existence dans la majorité des zones rurales. Il s'avère alors nécessaire d'effectuer le traitement en local et le plus près des sources de données (objets).

Le Edge AI est la convergence entre le Edge Computing et l'Intelligence Artificielle. Cette confluence permet l'exécution d'algorithmes d'Intelligence Artificielle – au cœur même des dispositifs (objets ou serveurs Edge) – sur des données générées localement dans un écosystème IoT. En d'autres termes, il s'agit de permettre aux dispositifs de pouvoir analyser des informations en temps réel et prendre des décisions, d'élaborer des comportements complexes et de s'adapter à des situations à évolution rapide, le tout sans connexion Internet. Ce qui se traduit par une réduction considérable des coûts de communication (trafic vers le Cloud par exemple) et des risques liés à la confidentialité, mais également par des temps de réponse extrêmement courts.

Toujours dans le cadre de l'automatisation de la station d'épuration de l'UGB, une Edge AI LoRa gateway dénommée Edge WaziGate a été développée. Cette Edge WaziGate, basée sur un Raspberry Pi 3 B+, intègre un système de raisonnement de flux de données (*Stream Reasoning*) permettant le traitement en temps réel de d'informations issues des objets déployés. Ce système, basé sur la combinaison des technologies du Web Sémantique et du Traitement d'Événements Complexes (Complex Event Processing, CEP), présente les avantages suivants :

- *Légèreté* : capacité à tourner sur des dispositifs contraints en ressources ;
- *Généricité* : capacité à s'adapter à différents cas d'usage (applications).

Le système de Stream Reasoning, dont le schéma global est décrit dans la Figure 2, est composé de trois modules :

- Un module *CEP Engine* : ce module est chargé d'exécuter les opérations de traitement d'événements complexes. Les données provenant des objets déployés sont injectées dans le moteur CEP lequel contient les règles permettant d'extraire les événements utiles. Les événements subissent un certain nombre de transformations telles que l'agrégation, le filtrage, etc. Chaque unité de transformation prend en entrée un flux et produit en sortie un flux d'événements répondant aux critères définis par l'unité de transformation. En faisant la correspondance entre ces événements et les faits qu'ils décrivent, le module produit en sortie un flux de déclarations RDF correspondant à ces événements.
- Un module *Reasoner* : le module de raisonnement met en relation les données contenues dans la base de connaissances et les déclarations émanant de l'étape de traitements d'événements complexes à la recherche des faits attendus. Ces faits sont préalablement définis dans le *Reasoner*. Les conclusions tirées de l'exécution du Reasoner sont redirigées vers un flux spécifique. De nouveaux faits peuvent être générés et ajoutés dans la base de connaissance à l'issue du raisonnement.
- Un module *Controller* : ce module est chargé d'envoyer des commandes aux objets afin d'agir sur l'environnement physique monitoré, par la mise en marche d'actionneurs par exemple. Les commandes envoyées découlent des résultats obtenus par le module de raisonnement.

Notre Edge WaziGate permet une analyse plus rapide des données avec des performances très satisfaisantes en termes de délai de traitement et d'utilisation des ressources système.

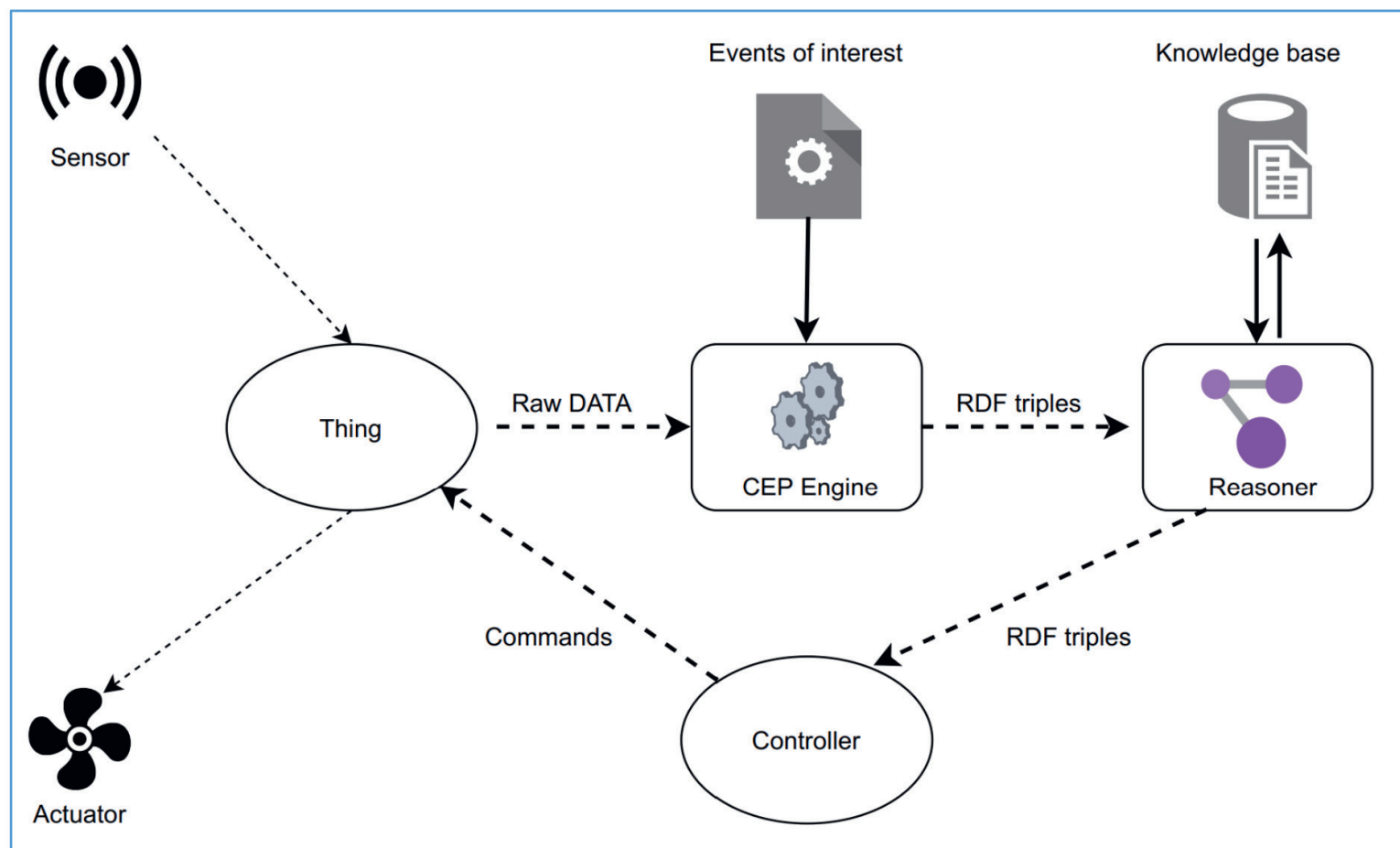


Figure 2: Schéma du système de Stream Reasoning

4. Perspectives

- Mettre en place un système national de monitoring temps réel et continu de la qualité de l'eau des stations de traitement des eaux usées et des réseaux d'eaux usées, avec à la clef une plateforme dédiée ;
- Proposer des outils plus innovants de supervision basés sur l'analyse de données et l'Intelligence Artificielle ;
- Proposer des solutions Edge plus dynamiques pour un traitement au plus proche des sources de données ;
- Prise en compte de la sécurité sur l'ensemble des propositions.

SYSTÈME DE TÉLÉGESTION DES STATIONS HYDROMÉTRIQUES ET DES OUVRAGES HYDRAULIQUES DANS LE DELTA DU FLEUVE SÉNÉGAL

Moustapha Lô^{1*}

¹ Société Nationale d'Aménagement et d'Exploitation des terres du Delta du fleuve Sénégal et des vallées du fleuve Sénégal et de la falémé, Saint Louis du Sénégal.

*Corresponding author : lotafa@gmail.com

1. Contexte

Le Delta du fleuve Sénégal est situé au Nord-Ouest dans la région de Saint Louis du Sénégal. Il est caractérisé par un réseau hydrographique très dense composé d'un ensemble d'axes hydrauliques qui sont tributaires du fleuve Sénégal pour leur remplissage. Cependant, de sérieux problèmes d'ordre climatiques et environnementaux peuvent aujourd'hui limiter la gestion correcte de ces différents axes.

La réalisation des barrages de Manantali et de Diama a par ailleurs fortement contribué à de profonds changements conduisant ainsi à la mise en place de nouvelles conditions hydrologiques qui se traduisent par une régularisation des crues et des étiages, une augmentation des volumes d'eau disponibles et un accroissement du niveau des plans d'eau.

Les aménagements hydrauliques et hydro-agricoles, particulièrement ceux de l'ouvrage G et de l'ouvrage de Ronkh, ont participé à la dynamique des axes hydrauliques. En effet, ces deux ouvrages constituent les principales portes de remplissage des différents plans d'eau du Delta.

De plus, l'ensemble des plans d'eau du Delta dont le plus important, l'axe du Gorom Lampsar avec 95 kms de long allant de Ronkh à Bango, assure aujourd'hui l'irrigation des aménagements hydro-agricoles, l'approvisionnement en eau des populations riveraines et de la ville de Saint Louis et l'alimentation en eau des agro-industries et du cheptel.

Face à cette complexité d'usagers et aux impacts du changement climatique sur la ressource en eau, il devient primordial de mettre en place un dispositif de suivi des écoulements et des niveaux d'eau dans les différents axes hydrauliques du Delta. Ce suivi est d'une grande importance car, il permet :

- de disposer d'informations à temps réels sur les conditions hydrologiques et de suivre le comportement des écoulements dans les axes hydrauliques ;
- de disposer d'un outil opérationnel d'aide à la prise de décisions ;
- d'améliorer l'exploitation des axes et des canaux (suivi de la régularité des débits, anticipation, réactivité, alerte) ;
- de mieux appréhender l'aménagement de futurs périmètres irrigués ;
- d'assurer un approvisionnement optimal et d'éviter le gaspillage d'eau (bonne maîtrise de la consommation d'eau).

2. Zone du projet

Le périmètre pour la mise en place du Système de Supervision et de Télégestion des Ressources en Eau (SSTRE) est circonscrit sur le territoire du Delta (Délégation de Dagana/Découpage zonale SAED).

La Délégation de Dagana est une des cinq (05) Délégations qui composent la SAED. Elle épouse les contours administratifs des Départements de Dagana et de Saint-Louis. Elle couvre une superficie d'environ de 6 087 km².

Elle regroupe 4 communes (Dagana, Saint Louis, Rosso et Richard Toll), 3 arrondissements et 6 communes :

- l'Arrondissement de Mbane englobant les communes de Gaé et de Mbane ;
- l'arrondissement de Ross-Bethio avec les communes de Ronkh et de Ross-Béthio ;
- l'arrondissement de Rao englobant les communes de Mpal et de Gandon.

La Délégation renferme un potentiel irrigable de 43 200 ha, sur les 88 000 ha projetés par le PDRG (Plan Directeur Rive Gauche). Les sols sont de types argileux (Hollaldé), limono-argileux (faux-holaldé) ou limono-sableuse (Fondé).

En plus de la source principale qu'est le Fleuve Sénégal et le Lac de Guiers, il existe d'autres axes hydrauliques qui sont des défluent du fleuve :

- le Gorom,
- le Lampsar,
- le Kassack,
- le Diawel,
- la Taouey

La figure 1 présente la carte du réseau hydrographique du delta du fleuve Sénégal avec les onze (11) ouvrages prioritaires bénéficiant d'équipements de mesures.

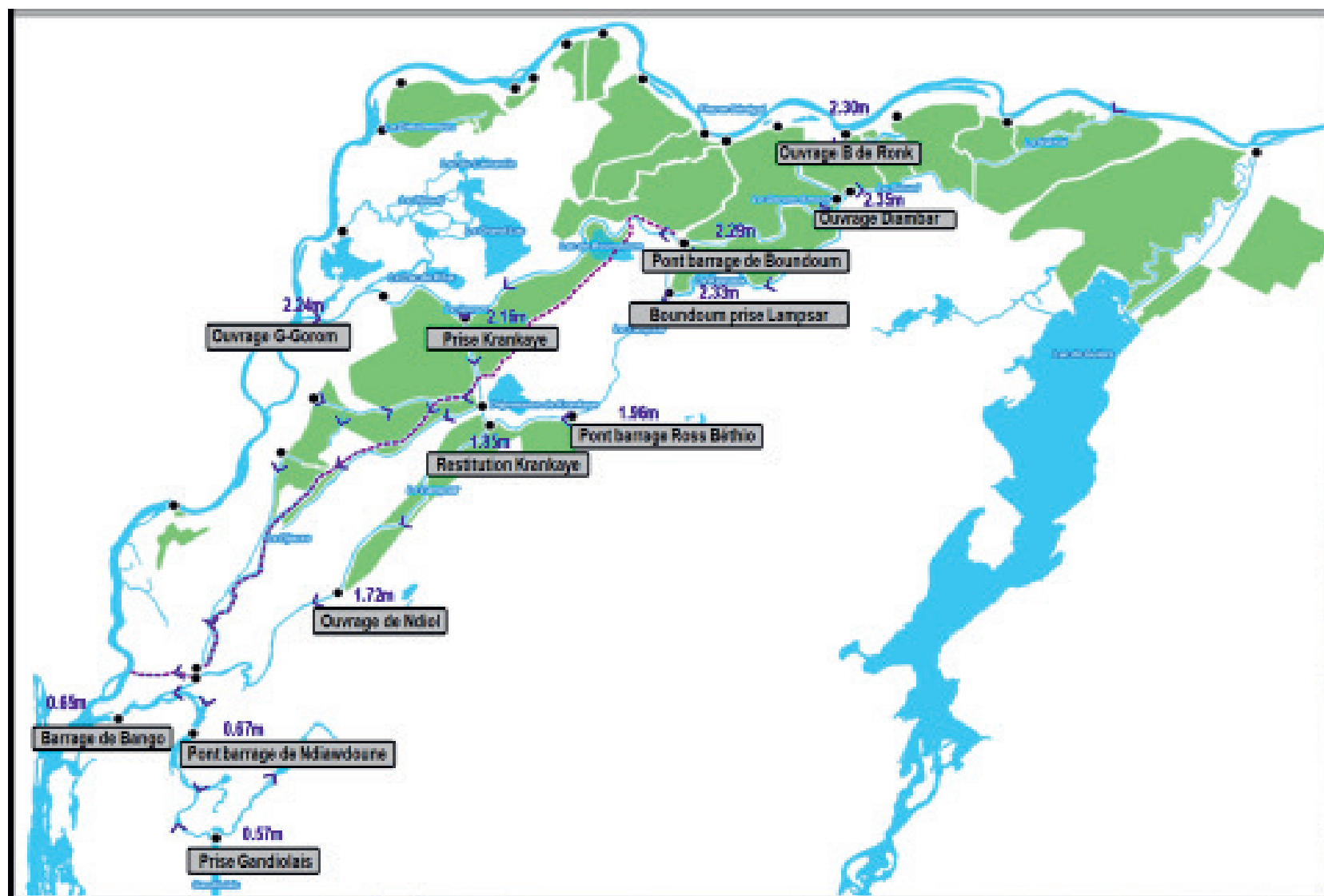


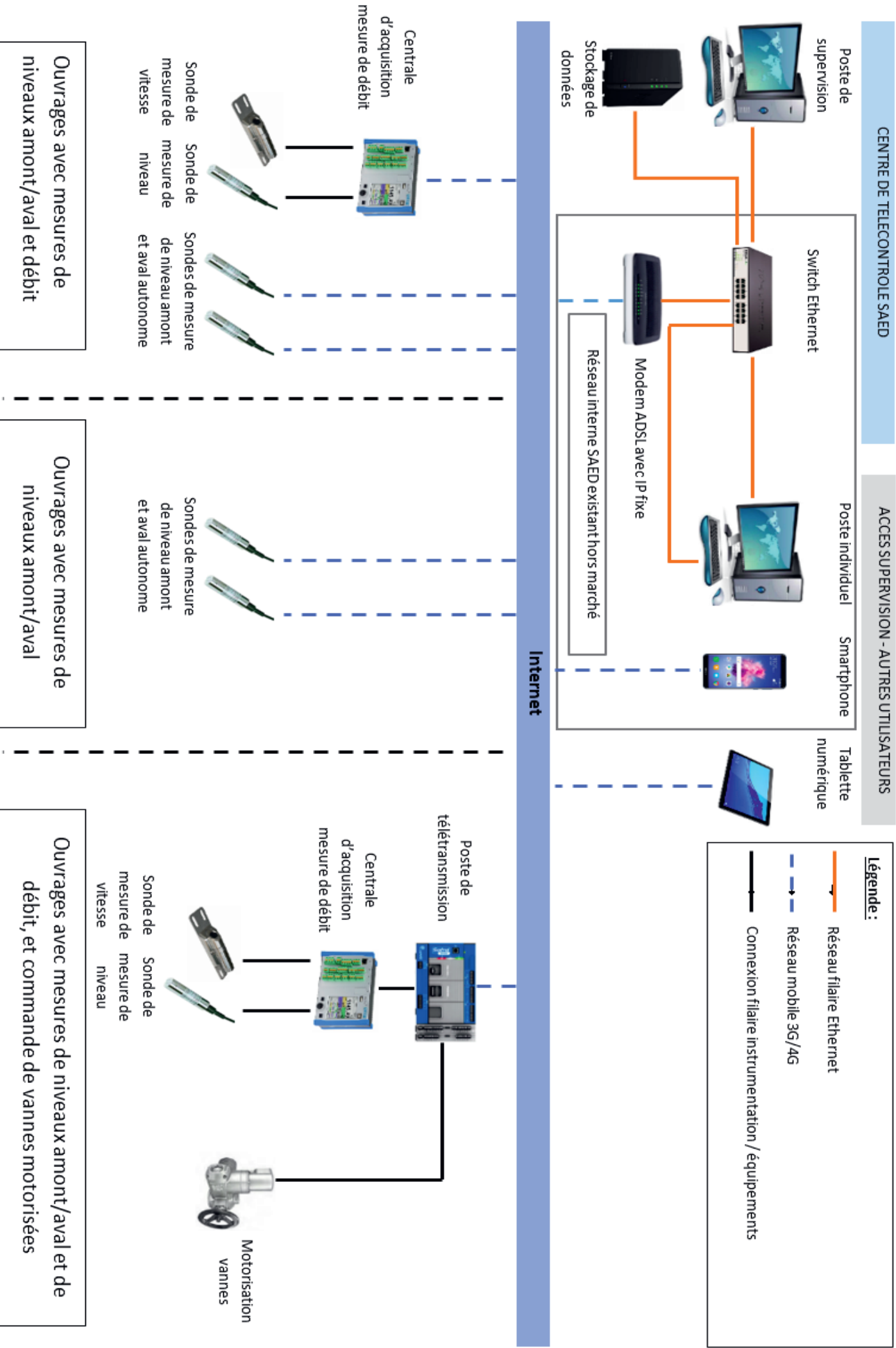
Figure 1: Delta du fleuve Sénégal, ouvrages équipés du système de télétransmission

3. Objectif

Pour une utilisation rationnelle et durable de la ressource dans une perspective de satisfaction de la demande en eau et de la préservation de l'environnement dans le département de Dagana, la SAED s'est dotée d'instruments de dernières générations de mesures hydrométriques et de la mise en place d'un système de télétransmission et de télégestion de données, permettant la régulation des ouvrages hydrauliques du delta du fleuve Sénégal. Ce système permet, entre autres, d'améliorer la connaissance du comportement hydraulique du réseau hydrographique du delta fleuve Sénégal, d'améliorer et de sécuriser la disponibilité de l'eau dans les différents axes hydrauliques et sa desserte dans les périmètres irrigués. Il favorise également une meilleure maîtrise des coûts d'énergie au niveau des stations de pompage permettant ainsi une amélioration de la production agricole et de l'efficacité de l'entretien du réseau. En outre, ce système permet aussi de disposer de séries de données hydrologiques pertinentes permettant de mieux appréhender l'aménagement de futurs périmètres irrigués dans le contexte marqué par le changement climatique mais également de disposer d'un outil opérationnel d'aide à la prise de décision.

4. Présentation du modèle conceptuel

Le schéma suivant, présente le modèle conceptuel de la mise en place et de l'exploitation du Système de Supervision et de Télégestion des Ressources en Eau (SSTRE). Les échanges se font par réseau mobile communiquant avec Internet.



Les schémas suivants illustrent les différents types de capteurs et le local technique.

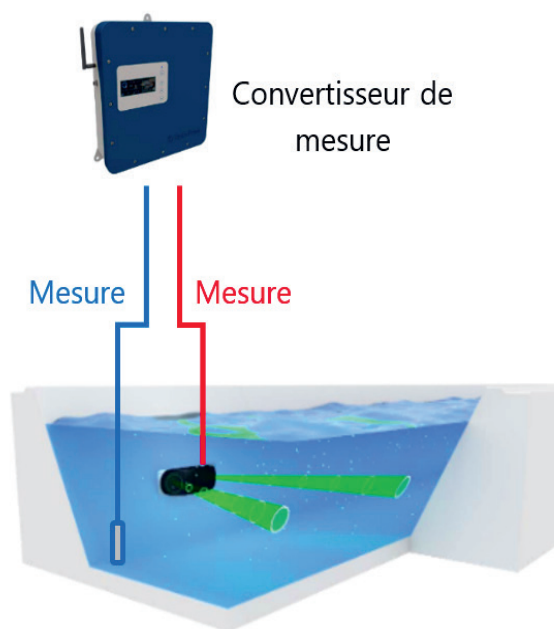


Figure 2 : Exemple type débitmètre

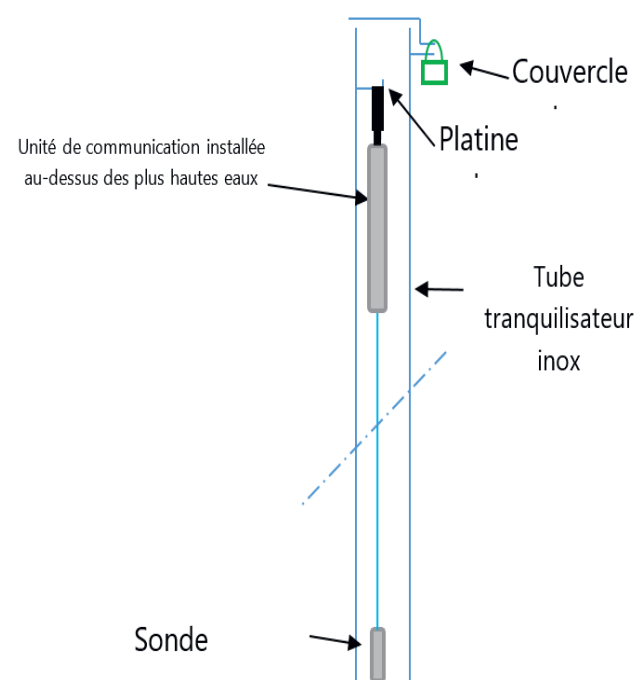


Figure 3 : Exemple type capteur de niveau



Figure 4 : Edicule-local technique

4. Résultats

L'exploitation du SSTRE permet d'avoir les résultats suivants à temps réel :

Ouvrages et axes hydrauliques	<ul style="list-style-type: none">• Débits,• Niveaux d'eau,• Volumes,• Températures.
Stations de pompage	<ul style="list-style-type: none">• Puissance des pompes• Niveau des pompes (bas vs normal)• Niveau de refoulement• Tension secteur et pompes

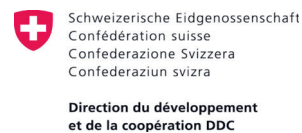
ATLAS

ON MAJOR SCIENTIFIC ISSUES ON WATER RESOURCES IN WEST AND CENTRAL AFRICA

In Africa, more than 64% of people live in rural areas, while 95% of agricultural lands depend on rainfall. Similarly, in West Africa, agriculture attracts 80% of the employment. It is why this 6th sustainable development goal (universal water access) is a top challenge to ensure economic growth and reduce poverty.

This social challenge requires a holistic approach to water resources/uses planning and management. In this context, producing knowledge on water resources, including numerical and AI-based tools (artificial intelligence) in water management, become cornerstones to support decision-making while achieving safe and sustainable water resources management.

The first volume of the Atlas on the Great Research questions on Water resources in West and Central Africa is the starting point of our main goal: breaking knowledge boundaries to support decision-making. This research disseminates more than 250 figures and involves more than 80 researchers/academics to engage communities and the public audience.



Editions PED



© Copyright PED - Mars 2022