



**HAL**  
open science

**Qualité des eaux de surface de la zone de Niamey :  
caractérisation physico-chimique, dynamique  
spatio-temporelle des concentrations en matières en  
suspension (MES) et en bactéries d'origine fécale (E.  
coli)**

Moussa Boubacar Moussa

► **To cite this version:**

Moussa Boubacar Moussa. Qualité des eaux de surface de la zone de Niamey : caractérisation physico-chimique, dynamique spatio-temporelle des concentrations en matières en suspension (MES) et en bactéries d'origine fécale (E. coli). Hydrologie. Université Paul Sabatier - Toulouse III; Université Abdou Moumouni, 2023. Français. NNT : 2023TOU30088 . tel-04257708

**HAL Id: tel-04257708**

**<https://theses.hal.science/tel-04257708v1>**

Submitted on 25 Oct 2023

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Université Fédérale



Toulouse Midi-Pyrénées

# THESE



En vue de l'obtention du

## DOCTORAT DES UNIVERSITES DE NIAMEY ET DE TOULOUSE

Délivrés : Universités Abdou Moumouni de Niamey / Toulouse III Paul Sabatier

Présentée et soutenue par

Moussa **BOUBACAR MOUSSA**

Le 31 mars 2023

**Qualité des eaux de surface de la zone de Niamey :**  
**Caractérisation physico-chimique, dynamique spatio-temporelle**  
**des concentrations en matières en suspension (MES) et en bactéries**  
**d'origine fécale (*E. coli*)**

**Écoles doctorales :** Sciences de la Vie et de la Terre - SVT (UAM) / Sciences de l'Univers,  
de l'Environnement et de l'Espace - SDU2E (UPS)

**Spécialités :** Géologie (UAM) / Surfaces et interfaces continentales, Hydrologie

**Unités de recherche :**

Laboratoire de Géologie / GET – Géosciences Environnement Toulouse

**Thèse dirigée par**

Manuela **GRIPPA**, Amadou **ABDOURHAMANE TOURE** et Bruno **LARTIGES**

**Membres du Jury**

M. Olivier **Ribolzi** – Géoscience Environnement Toulouse – DR IRD  
M. Bruno **LARTIGES** – Université Toulouse 3 Paul Sabatier  
M. Amadou **ABDOURHAMANE TOURE** – Université Abdou Moumouni  
Mme. Manuela **GRIPPA** – Université Toulouse 3 Paul Sabatier  
Mme. Isabelle **BERTRAND** – Université de Lorraine  
M. Philippe **CECCHI** – Université de Montpellier  
M. Bassirou **Alhou** – Université Abdou Moumouni  
M. Joseph **Sieliechi** – Université de Ngaoundere  
Mme. Sylvie **Galle** – Chargée de Recherche IRD  
M. Laurent **Kergoat** – Géoscience Environnement Toulouse

Président du jury  
Directeur de thèse  
Directeur de thèse  
Co-directrice de thèse  
Rapporteuse  
Rapporteur  
Examineur  
Examineur  
Invitée  
Invité

## Remerciements

---

Ce travail de thèse m'a permis, au-delà de l'aspect scientifique d'apprendre, de découvrir et de redécouvrir « chez moi », moi qui ai passé une bonne partie de mes jeunes années à quelques kilomètres du majestueux fleuve Niger. Je voudrais donc adresser mes remerciements et gratitude, dans ces quelques lignes, à chaque personne qui a fait de ce doctorat une expérience unique dans ma vie. Nombreuse sont les personnes et leurs contributions à ce travail ne sont en aucun cas exhaustives. Je tiens donc à m'excuser par avance si j'ai oublié des noms ou des expériences que j'aurais dû mentionner. Les remerciements professionnels se mêleront aux remerciements personnels, quoi de plus normal quand on a évolué dans un cadre comme le mien, je me sens tout simplement chanceux !

Tout d'abord, je tiens à remercier la personne du maître de conférences Amadou **ABDOURHAMANE TOURE**, enseignant chercheur de l'université Abdou Moumouni de Niamey, sans qui mon travail de thèse n'aurait pu voir le jour. Je me souviens encore de ce jour, alors que j'étais à Tlemcen/Algérie pour faire mon master 2, où j'ai reçu son coup de fil me proposant un stage sur des mesures de la qualité des eaux du fleuve Niger à Niamey. J'ai tout de suite dit oui, car d'une part cette demande venait de quelqu'un que j'admire de par son parcours et son exemplarité (et je ne suis pas le seul !) et d'autre part car je ne rechigne jamais devant une activité qui pourrait représenter un intérêt public. Qu'il en soit remercié pour m'avoir donné ma chance et d'avoir accepté d'être mon directeur de thèse !

Je me suis alors envolé pour Paris, à l'Institut d'écologie et des sciences de l'environnement (IEES-Paris) afin d'apprendre à faire les mesures de terrain où je fis la rencontre de la professeure Emma **ROCHELLE-NEWALL**. La facilité avec laquelle la formation s'est passée me laisse encore admiratif, tant la pédagogie et la maîtrise y étaient. Ensuite, le retour qu'elle avait fait sur le déroulement de la formation a été plus que décisif pour mon recrutement en thèse. Qu'elle en soit remerciée pour avoir cru en moi et d'avoir fait partie de mon comité de thèse !

Pendant les mesures de terrain j'ai échangé continuellement avec le duo d'enseignants chercheurs du Géoscience Environnement Toulouse (GET) Manuela **GRIPPA** et Laurent **KERGOAT** qui m'ont accompagné à tel point que si je voulais tout évoquer cette partie vaudrait la moitié de ma thèse. A mon arrivée à Toulouse, les discussions scientifiques avec ces deux chercheurs ont amplifié mon désir d'évoluer dans ce domaine et de viser l'excellence que je voyais dans leurs travaux. Qu'ils en soient rondement remerciés pour être des sources d'inspiration pour moi. Manuela **GRIPPA** qui est aussi ma directrice de thèse, a été bien plus que cela. Scientifiquement elle m'a apporté énormément et ça continue ! Mais au-delà de la rigueur scientifique, elle a fait preuve de tellement de compréhension à mon égard, ce qui a rendu cette thèse une aventure FORMIDABLE. Merci à Elodie **ROBERT** pour sa confiance, pour m'avoir confié la formation de ses techniciens, pour avoir fait partie de mon comité de thèse et pour ces très bons conseils sur le déroulement scientifique de mon travail. J'adresse mes remerciements aussi à Marielle **GOSSET** pour l'installation du radiomètre à la station de Goudel et son implication scientifique dans mon travail.

A mon autre directeur de thèse Bruno **LARTIGES**, Professeur à l'université Toulouse 3 Paul Sabatier, j'ai envie de dire merci chef ! Merci pour la patience et la bienveillance, les nombreuses corrections, les heures d'analyses au microscope ; merci de m'avoir appris plein de manips et aussi d'être monté à Ranguéil pour me voir pendant mon hospitalisation. A cet effet, je prends l'occasion de remercier toutes les personnes qui m'ont aidé dans ce moment compliqué : Laurent, merci de m'avoir accompagné et d'avoir été le relais pour tenir ma famille au courant ; Manuela malgré un mollet en souffrance est montée plusieurs fois à vélo ; Fabrice **GANGNERON**, Mathilde, Théo et Rémi, **MERCI !!!**

Les mots ne suffiront pas pour adresser mes remerciements aux équipes des hôpitaux de Purpan et de Ranguéil pour leurs soins à mon égard. Je remercie tout spécialement l'équipe du Docteur Jean **PORTERIE** et les infirmières du service de chirurgie cardiaque du CHU de Ranguéil.

J'adresse mes sincères remerciements aux rapporteurs et membres du jury : Isabelle **BERTAND**, Bassirou **ALHOU**, Philippe **CECCHI**, Sylvie **GALLE** et Olivier **RIBOLZI**, merci aussi de m'avoir aidé dans les démarches pour la mise en place de la bourse IRD et d'avoir été dans mon comité de thèse, j'ai beaucoup appris de nos échanges scientifiques.

Cette thèse a bénéficié d'un co-financement entre l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD) à travers son programme (**ARTS**) et l'ambassade de France au Niger à travers le (**SCAC**). Grâce à ces financements, j'ai pu mener mes travaux de recherche dans les meilleures conditions. Je voudrais leur témoigner ma gratitude pour donner l'opportunité à de jeunes chercheurs comme moi de pouvoir construire leur avenir scientifique, mais aussi de stimuler la recherche dans les pays du Sud. J'adresse également mes remerciements aux personnels et gestionnaires de ces deux institutions. Je me souviens encore de ce jour où Mr Issa **MAHAMANE** de l'ambassade de France au Niger est passé me prendre chez moi sous une pluie battante pour que je ne manque pas mon rendez-vous au consulat de France à Niamey et de Mme. Gaëlle **BRULE** qui a fait preuve d'une proximité bienveillante tout au long de mon soutien.

Je remercie chaleureusement les membres administratifs du GET et de l'IRD de Niamey pour leur accompagnement et leur professionnalisme. A la représentation de l'IRD de Niamey, je voudrais témoigner ma reconnaissance à **ALIKO** Mamane pour mon accueil dans le labo sol & érosion et sa grande contribution dans l'acquisition des données de cette thèse. Je dis merci à l'actuel représentant de l'IRD à Niamey Guillaume **FAVREAU** pour les échanges scientifiques très enrichissants et aux deux techniciens du labo de génétique Malan Djibo et Malan Moussa. Merci aussi à Tahirou Bana Hachimou et Moussa Abdou Boubacar respectivement logisticien et informaticien pour leur aide.

Merci à Jeremy **Panthou** et plus généralement à l'observatoire **AMMA-CATCH** pour la mise à disposition des données de précipitation utilisées dans cette thèse. Un très grand **MERCI** aux collègues doctorants et chercheurs du GET et du LETG – Nantes qui ont bien voulu accorder de leur temps pour la relecture de mon manuscrit, contribuant ainsi à le rendre meilleur : Laurent, Fabrice, Elodie, Mathilde, Félix et Paul-Alain.

Un grand merci, pour les bons moments passés avec mes collègues/amis (es) actuels (les) ou ex doctorants/postdoctorants (es) du GET et de l'UAM avec qui nous avons partagé repas,

astuces, idées et aussi d'intéressants débats notamment sur la géopolitique et l'actualité. Merci à Rémi, Steven, Théo, Kassem, Gaétan, Mathilde, Mohamed, Sofiyane, Juraj, Salia, Idé, Laëtitia, Jasmine, Latif, Klovis, Anaïs, Felix, Paul-Alain et toute « la team cantine ». Merci à Paty pour son aide et ses conseils pour mon premier comité de thèse.

Merci aussi à ces nombreux amis (frères) et cousins (es) qui se sont intéressés au travail que je fais et m'ont même accompagné quelques fois sur le terrain : Salim, Moustapha, Fatouma Agaly, Ismael, Maxime, Youssoupha, Aichatou, Samsia, Nouroudine, Omar, Hama Foulan, Al-Moubarak, Sannoussi, Aboubacar, A. Wahab, Moubarak, A. Kader. Un très grand merci à mes piroguiers de Saga, avec qui j'ai mené les campagnes à pirogue et que j'ai tissé une belle amitié : Hinsa et Idé. Merci aussi à **Mr Hadi** chef de l'usine de potabilisation des eaux de Goudel et l'ensemble des techniciens pour m'avoir donné accès à l'exhaure à chaque fois, à Mr Tanimoun Alkali, pour les données de débit du fleuve Niger et ses conseils. Merci au professeur **DIPAMA** et à la MC Hedwige **NIKIEMA** pour l'accueil à Ouagadougou lors de la formation.

Je voudrais aussi évoquer tous les enseignants (tes), maîtres (ses) d'école, professeurs (es) qui m'ont tenu du CI à maintenant. Mon doctorat est le fruit de votre amour à vouloir transmettre le savoir ! Les noms de tous me reviennent, mais je dirais seulement **MERCI !!!**

Merci à mon père Boubacar **MOUSSA**, mes frères et sœur (Lalla, Ahmed, Alfayed, Salif et Fayçal) qui, depuis Maradi ne cessent de m'encourager dans mon travail. Mes remerciements et ma profonde reconnaissance à mes oncles : Alassane, « Le Baba », Ibrahim et Harouna Djibo ; mes tantes : Terawey, Safi, Lamissi, Salamatou Anivali, Amy, Hadjara, Balkissa... Pour finir merci beaucoup à Fatima Ibrahim Maazou de m'encourager tous les jours quitte à me mettre un peu la pression parfois ! Merci d'être à mes côtés !

A toute ma famille, je voudrais dire tout simplement merci, merci pour l'amour et le soutien inconditionnels dont vous faites preuve envers moi. Parfois je n'en fais qu'à ma tête. Je me suis toujours dit que la meilleure des manières de dire merci à ma « famille » est de les rendre fier de moi. Je mets des crochets au mot famille car les personnes citées dans ces lignes occupent désormais une place spéciale pour moi et sont tous ma famille. J'espère de tout cœur vous avoir rendu fière de moi grâce à ce travail.

Enfin, je voudrais dédier le fruit de ce dur labeur A :

La mémoire de la personne sans qui tout ceci n'aurait jamais été possible littéralement et métaphoriquement, mon piler, mon tout, feu **AMINA DJIBO KIMBA**. Chère mère, Merci est un bien trop faible mot !

Ma grand-mère qui est une deuxième mère pour moi et une source d'inspiration par son courage et sa force !

La mémoire de mon petit cousin « Naboubou » avec qui je discutais d'animés (Naruto) et qui me faisait retomber dans l'enfance !

La mémoire de mon grand-père, Djibo **KIMBA** et mon oncle Boubacar **DJIBO** !

## Résumé

---

Au Sahel les eaux de surface constituent une ressource précieuse pour les populations qui y ont recours pour de multiples usages et le suivi de leur qualité est un enjeu crucial. Un accès à une eau de qualité, et un cadre de vie assaini et hygiénique peuvent conduire à une diminution des maladies hydriques, dont les maladies diarrhéiques qui touchent particulièrement les enfants en bas âge. Ces diarrhées infectieuses sont principalement causées par des bactéries pathogènes dont la présence dans l'eau est classiquement prospectée grâce à *Escherichia coli* qui est indicatrice de contamination fécale. Les éléments libres en surface (bactéries, matières organiques et minérales, déchets solides) sont généralement charriés vers les eaux de surfaces à la suite d'évènements pluvieux qui rendent ces dernières favorables à la prolifération des bactéries et autres pathogènes. Une meilleure compréhension des sources des agents pathogènes dans les eaux de surface, leur dynamique et les variables environnementales qui les contrôlent est donc primordiale. Ceci est d'autant plus urgent dans le contexte actuel caractérisé par les changements globaux : changement climatique, croissance démographique et modifications des écosystèmes naturels (changements de l'occupation et d'usage des terres, construction d'ouvrages hydroélectriques). L'objectif de cette thèse est d'améliorer la connaissance de la dynamique spatio-temporelle des concentrations en matières en suspension (MES), des bactéries d'origine fécale et des paramètres physico-chimique des eaux de surface dans la zone de Niamey. Un suivi régulier et adapté a été effectuée pendant 3 ans sur le tronçon du fleuve Niger entre l'amont et l'aval de la ville de Niamey et au niveau de deux lacs périurbains situés à l'est de la ville. La concentration en MES de ces eaux a été déterminée grâce à la méthode de filtration et à des mesures de la couleur des eaux dans le visible et le proche infrarouge par des radiomètres in-situ et embarqués sur satellite. La teneur des eaux en *E. coli* a été mesurée par la méthode de culture en microplaques grâce aux échantillonnages réalisés in-situ et les

paramètres physico-chimiques ont été mesurés avec des sondes multi paramètres. Ces mesures ont été complétées par des analyses de MES par microscopie électronique à transmission et à balayage, granulométrie et spectrométrie. Les analyses ont montré de très fines particules de kaolinite de l'ordre de 0,2  $\mu\text{m}$  avec des oxyhydroxydes de fer pendant la crue rouge. Les données issues de la radiométrie in situ et du capteur embarqué sur Sentinel-2 se sont montrées efficaces pour le suivi de la dynamique des MES dans la région et ont permis de quantifier les apports importants des affluents de la rive droite en amont de Niamey. La concentration en MES a montré une relation complexe avec le débit du fleuve Niger avec des valeurs maximales atteintes avant le pic de la crue locale (crue rouge) et de très faibles valeurs pendant le 2<sup>ème</sup> pic de crue à Niamey (crue blanche). La contamination fécale s'est avérée significative pendant toute l'année avec des pics plus importants au début de la saison des pluies qui précèdent les pics de MES et de débit. La teneur en *E. coli* du fleuve a révélé une importante pollution fécale provenant de la ville de Niamey avec des valeurs en moyenne 16 fois plus importantes en aval de Niamey par rapport à l'amont. Les lacs périurbains ont montré de valeurs élevées notamment en saison de pluie mais généralement plus faibles que dans le fleuve Niger. Les travaux de cette thèse ont permis de fournir des connaissances nouvelles sur l'état de la qualité microbiologique des eaux de surface dans la région de Niamey, et de mettre en évidence le rôle fondamental des sources de pollution notamment en ce qui concerne les activités anthropiques à proximité du fleuve et dans la ville de Niamey.

**Mots clés :** *Sahel, fleuve Niger moyen, lacs périurbains, hydrologie, matières en suspension (MES), couleur de l'eau, radiomètre, sentinel-2, Escherichia coli (E. coli).*

## Abstract

---

In the Sahel region, surface water is a precious resource for the population who uses it for many purposes and monitoring of its quality is a crucial concern. Access to improved water and a healthy and hygienic living environment would lead to the reduction of waterborne diseases, especially diarrheal diseases that affect young children. These infectious diarrheas are mainly caused by pathogenic bacteria whose presence in water is classically surveyed thanks to fecal indicator bacteria such as *Escherichia coli*. The free elements on the surface (bacteria, organic and mineral matter, solid waste) are generally washed into surface waters by rainfall events, making them favorable to the bacteria and other pathogens growth. A better understanding of pathogens sources in surface waters, their dynamics and the environmental variables that control them is therefore essential. Such approach is particularly urgent in view of the current context characterized by global changes: climate change, strong population growth and modifications of natural ecosystems (changes in land use and occupation, building of hydroelectric facilities). The objective of this thesis is to improve the knowledge of the spatio-temporal dynamics of surface waters of the Niamey area, characterized by suspended particulate matter (SPM), bacteria of fecal origin, and physico-chemical parameters. A regular and adapted monitoring was carried out during 3 years on the section of the Niger River between the upstream and downstream of the Niamey city and on two peri-urban lakes located east of the city. SPM concentration was determined using a filtration method and measurements of water color in the visible and near infrared was performed by in-situ and satellite radiometers. The *E. coli* content of the water was determined by the microplate culture method through in-situ sampling and the physico-chemical parameters were measured with multi parameter probes. These measurements were completed by analyses of SPM by transmission and scanning electron microscopy (TEM & SEM), granulometry and spectrometry. The analyses of the SPM

revealed the presence of very fine kaolinite particles around 0.2  $\mu\text{m}$  with iron oxyhydroxides during the red flood. Data from in situ radiometry and Sentinel-2 on-board sensor were effective in monitoring SPM dynamics in the region and allowed the quantification of significant inputs from right bank tributaries upstream of Niamey. The SPM concentration showed a complex relationship with the Niger River discharge with maximum values reached before the peak of the local flood (red flood) and very low values during the 2nd peak of the flood in Niamey (white flood). Fecal contamination was found to be significant throughout the year with higher peaks at the beginning of the rainy season that precedes the SPM and discharge peaks. The *E. coli* content of the river showed significant fecal pollution from the city of Niamey with values on average 16 times higher downstream of Niamey than upstream. The peri-urban lakes showed high values of contamination especially during the rainy season but generally lower than values in the Niger River. This work provides new knowledge on the state of the microbiological quality of surface waters in the Niamey area, and highlights the fundamental role of pollution sources, particularly the anthropogenic activities near the river and in the city of Niamey.

**Keywords:** *Sahel, Middle Niger River reaches (MNRR), peri-urban lakes, hydrology, suspended particulate matter (SPM), water color, radiometer, sentinel-2, Escherichia coli (E. coli).*

## Table des matières

---

Remerciements.....	2
Résumé .....	5
Abstract.....	7
Table des matières .....	9
Introduction .....	13
Chapitre I – Contexte et Objectifs .....	19
1.1 Les enjeux liés à la qualité des eaux.....	19
1.1.1 Les matières en suspension dans les eaux de surface .....	21
1.1.1.1 Facteurs contrôlant les MES dans un bassin versant .....	21
1.1.2 Pollution fécale de l'eau et maladies hydriques.....	24
1.2 Suivi de la qualité microbiologique de l'eau en zone tropicale et tempérée.....	26
1.3 Normes internationales liées à la présence d' <i>E. coli</i> .....	28
1.3.1.1 Sources des agents pathogènes et dissémination dans le bassin versant	30
1.3.1.2 Facteurs contrôlant la dynamique des bactéries pathogènes.....	33
1.3.1.2.1 Facteurs anthropiques .....	33
1.3.1.2.2 Précipitations et hydrologie.....	34
1.3.1.2.3 Facteurs environnementaux.....	35
1.3.1.2.4 Matières en suspension .....	36
1.4 Importance du fleuve Niger pour les populations de son bassin versant .....	37
1.5 Changements hydrologiques dans la partie moyenne du bassin du Niger .....	43
1.6 Objectifs et questions de recherche.....	50
Structure de la thèse.....	51
Chapitre II – Présentation de la zone d'étude et des sites d'échantillonnage.....	53
1.1 Climat régional et local .....	53
1.1.1 Précipitations dans le Niger moyen .....	56

1.1.2	Dynamique des températures à Niamey.....	57
1.2	Géologie et pédologie .....	58
1.3	Hydrologie du fleuve Niger .....	61
1.3.1	Évolution hydrologique long terme du fleuve Niger à Niamey .....	64
1.4	Hydrogéologie .....	66
1.5	Végétation.....	68
1.6	Sites de l'étude .....	73
1.6.1	Ville de Niamey .....	73
1.6.2	Population et approvisionnement en eau à Niamey .....	74
1.6.3	Lacs de Bangou Bi et Bangou Kirey .....	79
1.7	Sites d'échantillonnages .....	80
<b>Chapitre III – Matériels et méthodes .....</b>		<b>85</b>
1.1	Variables mesurées .....	85
1.2	Échantillonnage des eaux du fleuve et plans d'eau .....	85
1.3	Paramètres physico-chimiques des eaux de surfaces étudiées.....	86
1.4	Recherche et dénombrement d' <i>Escherichia coli</i> et d'Entérocoques intestinaux.....	87
1.4.1	Différence entre Nombre le Plus Probable (NPP) et Unité Formant Colonie (UFC) .....	89
1.4.2	Dénombrement d' <i>Escherichia coli</i> et Entérocoques intestinaux.....	90
1.5	Détermination de la concentration en matières en suspension.....	93
1.6	Détermination de la concentration en MES des eaux de surfaces de Niamey ...	95
1.6.1	Techniques directes de mesure de la concentration en MES : Méthode de mesure par filtration.....	95
1.6.2	Techniques indirectes de mesure de la concentration en MES : radiométrie optique .....	98
1.6.2.1	Estimation des MES des eaux du Niger par satellite .....	102
1.6.2.2	Estimation des MES par radiométrie in-situ.....	106

1.6.3	Détermination de la nature des MES (MET & EDXS, MEB, granulométrie)	108
1.6.3.1	Granulométrie des matières en suspension .....	109
1.6.3.2	Morphologie et nature minéralogique des matières en suspension .....	111
1.6.3.2.1	Microscope électronique à transmission et spectromètre.....	111
1.6.3.2.2	Microscope électronique à balayage.....	112
<b>Chapitre IV – Dynamique spatio-temporelle de la concentration en matières en suspension des eaux de surface dans la zone de Niamey .....</b>		
<b>115</b>		
1.1	Concentration en MES du fleuve Niger à Niamey obtenue par filtration.....	115
1.2	Concentration en matières en suspension des lacs de Bangou Bi et Bangou Kirey	121
1.3	Couleur des eaux du fleuve Niger à la station de pompage de Goudel.....	123
1.3.1	Concentration en MES du fleuve Niger obtenue par mesure de la couleur des eaux	126
1.3.1.1	Dynamiques temporelles de la concentration en MES et le débit du fleuve Niger à Niamey .....	129
1.3.1.2	Dynamique spatiale de la concentration en MES du fleuve Niger moyen	132
1.3.1.3	Nature des matières en suspension du fleuve Niger .....	133
1.4	Nature granulométrique et minéralogique des matières en suspension des eaux de Bangou Bi et Bangou Kirey .....	135
1.5	Discussion chapitre IV.....	137
1.6	Conclusion chapitre IV .....	143
<b>Chapitre V – Dynamique spatio-temporelle de la teneur en <i>Escherichia coli</i> dans le fleuve Niger à Niamey .....</b>		
<b>145</b>		
1.1	Teneur du fleuve Niger en <i>Escherichia coli</i> à l’amont et à l’aval de la ville de Niamey .....	145
1.2	Dynamique spatiale de la teneur en <i>Escherichia coli</i> dans le fleuve Niger entre l’amont et l’aval de Niamey .....	147

1.3	Dynamique spatiale de la teneur en <i>Escherichia coli</i> d'une rive à l'autre du fleuve Niger .....	149
1.4	Teneur en <i>Escherichia coli</i> des lacs de Bangou Bi et Bangou Kirey.....	152
1.5	Dynamique spatiale des paramètres physico-chimiques des eaux du fleuve Niger à Niamey .....	153
1.6	Paramètres physico-chimiques des eaux de Bangou Bi et Bangou Kirey.....	156
1.7	Dynamique temporelle de la Teneur en <i>Escherichia coli</i> du fleuve Niger et lien avec les variables environnementales.....	157
1.7.1	Dynamique de la teneur en <i>Escherichia coli</i> en lien avec les précipitations et le débit	157
1.7.2	Dynamique temporelle de la teneur en <i>Escherichia coli</i> des lacs de Bangou Bi et Bangou Kirey et lien avec les précipitations.....	164
1.7.2.1	Relations entre les teneurs en <i>Escherichia coli</i> et les concentrations en MES du fleuve Niger à Niamey .....	165
1.7.2.2	Dynamique de la teneur en <i>Escherichia coli</i> et de la concentration en MES des eaux de Bangou Bi et Bangou Kirey .....	167
1.8	Discussion chapitre V .....	169
1.9	Conclusion chapitre V .....	178
	Conclusions et perspectives .....	180
	Liste des figures .....	189
	Liste des tableaux .....	200
	Références bibliographiques .....	202
	Annexe .....	229

## Introduction

---

L'eau représente une ressource naturelle cruciale au vu de la place qu'elle occupe dans le domaine de l'énergie, l'agroalimentaire et l'amélioration de l'assainissement ainsi que la santé humaine (**Levi, 2007**). Les prélèvements d'eau doivent répondre aux besoins actuels des populations sans pour autant compromettre les écosystèmes aquatiques et les usages pour les générations à venir (**Anctil, 2016**). Pour ce faire, les stratégies de gouvernance de l'eau définissent un ensemble de dispositions politiques, sociales, économiques et administratives afin de garantir un approvisionnement durable à différents niveaux et concilier les usages actuels aux disponibilités (**Molle, 2020**). La prise de telles dispositions repose sur la connaissance de la ressource (disponibilité, qualité), des usages et de leurs impacts.

Le suivi de la qualité des eaux est important pour préservation des écosystèmes aquatiques et les problèmes liés au transport sédimentaire associant des transports de polluants de toute sorte (métaux lourds, bactéries) et l'ensablement des lits des cours et plans d'eau (**Adjagodo et al., 2016**). Ce suivi est encore plus important pour la prévention des maladies hydriques. L'accès à une eau de qualité est un droit humain reconnu par l'ONU (**Smets, 2011**) et fait partie des Objectifs de Développement Durable (**ONU, 2020**). A l'échelle du globe, 780 millions d'êtres humains n'ont cependant pas accès à une eau salubre et 2,5 milliards de personnes n'ont pas un assainissement de base (**ONU, 2021**). L'accès à une eau de qualité, et un cadre de vie assaini et hygiénique peuvent pourtant concourir à la diminution des maladies hydriques, dont les maladies diarrhéiques (**WaterAid, 2021**).

Les maladies diarrhéiques touchent environ 2 milliards de personnes dont 1,7 milliard d'enfants à travers le monde chaque année (**WGO, 2012 ; OMS-UNICEF, 2017**). Les enfants de moins de trois ans souffriraient en moyenne de trois épisodes diarrhéiques par an dans les pays en

développement, les plus touchés par ces diarrhées infectieuses (**Walker et al., 2013**). Ces maladies représentent dans ces pays une des plus grandes causes de malnutrition et la deuxième cause de mortalité infantile (- de 5 ans) avec environ 525 000 cas de décès par an (**OMS-UNICEF, 2017**). Le Niger est l'un des pays les plus concernés avec 484,6 cas de décès pour 100 000 enfants de moins de cinq en 2015 (**Troeger et al., 2017**). Si des progrès ont été enregistrés à l'échelle globale en matière de mortalité liée aux maladies hydriques (**Troeger et al., 2017**), au Niger ils restent faibles avec une diminution de la mortalité de 16,6% entre 2005 et 2015 (**Troeger et al., 2017**). Les principaux agents causals des maladies diarrhéiques sont les rotavirus et des bactéries (*Escherichia coli*, *Salmonella*, *Shigella*, *Campylobacter*, *Yersinia*) (**Aumaître et al., 2004**). Les infections bactériennes sont principalement dues à l'utilisation d'eau contaminée par des matières fécales humaines et/ou animales (**OMS, 2017b**). La forte prévalence de ces maladies hydriques en Afrique subsaharienne est principalement liée au fait qu'une importante partie de la population a recours aux eaux de surface. La qualité des eaux de lacs et fleuves est très souvent dégradée à cause des différentes activités qu'exercent les habitants de leurs bassins versant. Par exemple, au Burkina Faso, **Cecchi et al., 2020** ont mis en évidence une corrélation significative entre les charges de matières en suspension (MES) dans de petits réservoirs d'eau de surface et la densité des populations environnantes. Les eaux du fleuve Niger sont d'une grande importance pour les 160 millions de personnes qui vivent au sein de son bassin versant et qui y ont recours pour différentes activités : irrigation, pêche, baignade, lessive, vaisselle, boisson (**Nexus bassin du Niger, 2022**).

En Afrique subsaharienne, en plus de la fréquentation des cours et plans d'eaux par les animaux d'élevage, la défécation à l'air libre, conséquence du manque d'assainissement, favorise l'augmentation du nombre des bactéries pathogènes dans les eaux de surface (**Hickling et Bevan, 2010 ; UNEP, 2016**). Les précipitations provoquent du ruissellement de surface et charrient les éléments libres à la surface du sol tels que les MES et les bactéries dans les milieux

aquatiques. L'acheminement de ces éléments procure un environnement favorable à la contamination, au développement et à la prolifération des bactéries (**Zebracki, 2008**). Les particules en suspension peuvent fournir un support d'attache, un habitat riche en nutriments et matières organiques aux bactéries indispensables à leur croissance (**Rochelle-Newall et al., 2016**). Elles assurent une bonne protection des bactéries contre les prédateurs et les effets antiseptiques des rayons UV solaires. Ainsi, les MES accroissent, significativement la durée de vie des bactéries, potentiellement pathogènes (**Rochelle-Newall et al., 2016**). La dynamique spatio-temporelle des eaux de surface sahéliennes est caractérisée par de fortes concentrations en matières en suspension au cours de la saison des pluies (**Robert et al., 2016, 2017 ; Abdourhamane Touré et al., 2016**), des températures de l'eau et de l'air élevées en toute saison (**Guichard et al., 2015**) et des sources de pollution omniprésentes surtout en milieu urbain (**Alhou, 2007**). Ces caractéristiques particulières laissent présager un habitat favorable aux bactéries (**Garzio-Hadzick et al., 2010 ; Pachepsky et Shelton 2011**).

La qualité des eaux est une variable soumise à un environnement en changements perpétuels. L'Afrique de l'Ouest et le Sahel sont des régions très sensibles aux effets des changements climatiques et anthropiques (**Nicholson et al., 1998**). De grandes sécheresses sont survenues dans les années 1970-1980. Ces sécheresses ont eu pour conséquences une diminution du couvert végétal et une augmentation du processus d'érosion affectant ainsi l'hydrologie régionale (**Descroix et al., 2013 ; Descroix et al., 2015 ; Descroix et al., 2018 ; Janicot et al., 1996**). La reprise de la pluviométrie depuis les années 1990 et la recrudescence des événements pluviométriques extrêmes combinées aux effets à long terme des grandes sécheresses sur les écosystèmes et l'environnement se sont traduites par une augmentation du ruissellement de surface et des inondations toujours plus fréquentes et dévastatrices dans la région (**Amogu, 2010 ; Panthou et al., 2014 ; Taylor et al., 2017 ; Lebel et al., 2020**). Communément qualifiés de « paradoxe du Sahel », ces changements se caractérisent aussi par l'augmentation du

ruissellement qui va à son tour conduire à une augmentation des cas de ruptures d'endoréisme dans la région (**Mamadou et al., 2015**) accroissant ainsi les superficies actives des cours d'eau et contributrices aux pollutions en tout genre. La contamination microbienne des eaux de surface est généralement associée à l'occupation des terres notamment la présence de surfaces cultivées et/ou urbanisées (**Giri et al., 2018 ; Namugize et al., 2018**) qui sont plus propices au ruissellement et donc à la mobilisation des polluants. L'élévation des températures peut, par ailleurs, augmenter la répllication des pathogènes et leur taux de survie (**Kolstad et al., 2011 ; Carlton et al., 2016**). Depuis les années 1960 les températures dans le Sahel montrent une augmentation significative dans la même ligne que la tendance globale (**Ringard et al., 2014**).

Dans la zone tropicale, tout comme dans le reste du monde, les civilisations et les villes se sont préférentiellement installées et développées près des cours et plans d'eau. Les villes de Addis Abeba et Khartoum sont installées sur le Nil ; Brazzaville et Kinshasa sur le Congo ; Kayes ainsi que Saint-Louis sur le fleuve Sénégal et Bamako et Niamey sur le fleuve Niger. Ces villes tropicales d'Afrique Subsaharienne connaissent ces dernières décennies une importante croissance démographique. La ville de Niamey par exemple a vu sa population multipliée par 55 entre 1950 et 2021. L'expansion de ces villes n'est cependant pas toujours accompagnée par des infrastructures d'assainissement adaptées (**Cleland et Machiyama, 2017**). La croissance démographique et la pression croissante sur les ressources laissent présager une incidence sur l'hydrologie de surface et sur la contamination des eaux de surfaces y compris les bactéries pathogènes. Cependant, les processus de croissance, transport et survie des agents causals des diarrhées d'origine hydrique, leurs relations avec les activités humaines, les processus naturels et leurs impacts sur la santé humaine sont insuffisamment connus en zone sahélienne à cause notamment des conditions particulières des eaux de surface de la région, bien différentes de celles des zones tempérées (**Rochelle-Newall et al., 2015**). Le manque de connaissance sur les relations entre les bactéries indicatrices de contamination fécale et les variables

environnementales qui y sont associées en zone tropicale est aussi dû à la faiblesse des mesures in-situ permettant d'analyser les variables à des échelles spatio-temporelles en lien avec la variabilité hydrologique. Le fleuve Niger à Niamey par exemple dispose de très peu de données régulières et fiables relatives aux qualités physico-chimiques et bactériologiques des eaux de surface (PANGIRE Niger, 2017).

Ce travail de thèse vise à documenter des paramètres clefs de la qualité des eaux de surface dans la zone de Niamey au Niger. Il s'agit de déterminer la dynamique spatiale et temporelle des paramètres physico-chimiques et microbiologiques de différents types d'eau de surface et les facteurs environnementaux et/ou anthropiques qui les influencent. Il s'agit aussi d'évaluer l'impact de la zone urbaine et périurbaine dans la contamination de l'eau dans un contexte de changements globaux. Pour ce faire, des mesures ont été réalisées sur le tronçon du fleuve Niger allant de la station de Goudel (amont de la ville) au quartier Saga (aval de la ville) et sur les lacs péri-urbains de Bangou Bi et Bangou Kirey. Les paramètres concernés ont été la physico-chimie des eaux (pH, température, conductivité, oxygène dissous), mesurée in-situ avec sondes multiparamètres YSI 556 MPS » et « 3620 IDS SET G ». La concentration en MES a aussi été déterminée, grâce à la méthode de filtration sur membrane en microfibres de verre et par mesure de la couleur de l'eau par un radiomètre in-situ et le capteur Satellitaire multispectral de Sentinel-2. La teneur en bactéries indicatrices de contamination fécale a pour sa part été déterminée au laboratoire sur des échantillons collectés, grâce à la méthode du nombre le plus probable par microplaques (NF EN ISO 9308-3 et NF EN ISO 7899-1). Les échantillons ont été réalisés avec une meilleure fréquence et un laps de temps plus importants que les précédentes études dans la région pour le cas des paramètres ayant déjà fait l'objet de suivis comme la concentration en MES. Pour la teneur en *E. coli*, il s'agit de mesures inédites sur le fleuve et les lacs en termes de série temporelle et quantité de sites échantillonnés. Les mesures de terrain ont été complétées par des analyses aux microscopes électroniques à transmission

(MET), à balayage (MEB) et de la spectrométrie. A terme, l'objectif est de connaître et prendre conscience de l'état de contamination fécale des eaux de surfaces très utilisées et sous influence humaine, d'étudier les facteurs qui influencent la dégradation de la qualité des eaux et de prendre les dispositions qui s'imposent afin d'assurer une utilisation durable.

## Chapitre I – Contexte et Objectifs

---

### 1.1 Les enjeux liés à la qualité des eaux

La qualité de l'eau regroupe l'ensemble des critères que celle-ci doit remplir pour être éligible à un usage donné. Ces usages vont de la consommation sous forme d'eau de boisson ou pour la toilette, d'eau de lessive/vaisselle ou pour les activités telles que l'irrigation, l'élevage et la baignade. Selon l'usage, les normes et directives qui régissent la qualité des eaux peuvent varier : une eau destinée à l'irrigation n'aura pas les mêmes caractéristiques que celle destinée à la consommation humaine. La qualité de l'eau est caractérisée par ses paramètres physico-chimiques (pH, température, conductivité, oxygène dissous, potentiel d'oxydo-réduction et turbidité) et microbiologiques. La valeur de chaque paramètre influe sur les caractéristiques de l'eau et peut donner une indication sur son degré de pollution. La température (T), par exemple joue un rôle important dans la capacité de l'eau à favoriser les réactions chimiques et biochimiques et à dissoudre les sels et les gaz. Le pH, mesure de l'acidité de l'eau (concentration en ions  $H^+$ ) peut indiquer la prévalence de cette dernière à contenir des métaux sous forme ionique (pH acide) ou présenter une toxicité pour les organismes aquatiques (pH basique) en augmentant les concentrations d'ammoniaque. La conductivité électrique (EC) est l'estimation de la quantité totale de matière dissoute ionisée dans l'eau et représente un paramètre clé pour les organismes aquatiques. Par exemple, l'augmentation de la conductivité du milieu aquatique peut diminuer la probabilité d'occurrence de certains groupes de macro-invertébrés (les Diptères, éphéméroptères) tandis que d'autres groupes montrent une tendance à la hausse (**Crepin-Bournival, 2022**). L'oxygène dissous (OD) constitue un paramètre hautement important pour la vie des organismes aquatiques et provient dans le cas des eaux de surface essentiellement de l'atmosphère et de l'activité photosynthétique des algues et plantes aquatiques. Les éléments dissous (paramètres chimiques) peuvent indiquer l'état d'une eau vis-

à-vis de la pollution des eaux usées domestiques et industrielles. La turbidité, mesure de la transparence de l'eau est associée à la présence de matières en suspension (MES). Elle influence sur la pénétration de la lumière dans la colonne d'eau, contrôlant ainsi la photosynthèse des organismes aquatiques concernés. Les MES peuvent également gêner la respiration des poissons et favoriser l'accumulation d'importantes quantités de matières toxiques, comme les métaux, les pesticides, les huiles minérales (IBGE, 2005). La présence de cyanobactéries peut constituer un risque pour la santé humaine à cause de leurs toxines (microcystine-LR) dont les risques sont nombreux tels que des gastro-entérites, des nausées et vomissements, de la fièvre ou une hépatomégalie etc... (Cecchi et al., 2009). L'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) donne des valeurs guides quant à la concentration des différents éléments contenus dans l'eau selon son usage afin de préserver la santé humaine. La valeur guide d'un composant présent dans l'eau représente sa concentration qui ne présenterait aucun risque pour la santé humaine dans le cas d'une utilisation quotidienne (boisson, baignade, irrigation). Par ailleurs certains paramètres physico-chimiques bien que jouant un rôle dans la qualité de l'eau ne sont associés à des concentrations guides ou seuils (tableau 1. 1).

Tableau 1. 1 : Valeurs guides fixées par l'OMS pour certains paramètres physico-chimiques des eaux de boisson (OMS, 2017a).

Paramètres	Valeurs seuils fixées par l'OMS (2017)
pH	Pas de valeur guide mais un optimum entre : 6.5-8.5
T	Pas de valeur guide / adaptable aux spécificités locales
Conductivité ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Pas de valeur guide mais un optimum à : Moins de 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$
Oxygène dissous (mg/L)	Pas de valeur guide mais un optimum à :7,5
Turbidité (NTU)	Moins de 5
Microcystine-LR	1 $\mu\text{g}/\text{L}$ (valeur provisoire)

### **1.1.1 Les matières en suspension dans les eaux de surface**

Les matières en suspension regroupent l'ensemble des particules en suspension dans l'eau. Les MES dans un cours d'eau proviennent de l'érosion et du lessivage du sol suite à des événements pluvieux surtout lorsqu'ils sont intenses mais également par production autochtone du cours d'eau suite à l'effondrement des berges et à la re-suspension des sédiments du lit par le vent, par exemple. Les MES peuvent être de nature diverse (minéralogique et organique) selon leurs origines (Tessier, 2003). La mesure de la concentration en MES dans les cours d'eau ainsi que leur nature est importante car au-delà de représenter un paramètre clé de la qualité des eaux, elle fournit également une information sur le potentiel transport de polluants en tout genre (bactéries, métaux lourds ...) mais aussi la capacité du cours d'eau à rester pérenne face à la mobilisation de ces matières dont la conséquence est l'ensablement (Meybeck et al., 2003). Ces questions intéressent les autorités de régulation des cours d'eau notamment pour les phénomènes d'érosion et dépôts dans les chenaux navigables, le transport de polluants mais également la gestion des ouvrages hydrauliques (Barrages, station de pompage pour AEP) (ABN, 2007). L'ABN (Autorité du Bassin du Niger), organisme de gestion du fleuve Niger regroupant les Etats riverains s'en sert dans le cadre d'élaboration de stratégies durables de gestion et d'adaptation aux changements climatiques. Les matières en suspension représentent un paramètre important dans le devenir des bactéries car une importante partie de ces microorganismes est susceptible de se trouver attachée aux matières en suspension dans le milieu aquatique. Plusieurs paramètres environnementaux et anthropiques influencent la production, le transport et le dépôt des matières en suspension à l'échelle du bassin versant.

#### **1.1.1.1 Facteurs contrôlant les MES dans un bassin versant**

La dynamique spatio-temporelle des matières en suspension d'un cours d'eau est généralement contrôlée par des paramètres à la fois naturels et anthropiques. Cette influence s'étend de leur production à leur transport vers les cours et plans d'eau du bassin versant (Tessier, 2003) :

1. Le climat régional occupe un rôle fondamental dans la transformation de la roche en sols. Il influence aussi le transport des particules de leurs sources vers les cours et plans d'eau par l'érosion éolienne et hydrique. Ainsi, le climat d'une région donnée influe sur l'abondance et l'intensité des précipitations qui vont à leur tour impacter les MES charriées vers les eaux de surface (**Guillobez, 1990 ; Maucorps, 1987**). Les études sur l'agressivité des pluies dans le bassin versant du Kori Boubon situé en amont de la zone de Niamey ont montré des valeurs très élevées (**Mamadou, 2012**). L'agressivité d'une pluie se détermine à partir de son intensité qui joue un rôle important dans le lessivage et le ruissellement sur les surfaces.
  
2. La topographie du bassin versant est le facteur primordial qui contrôle les taux d'érosion mécaniques globaux (**Ludwig et Probst, 1998**). En effet, la topographie a une influence essentielle dans le transport des MES à travers la pente et l'altitude. L'énergie potentielle avec laquelle les précipitations érodent les surfaces drainées devient plus importante avec la pente acquérant ainsi une forte capacité mécanique de lessivage. Cependant, dans le cas d'une faible pente, l'eau a le temps de s'infiltrer, entièrement ou en partie, dans le sol, favorisant les processus de sédimentation et d'altération chimique. La région de Niamey est caractérisée par des pentes entre 1 et 2 % entre les plateaux et les bas-fonds. Cependant, les ravines sont très fréquentes et localisées près des plateaux où les pentes, plus abruptes, augmentent la vitesse de ruissellement et la capacité d'érosion (**Abdourhamane Touré, 2011**).
  
3. Les paramètres lithologiques du bassin versant ont un rôle fixe sur les sols et agissent principalement sur les propriétés physico-chimiques des roches mères. En effet, des travaux ont montré que les rivières drainant des bassins versants sédimentaires ont des taux d'érosion cinq fois plus important que ceux des rivières drainant des bassins versants cristallins ou métamorphiques et 2,5 cinq fois plus que celles drainant des

terrains volcaniques récents (**Meybeck, 1986, 1987 ; Probst, 1990**). Les propriétés des roches, pour leur part ont un rôle sur la nature du matériel transporté. L'ensemble de ces propriétés (physiques et chimiques) découle du contexte géologique dans lequel les roches se sont formées.

4. Le quatrième paramètre naturel le couvert végétal, se trouve grandement impacté par les variations climatiques et les activités anthropiques (**Cecchi et al., 2020**). Dans la région de Niamey la diminution du couvert végétal naturel pendant la période de sécheresse accompagnée par l'augmentation des surfaces mise en culture s'est traduite par d'importantes charges sédimentaires dans les eaux ruisselantes (**Esteves et Lapetite, 2003 ; Valentin et al., 2005**). De plus, les pratiques telles que la mise en jachère, moyen de restauration chimique des sols sableux par augmentation des teneurs en matière organique contribuent à l'augmentation du ruissellement, donc une accentuation de l'érosion et de la concentration en matières en suspension des eaux de surface. En effet, les surfaces concernées par les jachères anciennes développent également des croutes d'érosion (**Valentin et al., 2004**).

Globalement, beaucoup de fleuves ne disposent pas de suivi de concentration en MES, ce qui entraîne une mauvaise connaissance des processus liés au transport sédimentaire. Cependant, l'utilisation de données satellitaires a permis de montrer des dynamiques de flux sédimentaires très différentes entre les fleuves situés au nord et ceux situés au sud de la latitude 20°N. En effet alors que les flux sédimentaires ont une tendance à la diminution dans la partie nord, une tendance contraire est observée pour les systèmes hydrologiques du sud avec une augmentation d'environ 41% (**figure 1. 1**). D'après la littérature, l'Homme est le principal responsable de cette dichotomie avec d'une part la présence plus importante de barrages dans la partie nord qui retiennent de grandes quantités de sédiments (**Graf, 1999**) et d'autre part les changements des

états de surfaces dans le sud qui entraînent une augmentation des flux sédimentaires (Dethier et al., 2022).

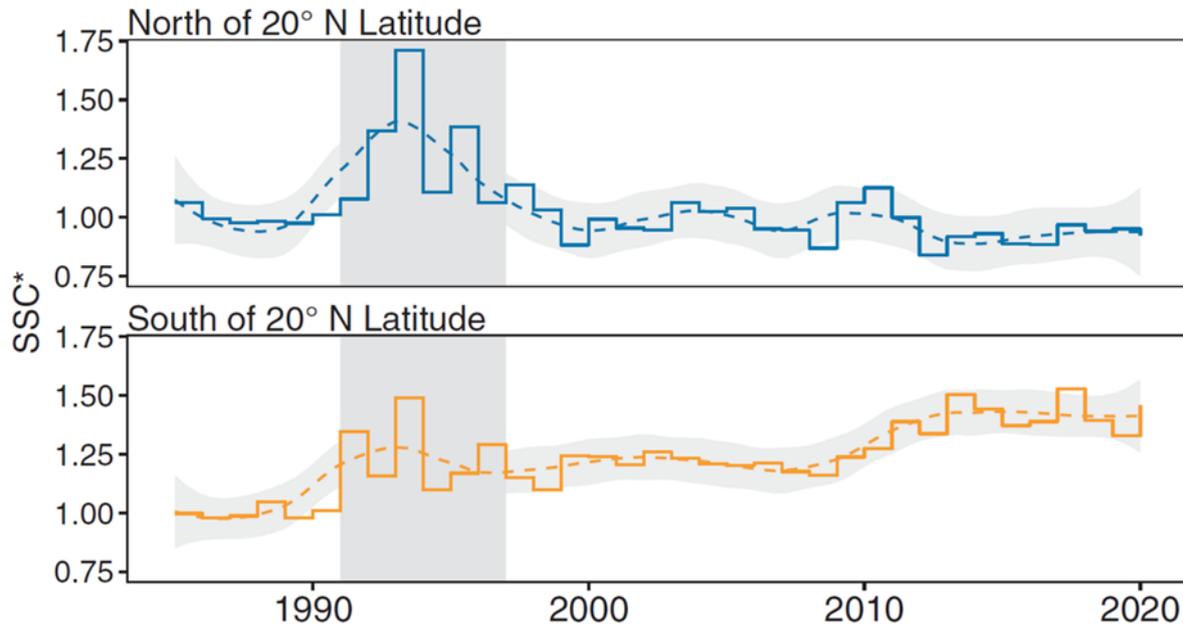


Figure 1. 1 : Concentration en MES des fleuves de part et d'autre de la latitude 20°N (Dethier et al., 2022). SSC désigne la concentration en matières en suspension.

### 1.1.2 Pollution fécale de l'eau et maladies hydriques

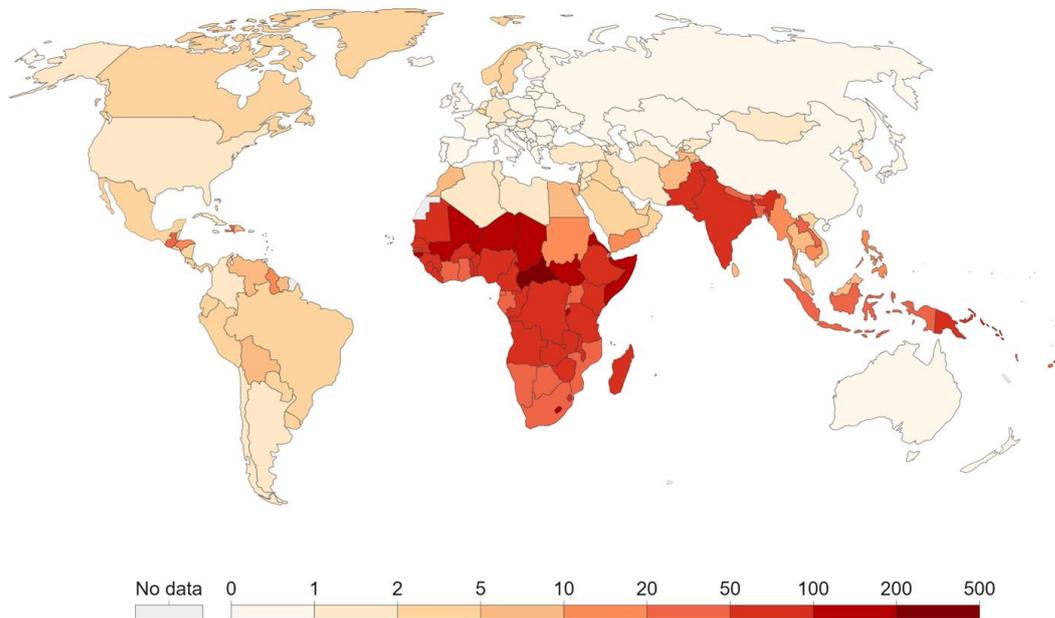
La pollution fécale des eaux de surface peut être d'origine naturelle et/ou liée aux activités anthropiques : usages domestiques, irrigation, industrie. On parle de pollution fécale naturelle quand il y a un apport de matières fécales d'animaux sauvages mais aussi la décomposition de leur cadavre. Ce type de pollution est généralement limité dans un milieu équilibré par les processus intrinsèques d'autoépuration qui dégradent la matière organique. Les pollutions anthropiques sont multiples et leurs effets varient selon l'importance de la pollution, la nature du polluant et la capacité du milieu à s'auto-épurer.

Les humains sont affectés par les maladies hydriques à cause de la consommation d'une eau souillée ou d'un contact avec cette dernière par des activités telles que la baignade, la lessive/vaisselle ou l'irrigation. Les effets liés aux contacts avec une ressource hydrique polluée

sur la santé humaine vont de la gastro-entérite à des maladies diarrhéiques graves et parfois mortelles telles que, la dysenterie, l'hépatite et la fièvre typhoïde. L'utilisation des eaux polluées par des matières fécales peut être la cause du déclenchement d'épidémies qui surviennent encore actuellement (OMS, 2017b). Pourtant, une importante part de la population mondiale consomme encore des eaux contaminées par les matières fécales et n'a pas un accès à une hygiène et un assainissement adéquat. Généralement cette population se situe dans les pays en développement de la zone tropicale (OMS/UNICEF, 2019). Dans ces pays, la présence de micro-organismes pathogènes est favorisée par l'insuffisance du cloisonnement des matières fécales qui transforment les eaux en véhicule majeur des maladies (Delolme et al., 1992). Aussi, la prévalence des maladies hydriques est, par ailleurs très importante. Les principaux agents pathogènes recensés dans ces zones sont *Salmonella*, *V. cholera*, *C. perfringens*, *Shigella*, *Cyanobacteria*, *Rotavirus*, *Entamoeba*, *Giardia* (Islam et al., 2021) et les maladies diarrhéiques d'origine hydrique y représentent l'une des premières causes de mortalité (figure 1. 2 ; ONU, 2020). Les plus touchés sont les enfants de moins de cinq ans. En Afrique subsaharienne ces maladies diarrhéiques ont été responsables de 600 000 cas de décès en 2017 (Troeger et al., 2017). Malgré quelques améliorations constatées pour l'accès à une eau de meilleure qualité, la mortalité reste élevée. Au Niger par exemple, aucune amélioration n'a été constaté entre 2010 et 2019 quant au taux de mortalité lié aux maladies diarrhéiques (figure 1. 2 ; OMS/UNICEF, 2020). Des progrès majeurs doivent nécessairement passer par une meilleure compréhension de la dynamique des agents pathogènes responsables, une meilleure détection des sources ainsi que la prévention à l'exposition des ressources en eau polluées (OMS, 2017b).

## Death rate from diarrheal diseases, 2019

The annual number of deaths from diarrheal diseases per 100,000 people.



Source: IHME, Global Burden of Disease

OurWorldInData.org/diarrheal-diseases • CC BY

Note: To allow comparisons between countries and over time this metric is age-standardized.

Figure 1. 2 : Taux de mortalité attribuable à l'insalubrité de l'eau, l'assainissement et l'hygiène-EAH, mesure du nombre de décès sur 100 000 personnes d'une population données de 2019. (OMS/UNICEF, 2020).

### 1.2 Suivi de la qualité microbiologique de l'eau en zone tropicale et tempérée

Les bactéries indicatrices de contamination (FIB en anglais) fécale désignent les germes qui vivent dans l'intestin humain et/ou des animaux et dont la présence dans l'eau traduit une pollution fécale. La qualité microbiologique des eaux peut être généralement déterminée grâce à la recherche d'une éventuelle contamination fécale. L'utilisation des bactéries indicatrices de contamination fécale (FIB) dans le suivi de la qualité microbienne de l'eau date du 20<sup>ème</sup> siècle (**Houston, 1900**). Pour être considérée comme FIB, une bactérie doit cependant remplir les critères suivants : 1) Être présente en nombre important dans les déjections humaines et animales ; 2) Avoir des similitudes avec les bactéries pathogènes d'origine fécale ; 3) Avoir un faible potentiel pathogène et 4) être facilement détectable par des techniques simples et peu coûteuses (**OMS et OECD, 2003 ; OMS, 2018**). Les bactéries *Escherichia coli* et

Entérocoques intestinaux font partis des bactéries qui répondent à ces critères. Elles se trouvent naturellement dans la flore intestinale humaine et des animaux à sang chaud et sont faiblement pathogènes (telles que ECEH, *Enterococcus faecalis*) (Santé Canada, 2021). Elles constituent ainsi de très bons indicateurs de contamination fécale, induisant la présence d'autres pathogènes.

Les indicateurs de contamination fécale (FIB) ont été établis afin de pallier les contraintes techniques et financières que représenterait le suivi de toutes les diversités de pathogènes de l'environnement (OMS, 1993). Plusieurs études se sont intéressées à la détermination de l'efficacité d'*Escherichia coli* et Entérocoques intestinaux comme proxy de la présence de germes pathogènes. Des études ont rapporté qu'*E. coli* est significativement corrélé avec certains agents pathogènes entériques tels que *Campylobacter*, *Cryptosporidium* (Van Dyke et al., 2012, Banihashemi et al., 2015). Par ailleurs, la présence des pathogènes est mieux détectée lorsque la densité d'*E. coli* dépasse 100 /100mL (Stea et al., 2015). Cabral et Marques, (2006) ont montré une bonne corrélation entre la teneur en Entérocoques intestinaux et les coliformes totaux, fécaux et streptocoques fécaux dans la rivière Febros au Portugal. Dans les zones tropicales et subtropical des études ont également relevé une bonne corrélation entre FIB et certains pathogènes. Ferguson et al, (1996) ont par exemple mis en évidence une corrélation positive entre coliformes & streptocoques fécaux et les spores de *C. perfringens* dans la rivière Georges en Australie. Au Burkina Faso Robert et al, (2021) ont mis en évidence une corrélation significative entre *E. coli* et entérocoques intestinaux et ainsi entre la concentration des *E. Coli* et les cas de diarrhées.

Les bactéries indicatrices de contamination fécales (*E. coli*, Entérocoques intestinaux) ne permettent cependant pas la détection d'agent pathogène précis, ni de virus et de protozoaires (Griffin et al., 1999 ; Jiang et al., 2001 ; Jiang et Chu, 2004). Il ne faut donc pas interpréter la présence ou l'absence de ces bactéries dans un échantillon comme un indice de la présence

ou de l'absence de microorganismes pathogènes entériques précis dans l'échantillon. Les FIB sont considérés comme des indicateurs généraux de contamination fécale puisque les études épidémiologiques ont montré que l'accroissement de leurs concentrations dans les zones récréatives représente d'importants risques pour la santé humaine (**Santé Canada, 2021**).

Globalement, une nette amélioration de la qualité microbiologique des eaux a été constatée dans les pays développés de la zone tempérée grâce à un suivi adéquat de la ressource (**UNEP, 2016**). En revanche, des insuffisances majeures subsistent encore, quant à un suivi adéquat dans les pays en développement notamment en Amérique Latine, en Afrique et en Asie, en zone tropicale et subtropicale (**UNEP, 2016**). Il en résulte une méconnaissance de l'état des eaux à différents usages surtout quand on sait que les populations de ces pays n'ont pas accès à une eau de qualité optimale. L'Autorité du Bassin du fleuve Niger (ABN), par exemple tente d'assurer une bonne connaissance, gouvernance, préservation, protection, mobilisation et utilisation des ressources en eau du bassin du Niger à travers sa charte de l'eau (**ABN, 2008**) signée par les différents Etats membres. Cependant aucun de ces pays membres ne dispose de normes complètes des rejets d'effluents dans les eaux (**Ba et al., 2022**).

### **1.3 Normes internationales liées à la présence d'*E. coli***

La surveillance de la qualité de l'eau pour tout type d'usage est régie par des normes qui reposent sur des seuils de concentration de bactéries indicatrices de contamination fécale telles que *Escherichia coli* (*E. coli*) et Entérocoque (ENT) (**Geldreich, 1970**). La classification de la qualité microbienne de l'eau relève des normes de l'OMS établies suite à des études d'évaluation des risques. Les pays développés appliquent ces normes ou les adaptent selon des évaluations des risques tenant compte des réalités locales (Erreur! Source du renvoi introuvable. ; **Figure 1. 3**). C'est le cas pour l'Afrique du Sud (**CSIR/NRE/CO/ER/2011/0009/A**) les Etats-Unis (**USEPA**) (**EPA, 2012**), le Canada (**SC**) et L'Europe (**Directive 2006/7/CE ; Commission Européenne, 2006**). Au Niger une telle

directive n'existe pas surtout pour les eaux de baignade et concernant les eaux de boisson, il applique la norme de OMS pour la qualité bactériologique à savoir 0 *E. coli* pour 100mL d'eau analysée avec une tolérance allant à 10 *E. coli* pour 100mL (pS-Eau, 2016). A l'échelle du bassin du fleuve Niger, l'ABN ne dispose pas de directive relative à la qualité des eaux de surface. Chaque pays membre fixe individuellement des valeurs seuils (Ba et al., 2022).

Tableau 1. 2 : Directives sud-africaines (CSIR/NRE/CO/ER/2011/0009/A) et européennes (98/83/EC) (2006/7/CE) pour la qualité microbiologique de l'eau de boisson et à usage récréatif.

Paramètres	Entérocoques (ENT) (CFU 100 mL <sup>-1</sup> )	<i>Escherichia coli</i> ( <i>E. coli</i> ) (CFU 100 mL <sup>-1</sup> )
Eau de boisson	0 (0)	0 (0)
Usage récréatif (Eaux côtières)		
Excellente		
Bonne	≤ 100* (100*)	≤ 250* (250*)
Qualité Suffisante	≤ 200* (200*) ≤ 180** (185**)	≤ 500* (500*) ≤ 500** (500**)
Usage récréatif (Eaux continentales)		
Excellente		
Bonne	≤ 200*	≤ 500*
Qualité Suffisante	≤ 400* ≤ 330**	≤ 1000* ≤ 900**

\* = percentile 95 ; \*\* = percentile 90.

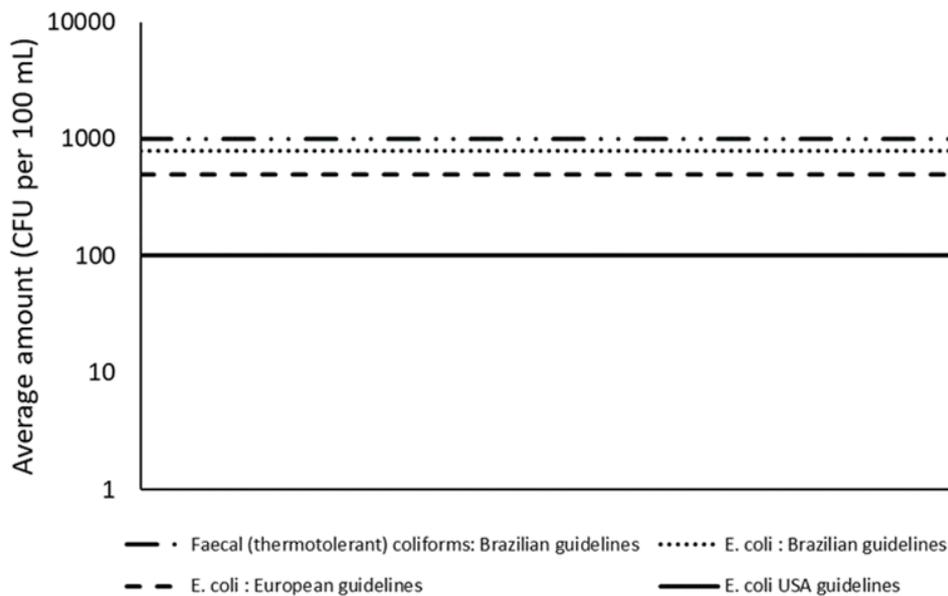


Figure 1.3 : Valeurs seuils de teneurs en *E. coli* et coliformes fécaux thermotolérants selon les normes d'eau de baignade pour les Etats Unis, l'Europe et Le Brésil (Vinueza et al., 2021 modifié).

### 1.3.1.1 Sources des agents pathogènes et dissémination dans le bassin versant

Les sources primaires de la pollution fécale dans l'environnement sont humaines et animales à travers leurs déjections (OMS, 2001). Dans les matières fécales humaines il existe entre  $10^7$  et  $10^9$  bactéries *E. coli* par gramme et entre  $10^4$  et  $10^9$  chez les animaux domestiques (Tenailon et al., 2010 ; Ervin et al., 2013). La concentration est beaucoup moins importante et varie entre  $10^4$  et  $10^9$  bactéries *E. coli* par gramme de déjections chez les animaux sauvages (Santé Canada, 2020). Les sources de pollution peuvent être diffuses quand il s'agit de plusieurs points de rejets collectés et transportés par le réseau hydrographique (écoulements de surface et subsurface) et ponctuelles lorsqu'il s'agit d'un unique point de rejet directement dans les cours et plans d'eau (OMS, 2011). Les jours qui suivent leur introduction dans leur nouvel environnement le nombre de bactéries tend à diminuer très rapidement (Flint, 1987). Cependant, plusieurs études ont montré que certaines espèces de bactéries sont capable de survivre, s'adapter et se multiplier hors de leurs hôtes (humain & animaux) dans différentes composantes (sols, eaux de surface et subsurface) des bassins versants tropicaux et tempérés

(Byappanahalli et al., 2012) et même dans les sédiments de fond suivant les conditions des milieux (Pachepsky et Shelton, 2011). Alors que la production des bactéries pathogènes dans les écosystèmes est assurée par les humains et les animaux, leur survie est favorisée par les concentrations importantes en nutriments, en matières en suspension et en matières organiques, des températures importantes et stables ainsi que la présence de végétation, mais aussi leur capacité à persister dans les biofilms (Rochelle-Newall et al., 2015 ; Jang et al., 2017). Le transport et la dissémination des agents pathogènes depuis les points de rejets de leurs hôtes sont assurés par le ruissellement sur les surfaces contaminées (Zhang et al., 2021) et les écoulements de subsurface dans le cas d'une mauvaise étanchéité des fosses septiques. Ces bactéries disséminées un peu partout dans le bassin versant représentent une source secondaire de la pollution. Elles sont transportées dans les eaux de surface où elles deviennent potentiellement une source tertiaire grâce notamment à leur résistance (Rochelle-Newall et al., 2015). Les échanges d'éléments, dont les bactéries, entre les différentes composantes du bassin versant sont sous l'influence de la topographie, le climat et la géologie (Figure 1. 4).

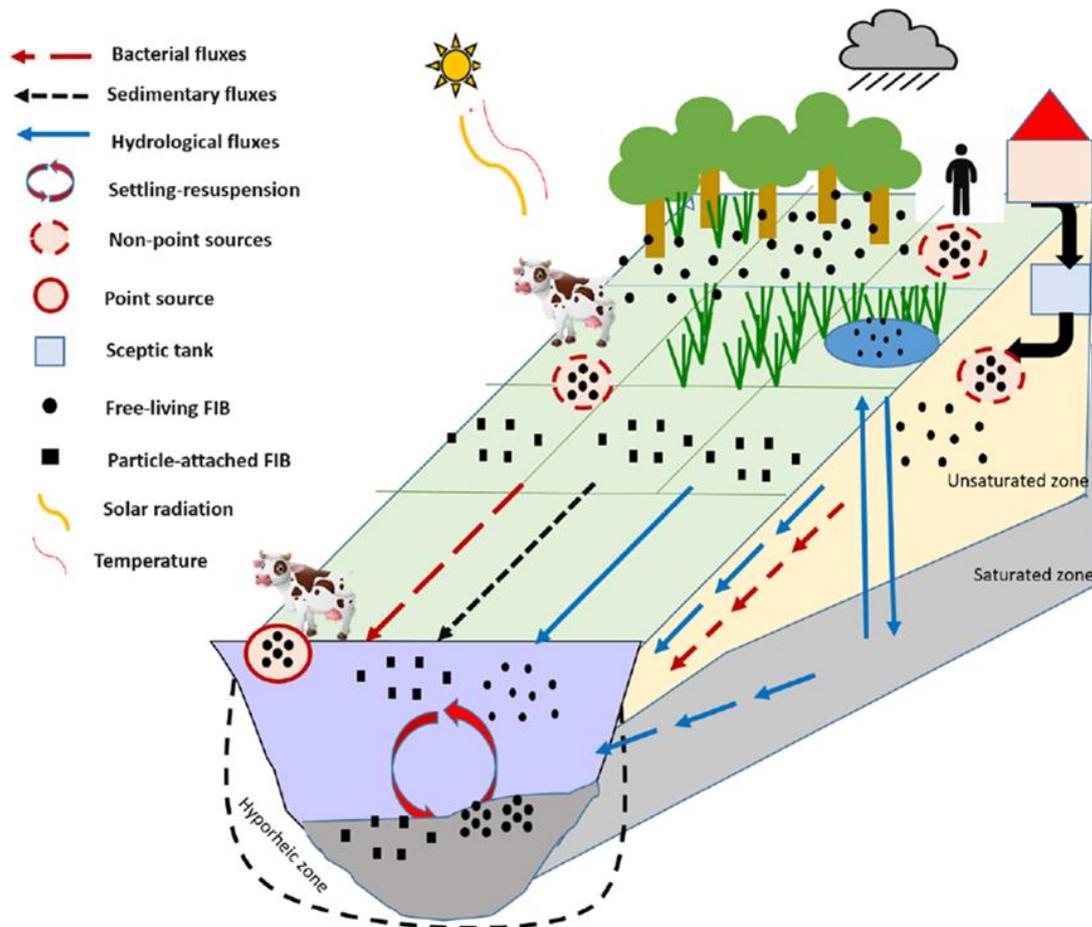


Figure 1. 4 : Diagramme conceptuel de sources et transport de bactéries indicatrices de contamination fécale (FIB) à l'échelle du bassin versant (Nakhle, 2021).

Globalement, dans les pays en développement, les deux types (diffuse/ponctuelle) de pollution fécale existent, avec cependant une prédominance des sources diffuses (OECD, 2017) à travers les déjections (humaines/animales) et leur utilisation comme engrais organiques sur les terres agricoles (Islam et al., 2021). Le risque de contamination fécale de la ressource en eau a montré une corrélation significative avec le nombre de têtes de bétail des ménages en Asie et en Afrique (Wardrop et al., 2018).

### 1.3.1.2 Facteurs contrôlant la dynamique des bactéries pathogènes

#### 1.3.1.2.1 Facteurs anthropiques

La majorité des études sur les paramètres qui influencent la dynamique des bactéries pathogènes dans l'environnement ont été menées dans les pays de la zone tempérée. Il reste donc beaucoup de connaissances à acquérir dans la description des écosystèmes des pays tropicaux en développement (**Rochelle-Newall et al., 2015 ; Islam et al., 2021**). Les changements d'occupation des sols et la gestion des ressources en eau par le biais d'ouvrages d'art modifient les régimes hydrologiques et aussi le transport des sédiments et des bactéries pathogènes (**Harmel et al., 2010 ; Zhang et al., 2021**). L'agriculture extensive en zone tropicale contribue elle aussi à travers l'application de fumier comme fertilisant et le pâturage du bétail, à la dissémination des bactéries pathogènes (**Zhang et al., 2021**). De plus, dans les pays en développement de la zone tropicale et majoritairement en zone rurale, les populations vivent à proximité des cours et plans d'eau avec leur bétail. Ils s'en servent pour l'eau de boisson, la cuisine et les activités récréatives et comme point de rejet des eaux usées. La conversion des espaces naturels en zones de cultures et centres urbains contribue à augmenter les bactéries pathogènes dans les sols et les eaux de surface (**Hathaway et al., 2010 ; Ribolzi et al., 2017 ; Huong et al., 2018 ; Derosé et al., 2020**). Dans les cours d'eau tropicaux hawaïennes **Strauch et al. (2014)** ont montré une forte augmentation des bactéries fécales à mesure qu'au passage dans les villes (**Figure 1. 5**).

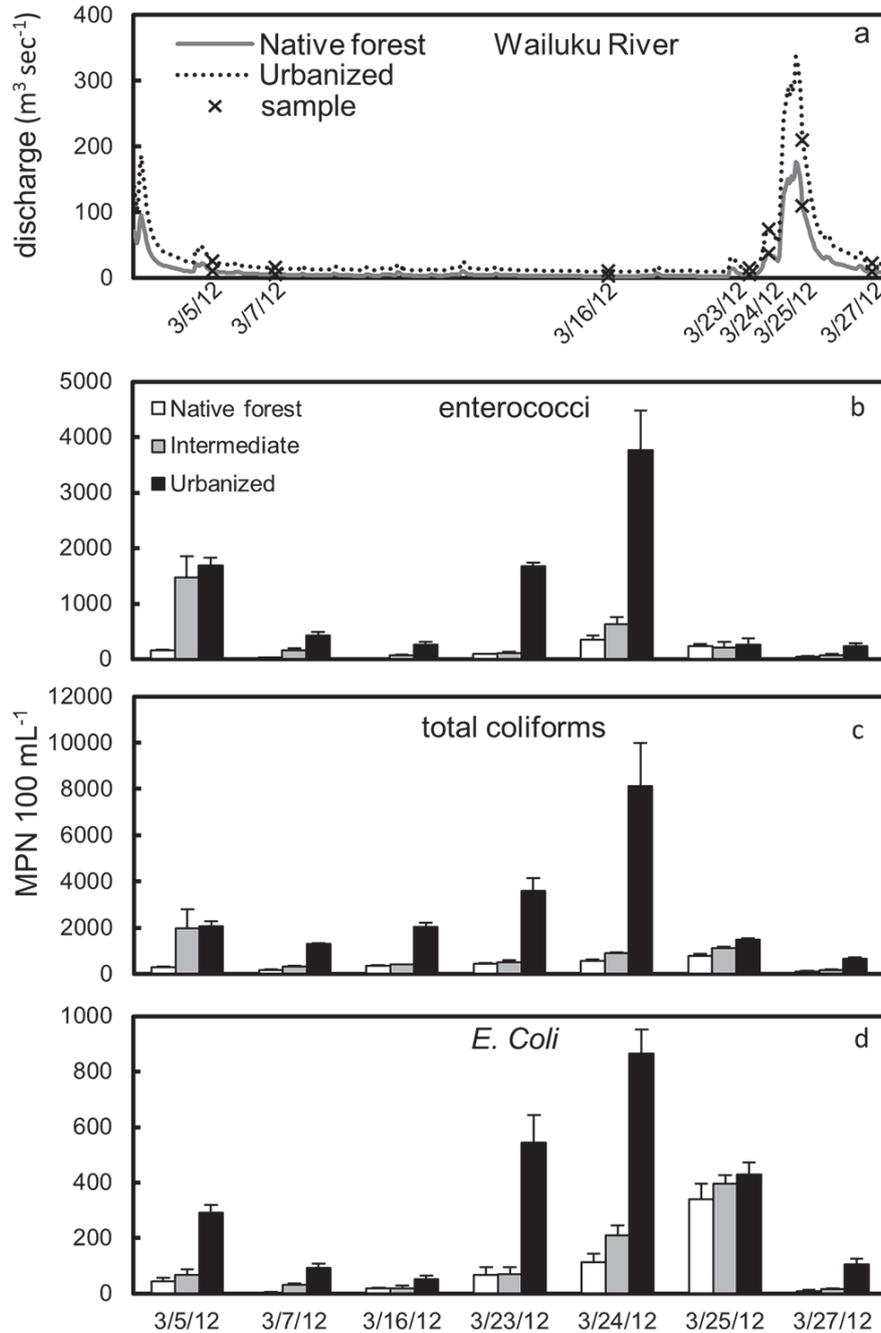


Figure 1. 5 : Teneur en Entérocoques intestinaux, coliformes thermotolérants et *E. coli* des eaux du fleuve Wailuku, (hawai) suite à des événements pluvieux (Strauch et al., 2014).

### 1.3.1.2.2 Précipitations et hydrologie

Au cours des évènements pluvieux les pathogènes provenant de sources secondaires et tertiaires sont mobilisés et distribués dans l’environnement. Les eaux de ruissellement, notamment dans les zones anthropisées ont été identifiées comme étant un important contributeur de bactéries

potentiellement pathogènes (**Hathaway et al., 2010**). En zone tempérée les précipitations intenses interviennent pendant l'hiver. Ceci a tendance à réduire les quantités de bactéries dans les eaux de surfaces par effet de dilution (**Mitch et al., 2010**). En zone tropicale cependant, les précipitations intenses interviennent sous des températures élevées. Ce qui favorise la survie des bactéries (**Pandey et al., 2012**). Des études menées en zone tropicale et subtropicale ont montré une augmentation des teneurs en bactéries fécales au cours de la saison des pluies (**Ahmed et al., 2018 ; Rochelle-Newall et al., 2016 ; Robert et al., 2021**).

#### 1.3.1.2.3 Facteurs environnementaux

Les relations entre les variables environnementales et les pathogènes ont reçu une grande attention dans la littérature scientifique. Une multitude de variables environnementales, biotiques et abiotiques ont montré à travers les études, leur influence sur la survie et la persistance d'*E. coli* dans l'environnement (**Barcina et al., 1986 ; Ishii et al., 2010 ; Jang et al., 2017**). Il s'agit du pH (**Presser et al., 1998 ; Van Elsas et al., 2011**), la salinité (**Bordalo et al., 2002**), les microorganismes prédateurs (**McCambridge et McMeekin, 1980 ; Korajkic et al., 2014**), La re-suspension des sédiments de fond (**Harmel et al., 2010**), et l'exposition aux rayons du soleil (**Davies et Evison, 1991 ; Sinton et al., 2002**). Cependant, la température et le rayonnement solaire sont cités comme étant les facteurs environnementaux le plus importants qui contrôlent la survie des pathogènes (**Mancini, 1978 ; McCambridge et McMeekin, 1981 ; Sampson et al., 2006**). Le rayonnement solaire est un facteur déterminant dans la survie des bactéries dans les eaux de surface surtout dans les régions tropicales caractérisées par une forte intensité et une durée importante du rayonnement solaire (**Conan et al., 2008**). Les rayons ultraviolet (UV) du soleil ont un effet antiseptique sur les bactéries (**Jozić et al., 2014**). L'inactivation par le soleil est souvent limitée en zone tropicale par la turbidité importante des eaux notamment en saison des pluies. Les fortes valeurs de turbidité gênent la pénétration de la lumière dans la colonne d'eau (**Walters et al., 2014**).

### 1.3.1.2.4 Matières en suspension

Dans les environnements fluviaux les bactéries allochtones et autochtones sont susceptibles d'être en association avec les particules en suspension (Jamieson et al., 2005 ; Fries et al., 2008 ; Droppo et al., 2009 ; Rehmann et Soupir 2009). Jeng et al., 2005 ont montré que dans les eaux de ruissellement les bactéries *E. coli* et entérocoques intestinaux se présentent sous forme attachée respectivement dans une proportion de 22 et 30% et 8 et 12%. Characklis et al., 2015 pour leur part ont trouvé qu'en saison des pluies 30 à 55% des coliformes fécaux sont attachés aux particules en suspension contre 20 à 35% en en saison sèche. La présence des particules est bien connue pour fournir aux bactéries les nutriments dont ils ont besoin particulièrement en présence de matière organique. Dans le lac de Bagré par exemple, la concentration en MES des eaux a montré une relation ( $r = 0,66$ ) significative avec la teneur en *E. coli*, avec des pics des deux paramètres en saison des pluies et une diminution progressive en saison sèche (Robert et al., 2016 ; Figure 1. 6).

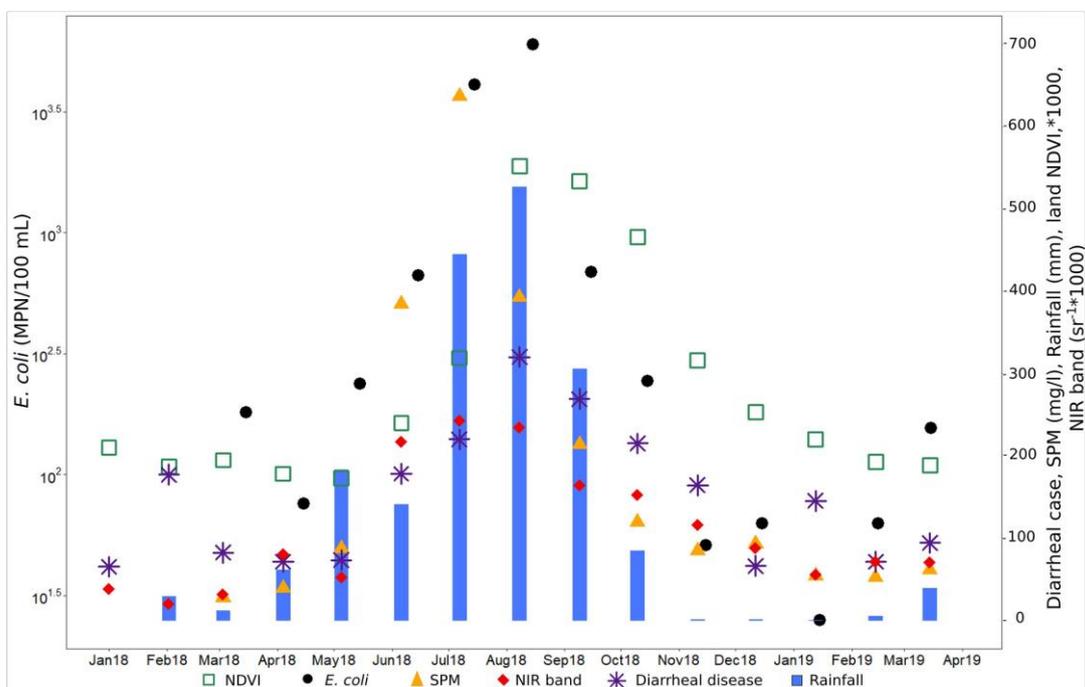


Figure 1. 6 : Moyenne mensuelle de concentration en MES (mg/l), d'*E. coli* (MPN/100mL), bande NIR ( $sr^{-1} \cdot 1000$ ), du NDVI ( $\cdot 1000$ ), des précipitations (mm) et des cas de diarrhée dans les centres de santé Dierma, Lengha et Dango, proche du lac de Bagré, entre 2018-2020. (Robert et al., 2021).

Les concentrations en *E. coli* sont plus importantes dans les sols riches en matière organique que dans les sols sablonneux pauvres en nutriments (**Garzio-Hadzick et al., 2010**). La bactérie *E. coli* bénéficie d'un plus grand potentiel de survie dans les sols limoneux et cette capacité augmente avec l'ajout de fumier (**Topp et al., 2003**). La présence de nutriments tels que le carbone, l'azote et le phosphore est un facteur qui conditionne la survie des bactéries dans l'environnement (**Jang et al., 2017**). Dans le milieu aquatique les MES offrent également une protection contre les prédateurs et l'effet des UV du soleil (**Davies et Bavor 2000 ; Gerba et McLeod 1976 ; Qualls et al., 1983 ; Sinton et al., 1999**). La protection contre les effets antiseptiques du soleil sur les bactéries dépend par ailleurs de la taille des particules en suspension. **Walters et al., 2014** ont rapporté que les bactéries associées aux MES dont la taille est inférieure à 12 µm sont éliminées environ deux fois plus vite que celles associées aux MES dont la taille est comprise entre 12 µm et 63 µm. De plus, **Qualls et al., 1985** ont rapporté que plus le nombre de particules ayant 40 µm de diamètre augmentait plus le nombre coliforme fécaux augmentait aussi. Ceci suggère que les particules de grosse taille sont des agrégats de densité moindre que les particules plus petites.

#### **1.4 Importance du fleuve Niger pour les populations de son bassin versant**

Le fleuve Niger, long de 4 200 km, est le troisième plus grand fleuve d'Afrique derrière le Nil et le Congo (**Vaucelle, 2015**). Il prend sa source dans les monts du Fouta Djallon en Guinée à environ 800 m d'altitude (**Orange, 1992**). Le fleuve Niger joue un rôle central dans la culture, l'histoire et la vie socio-économique de l'Afrique de l'ouest (**ABFN, 2018**). Son nom d'origine, le fleuve des fleuves : « *egerou n-igerou* » fût donné par les Touaregs pour mettre en lumière le caractère exceptionnel qu'il représentait pour eux (**World Wide Fund for Nature, 1986**). Le cours principal du fleuve et ses affluents ont de tout temps été la source principale d'eau pour les populations riveraines (**Aboubakar, 2003**). Il sert également de moyen de transport pour les

voyageurs et les marchandises. Les sédiments qui se déposent sur les berges ont servi aux habitants à fabriquer des briques pour bâtir leurs maisons. Les eaux du fleuve représentent également un territoire de pêche par excellence sous la surveillance des « maîtres des eaux » qui coordonnent et déterminent les activités sur le fleuve selon le niveau de l'eau. L'agriculture de décrues, la culture sèche sur les berges et dans les marécages y sont réalisées grâce à l'alternance des crues et décrues du fleuve (**Paturel et al., 2020**). Les échanges se font entre l'amont et l'aval par le biais de grandes pinasses transportant les produits agricoles en direction de Tombouctou et repartaient avec du sel apporté du Sahara.

De grands empires se sont développés et ont prospérés sur les prairies et hauts plateaux du bassin du fleuve Niger. Il s'agit des empires du Ghana (11<sup>e</sup> – 13<sup>e</sup> siècle), Mali (13<sup>e</sup> – 15<sup>e</sup> siècle), Songhaï (14<sup>e</sup> – 16<sup>e</sup> siècle) et Kanem-Bornou (16<sup>e</sup> – 17<sup>e</sup> siècle). L'actuelle ville de Djenné par exemple a connu un développement économique au temps de l'empire du Mali et a acquis grâce au fleuve Niger, une place prééminente dans le commerce transsaharien avec les états arabo-berbères méditerranéens. Le bassin du fleuve Niger a aussi été le siège des empires peulhs du Macina (1818-1862) et du Sokoto (1810-1903) remarquables organisations étatiques (**Marie et al., 2014**). Le littoral du fleuve a pour sa part vu se développer les royaumes Yoruba (12<sup>e</sup> – 14<sup>e</sup> siècle) et du Bénin (15<sup>e</sup> – 17<sup>e</sup> siècle).

Le fleuve Niger accueille une importante biodiversité constituée de multitudes d'écosystèmes où vivent 36 familles et environ 243 espèces de poissons d'eau douces dont 20 sont endémiques (**Andersen et al., 2006**). Le bassin du fleuve Niger abrite également une riche variété d'oiseaux migrateurs (grues couronnées, hérons, aigrettes, les cigognes dans le delta intérieur ; pélicans et des flamants roses dans le bassin supérieur de la Bénoué) (**Andersen et al., 2006**).

Le cours principal du Niger passe par de grandes villes/capitales dont Niamey et Bamako (**figure 1. 7**) avec ses 2,71 millions d'habitants en 2020 (**worldpopulationreview, 2022**). La

population totale dans le bassin du Niger est d'environ de 160 millions (**Niger Basin Nexus profile, 2022**). Les opportunités directes et indirectes qu'offre le Niger à sa population riveraine sont nombreuses allant de l'énergie, l'irrigation, la navigation et les échanges commerciaux (**Andersen et al., 2006**). Le potentiel de développement au sein du bassin du Niger est immense. Seulement 9% des terres agricoles sont aménagées et 25% du potentiel hydroélectrique est installé (**ABN, 2015**). Le bassin du fleuve compte actuellement 11 barrages opérationnels et 5 projets pour certains en cours de réalisation (**ABN, 2015**). Au Niger, le projet du barrage de Kandadji datant depuis 1970 est en cours de réalisation. Il devrait permettre au Niger d'accroître de 55% sa production d'électricité et permettre l'irrigation de 35 000 hectares de terres (**Vaucelle, 2015**).

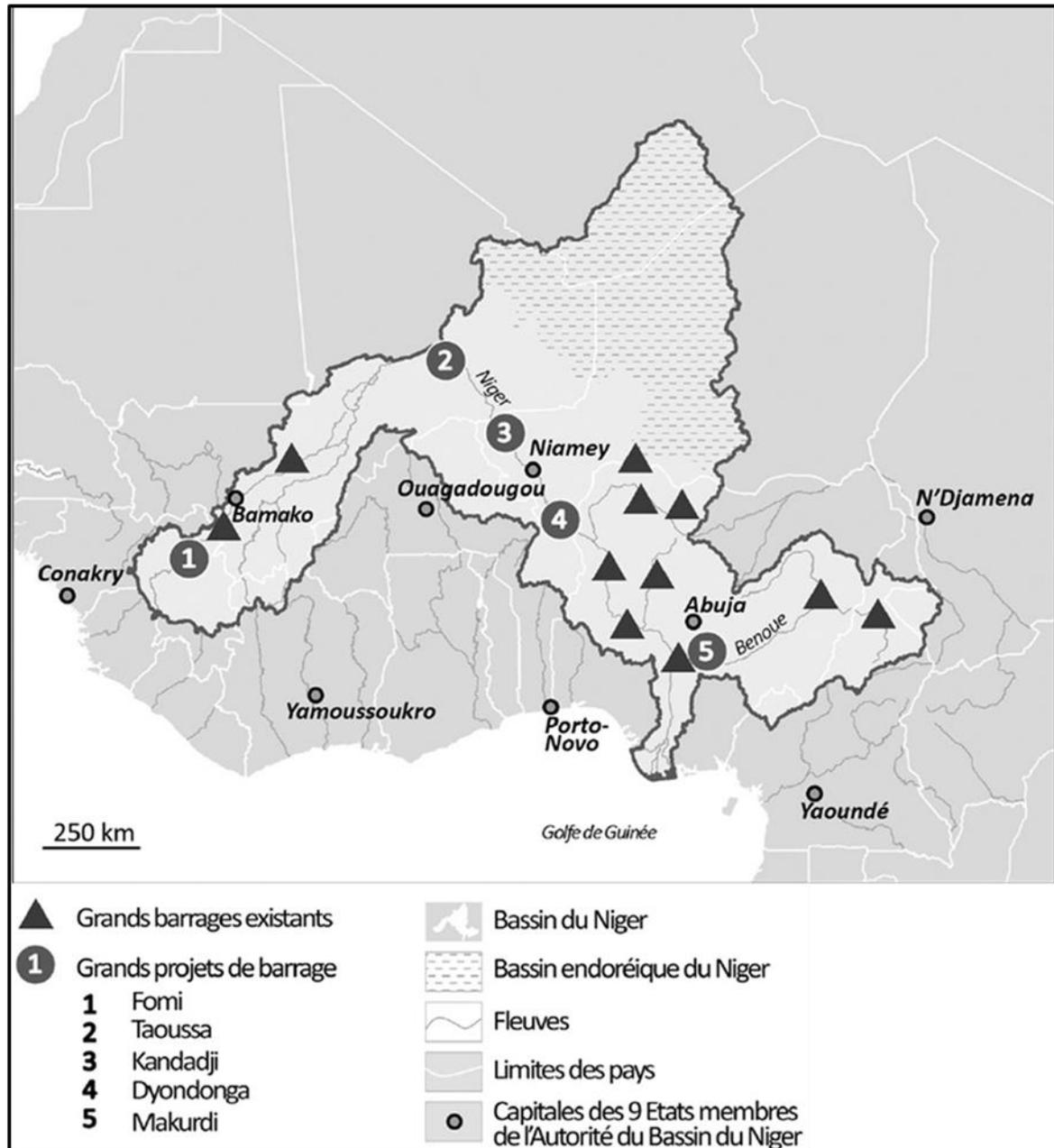


Figure 1. 7 : Localisation des barrages et grands projets dans le bassin du fleuve Niger (données ABN, conception, réalisation M-L Penin, J. Pierson, O. Pissoat) (Vaucelle, 2015).

La présence d'aménagements sur le cours d'eau est un élément modificateur des écosystèmes naturels du fleuve qui peut avoir différents effets. Les régimes d'étiages du fleuve Niger ont été modifié à Koulikoro après la construction du barrage de Sélingué passant de 46 m<sup>3</sup>/s entre 1907 et 1981 à 92 m<sup>3</sup>/s entre 1982 et 2009 (Ferry et al., 2012a). Ceci a permis l'alimentation des périmètres irrigués et le maintien du transport fluvial même en période de basses eaux. Les

ouvrages peuvent cependant perturber certaines pratiques de pêche par les nombreuses fluctuations du niveau de l'eau qui interviennent suite à des lâchers d'eau. A l'image du reste du bassin, les usages des eaux du Niger moyen par ses populations sont multiples. Il s'agit principalement de l'irrigation, l'approvisionnement en eau des populations, les besoins du cheptel, la pêche et la navigation (**figure 1. 8**).

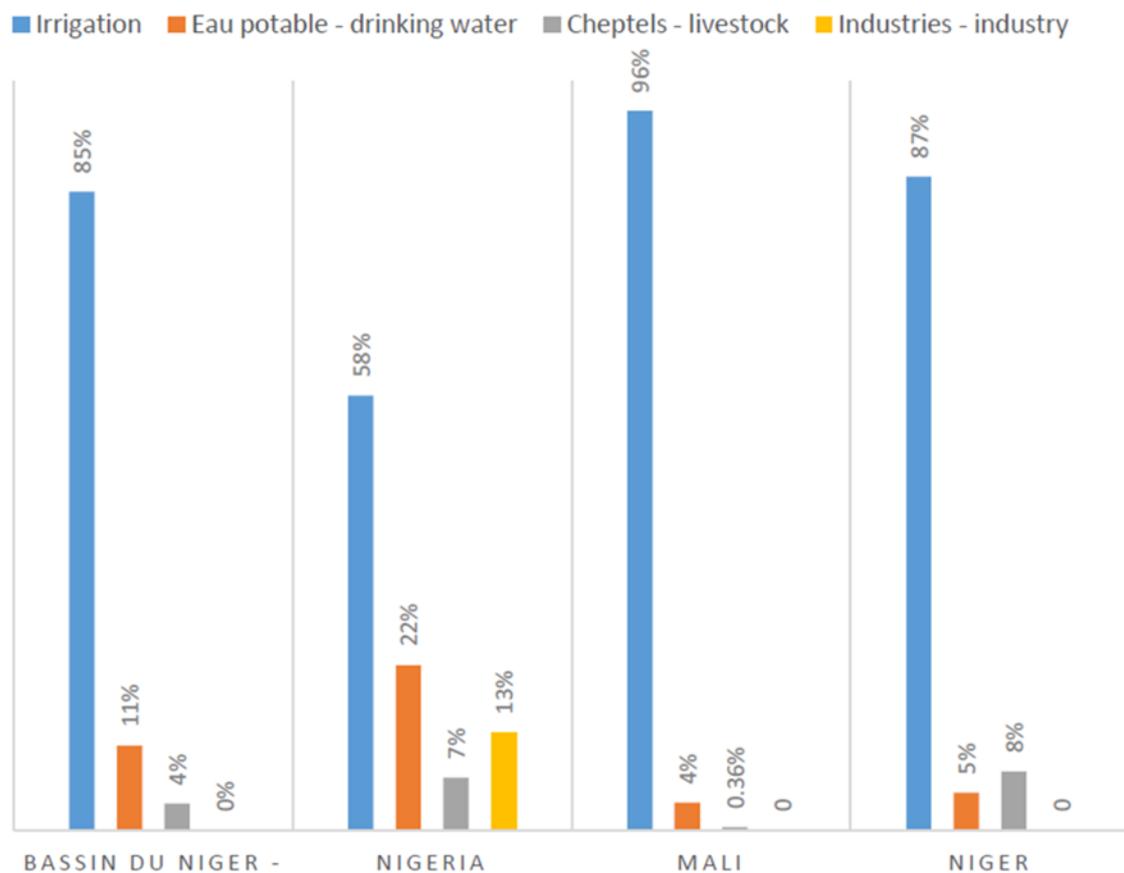


Figure 1. 8 : Prélèvement en eau par secteurs dans le bassin du fleuve Niger au Mali, Niger et Nigeria en 2005 (Paturel et al., 2020).

Au Niger la vallée du fleuve permet la production de 65 860 tonnes de riz par rapport à une production nationale estimée à 132 030 tonnes (Sido et al., 2015). Bien que le maintien de la productivité des sols soit menacé (Ado, 2017), ces derniers sont très adaptés à la riziculture et une fertilisation d'entretien appropriée pourrait y remédier (Tahirou et al., 2022).

Les prises d'une grande diversité de poisson (**figure 1. 9**) occupent une grande importance dans l'économie et l'apport substantiel de protéines animales dans l'alimentation des populations. Les rendements de la pêche ont considérablement fluctué au cours du temps passant de 2 000 tonnes à Niamey avant les années de 1970 - 1980 à 400 tonnes puis plus de 800 tonnes (1 040 tonnes à Niamey en 1997, **Yacouba Moussa et al., 2022**).



*Figure 1. 9 : Quelques espèces de poissons pêchés dans le fleuve Niger à Niamey a) Hippopotamyrus pictus ; b) Tilapia zillii ; c) Labeo senegalensis ; d) Hydrocynus brevis (04 juillet 2021) (Yacouba Moussa et al. 2022).*

Le taux d'accroissement annuel de la population dans l'ensemble du bassin du Niger est de l'ordre de 3%. Les conséquences pour le fleuve risquent d'être importantes si cette tendance se maintient car ceci engendrera un afflux important des populations vers le corridor du fleuve pour son eau et ses terres fertiles. L'occupation des berges se fera augmentant la vulnérabilité des populations aux inondations et les impacts sur le fleuve. Les conflits entre les populations pourraient également se produire.

## 1.5 Changements hydrologiques dans la partie moyenne du bassin du Niger

Le cours moyen du fleuve Niger appartient majoritairement au Sahel. Les cours d'eau sahélien ont connu une augmentation de débit depuis la fin des épisodes de sécheresse des années 1970-1980 (**Mahé et al., 2005 ; Descroix et al., 2015**). Elle résulte de l'augmentation du coefficient de ruissellement dans la région qui découle elle-même de la conjugaison des effets à long terme des sécheresses et des changements anthropiques (**Descroix et al., 2018**) qui ont affectés les caractéristiques des sols. Dans la région de Niamey la mise en culture intense de vastes surfaces et le déboisement important pour satisfaire les besoins d'une population en forte croissance démographique (bois de chauffe...) ont provoqué la diminution progressive du couvert végétal dénudant ainsi les sols (**Ringrose et Matheson, 1992 ; Raynaut, 2001**). Ces derniers sont devenus plus sujet à l'érosion éolienne, ce qui a peu à peu favorisé l'encroutement des sols avec un coefficient de ruissellement important (**Abdourhamane Touré, 2011**). Le taux d'accroissement de la population au Niger ces 7 dernières décennies a été de 3,8% par an, parmi les plus importants globalement (**Banque mondiale, 2017**). Au niveau de Saga Gorou, **Abdourhamane Touré (2011)** a rapporté, entre 1950 et 2009, une disparition quasi-totale de la savane arbustive au profit des champs cultivés et une apparition de surfaces encroutées après 1975. Le développement de ces croûtes favorise l'érosion par ravinement qui est la principale source de sédiments des réservoirs, 80% des sédiments provient de ce type d'érosion (**Wasson et al., 2002 ; Krause et al., 2003 ; de Vente et Poesen, 2005 ; Huon et al., 2005**). De plus la dégradation post-sécheresse de la végétation des plateaux peut avoir joué un rôle dans l'augmentation du ruissellement, de façon similaire aux phénomènes observés dans la région du Gourma dans le nord du Mali (**Trichon et al., 2018 ; Gal et al., 2017**).

Le fleuve Niger, dans sa partie moyenne, est depuis la fin des grandes sécheresses et la reprise des précipitations dans les années 1990, caractérisé à Niamey par deux crues annuelles (**Cassé, 2015**). Les hydrogrammes de crue à Niamey, du fleuve Niger montrent deux périodes de crues.

La première crue intervient entre les mois de juin et octobre (**Amani et Nguetora, 2002**). Elle coïncide avec la saison des pluies dans la région et résulte de la contribution hydrique des précipitations locales et de celles des affluents de la rive droite du fleuve Niger moyen (**Sighomnou et al., 2013**). Le deuxième pic de débit pour sa part intervient entre octobre et mars (**Olivry, 2002**). La crue blanche ou crue guinéenne, ou encore black flood en anglais provient des apports hydriques des précipitations tombées sur le bassin supérieur (**Sighomnou et al., 2013**). Les eaux parcourent toute la partie supérieure et le delta intérieur relativement plat avant d'arriver à Niamey d'où le retard par rapport à la crue rouge (premier pic de débit). Des différences subsistent, par ailleurs, entre les hydrographes des stations de jaugeage au sein même du Niger moyen. A Ansongo (**figure 1. 10**), par exemple la crue rouge est absente du fait que la localité se trouve en amont des principaux affluents du fleuve à ce niveau. La crue rouge a par ailleurs progressivement pris de l'ampleur après les années sèches pour devenir plus importante en termes de débit par rapport à la crue blanche (**figure 1. 11**) (**Cassé et al., 2016 ; Massazza et al., 2021**).

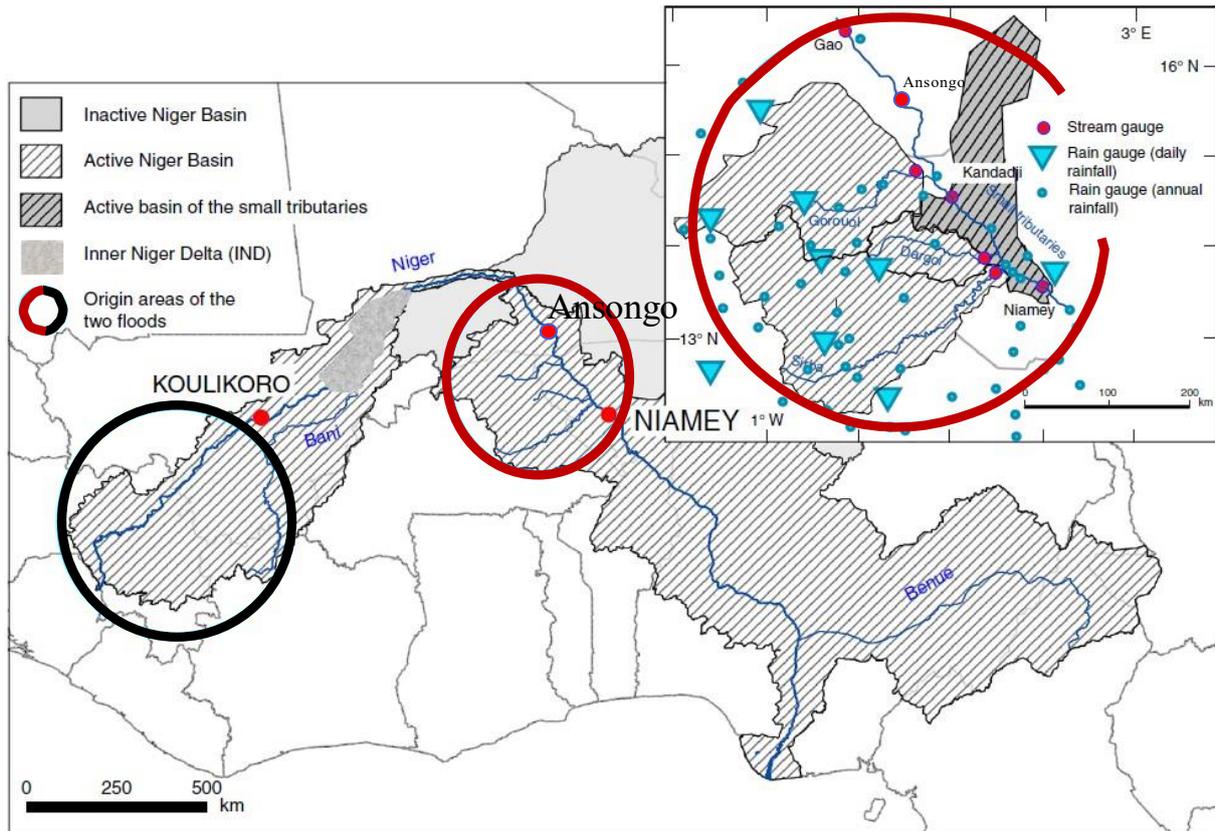


Figure 1. 10 : Bassin versant du fleuve Niger avec la localisation des deux crues annuelles qui caractérisent l'hydrogramme du fleuve à Niamey (Descroix et al., 2012, modifié).

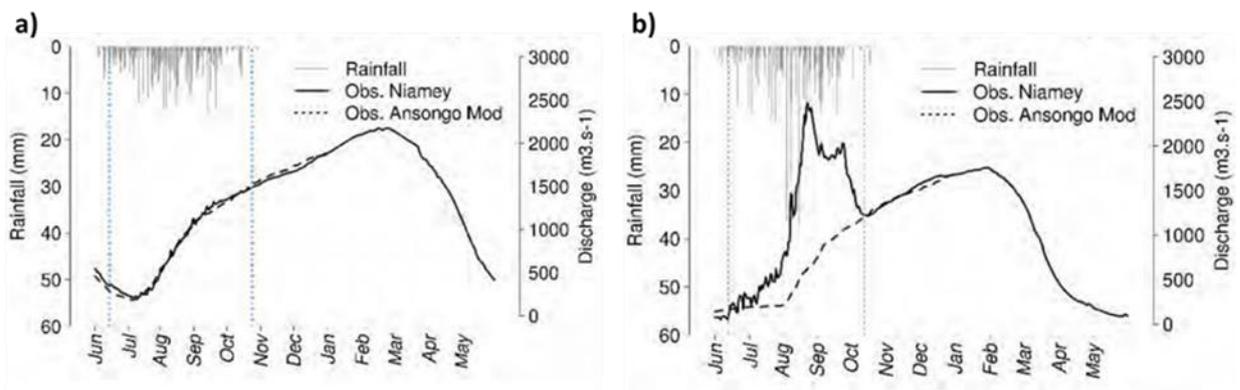


Figure 1. 11 : a) Débit du Niger à Ansongo et Niamey en 1955 et b) en 2012. Débit à Niamey (ligne noire) et Ansongo (pointillée). Histogrammes = précipitations dans le bief Ansongo-Niamey. les lignes verticales bleues = début et fin crue rouge (Cassé et al. 2015).

Les bouleversements hydrologiques dus à la dégradation des environnements sahéliens et à l'augmentation du ruissellement ont conduit à la multiplication des ravines. Ces ravines, aires de recharge de la nappe ont finalement engendré la remontée de la nappe dans la région de

Niamey depuis 1960 (**Leduc et al., 2001 ; Hassane et al., 2016 ; Hado et al., 2021**). La remontée de la nappe a conduit à la création de lacs permanents comme Bangou Bi et Bangou Kirey dans la région. La création de ces lacs a permis l'exploitation des terres environnantes sous forme de jardins et vergers. La proximité avec la ville de Niamey permet la commercialisation de la production agricole qui a lieu autour de ces lacs. Ils présentent également un espace d'exercice de la pêche ainsi que de détente les populations riveraines.

Les changements hydrologiques en cours dans le bassin versant moyen du fleuve Niger, l'accroissement de la population et la construction d'aménagements agro-hydro-électriques vont inexorablement avoir des conséquences sur la disponibilité en eau mais également sur la qualité de cette dernière. En effet, il est prévu que la construction des barrages entraîne la disparition de nombreux villages et d'importantes surfaces agricoles (**Vaucelle, 2015**). Les ruptures d'endoréismes qui s'opèrent dans le bassin du Niger ces dernières années, conduisent à l'augmentation des superficies de terres participant à la pollution de tout type. Ceci conduit à la dégradation des équilibres écologiques bases des activités socio-économiques des populations (**Mamadou, 2012**). Ces populations, de par leurs activités et leur important taux d'accroissement peuvent contribuer significativement à la dégradation de la qualité des eaux du fleuve Niger (**Alhou, 2007**).

Plusieurs études se sont intéressées à la quantification et au suivi de la dynamique des concentrations en MES des eaux du fleuve Niger aussi bien sur le cours principal qu'au niveau de ses affluents (**Figure 1. 12**). Dans le Niger supérieur et le delta intérieur, les travaux ont rapporté des valeurs très faibles comprises entre 0,1 et 213 mg/L au niveau de Banankoro, Koulikoro et Ké-Macina [**Grove (1972) et Picouet (1999) in Amogu (2009)**].

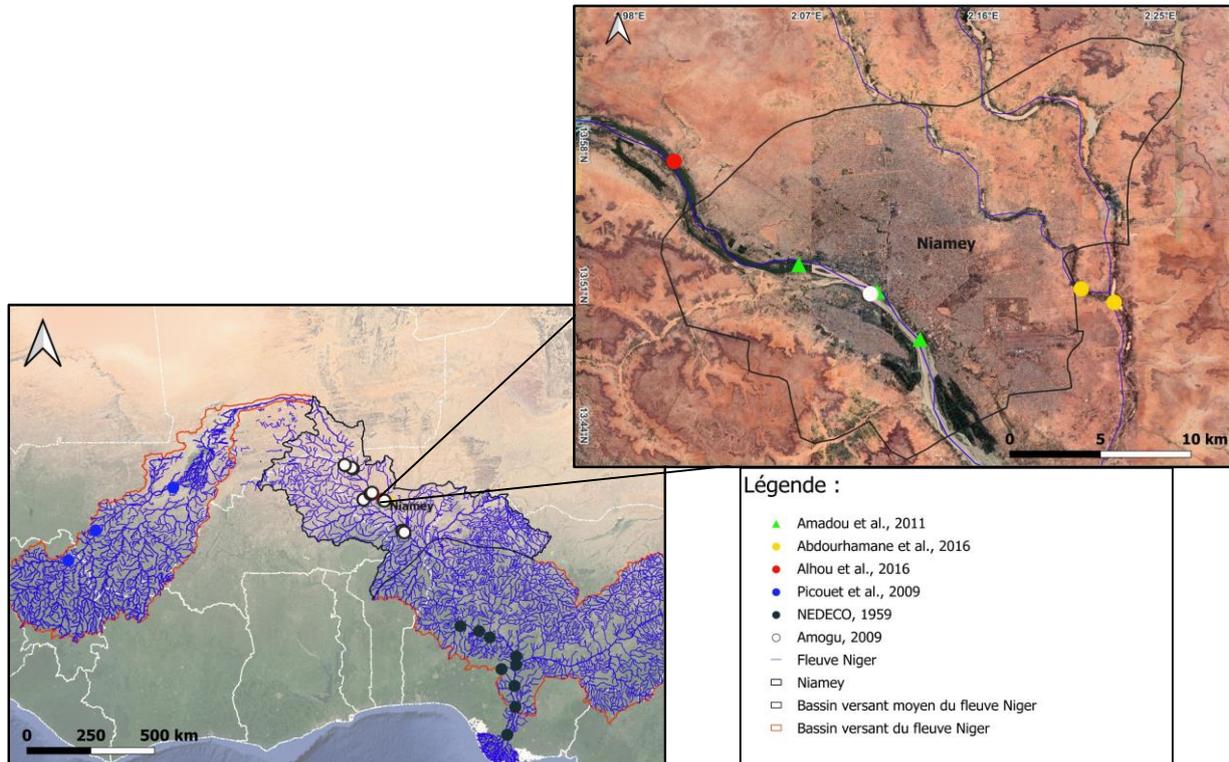


Figure 1. 12 : localisation des sites des études ayant caractérisées la qualité des eaux du fleuve Niger et lacs permanents à proximité de Niamey (avec les études portées sur la détermination de la concentration en MES représentées avec points et celles sur la caractérisation microbiologique représentées avec des triangles).

Dans le Niger moyen les plus anciennes mesures ont été réalisées par l’ORSTOM. Elles ont montré des valeurs très importantes aussi bien sur le cours principal du fleuve que sur les affluents du Niger. Les mesures de MES réalisées par **Amogu, (2009)** dans les mêmes localités ont donné des valeurs du même ordre : entre 124 et 3 750 mg/L à Alcongui sur le Gorouol et entre 54 et 2 841 mg/L à Garbé-Kourou sur la Sirba. Au niveau de Tondibia en amont Niamey, **Alhou et al., 2016** ont rapporté des concentrations en MES entre 18,2 et 1 578,7 mg/L dont les valeurs les plus importantes ont été mesurées en saison des pluies et avant le débit maximal de crue rouge (**Figure 1. 13**). Il faut noter que les concentrations en MES ont atteint des valeurs

plus importantes en saison des pluies avec un débit plus important, synonyme de plus d'apports hydriques (A2).

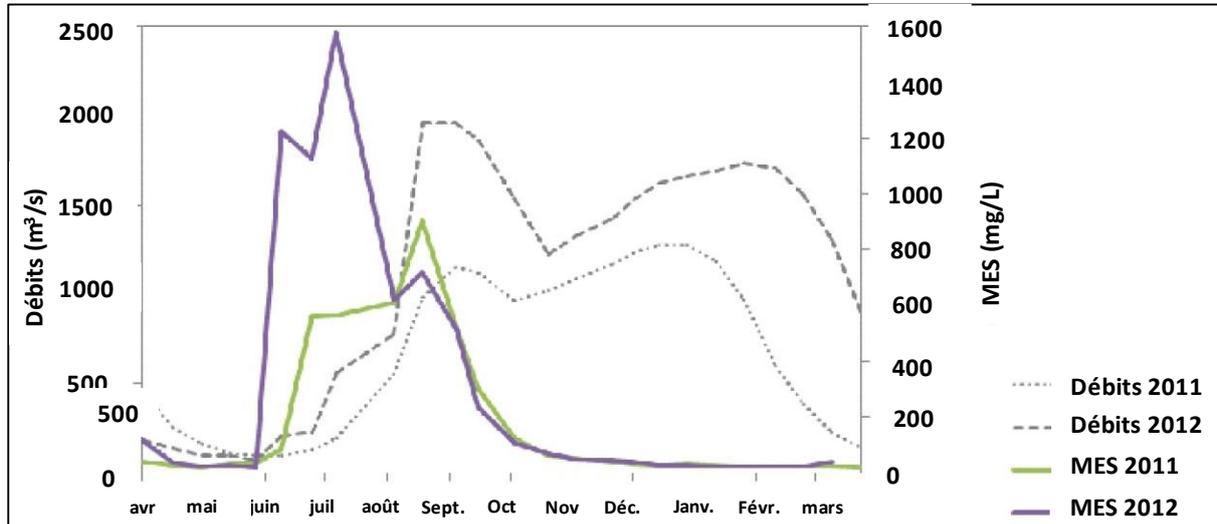


Figure 1. 13 : Dynamique de concentrations en MES du fleuve Niger à Niamey d'avril 2011 à mars 2013 (Alhou et al., 2016).

Au niveau du Niger inférieur les travaux ont rapporté des concentrations en MES entre 50 et 510 mg/L, moins importantes que celles rencontrées dans le Niger moyen mais plus importantes que celles du Niger supérieur [(NEDECO, 1959 in Amogu (2009)].

Des travaux sur la concentration en MES ont été également menés sur les lacs de Bangou Bi et Bangou Kirey (Abdourhamane Touré, 2011) qui, malgré le même contexte géologique, présentent des caractéristiques très différentes (couleur, pH). Elles sont principalement dues à des différences dans le réseau hydrographique et le mode d'alimentation des deux lacs. Le lac de Bangou Bi est principalement alimenté par la nappe phréatique et peu influencé par les pluies. La dynamique de la cote limnométrique de Bangou Bi montre deux phases de montée des eaux (juin à septembre) caractérisées par un retard d'environ 2 mois par rapport aux pluies et une phase d'étiage. La dynamique hydrologique du lac de Bangou Kirey possède un fonctionnement différent car en plus d'être alimenté par la nappe, il reçoit des écoulements

provenant de l'amont du réseau fossile et de nombreux koris dont le plus important draine 60 km<sup>2</sup> (Abdourhamane Touré, 2016).

De ce fait Bangou Kirey présente des concentrations beaucoup plus importantes comparativement à celles de Bangou Bi (Figure 1. 14). Cependant, en tout début de la saison des pluies la concentration en MES des deux lacs présente de pics due à l'effet des premières pluies ruisselantes. Dans la seconde partie de la saison des pluies, les effets de dilution par les eaux de la nappe et du dépôt des matières en suspension jouent un rôle dans la diminution de MES du Bangou-Kirey (en phase avec la montée des eaux à Bangou Bi). Les fortes concentrations à Bangou Kirey représentent une menace pour ce dernier par comblement du lit du lac. En effet, le taux de sédimentation dans ce lac a été estimé à plus de 4 cm/an en moyenne (Abdourhamane Touré et al., 2016).

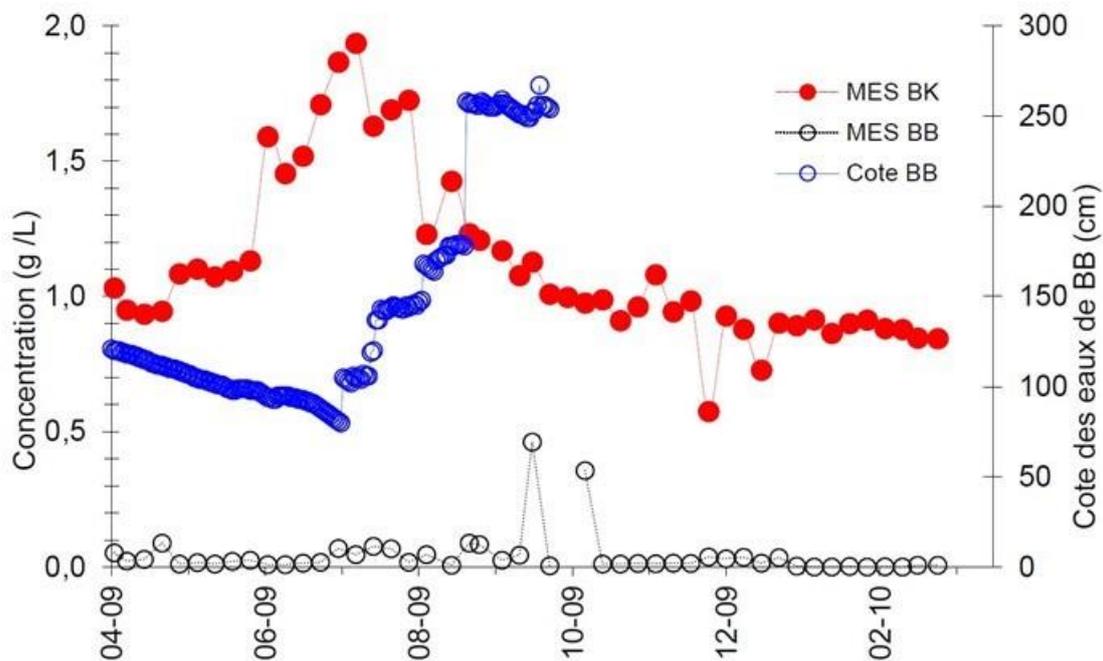


Figure 1. 14 : : Dynamique de la concentration en MES de Bangou Kirey (BK) et Bangou Bi (BB), et variation piézométrique de Bangou Bi (cote BB) (Abdourhamane Touré et al., 2016).

Le suivi de la contamination microbienne notamment la contamination en *E. coli* a reçu beaucoup moins d'attention dans la littérature scientifique. Néanmoins certains travaux ont été

menés notamment pour caractériser la qualité générale des eaux du fleuve à Niamey basée sur la mesure de paramètres physico-chimiques et de quelques paramètres microbiologiques au niveau des différents points de rejets de la ville. Ces études ont fait état d'une dégradation notable de la qualité des eaux du fleuve venant des rejets (**tableau 1. 3**) avec la présence de coliformes fécaux ( $9,4 \cdot 10^4$  /100mL), Streptocoques fécaux ( $5,8 \cdot 10^3$  /100mL) en aval de la ville (Alhou, 2007 ; Amadou et al., 2011).

Tableau 1. 3 : Caractéristiques physico-chimiques et bactériologiques des eaux du fleuve Niger en amont et en aval de Niamey. (Amadou et al., 2011).

Point prélèvement	DCO (mg/L)	DBO5 (mg/L)	MES (mg/L)	NTK (mg/l)	NH4 (mg/L)	NO2 (mg/L)	PO4 (mg/L)	T/pH/O2	Conductivité (µS/cm)	Coliforme (u/100mL)	Streptocoques (u/100mL)
Station pompage Goudel	27	22	1417	2,72	1,07	0,75	0,46	6,82/29,4/8,34	81	$4,7 \cdot 10^4$	$1,9 \cdot 10^3$
Pont Kennedy	42	35	1585	2,97	1,58	0,75	0,52	6,78/29,8/5,17	83	$9,6 \cdot 10^4$	$6,7 \cdot 10^3$
Entrée Saga	45	32	1294	3,36	1,96	0,80	0,38	6,8/29,5/5,52	169	$9,7 \cdot 10^4$	$5,8 \cdot 10^3$

## 1.6 Objectifs et questions de recherche

L'objectif principal de ce travail a été de caractériser la dynamique spatio-temporelle de la qualité des eaux de surface de la région de Niamey, à travers des mesures de la teneur en *E. coli*, des MES et des paramètres physico-chimiques, et d'étudier les liens entre la teneur en bactéries indicatrices de contamination fécale et les variables environnementales. Il s'agit aussi d'évaluer l'impact de la zone urbaine et périurbaine dans la contamination de l'eau. Ce travail de thèse vise ainsi à répondre aux questions suivantes :

1. Quelle est la dynamique spatiale et temporelle des paramètres clés de la qualité de l'eau (*Escherichia coli*, MES) dans le fleuve Niger moyen, aux moments clés du cycle hydrologique (crue rouge, crue blanche, période de basses eaux) et quelles variables environnementales impactent cette dynamique ?

2. Quelles sont les relations entre les bactéries indicatrices de contamination fécale, la concentration en MES et la nature de ces particules ?
3. Comment le milieu urbain et péri-urbain contribue-t-il à cette contamination ? Quelle est la part de l'environnement dans cette pollution et quelle est la contribution d'origine anthropique ?
4. Quelles méthodes de suivi de ces paramètres peuvent être implémentées dans ces régions faiblement instrumentées ? Les données satellitaires peuvent-elles être utiles pour suivre la contamination bactérienne des eaux de surface dans la zone d'étude ?

Afin de répondre à ces questions, une stratégie qui concilie plusieurs disciplines a été mise en œuvre. La stratégie a consisté à allier des mesures in-situ sur différents sites, l'utilisation des techniques de télédétection mais aussi la réalisation d'analyses au laboratoire. Les mesures ont été réalisées avec un pas de temps très fin (journalier/bijournalier en saison des pluies) et ont concerné un grand nombre de points dans la zone d'étude (vingt-six différents points au total). Il s'agissait, pour le fleuve Niger à Niamey, de trois points (Tondi Koirey, Goudel et Saga) pour le suivi continu, de mesures d'une rive à l'autre et du site le plus en amont (Tondi Koirey) au site aval (Saga) de la ville. Les lacs de Bangou Bi et Bangou Kirey, en zone péri-urbaine ont aussi été concernés par les mesures.

### **Structure de la thèse**

---

Ce manuscrit est composé, après ce premier chapitre contextuel et de définition des objectifs, de quatre autres chapitres. Le deuxième chapitre présente les caractéristiques physiques de la zone d'étude plus généralement et des sites de mesures plus particulièrement. Le troisième

chapitre est consacré à la présentation des matériels et méthodes utilisés ainsi que la stratégie d'échantillonnage. Les chapitres quatre et cinq présentent pour leur part les résultats de ce travail. Le chapitre quatre traite la dynamique spatio-temporelle de la concentration en MES des eaux de surface en lien avec le cycle hydrologique, tandis que le chapitre cinq aborde la question de la contamination fécale en lien avec les variables environnementales et anthropiques des eaux de la zone d'étude. La plupart des résultats présentés dans le chapitre quatre ont fait l'objet d'une publication (en annexe) dans « Journal of Hydrology : Regional Studies ». Chaque chapitre des résultats est constitué de sa discussion et de sa conclusion et le dernier chapitre du mémoire présente les conclusions et les perspectives du travail.

## Chapitre II – Présentation de la zone d'étude et des sites d'échantillonnage

---

### 1.1 Climat régional et local

Le climat de la partie moyenne du bassin du fleuve Niger est essentiellement sahélien (**Mahé et al., 2011**) marqué par l'alternance d'une longue saison sèche (environ 7 mois) et d'une saison humide caractérisée par des précipitations torrentielles et irrégulières (**Maïga et al., 2007**). Les conditions climatiques de la région sont associées aux mouvements de la Zone de Convergence Inter Tropicale (ZCIT) (**figure 2. 1a**) (**Fontaine et al., 2011**). La ZCIT est la zone de rencontre entre la mousson ouest africaine et l'harmattan (alizé) saharien et est caractérisée par la formation importante de nuages observables depuis l'espace (**figure 2. 1b**) (**Nicholson, 2009**). Ces nuages résultent des conditions chaudes et humides en surface et des conditions sèches en altitude (**Nicholson, 2009**). La période entre juin et novembre (été boréal) correspond au moment où la mousson se développe et la ZCIT atteint son extension maximale vers le nord (août) (**figure 2. 1c**). Ceci correspond à la période maximale de pluies sur l'ensemble du Sahel (**Fontaine et al., 2011**). Globalement, les premières pluies sur le bassin versant du fleuve Niger interviennent dans la zone guinéenne alors que la ZCIT a une position quasi-stable autour de 5°N. Au début du mois de juillet, elle change de position et se retrouve désormais autour de 10°N : c'est le saut de mousson. Ce dernier est associé à un changement majeur de circulation atmosphérique sur l'Afrique de l'ouest contrôlé par le système de mousson météorologique d'été (**Sultan et Janicot, 2003**). Il s'accompagne d'une diminution des pluies autour de la latitude 5°N et d'une augmentation de celles enregistrées dans le Niger moyen. Les études ont montré qu'il n'existe pas de corrélation entre les cumuls annuels de précipitations d'un point donné du Niger moyen et la durée de la saison des pluies. Par ailleurs, un démarrage précoce de la saison des pluies est annonciateur que cette dernière sera longue car cette dernière s'achève généralement entre fin septembre et début octobre (**Balme et al., 2004 ; Marteau et al., 2011**).

; Panthou et al., 2014). Le Niger moyen traverse selon le gradient pluviométrique nord-sud la zone désertique, la zone semi-aride et la zone tropicale avec des précipitations moyennes annuelles qui varient entre 200 mm et 905 mm respectivement à Gao et à Malanville (Descroix et al., 2013 ; Birama, 2020).

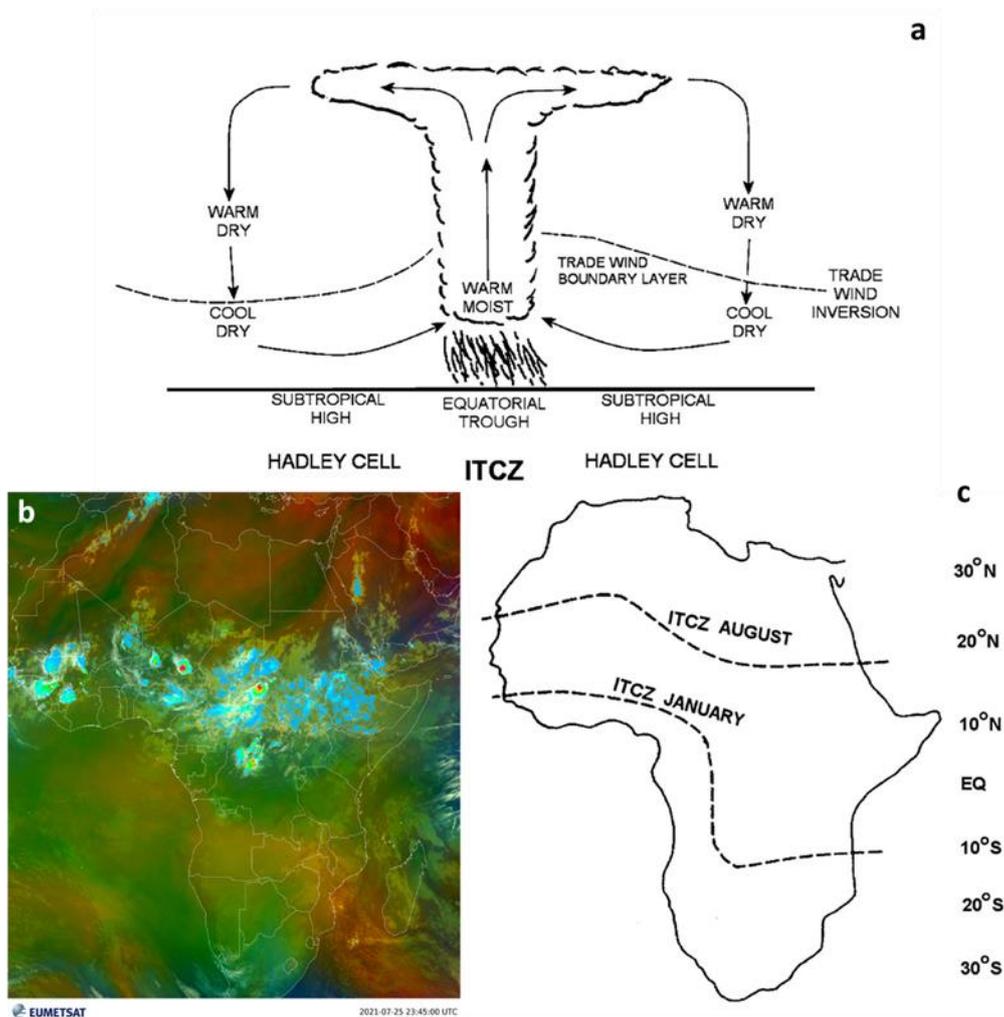


Figure 2. 1 : a) Schéma classique de la ZCIT ; b) ZCIT marquée par une bande nuageuse entre l'équateur et la zone tropicale (image EUMESAT) ; c) position saisonnière de la ZCIT en hiver (janvier-vents de l'harmattan) et en été (août-vent de mousson)(Nicholson, 2009).

La partie moyenne du bassin du fleuve Niger a connu des changements et variations du climat entre les décennies 1970 et 1980 marquées par des sécheresses récurrentes. De ces changements ont résulté un retrait des isohyètes de plus de 200 km vers le sud (figure 2. 2) (Lebel et Ali, 2009) et un déficit hydrologique de 20 à 40% (Hulme et al., 2001). Une récente reprise de la

pluviométrie (**figure 2. 3**) a par ailleurs été observée depuis la décennie 1990 (**Panthou et al., 2018**) en relation avec l'augmentation du nombre de pluies et des événements extrêmes (**Taylor et al., 2017**).

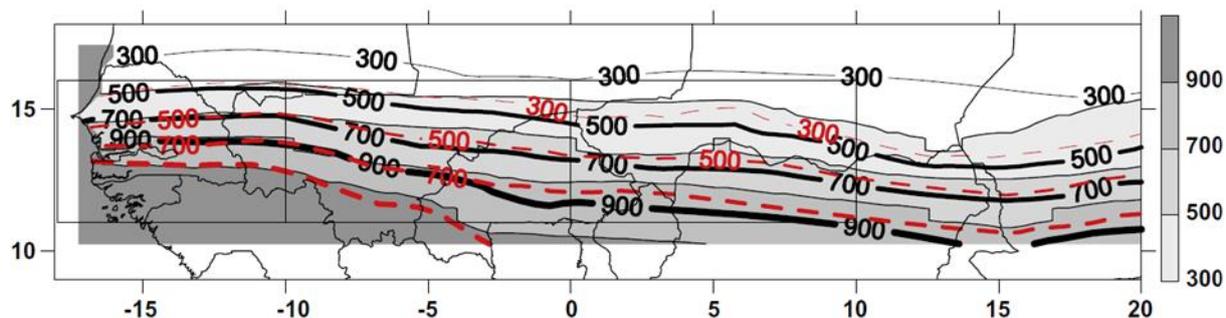


Figure 2. 2 : Moyenne des isohyètes de la période récente (1990-2007) en contours remplis (échelle de couleur à droite) ; période humide (1950-1969) en lignes continues et en lignes ponctuées la période sèche (1970-1989) (Lebel et Ali, 2009).

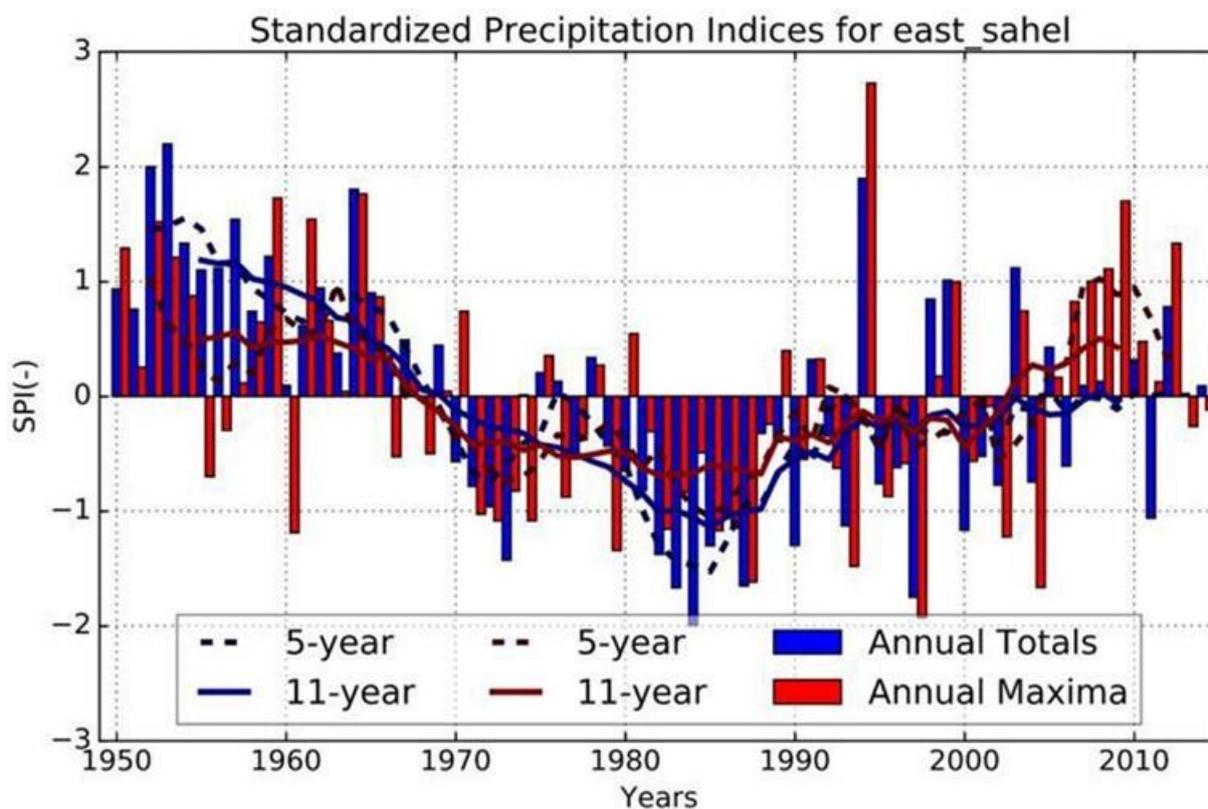


Figure 2. 3 : Indices normalisés de précipitations (SPI) entre 1950 et 2018 pour le total annuel (bleu) et les maxima annuels (rouge) dans une partie du Sahel (-2 E-5 W, 11-16 N) suivant la méthodologie (Panthou, 2014).

### 1.1.1 Précipitations dans le Niger moyen

La saison des pluies à Niamey et plus généralement dans le bassin versant moyen du fleuve Niger est marquée par un cycle saisonnier caractérisé par des précipitations qui débutent en avril-mai et se terminent en septembre-octobre. Le début de la saison des pluies est caractérisé par l'arrivée de grains chargés de poussières (**figure 2. 4**). La saison des pluies peut se subdiviser en cinq parties (**figure 2. 5 ; Lebel et Ali, 2009**) : 1) la période d'avril à fin mai caractérisée par une augmentation progressive des pluies, 2) une période stable d'un mois, 3) le saut de mousson intervenant vers la dernière décade de juin suivi par une légère baisse de la pluviométrie, 4) une augmentation des pluies cumulées en début du mois d'août et 5) un retrait rapide des pluies sur un mois avec néanmoins des pluies résiduelles en octobre (**Lebel et Ali, 2009**). A Niamey, la moyenne annuelle des précipitations a été de 527,36 mm entre 1970 et 2017 (**Hamadou Younoussa et al., 2020**). Cette pluviométrie est néanmoins très variable au cours du temps (**Sultan et Janicot, 2003**).

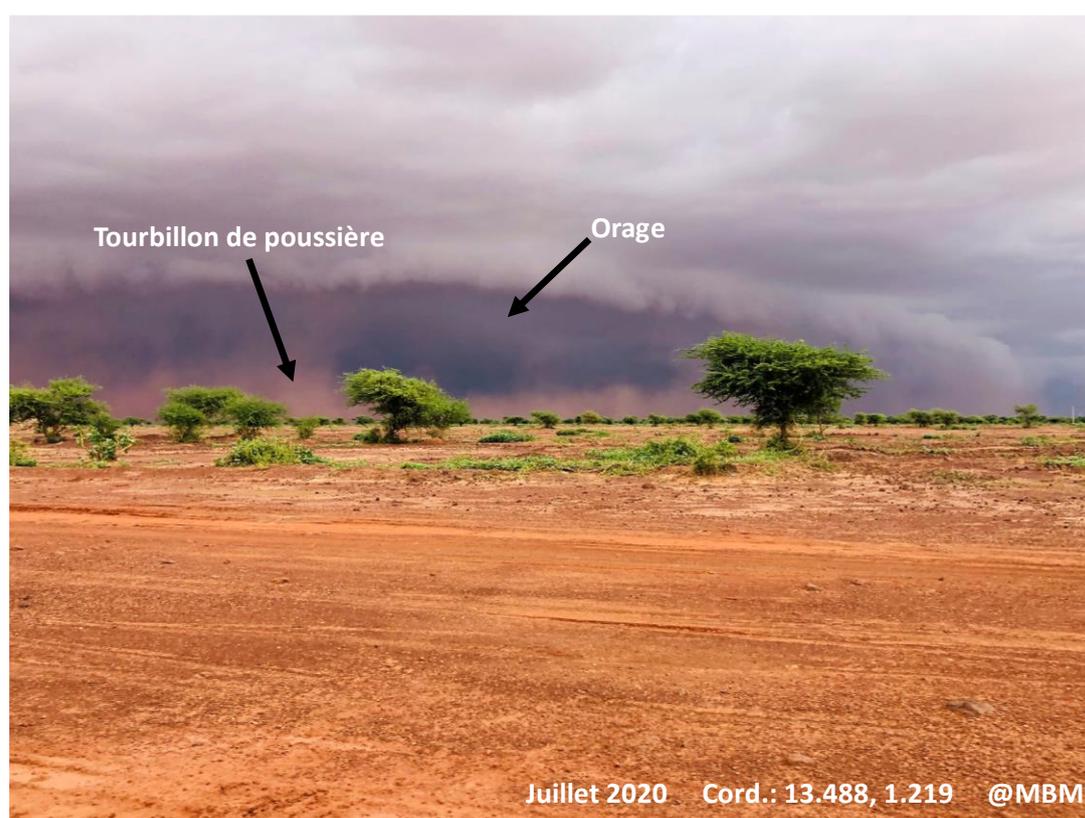


Figure 2. 4 : Arrivée d'une ligne de grain sur le plateau de l'aéroport (Est de Niamey).

L'évolution long terme des précipitations Sahéliennes a montré des différences entre les années humides (1950-1969) et les années sèches (1970-1989). Les périodes déficitaires ont été caractérisées par une précocité du maximum des précipitations et du retrait de la saison des pluies ainsi qu'une moyenne de précipitation déficitaire en fin de saison des pluies. La baisse de la pluviométrie a également été au cours des périodes sèches due à une importante baisse de la probabilité de pluie journalière (Lebel et Ali, 2009).

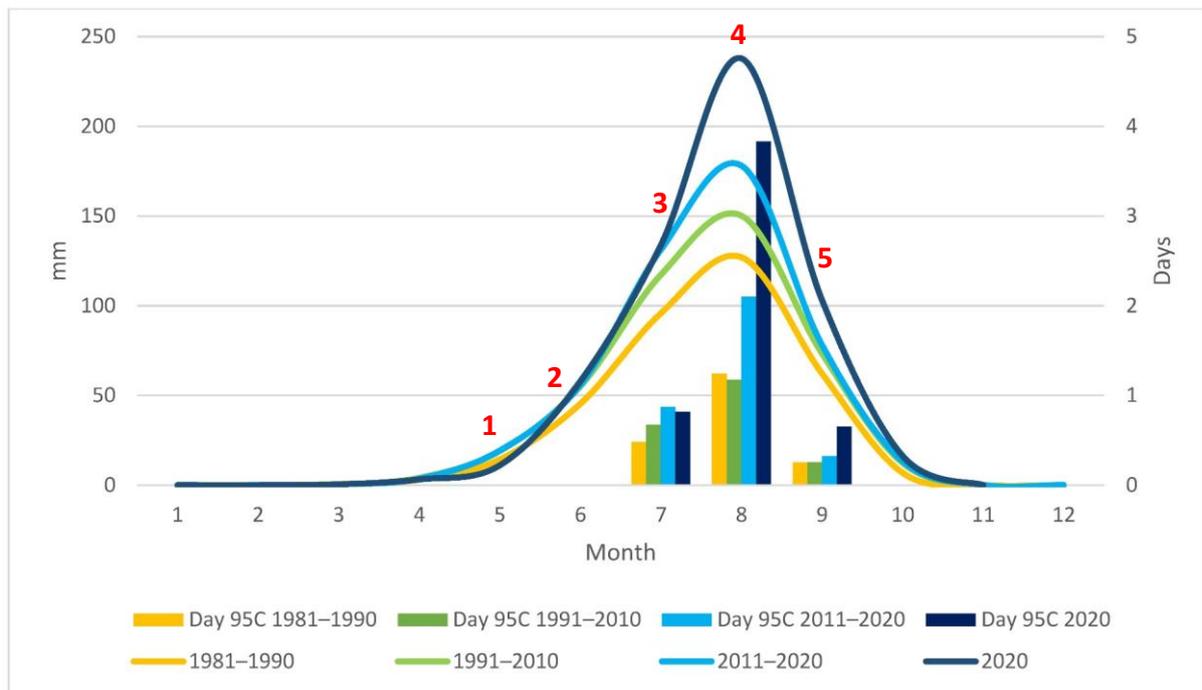


Figure 2. 5 : Distribution temporelle des précipitations pendant la saison des pluies dans le Niger moyen et nombre de jours pluvieux par mois (en rouge) (Massazza et al., 2021 modifié).

### 1.1.2 Dynamique des températures à Niamey

Globalement sur le Sahel et plus particulièrement à Niamey, les moyennes de températures varient entre moins de 30°C à près de 40°C. La dynamique intra-annuelle montre deux maxima saisonniers (mars-juin et octobre-décembre) et deux minima saisonniers (janvier et août). La période la plus chaude se situe entre mars et juin avec des températures  $\geq 38^\circ\text{C}$  (figure 2. 6). Plusieurs études ont par ailleurs rapporté une tendance générale à l'augmentation des températures (minimales, maximales, moyennes) à Niamey depuis les années 1960, dans la

même ligne avec le réchauffement globale du climat en cours (**Ringard et al., 2014**). Cette augmentation est cependant plus importante pour les températures minimales (diurnes) et attribuée à l'urbanisation et à la croissance démographique élevées (**Boubacar et al., 2020**).

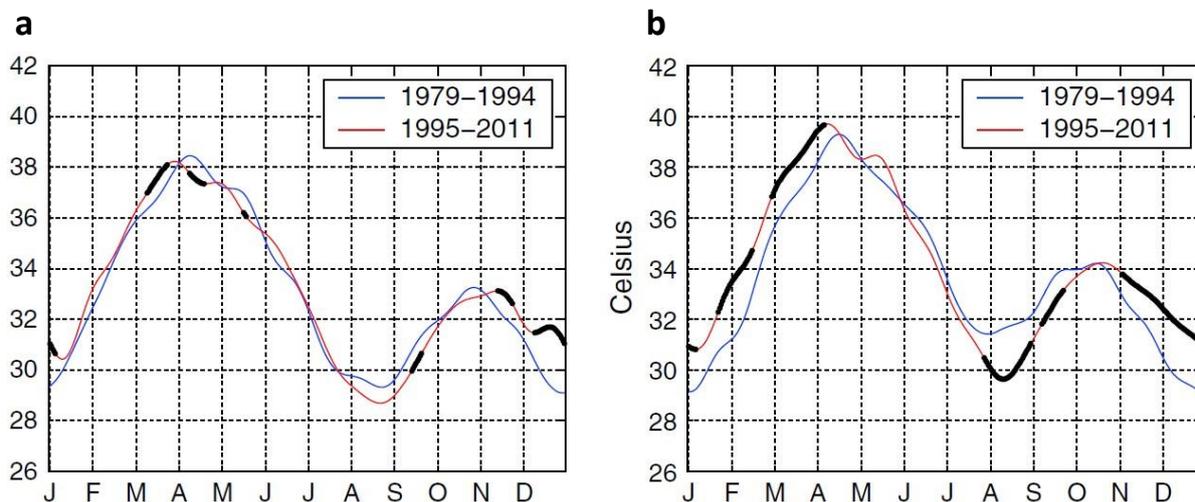


Figure 2. 6 : Dynamique temporelle des moyennes de températures journalières à travers le Sahel de l'ouest (a) et de l'est (b) (Fontaine et al., 2013).

## 1.2 Géologie et pédologie

Dans le Niger moyen, deux formations géologiques dominent : le Liptako à l'Ouest du fleuve et la bordure SW du bassin des Iullemeden à l'Est. Le socle du Liptako, constitué de batholites granitiques d'âge Birimien (environ 2,2 Ga) correspond à l'extrémité sud-est du craton ouest-africain. Les roches du socle forment une alternance de plutons granitoïdiques et de ceintures de roches vertes (**Soumaila, 2000**). Ce socle a été déformé par plusieurs phases éburnéennes (**Vicat et al., 1994 ; Willems et al., 1996**). Le long du fleuve, une série de couverture sédimentaire faiblement plissée et ayant un âge probablement protérozoïque supérieur a été reconnue par **Reichert, (1972) et Machens, (1973)**. Il s'agit entre autres de grés-quartzites présents au Sud du degré carré de Niamey et au niveau du parc W, dont quelques reliques sont exploitées en carrières dans le Nord de Niamey. Ce socle a subi une profonde altération au cours

du paléogène. Ce qui a produit des dépôts quartzo-kaoliniques pouvant dépasser par endroit 100 m d'épaisseur (**Lang et al., 1990**).

Le bassin des Iullemenden est composé d'une alternance de dépôts marins et continentaux qui se sont mis en place au cours d'épisodes de transgressions /régressions qui ont marqué son histoire géologique. Dans la région du fleuve, à la zone de confluence avec le Liptako, le bassin des Iullemenden est représenté par les roches du Continental Terminal (CT) d'âge Éocène (**Monfort, 1996**).

Le Continental Terminal affleure dans l'Ouest du bassin des Iullemenden et repose en discordance majeure sur le socle cristallin du Liptako. Le CT est un complexe de roches sédimentaires constitué de grès, sables, pélites, silts et argiles fluvio-lacustres. Cette série sédimentaire est caractérisée par une abondance d'oxyde de fer, qui forment les dépôts sidérolithiques (niveau de faible énergie) et la présence de matière organique provenant de la végétation qui couvrait les parties émergées du bassin. Les oxydes présents dans les dépôts sidérolithiques se présentent surtout sous forme de concrétion oolithiques imprégnant les argiles ou cimentant les sables. La matière organique pour sa part se retrouve sous forme de débris de lignite (**Greigert, 1966**).

Les passages oolithiques du Continental Terminal jouent un rôle majeur dans l'évolution morphologique des paysages car ils ont tendance à s'indurer fortement lorsqu'ils affleurent à la faveur de l'érosion (**Machens, 1973**). L'alternance de plateaux latéritiques et de vallées sableuses fossiles a été façonnée par la succession d'épisodes de creusement et comblement dans les vallées du CT.

La couverture pédologique est constituée de (**figure 2. 7**) :

- Sols ferrugineux tropicaux peu lessivés (**Gavaud, 1977**) parfois remaniés par le vent (**Ousseini, 1986 ; Ousseini et Morel, 1989**). Il s'agit d'une association de sols bruns

ou bruns rouges se développant sur divers matériaux (dunes, colluvions remaniées et alluvions). Ils ont une épaisseur moyenne de 1 à 1,5 m et présentent des oxydes de fer dans leur profil ainsi qu'une faible proportion de matière organique dans l'horizon A. Ceci améliore leur cohésion et leur stabilité, mais donne naissance à une érosion accélérée et difficile à maîtriser des parties superficielles (**Mamadou, 2012**).

- Des sols hydromorphes et se trouvent au niveau des bas-fonds de la vallée du fleuve Niger. Ils sont plus fournis en fractions fines limoneuse, argileuse et possèdent ainsi une rétention en eau plus importante. Les sols hydromorphes concentrent également d'importantes quantités d'humus et de sels divers (alcalis) dont l'accroissement des teneurs par une irrigation mal conduite aboutit à une dégradation difficile à inverser. Ce sont néanmoins des sols riches plus aptes aux cultures pluviales de sorgho et de coton, ainsi qu'aux cultures irriguées (**Mamadou, 2012**).

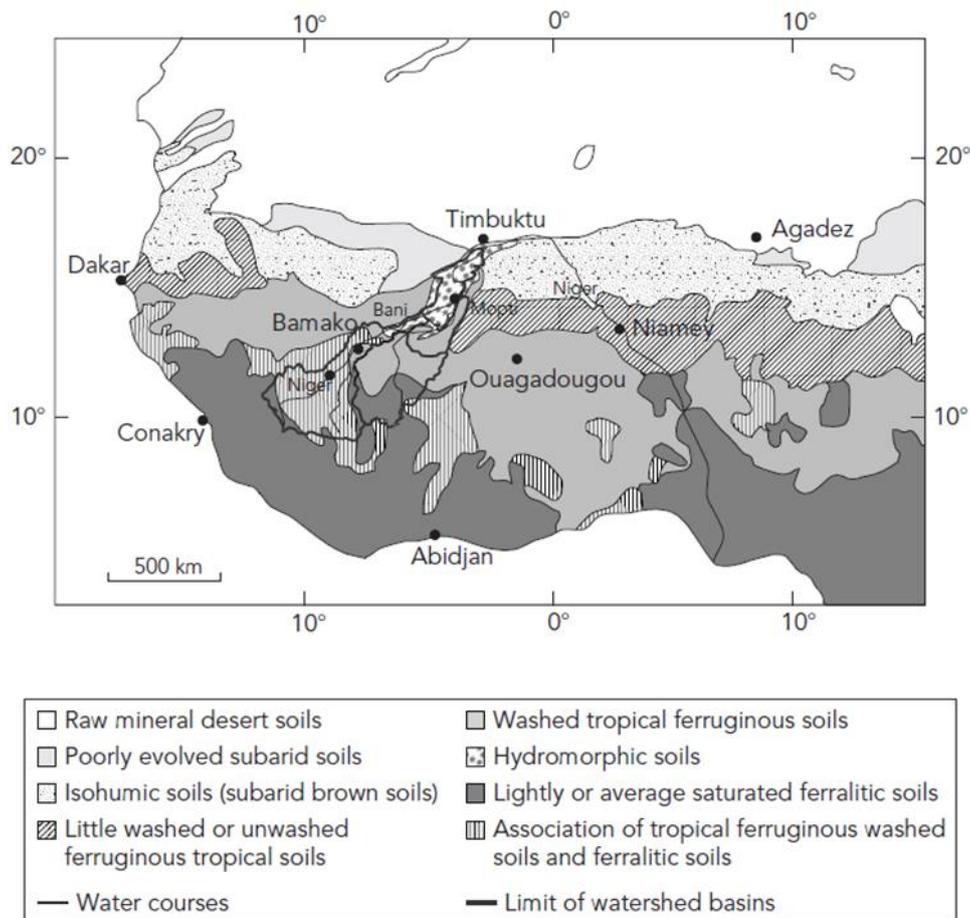


Figure 2. 7 : Carte schématique des sols ouest africains (Banque Mondiale, 1986, modifié par Picouet 1999).

### 1.3 Hydrologie du fleuve Niger

Le bassin versant actif du Niger possède une superficie de 1,5 million km<sup>2</sup> et couvre une partie du Bénin, Burkina-Faso, Cameroun, côte d'Ivoire, Guinée Conakry, Mali, Niger, Nigeria et du Tchad (Andersen et al., 2006). Le fleuve Niger se subdivise en quatre grandes unités hydrologiques (figure 2. 8) (Amogou, 2009) :

- Le Niger supérieur s'étend de la source du fleuve (Guinée) à Ségou, au Mali ;
- Le delta intérieur du fleuve de Ségou à Tossaye (Mali) ;
- Le Niger moyen de Tossaye à Malanville (Bénin) ;
- Le Niger inférieur de Malanville au delta du Niger au Nigeria.

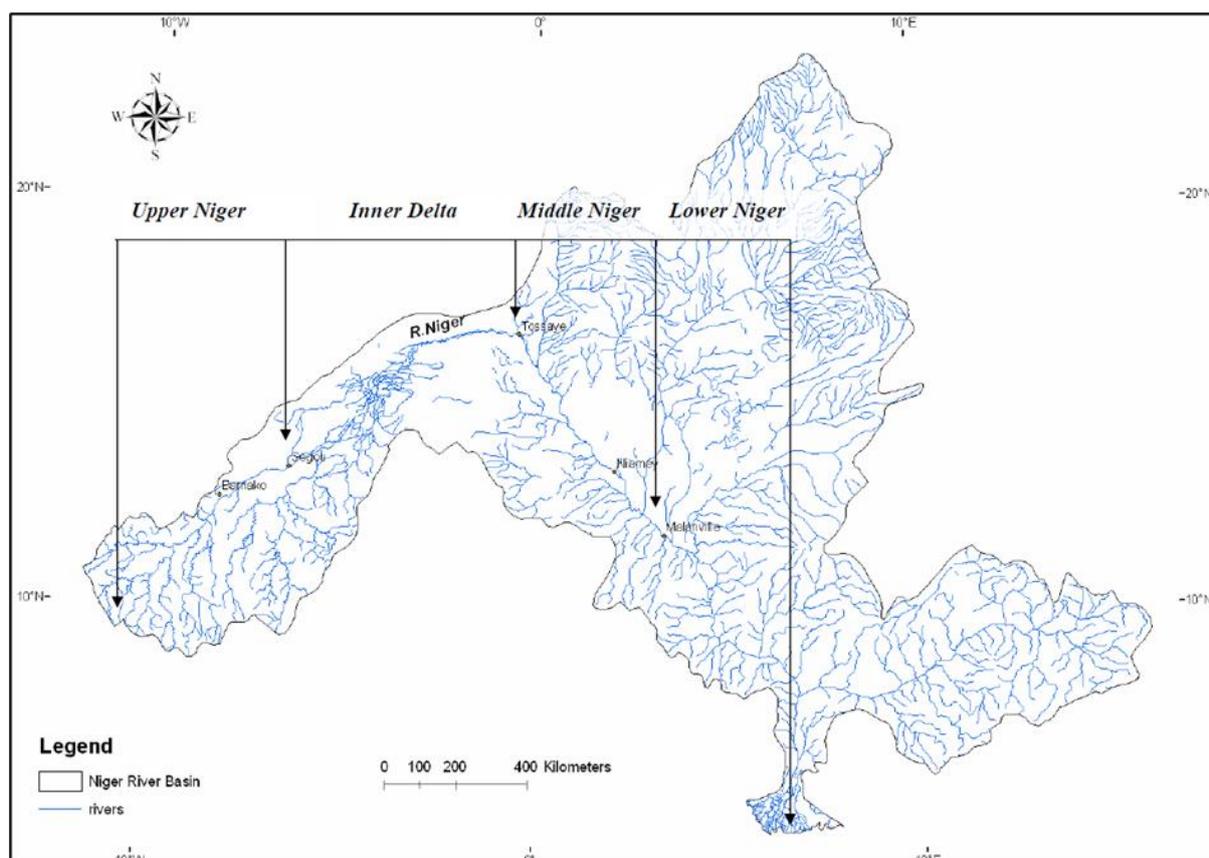


Figure 2. 8 : Grands ensembles hydrologiques du fleuve Niger (Amogou, 2009).

La partie supérieure du bassin du fleuve Niger s'étend de sa source à Ségou au Mali et correspond à 740 000 km<sup>2</sup> (Aboubakar, 2003). Cette partie est caractérisée par des précipitations moyennes annuelles pouvant atteindre 1 540 mm, des reliefs constitués de pentes relativement fortes en tête de bassin et des altitudes comprises entre 280 et 1 500 m. Les sous bassins versants du Niger supérieur sont recouverts de végétation forestière dans la partie guinéenne et par la savane dans sa partie aval (Ferry et al., 2012a). Les apports hydriques du delta intérieur et du Niger moyen sont en grande partie assurés par le Niger supérieur, notamment à travers le Bani qui compte environ ¼ de cette contribution. Les écoulements dans le Niger supérieur sont importants avec des régimes uni-modaux et des crues marquées à Koulikoro en septembre-octobre avec un maximum moyen de 4 681 m<sup>3</sup>/s. Sur le Bani les écoulements sont beaucoup moins importants et le tarissement de certains petits affluents est fréquent. Le transport sédimentaire « naturel » au fleuve dans le bassin supérieur est insignifiant

d'où le non comblement de la retenue de Sélingué depuis la construction du barrage en 1982 (Ferry et al., 2012a).

Le delta intérieur du fleuve Niger est une vaste zone d'inondation fertile d'environ 40 000 km<sup>2</sup> de superficie (Maïga et al., 2014). Il s'étire sur plus de 350 km de long suivant l'axe sud-ouest/nord-est de Ké-Macina à Tombouctou. Le réseau hydrographique du delta intérieur est parcouru par des chenaux très denses et hiérarchisés. Il est alimenté par le cours principal du fleuve Niger et par son confluent majeur à ce Niveau, le Bani. Les précipitations moyennes annuelles y sont de 450 mm à moins de 100 mm pour la partie située en zone tropicale désertique. Les crues sont amorties et étalées dans le delta intérieur entre octobre et novembre avec d'importantes pertes hydriques par évaporation et infiltration. Les pertes par évaporation ont été estimées à environ 44% des entrées (Andersen et al., 2012). Les reliefs sont peu marqués, les pentes sont très faibles dans le delta intérieur et la végétation y est peu importante. Les vitesses d'écoulement dans cette partie sont très faibles et les maximums de débits tournent autour de 2 000 m<sup>3</sup>/s et 1 500 m<sup>3</sup>/s respectivement aux stations hydrométriques de Koryoumé et Ansongo (Sangaré et al., 2002 ; Ferry et al., 2012b). Maïga et al (2014) ont distingués deux grandes régions hydrologiques au sein du delta intérieur du Niger : le delta amont constitué de chenaux larges et le delta aval où s'étendent des lacs.

Le Niger moyen couvre une superficie de 900 000 km<sup>2</sup> où 39% est inactive. Le tronçon moyen du Niger reçoit principalement des apports de ses affluents burkinabés et béninois en rive droite (Gorouol, Dargol, Sirba, Tapoa, Goroubi, Diamangou, Mékrou, Alibori et Sota). Cette partie du bassin du Niger est une zone sans relief marqué, de basses altitudes. Les débits du Niger moyen sont grandement influencés par les apports des parties amonts (Niger supérieur, delta intérieur) et les apports les affluents locaux. Le débit maximal à Niamey était de 2 200 m<sup>3</sup>/s avec des moyennes revues à la baisse (670 m<sup>3</sup>/s) depuis 20 ans. Un nouveau record de débit a par ailleurs été établie à Niamey en 2020 avec environ 3 390 m<sup>3</sup>/s (Lebel et al., 2020). Les débits à l'étiages

ont une tendance à la diminution depuis les années 1970 et le fleuve Niger a même cessé de couler à Niamey en 1985 (**Billon, 1985**). Les précipitations moyennes annuelles dans cette partie du bassin sont d'environ 500mm. Le Niger moyen fait depuis ces dernières décennies face au problème de l'ensablement du lit du fleuve avec d'importants apports sédimentaires provenant des bassins versants de ses affluents (**Mamadou, 2012**).

Le Niger inférieur s'étale sur environ 650 000 km<sup>2</sup> et constitue la zone la plus humide du bassin. Le Niger inférieur est caractérisé par une pluviométrie variable à mesure que l'on s'approche de l'embouchure du fleuve Niger sur l'Atlantique. Il s'agit de 700 mm au nord (Sokoto) à plus de 3 000 mm pour une évaporation réelle d'environ 1000 mm/an. Les Crues du fleuve s'observent en septembre-octobre notamment grâce aux apports de la Bénoué, son affluent principal. En l'absence de barrage le débit de la Bénoué pourrait atteindre un maximum de 6 000 m<sup>3</sup>/s. Après Lokoja, le Niger inférieur présente un débit maximum moyen de 25 000 m<sup>3</sup>/s en septembre grâce à ses nombreux affluents nigériens (la Taraba, la Donga et la Katsina, Ala). Le fleuve commence à se tarir avant l'arrivée des apports du haut bassin qui font remonter le débit à environ 2 500 m<sup>3</sup>/s (**Andersen et al.,2012**).

### **1.3.1 Évolution hydrologique long terme du fleuve Niger à Niamey**

Comme vu plus haut (**1.1**), le régime hydrologique du fleuve Niger à Niamey est contrôlé par les conditions climatiques et les états de surface. Ainsi les hydrogrammes de crue du Niger à Niamey ont montré une augmentation du débit, surtout de la crue rouge (**figure 2. 9**). La crue rouge qui, au fil du temps a pris de l'ampleur et est devenue plus importante que la crue blanche en terme de maximum de débit. Cette tendance est hautement liée à l'augmentation des coefficients de ruissellement, rapportée au niveau des principaux affluents du fleuve Niger moyen (**figure 2. 10**). Les inondations, corollaire aux quantités de pluies et événements intenses

sont également en augmentation dans la région. Ce fut le cas pour l'année 2012 (Sighomnou et al., 2013 ; Cassé et al., 2016) et plus récemment 2020 qui a connu un excédent de précipitations dans la région sahélienne atteignant 200% (Lebel et al., 2020 ; Massazza et al., 2021).

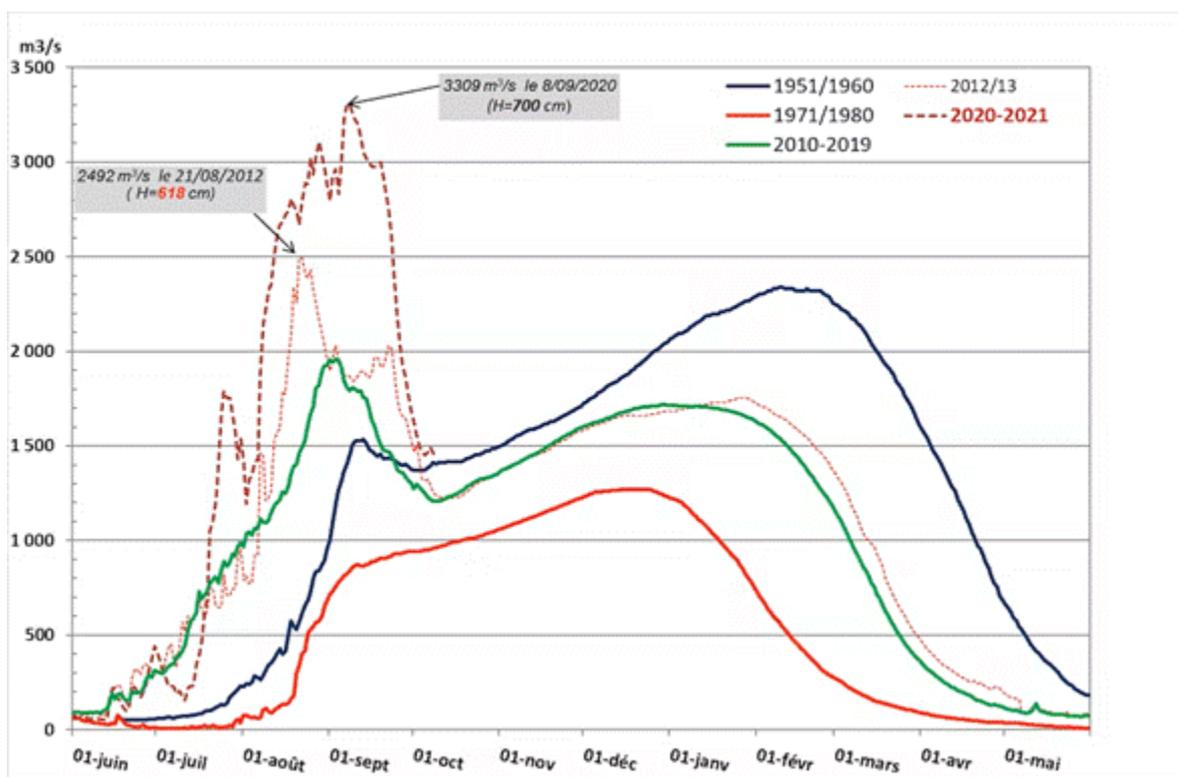


Figure 2. 9 : Hydrogrammes du fleuve Niger à Niamey pour : la période humide (1951-1960) et sèche (1971-1980) du XX<sup>e</sup> siècle ; la décennie 2010-2016 ; deux années exceptionnelles récentes (2012-2013 et 2020) (Lebel et al., 2020).

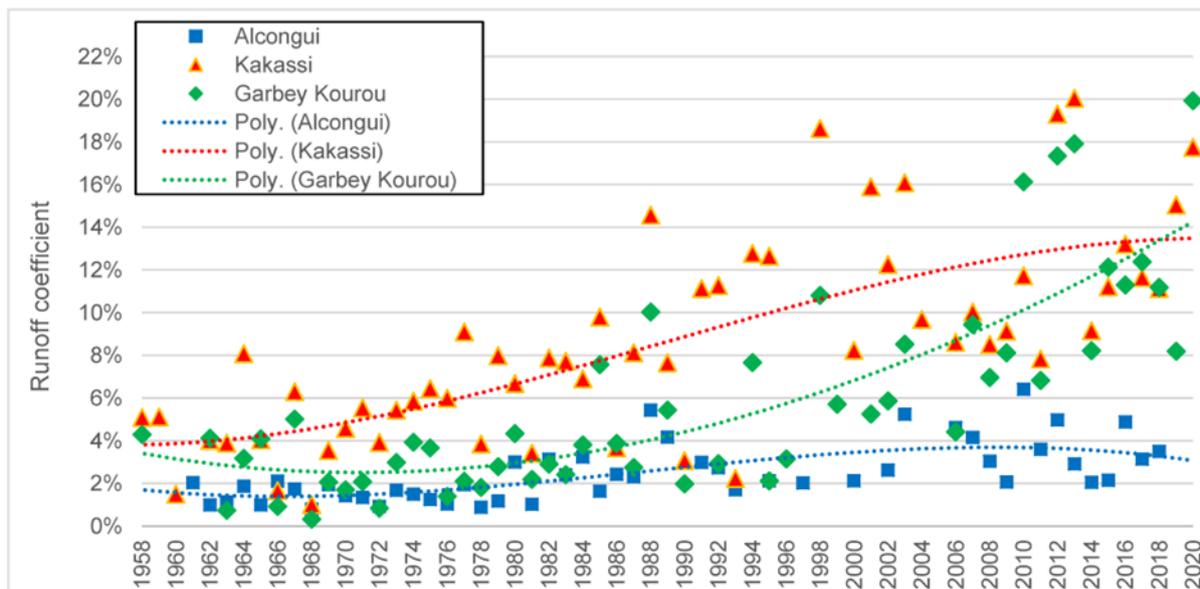


Figure 2. 10 : Coefficients de ruissellement des trois principaux affluents sahéliens du fleuve Niger : le Gorouol à Alcongui, Dargol à Kakassi et Sirba à Garbey Kourou sur la période 1958-2020 (Massazza et al., 2021).

#### 1.4 Hydrogéologie

Les formations géologiques caractérisent différents niveaux aquifères dans la zone de Niamey : l'aquifère profond du continental terminal (CT) capté par les forages et l'aquifère alluvial superficiel capté par les puits et les puisards. Le flux hydrogéologique se fait selon la direction NNW puis vers le sud en direction du fleuve Niger (Hado et al., 2022b). Ce qui suggère une alimentation du fleuve par les eaux de la nappe. La dynamique annuelle du niveau piézométrique est caractérisée par une période des hautes eaux atteignant les valeurs maximales en septembre-octobre en relation avec les pluies. La nappe phréatique à Niamey a par ailleurs connu une augmentation de son niveau statique de l'ordre de vingt à quarante mètres entre 1961 et 2021 (figure 2. 11). Cette augmentation de niveau, est accompagnée du phénomène des inondations par les eaux souterraines dans plusieurs quartiers de Niamey. Les zones inondées par la remontée de la nappe créent des sources potentielles de pollution. Il n'est en effet pas rare de rencontrer des points d'échanges entre les eaux souterraines et les fosses septiques ou une zone inondée occupées par une décharge (figure 2. 12). Il a par ailleurs été montré que le Gounti

Yena, principal affluent du fleuve Niger à Niamey et exutoire du réseau d'assainissement existant de la ville, draine la nappe phréatique à partir des secteurs inondés en aval (**Hado et al., 2022b**). Ceci représente une source potentielle de pollution diverse apportée au fleuve Niger.

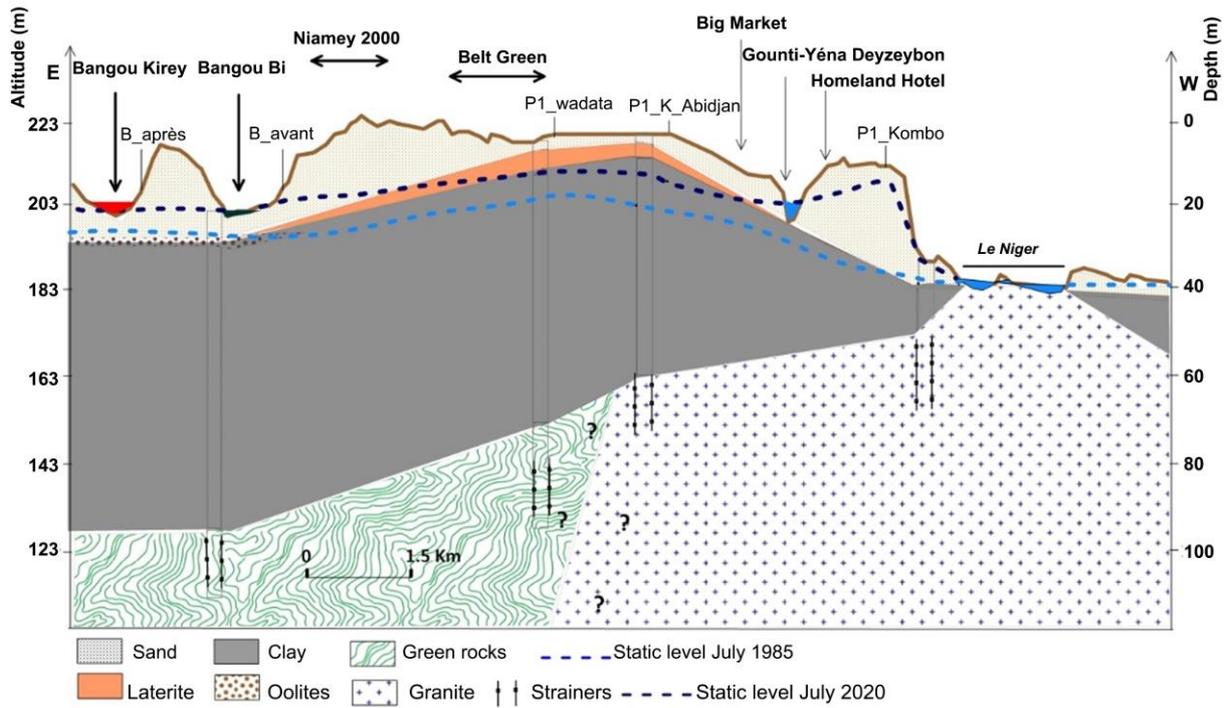


Figure 2. 11 : Coupe géologique transversale entre Bangou Kirey à l'est et le fleuve Niger à l'ouest (Hado et al., 2022b).

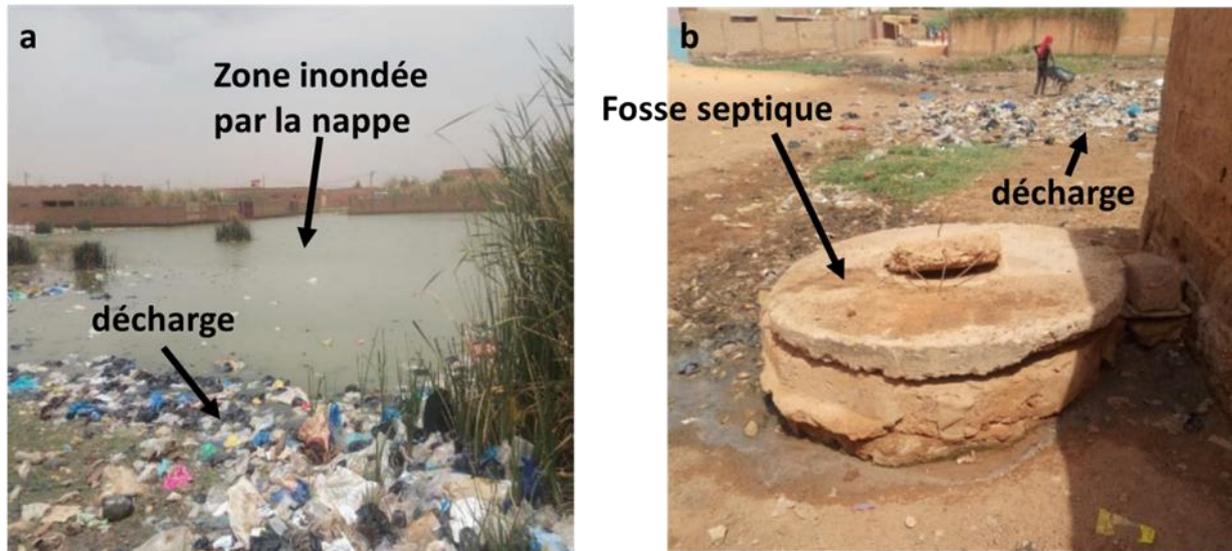


Figure 2. 12 : a) Zone d'inondation dans la ville de Niamey causée par la remontée de la nappe ; c) fosse septique communiquant avec la nappe phréatique (Hado et al., 2022b modifié).

### 1.5 Végétation

Dans la zone d'étude, comme plus en général au Sahel, la distribution, la diversité et la productivité du couvert végétal sont majoritairement contrôlées par les précipitations. L'eau représente d'ailleurs le facteur le plus limitant de la dynamique végétale au Sahel (Hiernaux et Le Houérou, 2006). La végétation naturelle est constituée d'une strate herbacée dominée par des graminées annuelles et une strate arborée constituée de plantes ligneuses (buissons, arbustes, arbres à épars) (figure 2. 13) (Hiernaux et al., 2009). La stratégie écologique des plantes annuelles est essentiellement tournée vers l'exploitation des ressources hydrique qu'offre l'humidité superficielle des sols en saisons des pluies. Les plantes ligneuses, quant à elle possèdent une évolution annuelle plus diversifiée avec une feuillaison dépendante de l'espèce et allant de quelques semaines à l'ensemble de l'année (Hiernaux et al., 1994).

On retrouve dans la région de Niamey de nombreuses formations de brousse tigrée sur les plateaux latéritiques cuirassés au sol peu profond, des steppes arbustives sur les terrasses et les dunes fixées dégradées (Mamadou, 2012). Des formations végétales de type forêts claires peuvent être présentes aux bords des cours d'eau, mares et dépressions argileuses. Globalement,

la flore présente une diversité d'espèces importante à mesure que l'on s'approche de la vallée du fleuve, des zones de bas-fonds, d'inondations et des îles (**tableau 2. 1**). La brousse tigrée est caractérisée par des alternances d'arcs végétalisés et des zones de sol nu encroutée qui engendrent une importante dégradation des sols par ruissellement vers les parties se trouvant en aval des formations végétalisées. Les zones de sol nu servent par ailleurs d'impluviums qui permettent de collecter la ressource hydrique indispensable à faire vivre la bande arborée en aval (**Galle et al., 1999 ; Valentin et al., 1999**). Les dégradations de brousse tigrée résultent, elle de la coupe sèche des zones arborées. Pour remédier à cette dégradation plusieurs sites de récupération des terres basés sur la réalisation de banquettes antiérosives ont été implantés. Les résultats ont globalement montré une amélioration du couvert végétal (**Manzo et al., 2020**).

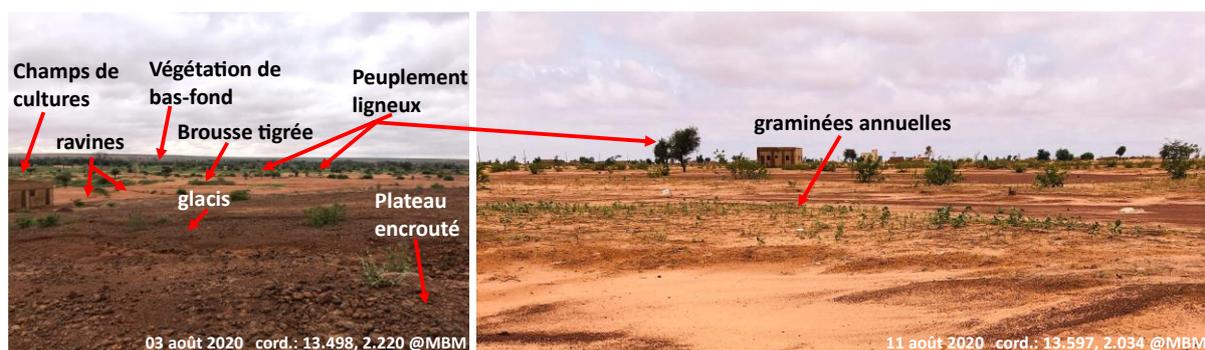


Figure 2. 13 : Végétation dans la zone de Niamey pendant la saison des pluies.

Tableau 2. 1 : Inventaire des espèces végétales ligneuses assez représentatives dans les vallées sèches de la région de Niamey (Leprun 1992 ; Garba, 1984 ; Herman et al. 2005 in Mamadou, 2012).

Nom scientifique	Nom en langue hausa	Nom en langue zerma
<i>Acacia ataxacantha</i>	<i>sarkakiya</i>	<i>Goumbi</i>
<i>Acacia nilotica</i>	<i>bagaroua</i>	-
<i>Balanites aegyptiaca</i>	<i>adwa</i>	<i>garbey</i>
<i>Bauhinia rufescens</i>	<i>dirga</i>	<i>namari</i>
<i>Boscia angustifolia</i>	<i>sarkakiya</i>	<i>hassou kwarey</i>
<i>Boscia senegalensis</i>	<i>dilo</i>	<i>anza</i>
<i>Combretum glutinosum</i>	<i>taramniya</i>	<i>kocorbé</i>
<i>Combretum micranthum</i>	<i>guéza</i>	<i>kubu</i>
<i>Combretum nigricans</i>	<i>tsiriri</i>	<i>delinya</i>
<i>Commiphora africana</i>	<i>dachi</i>	
<i>Faidherbia albida</i>		<i>gao</i>
<i>Guiera senegalensis</i> ,	<i>sabara</i>	<i>sabaré</i>
<i>Hyphaene thebaica</i>	<i>gorouba</i>	<i>gangouo</i>
<i>Lannea acida</i>	<i>farou</i>	-

Globalement, on assiste à un recouvrement de la végétation dans le Sahel après les grandes années de stress hydrique. Les études sur la dynamique du couvert végétal ont montré un reverdissement à l'échelle du Sahel pour les strates herbacées (Dardel et al., 2014a, b) et pour le peuplement ligneux (Brandt et al., 2018, 2019). Cependant, alors qu'en général la tendance est à l'augmentation, dans la zone de Niamey elle est à la diminution (Figure 2. 14 ; Figure 2. 15 ; Dardel et al., 2014b). A l'est de la ville de Niamey par exemple, sur le site de Saga il a été rapporté une importante diminution de la brousse tigrée au profit de terres cultivées et une apparition de surfaces encroustées (Figure 2. 16 ; Abdourhamane et al., 2016). Plus à l'est de Niamey, au niveau du Fakara cette diminution a été moins importante, sans doute à cause de son éloignement du centre urbain par rapport au site de Saga Gorou (Leblanc et al., 2008). En

effet, l'impact du pastoralisme est assez limité sur la diminution de la brousse tigrée (**Hiernaux et Le Houérou, 2006**), ce qui n'est pas le cas pour la récolte de bois de chauffage et à la mise en culture (**Leblanc et al., 2008**).

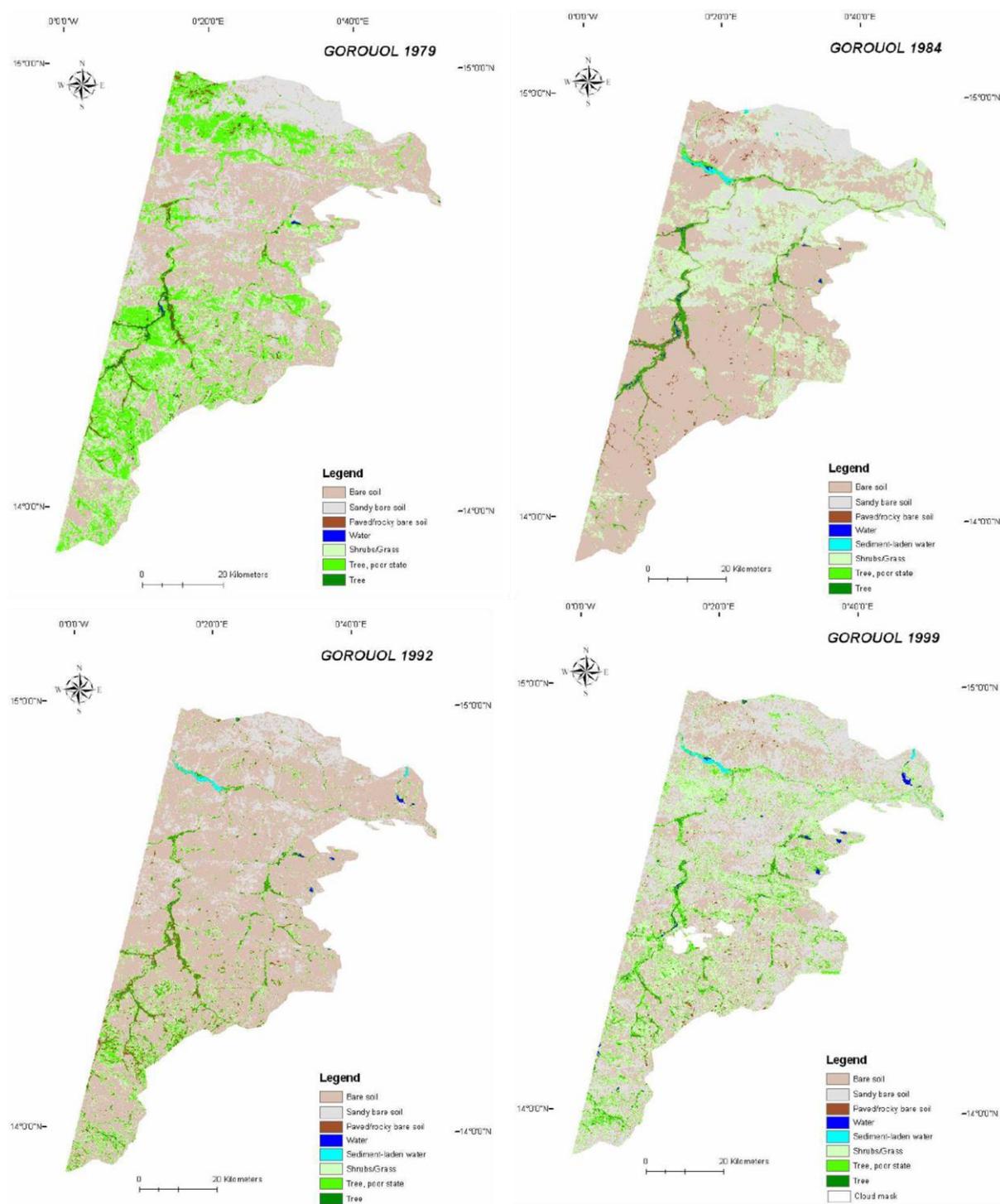


Figure 2. 14 : Changements des états de surface dans le bassin versant du Gorououl, affluent de rive droite du fleuve Niger moyen (Amogu, 2009).

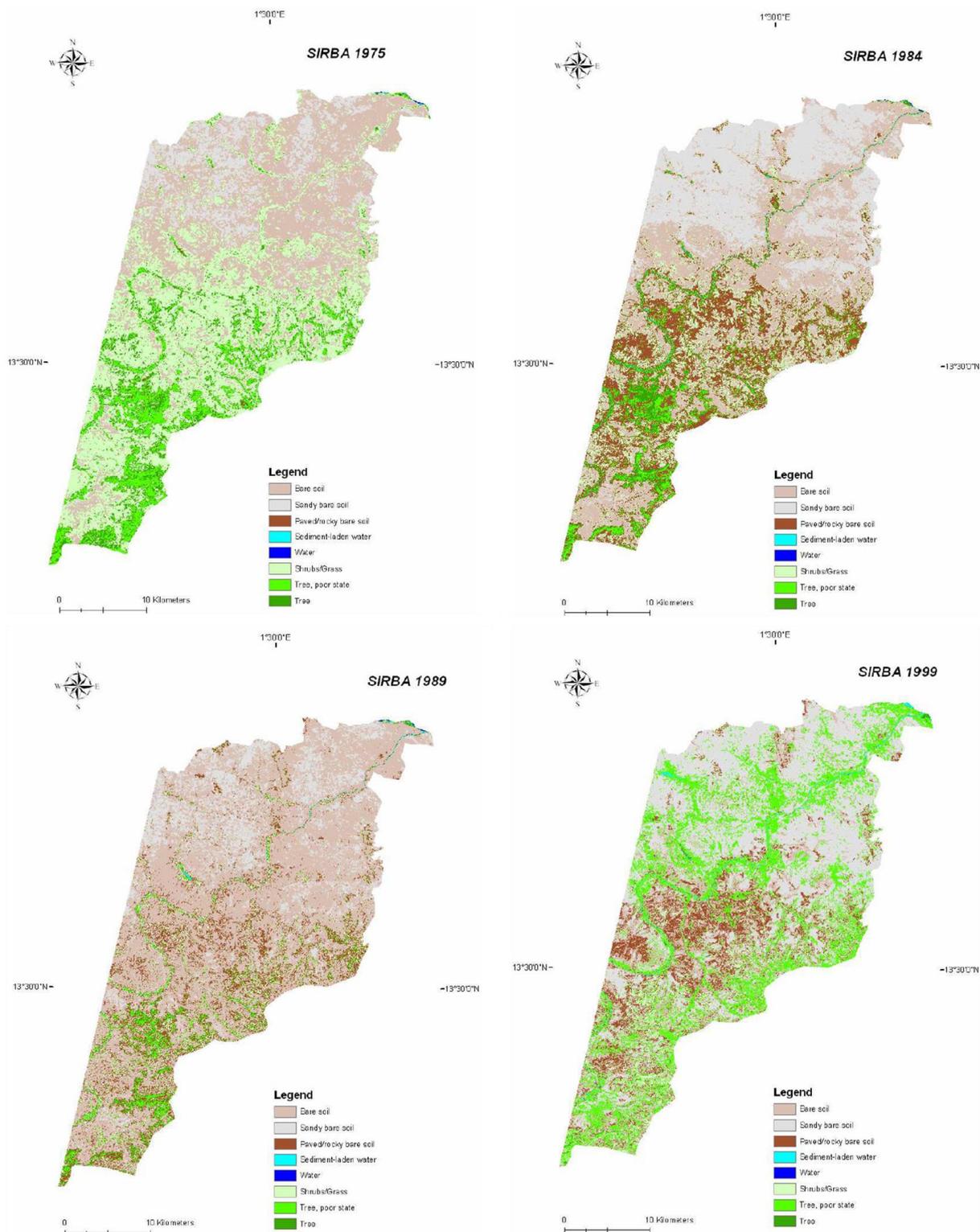


Figure 2. 15 : Changements des états de surface dans le bassin versant de la Sirba, affluent de rive droite du fleuve Niger moyen (Amogu, 2009).

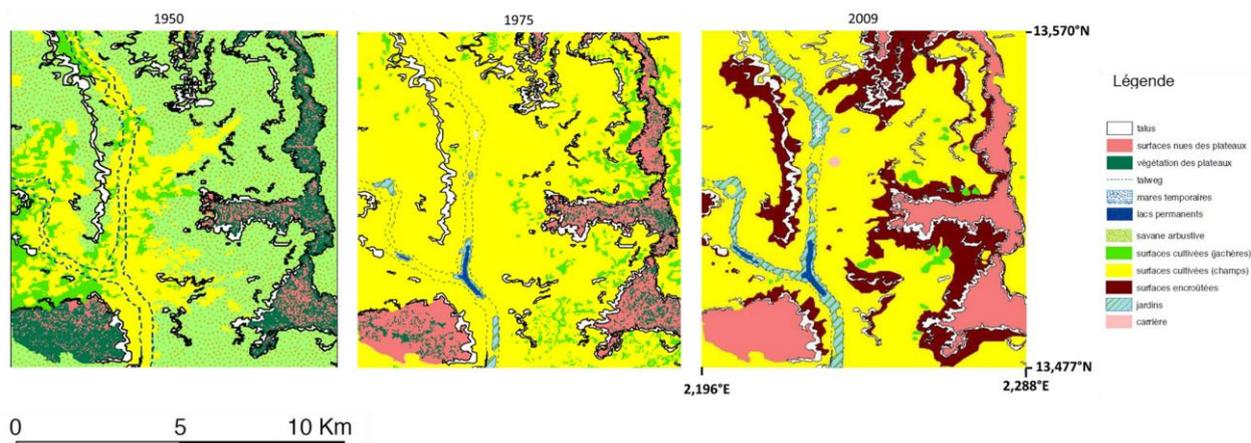


Figure 2. 16 : Cartographie diachronique des terroirs de Saga Gorou, situé sur la rive gauche du fleuve Niger moyen (Abdourhamane Touré., 2011).

## 1.6 Sites de l'étude

### 1.6.1 Ville de Niamey

La ville de Niamey est la capitale de la République du Niger depuis 1926. Niamey est localisée entre 13,44° et 13,6° de latitude Nord et 2,02° et 2,20° de longitude Est, pour une superficie d'environ 600 km<sup>2</sup>. Elle s'étend de part et d'autre du fleuve Niger sur un plateau surplombant le fleuve en rive gauche et une plaine alluviale sur la rive droite. Les altitudes à Niamey sont comprises entre 180 et 250 (Issaka et Bardariotti, 2013) pour des pentes de versants variant entre 1 et 2%. La ville appartient à la partie moyenne du fleuve Niger, au Sahel, avec un climat tropical semi-aride et des précipitations moyennes annuelles d'environ 527,36 mm (Hamadou Younoussa et al., 2020). L'évapotranspiration potentielle (ETP) y est d'environ 3 000 mm par an (Allies et al., 2020). Le territoire de la ville est subdivisé en 5 arrondissements communaux dont quatre en rive gauche (Figure 2. 17 ; sites de mesures : Tableau 2. 2).

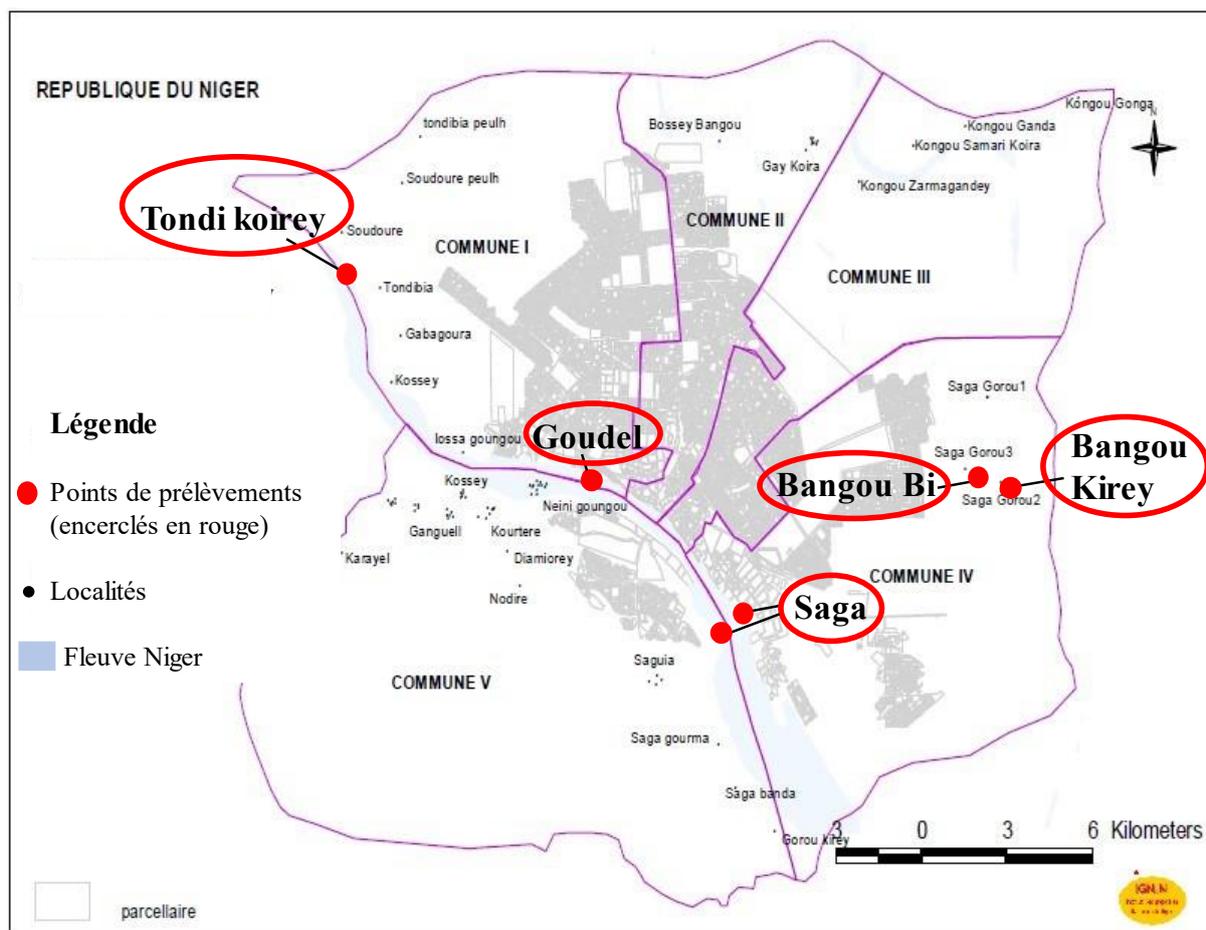


Figure 2. 17 : Sites étudiés et Découpage administratif de la ville de Niamey (Monographie région de Niamey, 2016 modifié).

Tableau 2. 2 : coordonnées des points de prélèvements des eaux concernées par l'étude.

Coordonnées	X	Y
Tondi Koirey	1,992°E	13,582°N
Goudel	2,066°E	13,520°N
Saga (rive gauche)	2,132°E	13,469°N
Saga (rive droite)	2,129°E	13,468°N
Bangou Bi	2,210°E	13,509°N
Bangou Kirey	2,226°E	13,502°N

### 1.6.2 Population et approvisionnement en eau à Niamey

Le bassin du fleuve Niger ainsi que la ville de Niamey ont subi un accroissement considérable de sa population pendant les dernières décennies (Figure 2. 18).

En effet, en 1960 Niamey ne comptait que 35 000 habitants (**Touré et Prokhoroff, 1963**) contre 1 026 848 (**Monographie Région de Niamey, 2016**) selon le dernier RGP/H (2012) et 1,3 million en 2020 pour les projections de **world population review (2022)**.

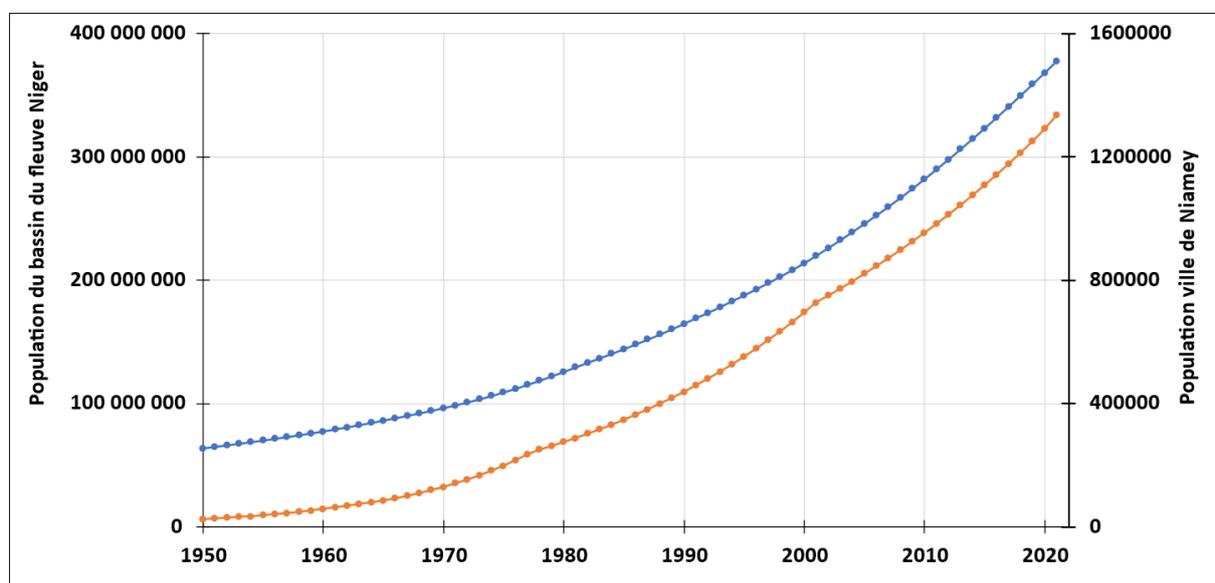


Figure 2. 18 : Dynamique de la population des pays du bassin du fleuve Niger (bleu) et de la ville de Niamey (orange) entre 1950 et 2021.

L'approvisionnement en eau de la ville se fait principalement par le biais de l'usine de potabilisation des eaux du fleuve de Goudel. Le prélèvement de l'eau brute se fait via deux stations de pompage : celles de Goudel et Yantala (plus en aval). Ces stations de pompage ne se trouvent plus véritablement à l'amont de l'actuelle ville du fait de l'accroissement important de la ville (**Alhou, 2007 ; Badamassi et al., 2018** La SEEN, organisme de gestion assurant la desserte de la ville en eau potable, assurait en 2014 l'approvisionnement de la population à hauteur de 82%. Une partie des ménages non desservis se tourne vers les eaux souterraines dont la qualité ne respecte souvent pas les normes de potabilité de l'OMS. Dans le bassin versant du Gouti Yena, principal affluent du fleuve à Niamey, par exemple, les qualités physico-chimique et microbiologique des eaux souterraines montrent respectivement un impact de la lithologie et une présence de pollution fécale (**Alhou, 2007 ; Hado et al., 2022b**). La ville de Niamey

manque en effet d'un système d'assainissement adapté. Ce manque cause de nombreux risques pour la santé des populations. Le lit mineur du fleuve est, pendant la décrue une aire de pâturage pour les animaux domestiques (**Mamadou, 2021**), mais également le lieu d'activités du quotidien (lessive, vaisselle, baignade...) et professionnelles (tannerie traditionnelle). Niamey ne disposant pas de station publique d'épuration des eaux usées, plusieurs établissements considérés dangereux, insalubres et incommodants dont des unités industrielles (OLANI, Abattoir frigorifique, ONPPC, UNILEVER, Tannerie) déversent directement leurs déchets dans le fleuve (**Alhou, 2007 ; Figure 2. 19**).

A l'image des autres villes établies sur le Niger, la ville de Niamey exerce son influence sur le fleuve et son écosystème bien qu'elle ne présente pas un important développement industriel. **Alhou (2007)** a regroupé les sources de pollution au fleuve de la ville de Niamey en quatre grands groupes : les sources domestiques, industrielles, hospitalières et agricoles.

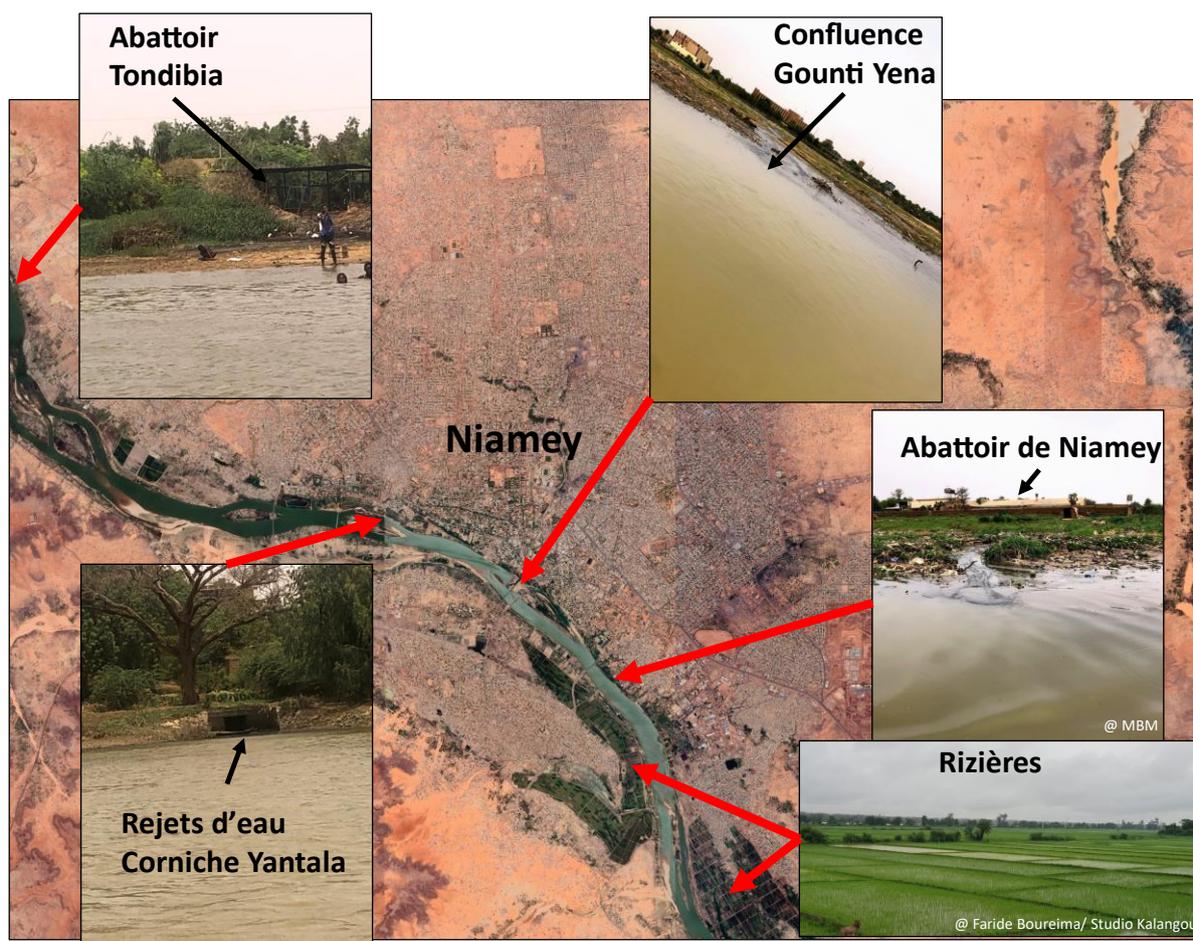


Figure 2. 19 : Quelques points de rejets d'eaux usées non traités dans le fleuve Niger à Niamey et potentielle source de pollution agricole.

La ville de Niamey ne disposant pas de système d'évacuation des eaux usées, le rejet des eaux et certaines ordures ménagères se fait par les caniveaux conçus pour l'évacuation des eaux pluviales pour la plupart bouchés par des sédiments. Ces eaux usées générées comportent de la matière en suspension, du phosphore, de l'Azote, de la matière organique mais également des bactéries et autres microorganismes qui se retrouvent le plus souvent dans le fleuve (**Figure 2. 20**). Les activités exercées sur les berges du fleuve représentent également une source de pollution domestique avec notamment les lavages divers (animaux domestiques, lessives, vaisselle, lavage de peaux animales). Le pâturage d'animaux domestiques présente aussi une source importante de bactéries fécales pour le fleuve (**Figure 2. 21**).

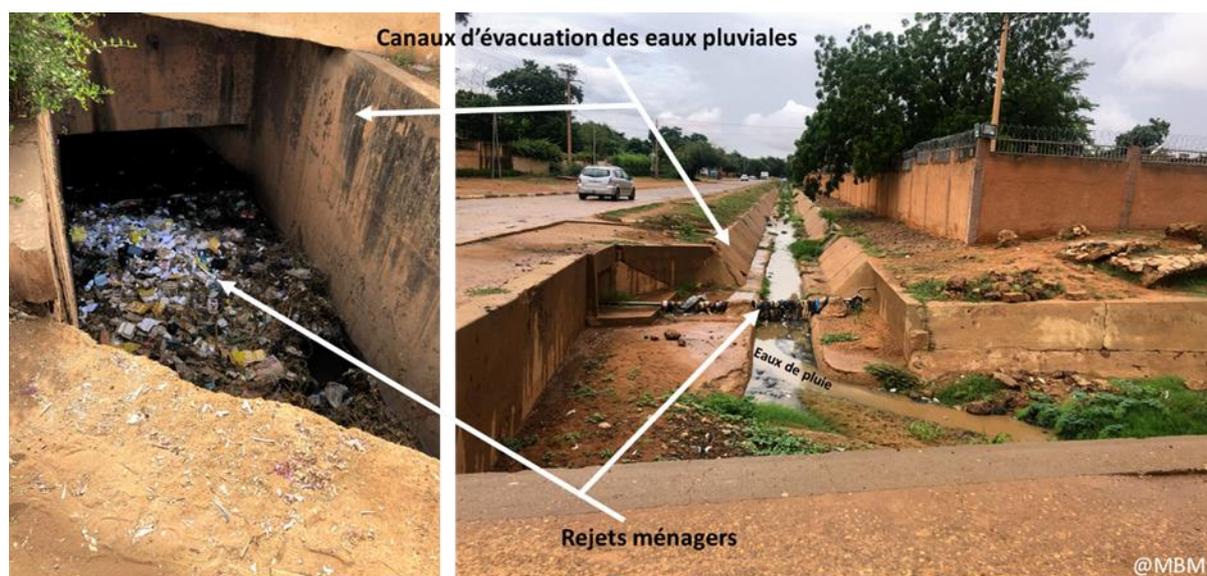


Figure 2. 20 : Caniveaux d'évacuation des eaux pluviales de la ville de Niamey envahies par des déchets solides. A gauche le canal est quasiment bouché.

La zone industrielle de Niamey est constituée de complexes agro-alimentaires (abattoir, tannerie, laiterie, brasserie), textile (ENITEX) et chimiques (savonnerie, produits pharmaceutiques). Il s'agit de la source de pollution la plus importante à Niamey (Alhou, 2007). L'abattoir de Niamey compte parmi les grands pollueurs de la ville de Niamey avec ses 220 m<sup>3</sup>/jour d'eau usées (Alhou, 2007).

Les hôpitaux de la ville produisent également des effluents qui sont déversés directement dans le fleuve faute de station d'épuration adéquate. Les effluents hospitaliers présentent des similitudes avec les effluents ménagers en plus de comporter des rejets médicamenteux et des métaux lourds.

Les sources agricoles proviennent essentiellement des aménagements hydro-agricoles (Figure 2. 19) et des champs de culture dans lesquels est répandue en guise d'engrais les déchets enlevés de la ville.

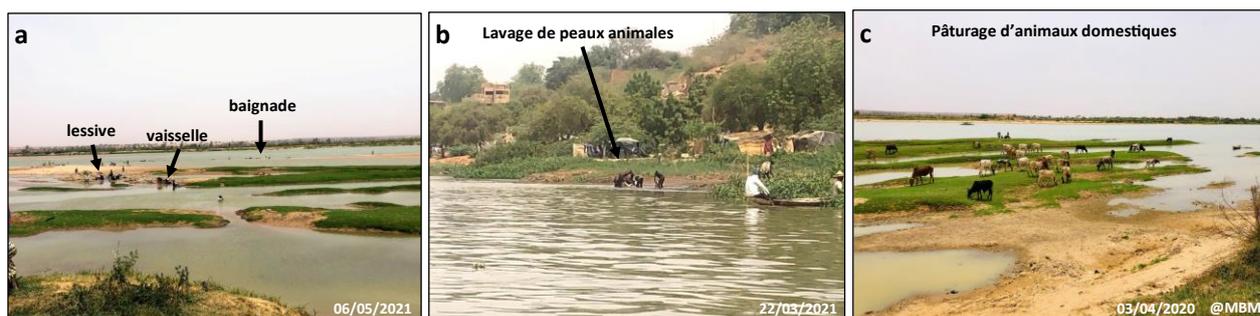


Figure 2. 21 : a) Activités des populations riveraines du fleuve Niger au quartier de Saga ; b) lavage de peaux d'animaux directement dans le fleuve, on peut apercevoir des pêcheurs à proximité ; c) Aire de pâturage des animaux domestiques au niveau de Saga.

### 1.6.3 Lacs de Bangou Bi et Bangou Kirey

Les lacs de Bangou Bi et Bangou Kirey (**Figure 2. 22**) appartiennent au chapelet de mares et lacs du kori de Ouallam, un affluent fossile du fleuve Niger. Les deux lacs ont une superficie respective de 0,06 km<sup>2</sup> et 0,4 km<sup>2</sup> (**Abdourhamane Touré, 2011**). Ils sont devenus permanents au début des années 1960 grâce à la remontée de la nappe phréatique de Niamey (**Leduc et al., 2001**). Les populations de Saga Gorou à qui appartient Bangou Bi et Bangou Kirey ont émigré depuis des localités environnantes. Ils viennent de Saga Goley, Dakala et majoritairement de Liboré Tonko Bangou et ont occupé les terres pour les cultiver en saison des pluies puis, il y a environ 100 ans, se sont sédentarisés fondant les huit villages que compte Saga Gorou (**Abdourhamane Touré, 2011**). C'est une population majoritairement Zarma qui vit d'une agriculture pluviale traditionnelle (culture du mil) et d'une agriculture irriguée (maraîchage) apparue avec la formation des lacs permanents. La proximité de la ville de Niamey leur permet d'écouler la production maraîchère, mais expose le site à une certaine pression anthropique.

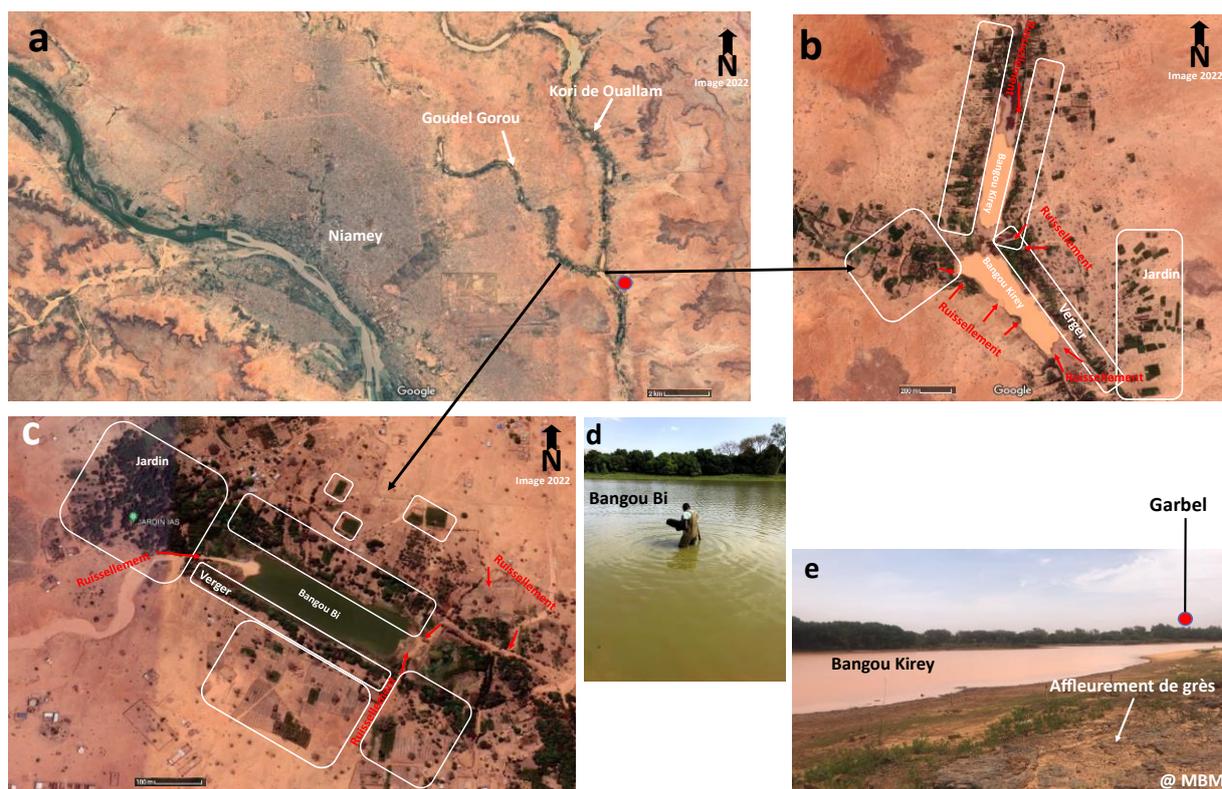


Figure 2. 22 : Localisation (a) des sites de Bangou Kirey (b & e) et Bangou Bi (c & d). La couleur des eaux des deux lacs est différente (Bangou Bi = eaux grisâtres et Bangou Kirey = eaux rougeâtres).

## 1.7 Sites d'échantillonnages

Les mesures de ce travail ont été menées sur les eaux de surface de la région de Niamey. Elles ont concerné cinq sites sur le fleuve Niger : Tondi Koirey (Latitude : 13.581, Longitude : 1.992), la station de pompage de Goudel (Latitude : 13.520, Longitude : 2.066) et Saga (Rive gauche : Latitude : 13.46772, Longitude : 2.132 et Rive droite : Latitude : 13.468, Longitude : 2.129) ainsi que deux lacs situés à l'Est de Niamey. Bangou Bi, « lac noir » en Zarma, la langue locale et Bangou Kirey signifiant « lac rouge » appartiennent au village satellite de la ville de Niamey (environ 15 km du centre-ville de Niamey), Saga Gorou.

La station de pompage de Goudel assure l'approvisionnement en eau de la ville. Elle a constitué le site principal du fait de sa situation en amont de la ville, exempte donc en théorie de toute influence urbaine. Goudel ne se trouve plus véritablement à l'amont de l'actuelle ville de

Niamey du fait de son important accroissement. Un second site a donc été temporairement installé en 2020 plus en amont de Niamey à Tondi Koirey. En amont du Niger moyen et les affluents majeurs, le site d'Ansongo a été exploré. Il s'agissait ici de montrer le comportement des paramètres environnementaux suivis dans un contexte d'absence de crue rouge du fleuve Niger.

Saga a constitué sur le fleuve Niger le site en aval de la ville de Niamey. Comparativement aux sites amonts celui de Saga a servi à déterminer l'impact de la ville de Niamey sur les paramètres mesurés. En 2019 les mesures ont été réalisées sur la rive droite de Saga tandis qu'en 2020 et 2021, elles ont été menées sur la rive gauche. Ce changement a été opéré afin de mieux quantifier l'impact de la ville, car la rive gauche de Niamey concentre plus de population comparativement à la rive droite.

Les lacs de Bangou Bi et Bangou Kirey ont eux aussi été échantillonnés à cause de leurs importances agricoles pour les populations environnantes et pour avoir des informations sur les paramètres environnementaux des différents systèmes hydrologiques de Niamey. Les mesures sur ces lacs permettront d'appréhender l'influence de la zone péri-urbaine sur les paramètres mesurés relativement à la ville de Niamey.

Les données pluviométriques de quatre stations de la zone de Niamey ont été utilisées dans le cadre de ce travail. Il s'agit des stations pluviométriques de l'IRI (rive droite Niamey), l'IRD (NY\_ORSTOM) et l'aéroport (rive gauche Niamey), Koyria (50 km au nord-ouest de Niamey) et Boubon (22 km au Nord-ouest de Niamey) (**Figure 2. 23**). Les données utilisées couvrent la période du 1<sup>er</sup> janvier 2018 au 31 décembre 2021 et sont fournies par l'observatoire AMMA-CATCH (AMMA-CATCH.CL.Rain\_N). La précipitation journalière de chaque pluviomètre est la somme de la lame d'eau tombée entre 6h de la veille et 6h du jour considéré. La précipitation journalière sur Niamey est la moyenne de toutes les stations pluviométriques sauf

celle de l'aéroport à cause des lacunes dans le jeu de données de cette dernière. Par ailleurs seules les données pluviométriques de la station de l'aéroport ont été utilisées pour explorer les relations entre les précipitations et les différents paramètres des eaux des deux lacs au vu de leur proximité géographique.

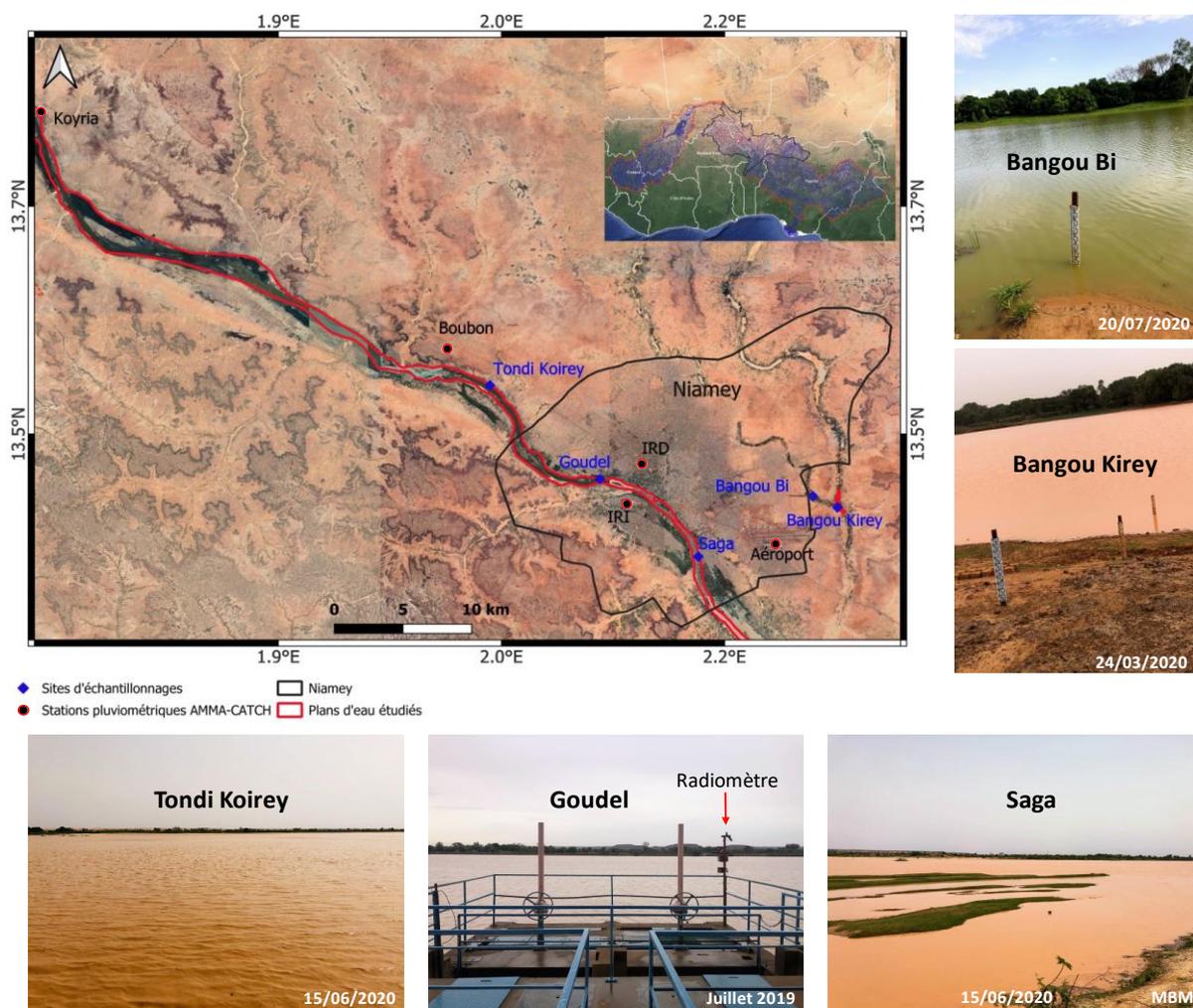


Figure 2. 23 : Localisation des sites d'échantillonnages et pluviomètres AMMA-CATCH. Sites sur le fleuve Niger à Niamey : Goudel, en amont ; Sage à l'aval et Tondi Koirey, le site le plus en amont de la ville. Bangou Bi et Bangou Kirey situés à l'Est de Niamey.

Des mesures en transect le long du fleuve Niger entre le site de Saga et celui de Tondi Koirey ont été effectuées une fois en basses eaux (28 mai 2020), une fois en crue rouge (16 août 2020) et une fois en crue blanche (22 mars 2021). Ce transect du fleuve, long de 24 km comporte 12 points d'échantillonnage équidistants de 2 km. Les mesures et échantillonnages ont été réalisés

dans le sens inverse des écoulements des eaux du fleuve (Saga vers Tondi Koirey). Les transects ont concerné la rive gauche du fleuve à Niamey car étant celle qui concentre la majorité de la population (**Figure 2. 24**), l'impact de la ville devrait être mieux quantifié. Des mesures en section de la rive gauche vers la rive droite au niveau des sites de Goudel et de Saga ont été réalisées pour explorer les variations d'une rive à l'autre du fleuve. Les mesures sur la section de Saga ont été réalisées une fois en basses eaux (28 mai 2020) sur quatre points, en crue rouge (16 août 2020) et en crue blanche (22 mars 2021) sur six points d'échantillonnage. Le changement dans le nombre de points d'échantillonnages en basse eaux par rapport aux autres états hydrologiques du fleuve est lié à la largeur variable du fleuve Niger au niveau de Saga. Au niveau de Goudel, les mesures en section ont concerné six points en basses eaux et en crue rouge et cinq points en crue blanche. L'échantillonnage lors de ces mesures (sections et transects) s'est fait à l'aide d'une pirogue équipée d'un moteur (**Figure 2. 25**).

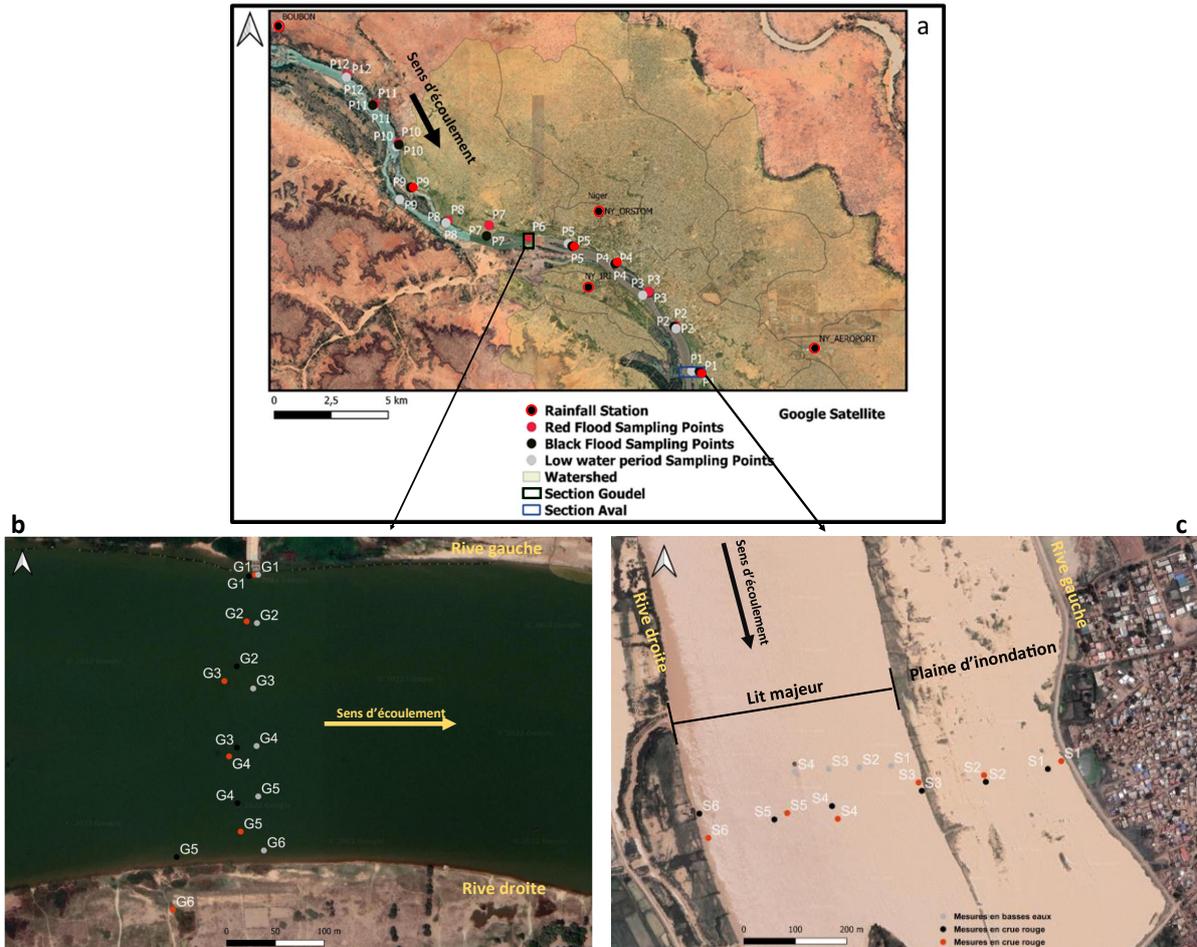


Figure 2. 24 : Localisation des points d'échantillonnages lors des mesures spéciales sur le fleuve Niger. a) le long du transect entre Saga et Tondi Koirey ; b) section Goudel et c) section Saga.



Figure 2. 25 : Préparatifs de pirogue pour les mesures (en transect et section) en crue rouge du Niger ; site de Saga 16/08/2020 (débit = 2 740 m<sup>3</sup>/s). Le Niger avait atteint et dépassé le niveau d'alerte rouge fixé à 6,20 m (débit = 2 512 m<sup>3</sup>/s) le 12/08/2020.

## Chapitre III – Matériels et méthodes

---

### 1.1 Variables mesurées

Les variables mesurées dans le cadre de ce travail ont concerné les paramètres microbiologiques, physico-chimiques et chimiques des eaux de surface de la ville de Niamey. Les paramètres microbiologiques mesurés ont été la teneur en *Escherichia coli* et en Entérocoques intestinaux. Pour les paramètres physico-chimiques, la concentration en MES ainsi que les pH, la température, la conductivité et l'oxygène dissout ont été estimées par différentes méthodes. Il a également été question de caractériser la nature des matières en suspension par le biais d'analyses granulométriques, spectrométriques et par l'observation de leur morphologie. La composition hydro-chimique des eaux a été déterminée de façon ponctuelle (**tableau 3. 1**). Ces analyses ont été possibles grâce à la préparation d'échantillons depuis Niamey et aux traitements effectués à Toulouse.

Tableau 3. 1 : Récapitulatif des variables mesurées en fonction du site.

Variables	Sites concernés
Paramètres microbiologiques (Teneur en <i>E. coli</i> et Entérocoques intestinaux)	Tondi Koirey, Goudel, Saga, Bangou Bi et Bangou Kirey
Paramètres physico-chimiques (concentration en MES, pH, T, Cond., O <sub>2</sub> dissout)	Tondi Koirey, Goudel, Saga, Bangou Bi et Bangou Kirey
Nature et granulométrie des matières en suspension	Goudel, Saga, Bangou Bi et Bangou Kirey
Détermination de composition hydro-chimique des eaux et observation des matières en suspension sous MET & MEB	Goudel, Bangou Bi et Bangou Kirey

### 1.2 Échantillonnage des eaux du fleuve et plans d'eau

Les échantillonnages ont été réalisés à l'aide de bouteilles plastiques de 0,5 L. Les échantillons d'eau ont été prélevés à environ 20 cm sous la surface de l'eau et à environ 5 m du bord au niveau de Tondi Koirey, Saga et des deux lacs afin d'échapper à l'influence de la rive. Le

prélèvement a été effectué de manière isocinétique, contre le sens du cours d'eau, en positionnant l'échantillonneur légèrement plus à la verticale quand il n'y a pas de courant (**figure 3. 1**). A Goudel l'échantillonnage a été fait en puisant l'eau avec un seau depuis la plateforme de la station de pompage. Les échantillons ont ensuite été acheminés au laboratoire "sols et érosion" de l'IRD de Niamey pour y effectuer des analyses (Concentration en MES, dénombrement de bactéries indicatrices de contamination fécale). D'autres échantillons ont été conditionnés pour des analyses à Toulouse en France.

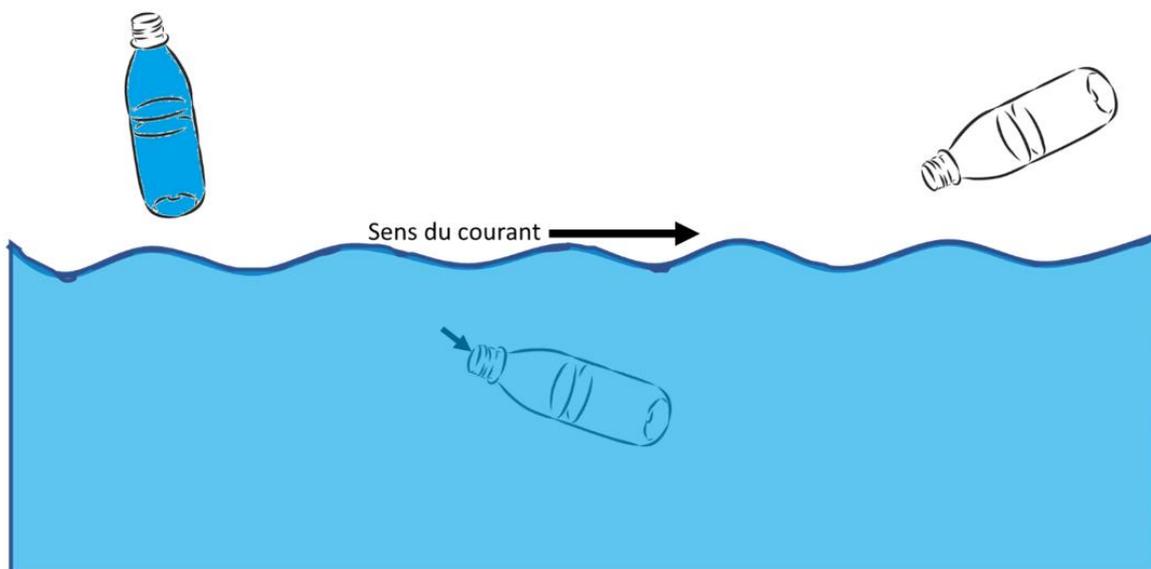


Figure 3. 1 : Méthodologie d'échantillonnage appliquée dans les plans et cours d'eau étudiés.

### 1.3 Paramètres physico-chimiques des eaux de surfaces étudiées

Les paramètres physico-chimiques des eaux ont été déterminés in situ à l'aide de sondes multiparamètres « YSI 556 MPS » et « 3620 IDS SET G » entre le 14 mai et le 16 août 2020 au niveau des cinq sites de mesures et entre le 15 mars et le 12 août 2021 au niveau de Goudel, Saga, Bangou Bi et Bangou Kirey (**figure 3. 2**). Les sondes de pH et de conductivité ont été calibrées tous les jours avant les sorties de terrain avec respectivement deux solutions tampons (pH = 4,1 & pH = 7) pour le pH et une solution à 1000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  pour la conductivité. La sonde d'oxygène dissous pour sa part, a été étalonnée sur le terrain.

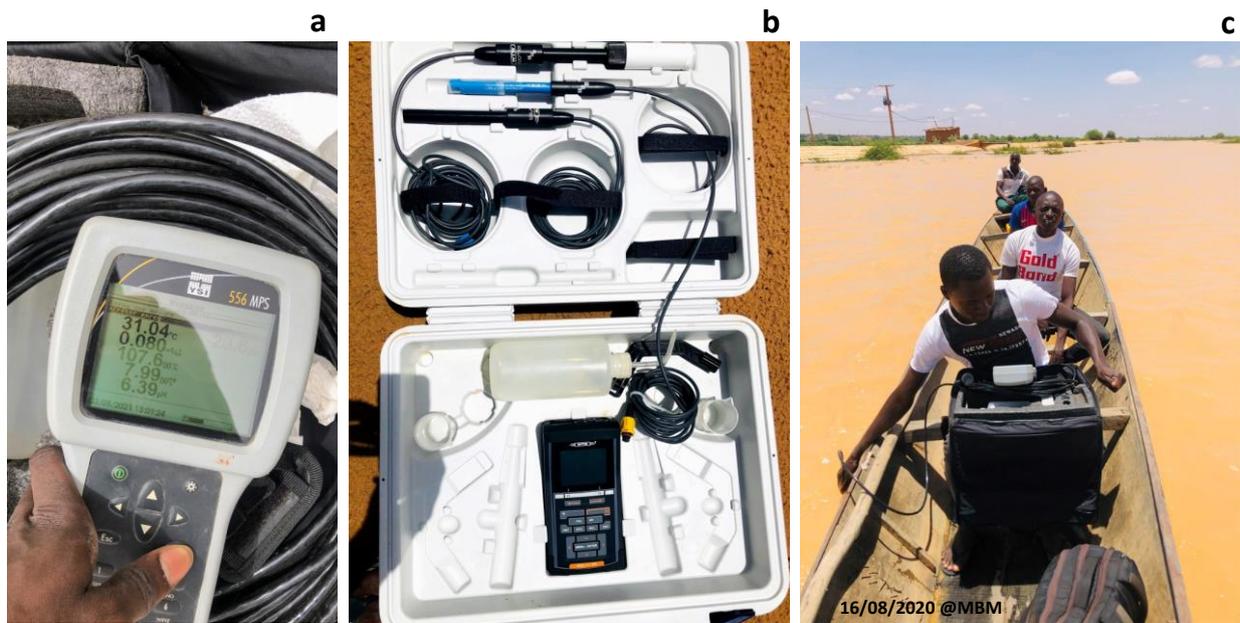


Figure 3. 2 : a) Sonde « YSI 556 MPS ». b) sonde « 3620 IDS SET G ». c) mesure de paramètres physico-chimiques sur le fleuve Niger.

#### 1.4 Recherche et dénombrement d'*Escherichia coli* et d'Entérocoques intestinaux

La recherche et le dénombrement de bactéries indicatrices de contamination fécale dans un échantillon liquide peut se faire soit avec les méthodes NF EN ISO 9308-3 pour *E. coli* et NF EN ISO 7899-1 pour Entérocoques intestinaux (Rochelle-Newall, 2016 ; Robert et al., 2021) par microplaques (figure 3. 3) ou soit avec la méthode MA. 700-Ec.BCIG 1.0 (CEAEQ, 2005) par filtration sur membrane (figure 3. 4). La méthode par microplaque consiste à incuber pendant 48h l'échantillon d'eau à analyser avec un certain niveau de dilution (1/2, 1/20/, 1/200 et 1/2000) dans une microplaque (MUG/EC ou MUG/ENT, BIOKAR DIAGNOSTICS) à une température de 44°C.

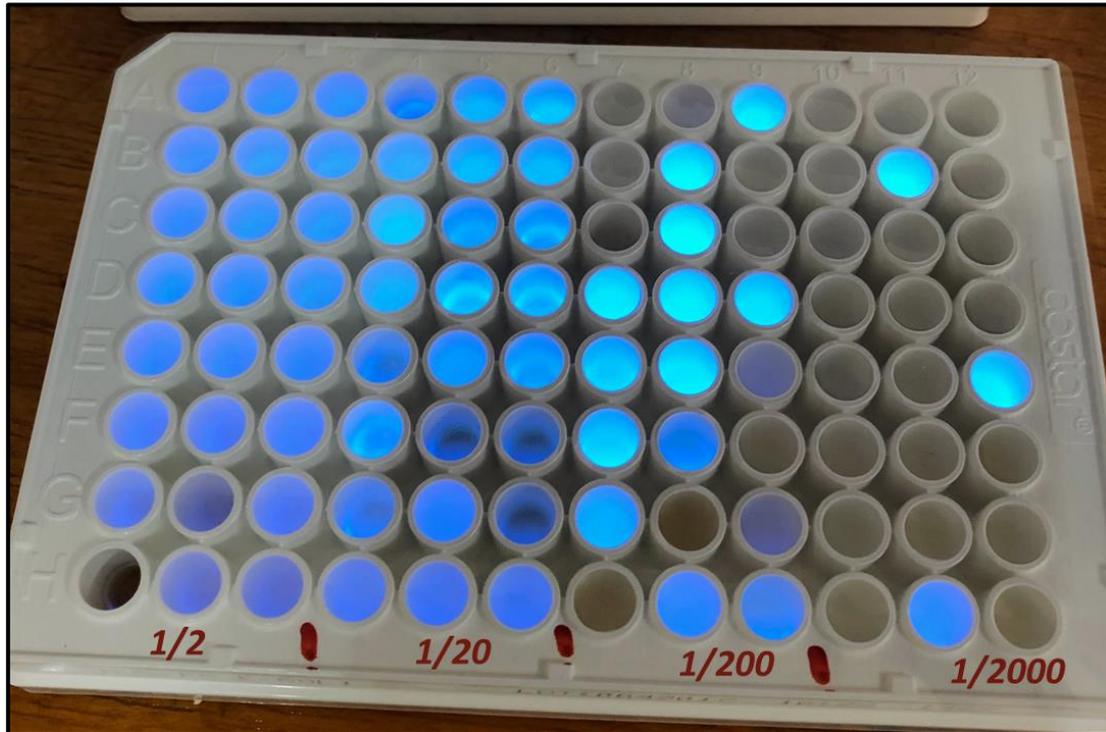


Figure 3. 3 : Dénombrement d'*E. coli* suivant la méthode ISO 9308-3. Microplaque MUG EC sous lumière UV à 366 nm de longueur d'onde. Échantillon du fleuve Niger. Les puits à fluorescence bleue sous lumières UV sont positifs à la présence de bactéries recherchées.

La méthode par filtration se fait en filtrant un certain volume d'eau à analyser avec une membrane filtrante stérile quadrillée de 0,45  $\mu\text{m}$  de porosité, qui incube ensuite pendant  $24\text{h} \pm 2\text{h}$  à  $44,5^\circ\text{C}$  avec un milieu à base de gélose mFC-BCIG. La présence de matières en suspension peut cependant nuire à cette méthode car en provoquant un colmatage de la membrane filtrante elles viennent entraver l'observation de colonies en masquant ou inhibant la croissance des bactéries (CEAEQ, 2016).

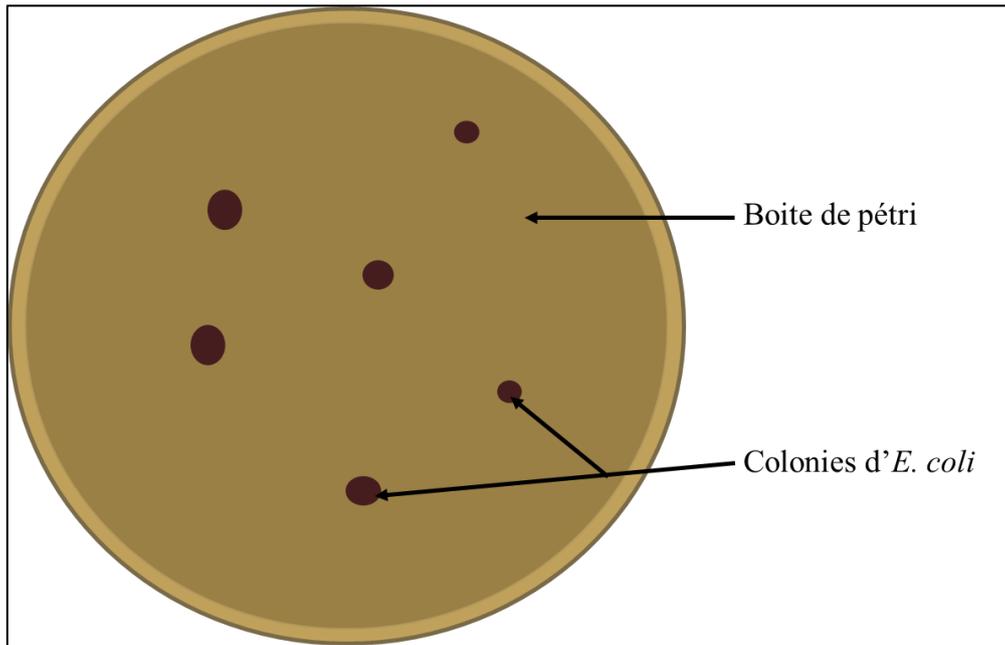


Figure 3. 4 : Dénombrement d'*E. coli* suivant la méthode MA. 700-*Ec*.BCIG 1.0 (résultat après incubation).

#### 1.4.1 Différence entre Nombre le Plus Probable (NPP) et Unité Formant Colonie (UFC)

Le résultat de la méthode de dénombrement des bactéries par microplaques s'exprime en « Nombre Plus probable (NPP) » tandis que pour la méthode par filtration le résultat s'exprime en « Unités Formant Colonies (UFC) ». Un NPP équivaut à un UFC, la seule différence se trouve dans la manière d'obtenir le résultat. La méthode de l'UFC consiste à estimer, dans un échantillon, le nombre individuel de bactéries viables capables de donner naissance à une colonie après une période donnée de culture sous des conditions optimales (milieu nutritif, température/pH adéquats). L'expression du résultat sous-estime le nombre réel de bactéries car il se peut que la colonie observée soit originaire d'une masse de cellules déposées ensemble ou physiquement proches (<https://www.jlindquist.com/microbiology102/cfupage.html>). Le NPP est la mesure alternative à UFC qui estime aussi le nombre de microorganismes viables d'un échantillon d'eau. Elle se base sur des lois statistiques en fonction des résultats des tests (positifs/négatifs).

#### 1.4.2 Dénombrement d'*Escherichia coli* et Entérocoques intestinaux

Pour ce travail, le dénombrement d'*E. coli* et d'Entérocoques intestinaux, indicatrices de contamination fécale, a été fait par la méthode de culture en microplaques (**figure 3. 5**). Le nombre le plus probable (NPP) d'*E. coli* et d'Entérocoques intestinaux a été calculé grâce au nombre de puits présentant une fluorescence bleue sous lumière UV à 366 nm de longueur d'onde. Cette fluorescence témoigne pour le cas d'*E. coli* par exemple de la présence de bactéries et est due à une activité enzymatique, la  $\beta$ -D-glucuronidase chez *Escherichia coli*. **Buehler et al., (1949)** ont été les premiers à mettre en évidence cette enzyme et **Kilian et Bulow (1979)** à révéler qu'il s'agissait d'une activité enzymatique propres aux genres *Escherichia*, *Shigella* et *Salmonella*. Les études ont montré que 94 à 97% des *Escherichia coli* d'origine humaine et environnementale présentent cette activité enzymatique. **Trepeta et Edberg** ont été les premiers à incorporer du 4-méthylumbelliféryl- $\beta$ -D-glucuronide (MUG) à un milieu de culture A-1 de **Andrews et Presnell (1972)** pour détecter la présence de  $\beta$ -D-glucuronidase. **Hernandez et al., (1991)** ont utilisé et validé la technique en microplaques ainsi que la méthode statistique d'exploitation des résultats et mis en évidence un meilleur taux de recouvrement, comparé aux autres méthodes, dans les eaux côtières françaises.

Une microplaque MUG/EC comporte 96 puits (12 rangées de 8 puits) dans lesquels se trouve 100  $\mu$ l de support (milieu de culture) incorporé et déshydraté. Ce support est constitué de 0,1 mg de MUG et 1 g de Triton X 100 ajoutés à 40 g de Tryptone et 1 g de Salicine mélangé puis autoclavé (**Biokar diagnostics**). Le Triton X 100 est un agent tensioactif et la Salicine est un hydrate de carbone facilement utilisé par *Escherichia* (**Andrews et Presnell, 1972**). La réhydratation du milieu se fait lorsque l'eau à analyser est introduite dans le puits. Les bactéries *E. coli*, éventuellement présentes dans l'inoculum, vont hydrolyser le MUG en 4-méthylumbelliférone glucuronide correspondant. C'est la production de 4-méthylumbelliférone qui a été observée sous lumière UV.

Les échantillons sont soumis à des dilutions successives selon le type d'eau à analyser et son niveau de contamination (**tableau 3. 2**). Les échantillons d'eau de surface de Niamey ont subi quatre dilutions avec du ringer lactate en 2019/2020 et trois (1/1, 1/2, 1/20, 1/200) en 2021. Le passage de quatre dilutions à trois a été décidé pour optimiser le dénombrement de bactéries. En effet, la dilution 1/2000 présentait peu de puits positifs pour les dénombrements effectués en 2019/2020. L'incubation à 44°C est faite afin d'inhiber la croissance de la majorité des microorganismes contaminants contrairement à des *E. coli* et Entérocoques intestinaux.

*Tableau 3. 2 : Dilutions et plages de mesures en fonction du type d'eau à analyser ([https://www.humeau.com/media/blfa\\_files/FT\\_Microplaque-MUG\\_EC\\_77010010802\\_FR\\_150321\\_bb6ff725ba3a781324535de957888393.pdf](https://www.humeau.com/media/blfa_files/FT_Microplaque-MUG_EC_77010010802_FR_150321_bb6ff725ba3a781324535de957888393.pdf)).*

Nature de l'échantillon	Nombre de dilutions	Nombre de puits / dilution	Plages de mesures (microorganismes / 100 mL)
Eaux de baignade	2	64 puits au 1/2 32 puits au 1/20	1,5 x 10 <sup>1</sup> à 3,5 x 10 <sup>4</sup>
Autres eaux de surface	4	24 puits au 1/2 24 puits au 1/20 24 puits au 1/200 24 puits au 1/2000	4,0 x 10 <sup>1</sup> à 3,2 x 10 <sup>6</sup>
Eaux résiduaires et stations d'épuration	6	16 puits au 1/2 jusqu'à 16 puits au 1/200 000	6,0 x 10 <sup>1</sup> à 6,7 x 10 <sup>8</sup>

Le calcul du NPP d'*E. coli* contenu dans l'échantillon se fait en fonction du nombre de puits fluorescents compté pour chaque dilution suivant l'analyse statistique fondée sur la loi de poisson. La procédure dérive des travaux de **McCrary (1915)**. L'estimation de la densité est basée sur l'application de la théorie des probabilités à partir de certaines hypothèses. La première est que l'inoculum contient une distribution aléatoire de cellules microbiennes. Cela implique que chaque dilution est soigneusement mélangée et qu'il n'y a pas d'amas ou d'agrégats de cellules ou, si c'est le cas, qu'ils ne sont pas perturbés lors des étapes de dilution suivantes (une hypothèse qui n'est pas toujours correcte). La seconde hypothèse est que chaque volume d'inoculum contenant au moins un organisme viable présente une croissance lorsqu'il est incubé dans le milieu de culture (**Oblinger et Koburger, 1975**). Si ces hypothèses ne sont pas

respectées, la procédure NPP peut sous-estimer la densité cellulaire microbienne réelle. Suivant ces suppositions, la loi de poisson peut être utilisée pour déterminer le nombre de microorganismes dans les tubes. Le dénombrement d'*E. coli* dans les échantillons des plans et cours d'eau de Niamey étudiés se termine par le calcul du NPP avec le logiciel « MPN Calculator » build 23 par Mike Curial suivant la méthode statistique expliquée par **Jarvis et al., (2010)**.

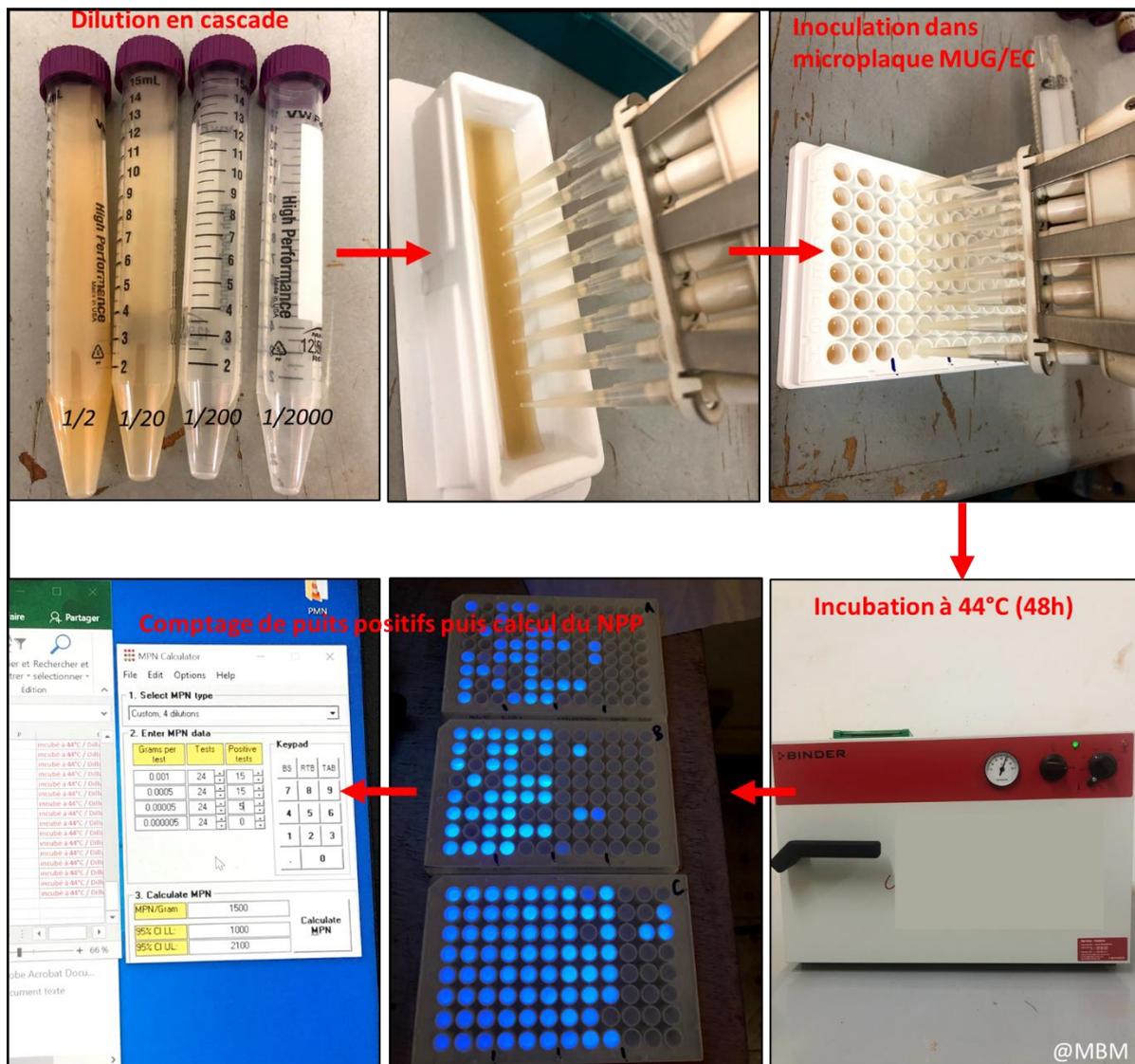


Figure 3. 5 : Etapes de dénombrement d'*E. coli* dans les échantillons d'eau.

### **1.5 Détermination de la concentration en matières en suspension**

Il existe différentes méthodes pour déterminer la concentration en MES qui peuvent être regroupées en deux grands ensembles : les méthodes directes et indirectes. Les méthodes directes consistent à effectuer un échantillonnage du cours d'eau grâce à des échantillonneurs diverses (échantillonneur automatique, préleveur manuel en berge ou depuis des plateformes, etc). Les paramètres (concentration en MES, granulométrie, nature de MES) sont alors analysés sur l'échantillon grâce à un sous-échantillonnage homogène et représentatif. La mesure de la concentration en MES se fait suivant plusieurs méthodes dont la plus courante consiste à isoler la fraction solide de la partie liquide du sous-échantillon avec un filtre en fibre de verre. Le choix du type de prélèvement et de la méthode de séparation des phases sont conditionnées par les caractéristiques hydrologiques du cours d'eau, les moyens humains et matériel de déploiement disponibles mais aussi l'objectif de l'étude. Le résultat obtenu est une concentration massique en MES du sous-échantillon. Des répliques peuvent être réalisés afin de vérifier la cohérence du sous-échantillonnage et la précision du protocole d'analyse (**Versini, 2015**).

Les méthodes indirectes visent à supprimer l'étape de l'échantillonnage et à déterminer la concentration en MES de l'eau grâce à un paramètre pouvant être lié à la valeur de cette concentration. Les méthodes optiques font parties des méthodes indirectes de détermination de la concentration en MES. Elles consistent à mesurer la turbidité des eaux grâce à la rétrodiffusion ou la transmission de la lumière, dans le visible ou l'infrarouge, dans une colonne d'eau (**Foster et al., 1992**). Le disque de Secchi est un exemple d'outil simple d'utilisation, peu coûteux et peu encombrant utilisé pour la détermination de la transparence d'une colonne d'eau. Les méthodes acoustiques pour leur part se basent sur la rétrodiffusion du son émis par les appareils de mesures pour déterminer la concentration en MES, mais aussi la taille caractéristique des grains (**Dinehart and Burau, 2005 ; Thorne et al., 1993**). Les techniques

par télédétection peuvent également être utilisées en mesurant la réflexion de la lumière par la surface de l'eau (Baban 1995 ; Gomez et al., 1995 ; Nellis et al., 1998).

Les méthodes de détermination de la concentration en MES présentent toutes des avantages et des limites (tableau 3. 3). Les étapes de calibration et de validation des méthodes indirectes se font toujours suivant les méthodes directes (Wren et al., 2000). La mesure par échantillonnage doit donc être rigoureusement réalisée pour permettre une meilleure validation.

Tableau 3. 3 : Techniques de détermination de la concentration en matières en suspension (MES) avec leur avantages et inconvénients ainsi que leur principe de fonctionnement (Wren et al., 2000).

Techniques	Principe d'application	Avantages	Inconvénients
Echantillonnages par bouteille	Echantillonnage d'eau du cours d'eau par prélèvement isocinétique puis analyse au laboratoire	Détermination de la concentration en MES, la distribution en taille, les autres méthodes sont étalonnées suivant cette technique	Faible résolution temporelle, perturbation du flux, nécessite du personnel pour les analyses en laboratoire
Echantillonnages par pompage	Echantillonnage d'eau du cours d'eau par pompage puis analyse au laboratoire	Méthode validée, permet de déterminer la concentration en MES, la distribution en taille et autres analyses	Faible résolution temporelle, technique intrusive et l'échantillonnage n'est généralement pas isocinétique
Télédétection	Mesure par télédétection de la lumière réfléchiée et diffusée par la masse d'eau	Bonne résolution spatio-temporelle	Forte dépendance à la taille des particules, faibles applicabilités à certains environnements fluviaux (résolution spatiale pas assez fine)
Faisceau focalisé	Mesure du temps de réflexion du rayon laser incident sur les particules en suspension.	Large plage de concentration mesurée, pas de dépendance à la taille des particules.	Technique intrusive, mesures ponctuelles.
Acoustiques	Détermination de la concentration en MES et la distribution en taille par rétrodiffusion du son par les sédiments.	Bonne résolution spatio-temporelle, mesure sur une large gamme verticale.	Difficultés à traduire la rétrodiffusion du signal acoustique, atténuation du signal en présence de fortes concentrations.
Diffraction laser	Mesure de l'angle de diffraction du laser incident sur les particules en suspension.	Pas de dépendance à la taille des particules. Angle de diffraction grand si particule petite	Coûteuse, mesure ponctuelle.
Optiques	Mesure de la rétrodiffusion ou transmission de la lumière visible ou infrarouge à travers l'échantillon à mesurer.	Bonne résolution temporelle, déploiement et enregistrement des données à distance.	Forte dépendance à la taille des particules, détérioration de l'instrument avec le temps, intrusif dans le cours d'eau.
Nucléaire	Mesure de la rétrodiffusion ou transmission des rayons gamma ou X par l'échantillon d'eau à analyser.	Large plage de concentration et de taille des particules.	Mesure ponctuelle, désintégration des sources radioactives, intrusive dans le cours d'eau.

Dans le cadre des travaux de cette thèse la concentration en MES a été déterminée par filtration d'un sous échantillon et grâce à la mesure par télédétection de la couleur des eaux (uniquement au niveau du fleuve Niger). Pour ce cas les deux méthodes ont été complémentaires, en effet, la première utilisée classiquement, a permis d'obtenir directement la concentration, alors que la deuxième, calibrée d'après la précédente, a permis d'améliorer la résolution temporelle du suivi et d'apporter une interpolation spatiale très intéressante pour les objectifs de ce travail.

## 1.6 Détermination de la concentration en MES des eaux de surfaces de Niamey

### 1.6.1 Techniques directes de mesure de la concentration en MES : Méthode de mesure par filtration

Les concentrations en MES ont été déterminées suivant la méthode : NF EN 872 / T90-105 (AFNOR, 2005). C'est une méthode conventionnelle utilisée pour le dosage des MES dans les eaux brutes, les eaux usées et effluents (figure 3. 6).

Méthode	Gamme de mesure	Préparation de l'échantillon	Séparation	Séchage	Pesée
APHA 2540 D	Filtration jusqu'à 20 g/L	 Agitation magnétique et prélèvement à la pipette		 105 °C	
EPA 160.2 NF EN 872 ISO 4365 (B)	Filtration 4mg/L à 20g/L Min. 2mg sur le filtre Pas de gamme	 Agitation manuelle et versement rapide		 105 °C	
ISO 4365 (A) ASTM D3977 (A)	Fortes concentrations Fortes concentrations, particules grossières	Mesure de volume ou de masse, puis Evaporation complète de l'échantillon		 105 °C	
ASTM D3977 (B)	Moins de 10 g/L de sable et moins de 200 mg/L d'argiles	Filtration de l'échantillon complet		 105 °C	
ASTM D3977 (C)	Pas de gamme	 Tamisage humide à 63 µm	Séchage direct du refus à 63 µm puis filtration du passant	 105 °C	 * 2
NF T90 105-2	Relais de la norme NF EN 872 en cas de colmatage du filtre	 Centrifugation de l'échantillon		 105 °C	
ISO 4365 (C)	Pas de gamme, fortes concentrations	Comparaison de densité à température maîtrisée		Lecture directe et calcul de la concentration	

Figure 3. 6 : Représentation des protocoles de mesure normalisés des concentrations massiques en MES (Dramais et al., 2018).

Les phases solide et liquide de l'échantillon d'eau sont séparées avec une pompe à vide par filtration à l'aide d'un filtre en fibre de verre (**figure 3. 7**). Les filtres utilisés ont une porosité de  $0,7\ \mu\text{m}$  et  $0,2\ \mu\text{m}$ . Ces filtres sont, préalablement à la filtration, chauffés à  $105^\circ\text{C}$  pendant 1 heure pour éliminer l'humidité, puis tarés avec une balance de précision ( $0,0001\ \text{g}$ ). Après la filtration (**figure 3. 8**) les filtres avec sédiment sont également chauffés à la même température avant d'être pesés. La concentration est calculée grâce au volume d'eau filtré, la masse de filtre à vide et celle du filtre avec les sédiments (Eq. 1). Par ailleurs, les filtres avec sédiment peuvent être calcinés à environ  $500^\circ\text{C}$  afin d'éliminer la fraction organique des MES et ainsi discriminer par différence les fractions organiques et inorganiques. Cette analyse n'a pas été faite dans le cadre ce travail.

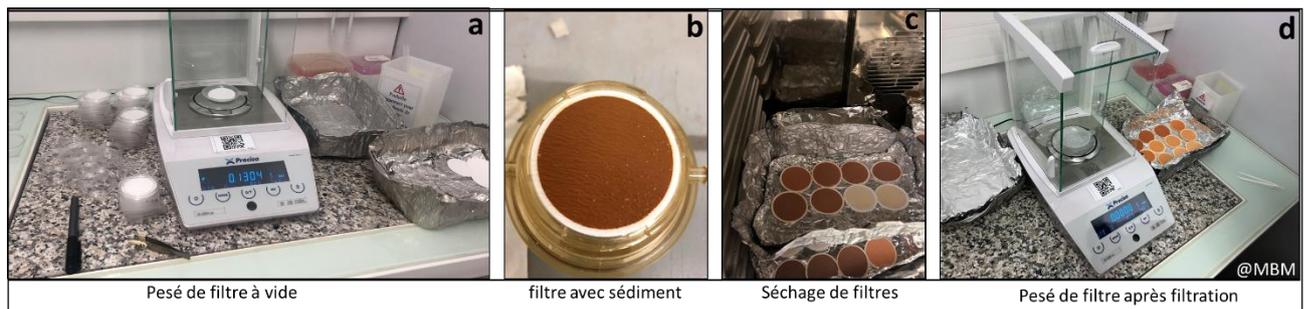


Figure 3. 7 : Détermination de concentration en MES : a) pesée de filtre à vide avant utilisation, b) filtre après sédiment (échantillon de crue rouge très chargé), c) séchage de filtres à l'étuve ;d) pesée de filtre après filtration et chauffage à  $105^\circ\text{C}$  pendant 1h.

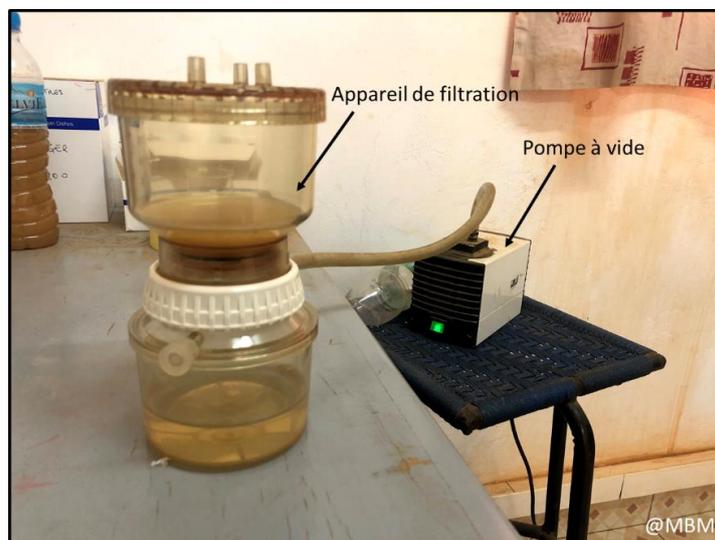


Figure 3. 8 : Filtration d'échantillon d'eau au labo « sol et érosion » de l'IRD de Niamey.

$$\text{MES} = (\text{Mfs} - \text{Mf}) / \text{Ve} \quad (\text{Eq. 1})$$

MES représente la concentration en MES de l'échantillon ; Mfs est la masse du filtre avec le sédiment ; Mf la masse initiale du filtre (sans sédiment) et Ve le volume d'eau filtré.

Les mesures directes de la concentration en MES des eaux de surface de Niamey ont été réalisées entre le 08 juillet 2018 et le 12 août 2021. Le **tableau 3. 4** récapitule les dates et la fréquence des mesures en fonction du site. On peut voir que le site de mesures à Saga a changé entre la campagne de 2019 et celles de 2020 & 2021. Cela se justifie par l'intérêt que représente la rive gauche du fleuve Niger à Niamey comparée à la rive droite, quant à la mesure de la qualité des eaux.

*Tableau 3. 4 : Récapitulatif des dates de mesures de la concentration en matières en suspension et fréquence selon le site de mesure.*

Date	Fréquence des mesures	Site de mesures
08/07 au 18/12/2018	Hebdomadaire	Goudel
18/12/2020 au 05/06/2019	Mensuelle	Goudel
05/06 au 30/06/2019	Hebdomadaire	Goudel
01/07 au 15/08/2019	Journalière	Goudel / rive droite Saga
20/08 au 30/10/2019	Hebdomadaire	Goudel
27/11/2019 au 27/01/2020	Mensuelle	Goudel
20/04 au 30/06/2020	Deux fois par semaine (lundi & jeudi)	Goudel / rive gauche de Saga / Tondi Koirey
1 <sup>er</sup> /07 au 16/08/2020	Bijournalière	Goudel / Rive gauche de Saga / Tondi Koirey
23/09 au 07/10/2020	Hebdomadaire	Goudel
21/10/2020 au 29/01/2021	Mensuelle	Goudel
15/03 au 12/08/2021	Deux fois par semaine (lundi & jeudi)	Goudel / rive gauche de Saga
17/03 au 11/08/2021	Hebdomadaire	Bangou Bi et Bangou Kirey

Les mesures de la concentration en MES avec les filtres de 0,2 µm de porosité ont uniquement été réalisées au niveau des sites de Saga et Goudel entre le 1<sup>er</sup> avril et le 12 août 2021 avec une fréquence bi-hebdomadaire. Ces mesures en parallèles ont été réalisées notamment pour vérifier l'efficacité des filtres à 0,7 µm de porosité dans la séparation des phases liquide et solide des

eaux échantillonnées. Il est à noter également que la concentration en matières en suspension et la teneur en *E. coli* (numéro section) du fleuve et des lacs, ont fait l'objet de mesures intensives à la suite des évènements pluvieux du : 04 avril ; 14, 24 et 27 juin 2020 ; 15, 19 et 21 juin et 05 juillet 2021. Les mesures intensives ont consisté à effectuer un échantillonnage journalier pendant cinq jours après l'évènement pluvieux. Cela a permis de suivre l'impact des précipitations sur les différents paramètres mesurés.

### **1.6.2 Techniques indirectes de mesure de la concentration en MES : radiométrie optique**

Les données de radiométrie optique assurent un suivi des matières en suspension proches de la surface d'une colonne d'eau grâce à la mesure de la réflectance de cette dernière. La réflectance, pour rappel, représente le rapport entre l'énergie réfléchie par une surface et l'énergie incidente reçue par cette dernière, pour une longueur d'onde donnée du spectre de la lumière. Lorsque le soleil, principale source d'énergie en télédétection passive, éclaire une surface, différentes interactions se produisent (réflexion spéculaire/diffuse, absorption ...) entre le rayonnement et la surface illuminée (**figure 3. 9**). En fonction des propriétés et caractéristiques de la surface, une partie du rayonnement est réfléchi vers les capteurs satellitaires. C'est ce rayonnement qui est enregistré par les satellites de façon à distinguer différents objets par leur signature spectrale (**figure 3. 10**), mais aussi différents états dudit objet. Dépourvue d'éléments, l'eau possède une faible réflectance dans toutes les longueurs d'onde. En revanche, lorsqu'elle contient des éléments (dissout ou en suspension) sa réflectance augmente selon la nature du contenu. Ainsi, plus une eau est turbide plus sa réflectance est importante et le pic de réflectance se déplace vers des longueurs d'onde plus grandes (**figure 3. 11a et b**).

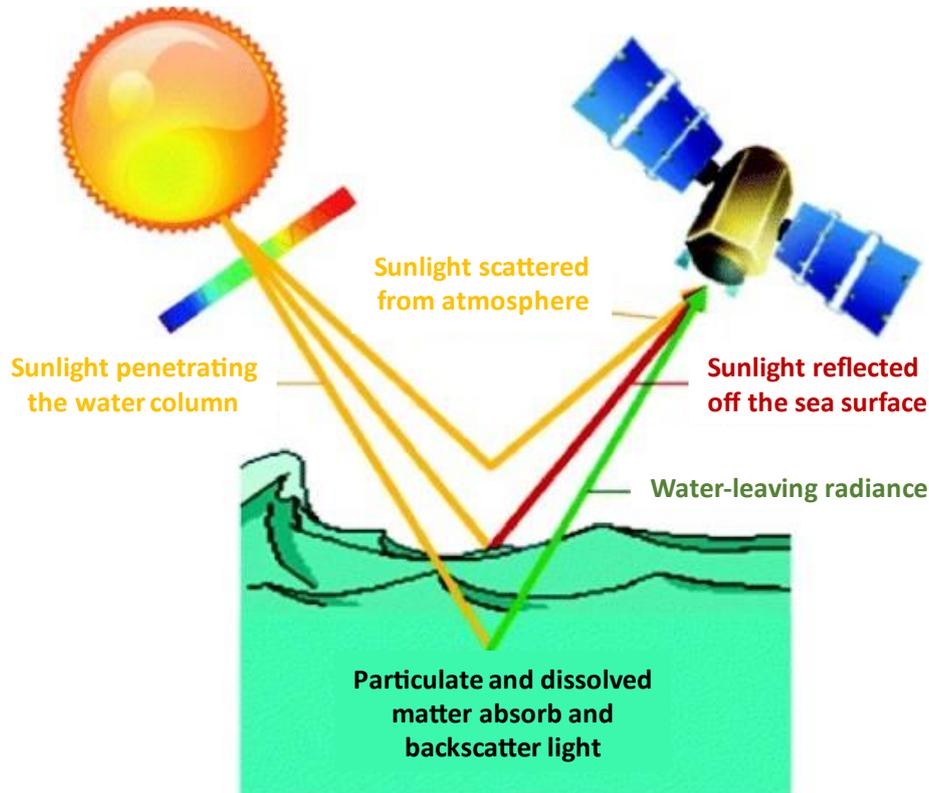


Figure 3. 9 : Mesure de couleur de l'océan par satellite. La mesure de la radiance comporte la lumière diffusée par l'atmosphère qui est éliminée après corrections pour ne laisser que celle réfléchie par la surface de la mer, rétrodiffusée vers le satellite (Dierssen et Randolph, 2013).

Les techniques de télédétection pour les eaux continentales ont largement été développées au cours des 20 dernières années afin de fournir des estimations de la variabilité spatio-temporelle de la concentration en MES. Ces techniques ont été utilisées avec succès pour évaluer la quantité totale de matières en suspension et le transport sédimentaire dans divers cours d'eau (Martinez et al., 2009 ; Nechad et al., 2010 ; Petus et al., 2010 ; Pinet et al., 2017). La plupart des études traitant de la dynamique de la concentration en MES dans les cours d'eau utilisent des données provenant de capteurs à moyenne résolution tels que MERIS (MEdium Resolution Imaging Spectrometer) et MODIS (Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer), car ils ont une fréquence temporelle élevée qui est nécessaire pour mesurer correctement la dynamique rapide des cours d'eau. Cependant, leur résolution spatiale grossière (allant de 250 m dans le visible et le proche infrarouge (NIR) à 500 km dans le SWIR pour MODIS) n'est pas suffisante

pour le suivi précis de la concentration en MES du fleuve Niger, en particulier pendant la période de basses eaux lorsque les bras du fleuve sont plus étroits. Ce n'est que récemment que des données satellitaires à haute résolution ont été disponibles à une fréquence temporelle permettant le suivi de la dynamique de la concentration en MES des cours d'eau. Le capteur MultiSpectral (MSI), à bord des satellites Sentinel-2, fournissent des données tous les 5 jours à une résolution spatiale de 10 m dans les bandes visible, et proche infrarouge et de 20 m dans les bandes SWIR. Ces données se sont avérées efficaces pour suivre la dynamique de la concentration en MES dans différents plans d'eau (**Caballero et al., 2018 ; Liu et al., 2017 ; Pahlevan et al., 2017**). Plusieurs équations d'inversion ont été développées pour déduire les concentrations en MES à partir des mesures radiométriques par satellite sur des eaux turbides en utilisant des approches théoriques (**Nechad et al., 2010**), semi-empiriques (**Shen et al., 2010**) et empiriques (**Doxaran et al., 2002 ; Robert et al., 2017 ; Caballero et al., 2018 ; Li et al., 2019 ; Renosh et al., 2020**). L'utilisation de longueurs d'onde dans le domaine du proche infrarouge, combinée avec celles du domaine du visible (**Li et al., 2019**) ou seules (**Robert et al., 2017**), s'est avérée utile pour éviter la saturation pour les valeurs élevées de concentration en MES. Les algorithmes d'inversion (**Shen et al., 2010 ; Han et al., 2016 ; Novoa et al., 2017 ; Caballero et al., 2018 ; Renosh et al., 2020**) ont permis de traiter une large gamme de valeurs de concentration en MES.

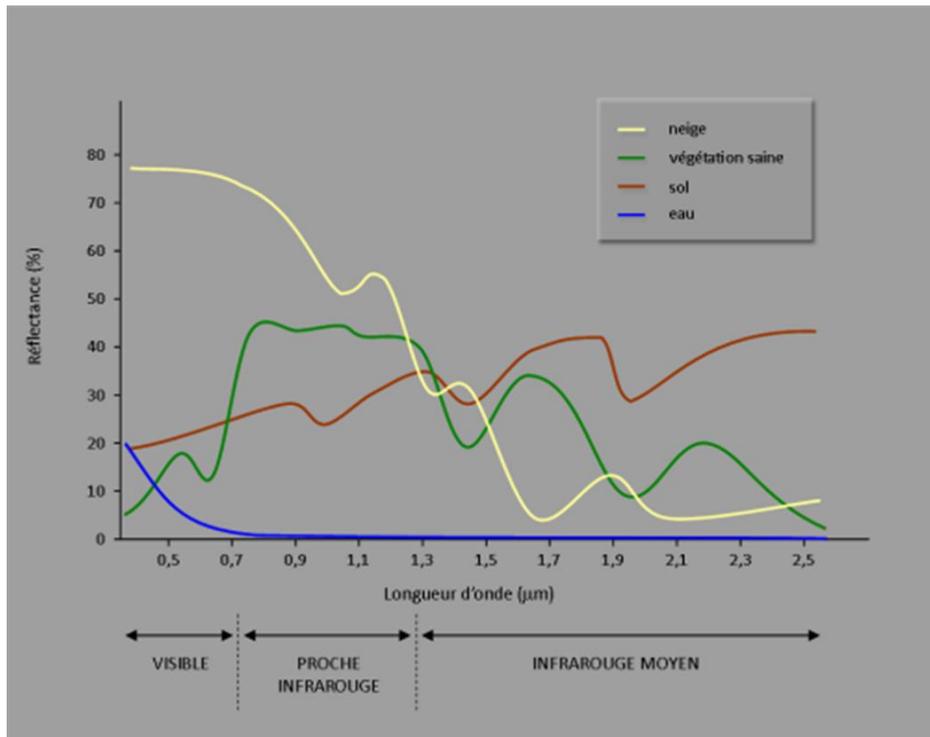


Figure 3. 10 : Signatures spectrales de surfaces naturelles dans le domaine du visible, proche infrarouge et de l'infrarouge moyen. (<https://e-cours.univ-paris1.fr/modules/uvcal/html/msg/index.html>).

Peu d'études ont porté sur la région sahélienne, car elle représente un réel défi pour la télédétection optique. Une charge atmosphérique très élevée en aérosols (poussières minérales et combustion de la biomasse) et une teneur en vapeur d'eau très variable rendent les corrections atmosphériques difficiles. De plus, les valeurs très élevées de réflectance des eaux ouest-africaines remettent en question les équations d'inversion utilisées dans d'autres régions. Des résultats encourageants ont cependant été obtenus sur quelques lacs en utilisant des données LANDSAT (Kaba et al., 2014 ; Robert et al., 2016 ; Robert et al., 2017) et Sentinel-2 (Robert et al., 2021) mais une validation, notamment pour les cours d'eau, est nécessaire.

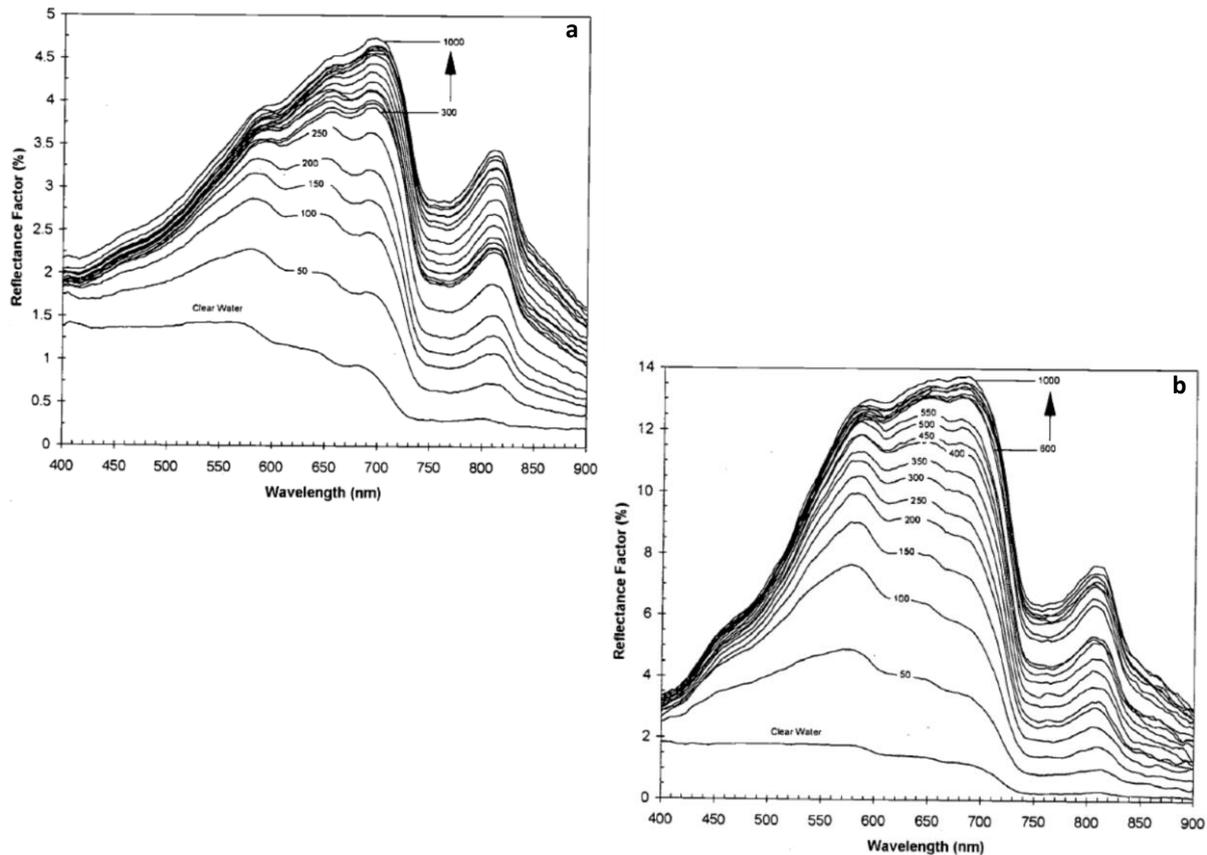


Figure 3. 11 : Réflectance pour des eaux chargées d'une suspension (mg/l) : (a) de sol argileux et (b) de sol limoneux. (Lodhi et al., 1997).

### 1.6.2.1 Estimation des MES des eaux du Niger par satellite

Les données radiométriques issues des satellites Sentinel-2A et 2B, lancés respectivement en 2015 et 2017 ont été utilisées dans le cadre de cette thèse. Placés sur la même orbite, les deux satellites assurent un temps de retour d'une fréquence de 5 jours à l'équateur. Ils embarquent à leurs bords un instrument de mesure multi spectral (MSI) (Drusch et al., 2012 in Mironczuk et Hościlo, 2017) constitué de (figure 3. 12) :

- Trois bandes dans le visible et le proche infrarouge à 10 m de résolution spatiale : B2 (490 nm), B3 (560 nm), B4 (665 nm) et B8 (842 nm) ;
- Six bandes dans le domaine spectrale du red-edge et moyen-infrarouge à 20 m de résolution spatiale : B5 (705 nm), B6 (740 nm), B7 (783 nm), B8a (865 nm), B11 (1610 nm) et B12 (2190 nm) ;

- Et trois bandes principalement axées sur la détection des nuages et la correction atmosphérique à 60 m de résolution spatiale : B1 (443 nm), B9 (940 nm) et B10 (1375 nm).

Pour ce travail, nous avons utilisé les trois bandes dans le visibles B2, B3 et B4, et la bande B8 dans le proche infrarouge. Les produits de réflectance de surface Sentinel-2 MSI (niveau 2-A) sur la zone d'étude sont mis à disposition par le centre de données terrestres THEIA ([www.theia-land.fr](http://www.theia-land.fr)). Les images sont corrigées des effets atmosphériques à l'aide de la chaîne de traitement MACCS-ATCOR Joint Algorithm (MAJA) (Hagolle et al., 2015). La chaîne de traitement (Hagolle et al., 2017) analyse les séries temporelles d'images de niveau 1 C et les données auxiliaires afin de détecter les nuages et les ombres de nuages, d'estimer l'épaisseur optique classes atmosphériques (y compris les aérosols), les effets de contiguïté (notamment la diffusion atmosphérique et les réflexions multiples entre la surface et l'atmosphère), et d'appliquer une correction de terrain basée sur la topographie (**figure 3.13**). Les corrections atmosphériques sont effectuées pour les pixels classés comme terre et extrapolées pour les pixels classés comme eau.

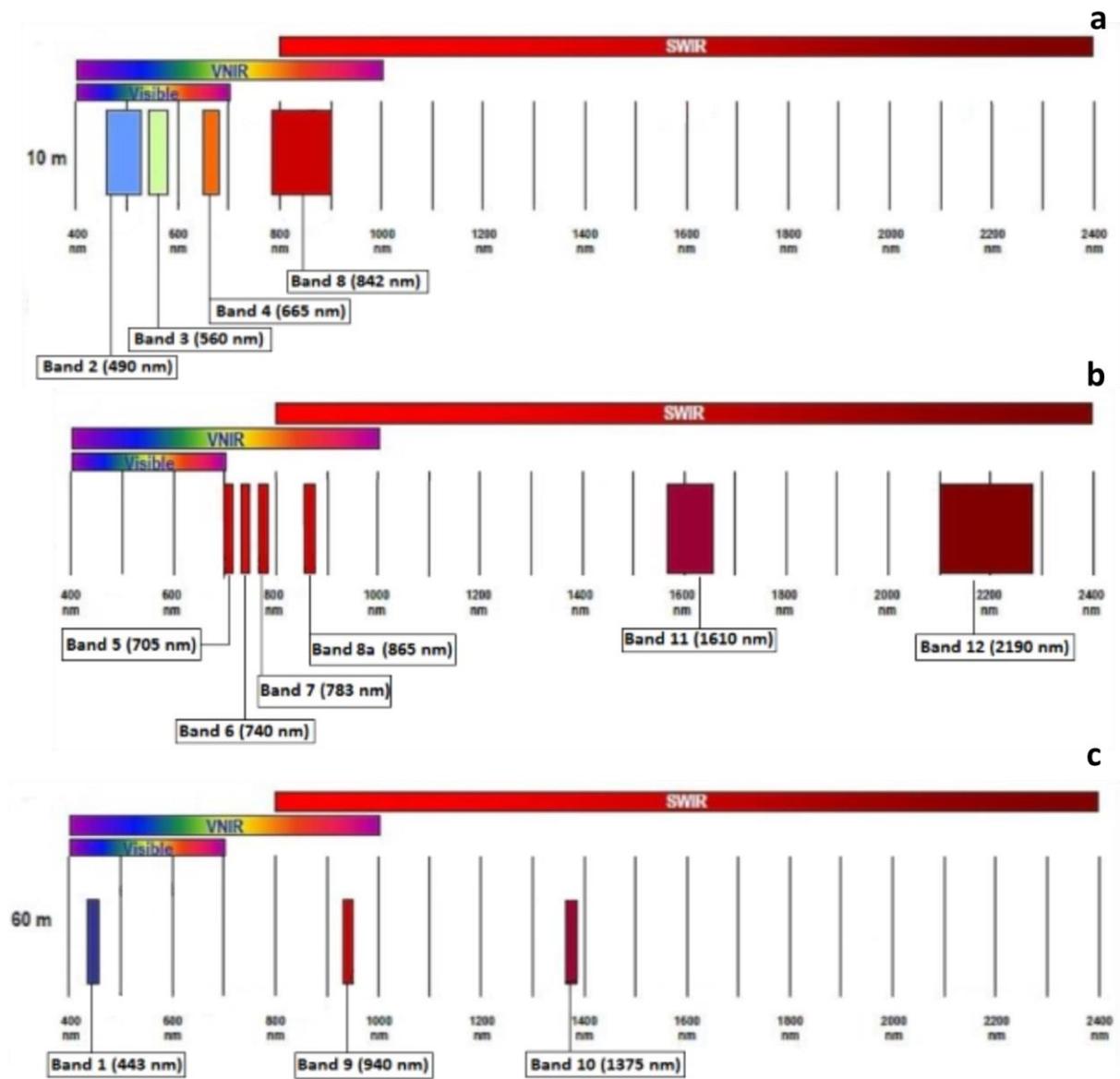


Figure 3. 12 : Différentes bandes embarquées par l'outil multispectrale de sentinel-2 en fonction de la résolution spatiale. a) bandes à 10 m, b) 20 m, c) et 60 m. ([https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user\\_guides/sentinel-2-msi/resolutions/spatial](https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user_guides/sentinel-2-msi/resolutions/spatial)).

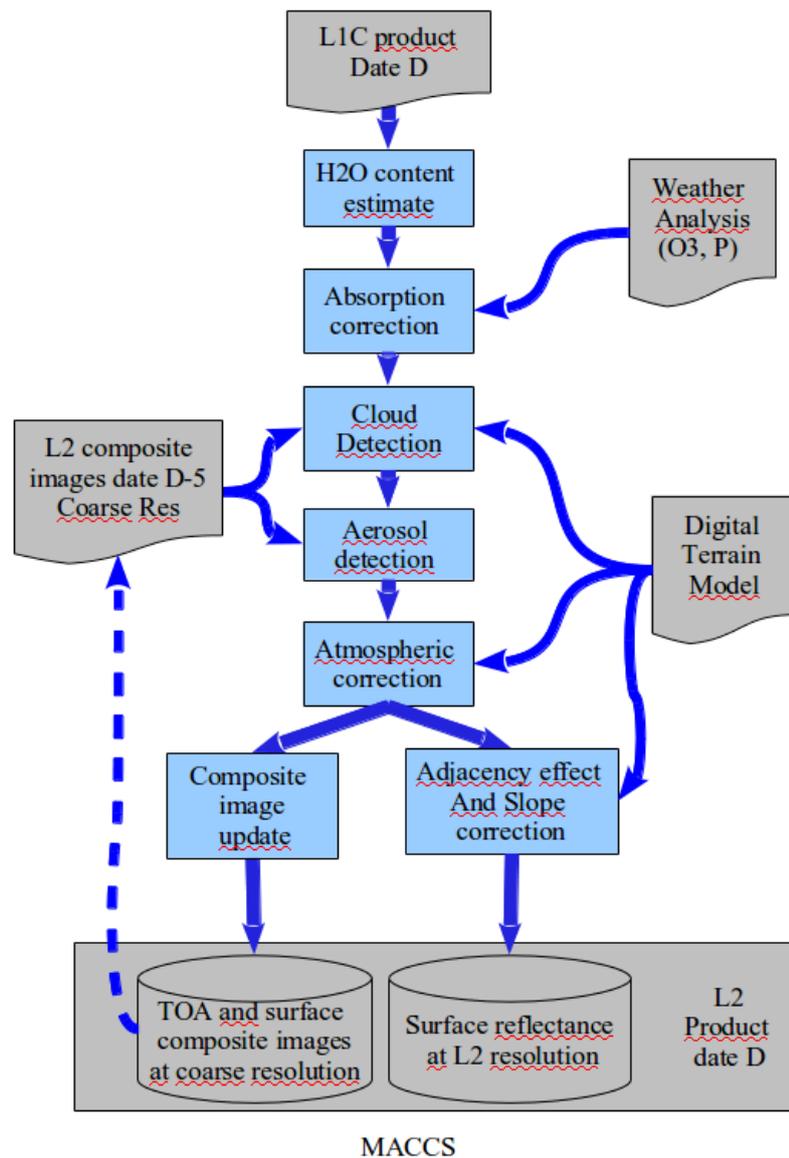


Figure 3. 13 : Etapes de correction d’images satellite par la chaîne de traitement MACCS-ATCOR Joint Algorithm MAJA (<https://labo.obs-mip.fr/multitemp/maccs-how-it-works/>).

Les données Sentinel-2 ont été extraites sur les pixels correspondants à la position de la station de pompage de Goudel (coïncidant avec l’aire des mesures de terrain) et d’Ansongo (Latitude : 15.66443, Longitude : 0.499783) pour la période de mai 2018 à août 2021. Seules les valeurs obtenues à partir d’images dépourvues de nuages ont été considérées dans le cadre de ce travail.

Les concentrations en MES du fleuve sont uniquement déterminées à partir de pixels avec un ciel dégagé. Les pixels, non encore masqués par la chaîne de traitement MAJA, mais affectés

par les aérosols, les nuages ou encore les ombres des nuages, ont été retenus comme pixels d'eau uniquement si leur MNDWI (Modified Normalized Difference Water Index) est inférieur à 0,2 (**Robert et al., 2017**). Le MNDWI est la différence entre la bande dans le vert et la bande dans le SWIR (Short-wave infrared) divisée par leur somme. Afin d'éviter les nuages résiduels non masqués, un seuil supplémentaire est ajouté sur les réflectances dans le vert. Les valeurs inférieures à 0,4 ont été retenues.

Les données de réflectance obtenues par Sentinel-2, au niveau de la station de pompage de Goudel et du site d'Ansongo, ont été moyennées sur un polygone carré situé à trois pixels du rivage, afin d'éviter d'éventuels effets de proximité de la rive. Les mesures de la concentration en MES, effectuées par filtration, ont été combinées à un jour de différence (jour précédent et jour suivant) avec la mesure du satellite afin d'augmenter le nombre de correspondances. Dix dates, au total, dans les séries utilisées ont permis d'établir la relation de détermination de la concentration en MES du fleuve Niger à partir de Sentinel-2.

#### **1.6.2.2 Estimation des MES par radiométrie in-situ**

Un radiomètre SKYE (**SKYE Instruments Ltd, Wales, UK**) a été installé au niveau de l'exhaure de la station de Goudel (**Moussa et al., 2022**). Le radiomètre fonctionne avec deux capteurs (SKR1840D/I Two channel Sensor) qui mesurent les rayonnements sur la même aire d'extraction que les données Sentinel-2 et dans les mêmes bandes du capteur multispectral dans le rouge (centré autour de 665,4 nm) et le proche infrarouge (centré autour de 829,0 nm). Le premier capteur, pointé vers le haut et disposé perpendiculairement sur un plan horizontal, mesure le rayonnement hémisphérique incident (intégration du rayonnement hémisphérique avec fonction Cosinus). Le second, pointé vers le sud-ouest, observe les eaux du fleuve avec un angle de 45° (**figure 3. 14**) et mesure le rayonnement directionnel provenant de la surface des eaux. Ce dernier se trouve à 2,3 m de hauteur au-dessus de la plateforme de la station de pompage de Goudel. La position du radiomètre par rapport à la surface de l'eau varie en

fonction de l'épaisseur de la lame d'eau du fleuve. Cette position varie entre 2,3 en période de crue et 5 m en période d'étiage.

Les mesures ont été réalisées de manière continue toutes les 30 minutes et enregistrées dans un datahog2+ (SKYE) entre le 08 juillet 2018 et le 25 septembre 2021. Les tournées de collectes de données et maintenances sont organisées chaque mois. Des lacunes dans la série de mesures, dues à des problèmes d'alimentation électrique, ont été observées entre le 27 et le 29 octobre 2019, ainsi que le 31 octobre 2019, le 02 décembre 2019, 28 juillet 2020 et le 06 octobre 2020. Ces lacunes ont concerné 25% des données dans la période de mesure. Les données du radiomètre utilisées dans ce travail couvrent la période du 08 juillet 2018 au 30 août 2021.

La réflectance de la surface des eaux ( $\rho$ ) se définit comme étant la fraction du rayonnement solaire entrant qui est réfléchi par la surface des eaux du fleuve pour des incidences directionnelles, coniques et hémisphériques. Elle a été calculée à partir du rapport entre les rayonnements réfléchis et incident dans chaque bande, multiplié par un facteur  $\pi$  pour donner une réflectance de surface ( $S_r$ ) sans dimension (Eq. 2).

$$\rho = \pi * R_{rs} = \pi * L / E_d \quad (\text{Eq. 2})$$

Où  $R_{rs}$  est la réflectance de l'eau ( $\text{sr}^{-1}$ ),  $L$  est le rayonnement provenant du plan d'eau ( $\mu\text{mol sr}^{-1} \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) et  $E_d$  le rayonnement incident ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) mesuré par le capteur hémisphérique pointé vers le haut.

Il est à noter que le rayonnement total réfléchi comprend le rayonnement émanant du cours d'eau et la réflexion spéculaire de la surface de l'eau causée par le soleil (sunlint) et le ciel (skylint).

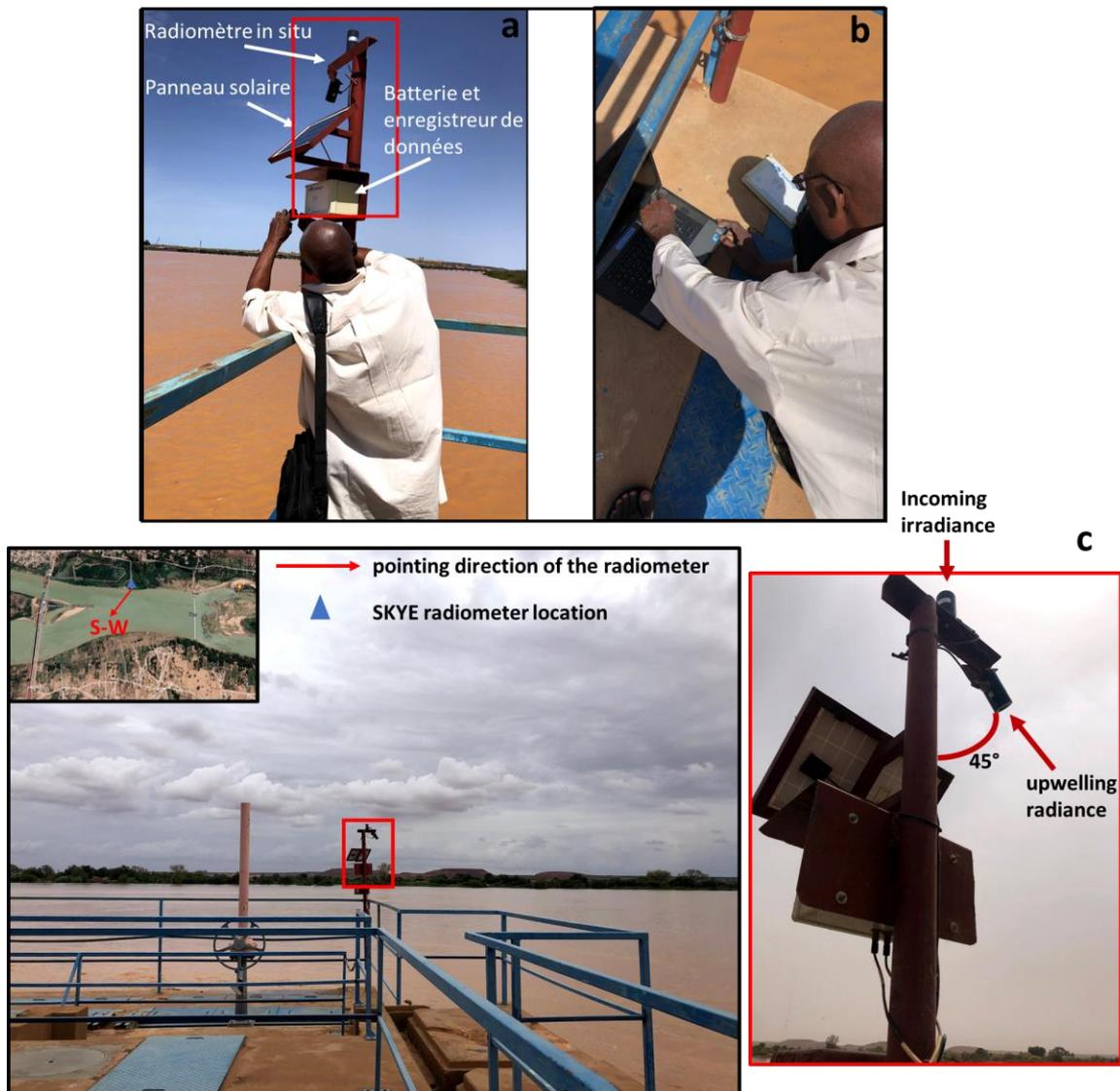


Figure 3. 14 : Radiomètre SKYE à la station de Goudel mesurant la couleur de l'eau en continu a & b) Collecte de données et maintenance du dispositif (20 juillet 2020) ; c) composantes et orientation du radiomètre SKYE (Moussa et al., 2022 modifié).

### 1.6.3 Détermination de la nature des MES (MET & EDXS, MEB, granulométrie)

Des analyses ont été réalisées sur des échantillons d'eau conditionnés afin de caractériser la nature minéralogique et la taille granulométrique des matières en suspension. Les dates et sites concernés par la caractérisation des MES des eaux sont renseignées dans le **tableau 3. 5**.

Tableau 3. 5 : Dates de prélèvement d'échantillon d'eau des différents sites pour lesquelles la nature et la granulométrie des eaux des cours et plans d'eau de Niamey ont été analysés.

	<b>Granulométrie</b>	<b>MET</b>	<b>MEB</b>
<b>Tondi koirey</b>	/	-16/08/2020	/
<b>Goudel</b>	-06/10 et 24/10/2017 -03/07, 08/07 et 09/07/2018 -06/08/2019	-13/07, 30/07 et 16/08/2020 -22/03 et 13/05/2021	-22/03 et 24/06/2021
<b>Saga</b>	-06/08/2019	-16/08/2020 -22/03 et 13/05/2021	-22/03 et 24/06/2021
<b>Bangou Bi</b>	-25/08/2019	-13/07/2020 -01/04 et 12/05/2021	-01/04/2021
<b>Bangou Kirey</b>	-25/08/2019	-13/07/2020 -01/04 et 12/05/2021	-01/04/2021

### 1.6.3.1 Granulométrie des matières en suspension

Les analyses de la granulométrie des matières en suspension ont été effectuées avec un granulomètre (**figure 3. 15**) laser Partica (Partica LA950-V2, **Horiba, 2022**). Le granulomètre laser Partica détermine la taille des particules sur la base du principe de la diffraction laser selon lequel une particule diffusera la lumière avec un angle déterminé par la taille de cette dernière. Ainsi une particule de petite taille diffusera le rayon incident avec un angle important tandis qu'une particule plus grande le diffusera avec un angle plus faible (**Horiba, 2022**).

La méthode par diffraction laser est appropriée pour la détermination de la taille granulométrique dans un échantillon constitué de sédiments avec un large spectre de taille. Cette méthode permet une caractérisation de la taille de particules comprise entre 10 nm et 5mm. Le granulomètre laser Partica utilise deux sources lumineuses permettant une meilleure caractérisation du diamètre sphérique équivalent (**figure 3. 16**). L'utilisation de la source (LED bleue de 405 nm de longueur d'onde) montre une meilleure précision sur la taille comparée avec une détection faite uniquement avec un laser rouge de 650 nm sur des particules de 50 nm et 70 nm.

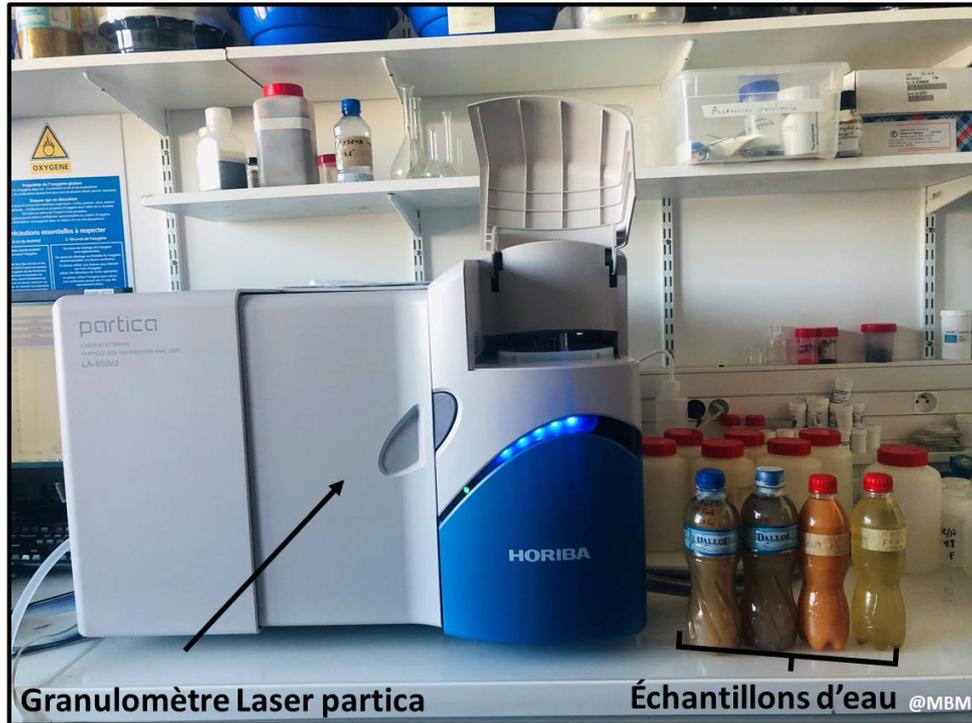


Figure 3. 15 : Séance d'analyse granulométrique au laboratoire LEFE à Toulouse.

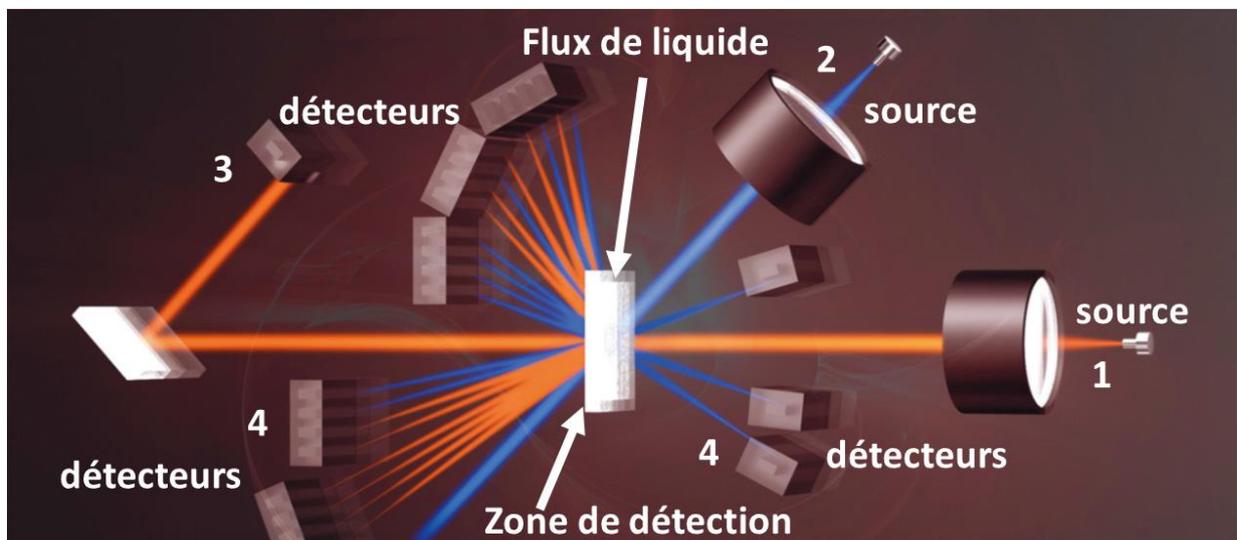


Figure 3. 16 : Schéma du dispositif optique du granulomètre Laser Partica LA950-V2. 1 : diode laser dans le rouge pour les particules  $> 500 \text{ nm}$  ; 2 : LED bleue pour les particules  $< 500 \text{ nm}$  ; 3 : détecteur pour les grosses particules ; 4 : détecteur à angle supérieur. ([http://www.horiba.com/fileadmin/uploads/Scientific/Documents/PSA/BRO\\_LA960\\_FR\\_Aout\\_2016\\_LR.pdf](http://www.horiba.com/fileadmin/uploads/Scientific/Documents/PSA/BRO_LA960_FR_Aout_2016_LR.pdf)).

### 1.6.3.2 Morphologie et nature minéralogique des matières en suspension

#### 1.6.3.2.1 Microscope électronique à transmission et spectromètre

Les matières en suspension ont été observées au microscope électronique à transmission (MET) de type JEOL JEM 2100 F avec un voltage de fonctionnement de 200 kV et une résolution de 2,3 Å (CMOS Gatan RIO 16IS 4 K camera). Le MET est constitué d'un faisceau produisant des électrons qui seront accélérés et focalisés à l'aide de lentilles électromagnétiques/condenseurs vers un échantillon préalablement préparé. Le faisceau d'électrons traverse ainsi l'échantillon qui va le modifier selon sa forme et sa nature. L'échantillon imprime alors son image sur le faisceau qui est par la suite agrandie par d'autres lentilles et focalisée par un détecteur traduisant le signal en une image contrastée (**figure 3. 17**).

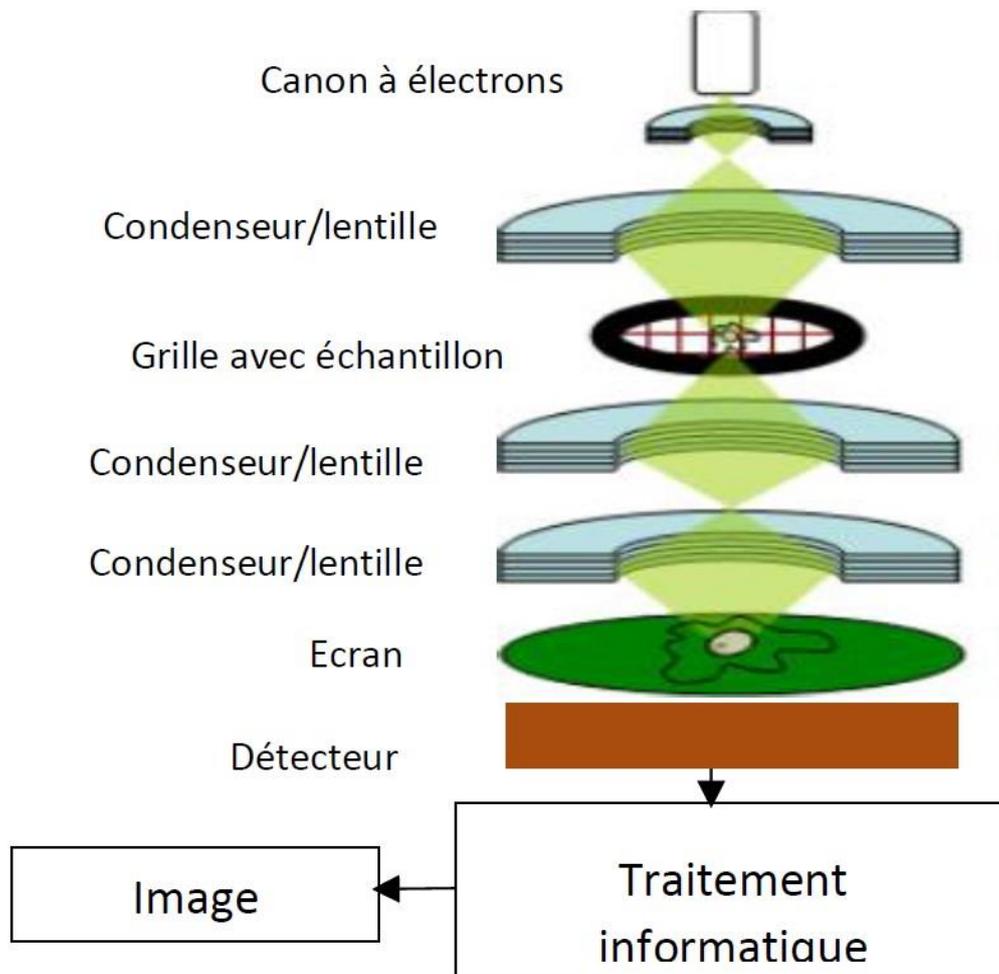


Figure 3. 17 : Principe de fonctionnement du microscope électronique à transmission (Lanje et al., 2014).

Afin de préparer les échantillons qui seront observés sous MET, les échantillons initiaux de 0,5 L d'eau ont été homogénéisés par agitation manuelle puis une goutte de 0,2  $\mu$ L a été prélevée. Cette goutte a été disposée sur une grille de cuivre revêtu de formvar (1 nm d'épaisseur) (**figure 3. 18**). La goutte est laissée 2 à 5 minutes pour que la fraction solide s'y dépose et le liquide est évacué à l'aide d'un papier filtre. La nature minéralogique de la fraction déposée est déterminée en parallèle par spectroscopie EDX Ultim Max TEM 80 mm<sup>2</sup> Windowless (Oxford Instruments) sur les grilles de MET.

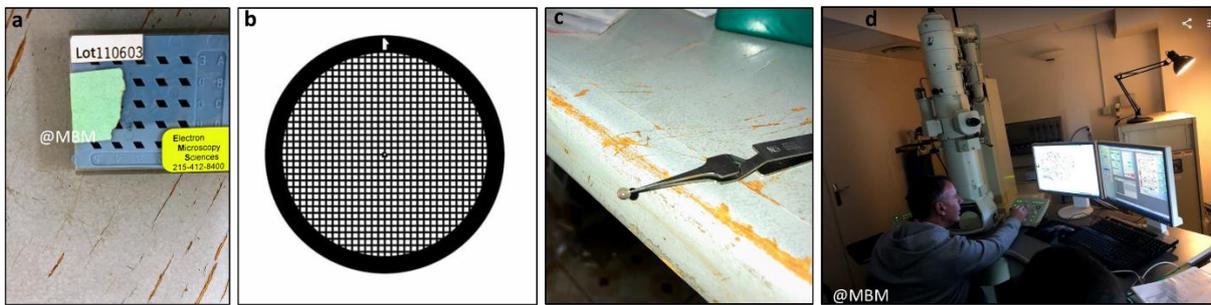


Figure 3. 18 : a) Boîte de grille pour le MET ; b) grille MET en cuivre ; c) décantation sur grille de la goutte échantillon ; d) séance d'observation d'échantillons du fleuve Niger sur la plateforme METI de Toulouse.

Certains échantillons subissent une fixation au Glutaraldéhyde avant l'observation sous MET. En effet le Glutaraldéhyde (C<sub>5</sub>H<sub>8</sub>O<sub>2</sub>) est utilisé pour la fixation des protéines en microscopie optique et électronique. Ceci permet l'observation des restes de bactéries dans leur habitat naturel.

#### 1.6.3.2.2 Microscope électronique à balayage

Les sédiments ont aussi été observés sous Microscope Électronique à Balayage (MEB) dans le cadre de la caractérisation de leur nature. Le MEB fonctionne grâce à la production, l'accélération et la condensation d'un faisceau d'électrons par des condenseurs (ou lentilles électromagnétiques) qui vont venir bombarder l'échantillon. Le produit (électrons & photons)

de l'interaction entre le faisceau d'électrons et l'échantillon est traité grâce à un détecteur qui traduit selon trois modes de détection le signal en image contrastée (**figure 3. 19**) :

- Dans le premier cas de figure, les électrons secondaires de faible énergie émis par l'échantillon bombardé vont être détectés. Ce mode permet de reconstruire la topographie de la surface de l'échantillon grâce à un balayage et une détection de la variation du nombre d'électrons diffusés. La méthode des électrons secondaires donne peu d'informations sur la composition des échantillons.
- Le deuxième mode permet de mesurer l'homogénéité chimique de l'échantillon car les électrons rétrodiffusés par l'échantillon vont rebondir de différentes manières selon le numéro atomique des éléments constitutifs de l'échantillon. Ainsi plus les atomes sont lourds plus ils réémettront d'électrons. Les zones formées d'atomes avec un numéro atomique élevé apparaîtront plus brillantes que les autres.
- Le faisceau d'électrons peut aussi ioniser les atomes de l'échantillon qui va par la suite émettre des rayons X dépendant de la composition élémentaire des différents éléments présents. La déduction de la nature chimique des composés présents se fait par balayage de l'échantillon et détection de l'énergie des rayons X émis.

Pour ce travail, les échantillons ont été soumis aux deux derniers modes de détection. Les échantillons analysés sous MEB se préparent également à partir d'échantillons initiaux d'eau étudiés. Ainsi un volume de 0,5  $\mu\text{L}$  d'échantillon est filtré à travers une membrane en polycarbonate de 0,2  $\mu\text{m}$  de porosité (**figure 3. 20**). Lorsque l'échantillon est trop chargé en MES ce dernier peut être dilué à 1/20 de sa concentration initiale.

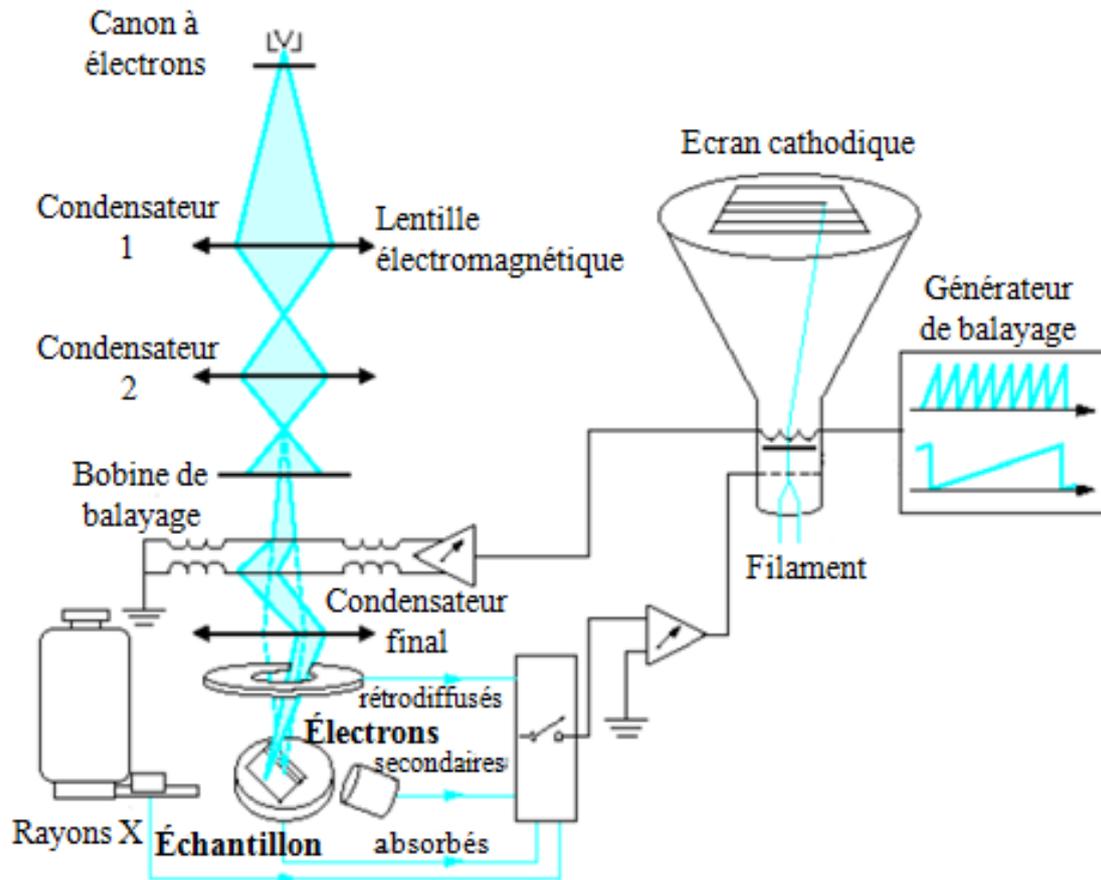


Figure 3. 19 : Principe de fonctionnement du MEB (Ruste, 2013 in Samson, 2015).

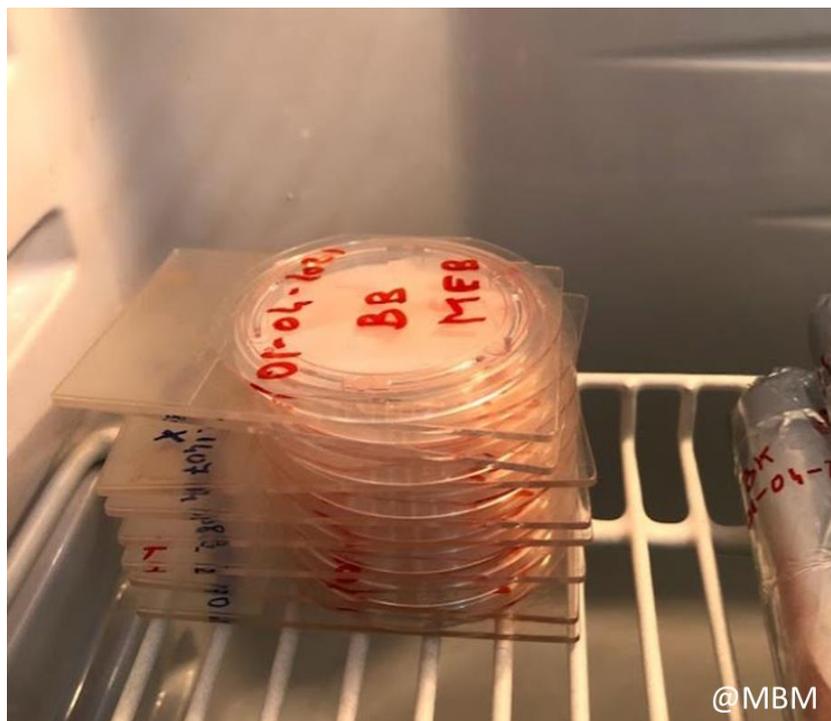


Figure 3. 20 : Membrane en polycarbonate avec sédiment avant observation sous MEB.

## Chapitre IV – Dynamique spatio-temporelle de la concentration en matières en suspension des eaux de surface dans la zone de Niamey

---

### 1.1 Concentration en MES du fleuve Niger à Niamey obtenue par filtration

Les concentrations en MES mesurées par filtration avec des filtres de 0,7  $\mu\text{m}$  de porosité ont varié entre 0,004 g/L (en basses eaux) et 1,922 g/L (en crue rouge) (**figure 4. 1a**) au niveau du site principal d'échantillonnage de Goudel. Les concentrations les plus faibles ont été observées au début de la saison sèche entre le 1<sup>er</sup> octobre 2018 et le 28 février 2019 (concentration moyenne = 0,0416 g/L et écart-type = 0,0324 g/L). Les plus fortes augmentations de concentration ont été enregistrées au début de la saison des pluies, à partir de juin, et les maximales, autour de 2 g/L, ont été atteintes en juillet. Les concentrations en MES du fleuve, des sites de Saga et Tondi koirey obtenues par filtration ont montré la même dynamique temporelle et des valeurs similaires avec les valeurs du site de Goudel (**figure 4. 1**). Les valeurs des trois sites ont également montré une covariance avec des coefficients de détermination très significatifs ainsi que des moyennes d'écart-type pour la station de Tondi Koirey et de Saga respectivement de 0,101 g/L et 0,091 g/L par rapport aux mesures à la station de Goudel (**figure 4. 1b**). Les faibles valeurs de concentration en MES pendant la saison sèche et les pics de la saison des pluies sont observés ainsi au niveau des trois stations. La comparaison entre les deux types de filtres utilisés n'a par ailleurs pas montré de différence significative entre les valeurs de concentrations en MES pour les dates communes de mesures (**figure 4. 1c**). En effet la moyenne des écarts-types entre concentration obtenues avec filtres à 0,7  $\mu\text{m}$  et 0,2  $\mu\text{m}$ , pour les sites de Goudel et Saga a été respectivement de 0,0231 g/L et 0,0172 g/L.

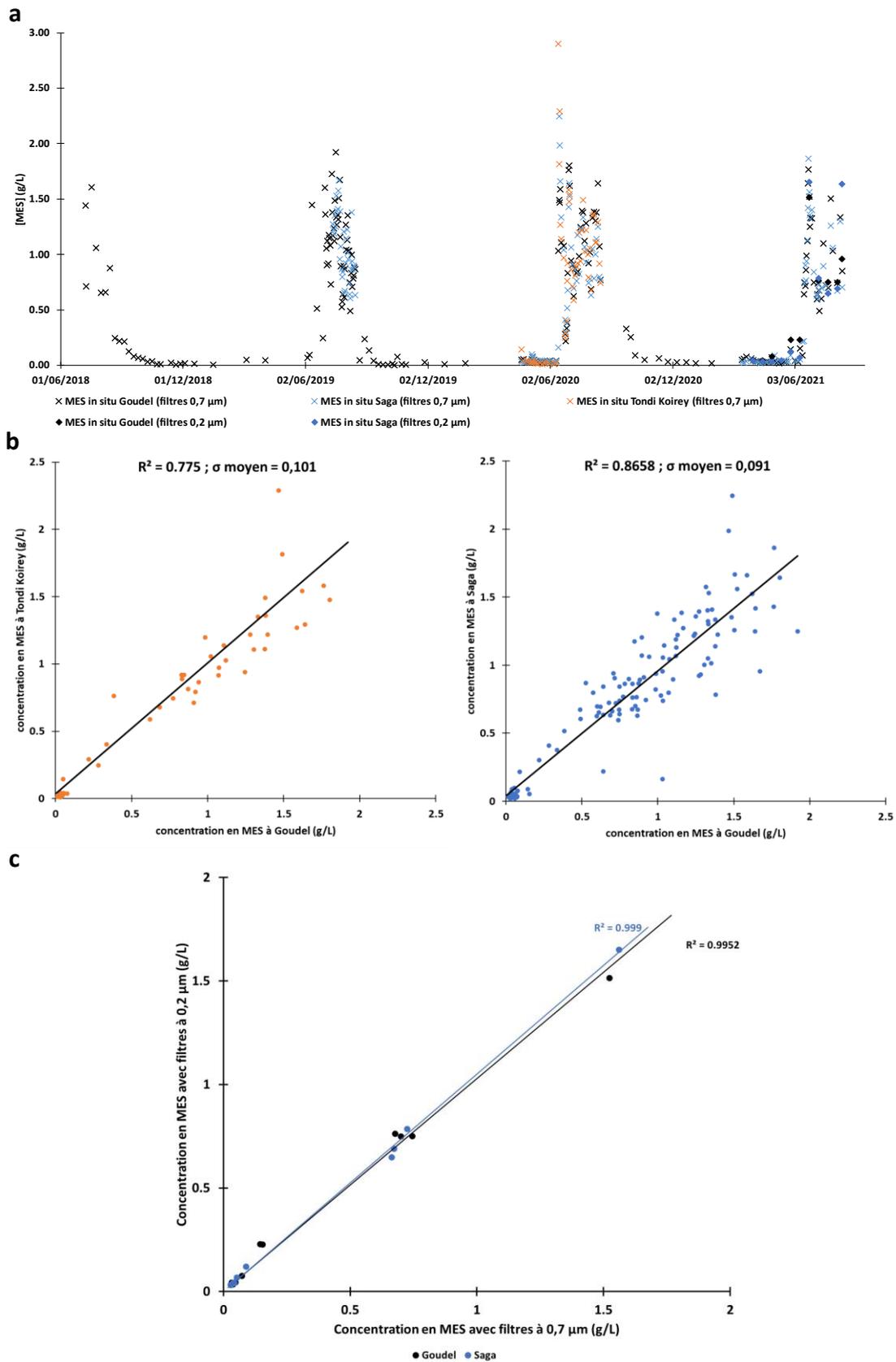


Figure 4. 1 : a) Dynamique spatio-temporelle de concentration en MES du Niger par méthode de filtration au niveau de Tondi Koirey, Goudel et Saga ; b) Relations entre les mesures des trois stations et c) relation entre les mesures pour les deux types de filtres.

Globalement les mesures de la concentration en MES par filtration ont été précises pour les sites d'échantillonnage du fleuve Niger à Niamey, et ceci pour les deux types de filtres utilisés. La moyenne des écarts-types des valeurs de concentration obtenues avec les filtres de 0,7  $\mu\text{m}$  a été de 0,0317 g/L, 0,0269 g/L et 0,025 g/L respectivement pour les sites de Goudel, Saga et Tondi Koirey (**figure 4. 2a**). Les concentrations en MES obtenues avec filtre de 0,2  $\mu\text{m}$  ont pour leur part eu une moyenne des écarts-types de 0,0237 g/L et 0,0133 g/L respectivement pour le site de Goudel et celui de Saga (**figure 4. 2b**).

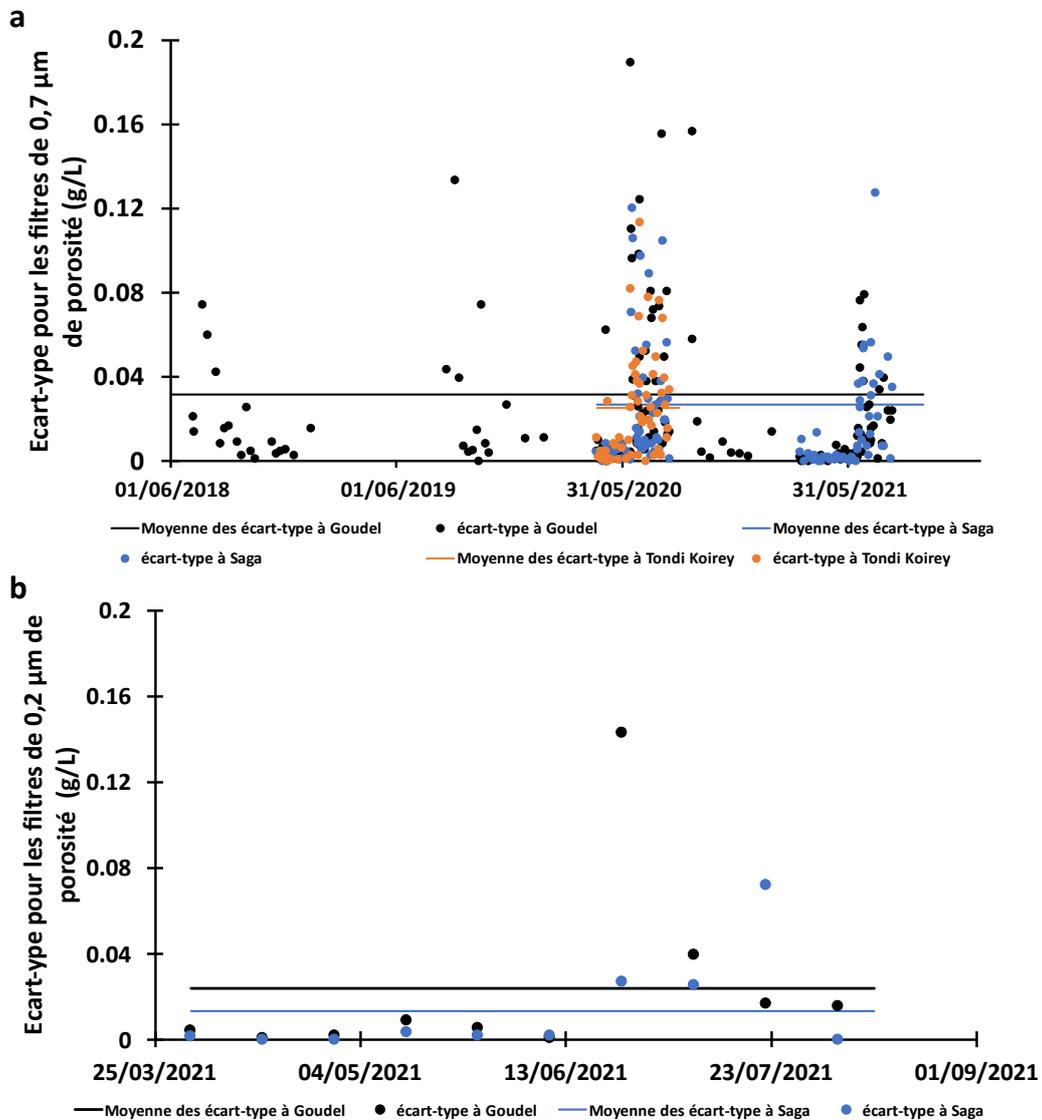


Figure 4. 2 : Précision des mesures de la concentration en MES : a) pour les filtres de 0,7  $\mu\text{m}$  de porosité (Trois sites sur le fleuve Niger) ; b) pour les filtres de 0,2  $\mu\text{m}$  de porosité (Goudel et Saga entre 1er avril et 12 août 2021).

Les concentrations en MES obtenues par filtration à 12 points de mesure entre l'aval (Saga) et l'amont (Tondi Koirey) ont montré également des valeurs similaires le long du transect (écart type égal à 0,007 g/L et 0,043 g/L respectivement en basses eaux et en crue rouge) (**figure 4. 3**). Les valeurs mesurées lors du transect de crue rouge ont à nouveau montré une très grande différence avec celles obtenues en période de crue blanche et des basses eaux. Le point P3 en aval immédiat (environ 1,5 km) de la confluence du Gounti Yena avec le fleuve Niger, a présenté en crue blanche et en basses eaux une concentration plus importante d'environ 15% au-dessus de la concentration moyenne du transect de la période considérée.

Les mesures sur la section transversale du fleuve à Goudel (**figure 4. 4**) ont montré en crue rouge une concentration en MES du fleuve variant entre 0,772 et 0,467 g/L de la rive gauche vers la rive droite. La concentration est légèrement remontée au niveau du point le plus près de la rive droite et a atteint 0,52 g/L. En crue blanche et en basses eaux les concentrations ont relativement été uniformes le long de la section de Goudel avec une différence moyenne de l'ordre de 0,026 g/L en basses eaux. Les mesures sur la section de Saga pour leur part ont montré des valeurs plus hétérogènes en crue rouge avec des concentrations plus importantes au niveau des deux rives du fleuve et une différence moyenne de l'ordre de 0,068 g/L. les mesures en basses eaux et en crue blanche ont présenté une évolution relativement constante le long de la section de Saga (**figure 4. 5**).

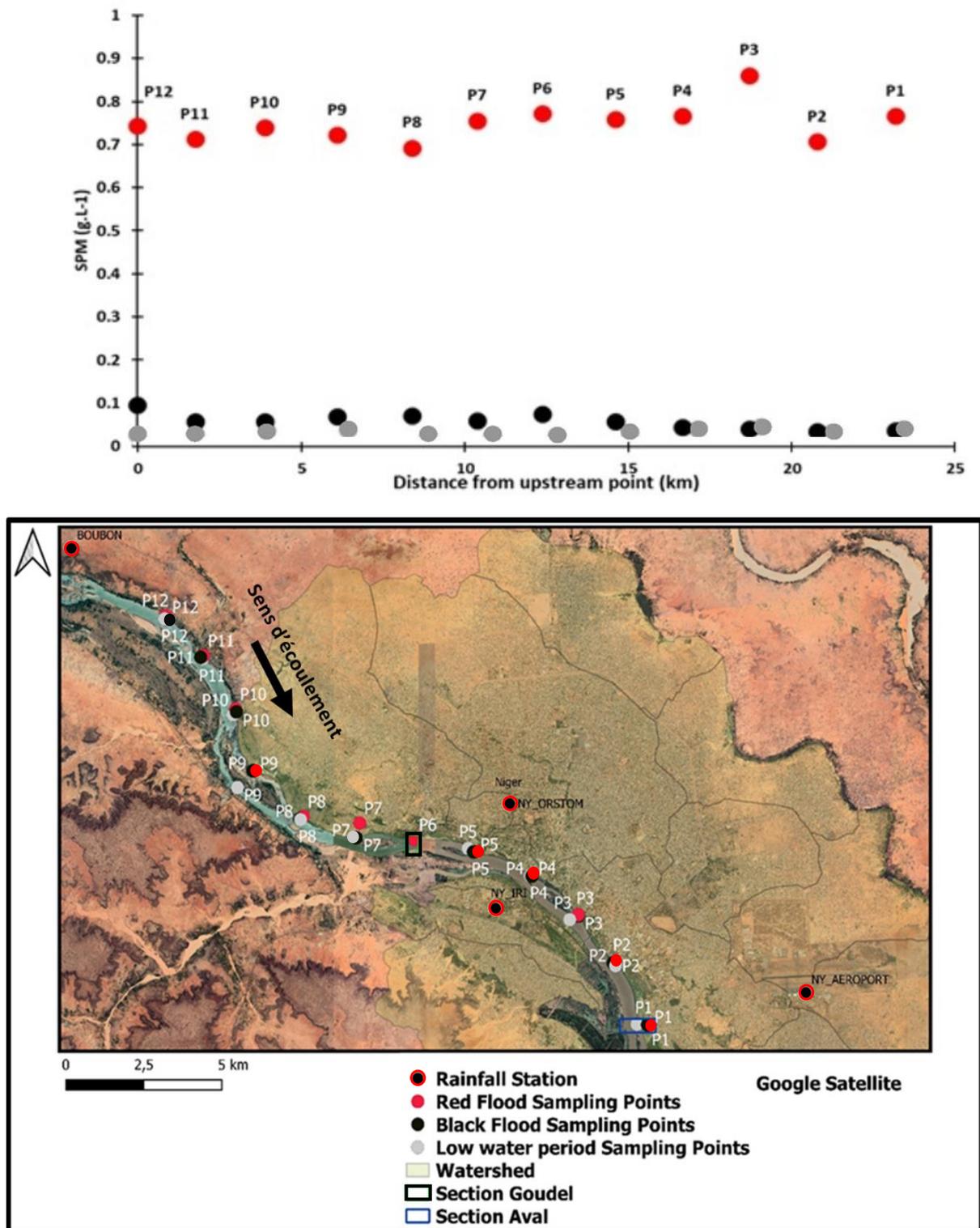


Figure 4. 3 : Concentration en MES du Niger obtenue par filtration le long du transect de mesure (Saga-Tondi koirey) en basses eaux (points gris – 30 mai 2020), crue rouge (points rouges – 16 juillet 2020) et crue blanche (points noirs - 23 mars 2021).

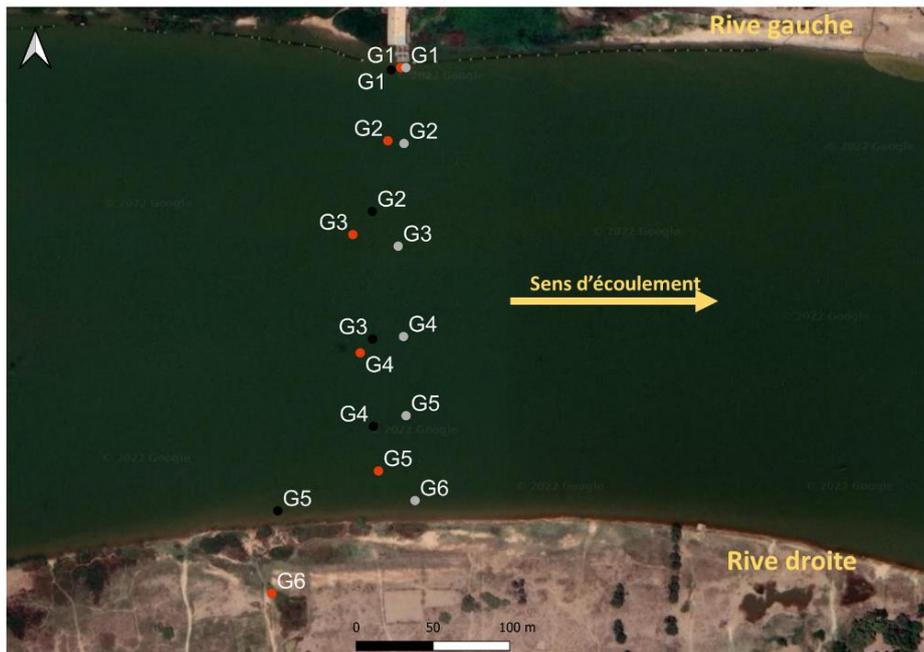
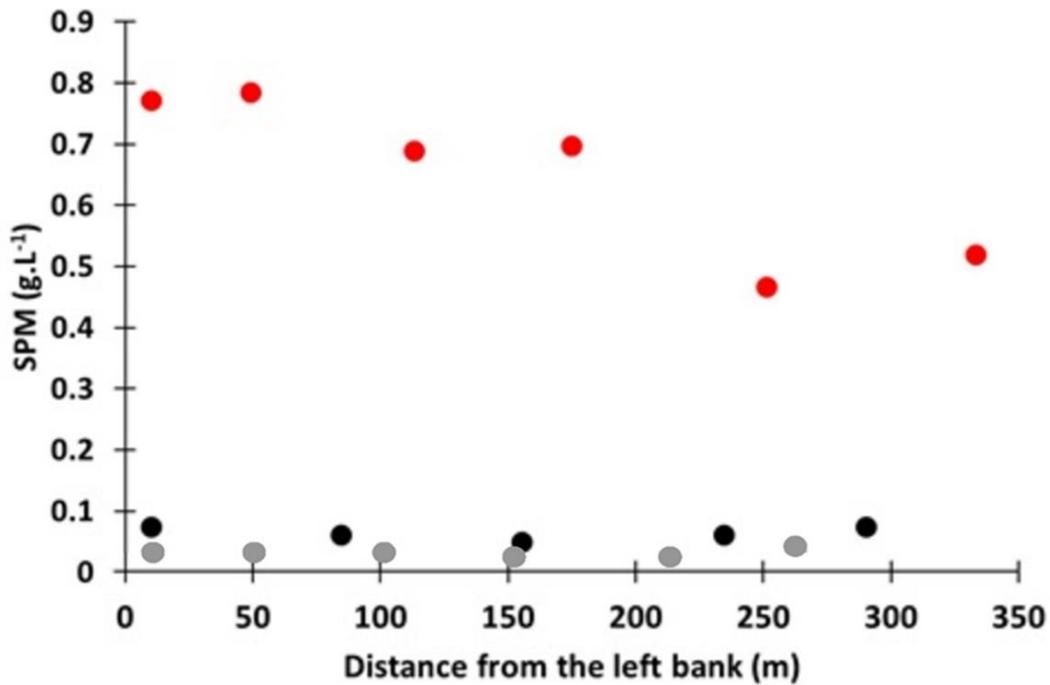


Figure 4. 4 : Concentration en MES du fleuve Niger obtenue par filtration le long de la section de Goudel. Mesures effectuées à partir de la rive gauche au cours de la crue rouge (points rouges), crue blanche (points noirs) et les basses eaux (points gris).

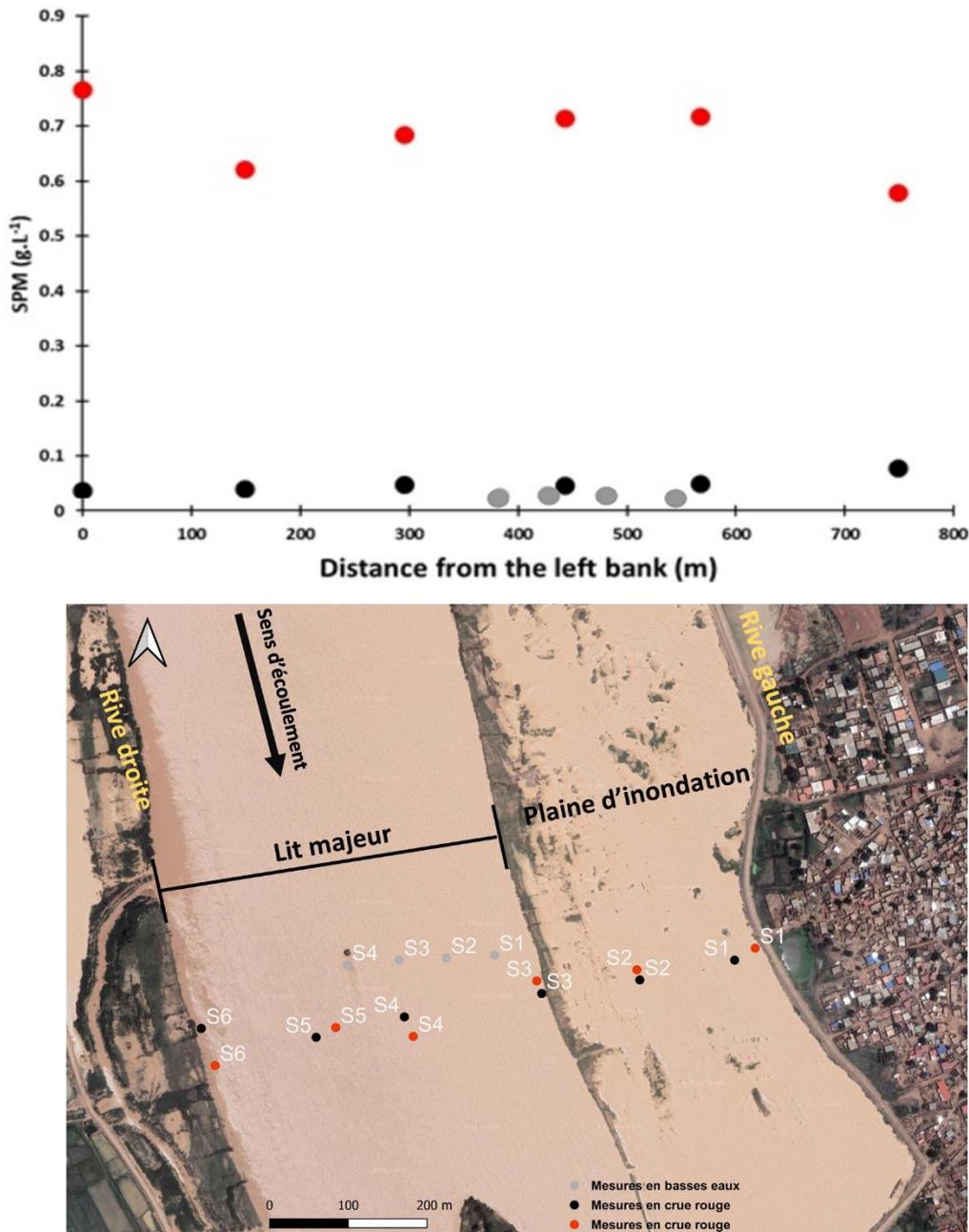


Figure 4. 5 : Concentration en MES du fleuve Niger obtenue par filtration le long de la section de Saga. Mesures effectuées à partir de la rive gauche au cours de la crue rouge (points rouges), crue blanche (points noirs) et les basses eaux (points gris).

## 1.2 Concentration en matières en suspension des lacs de Bangou Bi et Bangou Kirey

Les concentrations en MES des eaux de Bangou Bi et Bangou Kirey déterminées par filtration avec des filtres de  $0,7 \mu\text{m}$  ont montré une dynamique et des valeurs très différentes entre les deux lacs. Les concentrations en MES ont varié entre 0,3015 et 1,949 g/L (écart-type : 0,0344)

à Bangou Kirey contre 0,02 et 0,161 g/L (écart-type : 0,0029) pour Bangou Bi entre le 17 mars et le 11 août 2021 (**figure 4. 6**). Au niveau de Bangou Kirey la dynamique de la concentration en MES a montré une tendance à l'augmentation entre mars et juillet où elle atteint sa valeur maximale pour ensuite décroître. A Bangou Bi la dynamique a montré des valeurs quasi-stables avec de très légères augmentations entre juin et août. La plus forte concentration en MES a été mesurée en août pour le lac de Bangou Kirey (**figure 4. 6**). Globalement les mesures ont été précises, avec une moyenne des écarts-types de 0,0029 g/L et 0,0436 g/L respectivement à Bangou Bi et Bangou Kirey (**figure 4. 7**).

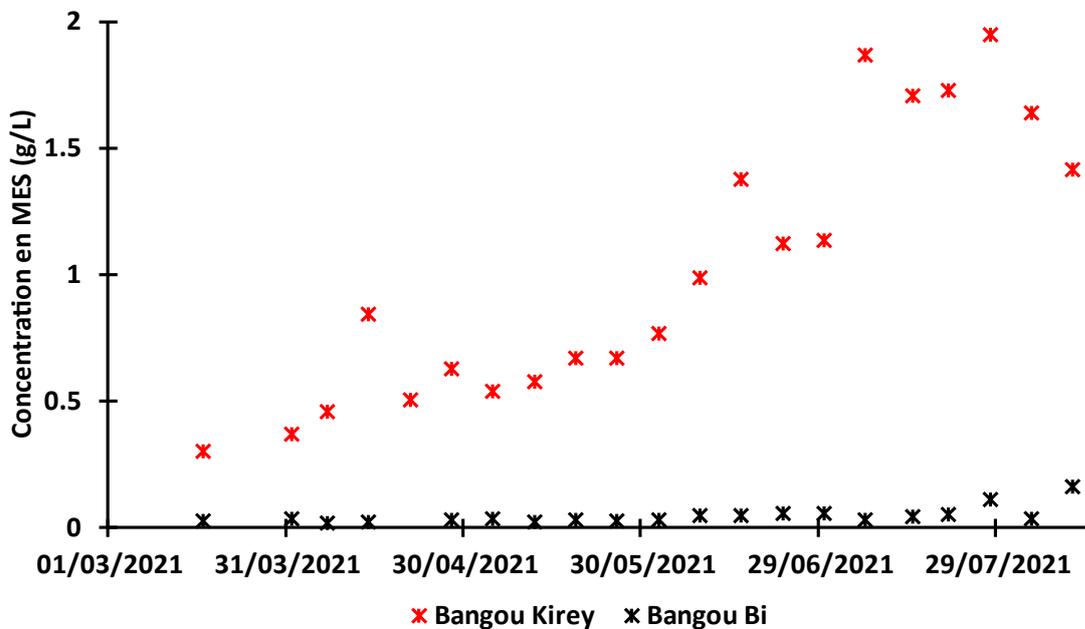


Figure 4. 6 : Dynamique de la concentration en matières en suspension des eaux de Bangou Bi et Bangou Kirey.

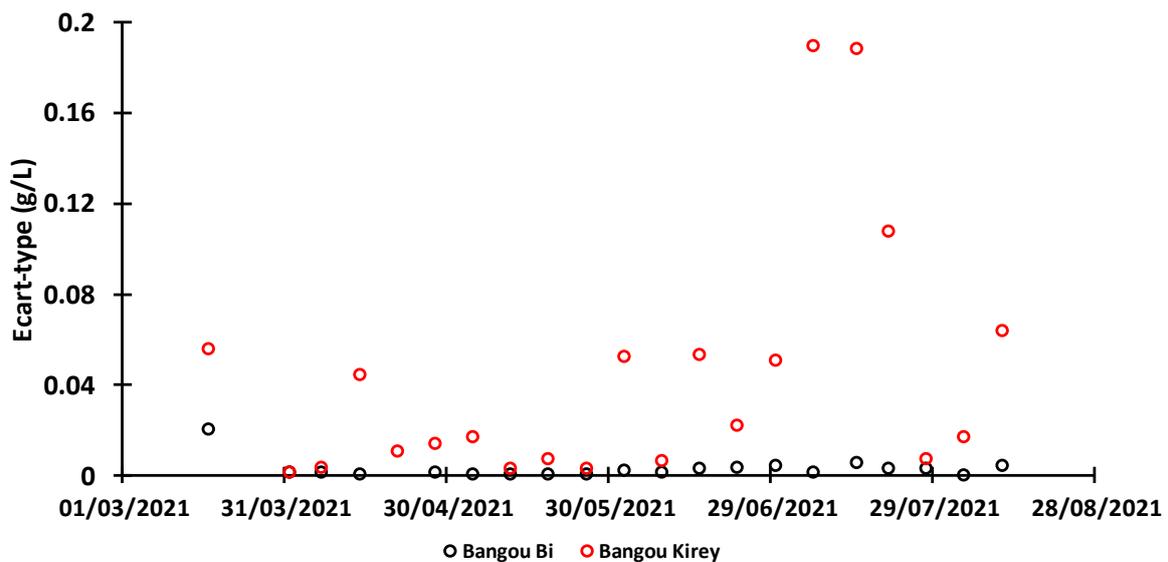


Figure 4. 7 : Précision des mesures de la concentration en MES des eaux de Bangou Bi et Bangou Kirey avec les filtres de 0,7  $\mu\text{m}$  de porosité (entre le 17 mars et 11 août 2021).

### 1.3 Couleur des eaux du fleuve Niger à la station de pompage de Goudel

La couleur des eaux du fleuve Niger a été pour rappel mesurée à partir d'un radiomètre SKYE installé à la station de Goudel et par la paire de satellites Sentinel-2. Quarante-huit mesures par jour de la couleur des eaux ont été réalisées par le radiomètre. Quelle que soit la période de l'année, la dynamique journalière de la réflectance a montré une forte variabilité (**figure 4. 8**). Les valeurs de la réflectance des eaux du Niger dans le rouge et le proche infrarouge, ont relativement été constantes la matinée. Elles ont présenté d'importantes variations dans l'après-midi. Ces variations sont dues à l'effet du sunglint qui résulte de la réflexion spéculaire du rayonnement solaire. Pour éviter ce phénomène, les données de réflectance ont uniquement été moyennées, pour chaque jour, entre 9H et 11H. Cette plage horaire a été caractérisée par des données de réflectance relativement constantes du fait d'une disposition soleil/cible/capteur moins sujette aux effets du sunglint. Le capteur du radiomètre était orienté vers le sud-ouest (**figure 3. 14c**) ce qui fait que le soleil se trouve dans la position spéculaire dans l'après-midi. Il faut noter cependant que la prise en compte des moyennes de 9-11H ne permet pas d'éliminer le skyglint.

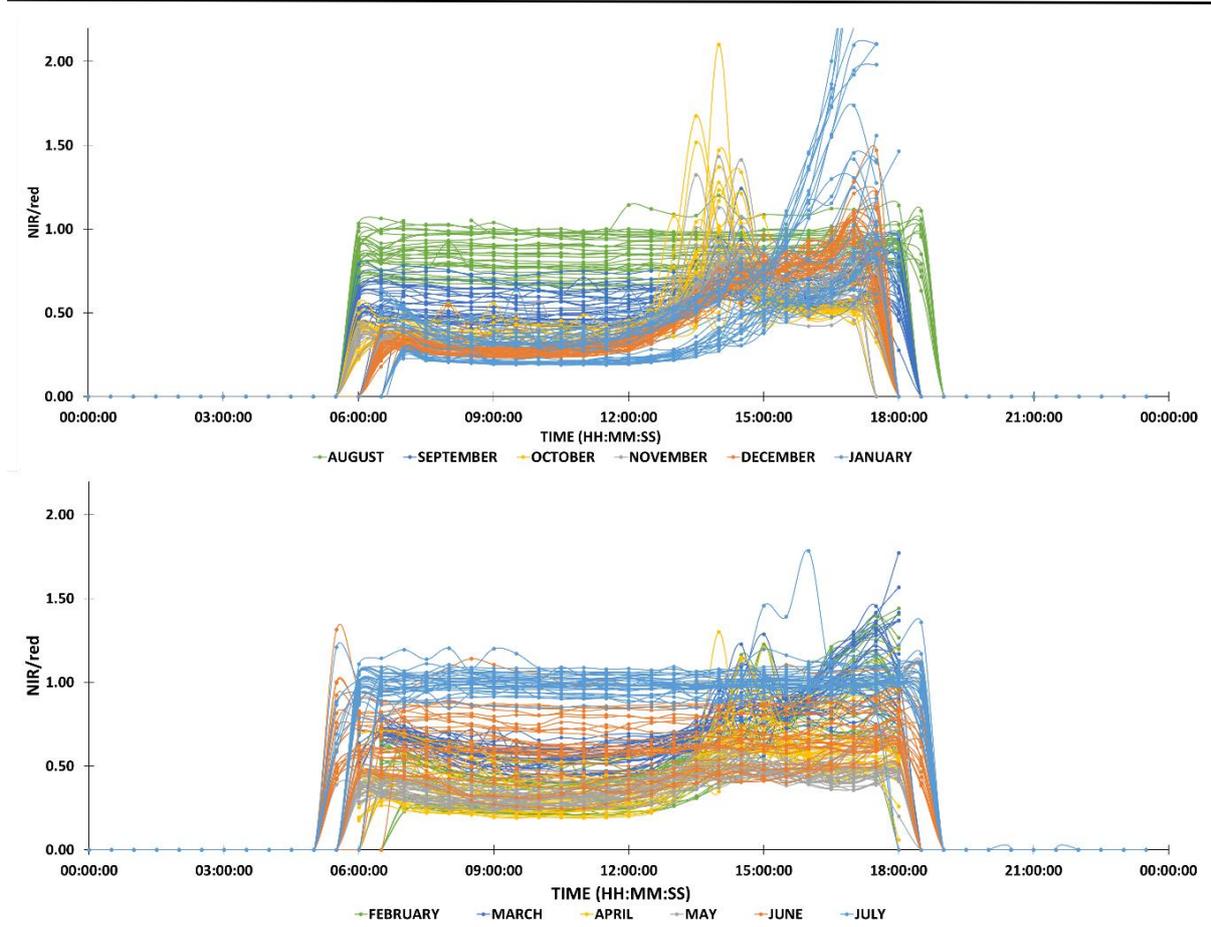


Figure 4. 8 : Rapport de réflectance semi-horaire (rapport de réflectance proche infrarouge/rouge) pour chaque jour entre le 1e août 2018 et le 31 juillet 2019. Les données de nuit sont mises à zéro.

Les valeurs de réflectance des eaux du Niger, dans les mêmes bandes que le radiomètre, ont été extraites des données issues des satellites Sentinel-2A et 2B qui acquièrent une image de la zone d'étude tous les cinq jours. Pour les mêmes jours, les mesures in situ de la réflectance des eaux du Niger par radiomètre SKYE comparées à celles obtenues par Sentinel-2 ont montré une très bonne corrélation dans les deux bandes (**figure 4. 9**). Les coefficients de déterminations  $R^2$  sont respectivement de 0,94 et 0,95 pour le proche infrarouge et le rouge. La RMSD (Root Mean Square Difference) de 0,0204 et 0,0134 et la MAPE (Mean Absolute Pourcentage Error) de 61,95% et 9,45%.

En général, les valeurs des réflectances des eaux du fleuve Niger déterminées par les capteurs SKYE et Sentinel-2 dans les bandes rouge et infrarouge ont montré une forte saisonnalité avec

des valeurs extrêmement élevées (**figure 4. 10**), atteignant 0,35-0,40 pendant la saison des pluies entre juin-septembre. Ces gammes de réflectances sont peu communes pour les grands cours d'eau. Les plus faibles valeurs sont obtenues en saison sèche particulièrement entre janvier et février (**figure 4. 10**). Les valeurs de réflectance obtenues par Sentinel-2 ont généralement été plus dispersées que celles du radiomètre pendant la saison sèche (de janvier à avril). Ceci est particulièrement vrai pour la bande du proche infrarouge, montrant des écarts dans les faibles valeurs du proche infrarouge sur la **figure 4. 10** et la haute valeur de MAPE obtenue pour cette bande. Cette dispersion pourrait être due à l'impact de la forte concentration en aérosols, durant la période de l'harmattan provenant du désert du Sahara, qui n'est probablement pas complètement corrigé par l'algorithme de correction atmosphérique MAJA.

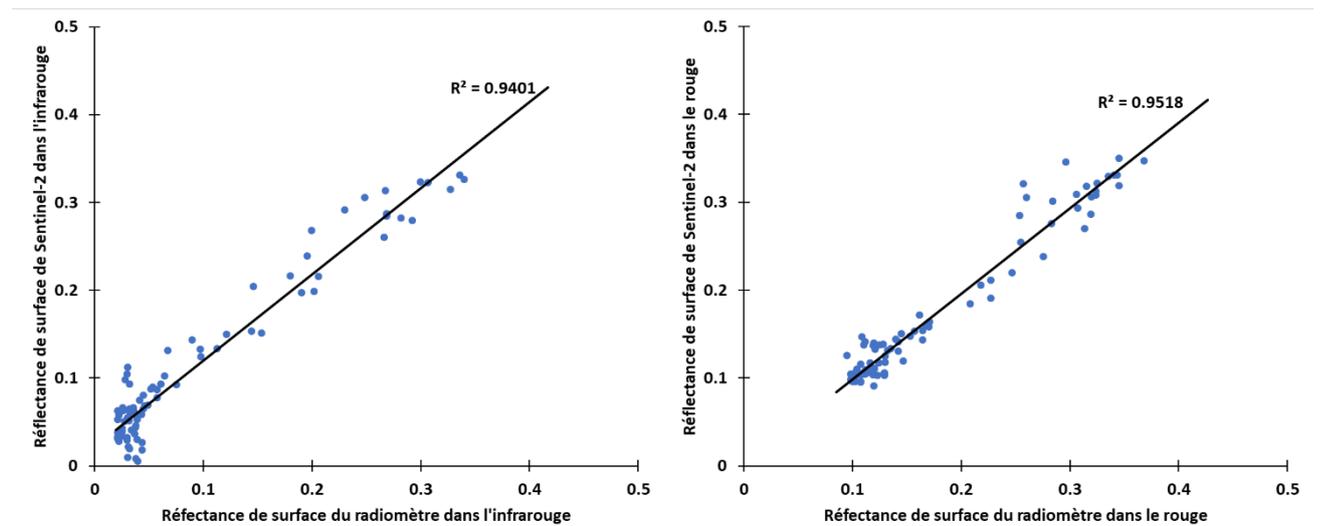


Figure 4. 9 : Corrélation entre les réflectances de surface de Sentinel-2 et du radiomètre SKYE dans les bandes du proche infrarouge (à gauche) et rouge (à droite).

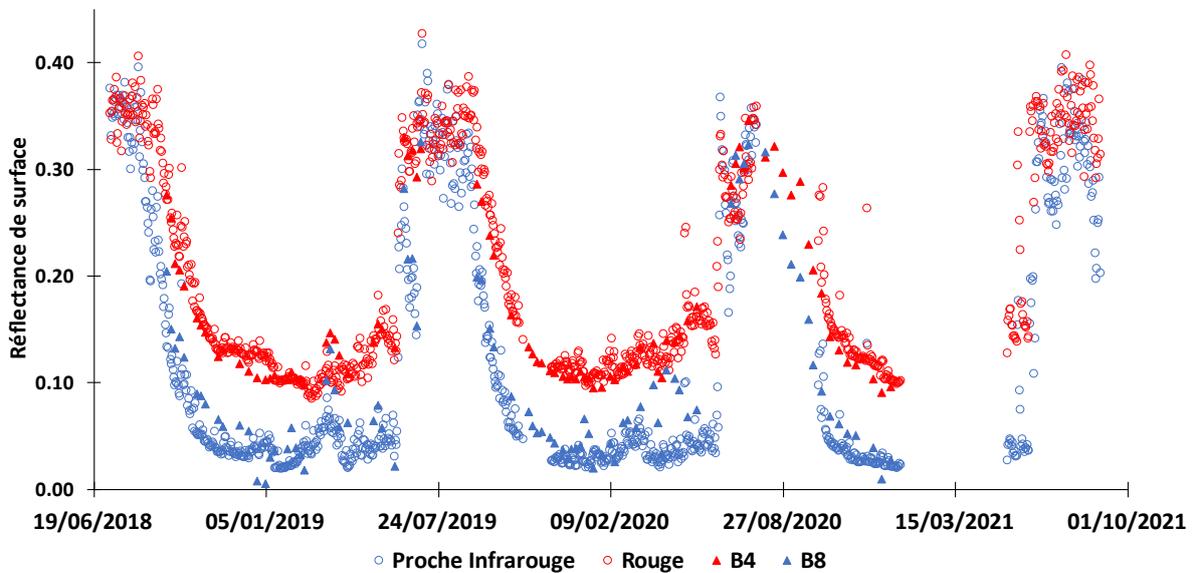


Figure 4. 10 : Dynamique temporelle de la réflectance des eaux du fleuve Niger par le capteur Sentinel-2 et radiomètre SKYE dans les bandes rouge (en couleur rouge) et proche infrarouge (en couleur bleue).

### 1.3.1 Concentration en MES du fleuve Niger obtenue par mesure de la couleur des eaux

Le meilleur ajustement entre les concentrations en MES obtenues par filtration et les mesures de la réflectance a été établi en utilisant des relations non linéaires de type puissance. Les concentrations en MES obtenues par filtration ont particulièrement montré une forte corrélation avec les valeurs de réflectance dans le proche infrarouge (B8) pour Sentinel-2 et le rapport de réflectance (proche infrarouge/rouge) pour le radiomètre (**tableau 4. 1**). La paramétrisation de la concentration en MES, dans le proche infrarouge pour Sentinel-2 ( $n = 25$ ) et le rapport de réflectance proche infrarouge/rouge ( $n = 125$ ) pour le radiomètre, est respectivement décrite par les équations **Eq 4.1** et **Eq 4.2** (**figure 4. 11**).

*Tableau 4. 1 : Coefficients de détermination et équations des différents ajustements essayés avec une relation de type puissance entre les concentrations en MES obtenues par filtration et les mesures radiométriques. Données acquises entre le 08/07/18 et le 19/07/20.*

	R <sup>2</sup>	Equation
B8	<b>0,84</b>	<b><math>y = 32,7892x^{2,91417}</math></b>
B4	0,6	$y = 65,76x^{4,21}$
Proche infrarouge/rouge	0,81	$y = 6,8812x^{1,845}$
Rouge	0,68	$y = 64,129x^{4,0715}$
B8/B4	0,65	$y = 0,7831x^{4,6346}$
Proche infrarouge/rouge	<b>0,90</b>	<b><math>y = 1,154x^{3,430}</math></b>

$$\text{MES} = 32,7892 * (\text{B8})^{2,91417} \text{ (Sentinel-2 MSI)} \quad \text{(Eq 4.1)} \quad R^2 = 0,84$$

$$\text{MES} = 1,154 * (\text{NIR/red})^{3,430} \text{ (SKYE)} \quad \text{(Eq 4.2)} \quad R^2 = 0,90$$

Où MES est la concentration en matières en suspension obtenue par inversion, B8 est la bande proche infrarouge de Sentinel-2, et NIR/rouge est le rapport des bandes du radiomètre SKYE.

Les paramétrisations de la fonction liant la concentration en MES et les réflectances des eaux du Niger, effectuées en utilisant les données acquises pendant la période de juillet 2018 à juillet 2020 ont été validées en utilisant les mesures effectuées pendant un cycle hydrologique allant de juillet 2020 à aout 2021, ce qui correspond à 30% et 43% des données communes de réflectance obtenues par le radiomètre et Sentinel-2 respectivement. L'étape de validation a montré une très bonne restitution de valeurs de concentration en MES du fleuve Niger par les données de réflectance du radiomètre in situ avec un  $R^2 = 0,95$  ; RMSE = 0,097 ; MAPE = 25,71% ; biais = 0,073 ; n = 45 (**figure 4. 12**). Une bonne restitution des concentrations en MES par Sentinel-2 a également été obtenue avec un  $R^2 = 0,63$  ; RMSE = 0,318 ; MAPE = 52,48% ; biais = 0,137 ; n = 19 (**figure 4. 12**).

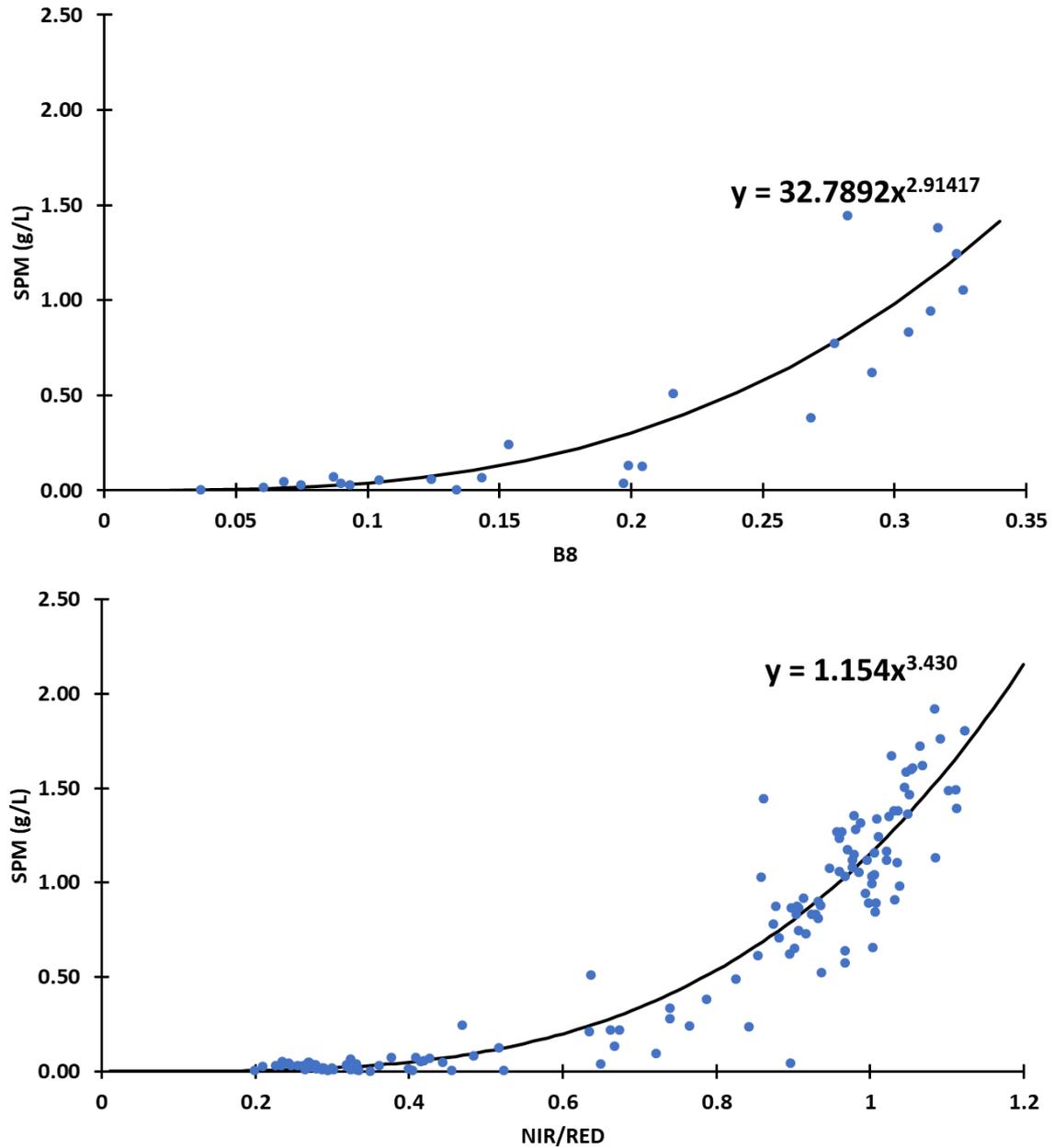


Figure 4. 11 : Relations entre les réflectances SKYE (en haut) et Sentinel-2 MSI (en bas) et la concentration en MES par filtration (données acquises entre 08 juillet 2018 et le 19 juillet 2020).

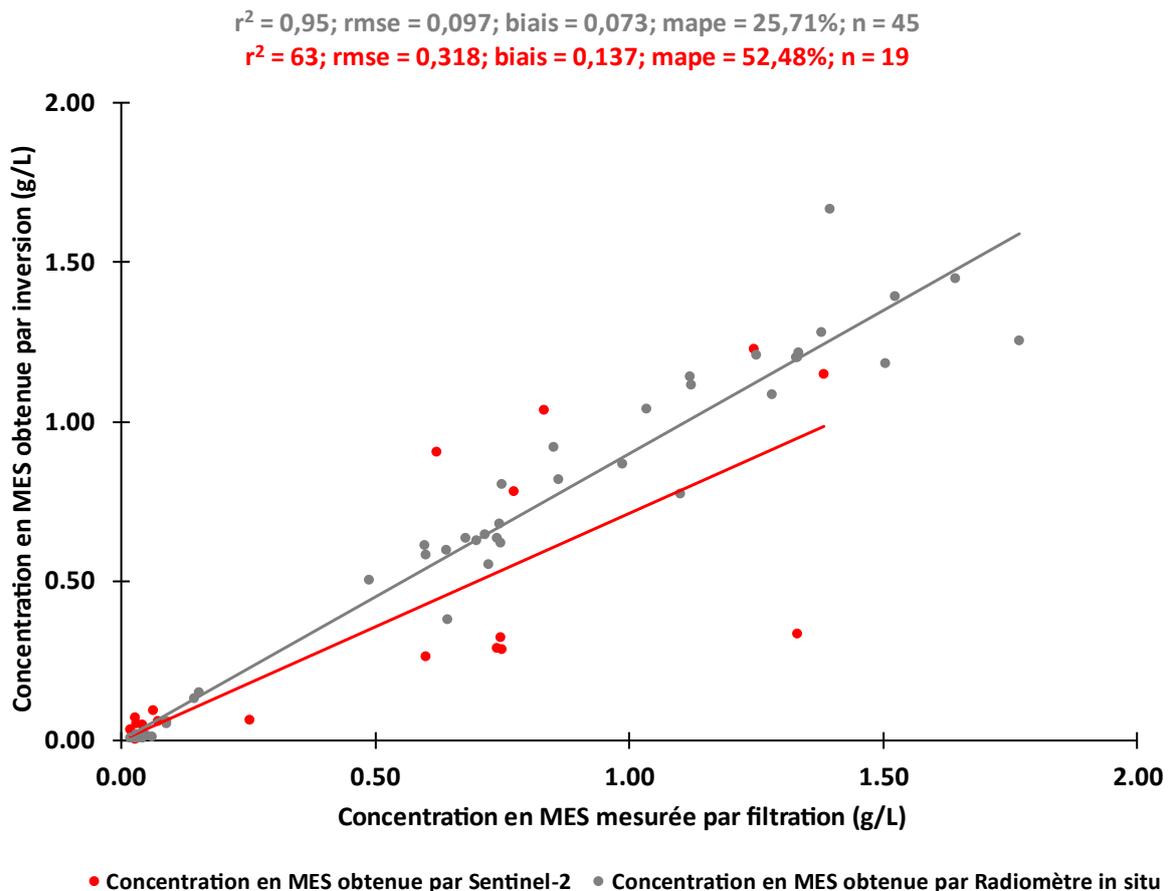


Figure 4. 12 : Relation entre concentrations en MES du Niger à Goudel inversées par mesures radiométriques et celles obtenues par filtration. Données de validation acquises entre le 07 juillet 2020 et le 12 juillet 2021 pour Sentinel-2 ; 20/08/2020 et 12/08/2021.

### 1.3.1.1 Dynamiques temporelles de la concentration en MES et le débit du fleuve Niger à Niamey

La dynamique temporelle de la concentration en MES des eaux du Niger à Niamey déterminée par filtration et par radiométrie a montré un déphasage avec le débit du fleuve (**figure 4. 13**). En début de crue rouge la concentration en MES commence à augmenter et atteint son maximum entre 43 et 71 jours avant le maximum de débit de la crue rouge (**figure 4. 13**). Ceci est typiquement un effet du « first flush » (**Bertrand-Krajewski et al., 1998**). Les concentrations les plus élevées en MES, de 0,5-2 g/L, ont été mesurées lorsque le débit du fleuve était faible (moins de 500 m<sup>3</sup>/s) ou moyen (500-1 000 m<sup>3</sup>/s). Lorsque le débit augmente,

la concentration en MES a tendance à diminuer. Cette tendance se poursuit durant le pic de la crue rouge voire même après (**figure 4. 13**).

Durant la crue blanche, le fleuve a été caractérisé par des débits pouvant dépasser 2 000 m<sup>3</sup>/s et de faibles concentrations en MES d'environ 0,1 g/L, soit 5 à 20 fois inférieures à celles obtenues lors de la crue rouge (**figure 4. 14**). Après la crue blanche, la concentration en MES reste faible, mais présente de légères augmentations entre février et avril. La période de basses eaux présente les débits les plus faibles (13,773m<sup>3</sup>/s le 23 mai 2018) et des valeurs de concentration en MES autour de 0,01 g/L soit 10 fois inférieures à celles de la crue blanche (**figure 4. 14**).

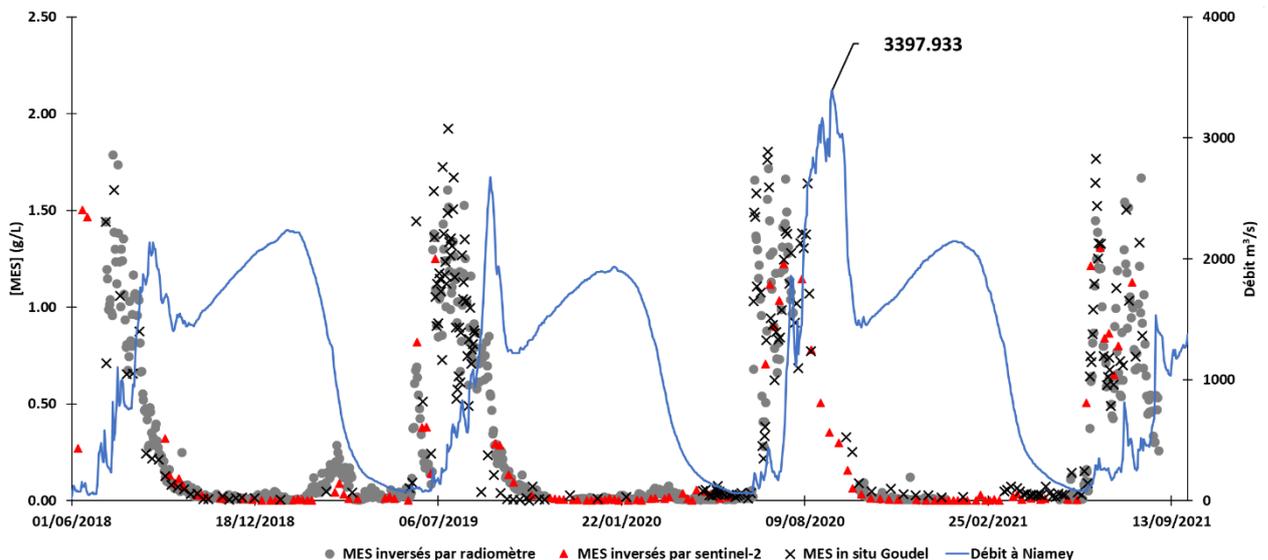


Figure 4. 13 : Dynamique de la concentration des matières en suspension et débit du fleuve Niger Niamey entre 2018 et 2021.

La variabilité interannuelle et les valeurs de la concentration en MES du fleuve Niger à Niamey ont globalement été similaires durant les crues rouges (entre juin et septembre). Une différence a cependant été observée en début de crue rouge (juin) avec des valeurs en MES deux fois plus faibles en 2019 par rapport à 2018 et 2020 (**figure 4. 15**). Les concentrations en MES des trois années sont devenues similaires en milieu de crue rouge bien qu'une grande différence ait subsisté au niveau du débit. En effet, le pic de débit le plus important jamais observé depuis

l'installation de la station hydrométrique du fleuve Niger à Niamey en 1929, est intervenue au début du mois de septembre 2020 (3 398 m<sup>3</sup>/s). Malgré ce débit exceptionnel, la concentration en MES du Niger à Niamey n'a pas varié davantage et sa valeur à cette période de 2020 a été similaire à celles observées en 2018 et légèrement inférieure aux valeurs de 2019.

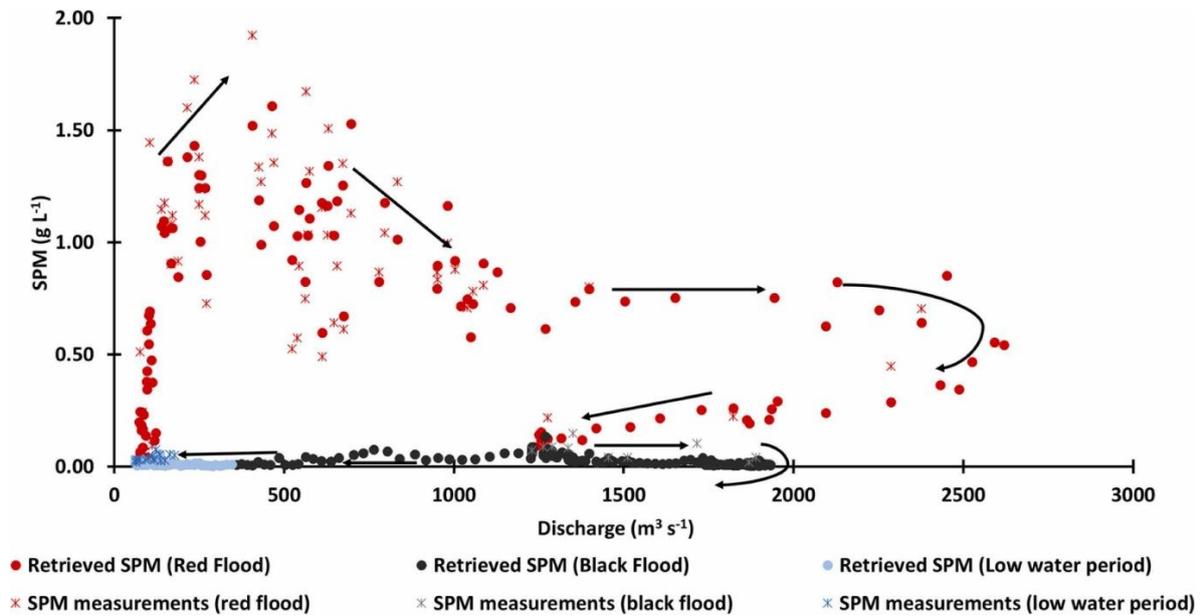


Figure 4. 14 : Concentration en MES (mesures par filtration et inversion de données de radiomètre SKYE) en fonction du débit pendant le cycle hydrologique de 2019 à Niamey. Les flèches représentent l'évolution chronologique de la concentration en MES.

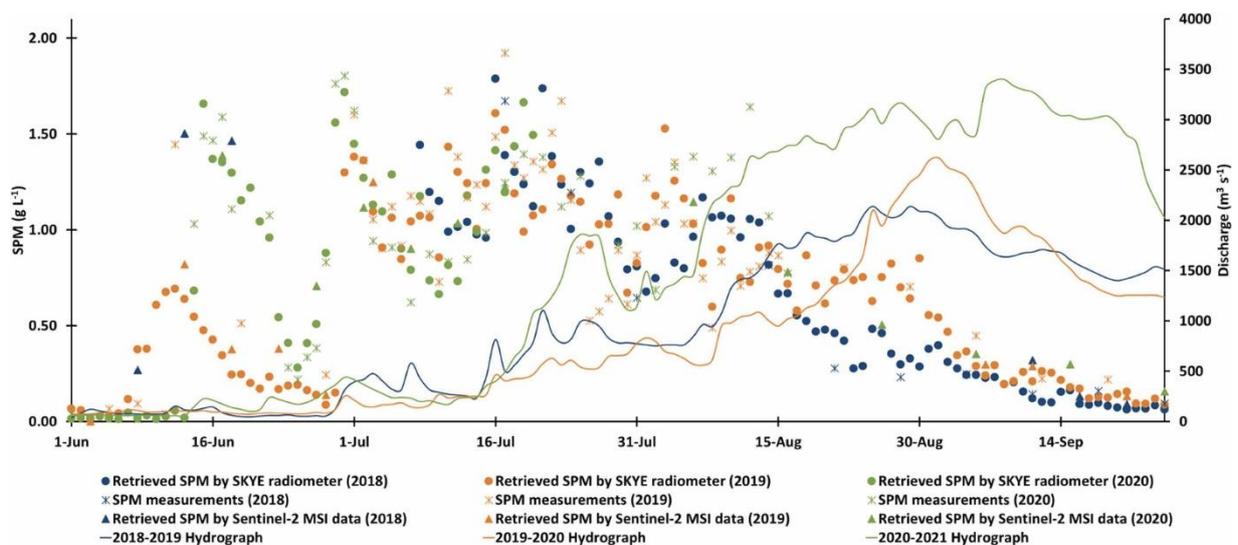


Figure 4. 15 : Concentrations en matières suspension inversées et débit du fleuve Niger pendant les crues rouges en 2018, 2019 et 2020.

### **1.3.1.2 Dynamique spatiale de la concentration en MES du fleuve Niger moyen**

Les principaux affluents du fleuve Niger contribuant à la crue rouge sont situés en aval de Ansongo. Les concentrations en MES déduites à partir de Sentinel-2 sont apparues similaires à Ansongo et à Niamey pendant la période de la crue blanche, d'octobre à mai. Pendant la saison des pluies (juin à septembre), des pics de concentration en MES du fleuve Niger ont été observés pour les deux localités, mais avec des ordres de grandeurs différents. La concentration maximale en MES a été de 1,5 g/L à Niamey et 0,13 g/L à Ansongo (**figure 4. 16**) pour une moyenne 15 fois plus importante à Niamey sur les quatre saisons des pluies (juin-septembre 2018 à 2021). Ceci montre clairement le rôle des affluents de la rive droite du Niger moyen dans la mobilisation et la contribution en matières en suspension à Niamey pendant la saison des pluies (crue rouge). La contribution significative en MES au tout début de la saison des pluies, en provenance de la Sirba (voir **figure 4. 17a**, pour le 17 juin 2020) met encore plus en évidence ce phénomène. La Sirba est en effet l'affluent principal du fleuve Niger moyen, contribuant à hauteur de 80% dans les apports hydriques enregistrés à la station hydrologique de Niamey (**Amani et Nguetora, 2002 ; Massazza et al., 2019**). En revanche, aucune différence majeure n'a été constatée entre les concentrations en MES des eaux de la Sirba et celles du fleuve Niger pendant la crue blanche (*14 mars 2020*, **figure 4. 17b**).

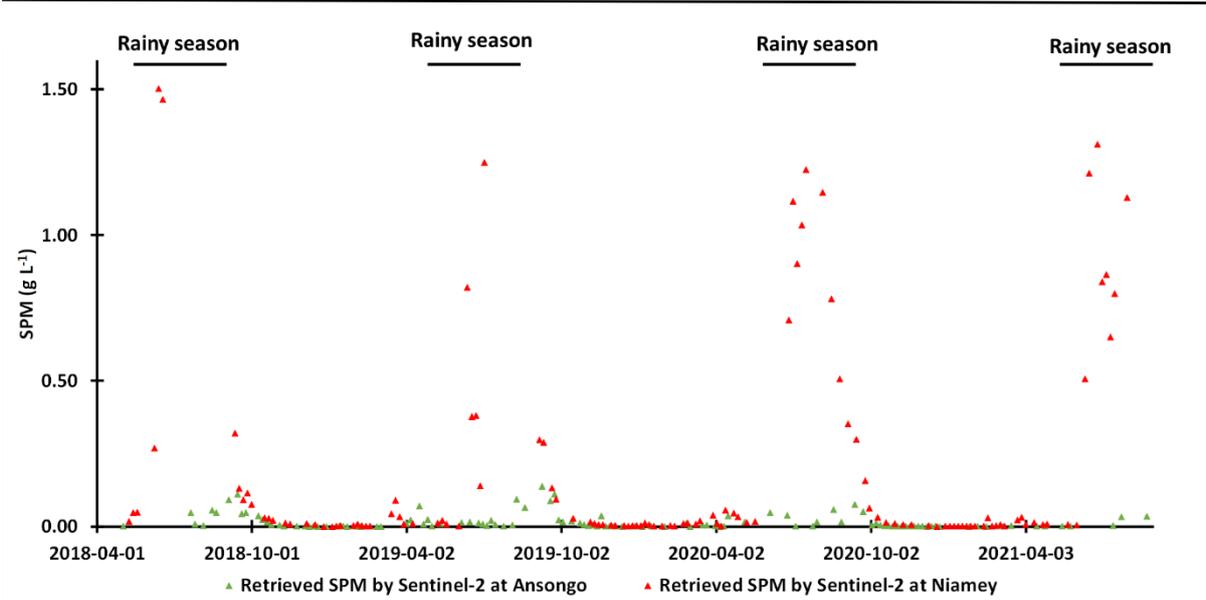


Figure 4. 16 : Dynamique temporelle de la concentration en MES dérivée de Sentinel-2 à Niamey et Ansongo entre 2018 et 2020.

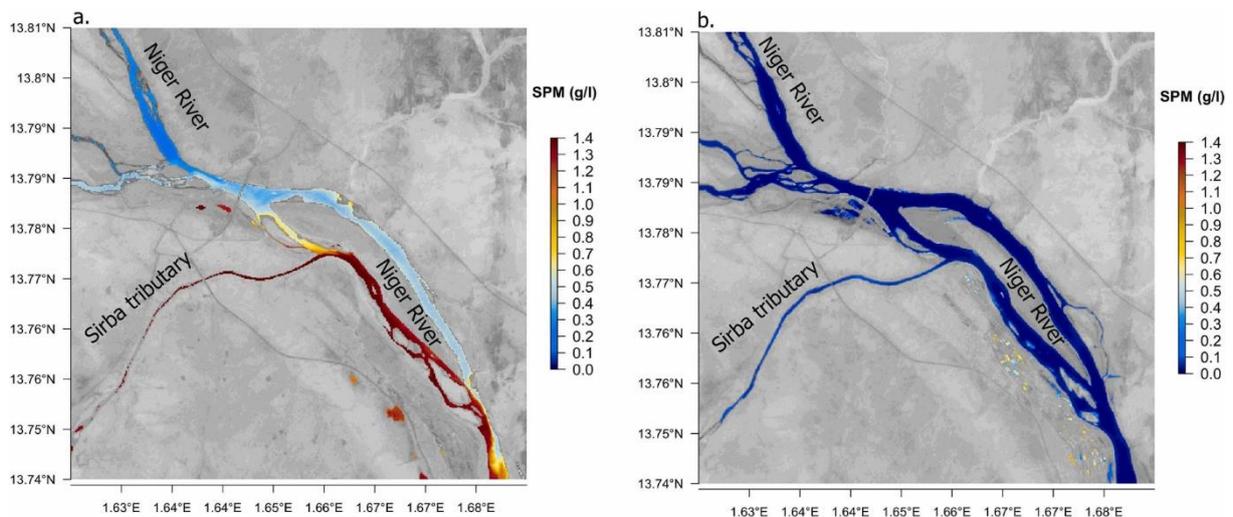


Figure 4. 17 : Concentration en matières en suspension estimée à partir des données Sentinel-2 montrant l'apport de la Sirba pendant la crue rouge. a) 17 juin 2020 ; b) 14 mars 2020.

### 1.3.1.3 Nature des matières en suspension du fleuve Niger

Il faut rappeler que « Matières en suspension (MES) » est employé pour désigner les matières en suspension dans la colonne des cours et plan d'eau de Niamey, allant des particules nanométriques aux sédiments de la taille du sable (Bilotta et al., 2012). La granulométrie des matières en suspension du fleuve Niger a essentiellement été dominée pendant la crue rouge,

par des particules très fines (**figure 4. 18**) d'origine argilo-limoneuses. Les principaux modes granulométriques sont centrés autour de 0,172-0,296 et 3,9  $\mu\text{m}$ . Lors de la crue blanche, les mêmes modes se retrouvent avec moins de particules fines cette fois-ci centrées autour de 0,26  $\mu\text{m}$  et une proportion équivalente au niveau des particules limoneuses centrées autour de 5,12-6,72  $\mu\text{m}$ . Les particules fines sont souvent organisées en agrégats (**figure 4. 19**) et sont principalement composées de kaolinite et d'oxyhydroxydes de fer, avec des occurrences mineures de quartz, illite/muscovite, et ilménite. Des traces de matières organiques ont également été observées dans les échantillons de crue rouge.

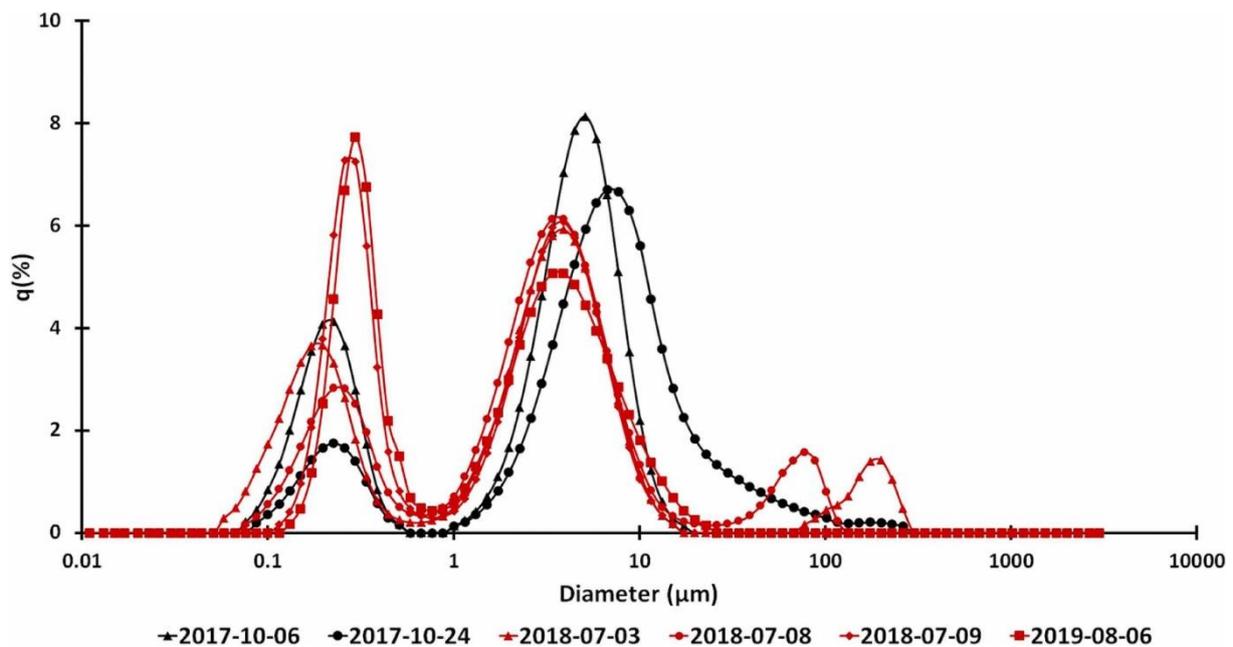


Figure 4. 18 : Courbes granulométriques des matières en suspension du fleuve Niger. Echantillons collectés lors de la crue rouge (2018-07-03, 2018-07-08, 2018-07-09 et 2019-08-06) et de la crue blanche (2017-10-06 et 2017-10-24) avec une concentration en MES égale respectivement à 2,34 g/L, 1,44 g/L, 0,71 g/L, 1,034 g/L, 0,065 g/L et 0,073 g/L.

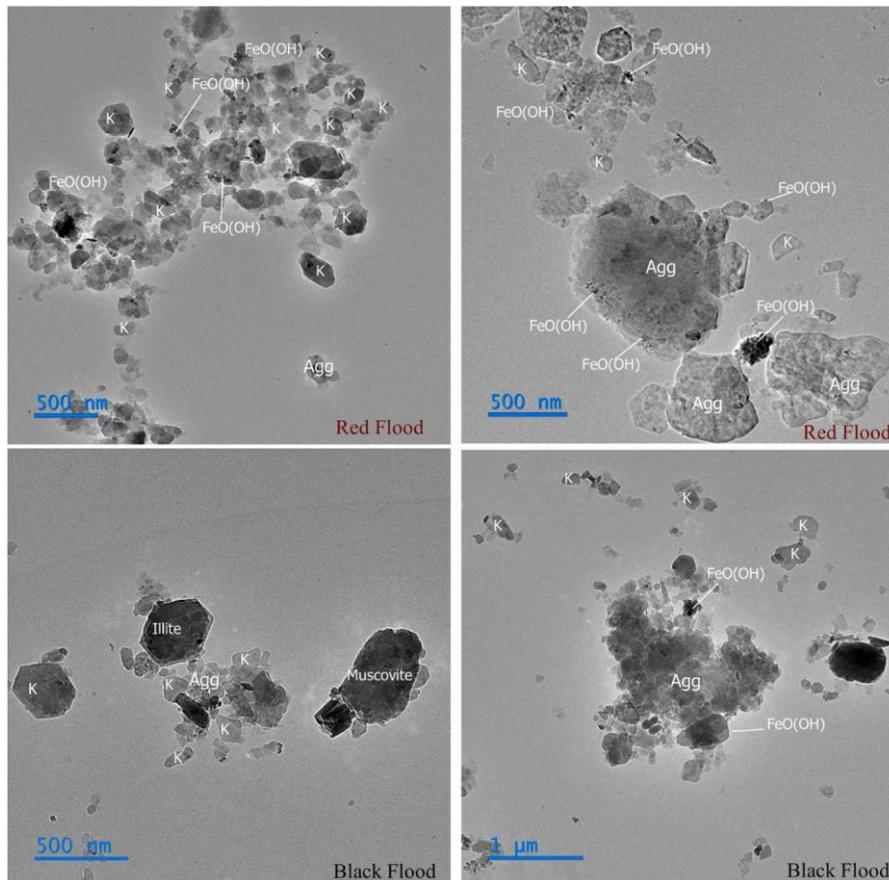


Figure 4. 19 : Images de Matières en suspension du fleuve Niger obtenues par microscope électronique à transmission (MET) : échantillons d'eau de crue rouge et blanche. K : Kaolinite ; Agg : Agrégat ; FeO (OH) : Oxyhydroxyde de fer.

#### 1.4 Nature granulométrique et minéralogique des matières en suspension des eaux de Bangou Bi et Bangou Kirey

La granulométrie des matières en suspension des eaux de Bangou Kirey a montré deux modes de particules centrés autour de 0,172 et 2,599  $\mu\text{m}$  et un mode centré autour de 13,246  $\mu\text{m}$  pour le lac de Bangou Bi (**figure 4. 20**). Les images du MET (**figure 4. 21**) ont bien montré ces particules très fines (mode de particules fines) au niveau de Bangou Kirey souvent associées en agrégats qui donnent le second mode de la courbe granulométrique. Au niveau de Bangou Bi les images MET ont également montré des particules très fines que l'on ne retrouve cependant pas sur la courbe granulométrique (**figure 4. 20**). En effet, les matières en suspension à Bangou

Bi s'organisent préférentiellement en agrégats (**figure 4. 21**) donnant ainsi un mode de particules plus important comparativement à Bangou Kirey.

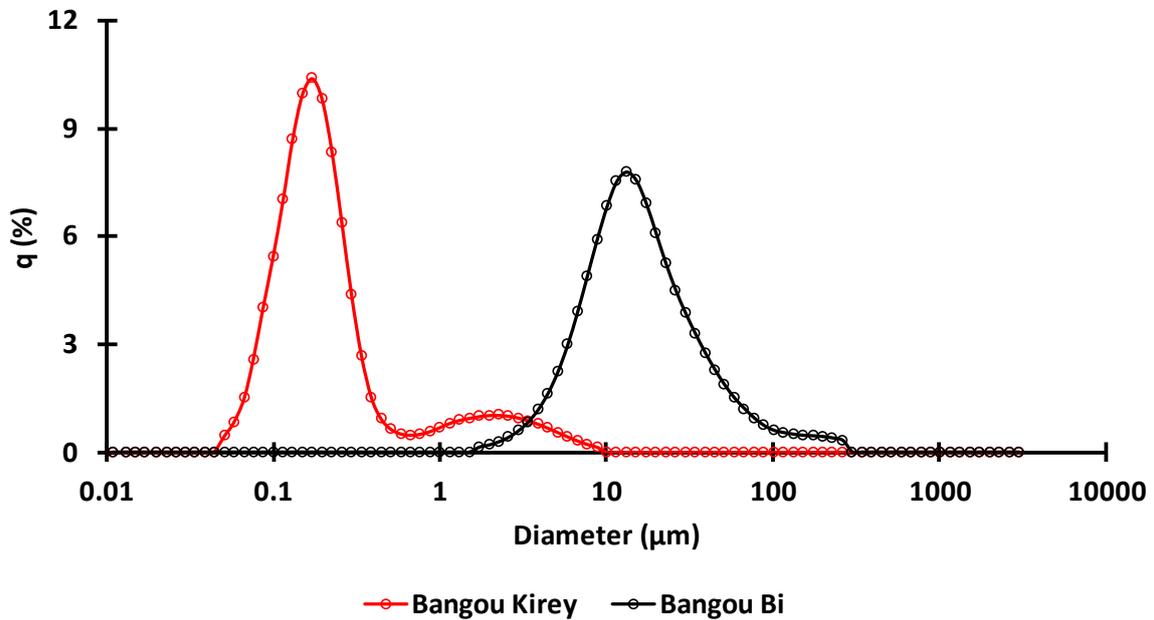


Figure 4. 20 : Courbes granulométrique des matières en suspension des eaux de Bangou Bi et Bangou Kirey.

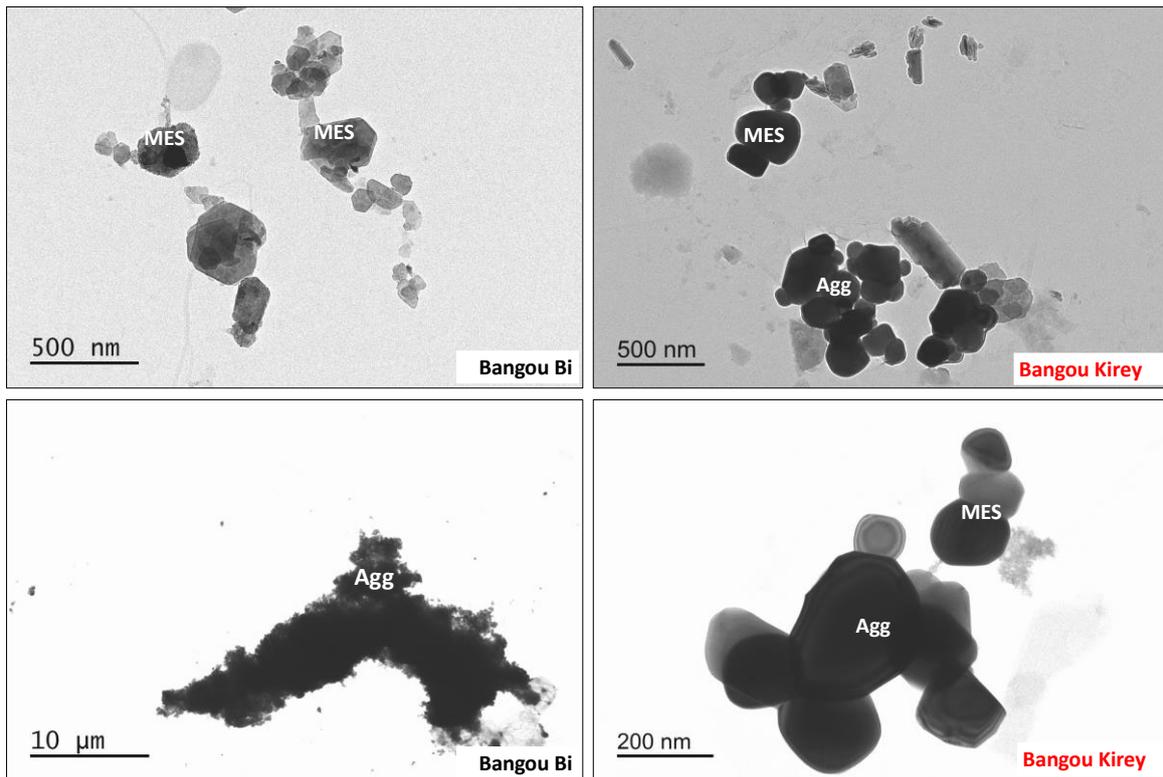


Figure 4. 21 : Images de Matières en suspension des eaux Bangou Bi et Bangou Kirey obtenues par microscope électronique à transmission (MET). MES : Matières en Suspension ; Agg : Agrégat.

## 1.5 Discussion chapitre IV

Ce chapitre a consisté à étudier la dynamique spatiale et temporelle de la concentration en MES du fleuve Niger moyen et des eaux de Bangou Bi et Bangou Kirey grâce à la combinaison de méthodes directes par filtration et de méthodes indirectes par mesures de la couleur des eaux.

La qualité des mesures de concentration en matières en suspension par filtration d'échantillons d'eau n'a pas été impactée par l'utilisation de filtres avec une porosité plus importante ( $0,7 \mu\text{m}$ ) que la taille des particules ( $0,2$  et  $6,71 \mu\text{m}$ ). En effet, les concentrations en MES déterminées avec des filtres de  $0,22 \mu\text{m}$  de porosité ont été très corrélées aux valeurs obtenues avec les filtres de  $0,7 \mu\text{m}$  de porosité, utilisés classiquement pour ce travail. Ainsi, les concentrations en MES des eaux du Niger obtenues par mesures directes, très précises, ont montré une saisonnalité équivalente au niveau des trois sites de suivi, marquées par des faibles valeurs en saison sèche

et de fortes valeurs en saison des pluies. Les mesures en transects entre Saga et Tondi Koirey ont montré des valeurs similaires pour le même état hydrologique du fleuve (basses eaux, crue rouge et crue blanche), avec une variabilité spatiale faible. Ceci dénote de l'absence de contributeur majeur en MES le long de ce transect. Une faible augmentation de la concentration a néanmoins été observée au niveau du point P3 en crue rouge et en basses eaux. Le point P3 se trouve en aval de la confluence du Gouti Yena avec le fleuve Niger. Le Gouti Yena étant le principal exutoire du réseau d'évacuation des eaux pluviales de la ville de Niamey, cette augmentation de concentration en MES à ce point montre donc une contribution de la ville. Les mesures sur les sections de Goudel et Saga ont montré des valeurs de concentration en MES plus importantes sur les points situés à proximité des deux rives, ce qui pourrait indiquer la mobilisation de MES via l'érosion de ces berges par le cours d'eau.

Les concentrations en MES ont été grandement différentes entre les lacs de Bangou Bi et Bangou Kirey avec des valeurs similaires à celles mesurées dans le fleuve Niger pour Bangou-Kirey et des valeurs bien plus faibles pour Bangou-Bi. Ce fait est déjà connu et a été largement documenté. En effet, alors que Bangou Bi est majoritairement alimenté par la nappe phréatique, Bangou Kirey reçoit d'importants apports hydriques par les écoulements de surface de son bassin versant douze fois plus grand que celui de son voisin ouest (**Figure 2. 22**).

Des équations d'inversion ont été développées pour déduire la concentration en MES du fleuve Niger, à partir des réflectances des eaux mesurées in situ par un radiomètre SKYE et par la paire de satellite Sentinel-2A et 2B, basées sur des fonctions non linéaires de type puissance communément employées comme dans **Robert et al. 2016, 2017 et Liu et al. 2017**. Les valeurs de réflectance des eaux du Niger par des mesures in-situ et par satellite se sont avérées efficaces pour suivre la dynamique de la concentration en MES dans le cours moyen du fleuve Niger. Les performances d'inversion obtenues par le radiomètre SKYE et Sentinel-2 ont été très bonnes et généralement meilleures que celles obtenues par d'autres capteurs de télédétection

optique tels que MODIS et Landsat dans la même région (**Kaba et al., 2014 ; Robert et al., 2016 ; Robert et al., 2017**). Cependant, l'utilisation d'une approche à bandes multiples en fonction de la gamme des concentrations en MES, comme suggérée par **Novoa et al (2017)** et **Han et al (2016)** peut constituer une bonne option pour améliorer les inversions de valeurs de concentration en MES et dériver une relation largement applicable sur différents plans d'eau.

Les mesures de la réflectance par le radiomètre SKYE ont montré que le Sunlint affectait de manière significative les mesures in situ. Par conséquent, seule une partie des mesures acquises au cours d'une journée pouvait être utilisée pour étudier la dynamique de la concentration en MES. Pour un suivi à l'échelle infra-journalière plusieurs radiomètres pointant dans des directions différentes pourraient être employés ou des corrections de sunlint basée sur la réflectance dans le SWIR pourraient être appliquées (**Harmel et al., 2018**). Le skyglint n'a pas été corrigé dans le cadre ce travail et entraîne des fluctuations de la réflectance dans le proche infrarouge et le rouge, notamment pour les matinées avec un temps couvert. Le rapport de réflectance est moins affecté par cet effet. Cela est la raison pour laquelle le rapport plus efficace a été utilisé pour la déduction des valeurs de concentration en MES par les données de radiomètre, par opposition à Sentinel-2 où les valeurs de réflectance dans le proche infrarouge ont été plus efficaces. Bien que cela ne soit pas évident sur nos données, de fortes charges d'aérosols peuvent également avoir un impact sur les réflectances dans le proche infrarouge et le rouge du radiomètre SKYE, mais probablement moins sur le rapport de réflectance.

Globalement, les données du rapport de réflectance ont présenté une variabilité relativement faible pendant la matinée, ce qui suggère que les variations de la couverture nuageuse ou du vent ne sont pas des problèmes majeurs ici et que la variabilité rapide de la concentration en MES dans une même journée n'est pas courante. Les valeurs élevées de la réflectance du rouge et du proche infrarouge dans le Niger peuvent atténuer les effets du sunlint et du skyglint. Les mesures routinières de la couleur de l'eau au-dessus de la surface sont principalement

appliquées aux eaux océaniques ou côtières, où ces problèmes sont plus importants (**Mobley, 1999 ; Zibordi et al., 2009**). Les résultats présentés ici suggèrent que ce type de mesures pourrait être utilisé pour les cours d'eau tropicaux turbides, soit seul ou en combinaison avec des données satellitaires à haute résolution, notamment avec les bonnes statistiques obtenues à l'étape de la validation. L'utilisation d'une telle approche à distance mais in situ dans la mesure de la concentration en MES représente un réel avantage par rapport au suivi par un turbidimètre classique. En effet, ce type de mesures assurent à la fois le suivi continu même en période de crues exceptionnelles et est relativement mieux préservé et en sécurité par rapport à un turbidimètre qui pourrait être immergé par les eaux.

Les réflectances du capteur multispectral MSI de Sentinel-2 acquises pour la station de Niamey ne semblent pas être affectées par les problèmes de sunglint : la station de Niamey est située sur le bord ouest de la tuile de Sentinel-2 et, étant donné que le satellite passe à environ 10h30 du matin, la réflexion spéculaire du soleil est peu probable sur ce site. Ce n'est pas le cas pour le site d'Ansongo qui se trouve à la limite Est de la tuile Sentinel-2 et qui peut donc être soumis à des effets de réverbération solaire. Ces effets entraîneraient une surestimation des valeurs de concentration en MES déduites sur ce site. Ceci sous-estimerait la différence observée entre Niamey et Ansongo mais ne changerait pas les résultats de manière significative.

Globalement, le schéma de correction atmosphérique appliqué par la chaîne MAJA s'est avéré suffisamment efficace pour suivre la variabilité de la concentration en MES des eaux du fleuve Niger moyen. Cependant, certains problèmes subsistent. Il s'agit notamment de l'impact des aérosols (poussières minérales) sur les réflectances mesurées par Sentinel-2, comme l'indiquent les valeurs présentant plus de dispersion dans le proche infrarouge et la bande rouge par rapport aux valeurs de réflectance obtenues par le radiomètre SKYE au cours de la période janvier-avril (**figure 4. 10**).

Les valeurs de concentration en MES des eaux du Niger à Niamey obtenues par mesures directes et indirectes ont montré une importante variabilité intra-annuelle. Les maximas de concentration en MES ( $\sim 2$  g/L) du fleuve Niger à Niamey ont été enregistrés au début de la saison des pluies entre juin et juillet. Ces valeurs sont beaucoup plus élevées que celles mesurées dans le cours supérieur du fleuve Niger à Banankoro (0,6 g/L, **Picouet et al., (2009)** mais inférieure à celles observées sur le Gorouol à Alcongui (3,751 g/L en 2007/08, **Amogu, 2009**). Les fortes concentrations en MES observées dans le cours moyen du fleuve Niger sont probablement liées à la faible couverture végétale au début de la saison des pluies entraînant une forte érosion des sols. En effet, ces sols ont connu un encroûtement important, devenus plus sujet à l'érosion, entraînant le drainage d'importantes quantités de sédiments dans le fleuve (**Mamadou, 2012**). Les mesures de la concentration en MES précédemment effectuées dans le fleuve Niger à Niamey, bien que discontinues pour certaines, ont montré des valeurs du même ordre de grandeur variant entre 0,182 g/L et 1,5787 g/L (**Alhou et al., 2016 ; Siddo et al., 2022**). Dans les grands fleuves d'Afrique de l'Ouest, le Sénégal (**Faye et al., 2020**) et le Black Volta à Tanguasie (**Bowan et Tingan, 2020**), les mesures de la concentration en MES étaient respectivement 1,4 et 2,15 fois inférieures à celles du Moyen Niger.

La baisse de la concentration en MES observée lors de la montée des eaux devrait être liée à la conjugaison des effets du développement de la végétation sur le bassin versant et à la diminution des éléments libres sur les surfaces déjà lessivées par les premières pluies. Une diminution similaire de la concentration en MES intervenant à la même période a été observée dans le lac Bangou Kirey et a été attribuée à un effet de dilution par remontée des eaux de la nappe phréatique (**Abdourhamane Touré et al., 2016**). A la fin de la crue blanche et avant la période des basses eaux, la concentration en MES du fleuve a présenté une légère augmentation, en l'absence d'apport d'eau par ruissellement. Cette augmentation peut être attribuée à la diminution du volume d'eau conduisant à une production locale de particules par le phénomène

d'effondrement des berges. De plus, la période mars-avril est caractérisée par une augmentation de la vitesse des alizés (harmattan) qui pourrait remettre en suspension les sédiments (**Abdourhamane Touré et al., 2016**). Une augmentation similaire au milieu de la saison sèche a été observée pour les lacs sahéliens au nord du Mali (**Robert et al., 2017**), la turbulence induite par le vent pouvant induire une recirculation des sédiments de fond et des rives.

Les hystérésis MES/débit du fleuve Niger à Niamey ont présenté des différences avec la plupart des autres systèmes hydrologiques. Pendant la crue rouge, la courbe MES/débit suit le scénario classique observé en zone tropicale, le maximum de concentration en MES se produisant avant le pic de débit. Ce scénario s'observe également à l'exutoire du fleuve Congo (**N'kaya et al., 2020**), sur le Mississippi (**Snedden et al., 2007**) et sur l'Orénoque (**Gallay et al., 2019**). Cependant, une différence majeure réside dans le fait que la courbe de débit du fleuve Niger à Niamey présente un second pic absent dans ces autres systèmes. Ce pic est caractérisé par de faibles valeurs de concentration en MES, démarquant la partie moyenne du fleuve Niger. En termes de variabilité interannuelle, la crue rouge de 2020, qui a constitué un record depuis l'installation de la station hydrologique de Niamey, n'a pas montré une augmentation notable de la concentration en MES du fleuve.

Les caractéristiques des matières en suspension, leur petite taille combinée à leur forte concentration, ont donné des valeurs très élevées de la réflectance des eaux mesurées dans cette zone dans les bandes visible et du proche infrarouge. La nature des MES dans le Moyen Niger à la latitude de Niamey est dominée par la présence de kaolinite, des oxyhydroxydes de fer et de quartz. Cette composition est cohérente avec la nature des sols sahéliens sableux et sablo-limoneux (**Stroosnijder, 1982**) et des roches affleurantes dominées par les grès ferrugineux du continental terminal (**Yaou et al., 2019**). Les oxyhydroxydes de fer, présents en importante quantité pendant la crue rouge proviendraient alors de l'érosion de ces surfaces. La kaolinite

provient des sols du bassin moyen, reconnus comme peu réactifs en raison de cette nature kaolinique (**Mahamane et al., 2020**).

La granulométrie des matières en suspension des eaux de Bangou Bi et Bangou Kirey a révélé des particules assez différentes par leur taille au niveau des deux lacs. Les MES de Bangou Kirey sont constituées majoritairement de particules, encore plus fines que celles du fleuve Niger, donnant des niveaux inédits de réflectance (**Grippa et al., en préparation**). A Bangou Bi la courbe granulométrique des MES a montré des particules de plus grandes tailles. Cependant l'observation sous MET a également montré des particules très fines à Bangou Bi. Ce qui suggérerait que ces dernières s'organisent préférentiellement en agrégats.

## **1.6 Conclusion chapitre IV**

Cette étude a permis de documenter la variabilité spatio-temporelle de la concentration en MES des eaux du fleuve Niger moyen ainsi que de Bangou Bi et Bangou Kirey grâce à des mesures par filtration et à des mesures de la couleur des eaux. Les mesures radiométriques in situ et satellitaires ont montré une bonne efficacité pour le suivi de la dynamique de la concentration en MES. Les MES, dans cette zone, sont caractérisées par de très fines particules de kaolinite et d'oxyhydroxydes de fer qui, à des concentrations élevées, donnent des valeurs de réflectance élevées aussi bien pour le fleuve Niger que pour les deux lacs à l'est de Niamey.

De bonnes relations ont été établies entre les valeurs radiométriques (proche infrarouge/rouge pour le radiomètre SKYE in situ et proche infrarouge (B8) pour l'instrument multispectrale de Sentinel-2) et les concentrations en MES par filtration. Cela a permis de déduire les concentrations en MES du Niger à Niamey avec un pas de temps journalier (mesures SKYE) et d'analyser leurs variabilités spatiales dans le fleuve Niger moyen (Sentinel-2). La crue rouge a été caractérisée par des valeurs de concentration en MES très élevées avec des valeurs

maximales atteintes au moins un mois avant le maximum du débit, tandis que de faibles valeurs ont été enregistrées pendant la crue blanche et en basses eaux. La contribution importante en MES de l'affluent principal du fleuve Niger moyen (la Sirba) a également été mise en évidence pendant la crue rouge expliquant la différence entre les valeurs de concentration en MES à Niamey et à Ansongo, situé en amont. Enfin, la variabilité interannuelle des débits de la crue rouge n'a pas joué un rôle majeur sur les valeurs de concentration en MES. Les valeurs de MES après juillet en 2020 étaient similaires à celles des deux années précédentes, malgré des valeurs de débit record mesurées en 2020 à Niamey. Cependant, les variations futures de la concentration en MES sous l'effet des changements climatiques et anthropiques, comme par exemple l'intensification du cycle hydrologique ou la construction de barrages en amont de Niamey (barrage de Kandadji), leurs impacts sur la concentration en MES à Niamey ne pouvant être exclus, soulignent fortement la nécessité de maintenir la surveillance des matières en suspension dans cette zone.

## Chapitre V – Dynamique spatio-temporelle de la teneur en *Escherichia coli* dans le fleuve Niger à Niamey

---

### 1.1 Teneur du fleuve Niger en *Escherichia coli* à l'amont et à l'aval de la ville de Niamey

La teneur en *Escherichia coli* (*E. coli*) indicatrice de contamination fécale a varié entre 27 et 81 000 NPP/100mL, au niveau du site principal d'échantillonnage de Goudel entre 2018 et 2021 (**figure 5. 1a**). 100 % des teneurs mesurées ont été supérieures à la limite de détection, qui est de 27 NPP/100mL avec la méthode du nombre le plus probable. L'ensemble des teneurs en *E. Coli* mesurées à Goudel était donc au-delà de la valeur seuil fixée par l'OMS pour l'utilisation d'une eau à des fins de boisson. De plus, seulement 14 % des mesures d'*E. coli* à cette station ont été inférieures à la valeurs seuil de 200 NPP/100mL de l'OMS pour les eaux de baignade. Les teneurs en *E. coli* au niveau du site de Tondi Koirey (amont de Goudel) mesurées entre le 15 avril et le 16 août 2020 ont varié entre 27 et 25 000 NPP/100mL. Comme pour le site de Goudel 100% et 14% de ces mesures n'ont pas remplis les conditions de la norme de l'OMS pour un usage respectivement en eau de boisson et de baignade. La moyenne des teneurs en *E. coli* pour cette période a été plus importante à Goudel comparativement à Tondi Koirey (**tableau 5. 1**), mais les dynamiques au niveau des deux sites ont été similaires (**figure 5. 1b**) Pour six mesures la teneur en *E. coli* a été significativement plus élevée à Goudel par rapport à Tondi Koirey et deux pics relevés à Tondi Koirey ont été absents au niveau du site de Goudel (**figure 5. 1b**, matérialisés par les cercles bleus).

Tableau 5. 1 : Moyenne et écart-type de la teneur en *E. coli* du fleuve Niger à Niamey. \* = mesures réalisées sur la rive droite de Saga.

Teneur en <i>E. coli</i> (NPP/100mL)	Tondi Koirey	Goudel	Saga
<b>15 juillet au 16 août 2019</b>			
Moyenne	/	3 362	6 450*
Ecart-type	/	2 968	5 863*
<b>20 avril au 16 août 2020</b>			
Moyenne	3 873	7 224	50 417
Ecart-type	6 002	15 089	78 646
<b>15 mars au 12 août 2021</b>			
Moyenne	/	2 057	50 654
Ecart-type	/	4 171	69 444

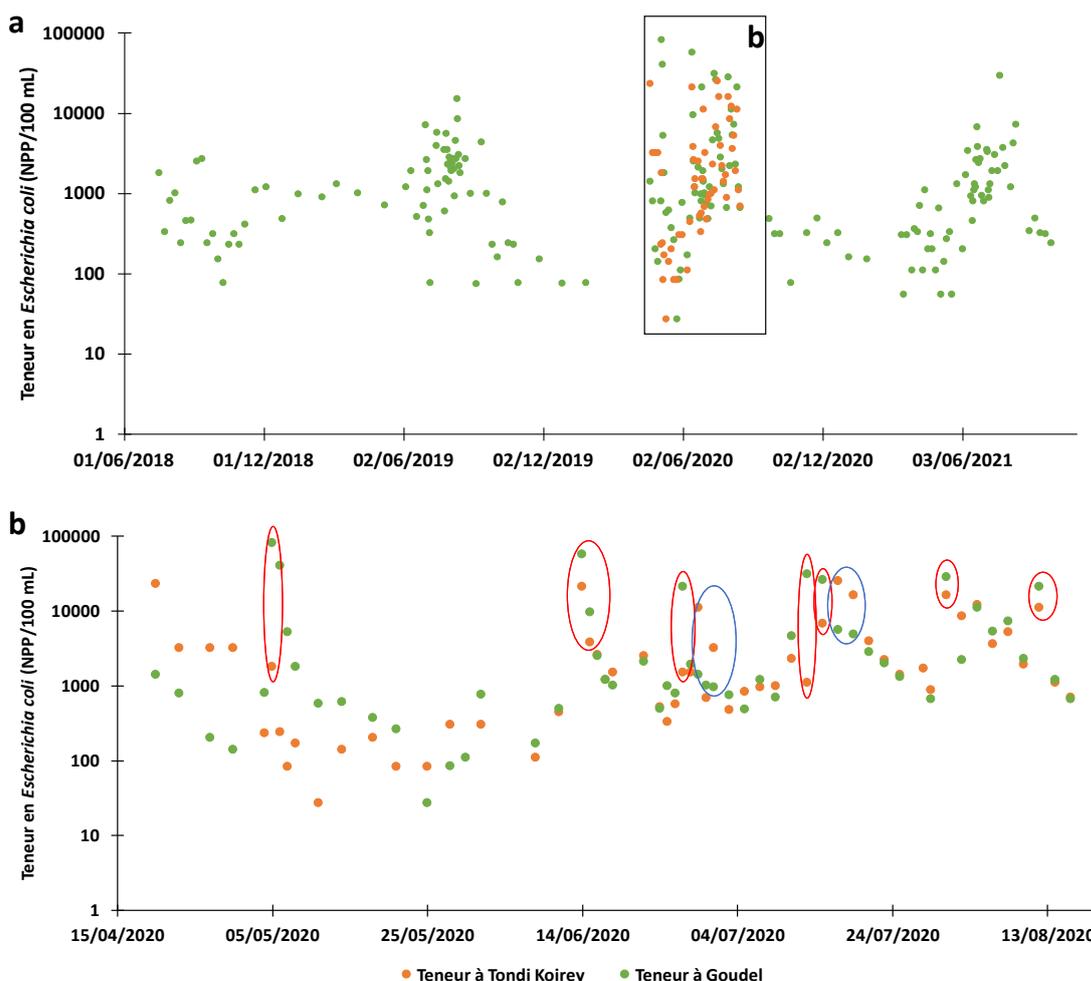


Figure 5. 1 : Dynamique de la teneur en *E. coli* du fleuve Niger a) au niveau des sites amonts de Niamey (juin 2018-août 2021) la période encadrée représente le zoom pendant la campagne de 2020 en b).

Le suivi de la teneur en *E. coli* du fleuve Niger entre juillet 2019 et août 2021 a varié entre 2 300 à 420 000 NPP/100mL au niveau du site de Saga (aval de la ville de Niamey) (**figure 5. 2**). Les teneurs au niveau de ce site ont été en totalité au-dessus de la limite pour permettre une utilisation des eaux à des fins récréatives. Les teneurs mesurées sur la rive droite du site de Saga entre juillet et août 2019 ont été en moyenne 8 fois plus faibles que celles mesurées en 2020 et 2021 sur la rive gauche. Cependant les teneurs en 2019 sur la rive droite ont été deux fois plus importantes que celles déterminées sur la même période à Goudel en rive gauche (**figure 5. 2**). En 2020 et 2021, pour les périodes de mesures communes (avril à août 2020 et mars à août 2021), la moyenne des teneurs en *E. coli* du fleuve, mesurée sur la rive gauche a été 16 fois plus importante à Saga par rapport à la moyenne des valeurs obtenues à Goudel (**figure 5. 2**).

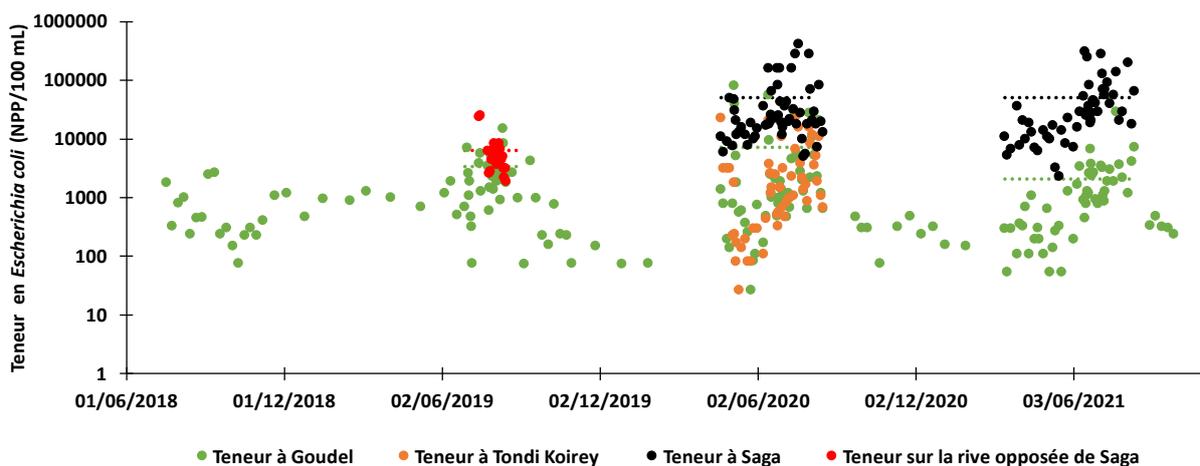


Figure 5. 2 : Teneur en *E. coli* du fleuve Niger aux stations de Saga, Goudel et Tondi Koirey entre 2018 et 2021. La moyenne de chaque période est représentée en pointillés.

## 1.2 Dynamique spatiale de la teneur en *Escherichia coli* dans le fleuve Niger entre l'amont et l'aval de Niamey

La teneur en *E. coli* a été mesurée pendant les trois principales phases du cycle hydrologique le long du transect du fleuve Niger entre Saga (aval) et Tondi Koirey (amont) (**figure 5. 3**). Trois portions se sont distinguées le long du transect. Il s'agit de :

- L'amont (P12 à P9) où quelle que soit la phase hydrologique, les teneurs en *E. coli* ont été intermédiaires avec des moyennes égales à 1 424 (écart-type : 2324) en basses eaux (BE), 705 (écart-type : 145) en crue rouge (CR) et 1 740 NPP/100mL (écart-type : 852) en crue blanche (CB).
- La portion médiane (P8 à P6) comprenant la station de Goudel où les teneurs ont été les plus faibles en BE et CB avec respectivement une moyenne égale à 83 (écart-type : 1) et 256 NPP/100mL (écart-type : 92). Les teneurs de la portion médiane ont été légèrement supérieures que celles de l'amont en CR avec une moyenne de 793 NPP/100mL (soit une différence de 88 avec la portion amont).
- L'aval de Goudel où les plus fortes teneurs ont été enregistrées. Ces teneurs ont été en moyenne égales à 58 480 NPP/100mL (écart-type : 91 113) en BE, 22 320 NPP/100mL (écart-type : 26 844) en CR et 20 658 NPP/100mL (écart-type : 27 160) en CB et confirment le rôle de la ville de Niamey dans la pollution du fleuve.

Par ailleurs, des points particuliers sont apparus comme des *hots* de pollution en *E. coli*. Il s'agit de P3, P5, P10 (**figure 5. 3**). Le point P3 se trouve à l'aval des confluences de Gounti Yéna, principal affluent du Niger à Niamey qui draine des eaux usées vers le fleuve. P5 marque l'entrée d'un caniveau drainant les eaux usées de l'Hôpital National de Niamey (HNN) et des ministères ; tandis qu'à P10 se trouve un abattoir artisanal (voir **Figure 2. 22**).

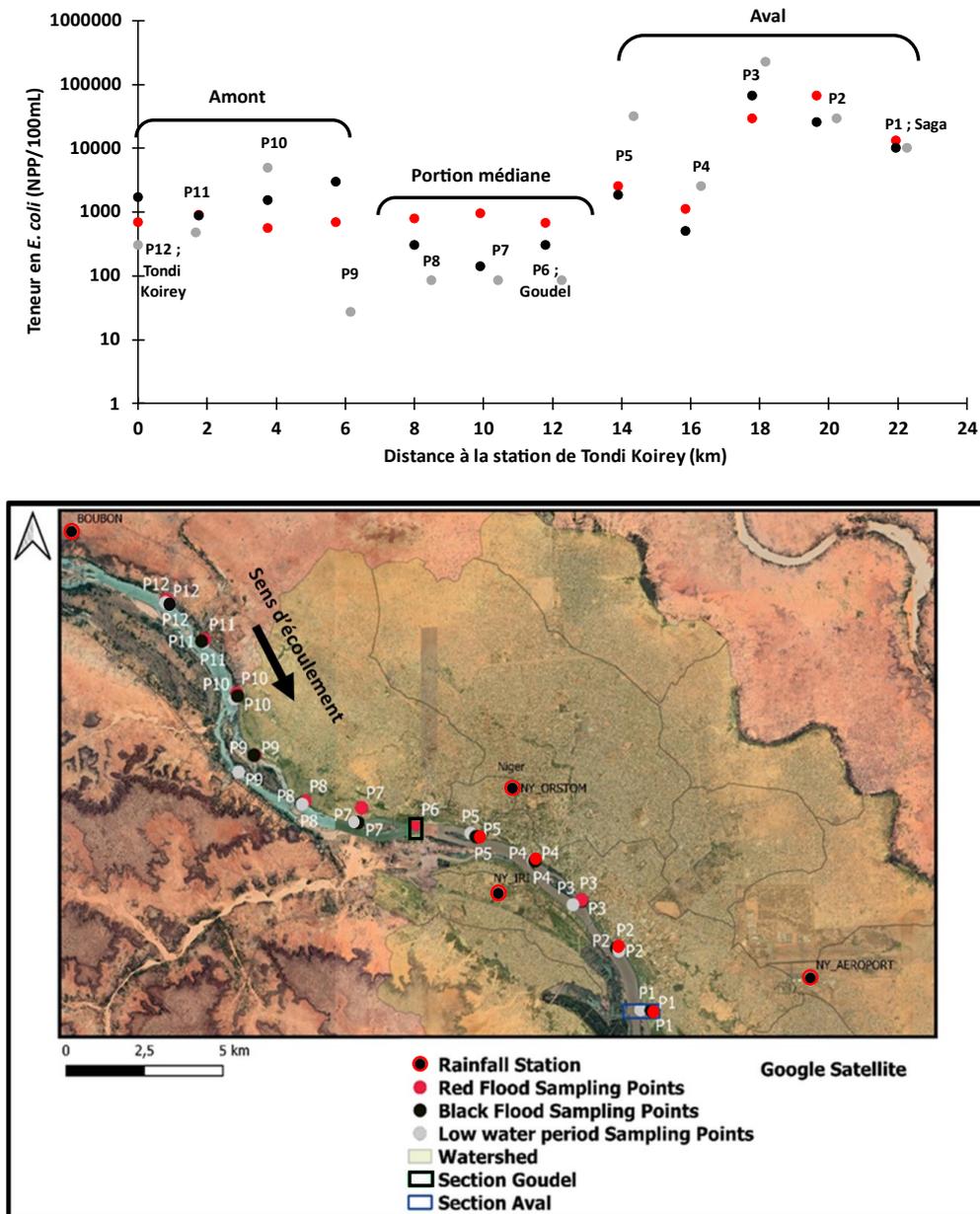


Figure 5. 3 : Haut : Teneur en *E. coli* du fleuve Niger le long du transect de mesures (Saga-Tondi Koirey) en crue rouge (points rouges), en crue blanche (points noirs) et en basses eaux (points gris). Bas : Schéma avec la localisation des sites de prélèvement (image du fond : @Google Earth).

### 1.3 Dynamique spatiale de la teneur en *Escherichia coli* d'une rive à l'autre du fleuve Niger

Les teneurs en *E. coli* le long de la section de Goudel ont varié sur les trois phases majeures du cycle hydrologique du fleuve Niger. Les points situés à proximité de chaque rive ont présenté des teneurs 3 et 8 fois plus importantes que celles des eaux médianes respectivement lors des

mesures de basses eaux et crue blanche (**figure 5. 4**). Pour ces périodes, la moyenne des différences entre les mesures réalisées à proximité des berges et celles faites au milieu du cours d'eau a été de 281 NPP/100mL. Au cours des mesures réalisées lors de la crue rouge, les teneurs ont été relativement plus homogènes d'une rive à l'autre avec une différence de 15 NPP/100mL entre les deux points les plus proches des berges et ceux des eaux médianes.

Les mesures sur la section de Saga ont concerné quatre points en basses eaux au lieu de six pour les dates en crues rouge et blanche. Ceci est dû à la largeur variable du fleuve Niger à Saga selon l'épisode hydrologique (**figure 5. 5**). Pour l'ensemble des trois périodes de mesures, la rive gauche a été caractérisée par une teneur en moyenne 11 fois plus importante comparativement au milieu du cours d'eau et à la rive droite (**figure 5. 5**). Les points situés à proximité de la rive gauche (moins de 20m) ont ainsi présenté une teneur en *E. coli* 6, 7 et 14 fois plus importante que ceux à côté de la rive droite (moins de 20m) respectivement en basses eaux, en crue blanche et en crue rouge. Ces résultats sont dans le même sens que ceux des mesures réalisées au niveau de Saga et Goudel au cours des trois années (**figure 5. 2**). Par ailleurs, contrairement à Goudel qui a présenté des valeurs plus élevées en crue rouge, la valeur maximale des teneurs en *E. coli*, à la section de Saga a été mesurée en basses eaux (19 000 NPP/100mL). Enfin, la plus faible valeur a été obtenue en crue blanche avec 27 NPP/100mL au niveau de S5.

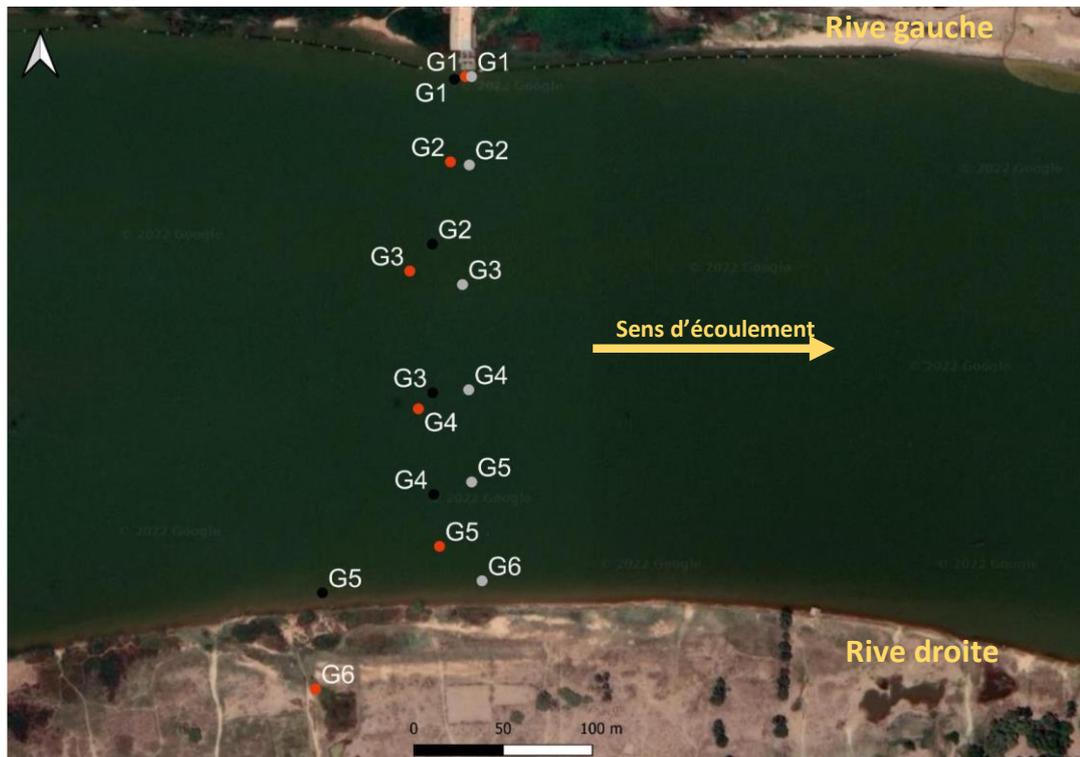
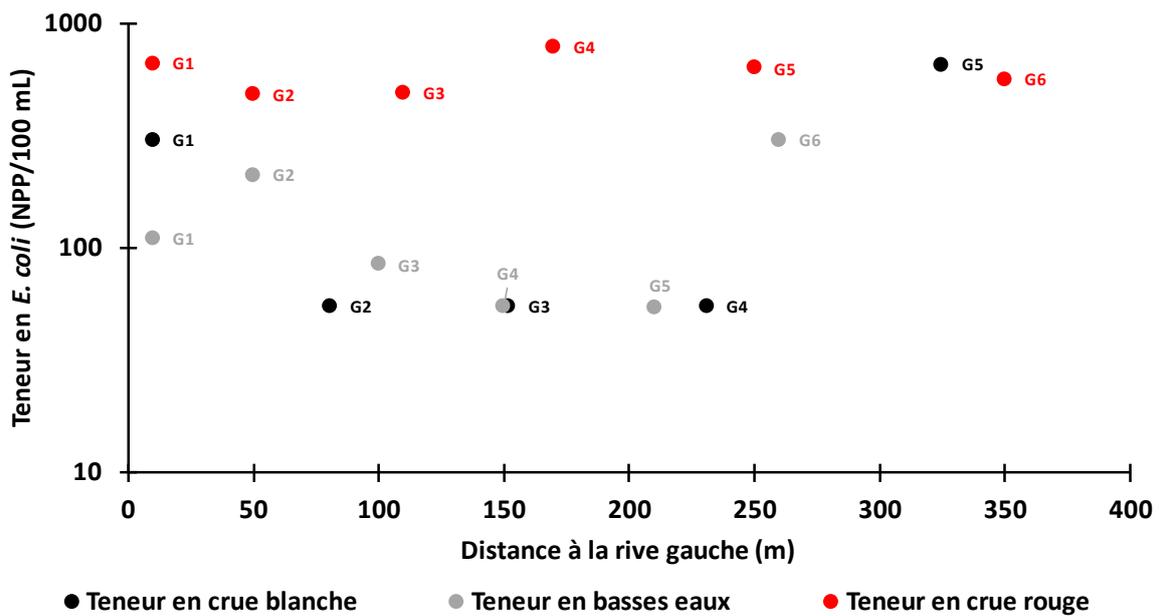


Figure 5. 4 : Haut : Teneur en *E. coli* du Niger le long de la section de Goudel en crue rouge (points rouges), en crue blanche (points noirs) et en basses eaux (points gris). Bas : Localisation des sites de mesures (image de fond = @Google Earth).

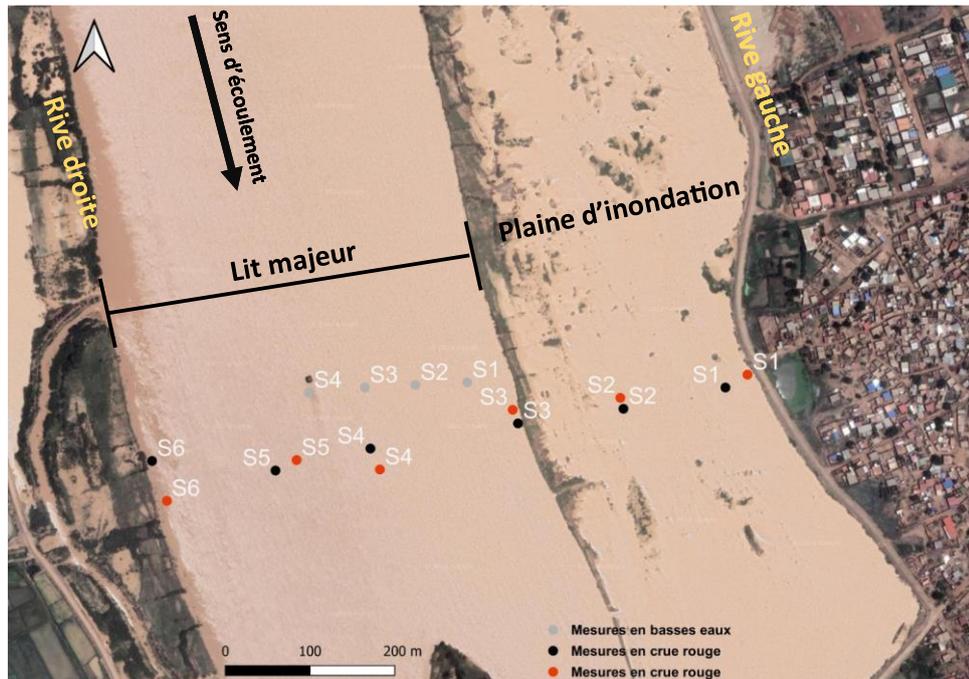
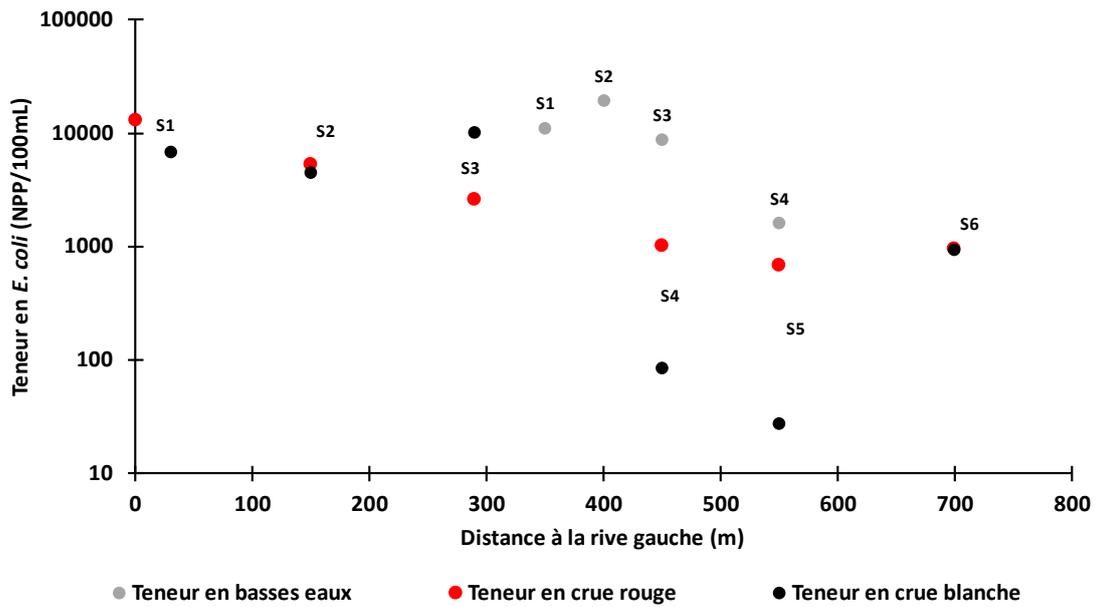


Figure 5. 5 : Teneur en *E. coli* du fleuve Niger le long de la section de Saga en crue rouge (points rouges), en crue blanche (points noirs) et en basses eaux (points gris). Bas : Localisation des sites de prélèvement (image de fond = @Google Earth).

#### 1.4 Teneur en *Escherichia coli* des lacs de Bangou Bi et Bangou Kirey

Au cours de la période de mesures (15 mars-11 août 2021), la teneur en *Escherichia coli* a varié, entre 1 et 6 800 NPP/100mL à Bangou Bi et entre 1 et 11 000 NPP/100mL à Bangou Kirey. Quatre mesures au total ont présenté une teneur inférieure à la limite de détection de 27

NPP/100mL, et se sont vus attribuer la valeur arbitraire de 1 NPP/100mL dans la **figure 5. 6**. 65% et 59% des teneurs en *E. coli* mesurées ont été inférieures à la norme pour les eaux de baignade respectivement à Bangou Bi et Bangou Kirey.

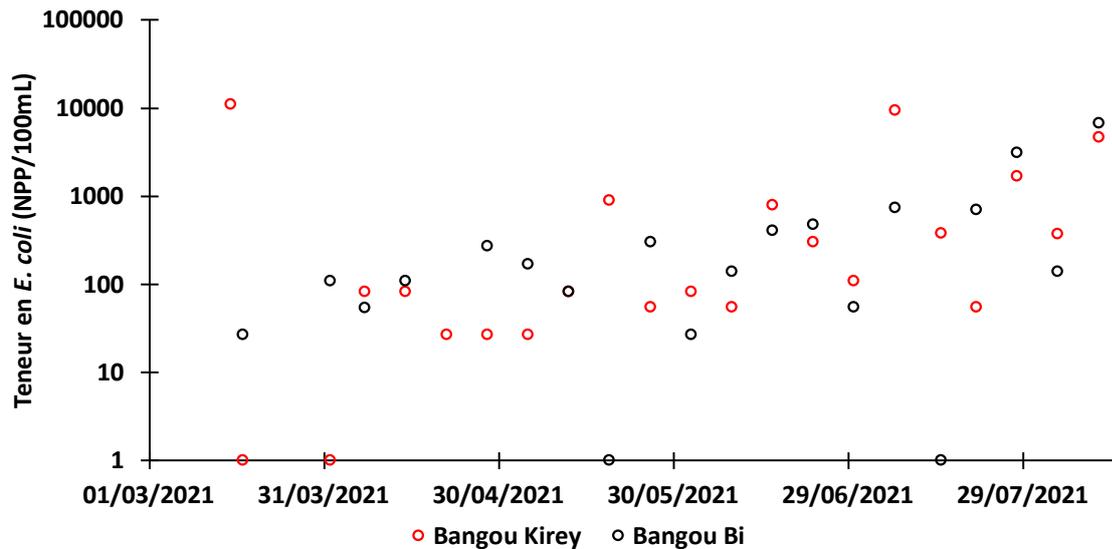


Figure 5. 6 : Teneur en *E. coli* des eaux de Bangou Bi et Bangou Kirey.

### 1.5 Dynamique spatiale des paramètres physico-chimiques des eaux du fleuve Niger à Niamey

Les paramètres physico-chimiques des eaux du fleuve Niger ont été mesurés sur le fleuve Niger durant une partie de l'année 2020 au niveau des trois stations, et uniquement à Saga et Goudel en 2021. En moyenne le pH a été neutre et similaire au niveau des trois stations avec des valeurs conformes aux valeurs optimales recommandées par les directives pour l'eau potable de l'OMS. La température des eaux a également été similaire d'un site à l'autre. Cependant, la conductivité a montré des valeurs plus élevées en allant des sites situés en amont vers l'aval de la ville. Cette augmentation de la conductivité pourrait être liée aux rejets de la ville. En moyenne la conductivité a été en-deçà des recommandations pour l'eau potable. Il faut noter que les valeurs

de conductivité n'ont pas fait l'objet de correction suivant une température standard (20°C ou 25°C) pouvant améliorer les interprétations entre différents échantillons de différents sites. L'oxygène dissous a, pour sa part, montré des valeurs différentes pour les trois sites, comprises dans la gamme de recommandation pour l'eau de boisson (**tableau 5. 2**). La dynamique temporelle des paramètres physico-chimiques ainsi que celle des MES ont été similaire pour les trois sites de mesures (**figure 5. 7**).

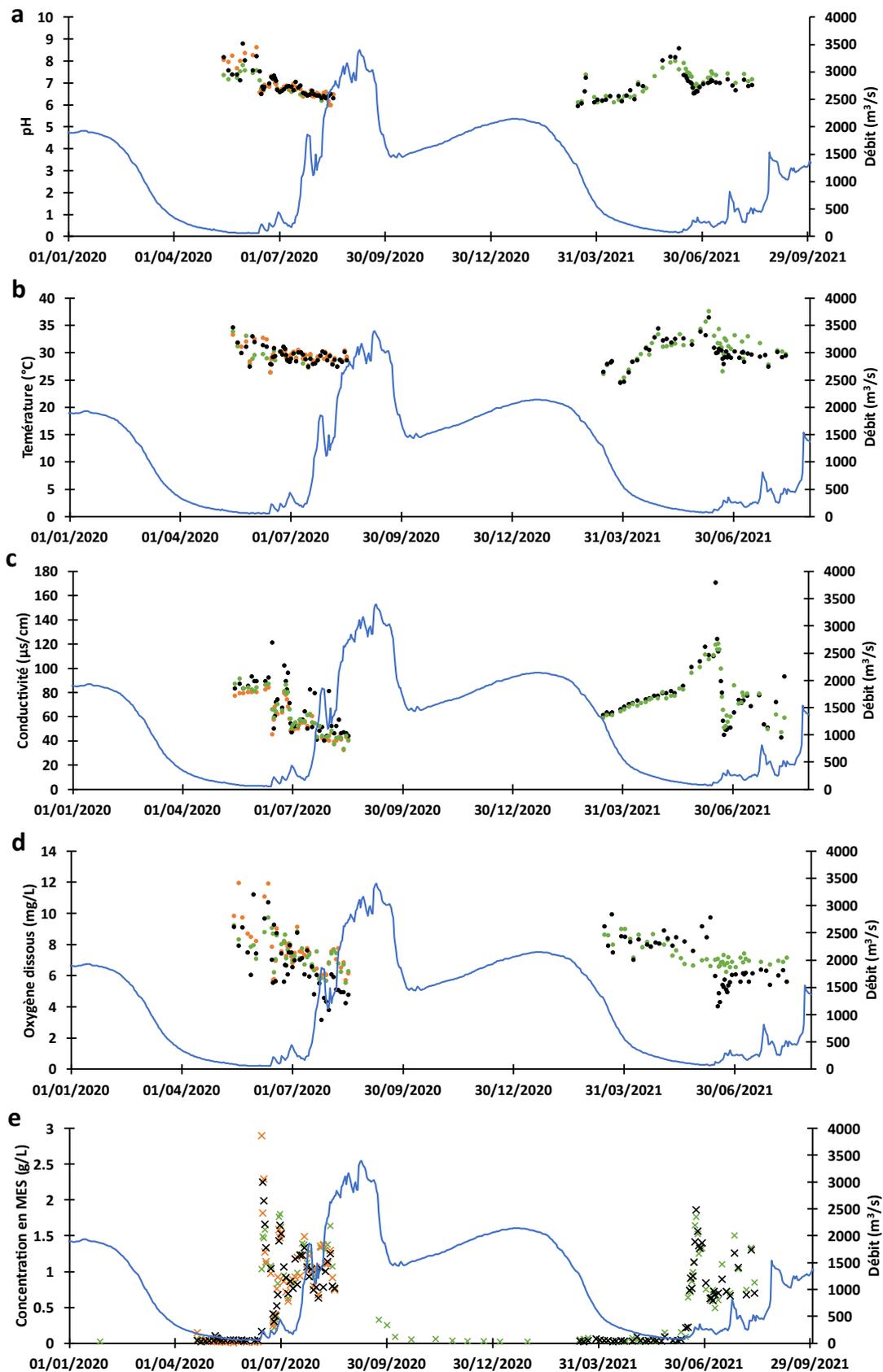


Figure 5. 7 : Dynamique des paramètres physico-chimiques et des MES aux différents sites de mesure sur le fleuve Niger. a) pH, b) température, c) conductivité, d) oxygène dissous, e) MES. Tondi Koirey = en orange, Goudel = en vert, Saga = en noir.

Tableau 5. 2 : Moyenne et écart-type des paramètres physico-chimiques, des MES et des teneurs en *E. Coli* au niveau des trois sites de mesures sur la rive gauche pour la période des mesures commune (20/04 au 16/08/2020).

Paramètres physico-chimiques	Tondi Koirey	Goudel	Saga
<b>pH</b>			
Moyenne	6,9	6,8	6,9
Ecart-type	0,6	0,4	0,5
<b>Température (°C)</b>			
Moyenne	29,6	29,3	29,5
Ecart-type	1,4	1,32	1,5
<b>Conductivité (µs/cm)</b>			
Moyenne	57	61,5	66,6
Ecart-type	14,9	16,7	20
<b>Oxygène dissous (mg/L)</b>			
Moyenne	7,6	7,4	6,6
Ecart-type	1,5	1	1,7
<b>MES (g/L)</b>			
Min	0,0095	0,0115	0,0235
Max	2,9	1,803	2,246
<b><i>E. coli</i> (NPP/100mL)</b>			
Min	27	27	5 100
Max	25 000	81 000	420 000

### 1.6 Paramètres physico-chimiques des eaux de Bangou Bi et Bangou Kirey

Les paramètres physico-chimiques des eaux des lacs de Bangou Bi et Bangou Kirey, mesurés entre le 17 mars et 11 août 2021 ont présenté des valeurs assez différentes pour les deux lacs. Alors que Bangou Bi a montré un pH avec une tendance basique, Bangou Kirey a présenté un pH plutôt acide (**tableau 5. 3**). De plus les valeurs de la température, de la conductivité et de l’oxygène dissous ont été plus importants à Bangou Bi comparativement à Bangou Kirey. La dynamique temporelle des différents paramètres physico-chimiques a montré une corrélation significative entre les mesures effectuées dans les deux pour la température et la conductivité (coefficients de détermination respectif de  $0,65 - p < 0,0001$  et  $0,45 - p < 0,005$ ) et pas de corrélations significatives pour le pH et l’oxygène dissous (**figure 5. 8**).

Tableau 5. 3 : Paramètres physico-chimiques des lacs de Bangou Bi et Bangou Kirey.

Paramètres physico-chimiques	Bangou Bi	Bangou Kirey
<b>pH</b>		
Moyenne	7,8	6,6
Ecart-type	0,8	0,6
<b>Température (°C)</b>		
Moyenne	31,5	27,9
Ecart-type	2	1,6
<b>Conductivité (µs/cm)</b>		
Moyenne	101	69, 3
Ecart-type	6	17,2
<b>Oxygène dissous (mg/L)</b>		
Moyenne	9,1	7
Ecart-type	2,4	1,2

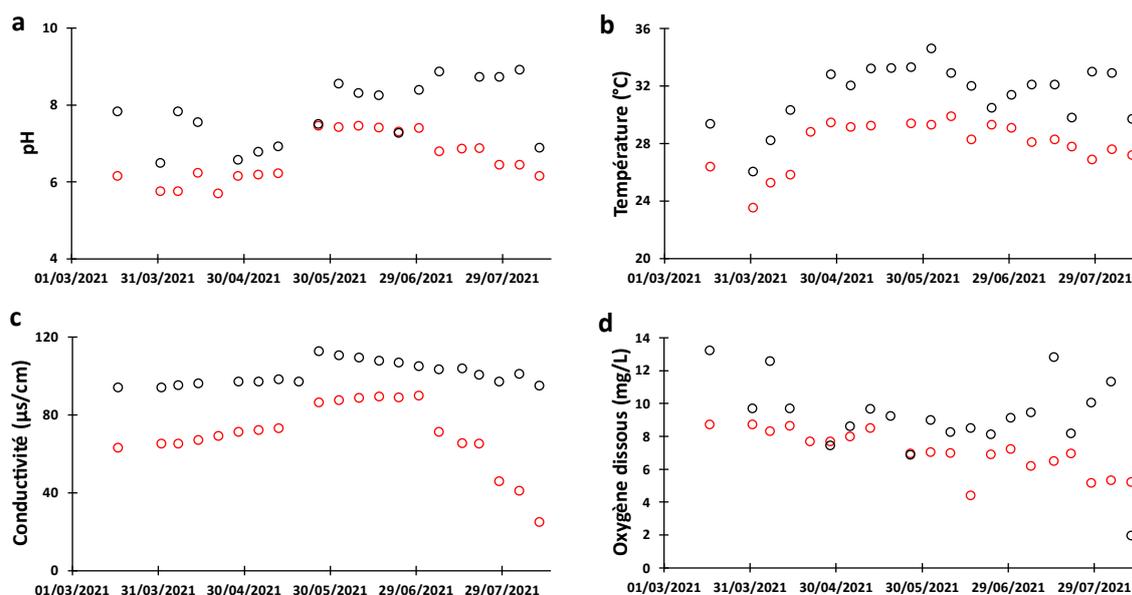


Figure 5. 8 : Dynamique temporelle des paramètres physico-chimiques des eaux de Bangou Bi et Bangou Kirey : a) pH ; b) température ; c) conductivité ; d) oxygène dissous.

## 1.7 Dynamique temporelle de la Teneur en *Escherichia coli* du fleuve Niger et lien avec les variables environnementales

### 1.7.1 Dynamique de la teneur en *Escherichia coli* en lien avec les précipitations et le débit

La teneur en *E. coli* a connu une variation saisonnière marquée avec de faibles valeurs pendant la saison sèche (octobre – avril), mais aussi une variabilité interannuelle importante (figure 5.

9a). La teneur moyenne en *E. coli* à Goudel durant la saison sèche 2018-2019 a été de 816 NPP/100mL, soit 2 fois plus importante que celle de 2019 – 2020 et 2,7 fois plus importante que celle de 2020-2021 (**figure 5. 9b**). Les plus fortes teneurs en *E. coli* ont été enregistrées durant les saisons des pluies (mai – septembre) avec des valeurs moyennes six fois plus importantes qu'en saison sèche au niveau du site principal de mesures. La moyenne des teneurs de la saison des pluies 2020, 7 454 NPP/100mL, a été la plus élevée atteignant 2,9 fois celle de 2019 et 2,8 fois celle de 2021 (**figure 5. 9b**). La teneur en *E. coli* de la saison sèche a semblé indépendante de celle de la saison des pluies précédente. En effet, la teneur en *E. coli* durant la saison sèche 2020 – 21 a été la plus faible alors que cette période suit la saison des pluies ayant enregistré la plus forte pollution en *E. coli*.

La dynamique temporelle de la teneur en *E. coli* sur le site principal de Goudel a montré des valeurs différentes selon les phases du cycle hydrologique du fleuve Niger (**figure 5. 9c**) :

- Les plus fortes teneurs en *E. coli* ont été mesurées lors de la montée de crue rouge. Ainsi plus le débit a été important pendant la phase de montée de la CR, ce qui est synonyme de plus de pluies ruisselantes, plus la pollution en *E. coli* a été forte. Lorsque les débits maximaux de la crue rouge ont atteint ~3300 et 2700 m<sup>3</sup>/s en 2020 et 2019, les teneurs moyennes en *E. coli* ont été respectivement de 6 768 (écart-type = 11 680) et 2 779 NPP/100mL (écart-type = 2 736).
- La décrue de la crue rouge est la 2<sup>ème</sup> période en termes d'importance de la teneur en *E. coli*. La différence de teneur entre la montée et la décrue de la crue rouge a été plus importante en 2020 lorsque le débit de la crue rouge a atteint des valeurs très élevées.
- La teneur en *E. coli* n'a pas montré de tendance claire pendant la montée et la décrue de la crue blanche. Lors des cycles hydrologiques de 2019-2020 et 2020-2021, la phase de montée de la crue blanche a présenté en moyenne deux fois plus d'*E. coli* que la phase

de décrue. En 2018-2019, c'est une situation inverse qui a été observée avec la décrue de crue blanche qui a présenté deux fois plus d'*E. coli* que lors de la montée.

- Pour les basses eaux : la teneur en *E. coli* n'a pas montré une tendance claire. Cependant, la moyenne des teneurs en *E. coli* de 2020 a présenté une valeur plus importante que la phase de montée de la crue rouge en raison du démarrage précoce de la saison des pluies dans la zone de Niamey (figure 5. 9b et c).

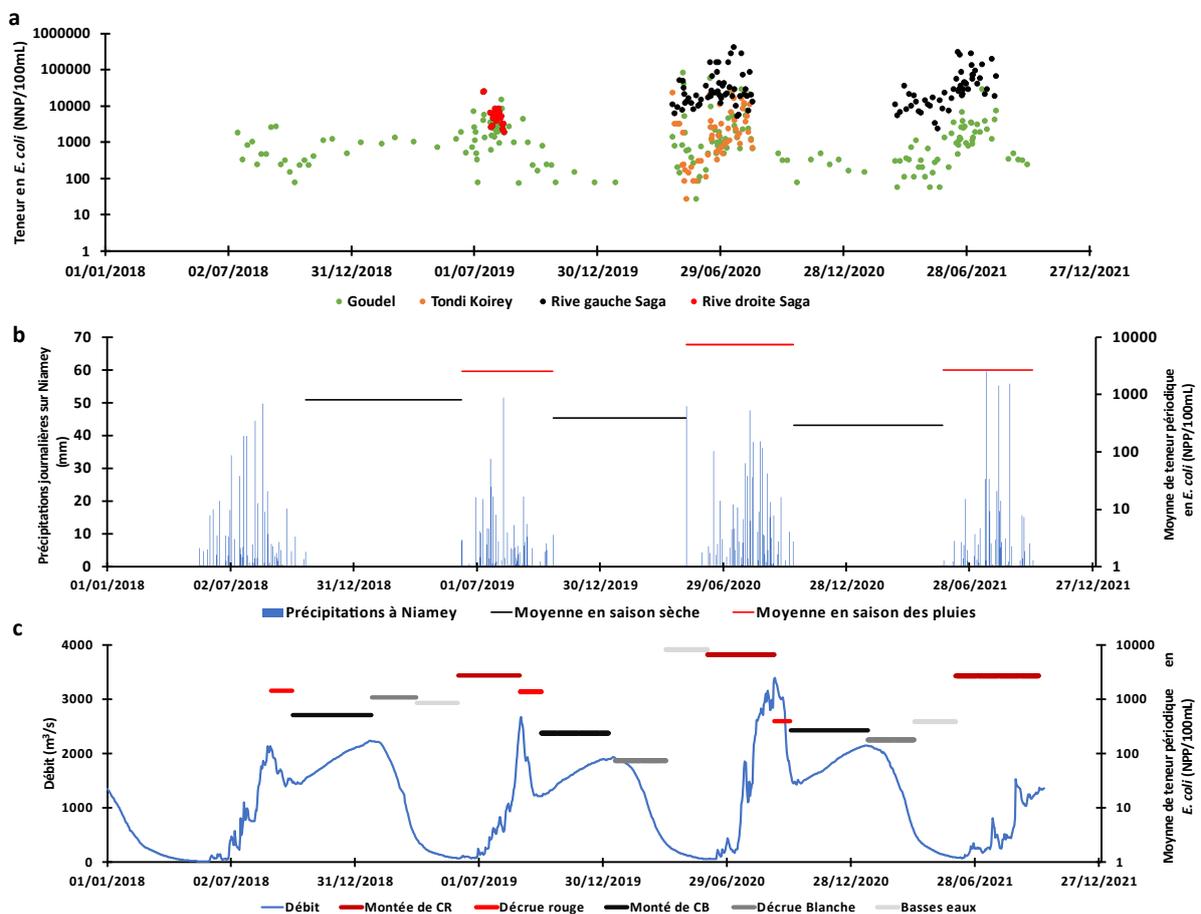


Figure 5. 9 : a) Dynamique temporelle de la teneur en *E. coli* du fleuve Niger au niveau des différents sites de mesures (points verts = Goudel, points oranges = Tondi Koirey, points rouges = rive droite de Saga et points noirs = rive gauche de Saga) ; b) Moyenne de la teneur en *E. coli* à Goudel pendant la saison des pluies (trait rouge) et la saison sèche (trait noir) ; c) Moyenne de la teneur en *E. coli* au cours des phases du cycle hydrologique (phase de montée de crue rouge = en rouge brique, descente de crue rouge = rouge clair, montée de crue blanche = noir, descente de crue blanche = gris foncé, basses eaux = gris clair).

La teneur en *E. coli* du fleuve Niger à Niamey (Tondi Koirey, Goudel, Saga) a été mise en relation avec les précipitations journalières tombées sur la zone de Niamey (**Figure 2. 23**). La teneur en *E. coli* du fleuve Niger a montré différents comportements vis-à-vis des événements pluvieux :

Les premiers événements de pluies ont été suivies par une augmentation de la teneur en *E. coli* au niveau des trois sites de mesures (Tondi Koirey, Goudel et Saga). La pluie du 29 juin 2019 (21,16 mm) a en effet été suivie d'une importante hausse de la teneur en *E. coli* au niveau de la station de Goudel. La valeur de la teneur en *E. coli* mesurée après cet événement a été 10 fois plus importante que celle mesurée avant. Un scénario similaire a été observé en 2020 : la pluie du 05 mai (49,01 mm) a été suivie par une hausse de la teneur en *E. coli* d'environ 8, 101 et 6 fois, respectivement à Tondi Koirey, Goudel et Saga par rapport aux valeurs mesurées avant l'évènement (**figure 5. 10**).

Les jours qui ont suivi les événements pluvieux, les teneurs en *E. coli* ont montré une tendance à la baisse et ont retrouvé les valeurs qu'elles avaient avant les pluies surtout lorsque ces dernières étaient suivies d'une période sèche (absence de pluie). Cependant certaines précipitations n'ont pas provoqué de hausse systématique de la teneur en *E. coli* (**figure 5. 10**). Globalement, la teneur en *E. coli* du site de Goudel a montré une meilleure corrélation avec les précipitations journalières de la zone de Niamey par rapport aux autres sites.

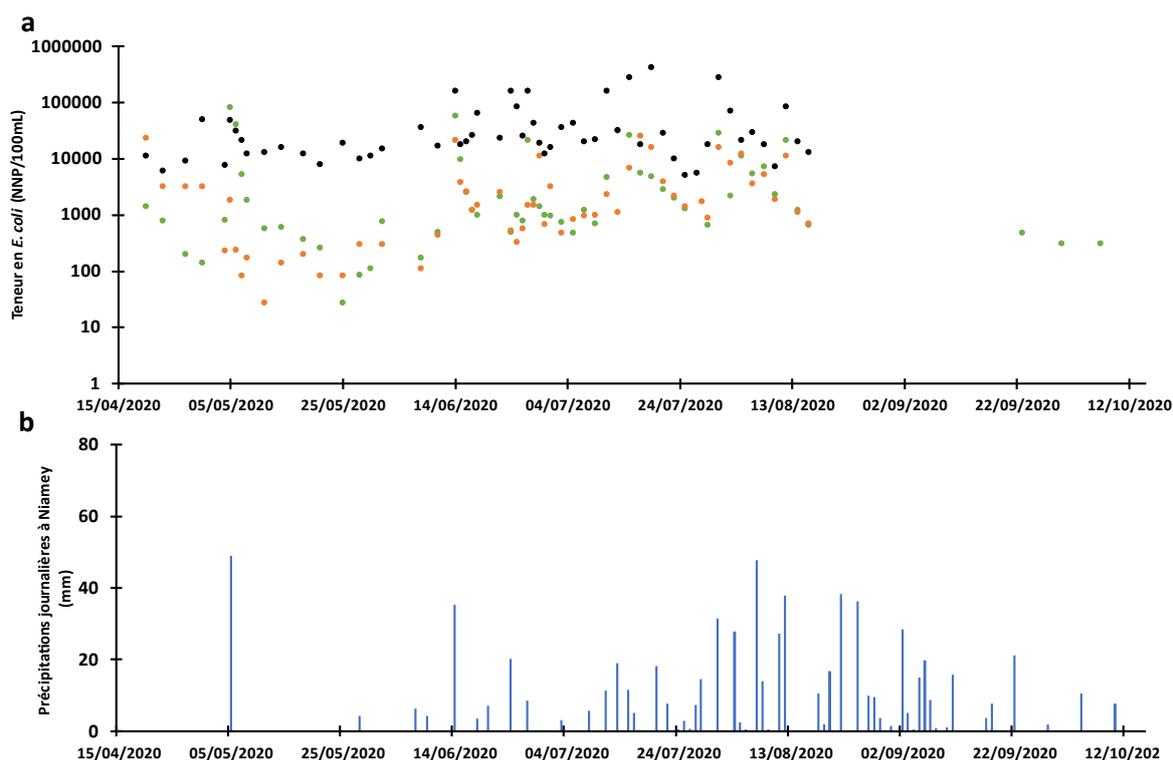


Figure 5. 10 : a) Teneur en *E. coli* du fleuve Niger au niveau des trois stations de mesure de Niamey au cours de la saison des pluies de 2020, b) Précipitations journalières à Niamey.

Tableau 5. 4 : Coefficient de corrélation entre la teneur en *E. coli* des eaux et les variables environnementales (précipitations, MES, pH, température, conductivité et oxygène dissous).

Variables environnementales	Tondi Koirey	Goudel	Saga	Bangou Bi	Bangou Kirey
Précipitation journalière à Niamey	0,28** (n = 55)	0,55**** (n = 143)	0,24** (n = 116)	0,56 (n = 8)	0,03 (n = 8)
Concentration en MES	0,39*** (n = 55)	0,12 (n = 170)	0,05 (n = 132)	0,94**** (n = 20)	0,50** (n = 21)
pH	-0,36** (n = 45)	-0,04 (n = 92)	-0,07 (n = 91)	0,01 (n = 20)	-0,1 (n = 20)
T	-0,46**** (n = 45)	-0,22** (n = 92)	-0,16 (n = 93)	-0,12 (n = 20)	0,04 (n = 20)
Conductivité	-0,37** (n = 45)	-0,19* (n = 92)	0,32*** (n = 94)	-0,27 (n = 20)	-0,29 (n = 20)
Oxygène dissous	-0,24 (n = 45)	0,006 (n = 92)	-0,34*** (n = 93)	-0,66**** (n = 20)	-0,4* (n = 20)

\*\*\*\* =  $p < 0,0001$     \*\*\* =  $p < 0,01$     \*\* =  $p < 0,05$     \* =  $p < 0,1$

Afin de mieux déterminer l'impact des évènements pluvieux dans la zone de Niamey sur les fluctuations de la teneur en *E. coli* du fleuve Niger, mesurées aux différents sites, les variations d'*E. coli* sur des intervalles des deux jours ont été calculées entre le 1<sup>er</sup> juillet 2019 et le 16 août 2020. Ces variations au niveau des trois stations de mesure n'ont pas montré de corrélations significatives avec le cumul de précipitations sur les même jours (**figure 5. 11**). Il n'y a pas de tendances claires qui se dégagent mais, les précipitations supérieures à 30 mm ont été dans 100% des cas suivies par une augmentation de la teneur en *E. coli* à Goudel et à Tondi Koirey et dans 50% des cas seulement au niveau du site de Saga. Les pluies intermédiaires (10-30 mm) ont été suivies dans 30% des cas par une augmentation à Goudel, 40% à Tondi Koirey et 75% à Saga. **La figure 5. 11** montre une augmentation de la teneur en *E. coli* même après de faibles précipitations (inférieures à 10 mm). Ceci met en évidence l'influence des surfaces urbaines, notamment avec l'imperméabilisation des terrains. Par ailleurs, une augmentation de teneur en *E. coli* a été observé pour Goudel, Tondi Koirey et Saga après respectivement un minimum de pluies dans la zone de 1,95 mm ; 5,56 mm et 0,48 mm. Ces augmentations seraient davantage dues à des fluctuations « normales » de la teneur en *E. coli*. Enfin, des variations de ces teneurs ont également été observées en absence de pluie.

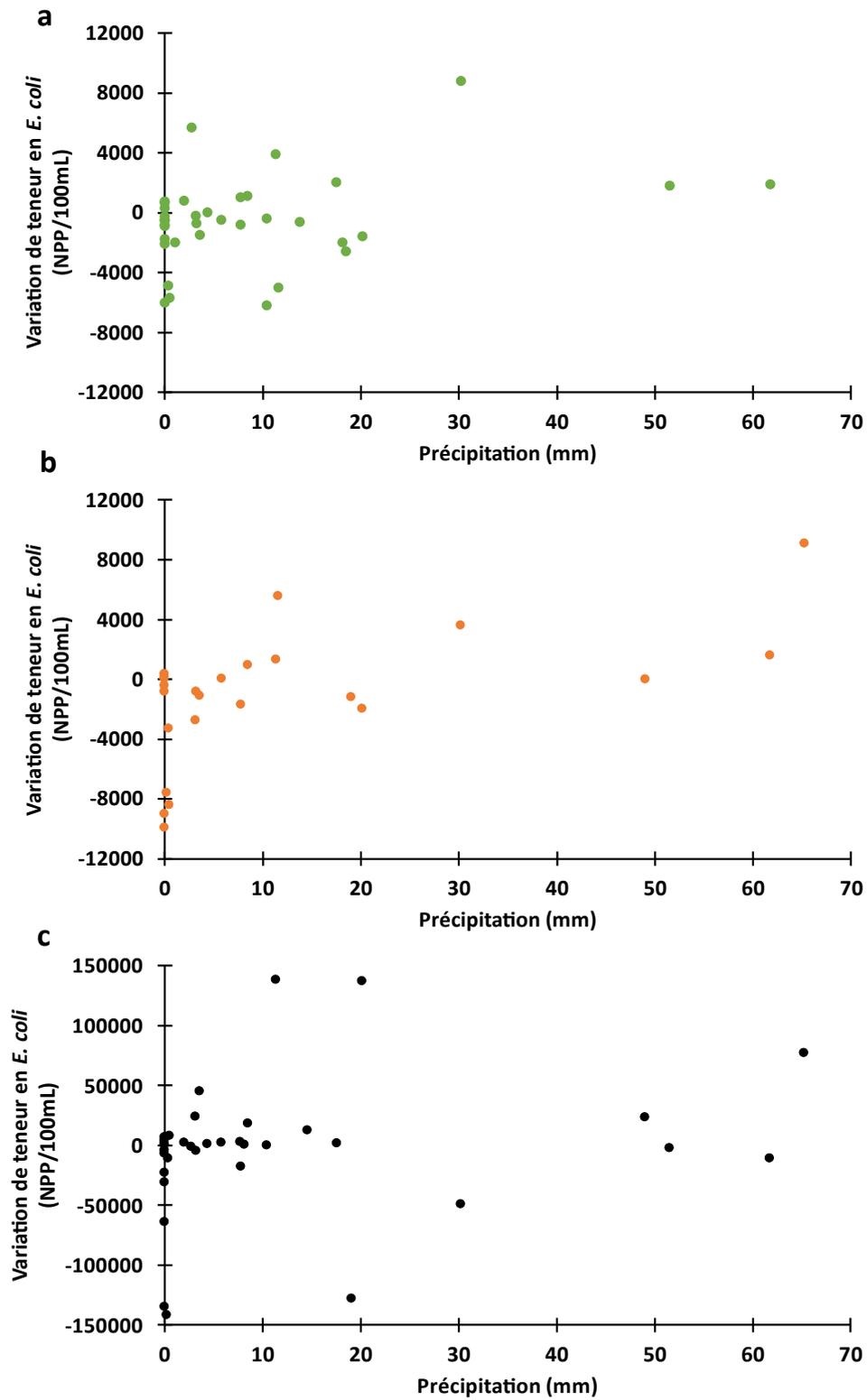


Figure 5. 11 : Relation entre les variations de la teneur en *E. coli* du fleuve Niger à Goudel (a), Tondi Koirey (b) et Saga (c) et les précipitations.

### 1.7.2 Dynamique temporelle de la teneur en *Escherichia coli* des lacs de Bangou Bi et Bangou Kirey et lien avec les précipitations

Les teneurs en *E. coli* ont été en moyenne de 117 NPP/100mL (écart-type : 97) à Bangou Bi et 955 NPP/100mL (écart-type : 3 027 ; **figure 5. 12**) à Bangou Kirey entre mars et juin 2021 (deuxième partie de la saison sèche). Il faut noter que la moyenne de Bangou Kirey a hautement été influencée par la valeur très élevée du 17 mars. Sans cette valeur, la moyenne des teneurs en *E. coli* pour cette période à Bangou Kirey a été équivalente à celle de Bangou Bi, 117 NPP/100mL (écart-type : 245). Pendant les mois de juin à août, correspondant à la saison des pluies, les teneurs en *E. coli* ont été multipliées par 11 et 16 respectivement à Bangou Bi et Bangou Kirey (par rapport à la valeur moyenne de saison sèche qui exclue le 17 mars) (**figure 5. 12**). Les teneurs en *E. coli* de Bangou Bi et Bangou Kirey n’ont pas montré de corrélation significative avec les précipitations journalières (**tableau 5. 4**).

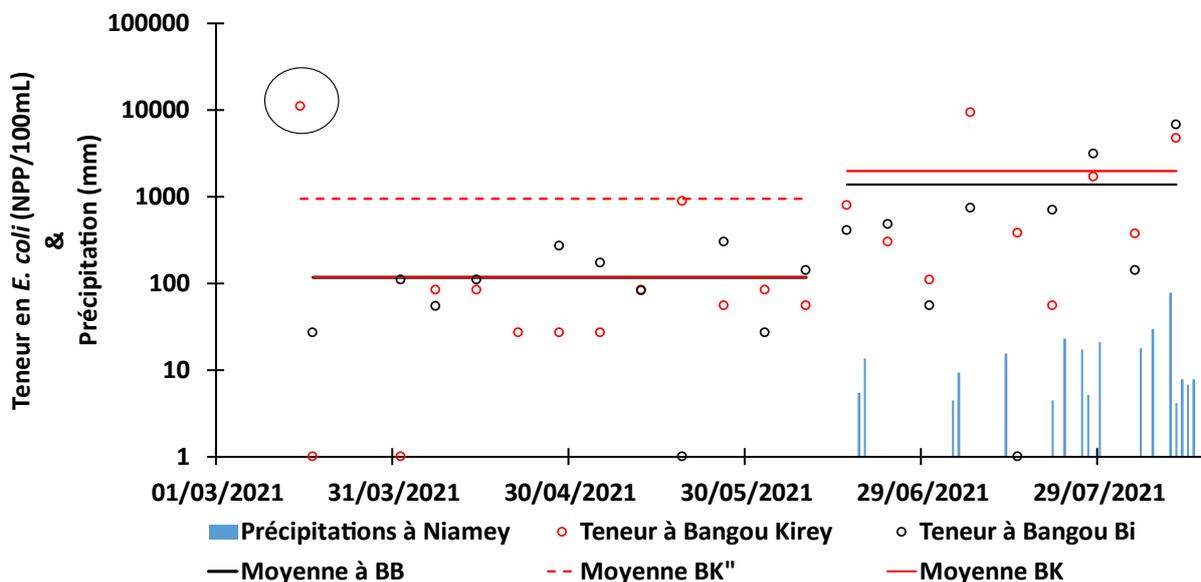


Figure 5. 12 : a) Dynamique temporelle de la teneur en *E. coli* des eaux de Bangou Bi (figurés noirs) et Bangou Kirey (figurés rouges). « Moyenne BK'' » représente la moyenne des teneurs à Bangou Kirey prenant en compte la valeur haute du 17 mars 2021.

### 1.7.2.1 Relations entre les teneurs en *Escherichia coli* et les concentrations en MES du fleuve Niger à Niamey

L'évolution temporelle des concentrations en matières en suspension et des teneurs en *E. coli* des eaux du fleuve Niger a montré plusieurs scénarios distincts (**figure 5. 13**) :

- Pendant la période entre octobre et avril (au cœur de la saison sèche) les deux paramètres ont été caractérisés par leurs plus faibles valeurs.
- La période d'avril et mai a été caractérisée par des valeurs importantes d'*E. coli* alors que la concentration en MES était encore faible (**tableau 5. 5 ; figure 5. 13**). Suite aux premiers évènements de pluie, les deux paramètres ont montré une augmentation, mais celle-ci a été bien plus importante pour la teneur en *E. Coli* (environ 31 fois) que pour la concentration en MES (environ 3 fois). Toutefois, cette augmentation, reste faible par rapport aux valeurs maximales de l'année.
- Lorsque la saison des pluies s'est installée les deux paramètres ont montré une tendance à l'augmentation jusqu'à atteindre leurs valeurs maximales au cours des mois de juin-juillet. La période de juin à août a été caractérisée par les plus fortes teneurs à la fois en *E. coli* et en MES (**tableau 5. 5**). Après la saison des pluies les concentrations des deux paramètres ont baissé en même temps (**tableau 5. 5 ; figure 5. 13**).

Pour les trois sites, les dynamiques temporelles des deux paramètres (concentration en MES et teneur en *E. coli*) pendant les trois années ont montré de très faibles corrélations (**figure 5. 14 ; tableau 5. 4**), avec une valeur significative seulement pour le site de Tondi Koirey (mais qui explique seulement 15% de la variance).

*Tableau 5. 5 : Moyenne de la teneur en E. coli et concentration en MES au cours de l'année.*

<b>Moyenne</b>	<b>Avril-mai</b>	<b>Juin-août</b>	<b>Septembre-mars</b>
<b>MES (g/L)</b>	0,0386	0,974	0,045
<b><i>E. coli</i> (NPP/100mL)</b>	7096	20 487	7 664

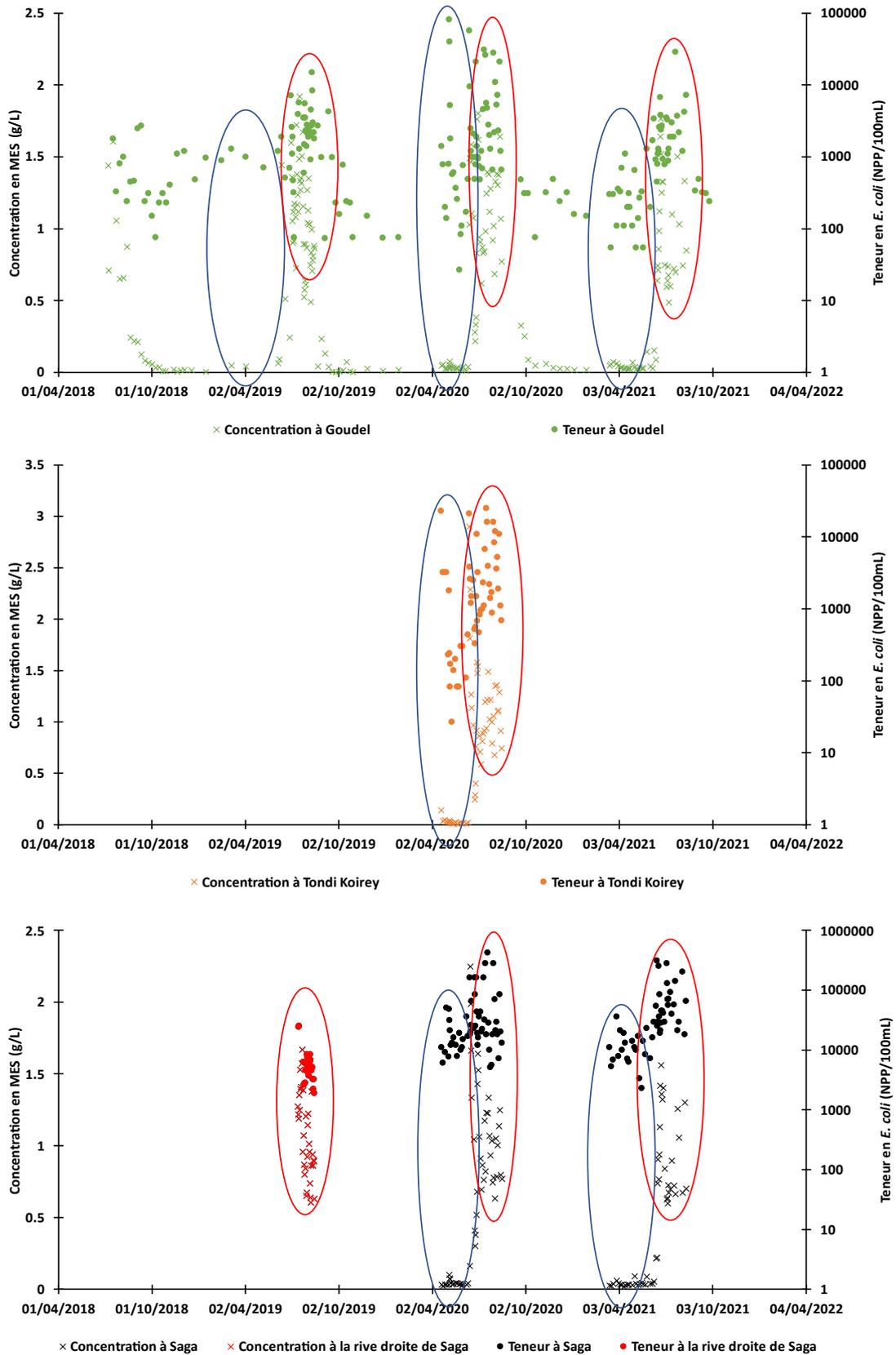


Figure 5. 13 : Dynamique de la teneur en *E. coli* et de la concentration en MES du fleuve Niger à Goudel, Saga et Tondi Koirey. Les cercles bleus représentent les périodes de fortes teneurs en *E. coli* et de faibles concentrations en MES. Les cercles rouges concernent les périodes des fortes teneurs en *E. coli* et de concentrations en MES.

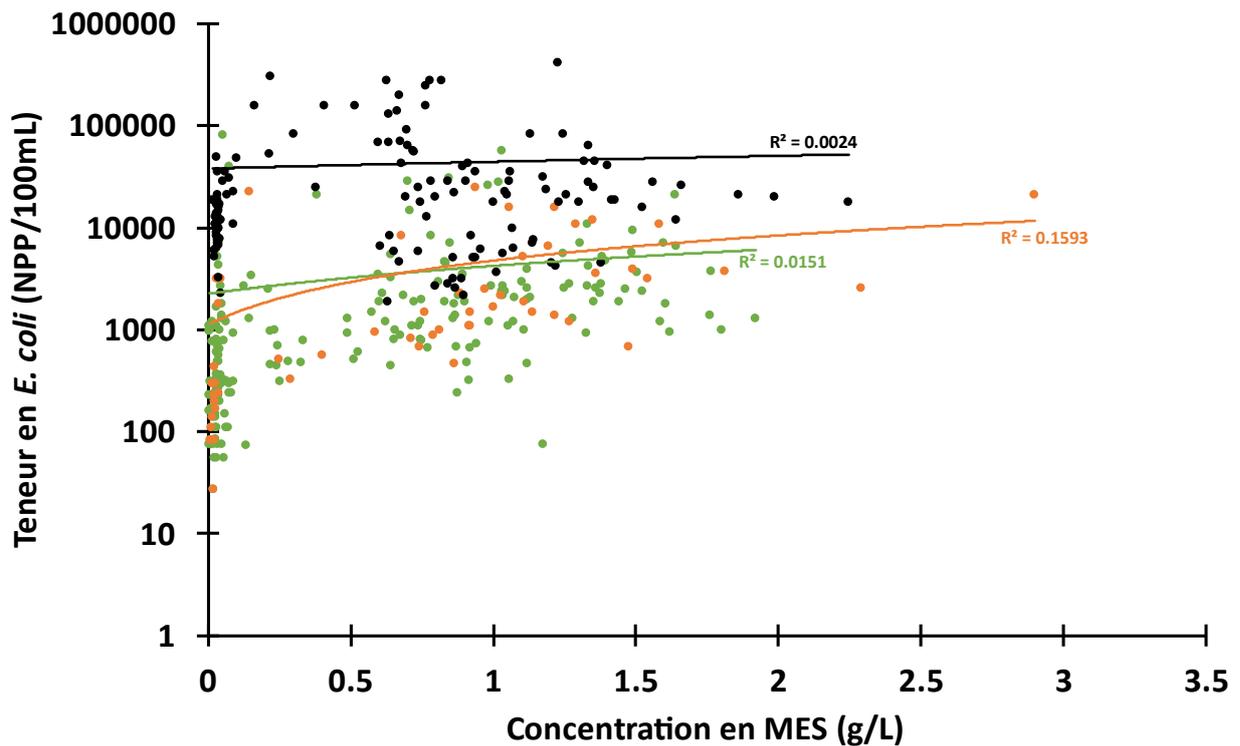


Figure 5. 14 : Teneur en *E. coli* versus concentration en MES des eaux du fleuve Niger aux trois stations de mesure.

### 1.7.2.2 Dynamique de la teneur en *Escherichia coli* et de la concentration en MES des eaux de Bangou Bi et Bangou Kirey

Les teneurs en *E. coli* des lacs de Bangou Bi et Bangou Kirey ont présenté leurs plus faibles valeurs au même moment que les concentrations en MES. Les maximas pour les deux paramètres ont aussi été mesurés au cours de la même période avec des pics qui sont souvent apparus aux mêmes dates (**figure 5. 15**). Les concentrations en MES et les teneurs en *E. coli* dans ces lacs ont été significativement corrélées avec notamment des valeurs de  $R^2$  plus élevées pour Bangou Bi comparativement à Bangou Kirey (**figure 5. 16**).

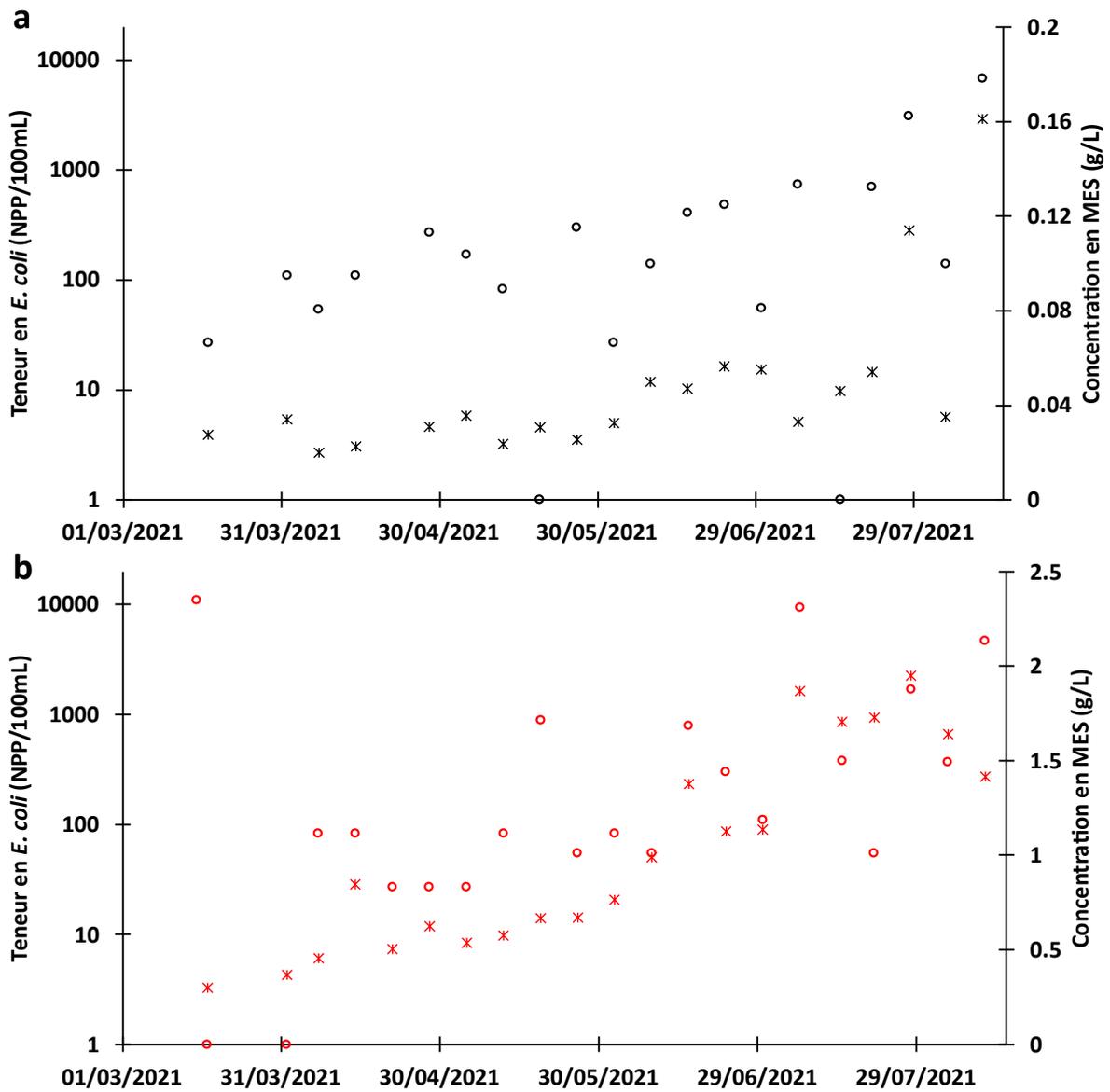


Figure 5. 15 : Dynamique temporelle de la teneur en *E. coli* et de la concentration en MES des eaux de Bangou Bi (a) et Bangou Kirey (b).

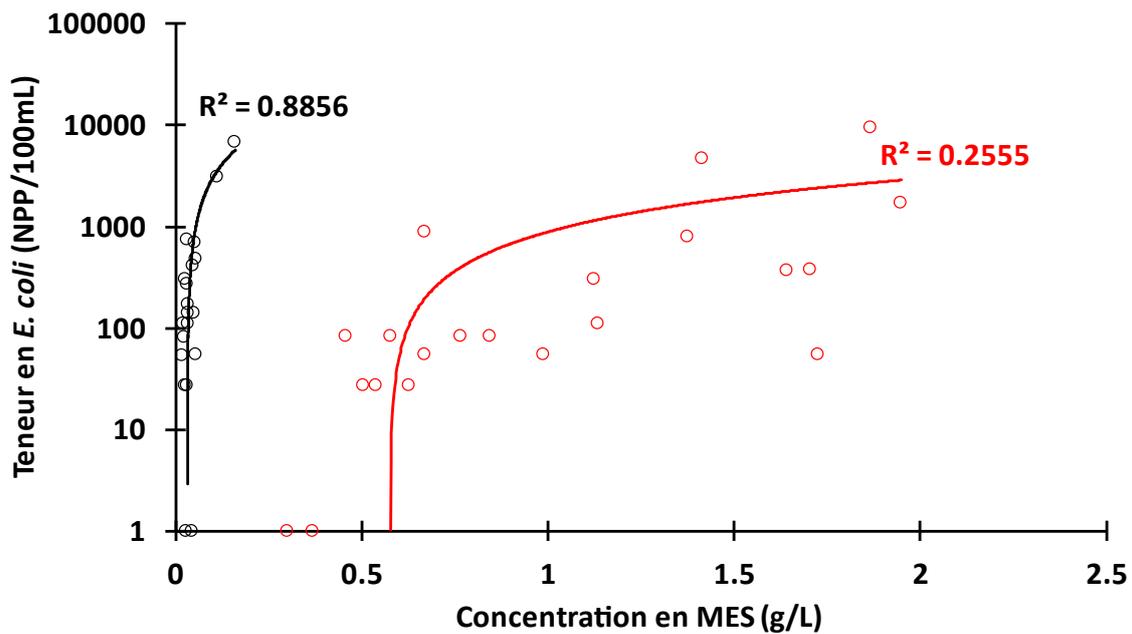


Figure 5. 16 : Teneur en *E. coli* versus concentration en MES des eaux de Bangou Bi (cercles noirs) et Bangou Kirey (cercles rouges).

## 1.8 Discussion chapitre V

Le suivi de la qualité microbiologique des eaux du fleuve Niger à Niamey et des lacs péri-urbains de Bangou Bi et Bangou Kirey a montré une pollution quasi permanente *Escherichia coli*, bactéries indicatrices de contamination fécale. Les teneurs au niveau du fleuve Niger ont été respectivement dans 91% et 100% des cas supérieures aux seuils fixés par l’OMS pour les eaux de baignade (OMS, 2021) et de boisson (OMS, 2017a). Au niveau des lacs de Bangou Bi et Bangou Kirey il s’agissait respectivement de 40% et 41% des mesures qui ont été supérieures à la valeur seuil pour la norme de baignade. Les teneurs en *E. coli* des deux lacs n’ont globalement pas rempli les conditions pour une utilisation de leurs eaux à des fins de boissons. Cependant, ils ont présenté des valeurs inférieures à la limite de détection, mises arbitrairement à 1, qui pouvaient éventuellement être égales à 0 et donc conforme à la norme. Globalement, 10% des échantillons du fleuve Niger et 60% de ceux des lacs correspondent à une eau de bonne qualité pour la baignade à l’égard de la teneur en *E. coli*.

Les teneurs en *E. coli* déterminées en amont de la ville de Niamey (sites de Tondi Koirey et Goudel) ont présenté en moyenne des valeurs plus importantes au niveau du site de Goudel, montrant que ce point de prélèvement bien qu'étant au début de la ville se trouve déjà sous l'influence de cette dernière. Les teneurs à Saga (aval de Niamey) ont montré une contamination fécale en moyenne 16 fois plus importante par rapport à Goudel (amont de Niamey) en 2020 et 2021. A Saga, les teneurs mesurées sur la rive droite se sont avérées moins importantes par rapport à la rive gauche ; mais avec, en 2019, une contamination deux fois plus importante comparativement à l'amont (Goudel). Ces résultats mettent bien en évidence l'impact de la ville de Niamey sur la qualité microbiologique des eaux du fleuve Niger. Il faut cependant noter que les eaux étudiées, malgré ces taux de contamination fécale supérieurs aux normes, peuvent être utilisable comme source pour la production d'eau destinée à la consommation humaine en appliquant les traitements de potabilisation adéquats.

Les mesures le long du transect du fleuve Niger entre Saga et Tondi Koirey ont davantage montré l'important degré de pollution du fleuve lié au milieu urbain et confortent les résultats des mesures des trois sites échantillonnés de façon continue. Cependant, les milieux ruraux et périurbains contribuent eux aussi à la contamination fécale des eaux de surface. En effet, l'amont de Niamey sur le fleuve Niger est occupé par de nombreux villages « satellites » comme Tondibia et Tondi Koirey appartenant presque à la ville. Ces villages se trouvent justement au niveau de la portion en amont (P12 à P9) et semblent être à l'origine des sources de contamination bien localisées le long du fleuve. Aussi, plusieurs points présentant des *hotspots* de contamination ont été mis en évidence à partir des mesures sur le transect. La qualité microbiologique des lacs de Bangou Bi et Bangou Kirey situés à l'est de la ville de Niamey confirme la contribution de la zone péri-urbaine dans la pollution fécale des eaux de surface avec cependant des teneurs en *E. Coli* moins importantes que celles rencontrées dans le fleuve Niger.

Les mesures de teneurs en *E. coli* à travers la section du fleuve Niger à Goudel (amont de Niamey) ont montré des valeurs plus importantes sur les deux rives par rapport au milieu du cours d'eau, particulièrement en crue blanche et en basses eaux. Cette différence de teneur en absence de précipitation peut à nouveau montrer la présence de sources de pollution localisées à proximité ou directement sur les berges du cours d'eau. En crue rouge, la teneur a été relativement homogène sur cette section. Cette homogénéisation est due aux apports d'*E. coli* par les pluies et à une vitesse d'écoulement des eaux plus importante (**Mamadou, 2012**) qui mélange ainsi les flux de pollution d'une rive à l'autre. La différence entre la rive gauche et droite n'a pas été observée sur la section de Goudel localisé en amont de la ville. A l'inverse, en aval de Niamey, à Saga, les teneurs en *E. coli* ont été en moyenne onze fois plus importantes en rive gauche par rapport à la rive droite. En effet la rive gauche de Niamey concentre quatre des cinq communes que compte la ville (**Figure 2. 17**), mais également plusieurs établissements générant des effluents non traités tels que l'hôpital National de Niamey ou encore la zone industrielle avec ses usines agroalimentaires (**Alhou, 2009**). Par ailleurs, les mesures de concentration en MES (**chapitre 0**), réalisées sur les mêmes échantillons de la section de Saga ayant servi à quantifier la teneur en *E. coli*, n'ont pas montré une différence significative d'une rive à l'autre, ce qui suggèrerait un apport plus conséquent de la ville en bactéries comparativement à sa contribution en matières en suspension.

Ces constats sont en accord avec les travaux de **Alhou (2007)** qui ont pointé la présence permanente de sources de pollution comme la principale cause de dégradation de la qualité des eaux dans la zone de Niamey. Les sources de pollution microbiologique sur le fleuve sont principalement dues aux activités dans la zone urbaine, au pâturage des animaux domestiques ou encore à la défécation à l'air libre dans le lit du cours d'eau (**Abia et al., 2015 ; Islam et al., 2017**). Au Niger, 85,7 de la population rurale et 9,9 % de la population urbaine étaient encore concernées par la défécation à l'air libre en 2020 (**Rapport MHA, 2020**). La tannerie et les

abattoirs de Niamey et de Tondibia peuvent aussi contribuer à la pollution par leurs effluents (**Figure 2. 19**entrées d'eau Tondibia).

La dynamique temporelle de la teneur en *E. coli* des trois sites de mesure sur le fleuve Niger a montré des valeurs plus faibles, mais toujours importantes, pendant la saison sèche (octobre – avril). Au niveau du site de Goudel, la contamination en *E. coli* pendant cette période, a été en moyenne deux fois plus importante que la norme de baignade. Les contaminations fécales les plus importantes ont été mesurées pendant la saison humide (mai – septembre) sur tous les sites (fleuve et lacs). Une dynamique d'*E. coli* similaire, avec d'importantes valeurs en saison des pluies comparativement à la saison sèche a également été reportée au niveau du lac de Bagré au Burkina Faso (**Robert et al., 2021**), en zone subtropicale montagneuse en Chine (**Xue et al., 2018**) et dans le bassin versant du Mékong (**Nakhle et al., 2021**). Les différences de teneur en *E. coli* entre la saison sèche et la période humide montrent ainsi l'importance des précipitations dans le processus de lessivage des surfaces réservoirs de bactéries et le transport des polluants vers les cours (fleuve Niger) et plans d'eau (Bangou Bi et Bangou Kirey). Aussi, les teneurs en *E. coli* du fleuve Niger ont montré d'importantes augmentations suite aux premiers évènements de pluie. Le même scénario a été observé au niveau de « Raccoon river » dans le bassin du Mississippi, marqué par des précipitations intenses entre mai et juin accompagnées d'un pic de débit (**Schilling et al., 2009**). Les évènements de pluies abondants en début de saison des pluies sont connus pour être d'importants contributeurs en *E. coli* dans les eaux de surface (**Effler et al., 2001**). Les évènements pluvieux font augmenter les teneurs qui baissent quelques heures après pour retrouver les valeurs d'avant la pluie. Ainsi, les précipitations journalières dans la zone de Niamey ont montré des corrélations significatives avec les teneurs en *E. coli* des trois stations de mesure sur le fleuve Niger. Cependant, les quantités de pluies ne sont pas parvenues à expliquer les fluctuations à court terme de la teneur en *E. coli*, car plusieurs autres facteurs entrant en jeu ne sont pas pris en compte ici : comme l'état de la contamination bactériologique

des surfaces avant les précipitations, les usages de sols et les activités anthropiques associées (McCarthy et al., 2012). Au niveau des lacs péri-urbains les corrélations entre les deux paramètres n'ont pas été significatives, mais il faudrait confirmer ces résultats avec des séries de données plus longues par rapport à la période d'échantillonnage et une fréquence de mesures plus intense.

La concentration en MES des eaux du fleuve Niger à Niamey bien qu'ayant présenté une petite hausse suite aux premiers événements pluvieux et plus généralement des valeurs bien plus élevées pendant la saison des pluies, n'a pas montré de corrélation avec cette dernière sur l'ensemble des périodes échantillonnées. Cependant, au Niveau des lacs de Bangou Bi et Bangou Kirey les deux paramètres ont montré une bonne corrélation surtout pour le lac de Bangou Bi. Les résultats présentés ici pour le fleuve Niger s'écartent donc des nombreuses études qui ont montré une corrélation positive entre les bactéries et la turbidité ou la charge totale de sédiments qui sont des paramètres liés à la concentration en MES des eaux (Weller et al., 2020 ; Nakhle et al., 2021 ; Robert et al., 2021). Il faut dire que les matières en suspension des eaux de surface sont connues pour contribuer à la survie des bactéries (Rochelle-Newall et al., 2015). Elles procurent aux bactérie les nutriments et les matières organiques indispensables à leur développement, en plus de leur accorder une protection contre les effets antiseptiques des rayons ultraviolet du soleil (Vigiak et al., 2008 ; Amalfitano, 2017). En effet, les bactéries (*E. coli*) survivent mieux lorsqu'elles sont associées avec les matières en suspension dans l'eau (Chu et al., 2011 ; Jeng et al., 2005). Par ailleurs, les échantillons d'eau du fleuve Niger et du lac de Bangou Bi fixés au glutaraldéhyde puis observés au MET ont montré de nombreuses bactéries présentes dans la fraction agrégée des matières en suspension (figure 5. 17).

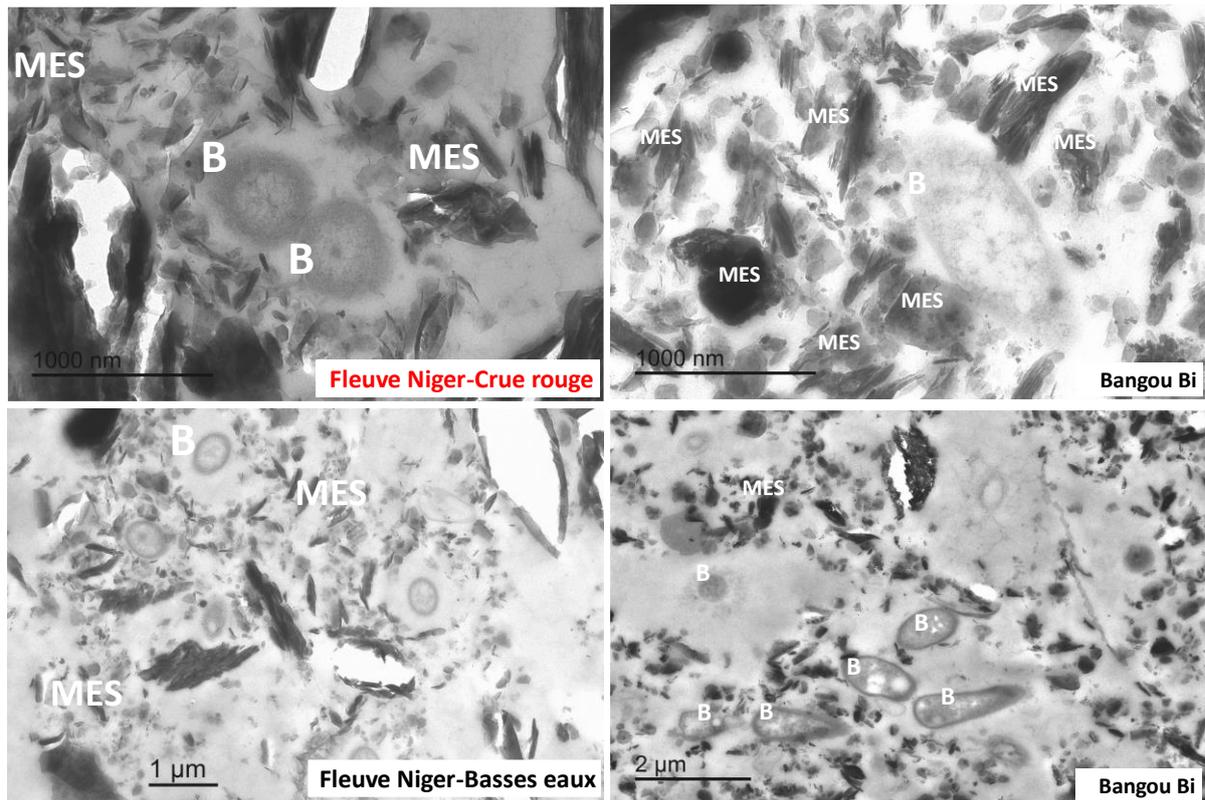


Figure 5. 17 : Images des MES des eaux du Niger fixées au glutaraldéhyde, incluses dans une résine Epoxy, et coupées avec un ultramicrotome pour obtenir des sections ultrafines observées par MET. MES = Matières en suspension ; B = Bactéries.

La faible corrélation entre la teneur en *E. coli* et la concentration en MES du fleuve Niger à Niamey pourrait venir de la différence entre leurs sources respectives. Si les précipitations sont à l'origine de l'augmentation des deux paramètres, elles n'agissent pas de la même façon dans un milieu fluvial intégrateur, à l'origine de MES, et dans un contexte urbain caractérisé par des sources plus locales de pollution bactérienne. En effet, la pollution fécale provient en grande partie des activités humaines qui ont lieu à tous les moments de l'année à proximité du fleuve et notamment dans la ville. L'augmentation de la teneur en *E. coli* en tout début de la saison des pluies relève du fait que ces bactéries sont transportées par les pluies depuis les surfaces où elles y sont déjà stockées. Les matières en suspension, par contre, sont transportées dans le fleuve suite aux précipitations et à l'érosion des sols du bassin versant localisé à l'amont de Niamey notamment par les affluents du Niger moyen, comme vu dans le chapitre 0. Ainsi en

fonction de la localisation des précipitations dans le Niger moyen, des hausses de la teneur en *E. coli* et/ou de la concentration en MES peuvent se produire à Niamey (**figure 5. 18**). Lorsqu'une pluie est localisée sur la ville de Niamey, cette dernière est suivie par une augmentation de la teneur en *E. coli* (**figure 5. 18**) avec un délai d'environ 24H. Ceci a été le cas pour les pluies du 29/06/2019, 04/05/2020 et 24/05/2021. En revanche lorsque l'évènement pluvieux est localisé en amont de Niamey, plus précisément sur la zone des bassins versants des affluents de la rive droite (**figure 5. 18**), ce dernier est suivi par une hausse de la concentration en MES du fleuve Niger à Niamey avec un décalage d'environ deux jours. Ceci a été le cas pour les évènements du 09/07/2019, 14/06/2020 et 16/06/2021.

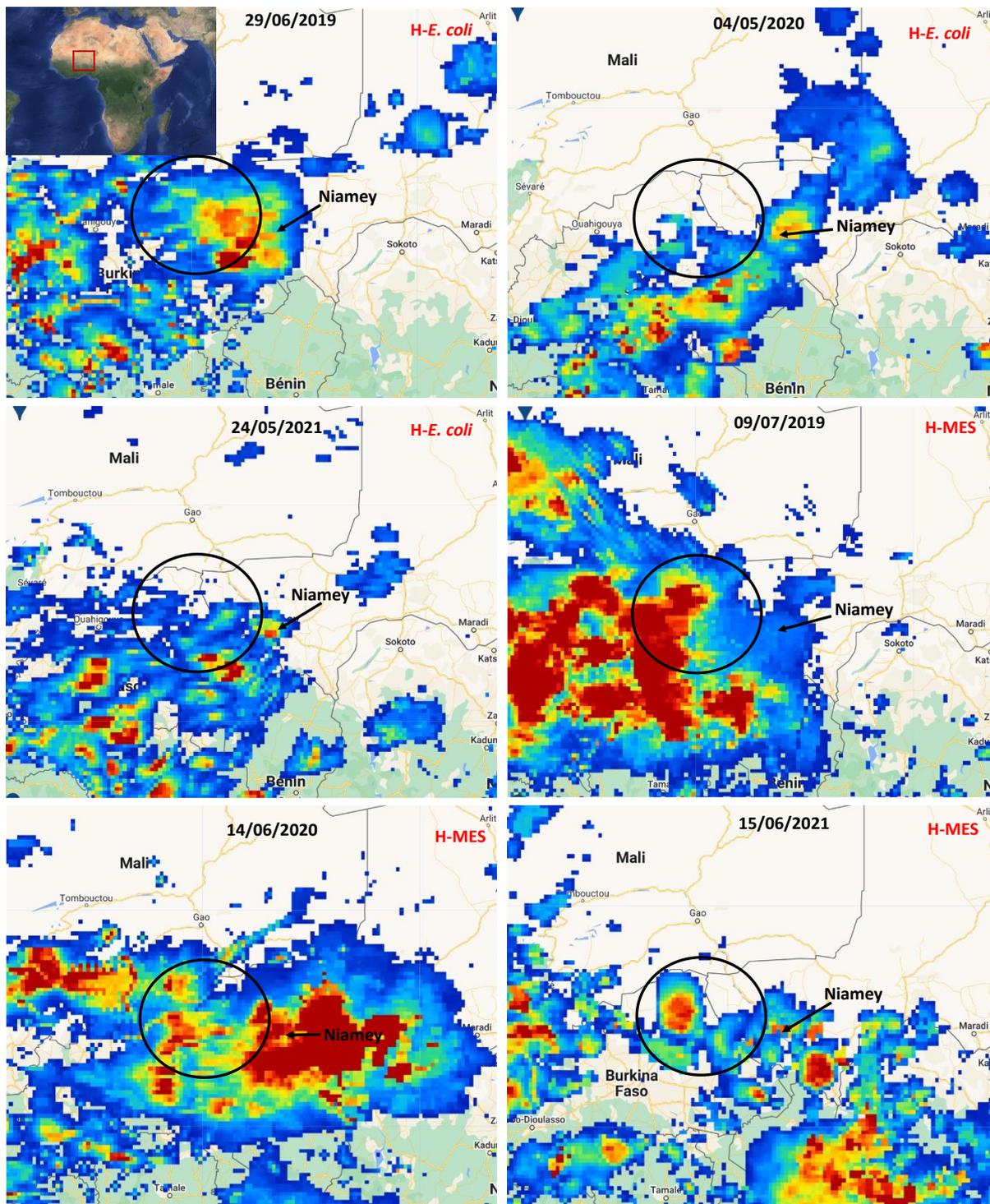


Figure 5. 18 : Localisation des pluies (moyenne journalière entre 0 et 15 mm) sur le bassin Niger. « H-E. coli » et « H-MES » correspondent respectivement aux évènements suivis par une hausse de la teneur en *E. coli* et une hausse de la concentration en MES à Niamey. Les cercles matérialisent les bassins versant des affluents amonts de la rive droite de Niamey. Produit : GPM\_3IMERGHH\_V06 (Huffman et al., 2019) fourni par Google Earth Engine.

Les paramètres physico-chimiques des eaux du fleuve Niger ont présenté une dynamique et des valeurs similaires au niveau des trois stations de mesure du fleuve Niger à Niamey. Ces valeurs ont été du même ordre que les précédentes mesures réalisées sur le fleuve à Niamey (**Alhou et al., 2009 ; Siddo et al., 2022**). La conductivité, l'oxygène dissous et la température ont montré des corrélations significatives avec la teneur en *E. coli* pour certaines périodes d'échantillonnages. Plusieurs études ont également mis en évidence des corrélations entre la teneur en *E. coli* et la conductivité électrique en zone tropicale (**Nakhle et al., 2021**) ainsi qu'avec la température et le pH des eaux en zone tempérée (**Hathaway et al., 2010 ; Herrig et al., 2019**). Cependant les valeurs de  $R^2$  obtenues entre la teneur en *E. coli* du fleuve Niger à Niamey et les paramètres physico-chimiques des eaux restent relativement faibles, ce qui pourrait s'expliquer par le fait que les mesures de ces paramètres ont été réalisées au cours d'une petite partie de la saison sèche et majoritairement en saison des pluies excluant ainsi une bonne portion de l'année. Enfin, les corrélations obtenues ne sont pas forcément causales et sont probablement dues au fait que ces paramètres et la teneur en *E. coli* réagissent simultanément aux précipitations, donc aux apports par ruissèlement. En effet, dans le cas de la conductivité et la température par exemple, plusieurs études ont montré que leurs diminutions étaient caractéristiques d'une augmentation des contributions des flux de surface (**Cano-Paoli et al., 2019 ; Pellerin et al., 2008, Du et al., 2020**).

Les paramètres physico-chimiques ont montré un pH avec une tendance basique pour le lac de Bangou Bi et plutôt acide à Bangou Kirey. Bangou Bi a présenté une température de subsurface plus importante comparativement à Bangou Kirey. Ces différences pourraient venir de la taille différente des deux lacs ainsi que de leurs bassins versants respectifs. En effet, le bassin versant de Bangou Bi est douze fois plus petit que celui de Bangou Kirey (**Abdourhamane Touré, 2011**). La conductivité des eaux de Bangou Bi a été durant toute la période de mesure plus importante que celle du lac de Bangou Kirey. Cette différence met en évidence une

minéralisation plus importante à Bangou Bi qui confirme une alimentation hydrique par la nappe phréatique (**Obame et al., 2013**). A partir du mois de juin correspondant au début de la saison des pluies la conductivité a montré une tendance à la baisse au niveau des deux lacs a été plus importante au niveau de Bangou Kirey comparativement à Bangou Bi. Ceci est en accord avec un bassin versant hydrographique plus grand à Bangou Kirey ramenant ainsi d'importants écoulements, suite aux précipitations, responsables d'une baisse plus importante de conductivité pour ce lac (**Namour, 2016**). En moyenne l'oxygène dissous a été plus important à Bangou Bi comparativement à Bangou Kirey. Ceci suggérerait une production d'oxygène par les plantes aquatiques plus élevée au niveau de Bangou Bi. Le pH et la conductivité des eaux de Bangou Bi et Bangou Kirey mesurés précédemment ont été du même ordre (**Abdourhamane Touré, 2011**). Dans le Dallol Bosso, le lac Tankalawal, également alimenté par la nappe phréatique et quelques apports par ruissellement, a présenté un pH proche de celui de Bangou Bi, mais une minéralisation beaucoup plus importante de  $930 \mu\text{s/cm}$  (**Obame et al., 2013**). Dans le bassin versant du lac Tchad, les lacs Fitri et Iro (**Poulin et al., 2019**) ont montré des pH et conductivité assez proches du lac de Bangou Bi. D'une manière générale, les teneurs en *E. coli* de Bangou Bi et Bangou Kirey n'ont montré de corrélation qu'avec la conductivité des eaux, sans doute à cause d'une trop faible quantité de données. L'impact des paramètres physico-chimiques sur la teneur d'*E. coli* des deux lacs reste une question ouverte qui nécessitera de plus longues séries des mesures ainsi que des informations précises sur la fréquentation des points d'eau et les sources de pollution.

## **1.9 Conclusion chapitre V**

Ce chapitre a permis de mettre en évidence une contamination fécale significative des eaux du fleuve Niger à Niamey et des lacs de Bangou et Bangou Kirey à tout moment de l'année, avec 89% des valeurs au-dessus des normes de l'OMS pour les eaux de baignade. Les teneurs en *E.*

*E. coli* atteintes dans ces eaux peuvent représenter un véritable risque de maladies gastro-intestinales et des insuffisances respiratoires aiguës pour les populations qui les utilisent dans leur vie de tous les jours. Les résultats ont montré une contamination fécale significative venant de la ville de Niamey par de nombreuses sources tout au long du transect du fleuve Niger. Des *hotspots* de pollution ont été mis en évidence comme l'affluent Gounti Yéna, les rejets domestiques et d'établissements divers (P3, P5 et P10). En aval de la ville de Niamey, les teneurs en *E. coli* ont été en moyennes 16 fois plus importantes qu'à l'amont. De plus, la rive gauche du point de mesures aval, concentrant une grande partie de la population, est apparue plus contaminée que la rive droite, confortant l'hypothèse de l'impact humain sur la qualité de l'eau. La dynamique temporelle des teneurs en *E. coli* des eaux a montré une contamination plus importante en saison des pluies comparativement à la saison sèche. Néanmoins, les valeurs d'*E. coli* restent élevées pendant toute l'année, à l'inverse des concentrations en MES qui sont très faibles en absence de précipitation. Ce qui laisse penser à une séparation des sources de ces deux paramètres avec : pour la contamination bactérienne des sources locales distribuées le long du fleuve et plus importantes en proximité de la ville, et pour MES des sources plus éloignées dans le bassin versant. Les milieux ruraux et péri-urbains ont eux aussi présenté des sources de contamination fécale avec des taux importants d'*E. coli* mesurés dans les lacs de Bangou Bi et Bangou Kirey ainsi que dans la portion du fleuve Niger se trouvant en amont de la ville de Niamey.

Au regard de ces résultats, il est urgent d'améliorer les connaissances des différentes sources responsables de la détérioration de la qualité des eaux de surface dans la zone de Niamey, de prendre les dispositions nécessaires pour y remédier et d'instaurer des réglementations quant aux usages de ces dernières.

## Conclusions et perspectives

---

Les ressources en eaux de surface du Sahel sont depuis les dernières décennies soumises à d'importants changements, conséquence des contraintes climatiques et anthropiques. Les eaux de surface sont largement utilisées par les populations, qui y ont recours pour différentes activités, et l'accès à une eau de bonne qualité représente un sérieux enjeu pour la santé. Au Sahel et dans les pays en développement en général, il existe très peu de données sur la contamination, y compris sur la pollution fécale des eaux de surface. Aussi, les facteurs environnementaux et anthropiques qui influencent la dynamique spatio-temporelle des bactéries indicatrices de contamination fécale (*Escherichia coli*) ont été très peu étudiés dans la région qui nous intéresse. L'amélioration de ces connaissances permettra à terme, de définir de meilleures stratégies afin de limiter au mieux la contamination. La motivation de ce travail a donc été de contribuer à réduire le manque de connaissance sur la qualité des eaux de surface de la zone de Niamey en général et la contamination fécale en particulier, ainsi que de mettre en évidence les facteurs anthropiques (la part de pollution fécale apportée par le milieu urbain) et environnementaux qui influencent cette dernière. Il a aussi été question d'évaluer quelles méthodes de surveillance de la qualité des eaux, y compris les outils de télédétection, sont les plus efficaces dans cette zone, caractérisée par de très fortes concentrations en MES, des particules très fines et un impact important des aérosols atmosphériques.

L'accent a été mis sur le tronçon du fleuve Niger allant de l'amont à l'aval de Niamey et sur deux lacs péri-urbains situés à l'est de la ville. Les mesures ont été réalisées à très haute fréquence et en continu entre juin 2018 et septembre 2021 sur quatre sites du fleuve Niger à Niamey et au niveau des lacs de Bangou Bi et Bangou Kirey. Elles ont concerné la concentration en MES des eaux, la teneur en *E. coli* et les paramètres physico-chimiques (pH, température, conductivité et oxygène dissous). De plus, des mesures radiométriques de couleur des eaux ont

été mises en place à la station de Goudel. Les matières en suspension ont été analysées afin de déterminer leur nature granulométrique et minéralogique, qui est importante pour le suivi de la couleur des eaux et peut jouer un rôle dans les mécanismes de développement et survie des bactéries. Les travaux de cette thèse se sont efforcés, grâce à des méthodes multidisciplinaires et un échantillonnage adapté, d'analyser la dynamique spatiale et temporelle des paramètres de la qualité des eaux de surface de la zone de Niamey en lien avec le cycle hydrologique.

Les résultats obtenus sont nombreux :

Les techniques de télédétection ont montré leur efficacité pour la surveillance de la qualité des eaux dans cette région. Malgré les fortes concentrations en MES, la petite taille des particules et la présence d'aérosols atmosphériques qui posent des défis pour l'application de ces méthodes, les performances d'inversion obtenues par le radiomètre SKYE et Sentinel-2 ont été de bonne qualité et généralement meilleures que celles obtenues par des capteurs de télédétection optique tels que MODIS et Landsat dans la même région (**Kaba et al., 2014 ; Robert et al., 2016 ; Robert et al., 2017**). Les méthodes de télédétection, bien que pouvant bénéficier d'améliorations (algorithme d'inversion, détection/correction du skylint), peuvent donc fournir une technique « opérationnelle » dans cette région faiblement instrumentée. Ainsi, l'utilisation de radiomètres in-situ pourrait constituer une alternative valable par rapport aux turbidimètres classiques, qui peuvent être emportés en cas de fortes crues ou saturés par des charges de MES trop importantes. Les données satellitaires pourraient fournir un moyen rapide d'anticiper l'arrivée de charges importantes de MES, information sans doute utile pour la station de potabilisation de Niamey. Cependant Ces données satellitaires optiques restent affectées par la couverture nuageuse qui est un facteur limitant pour le suivi des MES en saison des pluies.

La nature granulométrique et minéralogique des matières en suspension des eaux de surface de la zone, a été étudiée. Les MES ont été caractérisées par la présence de particules de kaolinite,

d'oxyhydroxyde de fer et de quartz ce qui est cohérent avec la nature des sols sahéliens sableux, sablo-limoneux et des roches affleurantes dominées par les grès ferrugineux du continental terminal. La granulométrie de ces matières en suspension a montré deux modes dominants dans la distribution volumique : un premier caractérisé par des particules très fines de l'ordre de 0,2  $\mu\text{m}$  et un deuxième avec des particules de plus grande taille, de 6,72  $\mu\text{m}$ .

La dynamique spatio-temporelle de la concentration en MES des eaux du fleuve Niger, mais aussi des lacs de Bangou Bi et Bangou Kirey, a été étudiée. L'efficacité des techniques de télédétection a permis d'élargir la zone et de montrer l'importante contribution en MES des affluents de la rive droite du fleuve, en amont de Niamey, et de comparer les concentrations avec celles de la localité d'Ansongo sous influence unique de la crue blanche. Les mesures de la couleur de l'eau in-situ ont également permis de porter le suivi de la dynamique des MES du fleuve Niger à une résolution journalière et ainsi d'étudier son évolution à des échelles temporelles fines pendant les différentes phases du cycle hydrologique du fleuve. Les concentrations en MES des eaux du fleuve Niger et des lacs de Bangou Bi et Bangou Kirey ont montré une saisonnalité marquée par de faibles valeurs en saison sèche et de très fortes valeurs en saison des pluies. La crue rouge a été la période du cycle hydrologique du fleuve Niger caractérisée par les plus fortes concentrations en MES, qui atteignent leurs valeurs maximales avant le pic de débit, à l'inverse de la crue blanche et de la période d'étiage (basses eaux). Par ailleurs, les mesures sur différents points d'échantillonnage ont montré des valeurs similaires pour le même état hydrologique du fleuve.

Une pollution fécale significative a été mise en évidence au niveau des eaux du fleuve Niger à Niamey et des lacs de Bangou Bi et Bangou Kirey à tout moment de l'année mais avec des maximums en saison des pluies. Ceci a montré le rôle des précipitations dans le lessivage des surfaces « réservoirs de bactéries » et le transport des polluants vers les cours et plans d'eau. Cependant, les précipitations seules n'ont pas suffi à expliquer les fluctuations de la teneur en

*E. coli* dans les eaux étudiées. D'autres paramètres doivent être pris en compte tels que l'état de la contamination bactériologique des surfaces avant les précipitations (les sources de pollution), les usages des sols et activités anthropiques associées ainsi que la distribution spatiale des pluies (McCarthy et al., 2012). La contamination a été plus importante dans les eaux du fleuve comparativement à celles des lacs de Bangou Bi et Bangou Kirey qui restent néanmoins suffisamment polluées pour représenter un risque de contamination pour les populations riveraines en cas d'utilisation. Les teneurs en *E. coli* de ces eaux, plusieurs fois supérieures aux normes de l'OMS (eaux de boisson, baignade) pourraient représenter un risque direct pour les populations riveraines, mais aussi indirect à travers l'utilisation des eaux pour l'irrigation et le maraichage. En effet l'arrosage avec des eaux contaminées par la matière fécale représente un risque potentiel pour la santé des consommateurs, ces eaux pouvant être vecteur de maladies telles que la fièvre typhoïde ou encore la dysenterie, susceptibles d'atteindre des proportions épidémiques (Koffi-Nevry et al., 2012). La dynamique de *E. Coli* dans les lacs gagnerait, cependant, être confirmée avec des séries temporelles plus longues.

Une importante hausse de la contamination en *Escherichia coli* a également été montrée, en aval de Niamey et au niveau des entrées d'eaux usées de la ville dans le fleuve Niger. Globalement, l'ensemble des mesures effectuées (suivi en continu des trois stations sur le fleuve Niger, mesures ponctuelles sur les transects et les sections) a convergé pour montrer que la « ville de Niamey » et ses activités sont les acteurs majeurs de la contamination des eaux du fleuve Niger. En effet, la teneur en *E. coli* a été multipliée en moyenne par 16 entre le site de Goudel en amont de la ville et celui de Saga en aval (moyenne sur les séries temporelles). Elle a montré des pics très importants après les principaux points de rejets des eaux de la ville sur le fleuve, visibles sur les mesures en transect. La teneur en *E. Coli* a aussi montré des valeurs plus importantes sur les deux rives du Niger au niveau du site de Goudel, et des valeurs beaucoup plus élevées en rive gauche qu'en rive droite au niveau du site de Saga à l'aval (visibles sur les

mesures en section). L'impact des activités humaines pourrait davantage être mis en évidence par la détermination des sources des pathogènes fécaux grâce à l'utilisation des méthodes de traçage qui permettraient de déterminer la provenance des bactéries selon qu'elles soient d'origine humaine ou animale (**Jeanneau et al., 2012 ; Ekklesia et al., 2015 ; Harrault et al., 2019**). Ce genre de méthodes nécessite cependant d'importants efforts logistiques pouvant par ailleurs être un facteur limitant dans les pays d'Afrique subsaharienne (**Rochelle-Newall et al., 2015**). Par ailleurs, la détermination du rapport entre coliformes fécaux (CF) et streptocoques fécaux (SF) pourrait représenter une méthode possible à appliquer. Des valeurs de ce rapport inférieures à 0,7 indiquent une contamination d'origine animale, et des valeurs supérieures à 4 une contamination d'origine humaine. La contamination peut aussi être mixte ce qui est souvent le cas, à dominance animale si le rapport est compris entre 0,7 et 1 et à dominance humaine s'il est compris entre 2 et 4 (**Borrego et Romero, 1982 in Koffi-Nevry et al., 2012**).

De faibles corrélations ont été montrées entre les paramètres environnementaux (concentration en MES, pH, température, conductivité et oxygène dissous) et les teneurs en *E. coli*. Ces relations, notamment pour ce qui concerne le MES, sont différentes des résultats d'autres travaux en zone tropicale (**Nakhle et al., 2021 ; Robert et al., 2021**). La taille très fine des particules en suspension des eaux de surface de Niamey, les fortes turbidités et la présence d'importantes sources de pollution fécale donnent lieu à un complexe très intéressant à étudier. La faible corrélation entre concentration en matières en suspension et teneur en *E. coli* est, d'après les résultats de ce travail, due à une différence des sources de ces deux éléments. Alors que les pluies sur les bassins versants des affluents nigéro-burkinabés en amont, sont responsables des augmentations importantes de concentration en MES du fleuve à Niamey, celles qui ont lieu sur la ville et son voisinage immédiat sont responsables des pics de la contamination fécale (**figure 6. 1**). Il s'agit là d'une hypothèse qui, pour être confirmée, nécessite d'autres types de mesures, i.e. un suivi haute fréquence (12 h) de la teneur en *E. coli*

pendant toute la saison des pluies. Ceci donnera la possibilité de voir l'impact sur la teneur en *E. coli* de chaque évènement pluvieux selon sa localisation. D'autres facteurs pourraient aussi entrer en jeu. En effet, les observations au MET ont montré des bactéries dans la fraction agrégée des MES. Ceci suggère que bactéries et MES sont au moins associées dans la portion agrégée, en accord avec la théorie qui suggère pour les bactéries une association très bénéfique. Cependant, des travaux ont montré que les bactéries associées à des particules inférieures à 12  $\mu\text{m}$  bénéficient d'une moindre protection contre les UV du soleil (Qualls et al., 1985 ; Walters et al., 2014) ce qui pourrait expliquer les faibles corrélations entre MES et teneur en *E. Coli* dans les trois stations échantillonnées sur le fleuve Niger. Il est aussi possible que la fraction agrégée des MES soit minoritaire par rapport aux particules dispersées. Par ailleurs, le fait que des corrélations significatives ont été mises en évidence avec des particules de taille similaires dans le réservoir de Bagré au Burkina Faso (Robert et al., 2021) ainsi que par les toutes premières mesures, qui doivent être confirmées par des séries des données plus longues, sur les mares de Bangou-Bi et Bangou-Kirey, remet en question cette hypothèse. Les fortes concentrations en MES dans la colonne d'eau pourraient tourner à l'avantage des bactéries et réduire l'impact de la taille des particules sur la protection du rayonnement UV. Une question qui reste à étudier concerne aussi les propriétés des MES, notamment la quantité de matière organique qui pourrait constituer une source importante de nutriments pour les bactéries et également l'impact de très petites particules majoritairement minérale.

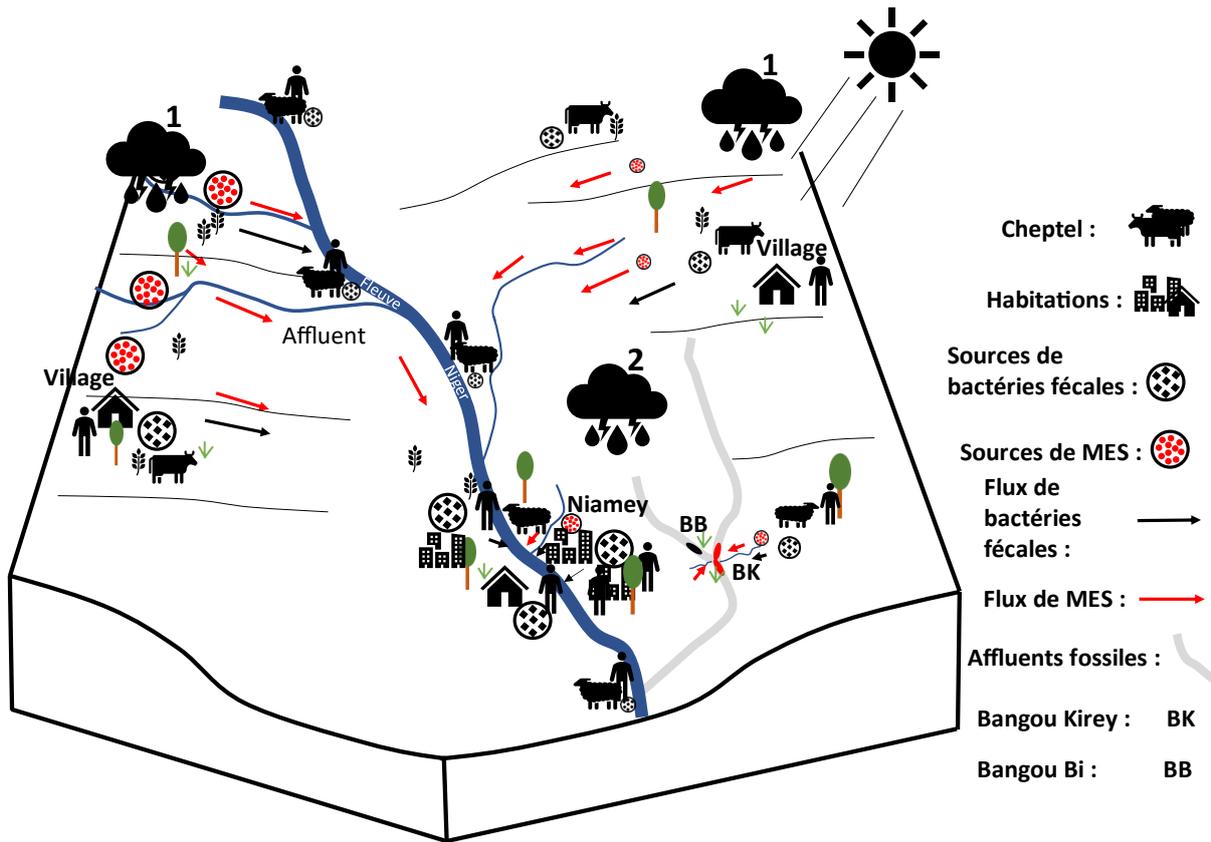


Figure 6. 1 : Schéma conceptuel des sources de contamination fécale et de MES apportées aux eaux de surface dans la zone de Niamey. 1) Pluies provoquant une hausse de concentration en MES à Niamey ; 2) Pluies provoquant une hausse de la teneur en *E. coli* à Niamey.

De manière plus générale, le transport de polluants (organiques, métaux lourds, microbiens) de l'amont vers l'aval d'un cours d'eau est affecté par les ouvrages hydrauliques (régulation des débits, hauteurs d'eau, production électrique) sur ce dernier. Des études sur les fleuves Amazone, Congo et Mékong ont montré des répercussions hydrologiques et écologiques suite à la construction de barrages sur leur cours (Poff et Zimmerman, 2010 ; Winemiller et al., 2016). Les barrages, par obstruction, influent sur le transport des matières en suspension (Gao et al., 2010 ; Vörösmarty et al., 2010) qui vont à leur tour affecter le transport des bactéries attachées y compris les pathogènes (Nakhle, 2021). La rétention des contaminants va donc conduire à l'atténuation de la pollution en aval des ouvrages mais donner lieu à leur accumulation en amont où ils seront susceptibles d'impacter négativement des activités comme la pêche, l'irrigation et les usages domestiques quotidiens. Les résultats de ce travail montrent

la nécessité de maintenir les mesures de la qualité des eaux de surface de Niamey dans le contexte de changement environnementaux et anthropiques. Le barrage de Kandadji (14° 36' 32" N, 0° 59' 14" E) actuellement en construction en amont de Niamey (environ 180 km à vol d'oiseau) pour une mise en eau prévue pour 2025, aura sans doute des conséquences sur les paramètres concernant la qualité des eaux du fleuve Niger. Nos données permettront d'avoir une comparaison avec les nouvelles réalités du fleuve sous l'influence du barrage de Kandadji.

Dans l'optique de mieux comprendre les risques pour la santé, une meilleure compréhension des relations entre concentration en MES et bactéries indicatrices de contamination fécale devra prendre en compte des paramètres supplémentaires tels que l'occupation des sols, les états de contamination de chaque type de surface et leur potentiel de ruissellement, la détermination effective des sources (MES et *E. coli*) et la distribution spatiale des précipitations. Des mesures sur le profil vertical du fleuve ont été prévues mais n'ont pas pu être réalisées. Ces mesures devraient être réalisées afin de prospecter l'évolution des teneurs en bactéries et de la concentration en MES le long de ce profil, ce qui permettrait de voir les modalités de leur transport.

D'un point de vue pratique, les résultats de ce travail devraient être vulgarisés auprès des autorités compétentes afin que des dispositions soient prises pour limiter au mieux les sources de la contamination et améliorer le système d'assainissement de la ville de Niamey dont la superficie augmente à grande vitesse. Sur les lacs de Bangou Bi et Bangou Kirey les résultats obtenus devraient être confirmés par des séries plus longues et devraient faire l'objet de suivis complémentaires. Les données du projet ANR « Tele-epidemiology of diarrheal Diseases in Muddy tropical surface Waters in west Africa (AAPG-MAMIWATA, 2021) », porté par Elodie Robert, Chargée de recherche au CNRS – LETG, devraient fournir les éléments de réponse nécessaires ? Ce projet apparaît comme un cadre idéal pour continuer à travailler dans le domaine de la qualité des eaux de surface, mais plus encore sur la performance des bactéries

indicatrices de contamination fécale dans la région et la prévision des risques liés à l'utilisation des eaux contaminées. MAMIWATA prévoit entre autres d'étudier les facteurs environnementaux les plus importants pour le risque sanitaire posé par la contamination bactériologique de lacs tropicaux en zone rurale et d'évaluer le potentiel des données satellites dans la surveillance de ce risque. Le lac de Bangou Kirey est un des quatre sites concernés par les mesures du projet.

Les questions sur la contribution des eaux souterraines dans la contamination fécale des eaux du fleuve à Niamey constituent également une piste qui mériterait d'être convenablement investiguée. En effet les travaux de **Hama Garba, (2022)** et **Hado et al., (2022b)** ont montré qu'il y avait une alimentation du fleuve Niger par la nappe phréatique au niveau de Niamey. De plus l'assainissement dans la ville de Niamey se fait majoritairement à travers de fosses septiques individuelles dont l'étanchéité fait très souvent défaut et dont la vidange et le transport des boues des sites de production vers les sites de traitement ne sont assurés qu'à 50% en milieu urbain, au Niger (**Ministère de l'Hydraulique et de l'Assainissement Niger, 2016**). Les défis à relever sont donc conséquents mais incontournables dans le contexte de pressions anthropiques et climatiques toujours plus importantes et le maintien des mesures de bonne qualité dans cette région est primordial.

## Liste des figures

---

Figure 1. 1 : Concentration en MES des fleuves de part et d'autre de la latitude 20°N (Dethier et al., 2022). SSC désigne la concentration en matières en suspension. ....	24
Figure 1. 2 : Taux de mortalité attribuable à l'insalubrité de l'eau, l'assainissement et l'hygiène-EAH, mesure du nombre de décès sur 100 000 personnes d'une population données de 2019. (OMS/UNICEF, 2020).....	26
Figure 1. 3 : Valeurs seuils de teneurs en E. coli et coliformes fécaux thermotolérants selon les normes d'eau de baignade pour les Etats Unis, l'Europe et Le Brésil (Vinueza et al., 2021 modifié). ....	30
Figure 1. 4 : Diagramme conceptuel de sources et transport de bactéries indicatrices de contamination fécale (FIB) à l'échelle du bassin versant (Nakhle, 2021). ....	32
Figure 1. 5 : Teneur en Entérocoques intestinaux, coliformes thermotolérants et E. coli des eaux du fleuve Wailuku, (hawai) suite à des événements pluvieux (Strauch et al., 2014).....	34
Figure 1. 6 : Moyenne mensuelle de concentration en MES (mg/l), d'E. coli (MPN/100mL), bande NIR (sr-1*1000), du NDVI (*1000), des précipitations (mm) et des cas de diarrhée dans les centres de santé Dierma, Lengha et Dango, proche du lac de Bagré, entre 2018-2020. (Robert et al., 2021).....	36
Figure 1. 7 : Localisation des barrages et grands projets dans le bassin du fleuve Niger (données ABN, conception, réalisation M-L Penin, J. Pierson, O. Pissoat) (Vaucelle, 2015). 40	
Figure 1. 8 : Prélèvement en eau par secteurs dans le bassin du fleuve Niger au Mali, Niger et Nigeria en 2005 (Paturel et al., 2020). ....	41
Figure 1. 9 : Quelques espèces de poissons pêchés dans le fleuve Niger à Niamey a) Hippopotamyrus pictus ; b) Tilapia zillii ; c) Labeo senegalensis ; d) Hydrocynus brevis (04 juillet 2021) (Yacouba Moussa et al. 2022).....	42

Figure 1. 10 : Bassin versant du fleuve Niger avec la localisation des deux crues annuelles qui caractérisent l'hydrogramme du fleuve à Niamey (Descroix et al., 2012, modifié).....	45
Figure 1. 11 : a) Débit du Niger à Ansongo et Niamey en 1955 et b) en 2012. Débit à Niamey (ligne noire) et Ansongo (pointillée). Histogrammes = précipitations dans le bief Ansongo-Niamey. les lignes verticales bleues = début et fin crue rouge (Cassé et al. 2015).....	45
<i>Figure 1. 12 : localisation des sites des études ayant caractérisées la qualité des eaux du fleuve Niger et lacs permanents à proximité de Niamey (avec les études portées sur la détermination de la concentration en MES représentées avec points et celles sur la caractérisation microbiologique représentées avec des triangles).</i> .....	47
Figure 1. 13 : Dynamique de concentrations en MES du fleuve Niger à Niamey d'avril 2011 à mars 2013 (Alhou et al., 2016).....	48
Figure 1. 14 : : Dynamique de la concentration en MES de Bangou Kirey (BK) et Bangou Bi (BB), et variation piézométrique de Bangou Bi (cote BB) (Abdourhamane Touré et al., 2016). .....	49
Figure 2. 1 : a) Schéma classique de la ZCIT ; b) ZCIT marquée par une bande nuageuse entre l'équateur et la zone tropicale (image EUMESAT) ; c) position saisonnière de la ZCIT en hiver (janvier-vents de l'harmattan) et en été (août-vent de mouson)(Nicholson, 2009). .....	54
Figure 2. 2 : Moyenne des isohyètes de la période récente (1990-2007) en contours remplis (échelle de couleur à droite) ; période humide (1950-1969) en lignes continues et en lignes ponctuées la période sèche (1970-1989) (Lebel et Ali, 2009).....	55
Figure 2. 3 : Indices normalisés de précipitations (SPI) entre 1950 et 2018 pour le total annuel (bleu) et les maxima annuels (rouge) dans une partie du Sahel (-2 E-5 W, 11-16 N) suivant la méthodologie (Panthou, 2014). .....	55
Figure 2. 4 : Arrivée d'une ligne de grain sur le plateau de l'aéroport (Est de Niamey). .....	56

Figure 2. 5 : Distribution temporelle des précipitations pendant la saison des pluies dans le Niger moyen et nombre de jours pluvieux par mois (en rouge) (Massazza et al., 2021 modifié).....	57
Figure 2. 6 : Dynamique temporelle des moyennes de températures journalières à travers le Sahel de l’ouest (a) et de l’est (b) (Fontaine et al., 2013). .....	58
Figure 2. 7 : Carte schématique des sols ouest africains (Banque Mondiale, 1986, modifié par Picouet 1999).....	61
Figure 2. 8 : Grands ensembles hydrologiques du fleuve Niger (Amogou, 2009). .....	62
Figure 2. 9 : Hydrogrammes du fleuve Niger à Niamey pour : la période humide (1951-1960) et sèche (1971-1980) du XX <sup>e</sup> siècle ; la décennie 2010-2016 ; deux années exceptionnelles récentes (2012-2013 et 2020) (Lebel et al., 2020). .....	65
Figure 2. 10 : Coefficients de ruissellement des trois principaux affluents sahéliens du fleuve Niger : le Gorouol à Alcongui, Dargol à Kakassi et Sirba à Garbey Kourou sur la période 1958-2020 (Massazza et al., 2021).....	66
Figure 2. 11 : Coupe géologique transversale entre Bangou Kirey à l’est et le fleuve Niger à l’ouest (Hado et al., 2022b).....	67
Figure 2. 12 : a) Zone d’inondation dans la ville de Niamey causé par la remontée de la nappe ; c) fosse septique communiquant avec la nappe phréatique (Hado et al., 2022b modifié). ....	68
Figure 2. 13 : Végétation dans la zone de Niamey pendant la saison des pluies. ....	69
Figure 2. 14 : Changements des états de surface dans le bassin versant du Gorouol, affluent de rive droite du fleuve Niger moyen (Amogu, 2009).....	71
Figure 2. 15 : Changements des états de surface dans le bassin versant de la Sirba, affluent de rive droite du fleuve Niger moyen (Amogu, 2009).....	72
Figure 2. 16 : Cartographie diachronique des terroirs de Saga Gorou, situé sur la rive gauche du fleuve Niger moyen (Abdourhamane Touré., 2011). .....	73

Figure 2. 17 : Sites étudiés et Découpage administratif de la ville de Niamey (Monographie région de Niamey, 2016 modifié).....	74
Figure 2. 18 : Dynamique de la population des pays du bassin du fleuve Niger (bleu) et de la ville de Niamey (orange) entre 1950 et 2021. ....	75
Figure 2. 19 : Quelques points de rejets d’eaux usées non traités dans le fleuve Niger à Niamey et potentielle source de pollution agricole. ....	77
Figure 2. 20 : Caniveaux d’évacuation des eaux pluviales de la ville de Niamey envahies par des déchets solides. A gauche le canal est quasiment bouché. ....	78
Figure 2. 21 : a) Activités des populations riveraines du fleuve Niger au quartier de Saga ; b) lavage de peaux d’animaux directement dans le fleuve, on peut apercevoir des pêcheurs à proximité ; c) Aire de pâturage des animaux domestiques au niveau de Saga.....	79
Figure 2. 22 : Localisation (a) des sites de Bangou Kirey (b & e) et Bangou Bi (c & d). La couleur des eaux des deux lacs est différente (Bangou Bi = eaux grisâtres et Bangou Kirey = eaux rougeâtres). ....	80
Figure 2. 23 : Localisation des sites d’échantillonnages et pluviomètres AMMA-CATCH. Sites sur le fleuve Niger à Niamey : Goudel, en amont ; Sage à l’aval et Tondi Koirey, le site le plus en amont de la ville. Bangou Bi et Bangou Kirey situés à l'Est de Niamey. ....	82
Figure 2. 24 : Localisation des points d’échantillonnages lors des mesures spéciales sur le fleuve Niger. a) le long du transect entre Saga et Tondi Koirey ; b) section Goudel et c) section Saga.....	84
Figure 2. 25 : Préparatifs de pirogue pour les mesures (en transect et section) en crue rouge du Niger ; site de Saga 16/08/2020 (débit = 2 740 m <sup>3</sup> /s). Le Niger avait atteint et dépassé le niveau d’alerte rouge fixé à 6,20 m (débit = 2 512 m <sup>3</sup> /s) le 12/08/2020.....	84
Figure 3. 1 : Méthodologie d’échantillonnage appliquée dans les plans et cours d’eau étudiés. ....	86

Figure 3. 2 : a) Sonde « YSI 556 MPS ». b) sonde « 3620 IDS SET G ». c) mesure de paramètres physico-chimiques sur le fleuve Niger. ....	87
Figure 3. 3 : Dénombrement d'E. coli suivant la méthode ISO 9308-3. Microplaque MUG EC sous lumière UV à 366 nm de longueur d'onde. Échantillon du fleuve Niger. Les puits à fluorescence bleue sous lumières UV sont positifs à la présence de bactéries recherchées. ...	88
Figure 3. 4 : Dénombrement d'E. coli suivant la méthode MA. 700-Ec.BCIG 1.0 (résultat après incubation). ....	89
Figure 3. 5 : Etapes de dénombrement d'E. coli dans les échantillons d'eau. ....	92
Figure 3. 6 : Représentation des protocoles de mesure normalisés des concentrations massiques en MES (Dramais et al., 2018). ....	95
Figure 3. 7 : Détermination de concentration en MES : a) pesée de filtre à vide avant utilisation, b) filtre après sédiment (échantillon de crue rouge très chargé), c) séchage de filtres à l'étuve ;d) pesée de filtre après filtration et chauffage à 105°C pendant 1h. ....	96
Figure 3. 8 : Filtration d'échantillon d'eau au labo « sol et érosion » de l'IRD de Niamey. ...	96
Figure 3. 9 : Mesure de couleur de l'océan par satellite. La mesure de la radiance comporte la lumière diffusée par l'atmosphère qui est éliminée après corrections pour ne laisser que celle réfléchie par la surface de la mer, rétrodiffusée vers le satellite (Dierssen et Randolph, 2013). ....	99
Figure 3. 10 : Signatures spectrales de surfaces naturelles dans le domaine du visible, proche infrarouge et de l'infrarouge moyen. ( <a href="https://e-cours.univ-paris1.fr/modules/ued/envcal/html/msg/index.html">https://e-cours.univ-paris1.fr/modules/ued/envcal/html/msg/index.html</a> ). ....	101
Figure 3. 11 : Réflectance pour des eaux chargées d'une suspension (mg/l) : (a) de sol argileux et (b) de sol limoneux. (Lodhi et al., 1997). ....	102
Figure 3. 12 : Différentes bandes embarquées par l'outil multispectrale de sentinel-2 en fonction de la résolution spatiale. a) bandes à 10 m, b) 20 m, c) et 60 m.	

([https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user\\_guides/sentinel-2-msi/resolutions/spatial](https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user_guides/sentinel-2-msi/resolutions/spatial)).  
 ..... 104

Figure 3. 13 : Etapes de correction d’images satellite par la chaîne de traitement MACCS-ATCOR Joint Algorithm MAJA (<https://labo.obs-mip.fr/multitemp/maccs-how-it-works/>). 105

Figure 3. 14 : Radiomètre SKYE à la station de Goudel mesurant la couleur de l’eau en continu a & b) Collecte de données et maintenance du dispositif (20 juillet 2020) ; c) composantes et orientation du radiomètre SKYE (Moussa et al., 2022 modifié). ..... 108

Figure 3. 15 : Séance d’analyse granulométrique au laboratoire LEFE à Toulouse. .... 110

Figure 3. 16 : Schéma du dispositif optique du granulomètre Laser Partica LA950-V2. 1 : diode laser dans le rouge pour les particules > 500 nm ;2 : LED bleue pour les particules < 500nm ;3 : détecteur pour les grosses particules ;4 : détecteur à angle supérieur.  
 ([http://www.horiba.com/fileadmin/uploads/Scientific/Documents/PSA/BRO\\_LA960\\_FR\\_Aout\\_2016\\_LR.pdf](http://www.horiba.com/fileadmin/uploads/Scientific/Documents/PSA/BRO_LA960_FR_Aout_2016_LR.pdf)). ..... 110

Figure 3. 17 : Principe de fonctionnement du microscope électronique à transmission (Lanje et al., 2014). ..... 111

Figure 3. 18 : a) Boite de grille pour le MET ; b) grille MET en cuivre ; c) décantation sur grille de la goutte échantillon ; d) séance d’observation d’échantillons du fleuve Niger sur la plateforme METI de Toulouse. .... 112

Figure 3. 19 : Principe de fonctionnement du MEB (Ruste, 2013 in Samson, 2015). ..... 114

Figure 3. 20 : Membrane en polycarbonate avec sédiment avant observation sous MEB. .... 114

Figure 4. 1 : a) Dynamique spatio-temporelle de concentration en MES du Niger par méthode de filtration au niveau de Tondi Koirey, Goudel et Saga ; b) Relations entre les mesures des trois stations et c) relation entre les mesures pour les deux types de filtres. .... 116

---

Figure 4. 2 : Précision des mesures de la concentration en MES : a) pour les filtres de 0,7 $\mu\text{m}$ de porosité (Trois sites sur le fleuve Niger) ; b) pour les filtres de 0,2 $\mu\text{m}$ de porosité (Goudel et Saga entre 1er avril et 12 août 2021).....	117
Figure 4. 3 : Concentration en MES du Niger obtenue par filtration le long du transect de mesure (Saga-Tondi koirey) en basses eaux (points gris – 30 mai 2020), crue rouge (points rouges – 16 juillet 2020) et crue blanche (points noirs - 23 mars 2021).....	119
Figure 4. 4 : Concentration en MES du fleuve Niger obtenue par filtration le long de la section de Goudel. Mesures effectuées à partir de la rive gauche au cours de la crue rouge (points rouges), crue blanche (points noirs) et les basses eaux (points gris).....	120
Figure 4. 5 : Concentration en MES du fleuve Niger obtenue par filtration le long de la section de Saga. Mesures effectuées à partir de la rive gauche au cours de la crue rouge (points rouges), crue blanche (points noirs) et les basses eaux (points gris).....	121
Figure 4. 6 : Dynamique de la concentration en matières en suspension des eaux de Bangou Bi et Bangou Kirey.....	122
Figure 4. 7 : Précision des mesures de la concentration en MES des eaux de Bangou Bi et Bangou Kirey avec les filtres de 0,7 $\mu\text{m}$ de porosité (entre le 17 mars et 11 août 2021). ....	123
Figure 4. 8 : Rapport de réflectance semi-horaire (rapport de réflectance proche infrarouge/rouge) pour chaque jour entre le 1e août 2018 et le 31 juillet 2019. Les données de nuit sont mises à zéro. ....	124
Figure 4. 9 : Corrélation entre les réflectances de surface de Sentinel-2 et du radiomètre SKYE dans les bandes du proche infrarouge (à gauche) et rouge (à droite). ....	125
Figure 4. 10 : Dynamique temporelle de la réflectance des eaux du fleuve Niger par le capteur Sentinel-2 et radiomètre SKYE dans les bandes rouge (en couleur rouge) et proche infrarouge (en couleur bleue).....	126

Figure 4. 11 : Relations entre les réflectances SKYE (en haut) et Sentinel-2 MSI (en bas) et la concentration en MES par filtration (données acquises entre 08 juillet 2018 et le 19 juillet 2020).....	128
Figure 4. 12 : Relation entre concentrations en MES du Niger à Goudel inversées par mesures radiométriques et celles obtenues par filtration. Données de validation acquises entre le 07 juillet 2020 et le 12 juillet 2021 pour Sentinel-2 ; 20/08/2020 et 12/08/2021. ....	129
Figure 4. 13 : Dynamique de la concentration des matières en suspension et débit du fleuve Niger Niamey entre 2018 et 2021. ....	130
Figure 4. 14 : Concentration en MES (mesures par filtration et inversion de données de radiomètre SKYE) en fonction du débit pendant le cycle hydrologique de 2019 à Niamey. Les flèches représentent l'évolution chronologique de la concentration en MES.....	131
Figure 4. 15 : Concentrations en matières suspension inversées et débit du fleuve Niger pendant les crues rouges en 2018, 2019 et 2020. ....	131
Figure 4. 16 : Dynamique temporelle de la concentration en MES dérivée de Sentinel-2 à Niamey et Ansongo entre 2018 et 2020. ....	133
Figure 4. 17 : Concentration en matières en suspension estimée à partir des données Sentinel-2 montrant l'apport de la Sirba pendant la crue rouge. a) 17 juin 2020 ; b) 14 mars 2020. ...	133
Figure 4. 18 : Courbes granulométriques des matières en suspension du fleuve Niger. Echantillons collectés lors de la crue rouge (2018-07-03, 2018-07-08, 2018-07-09 et 2019-08-06) et de la crue blanche (2017-10-06 et 2017-10-24) avec une concentration en MES égale respectivement à 2,34 g/L, 1,44 g/L, 0,71 g/L, 1,034 g/L, 0,065 g/L et 0,073 g/L.....	134
Figure 4. 19 : Images de Matières en suspension du fleuve Niger obtenues par microscope électronique à transmission (MET) : échantillons d'eau de crue rouge et blanche. K : Kaolinite ; Agg : Agrégat ; FeO (OH) : Oxyhydroxyde de fer. ....	135

Figure 4. 20 : Courbes granulométrique des matières en suspension des eaux de Bangou Bi et Bangou Kirey.....	136
Figure 4. 21 : Images de Matières en suspension des eaux Bangou Bi et Bangou Kirey obtenues par microscope électronique à transmission (MET). MES : Matières en Suspension ; Agg : Agrégat. ....	137
Figure 5. 1 : Dynamique de la teneur en E. coli du fleuve Niger a) au niveau des sites amonts de Niamey (juin 2018-août 2021) la période encadrée représente le zoom pendant la campagne de 2020 en b).....	146
Figure 5. 2 : Teneur en E. coli du fleuve Niger aux stations de Saga, Goudel et Tondi Koirey entre 2018 et 2021. La moyenne de chaque période est représentée en pointillés.....	147
Figure 5. 3 : Haut : Teneur en E. coli du fleuve Niger le long du transect de mesures (Saga-Tondi Koirey) en crue rouge (points rouges), en crue blanche (points noirs) et en basses eaux (points gris). Bas : Schéma avec la localisation des sites de prélèvement (image du fond : @Google Earth). ....	149
Figure 5. 4 : Haut : Teneur en E. coli du Niger le long de la section de Goudel en crue rouge (points rouges), en crue blanche (points noirs) et en basses eaux (points gris). Bas : Localisation des sites de mesures (image de fond = @Google Earth).....	151
Figure 5. 5 : Teneur en E. coli du fleuve Niger le long de la section de Saga en crue rouge (points rouges), en crue blanche (points noirs) et en basses eaux (points gris). Bas : Localisation des sites de prélèvement (image de fond = @Google Earth). ....	152
Figure 5. 6 : Teneur en E. coli des eaux de Bangou Bi et Bangou Kirey. ....	153
Figure 5. 7 : Dynamique des paramètres physico-chimiques et des MES aux différents sites de mesure sur le fleuve Niger. a) pH, b) température, c) conductivité, d) oxygène dissous, e) MES. Tondi Koirey = en orange, Goudel = en vert, Saga = en noir. ....	155

Figure 5. 8 : Dynamique temporelle des paramètres physico-chimiques des eaux de Bangou Bi et Bangou Kirey : a) pH ; b) température ; c) conductivité ; d) oxygène dissous. ....	157
Figure 5. 9 : a) Dynamique temporelle de la teneur en E. coli du fleuve Niger au niveau des différents sites de mesures (points verts = Goudel, points oranges = Tondi Koirey, points rouges = rive droite de Saga et points noirs = rive gauche de Saga) ; b) Moyenne de la teneur en E. coli à Goudel pendant la saison des pluies (trait rouge) et la saison sèche (trait noir) ; c) Moyenne de la teneur en E. coli au cours des phases du cycle hydrologique (phase de montée de crue rouge = en rouge brique, descente de crue rouge = rouge clair, montée de crue blanche = noir, descente de crue blanche = gris foncé, basses eaux = gris clair). ....	159
Figure 5. 10 : a) Teneur en E. coli du fleuve Niger au niveau des trois stations de mesure de Niamey au cours de la saison des pluies de 2020, b) Précipitations journalières à Niamey. .	161
Figure 5. 11 : Relation entre les variations de la teneur en E. coli du fleuve Niger à Goudel (a), Tondi Koirey (b) et Saga (c) et les précipitations. ....	163
Figure 5. 12 : a) Dynamique temporelle de la teneur en E. coli des eaux de Bangou Bi (figurés noirs) et Bangou Kirey (figurés rouges). « Moyenne BK » représente la moyenne des teneurs à Bangou Kirey prenant en compte la valeur haute du 17 mars 2021. ....	164
Figure 5. 13 : Dynamique de la teneur en E. coli et de la concentration en MES du fleuve Niger à Goudel, Saga et Tondi Koirey. Les cercles bleus représentent les périodes de fortes teneurs en E. coli et de faibles concentrations en MES. Les cercles rouges concernent les périodes des fortes teneurs en E. Coli et de concentrations en MES. ....	166
Figure 5. 14 : Teneur en E. coli versus concentration en MES des eaux du fleuve Niger aux trois stations de mesure. ....	167
Figure 5. 15 : Dynamique temporelle de la teneur en E. coli et de la concentration en MES des eaux de Bangou Bi (a) et Bangou Kirey (b). ....	168

Figure 5. 16 : Teneur en E. coli versus concentration en MES des eaux de Bangou Bi (cercles noirs) et Bangou Kirey (cercles rouges)..... 169

Figure 5. 17 : Images des MES des eaux du Niger fixées au glutaraldéhyde, incluses dans une résine Epoxy, et coupées avec un ultramicrotome pour obtenir des sections ultrafines observées par MET. MES = Matières en suspension ; B = Bactéries. .... 174

Figure 5. 18 : Localisation des pluies (moyenne journalière entre 0 et 15 mm) sur le bassin Niger. « H-E. coli » et « H-MES » correspondent respectivement aux évènements suivis par une hausse de la teneur en E. coli et une hausse de la concentration en MES à Niamey. Les cercles matérialisent les bassins versant des affluents amonts de la rive droite de Niamey. Produit : GPM\_3IMERGHH\_V06 (**Huffman et al., 2019**) fourni par Google Earth Engine. .... 176

Figure 6. 1 : Schéma conceptuel des sources de contamination fécale et de MES apportées aux eaux de surface dans la zone de Niamey. 1) Pluies provoquant une hausse de concentration en MES à Niamey ; 2) Pluies provoquant une hausse de la teneur en E. coli à Niamey. .... 186

## Liste des tableaux

---

Tableau 1. 1 : Valeurs guides fixées par l’OMS pour certains paramètres physico-chimiques des eaux de boisson (OMS, 2017a).....	20
Tableau 1. 2 : Directives sud-africaines (CSIR/NRE/CO/ER/2011/0009/A) et européennes (98/83/EC) (2006/7/CE) pour la qualité microbiologique de l’eau de boisson et à usage récréatif.....	29
Tableau 1. 3 : Caractéristiques physico-chimiques et bactériologiques des eaux du fleuve Niger en amont et en aval de Niamey. (Amadou et al., 2011). ....	50
Tableau 2. 1 : Inventaire des espèces végétales ligneuses assez représentatives dans les vallées sèches de la région de Niamey (Leprun 1992 ; Garba, 1984 ; Herman et al. 2005 in Mamadou, 2012).....	70
Tableau 2. 2 : coordonnées des points de prélèvements des eaux concernées par l’étude. ....	74
Tableau 3. 1 : Récapitulatif des variables mesurées en fonction du site. ....	85
Tableau 3. 2 : Dilutions et plages de mesures en fonction du type d’eau à analyser ( <a href="https://www.humeau.com/media/blfa_files/FT_Microplaque-MUG_EC_77010010802_FR_150321_bb6ff725ba3a781324535de957888393.pdf">https://www.humeau.com/media/blfa_files/FT_Microplaque-MUG_EC_77010010802_FR_150321_bb6ff725ba3a781324535de957888393.pdf</a> ). ....	91
Tableau 3. 3 : Techniques de détermination de la concentration en matières en suspension (MES) avec leur avantages et inconvénients ainsi que leur principe de fonctionnement (Wren et al., 2000).....	94
Tableau 3. 4 : Récapitulatif des dates de mesures de la concentration en matières en suspension et fréquence selon le site de mesure. ....	97
Tableau 3. 5 : Dates de prélèvement d’échantillon d’eau des différents sites pour lesquelles la nature et la granulométrie des eaux des cours et plans d’eau de Niamey ont été analysés....	109

---

Tableau 4. 1 : Coefficients de détermination et équations des différents ajustements essayés avec une relation de type puissance entre les concentrations en MES obtenues par filtration et les mesures radiométriques. Données acquises entre le 08/07/18 et le 19/07/20.....	127
Tableau 5. 1 : Moyenne et écart-type de la teneur en E. coli du fleuve Niger à Niamey. * = mesures réalisées sur la rive droite de Saga. ....	146
Tableau 5. 2 : Moyenne et écart-type des paramètres physico-chimiques, des MES et des teneurs en E. Coli au niveau des trois sites de mesures sur la rive gauche pour la période des mesures commune (20/04 au 16/08/2020). ....	156
Tableau 5. 3 : Paramètres physico-chimiques des lacs de Bangou Bi et Bangou Kirey. ....	157
Tableau 5. 4 : Coefficient de corrélation entre la teneur en E. coli des eaux et les variables environnementales (précipitations, MES, pH, température, conductivité et oxygène dissous). .....	161
Tableau 5. 5 : Moyenne de la teneur en E. coli et concentration en MES au cours de l'année. .....	165

## Références bibliographiques

---

- AAPG-MAMIWATA., 2021. Tele-epidemiology of diarrheal diseases in muddy tropical surface waters in West Africa – (MAMIWATA). *ANR-21-CE35-0014*.
- Abdourhamane Touré, A., 2011. *Erosion en milieu sableux cultivé au Niger : dynamique actuelle et passée en liaison avec la pression anthropique et les changements climatiques* (Doctoral dissertation, Dijon).
- Abdourhamane Touré, A., Tidjani, A., Guillon, R., Rajot, J., Petit, C., Garba, Z. and Sebag, D., 2016. Teneur en matières en suspension des lacs sahéliens en liaison avec les variations piézométrique et pluviométrique : cas des lacs Bangou Kirey et Bangou Bi, Sud-Ouest Niger. *Afrique Science*, 12(2), pp.384-392.
- Abia, A.L.K., Ubomba-Jaswa, E. and Momba, M.N.B., 2015. Impact of seasonal variation on *Escherichia coli* concentrations in the river bed sediments in the Apies River, South Africa. *Science of the Total Environment*, 537, pp.462-469.
- ABN, Autorité du Bassin du fleuve Niger., 2007. Plan d'action de développement durable (PADD) du bassin du Niger. Rapport, 30 p.
- Aboubakar, A., 2003. L'Initiative Bassin du Niger (IBN): développement durable et gestion intégrée d'un grand fleuve. *Afrique contemporaine*, 206(2), pp.179-203.
- Adjagodo, A., Tchibozo, M.A.D., Ahouangnivo, N.K. and Lawani, R., 2016. Flow of pollutants linked to anthropic activities and risks on worldwide surface water resource (literature review). *LARHYSS Journal P-ISSN 1112-3680/E-ISSN 2521-9782*, (28), pp.7-23.
- Ado, M.N., 2017. *Evaluation in situ et en conditions contrôlées de la phytodésalinisation des Vertisols irrigués. Cas d'étude du périmètre rizicole de Kollo (Niger) dans la vallée du fleuve Niger* (Doctoral dissertation, Agrocampus Ouest).
- Afnor (2005) — NF EN 872. *Qualité de l'eau – Dosage des matières en suspension – Méthode par filtration sur filtre en fibres de verre*, 16.
- Ahmed, W., Zhang, Q., Lobos, A., Senkbeil, J., Sadowsky, M.J., Harwood, V.J., Saeidi, N., Marinoni, O. and Ishii, S., 2018. Precipitation influences pathogenic bacteria and antibiotic resistance gene abundance in storm drain outfalls in coastal sub-tropical waters. *Environment international*, 116, pp.308-318.
- Alhou, B., 2007. *Impact des rejets de la ville de Niamey (Niger) sur la qualité des eaux du fleuve Niger*. Facultés Universitaires Notre-Dame de la paix Namur, Namur.
- Alhou, B., Boukari, I. and Darchambeau, F., 2016. Apports En Carbone Et Azote Dans Le Fleuve Niger À Tondibia (Niamey): Résultats De Deux (2) Ans D'observations. *European Scientific Journal*, 12(21).

- Alhou, B., Micha, J.C., Dodo, A. and Awaiss, A., 2009. Etude de la qualité physico-chimique et biologique des eaux du fleuve Niger à Niamey. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 3(2).
- Allies, A., Demarty, J., Olioso, A., Bouzou Moussa, I., Issoufou, H.B.A., Velluet, C., Bahir, M., Maïnassara, I., Oï, M., Chazarin, J.P. and Cappelaere, B., 2020. Evapotranspiration estimation in the Sahel using a new ensemble-contextual method. *Remote Sensing*, 12(3), p.380.
- Amadou, H., Laouali, M.S. and Manzola, A.S., 2011. Évaluation des rejets d'eaux usées de la ville de Niamey dans le fleuve Niger. *Afrique Science : Revue Internationale des Sciences et Technologie*, 7(2).
- Amalfitano, S., Corno, G., Eckert, E., Fazi, S., Ninio, S., Callieri, C., Grossart, H.P. and Eckert, W., 2017. Tracing particulate matter and associated microorganisms in freshwaters. *Hydrobiologia*, 800(1), pp.145-154.
- Amani, A. and Nguetora, M., 2002. Evidence d'une modification du régime hydrologique du fleuve Niger à Niamey. *IAHS PUBLICATION*, pp.449-456.
- AMMA-CATCH (1990): Precipitation dataset (5 minutes rainfall), 30 long-term stations over the Niamey square degree site (16 000 km<sup>2</sup>), Niger. IRD, CNRS-INSU, OSUG, OMP, OREME. [doi:10.17178/AMMA-CATCH.CL.Rain\\_N](https://doi.org/10.17178/AMMA-CATCH.CL.Rain_N).
- Amogu, O., 2009. *La dégradation des espaces sahéliens et ses conséquences sur l'alluvionnement du fleuve Niger moyen* (Doctoral dissertation, Université Joseph Fourier).
- Amogu, O., Descroix, L., Yéro, K.S., Le Breton, E., Mamadou, I., Ali, A., Vischel, T., Bader, J.C., Moussa, I.B., Gautier, E. and Boubkraoui, S., 2010. Increasing river flows in the Sahel?. *Water*, 2(2), pp.170-199.
- Anctil, F., 2016. *L'eau et ses enjeux* 2e édition. Presses de l'Université Laval.
- Andersen, I., Dione, O., Jarosewich-Holder, M., Oliver, J.C. and Golitzen, G., 2006. Le bassin du fleuve Niger : vers une vision de développement durable (No. 34518, pp. 1-172). *The World Bank*.
- Andrews, W.H. and Presnell, M.W., 1972. Rapid recovery of Escherichia coli from estuarine water. *Applied microbiology*, 23(3), pp.521-523. <https://doi.org/10.1128/am.23.3.521-523.1972>.
- Auclair, A. and Lasserre, F., 2013. Aménagements, politiques et conflits sur l'eau en Afrique de l'Ouest. *VertigO : la revue électronique en sciences de l'environnement*, 13(2).
- Aumaître, H., Lecaillon, E., Ollivier, S. and Bouchaud, O., 2004. Diarrhées bactériennes. *EMC-Chirurgie*, 1(5), pp.437-454.
- Autorité du Bassin du Fleuve Niger (ABFN), 2018. Rapport sur l'état du fleuve Niger au Mali. Available on: <https://q-eau-mali.net/media/rapport-sur-letat-du-fleuve-niger-au->

- mali/#:~:text=Le%20rapport%20permet%20de%20conna%C3%A9tre,et%20de%20plans%20d'actions (last Access: 17/01/2022).
- Autorité du Bassin du Niger (ABN), 2015 - *Plan d'investissement pour le renforcement de la résilience au changement climatique du bassin du fleuve Niger (PIC). Version finale*. Niamey, 153 p.
- Autorité du Bassin du Niger (ABN)., 2008. La charte de l'eau du bassin du Niger. 18 p.
- Ba, S., Onyeabor, E.U. and Moneke, A.N., 2022. The current legal framework for pollution control in the Niger River Basin relative to SDG 6.3. *Water International*, pp.1-18.
- Baban, S.M., 1995. The use of Landsat imagery to map fluvial sediment discharge into coastal waters. *Marine Geology*, 123(3-4), pp.263-270.
- Badamassi, M.B.M., El Aboudi, A., Tahiri, D., Taouss, A. and Gbetkom, P.G., 2018. Étude par télédétection de la dynamique urbaine de la ville de Niamey (Niger) de 1985 à 2016 et variations concomitantes de la pluviométrie.
- Balme, M., Galle, S. and Lebel, T., 2005. Démarrage de la saison des pluies au Sahel: variabilité aux échelles hydrologique et agronomique, analysée à partir des données EPSAT-Niger. *Science et changements planétaires/Sécheresse*, 16(1), pp.15-22.
- Banihashemi, A., Van Dyke, M.I. and Huck, P.M., 2015. Detection of viable bacterial pathogens in a drinking water source using propidium monoazide-quantitative PCR. *Journal of Water Supply: Research and Technology—AQUA*, 64(2), pp.139-148.
- Banque mondiale, 2017. Republic of Niger, Priorities for ending poverty and boosting shared prosperity: systematic country diagnostic. Report No. 115661-NE, pp126. Available at: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/28994?show=full&locale-attribute=fr>.
- Barbier, B., Dessouassi, R., Bouraïma, K., Marcelin, K., Constant, O., Mahamadou, I., Bisson, P., Lidon, B. and Jamin, J.Y., 2009. Productivité de l'eau d'irrigation dans le bassin du fleuve Niger.
- Barcina, I., Arana, I., Iriberry, J. and Egea, L., 1986. Factors affecting the survival of E. coli in a river. *Hydrobiologia*, 141(3), pp.249-253.
- Bertrand-Krajewski, J.L., Chebbo, G. and Saget, A., 1998. Distribution of pollutant mass vs volume in stormwater discharges and the first flush phenomenon. *Water research*, 32(8), pp.2341-2356.
- Billon, B., 1985. Le Niger à Niamey. Décrue et étiage 1985. Cah. Orstom. Série Hydrol. 21 (4), 3–22.
- Birama, D., 2020. Les changements climatiques au Mali et impacts.
- Bordalo, A.A., Onrassami, R. and Dechsakulwatana, C., 2002. Survival of faecal indicator bacteria in tropical estuarine waters (Bangpakong River, Thailand). *Journal of Applied Microbiology*, 93(5), pp.864-871.

- Borrego, A.F. and Romero, P., 1982. Study of the microbiological pollution of a Malaga littoral area II. Relationship between fecal coliforms and fecal streptococci. VI<sup>e</sup> Journée Étude Pollutions, Cannes, France, pp.561-569.
- Boubacar, G., Saley, M.M., Saley, I.A., Mouhaimouni, M. and Fodé, M., 2020. Analyses statistiques des variations des températures et précipitations observées à Niamey et à Nguigmi. *La Météorologie*, 110, pp.28-33.
- Bowan, P.A. and Tingan, E.M.A., 2020. Influence of Illegal Small-Scale Gold Mining on the Black Volta Water. *Communications in Applied Sciences*, 9.
- Brandt, M., Hiernaux, P., Rasmussen, K., Tucker, C.J., Wigneron, J.P., Diouf, A.A., Herrmann, S.M., Zhang, W., Kergoat, L., Mbow, C. and Abel, C., 2019. Changes in rainfall distribution promote woody foliage production in the Sahel. *Communications biology*, 2(1), pp.1-10.
- Brandt, M., Rasmussen, K., Hiernaux, P., Herrmann, S., Tucker, C.J., Tong, X., Tian, F., Mertz, O., Kergoat, L., Mbow, C. and David, J.L., 2018. Reduction of tree cover in West African woodlands and promotion in semi-arid farmlands. *Nature Geoscience*, 11(5), pp.328-333.
- Buehler, H.J., Katzman, P.A., Doisy, P.P. and Doisy, E.A., 1949. Hydrolysis of conjugated steroids by bacterial glucuronidase. *Proceedings of the Society for Experimental Biology and Medicine*, 72(2), pp.297-299.
- Byamukama, D., Mach, R.L., Kansiime, F., Manafi, M. and Farnleitner, A.H., 2005. Discrimination efficacy of fecal pollution detection in different aquatic habitats of a high-altitude tropical country, using presumptive coliforms, *Escherichia coli*, and *Clostridium perfringens* spores. *Applied and Environmental Microbiology*, 71(1), pp.65-71.
- Byappanahalli, M.N., Nevers, M.B., Korajkic, A., Staley, Z.R. and Harwood, V.J., 2012. Enterococci in the environment. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 76(4), pp.685-706.
- Caballero, I., Steinmetz, F. and Navarro, G., 2018. Evaluation of the first year of operational Sentinel-2A data for retrieval of suspended solids in medium-to high-turbidity waters. *Remote Sensing*, 10(7), p.982.
- Cabral, J.P. and Marques, C., 2006. Faecal coliform bacteria in Febros river (northwest Portugal): temporal variation, correlation with water parameters, and species identification. *Environmental monitoring and assessment*, 118(1), pp.21-36.
- Cano-Paoli, K., Chiogna, G. & Bellin, A. Convenient use of electrical conductivity measurements to investigate hydrological processes in Alpine headwaters. *Sci. Total Environ.* 685, 37–49 (2019).

- Carlton, E.J., Woster, A.P., DeWitt, P., Goldstein, R.S. and Levy, K., 2016. A systematic review and meta-analysis of ambient temperature and diarrhoeal diseases. *International journal of epidemiology*, 45(1), pp.117-130.
- Cassé, C., 2015. *Impact du forçage pluviométrique sur les inondations du fleuve Niger à Niamey: Etude à partir de données satellitaires et in-situ* (Doctoral dissertation, Université Paul Sabatier-Toulouse III).
- Casse, C., Gosset, M., Vischel, T., Quantin, G. and Tanimoun, B.A., 2016. Model-based study of the role of rainfall and land use–land cover in the changes in the occurrence and intensity of Niger red floods in Niamey between 1953 and 2012. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20(7), pp.2841-2859.
- CEAEQ, Centre d'Expertise en Analyse Environnementale du Québec, 2016. Recherche et Dénombrement d'Escherichia coli Thermotolérants Dans l'eau : Méthode par Filtration sur Membrane Utilisant le Milieu de Culture Mfc-BCIG. Ministère du Développement Durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques (MDDELCC), p. 17.
- Cecchi, P., Arfi, R., Berger, C., Couté, A., Gugger, M., Zongo, F., 2009. Cyanobacteria, cyanotoxins and potential health hazards in small tropical reservoirs. In: Andreini, M., Schuetz, T., Harrington, L. (Eds.), *Small Reservoirs Toolkit*. IWMI, Sri Lanka, Battaramulla, Sri Lanka, pp. 12. <http://www.smallreservoirs.org/full/toolkit>.
- Cecchi, P., Forkuor, G., Cofie, O., Lalanne, F., Poussin, J.C. and Jamin, J.Y., 2020. Small reservoirs, landscape changes and water quality in sub-Saharan West Africa. *Water*, 12(7), p.1967.
- Centre d'Expertise en Analyse Environnementale du Québec (CEAEQ), Dénombrement de Escherichia coli : méthode par tubes multiples employant un milieu de milieu de culture à substrats enzymatiques, MA. 700 – Ec-tm 1.0, Rév. 1, Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec, 2005, 19p.
- Characklis, G.W., Dilts, M.J., Simmons III, O.D., Likirdopulos, C.A., Krometis, L.A.H. and Sobsey, M.D., 2005. Microbial partitioning to settleable particles in stormwater. *Water research*, 39(9), pp.1773-1782.
- Charlotte Balière. Les Escherichia coli potentiellement pathogènes dans l'environnement littoral : cas des STEC et des EPEC. Microbiologie et Parasitologie. Université de Bretagne occidentale - Brest, 2016. Français.
- Chu, Y., Salles, C., Tournoud, M.G., Got, P., Troussellier, M., Rodier, C. and Caro, A., 2011. Faecal bacterial loads during flood events in Northwestern Mediterranean coastal rivers. *Journal of Hydrology*, 405(3-4), pp.501-511.
- Cleland, J. and Machiyama, K., 2017. The challenges posed by demographic change in sub-Saharan Africa: a concise overview. *Population and Development Review*, 43, pp.264-286.

- Conan, P., Joux, F., Torréton, J.P., Pujo-Pay, M., Douki, T., Rochelle-Newall, E. and Mari, X., 2008. Effect of solar ultraviolet radiation on bacterio-and phytoplankton activity in a large coral reef lagoon (southwest New Caledonia). *Aquatic Microbial Ecology*, 52(1), pp.83-98.
- Crepin-Bournival, M. 2022. Des rivières surveillées : s'adapter pour l'avenir bénéficie d'une aide financière du gouvernement du Québec tirée du programme Action-Climat Québec et rejoint les objectifs du Plan pour une économie verte 2030. Accessible en ligne : <https://www.g3e-ewag.ca/la-conductivite/>.
- Dardel, C., Kergoat, L., Hiernaux, P., Grippa, M., Mougins, E., Ciais, P., Nguyen, C.C., 2014a. Rain-use-efficiency: What it tells us about the conflicting Sahel greening and Sahelian paradox. *Remote Sens.* 6 (4), 3446–3474. <https://doi.org/10.3390/rs6043446>.
- Dardel, C., Kergoat, L., Hiernaux, P., Mougins, E., Grippa, M., Tucker, C.J., 2014b. Re-greening Sahel : 30 years of remote sensing data and field observations (Mali, Niger). *Remote Sens. Environ.* 140, 350–364. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.09.011>.
- Davies, C.M. and Bavor, H.J., 2000. The fate of stormwater-associated bacteria in constructed wetland and water pollution control pond systems. *Journal of Applied Microbiology*, 89(2), pp.349-360.
- Davies, C.M. and Evison, L.M., 1991. Sunlight and the survival of enteric bacteria in natural waters. *Journal of Applied Bacteriology*, 70(3), pp.265-274.
- De Vente, J. and Poesen, J., 2005. Predicting soil erosion and sediment yield at the basin scale: scale issues and semi-quantitative models. *Earth-science reviews*, 71(1-2), pp.95-125.
- Delolme, H., Boutin, J. and Andre, L.J., 1992. Eau douce et Pathologie. *Médecine d'Afrique Noire*, 39(3).
- Derose, K.L., Roche, L.M., Lile, D.F., Eastburn, D.J. and Tate, K.W., 2020. Microbial water quality conditions associated with livestock grazing, recreation, and rural residences in mixed-use landscapes. *Sustainability*, 12(12), p.5207.
- Descroix, L., Genthon, P., Amogu, O., Rajot, J.L., Sighomnou, D. and Vauclin, M., 2012. Change in Sahelian Rivers hydrograph: The case of recent red floods of the Niger River in the Niamey region. *Global and Planetary Change*, 98, pp.18-30.
- Descroix, L., Guichard, F., Grippa, M., Lambert, L.A., Panthou, G., Mahé, G., Gal, L., Dardel, C., Quantin, G., Kergoat, L. and Bouaita, Y., 2018. Evolution of surface hydrology in the Sahelo-Sudanian strip: An updated review. *Water*, 10(6), p.748.
- Descroix, L., Mahe, G., Olivry, J.C., Albergel, J., Tanimoun, B., Amadou, I., Coulibaly, B., Bouzou Moussa, I., Faran-Maiga, O., Malam Abdou, M. and Souley Yero, K., 2015. Facteurs anthropiques et environnementaux de la recrudescence des inondations au Sahel. *Les sociétés rurales face aux changements climatiques et environnementaux en Afrique de l'Ouest* » Ed. IRD, pp.153-170.

- Descroix, L., Niang, A.D., Dacosta, H., Panthou, G., Quantin, G. and Diedhiou, A., 2013. Évolution des pluies de cumul élevé et recrudescence des crues depuis 1951 dans le bassin du Niger moyen (Sahel). *Climatologie*, 10, pp.37-49.
- Dethier, E.N., Renshaw, C.E. and Magilligan, F.J., 2022. Rapid changes to global river suspended sediment flux by humans. *Science*, 376(6600), pp.1447-1452.
- Dierssen, H.M. and Randolph, K., 2013. Remote sensing of ocean color. In Earth system monitoring (pp. 439-472). *Springer*, New York, NY.
- Dinehart, R.L. and Burau, J.R., 2005. Averaged indicators of secondary flow in repeated acoustic Doppler current profiler crossings of bends. *Water Resources Research*, 41(9).
- Doxaran, D., Froidefond, J.M., Lavender, S. and Castaing, P., 2002. Spectral signature of highly turbid waters: Application with SPOT data to quantify suspended particulate matter concentrations. *Remote sensing of Environment*, 81(1), pp.149-161.
- Dramais, G., Camenen, B. and Le Coz, J., 2018. Comparaison de methodes pour la mesure des matieres en suspension dans les cours d'eau, en présence de sable. *La Houille Blanche*, (5-6), pp.96-105.
- Droppo, I.G., Liss, S.N., Williams, D., Nelson, T., Jaskot, C. and Trapp, B., 2009. Dynamic existence of waterborne pathogens within river sediment compartments. Implications for water quality regulatory affairs. *Environmental science & technology*, 43(6), pp.1737-1743.
- Du, X., Goss, G. and Faramarzi, M., 2020. Impacts of hydrological processes on stream temperature in a cold region watershed based on the SWAT equilibrium temperature model. *Water*, 12(4), p.1112.
- Effler, E., Isaäcson, M., Arntzen, L., Heenan, R., Canter, P., Barrett, T., Lee, L., Mambo, C., Levine, W., Zaidi, A. and Griffin, P.M., 2001. Factors contributing to the emergence of Escherichia coli O157 in Africa. *Emerging infectious diseases*, 7(5), p.812.
- Ekklesia, E., Shanahan, P., Chua, L.H.C. and Eikaas, H.S., 2015. Associations of chemical tracers and faecal indicator bacteria in a tropical urban catchment. *Water research*, 75, pp.270-281.
- EPA, 2012. Recreational Water Quality Criteria. US Environmental Protection Agency: Washington.
- Ervin, J.S., Russell, T.L., Layton, B.A., Yamahara, K.M., Wang, D., Sassoubre, L.M., Cao, Y., Kely, C.A., Sivaganesan, M., Boehm, A.B. and Holden, P.A., 2013. Characterization of fecal concentrations in human and other animal sources by physical, culture-based, and quantitative real-time PCR methods. *Water Research*, 47(18), pp.6873-6882.
- Esrey, S.A., Potash, J.B., Roberts, L. and Shiff, C., 1991. Effects of improved water supply and sanitation on ascariasis, diarrhoea, dracunculiasis, hookworm infection, schistosomiasis, and trachoma. *Bulletin of the World Health organization*, 69(5), p.609.

- Esteves, M. and Lapetite, J.M., 2003. A multi-scale approach of runoff generation in a Sahelian gully catchment: a case study in Niger. *Catena*, 50(2-4), pp.255-271.
- Faye, C., Grippa, M., Kergoat, L. and Robert, E., 2020. Investigating the drivers of total suspended sediment regime in the senegal river basin using landsat 8 satellite images. *Journal of Environmental Geography*, 13(1-2), pp.31-42.
- Ferguson, C.M., Coote, B.G., Ashbolt, N.J. and Stevenson, I.M., 1996. Relationships between indicators, pathogens and water quality in an estuarine system. *Water Research*, 30(9), pp.2045-2054.
- Ferry, L., Mietton, M., Muther, N., Martin, D., Coulibaly, N.T., Laval, M., Basselot, F.X., Coulibaly, Y.C., Collierie, M., Croix, K.D.L. and Olivry, J.C., 2012a. Extraction de sables et tendance à l'incision du Niger supérieur (Mali). *Géomorphologie: relief, processus, environnement*, 18(3), pp.351-368.
- Ferry, L., Muther, N., Coulibaly, N., Martin, D., Mietton, M., Olivry, J.C., Paturel, J.E., Barry, M.A. and Yéna, M., 2012b. Le fleuve Niger, de la forêt tropicale guinéenne au désert saharien: Les grands traits des régimes hydrologiques. *Mémoire IRD & UNESCO*.
- Flint, K.P., 1987. La survie à long terme d'*Escherichia coli* dans l'eau des rivières. *Journal of Applied Bacteriology*, 63 (3), pp.261-270. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.1987.tb04945.x>.
- Fontaine, B., Roucou, P., Gaetani, M. and Marteau, R., 2011. Recent changes in precipitation, ITCZ convection and northern tropical circulation over North Africa (1979–2007). *International Journal of Climatology*, 31(5), pp.633-648. <https://doi.org/10.1002/joc.2108>.
- Foster, I.D.L., Millington, R. and Grew, R.G., 1992. The impact of particle size controls on stream turbidity measurement; some implications for suspended sediment yield estimation. Erosion and sediment transport monitoring programmes in river basins, 210, pp.51-62.
- Fries, J.S., Characklis, G.W. and Noble, R.T., 2008. Sediment–water exchange of *Vibrio* sp. and fecal indicator bacteria: implications for persistence and transport in the Neuse River Estuary, North Carolina, USA. *Water research*, 42(4-5), pp.941-950.
- Gal, L., Grippa, M., Hiernaux, P., Pons, L. and Kergoat, L., 2017. The paradoxical evolution of runoff in the pastoral Sahel: analysis of the hydrological changes over the Agoufou watershed (Mali) using the KINEROS-2 model. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(9), pp.4591-4613.
- Gallay, M., Martinez, J.M., Mora, A., Castellano, B., Yépez, S., Cochonneau, G., Alfonso, J.A., Carrera, J.M., López, J.L. and Laraque, A., 2019. Assessing Orinoco river sediment discharge trend using MODIS satellite images. *Journal of South American Earth Sciences*, 91, pp.320-331.

- Galle, S., Ehrmann, M. and Peugeot, C., 1999. Water balance in a banded vegetation pattern: A case study of tiger bush in western Niger. *Catena*, 37(1-2), pp.197-216.
- Galle, S., Grippa, M., Peugeot, C., Moussa, I.B., Cappelaere, B., Demarty, J., Mougin, E., Panthou, G., Adjomayi, P., Agbossou, E.K. and Ba, A., 2018. AMMA-CATCH, a critical zone observatory in West Africa monitoring a region in transition. *Vadose Zone Journal*, 17(1), pp.1-24.
- Gao, P., Zhang, X., Mu, X., Wang, F., Li, R. and Zhang, X., 2010. Trend and change-point analyses of streamflow and sediment discharge in the Yellow River during 1950–2005. *Hydrological Sciences Journal–Journal des Sciences Hydrologiques*, 55(2), pp.275-285.
- Garzio-Hadzick, A., Shelton, D.R., Hill, R.L., Pachepsky, Y.A., Guber, A.K. and Rowland, R., 2010. Survival of manure-borne E. coli in streambed sediment: effects of temperature and sediment properties. *Water research*, 44(9), pp.2753-2762.
- Gavaud, M., 1977. Les grands traits de la pédogenèse au Niger méridional. Travaux et documents de l'ORSTOM, 76. ORSTOM, Paris, 102 pp.
- Geldreich, E.E., 1970. Applying bacteriological parameters to recreational water quality. *Journal-American Water Works Association*, 62(2), pp.113-120.
- Gerba, C.P. and McLeod, J.S., 1976. Effect of sediments on the survival of Escherichia coli in marine waters. *Applied and environmental microbiology*, 32(1), pp.114-120.
- Giri, S., Qiu, Z. and Zhang, Z., 2018. Assessing the impacts of land use on downstream water quality using a hydrologically sensitive area concept. *Journal of Environmental Management*, 213, pp.309-319.
- Global Burden of Disease Collaborative Network. Global Burden of Disease Study 2019 (GBD 2019) Results. Seattle, United States: Institute for Health Metrics and Evaluation (IHME), 2021.
- Gomez, B., Mertes, L.A., Phillips, J.D., Magilligan, F.J. and James, L.A., 1995. Sediment characteristics of an extreme flood: 1993 upper Mississippi River valley. *Geology*, 23(11), pp.963-966.
- Graf, W.L., 1999. Dam nation: A geographic census of American dams and their large-scale hydrologic impacts. *Water resources research*, 35(4), pp.1305-1311.
- Greigert, J., Pougnet, R., Black, R., Faure, H., Joulia, F., Lessard, L., Machens, E., Pellaton, C., Pirard, F. and Reichelt, R., 1966. Republic of Niger. Geological Map to 1/2 000 000 scale; République du Niger. Carte Géologique à l'échelle: 1/2 000 000.
- Griffin, D.W., Gibson III, C.J., Lipp, E.K., Riley, K., Paul III, J.H. and Rose, J.B., 1999. Detection of viral pathogens by reverse transcriptase PCR and of microbial indicators by standard methods in the canals of the Florida Keys. *Applied and Environmental Microbiology*, 65(9), pp.4118-4125.

- Grove, A. T. (1972), The load carried by some West African rivers, *Journal of Hydrology*, 16, 277-300.
- Guichard, F., Kergoat, L., Hourdin, F., Authaud, C.L., Barbier, J., Mougin, E. and Diarra, B., 2015. Le réchauffement climatique observé depuis 1950 au Sahel. Les sociétés rurales face aux changements climatiques et environnementaux en Afrique de l'Ouest, pp.23-42.
- Guillobez, S., 1990. Réflexions théoriques du ruissellement et de l'érosion. Bases d'un contrôle, application à la détermination des écartements entre dispositifs anti-érosifs. *Bois et forêts des tropiques*, 226, pp. 37-47.
- Hado, A.H., 2022. *Contribution hydrogéologique à la compréhension des inondations en milieu urbain : cas de la vallée du Gounti Yéna dans la ville de Niamey (Niger)* (Thèse de doctorat, Université Abdou Moumouni).
- Hado, H.A., Adamou, M.M., Favreau, G., Hima, K., Dano, I.D., Amadou, A.T. and Saidou, N., 2022a. Physicochemical and Bacteriological Quality of Ground Water in the Basin of Gounti Yena Valley in Niamey City (Niger Republic). *Journal of Water Resource and Protection*, 14(2), pp.186-220.
- Hado, H.A., Adamou, M.M., Hima, K., Favreau, G., Boucher, M. and Dano, I.D., 2021. Rise of Urban Water Table as a Cause of Flooding: Improving Knowledge in the City of Niamey (Niger Republic). *Journal of Water Resource and Protection*, 13(12), pp.976-999.
- Hado, H.A., Moustapha, A.M., Favreau, G., Hima, K., Dano, I.D., Toure, A.A. and Saidou, N., 2022b. Monitoring of the Physicochemical and Bacteriological Quality of the Water of the Gounti-Yéna Basin and Assessment of the Impact on the Health of the Populations. *Journal of Environmental Protection*, 13(7), pp.459-489.
- Hagolle, O., Huc, M., Desjardins, C., Auer, S. and Richter, R., 2017. Maja algorithm theoretical basis document. *Development*, pp.1-39. <https://doi.org/10.5281/zenodo.1209633>.
- Hagolle, O., Huc, M., Pascual, D.V. and Dedieu, G., 2015. A multi-temporal and multi-spectral method to estimate aerosol optical thickness over land, for the atmospheric correction of FormoSat-2, LandSat, VEN $\mu$ S and Sentinel-2 images. *Remote Sensing*, 7(3), pp.2668-2691.
- Hama Garba, O., 2022. *Etude hydrogéologique des échanges entre le fleuve Niger et les aquifères sédimentaires et le socle au Niger* (Thèse de doctorat, Université Abdou Moumouni/Université Grenoble Alpes).
- Hamadou Younoussa, B., Hassane Yaou, T., Abdourhamane Tour'e, A., Moussa Issaka, A., Hassane, B., Garba, Z., 2020. Dynamique récente et actuelle de l'érosion en nappe aux abords du fleuve Niger. *Afrique. Science* 16 (1), 247–259.
- Han, B., Loisel, H., Vantrepotte, V., Mériaux, X., Bryère, P., Ouillon, S., Dessailly, D., Xing, Q. and Zhu, J., 2016. Development of a semi-analytical algorithm for the retrieval of

- suspended particulate matter from remote sensing over clear to very turbid waters. *Remote Sensing*, 8(3), p.211.
- Harmel, R.D., Karthikeyan, R., Gentry, T. and Srinivasan, R., 2010. Effects of agricultural management, land use, and watershed scale on E. coli concentrations in runoff and streamflow. *Transactions of the ASABE*, 53(6), pp.1833-1841.
- Harrault, L., Milek, K., Jardé, E., Jeanneau, L., Derrien, M. and Anderson, D.G., 2019. Faecal biomarkers can distinguish specific mammalian species in modern and past environments. *PLoS One*, 14(2), p.e0211119.
- Hassane, A.B., Leduc, C., Favreau, G., Bekins, B.A. and Margueron, T., 2016. Impacts of a large Sahelian city on groundwater hydrodynamics and quality: example of Niamey (Niger). *Hydrogeology journal*, 24(2), pp.407-423.
- Hathaway, J.M., Hunt, W.F. and Simmons III, O.D., 2010. Statistical evaluation of factors affecting indicator bacteria in urban storm-water runoff. *Journal of Environmental Engineering*, 136(12), pp.1360-1368.
- Hawley GG. The condensed chemical dictionary, 10e éd. New York, Van Nostrand Reinhold, 1981.
- Hernandez, J.F., Guibert, J.M., Delattre, J.M., Oger, C., Charriere, C., Hughes, B., Serceau, R. and Sinegre, F., 1991. Miniaturized fluorogenic assays for enumeration of E. coli and enterococci in marine water. *Water Science and Technology*, 24(2), pp.137-141.
- Herrig, I., Seis, W., Fischer, H., Regnery, J., Manz, W., Reifferscheid, G. and Böer, S., 2019. Prediction of fecal indicator organism concentrations in rivers: the shifting role of environmental factors under varying flow conditions. *Environmental Sciences Europe*, 31(1), pp.1-16.
- Hickling, S. and Bevan, J., 2010. Passage à l'échelle de l'ATPC en Afrique subsaharienne. *Si la merde m'était contée : l'Assainissement total piloté par la communauté en Afrique*, p.55.
- Hiernaux, P. and Le Houérou, H.N., 2006. Les parcours du Sahel. *Science et changements planétaires/Sécheresse*, 17(1), pp.51-71.
- Hiernaux, P., Diarra, L., Trichon, V., Mougin, E., Soumaguel, N. and Baup, F., 2009. Woody plant population dynamics in response to climate changes from 1984 to 2006 in Sahel (Gourma, Mali). *Journal of Hydrology*, 375(1-2), pp.103-113.
- Hiernaux, P.H., Cissé, M.I., Diarra, L. and De Leeuw, P.N., 1994. Fluctuations saisonnières de la feuillaison des arbres et des buissons sahéliens. Conséquences pour la quantification des ressources fourragères. *Revue d'Elevage et de Médecine Vétérinaire des Pays tropicaux*, 47(1), pp.117-125.
- Hoff, H., 2009. Global water resources and their management. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 1(2), pp.141-147.

- Horiba. Partica LA950-V2. [En ligne]. Available on: <http://www.horiba.com/fr/scientific/products/particle-characterization/particle-size-analysis/details/la-950-laser-particle-size-analyzer-108/> (last access: 11/01/2022).
- Houston, A.C., 1900. On the value of examination of water for Streptococci and Staphylococci with a view to detection of its recent contamination with animal organic matter. *Sup. 29th Ann. Report of the Local Government Board containing the Report of the Medical Officer for 1899, 1900*, p.548.
- Huffman, G.J., E.F. Stocker, D.T. Bolvin, E.J. Nelkin, Jackson Tan (2019), GPM IMERG Late Precipitation L3 Half Hourly 0.1 degree x 0.1 degree V06, Greenbelt, MD, *Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center* (GES DISC). 10.5067/GPM/IMERG/3B-HH-L/06.
- Hulme, M., Doherty, R., Ngara, T., New, M. and Lister, D., 2001. African climate change: 1900-2100. *Climate research*, 17(2), pp.145-168.
- Huon, S., Bellanger, B., Bonté, P., Sogon, S., Podwojewski, P., Girardin, C., Valentin, C., de Rouw, A., Velasquez, F., Bricquet, J.P. and Mariotti, A., 2005. Monitoring soil organic carbon erosion with isotopic tracers: two case studies on cultivated tropical catchments with steep slopes (Laos, Venezuela). In *Soil Erosion and Carbon Dynamics* (pp. 301-328). CRC Press.
- Huong, T. Le., Rochelle-Newall, E., Auda, Y., Ribolzi, O., Sengtaheuanghoung, O., Thébault, E., Soulileuth, B. and Pommier, T., 2018. Vicinal land use change strongly drives stream bacterial community in a tropical montane catchment. *FEMS microbiology ecology*, 94(11), p.fiy155.
- Institut Bruxellois pour la Gestion de l'Environnement (IBGE), 2005. Qualité physico-chimique et chimique des eaux de surface : cadre général.
- Ishii, S., Yan, T., Vu, H., Hansen, D.L., Hicks, R.E. and Sadowsky, M.J., 2010. Factors controlling long-term survival and growth of naturalized *Escherichia coli* populations in temperate field soils. *Microbes and Environments*, 25(1), pp.8-14.
- Islam, M.M., Hofstra, N. and Islam, M., 2017. The impact of environmental variables on faecal indicator bacteria in the Betna river basin, Bangladesh. *Environmental Processes*, 4(2), pp.319-332.
- Islam, M.M., Iqbal, M.S., D'Souza, N. and Islam, M.A., 2021. A review on present and future microbial surface water quality worldwide. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 16, p.100523. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2021.100523>.
- Issaka, H. and Badariotti, D., 2013. Les inondations à Niamey, enjeux autour d'un phénomène complexe. *Les Cahiers d'Outre-Mer. Revue de géographie de Bordeaux*, 66(263), pp.295-310.

- Jamieson, R.C., Joy, D.M., Lee, H., Kostaschuk, R. and Gordon, R.J., 2005. Resuspension of sediment-associated *Escherichia coli* in a natural stream. *Journal of Environmental Quality*, 34(2), pp.581-589.
- Jang, J., Hur, H.G., Sadowsky, M.J., Byappanahalli, M.N., Yan, T. and Ishii, S., 2017. Environmental *Escherichia coli*: ecology and public health implications—a review. *Journal of applied microbiology*, 123(3), pp.570-581.
- Janicot, S., Moron, V. and Fontaine, B., 1996. Sahel droughts and ENSO dynamics. *Geophysical Research Letters*, 23(5), pp.515-518.
- Jarvis, B., Wilrich, C. and Wilrich, P.T., 2010. Reconsideration of the derivation of Most Probable Numbers, their standard deviations, confidence bounds and rarity values. *Journal of applied microbiology*, 109(5), pp.1660-1667. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2010.04792.x>.
- Jeanneau, L., Solecki, O., Wéry, N., Jardé, E., Gourmelon, M., Communal, P.Y., Jadas-Hécart, A., Caprais, M.P., Gruau, G. and Pourcher, A.M., 2012. Relative decay of fecal indicator bacteria and human-associated markers: a microcosm study simulating wastewater input into seawater and freshwater. *Environmental science & technology*, 46(4), pp.2375-2382.
- Jeng, H.C., England, A.J. and Bradford, H.B., 2005. Indicator organisms associated with stormwater suspended particles and estuarine sediment. *Journal of environmental science and health*, 40(4), pp.779-791.
- Jiang, L., Whiteway, M. and Shen, S.H., 2001. A novel type 2C protein phosphatase from the human fungal pathogen *Candida albicans*. *FEBS letters*, 509(1), pp.142-144.
- Jiang, S.C. and Chu, W., 2004. PCR detection of pathogenic viruses in southern California urban rivers. *Journal of Applied Microbiology*, 97(1), pp.17-28.
- Jozić, S., Morović, M., Šolić, M., Krstulović, N. and Ordulj, M., 2014. Effect of solar radiation, temperature and salinity on the survival of two different strains of *Escherichia coli*. *Fresenius environmental bulletin*, 23(8), pp.1852-1859.
- Kaba, E., Philpot, W. and Steenhuis, T., 2014. Evaluating suitability of MODIS-Terra images for reproducing historic sediment concentrations in water bodies: Lake Tana, Ethiopia. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 26, pp.286-297.
- Kilian, M. and Bülow, P., 1979. Rapid Identification of Enterobacteriaceae: II. Use of a  $\beta$ -glucuronidase Detecting Agar Medium (PGUA Agar) for the Identification of *E. coli* in Primary Cultures of Urine Samples. *Acta Pathologica Microbiologica Scandinavica Section B Microbiology*, 87(1-6), pp.271-276.
- Koffi-Nevry, R., Assi-Clair, B.J., Assemand, E.F., Affou, S.W. and Koussémon, M., 2012. Origine des témoins de contamination fécale de l'eau d'arrosage de la laitue (*Lactuca*

- sativa) cultivée dans la zone périurbaine d'Abidjan. *Journal of Applied Biosciences*, 52, pp.3669-3675.
- Kolstad, E.W. and Johansson, K.A., 2011. Uncertainties associated with quantifying climate change impacts on human health: a case study for diarrhea. *Environmental health perspectives*, 119(3), pp.299-305.
- Korajkic, A., McMinn, B.R., Harwood, V.J., Shanks, O.C., Fout, G.S. and Ashbolt, N.J., 2013. Differential decay of enterococci and *Escherichia coli* originating from two fecal pollution sources. *Applied and environmental microbiology*, 79(7), pp.2488-2492.
- Korajkic, A., Parfrey, L.W., McMinn, B.R., Baeza, Y.V., VanTeuren, W., Knight, R. and Shanks, O.C., 2015. Changes in bacterial and eukaryotic communities during sewage decomposition in Mississippi river water. *Water research*, 69, pp.30-39.
- Krause, A.K., Loughran, R.J. and Kalma, J.D., 2003. The use of Caesium-137 to assess surface soil erosion status in a water-supply catchment in the Hunter Valley, New South Wales, Australia. *Australian Geographical Studies*, 41(1), pp.73-84.
- Lang, J., Kogbe, C., Alidou, S., Alzouma, K.A., Bellion, G., Dubois, D., Durand, A., Guiraud, R., Houessou, A., De Klasz, I. and Romann, E., 1990. The continental terminal in West Africa. *Journal of African Earth Sciences (and the Middle East)*, 10(1-2), pp.79-99.
- Lanje, A.S., Sharma, S.J. and Pode, R., 2014. Functional Nanomaterial Synthesis and Characterization Electrical. Magnetic and Optical.
- Lebel, T. and Ali, A., 2009. Recent trends in the Central and Western Sahel rainfall regime (1990–2007). *Journal of hydrology*, 375(1-2), pp.52-64.
- Lebel, T., Panthou, G. and Vischel, T., 2020. Inondations en Afrique: une nouvelle ère hydroclimatique. *The Conversation*, 24, pp.6-p.
- Leblanc, M.J., Favreau, G., Massuel, S., Tweed, S.O., Loireau, M. and Cappelaere, B., 2008. Land clearance and hydrological change in the Sahel: SW Niger. *Global and Planetary Change*, 61(3-4), pp.135-150.
- Leduc, C., Favreau, G. and Schroeter, P., 2001. Long-term rise in a Sahelian water-table: The Continental Terminal in south-west Niger. *Journal of hydrology*, 243(1-2), pp.43-54.
- Levi, Y., 2007. Eau et Santé Publique. *L'EAU*, p.110.
- Li, P., Ke, Y., Bai, J., Zhang, S., Chen, M. and Zhou, D., 2019. Spatiotemporal dynamics of suspended particulate matter in the Yellow River Estuary, China during the past two decades based on time-series Landsat and Sentinel-2 data. *Marine Pollution Bulletin*, 149, p.110518.
- Liu, H., Li, Q., Shi, T., Hu, S., Wu, G. and Zhou, Q., 2017. Application of sentinel 2 MSI images to retrieve suspended particulate matter concentrations in Poyang Lake. *Remote Sensing*, 9(7), p.761. <https://doi.org/10.3390/rs9070761>.

- Lodhi, M.A., Rundquist, D.C., Han, L. and Kuzila, M.S., 1997. The Potential for Remote Sensing of Loess Soils Suspended in Surface Waters 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 33(1), pp.111-117.
- Ludwig, W. and Probst, J.L., 1998. River sediment discharge to the oceans; present-day controls and global budgets. *American Journal of Science*, 298(4), pp.265-295.
- Machens, E., 1973. *Contribution à l'étude des formations du socle cristallin et de la couverture sédimentaire de l'Ouest de la République du Niger* (Vol. 82). Éditions BRGM.
- Mahamane, M., Matchi, I.I., Hochschild, V. and Mahamane, A., 2020. Évaluation du risque d'érosion du sol au Sahel: cas du paysage de Tillabéry. *Afrique Science*, 16(5), pp.235-248.
- Mahe, G., Lienou, G., Bamba, F., Paturel, J.E., Adeaga, O., Descroix, L., Mariko, A., Olivry, J.C., Sangaré, S., Ogilvie, A. and Clanet, J.C., 2011, July. Le fleuve Niger et le changement climatique au cours des 100 dernières années. In *Hydroclimatology variability and change, Proceedings of symposium held during IUGG* (Vol. 344, pp. 131-7).
- Mahé, G., Olivry, J.C. and Servat, E., 2005. extrêmes et paradoxes. Regional Hydrological Impacts of Climatic Change: Hydroclimatic variability, 2, p.169.
- Maïga, H., Marie, J., Morand, P., N'Djim, H. and Orange, D., 2007. Présentation du fleuve Niger. *Avenir du fleuve Niger*, 1, pp.3-105.
- Mamadou, I., 2012. *La dynamique accélérée des koris de la région de Niamey et ses conséquences sur l'ensablement du fleuve Niger* (Doctoral dissertation, Thèse de doctorat : Université de Grenoble 1 (France) et Université Abdou Moumouni de Niamey (Niger)).
- Mamadou, I., 2021. Dynamiques des îles et bancs sédimentaires du fleuve Niger dans la région de Niamey au Niger. *Environmental and Water Sciences, public Health and Territorial Intelligence Journal*, 5(4).
- Mamadou, I., Gautier, E., Descroix, L., Noma, I., Moussa, I.B., Maïga, O.F., Genthon, P., Amogu, O., Abdou, M.M. and Vandervaere, J.P., 2015. Exorheism growth as an explanation of increasing flooding in the Sahel. *Catena*, 131, pp.130-139.
- Mancini, J.L., 1978. Numerical estimates of coliform mortality rates under various conditions. *Journal (Water Pollution Control Federation)*, pp.2477-2484.
- Manzo, O.L., Amani, A., Guimbo, I.D., Rachidi, A.H. and Mahamane, A., 2020. Impacts des banquettes dans la récupération des terres dégradées au Niger. *Journal of Applied Biosciences*, 151(1), pp.15510-15529.
- Marie, J., Morand, P. and N'Djim, H. eds., 2014. *Avenir du fleuve Niger*. IRD Éditions.

- Marteau, R., Sultan, B., Moron, V., Alhassane, A., Baron, C. and Traoré, S.B., 2011. The onset of the rainy season and farmers' sowing strategy for pearl millet cultivation in Southwest Niger. *Agricultural and forest meteorology*, 151(10), pp.1356-1369.
- Martinez, J.M., Guyot, J.L., Filizola, N. and Sondag, F., 2009. Increase in suspended sediment discharge of the Amazon River assessed by monitoring network and satellite data. *Catena*, 79(3), pp.257-264.
- Massazza, G., Bacci, M., Descroix, L., Ibrahim, M.H., Fiorillo, E., Katiellou, G.L., Panthou, G., Pezzoli, A., Rosso, M., Sauzedde, E. and Terenziani, A., 2021. Recent changes in hydroclimatic patterns over medium Niger River Basins at the origin of the 2020 flood in Niamey (Niger). *Water*, 13(12), p.1659.
- Massazza, G., Tamagnone, P., Wilcox, C., Belcore, E., Pezzoli, A., Vischel, T., Panthou, G., Housseini Ibrahim, M., Tiepolo, M., Tarchiani, V. and Rosso, M., 2019. Flood hazard scenarios of the Sirba River (Niger): Evaluation of the hazard thresholds and flooding areas. *Water*, 11(5), p.1018.
- Maucorps, J., 1987. Estimation spatiale des risques de dégradation physique des sols dans le Nord-Pas-de-Calais. *Hommes et Terres du Nord*, 3(1), pp.147-150.
- McCambridge, J. and McMeekin, T.A., 1980. Relative effects of bacterial and protozoan predators on survival of *Escherichia coli* in estuarine water samples. *Applied and Environmental Microbiology*, 40(5), pp.907-911.
- McCarthy, D.T., Hathaway, J.M., Hunt, W.F. and Deletic, A., 2012. Intra-event variability of *Escherichia coli* and total suspended solids in urban stormwater runoff. *Water research*, 46(20), pp.6661-6670.
- McCrary, M.H., 1915. The numerical interpretation of fermentation-tube results. *The Journal of Infectious Diseases*, pp.183-212.
- Meybeck, M., 1986. Composition chimique des ruisseaux non pollués en France. Chemical composition of headwater streams in France. *Sciences Géologiques, bulletins et mémoires*, 39(1), pp.3-77.
- Meybeck, M., 1987. Global chemical weathering of surficial rocks estimated from river dissolved loads. *American journal of science*, 287(5), pp.401-428.
- Meybeck, M., Laroche, L., Dürr, H.H. and Syvitski, J.P.M., 2003. Global variability of daily total suspended solids and their fluxes in rivers. *Global and planetary change*, 39(1-2), pp.65-93.
- Ministère de l'Hydraulique et de l'Assainissement (MHA) du Niger. 2016. Programme sectoriel eau hygiène et assainissement (PROSEHA 2016-2030). Rapport, 108 p.
- Ministère de l'Hydraulique et de l'Assainissement (MHA) du Niger. 2020. Rapport annuel d'activités 2020 du ministère de l'hydraulique et de l'assainissement. Rapport, 56 p.

- Mironczuk, A. and Hościło, A., 2017. Mapping tree cover with Sentinel-2 data using the Support Vector Machine (SVM). *Geoinformation Issues*, 9(1 (9)), pp.27-38.
- Mitch, A.A., Gasner, K.C. and Mitch, W.A., 2010. Fecal coliform accumulation within a river subject to seasonally-disinfected wastewater discharges. *Water Research*, 44(16), pp.4776-4782.
- Mobley, C.D., 1999. Estimation of the remote-sensing reflectance from above-surface measurements. *Applied optics*, 38(36), pp.7442-7455.
- Molle François. Gouvernance de l'eau. In : Berroir S., Cauvin C., Chamussy H. (ed.). Hypergeo [encyclopédie électronique en ligne]. 2020, 4 p. Molle François. Gouvernance de l'eau. In : Berroir S., Cauvin C., Chamussy H. (ed.).
- Monfort, M., 1996. Reconstitution géologique des aquifères du continental terminal dans la région de Niamey. In *Stage de Maîtrise en Sciences de l'Environnement, ORSTOM-Montpellier*.
- Monographie régionale de Niamey, 2016. Recensement Général de la Population et de l'Habitat 2012. *Rapport*, 119 p.
- Moussa, B.Y., Mousa, Y., Saqalli, M., Laffly, D. and Chapron, E., 2022. Pratiques de pêche de poissons et changement climatique sur le fleuve Niger à Niamey, Niger. *Afrique Science*.
- Moussa, M.B., Abdourhamane Touré, A., Kergoat, L., Lartiges, B., Rochelle-Newall, E., Robert, E., Gosset, M., Tanimoun, B.A. and Grippa, M., 2022. Spatio-temporal dynamics of suspended particulate matter in the middle Niger River using in-situ and satellite radiometric measurements. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 41, p.101-106.
- N'kaya, G.D.M., Orange, D., Bayonne Padou, S.M., Datok, P. and Laraque, A., 2020. Temporal variability of sediments, dissolved solids and dissolved organic matter fluxes in the Congo river at Brazzaville/Kinshasa. *Geosciences*, 10(9), p.341.
- Nakhle, P., 2021. *Dissemination of fecal indicator bacteria in tropical hydrosystems: transport and fate of Escherichia coli in the Mekong watershed in Lao PDR* (Doctoral dissertation, Université Paul Sabatier-Toulouse III).
- Nakhle, P., Boithias, L., Pando-Bahuon, A., Thammahacksa, C., Gallion, N., Sounyafong, P., Silvera, N., Latsachack, K., Soulileuth, B., Rochelle-Newall, E. and Marcangeli, Y., 2021. Concentrations of Escherichia Coli, Total Suspended Sediment, and Dissolved Organic Carbon, Turbidity, and Environmental Variables Measured in 2019 in a Headwater Wetland in The Houay Pano Catchment, Northern Lao PDR.
- Namour, P., 2016, January. Suivi en continu de la qualité d'un cours d'eau : apports et difficultés des méthodes optiques. In *7ème Colloque Interdisciplinaire en Instrumentation*.
- Namugize, J.N., Jewitt, G. and Graham, M., 2018. Effects of land use and land cover changes on water quality in the uMgeni river catchment, South Africa. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts a/b/c*, 105, pp.247-264.

- Nechad, B., Ruddick, K.G. and Park, Y., 2010. Calibration and validation of a generic multisensor algorithm for mapping of total suspended matter in turbid waters. *Remote Sensing of Environment*, 114(4), pp.854-866.
- NEDECO (1959), River Studies and recommendations on improvement of Niger and BenueRep., Netherlands Engineering Consultants The Hague., Amsterdam 1000 pp.
- Nellis, M.D., Harrington Jr, J.A. and Wu, J., 1998. Remote sensing of temporal and spatial variations in pool size, suspended sediment, turbidity, and Secchi depth in Tuttle Creek Reservoir, Kansas: 1993. *Geomorphology*, 21(3-4), pp.281-293.
- Nexus bassin du Niger, 2022. Accessible en ligne : [http://www.abn.ne/images/documents/FME2022/fiche\\_nexus.pdf](http://www.abn.ne/images/documents/FME2022/fiche_nexus.pdf).
- Nicholson, S.E. A revised picture of the structure of the “monsoon” and land ITCZ over West Africa. *Clim Dyn* 32, 1155–1171 (2009). <https://doi.org/10.1007/s00382-008-0514-3>.
- Nicholson, S.E., Tucker, C.J., Ba, M.B., 1998. Desertification, drought, and surface vegetation : an example from the West African Sahel. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 79 (5), 815–830. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1998\)079<0815:DDASVA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1998)079<0815:DDASVA>2.0.CO;2)
- Novoa, S., Doxaran, D., Ody, A., Vanhellemont, Q., Lafon, V., Lubac, B. and Gernez, P., 2017. Atmospheric corrections and multi-conditional algorithm for multi-sensor remote sensing of suspended particulate matter in low-to-high turbidity levels coastal waters. *Remote Sensing*, 9(1), p.61.
- Obame, R.M., Copard, Y., Sebag, D., Abdourhamane Touré, A., Boussafir, M., Bichet, V., Garba, Z., Guillon, R., Petit, C., Rajot, J.L. and Durand, A., 2014. Carbon sinks in small Sahelian lakes as an unexpected effect of land use changes since the 1960s (Saga Gorou and Dallol Bosso, SW Niger). *Catena*, 114, pp.1-10.
- Oblinger, J.L. and Koburger, J.A., 1975. Understanding and teaching the most probable number technique. *Journal of Milk and Food technology*, 38(9), pp.540-545.
- OECD, 2017. Diffuse Pollution, Degraded Water : Emerging Policy Solutions.
- Olivry, J.C., 2002. Synthèse des connaissances hydrologiques et potentiel en ressources en eau du fleuve Niger. *World Bank, Niger Basin Authority, provisional report*, 160.
- OMS and OECD, 2003. Assessing Microbial Safety of Drinking Water: Improving Approaches and Methods - Google Books. *IWA Publishing*: London, UK.
- OMS, 1993. Guidelines for Drinking-water Quality: second edition. World Health Organization, Geneva.
- OMS, 2017a. Directives de qualité pour l’eau de boisson : 4e éd. intégrant le premier additif [Guidelines for drinking-water quality: 4th ed. incorporating first addendum]. Genève : Organisation mondiale de la Santé ; 2017. Licence : CC BY-NC-SA 3.0 IGO.
- OMS, 2017b. Inheriting a sustainable world ? Atlas on children’s health and the environment. World Health Organization, Geneva, Switzerland.

- OMS, 2018. WHO recommendations on scientific, analytical and epidemiological developments relevant to the parameters for bathing water quality in the bathing water directive (2006/7/EC).
- OMS, 2021. Guidelines on recreational water quality. Volume 1: coastal and fresh waters. Geneva: World Health Organization. Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO.
- OMS, Organisation Mondiale de la Santé., 2001. Guidelines, Standards and Health: Assessment of risk and risk management for water-related infectious disease. p. 431.
- OMS, Organisation Mondiale de la Santé., 2011. Directives de qualité pour l'eau de boisson : 4e éd. P. 564.
- OMS-UNICEF, 2017. Progrès en matière d'eau, d'assainissement, et d'hygiène : mise à jour 2017 et estimation des ODD. OMS et UNICEF Genève.
- OMS-UNICEF, 2019. Progress on household drinking water, sanitation and hygiene 2000-2017. Special focus on inequalities. New York.
- ONU, 2020. Rapport sur les objectifs de développement durable 2020.
- ONU, 2021. Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau 2021 : la valeur de l'eau.
- Orange, D., 1992. *Hydroclimatologie du Fouta Djallon et dynamique actuelle d'un vieux paysage latéritique (Afrique de l'Ouest)* (Vol. 93, No. 1). Persée-Portail des revues scientifiques en SHS.
- Ousseini, I. and Morel, A., 1989. Quaternary fluvial deposits on outer sahelien region-a way of explaining the paleoenvironments-the example of the middle Niger's valley. *Bulletin de la société géologique de France*, 5(1), pp.85-90.
- Ousseini, I., 1986. *Etude de la répartition des formations sableuses et interprétation des dépôts éoliens dans le Liptako oriental (Rép. Du Niger)* (Doctoral dissertation, Paris 6).
- Pachepsky, Y.A. and Shelton, D.R., 2011. Escherichia coli and fecal coliforms in freshwater and estuarine sediments. *Critical reviews in environmental science and technology*, 41(12), pp.1067-1110.
- Pahlevan, N., Sarkar, S., Franz, B.A., Balasubramanian, S.V. and He, J., 2017. Sentinel-2 MultiSpectral Instrument (MSI) data processing for aquatic science applications: Demonstrations and validations. *Remote sensing of environment*, 201, pp.47-56.
- Pandey, P.K., Soupir, M.L., Haddad, M. and Rothwell, J.J., 2012. Assessing the impacts of watershed indexes and precipitation on spatial in-stream E. coli concentrations. *Ecological indicators*, 23, pp.641-652.
- Pandey, P.K., Soupir, M.L., Haddad, M. and Rothwell, J.J., 2012. Assessing the impacts of watershed indexes and precipitation on spatial in-stream E. coli concentrations. *Ecological indicators*, 23, pp.641-652.

- PANGIRE Niger, 2017. Elaboration du Plan d'Action National de Gestion Intégrée des Ressources en Eau (PANGIRE) et du Programme d'Investissement Prioritaire (PIP). Rapport. 167 p.
- Panthou, G., Lebel, T., Vischel, T., Quantin, G., Sane, Y., Ba, A., Ndiaye, O., Diongue-Niang, A. and Diopkane, M., 2018. Rainfall intensification in tropical semi-arid regions: The Sahelian case. *Environmental Research Letters*, 13(6), p.064013.
- Panthou, G., Vischel, T. and Lebel, T., 2014. Recent trends in the regime of extreme rainfall in the Central Sahel. *International Journal of Climatology*, 34(15), pp.3998-4006.
- Paturel, J.E., Poussin, J.C., Braquet, N., Ferry, L., Mahé, G., Ogilvie, A., Diello, P. and Hertzog, T., 2020. Avenir du fleuve Niger [Etude suite à l'expertise collégiale de 2007].
- Pellerin, B. A., Wollheim, W. M., Feng, X. & Vörösmarty, C. J. The application of electrical conductivity as a tracer for hydrograph separation in urban catchments. *Hydrol. Process.* 22, 1810–1818 (2008).
- Petus, C., Chust, G., Gohin, F., Doxaran, D., Froidefond, J.M. and Sagarminaga, Y., 2010. Estimating turbidity and total suspended matter in the Adour River plume (South Bay of Biscay) using MODIS 250-m imagery. *Continental Shelf Research*, 30(5), pp.379-392.
- Picouet, C. (1999), Géodynamique d'un hydrosystème tropical peu anthropisé : Le bassin supérieur du Niger et son delta intérieur, 386 pp, Université de Montpellier II, Montpellier.
- Picouet, C., Hingray, B. and Olivry, J.C., 2009. Modelling the suspended sediment dynamics of a large tropical river: the Upper Niger River basin at Banankoro. *Hydrological Processes: An International Journal*, 23(22), pp.3193-3200.
- Pinet, S., Martinez, J.M., Ouillon, S., Lartiges, B. and Villar, R.E., 2017. Variability of apparent and inherent optical properties of sediment-laden waters in large river basins—lessons from in situ measurements and bio-optical modeling. *Optics express*, 25(8), pp.A283-A310.
- Poff, N.L. and Zimmerman, J.K., 2010. Ecological responses to altered flow regimes: a literature review to inform the science and management of environmental flows. *Freshwater biology*, 55(1), pp.194-205.
- Poulin, C., Hamelin, B., Vallet-Coulomb, C., Amngar, G., Loukman, B., Crétaux, J.F., Doumang, J.C., Nour, A.M., Menot, G., Sylvestre, F. and Deschamps, P., 2019. Étude de la dynamique hydrologique des lacs Iro et Fitri par une approche isotopique.
- Presser, K.A., Ross, T. and Ratkowsky, D.A., 1998. Modelling the growth limits (growth/no growth interface) of *Escherichia coli* as a function of temperature, pH, lactic acid concentration, and water activity. *Applied and Environmental Microbiology*, 64(5), pp.1773-1779.

- Probst, J.L., 1990. *Géochimie et hydrologie de l'érosion mécanique continentale, bilan global actuel, fluctuations au cours des 500 derniers millions d'années*. Thèse d'Etat, Université de Strasbourg, 323 p.
- Programme Solidarité-Eau (pS-Eau)., Accès à l'eau au Niger : Quelles ressources pour quels besoins ? rapport. 18 p.
- Qualls, R.G., Flynn, M.P. and Johnson, J.D., 1983. The role of suspended particles in ultraviolet disinfection. *Journal (Water Pollution Control Federation)*, pp.1280-1285.
- Qualls, R.G., Ossoff, S.F., Chang, J.C., Dorfman, M.H., Dumais, C.M., Lobe, D.C. and Johnson, J.D., 1985. Factors controlling sensitivity in ultraviolet disinfection of secondary effluents. *Journal (Water Pollution Control Federation)*, pp.1006-1011.
- Rapport de la conférence des Nations Unies, 2010. Le droit de l'homme à l'eau et à l'assainissement. Numéro : A/RES/64/292.
- Raynaud, C., 2001. Societies and nature in the Sahel: ecological diversity and social dynamics. *Global Environmental Change*, 11(1), pp.9-18.
- Rehmann, C.R. and Soupir, M.L., 2009. Importance of interactions between the water column and the sediment for microbial concentrations in streams. *Water Research*, 43(18), pp.4579-4589.
- Reichelt, R., 1972. Géologie du Gourma (Boucle du Niger). *Mémoire BRGM*, (53).
- Renosh, P.R., Doxaran, D., Keukelaere, L.D. and Gossn, J.I., 2020. Evaluation of atmospheric correction algorithms for sentinel-2-MSI and sentinel-3-OLCI in highly turbid estuarine waters. *Remote Sensing*, 12(8), p.1285.
- Ribolzi, O., Evrard, O., Huon, S., De Rouw, A., Silvera, N., Latsachack, K.O., Soulileuth, B., Lefèvre, I., Pierret, A., Lacombe, G. and Sengtaheuanghoung, O., 2017. From shifting cultivation to teak plantation: effect on overland flow and sediment yield in a montane tropical catchment. *Scientific Reports*, 7(1), pp.1-12.
- Ringard, J., Dieppois, B., Rome, S., DJE, K.B., Konaté, D., Katiellou, G.L., Lazoumar, R.H., Bouzou-Moussa, I., Konaré, A., Diawara, A. and Ochou, A.D., 2014. Évolution des pics de températures en Afrique de l'ouest : étude comparative entre Abidjan et Niamey. In *27e Colloque de l'Association Internationale de Climatologie* (pp. 1-7).
- Ringrose, S. and Matheson, W., 1992. The use of Landsat MSS imagery to determine the aerial extent of woody vegetation cover change in the west-central Sahel. *Global Ecology and Biogeography Letters*, pp.16-25.
- Robert E, Kergoat L, Soumaguel N, Merlet S, Martinez J-M, Diawara M, Grippa M. Analysis of Suspended Particulate Matter and Its Drivers in Sahelian Ponds and Lakes by Remote Sensing (Landsat and MODIS): Gourma Region, Mali. *Remote Sensing*. 2017; 9(12):1272. <https://doi.org/10.3390/rs9121272>.

- Robert, E., Grippa, M., Kergoat, L., Pinet, S., Gal, L., Cochonneau, G. and Martinez, J.M., 2016. Monitoring water turbidity and surface suspended sediment concentration of the Bagre Reservoir (Burkina Faso) using MODIS and field reflectance data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 52, pp.243-251.
- Robert, E., Grippa, M., Nikiema, D.E., Kergoat, L., Koudougou, H., Auda, Y. and Rochelle-Newall, E., 2021. Environmental determinants of E. coli, link with the diarrheal diseases, and indication of vulnerability criteria in tropical area (Kapore, Burkina Faso). *medRxiv*.
- Rochelle-Newall, E., Nguyen, T.M.H., Le, T.P.Q., Sengtaheuanghoung, O. and Ribolzi, O., 2015. A short review of fecal indicator bacteria in tropical aquatic ecosystems: knowledge gaps and future directions. *Frontiers in microbiology*, 6, p.308.
- Rochelle-Newall, E., Nguyen, T.M.H., Le, T.P.Q., Sengtaheuanghoung, O. and Ribolzi, O., 2015. A short review of fecal indicator bacteria in tropical aquatic ecosystems: knowledge gaps and future directions. *Frontiers in microbiology*, 6, p.308.
- Rochelle-Newall, E.J., Ribolzi, O., Viguier, M., Thammahacksa, C., Silvera, N., Latsachack, K., Dinh, R.P., Naporn, P., Sy, H.T., Soulileuth, B. and Hmimum, N., 2016. Effect of land use and hydrological processes on Escherichia coli concentrations in streams of tropical, humid headwater catchments. *Scientific reports*, 6(1), pp.1-12.
- Ruste, J., 2013. Technique de l'ingénieur : Microscopie à balayage électronique.
- Sampson, R.W., Swiatnicki, S.A., Osinga, V.L., Supita, J.L., McDermott, C.M. and Kleinheinz, G., 2006. Effects of temperature and sand on E. coli survival in a northern lake water microcosm. *Journal of Water and Health*, 4(3), pp.389-393.
- Samson, G., 2015. *Synthèse et propriétés des mousses minérales* (Doctoral dissertation, INSA de Rennes).
- Sangaré, S., Mahé, G., Paturel, J.E. and Banwura, Y., 2002. Bilan hydrologique du fleuve Niger en Guinée de 1950 à 2000.
- Santé Canada., 2020. Recommandations pour la qualité de l'eau potable au Canada : Document technique – *Escherichia coli*. p. 58.
- Santé Canada., 2021. Recommandations au sujet de la qualité des eaux utilisées à des fins récréatives au Canada : Indicateurs de contamination fécale. Document technique pour consultation publique. p. 54.
- Schilling, K.E., Zhang, Y.K., Hill, D.R., Jones, C.S. and Wolter, C.F., 2009. Temporal variations of Escherichia coli concentrations in a large Midwestern river. *Journal of Hydrology*, 365(1-2), pp.79-85.
- Shen, F., Verhoef, W., Zhou, Y., Salama, M. and Liu, X., 2010. Satellite estimates of wide-range suspended sediment concentrations in Changjiang (Yangtze) estuary using MERIS data. *Estuaries and Coasts*, 33(6), pp.1420-1429.

- Siddo, I.S., Adamou, M.M. and Abou, F.M., 2022. Physico-Chemical Characterization of Sludge from the Goudel Drinking Water Production Plant in Niamey (Niger). *Natural Resources*, 13(10), pp.206-216.
- Sido A, Saminou E, Hassane A, Mossi Maïga I, Maï Alimi O, Yacouba I, Bouzou A, Hassane M, Baye I, Seyni I. 2015. Etat des lieux de la riziculture au Niger. *Ministère de l'agriculture/PPAAO-WAAPP-WAAPP*, Niamey, 92 p.
- Sighomnou, D., Descroix, L., Genthon, P., Mahé, G., Moussa, I.B., Gautier, E., Mamadou, I., Vandervaere, J.P., Coulibaly, E., Rajot, J.L. and Malam, O., 2013. La crue de 2012 à Niamey : un paroxysme du paradoxe du Sahel?. *Science et changements planétaires/Sécheresse*.
- Sinton, L.W., Finlay, R.K. and Lynch, P.A., 1999. Sunlight inactivation of fecal bacteriophages and bacteria in sewage-polluted seawater. *Applied and environmental microbiology*, 65(8), pp.3605-3613.
- Sinton, L.W., Hall, C.H., Lynch, P.A. and Davies-Colley, R.J., 2002. Sunlight inactivation of fecal indicator bacteria and bacteriophages from waste stabilization pond effluent in fresh and saline waters. *Applied and environmental microbiology*, 68(3), pp.1122-1131.
- Smets, H., 2011. Le droit de l'homme à l'eau et à l'assainissement est finalement reconnu. *Revue juridique de l'environnement*, 36(1), pp.79-89.
- Snedden, G.A., Cable, J.E., Swarzenski, C. and Swenson, E., 2007. Sediment discharge into a subsiding Louisiana deltaic estuary through a Mississippi River diversion. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 71(1-2), pp.181-193.
- Soumaila, A., 2000. *Etude structurale, pétrographique et géochimique de la ceinture birimienne de Diagorou-Darbani Liptako, Niger occidental (Afrique de l'ouest)* (Doctoral dissertation, Besançon).
- Soumaila, A., Henry, P. and Rossy, M., 2004. Contexte de mise en place des roches basiques de la ceinture de roches vertes birimienne de Diagorou-Darbani (Liptako, Niger, Afrique de l'Ouest): plateau océanique ou environnement d'arc/bassin arrière-arc océanique. *Comptes Rendus Geoscience*, 336(13), pp.1137-1147.
- Stea, E.C., Truelstrup Hansen, L., Jamieson, R.C. and Yost, C.K., 2015. Fecal contamination in the surface waters of a rural-and an urban-source watershed. *Journal of environmental quality*, 44(5), pp.1556-1567.
- Strauch, A.M., Mackenzie, R.A., Bruland, G.L., Tingley III, R. and Giardina, C.P., 2014. Climate change and land use drivers of fecal bacteria in tropical Hawaiian rivers. *Journal of environmental quality*, 43(4), pp.1475-1483.
- Stroosnijder, L., 1982. La pé'edologie du Sahel et du terrain d'étude. In La productivite des paturages Sahéliens. In Penning de Vries M.A. Djiteye *F.W.T* No., 918, 1982, pp. 52–71.

- Sultan, B. and Janicot, S., 2003. The West African monsoon dynamics. Part II: The “preonset” and “onset” of the summer monsoon. *Journal of climate*, 16(21), pp.3407-3427.
- Sultan, B., Janicot, S., Lazar, A. and Menkès, C., 2006. The atmospheric dynamics of the West african monsoon onset and its ocean counterpart.
- Tahirou, S., Zerbo, P., Ouattara, S. and Ado, M.N., 2022. Caractérisation des paramètres physico-chimiques du sol de la zone rizicole de Saga (Niamey) dans la vallée du fleuve Niger. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 16(2), pp.842-854.
- Taylor, C.M., Belušić, D., Guichard, F., Parker, D.J., Vischel, T., Bock, O., Harris, P.P., Janicot, S., Klein, C. and Panthou, G., 2017. Frequency of extreme Sahelian storms tripled since 1982 in satellite observations. *Nature*, 544(7651), pp.475-478. <https://doi.org/10.1038/nature22069>.
- Tenaillon, O., Skurnik, D., Picard, B. and Denamur, E., 2010. The population genetics of commensal Escherichia coli. *Nature reviews microbiology*, 8(3), pp.207-217.
- Tessier, L., 2003. *Transport et caractérisation des matières en suspension dans le bassin versant de la Seine : identification de signatures naturelles et anthropiques* (Doctoral dissertation, Ecole des Ponts ParisTech).
- Thorne, P.D., Hardcastle, P.J. and Soulsby, R.L., 1993. Analysis of acoustic measurements of suspended sediments. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 98(C1), pp.899-910.
- Topp, E., Welsh, M., Tien, Y.C., Dang, A., Lazarovits, G., Conn, K. and Zhu, H., 2003. Strain-dependent variability in growth and survival of Escherichia coli in agricultural soil. *FEMS microbiology ecology*, 44(3), pp.303-308.
- Touré Sekou and Prokhoroff. 1963. Etude démographique du Niger. Données individuelles. Résultats définitifs. Paris, Ministère de la Coopération et du Développement ; INSEE, 88 p.
- Trepeta, R.W. and Edberg, S.C., 1984. Methylumbelliferyl-beta-D-glucuronide-based medium for rapid isolation and identification of Escherichia coli. *Journal of Clinical Microbiology*, 19(2), pp.172-174.
- Trichon, V., Hiernaux, P., Walcker, R. and Mougin, E., 2018. The persistent decline of patterned woody vegetation: The tiger bush in the context of the regional Sahel greening trend. *Global change biology*, 24(6), pp.2633-2648.
- Troeger, C., Forouzanfar, M., Rao, P.C., Khalil, I., Brown, A., Reiner Jr, R.C., Fullman, N., Thompson, R.L., Abajobir, A., Ahmed, M. and Alemayohu, M.A., 2017. Estimates of global, regional, and national morbidity, mortality, and aetiologies of diarrhoeal diseases: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2015. *The Lancet Infectious Diseases*, 17(9), pp.909-948. [http://dx.doi.org/10.1016/S1473-3099\(17\)30276-1](http://dx.doi.org/10.1016/S1473-3099(17)30276-1).

- UNEP, A., 2016. A Snapshot of the World's Water Quality: Towards a global assessment, Nairobi, United Nations Environment Programme. United Nations Environment Programme, Nairobi, Kenya.
- Valentin, C. and d'Herbès, J.M., 1999. Niger tiger bush as a natural water harvesting system. *Catena*, 37(1-2), pp.231-256.
- Valentin, C., Poesen, J. and Li, Y., 2005. Gully erosion: Impacts, factors and control. *Catena*, 63(2-3), pp.132-153.
- Valentin, C., Rajot, J.L. and Mitja, D., 2004. Responses of soil crusting, runoff and erosion to fallowing in the sub-humid and semi-arid regions of West Africa. *Agriculture, ecosystems & environment*, 104(2), pp.287-302.
- Van Dyke, M.I., Ong, C.S., Prystajecy, N.A., Isaac-Renton, J.L. and Huck, P.M., 2012. Identifying host sources, human health risk and indicators of Cryptosporidium and Giardia in a Canadian watershed influenced by urban and rural activities. *Journal of water and health*, 10(2), pp.311-323.
- Van Elsas, J.D., Semenov, A.V., Costa, R. and Trevors, J.T., 2011. Survival of Escherichia coli in the environment: fundamental and public health aspects. *The ISME journal*, 5(2), pp.173-183.
- Vaucelle, S., 2015. Le fleuve Niger et son bassin: aménagements, gouvernance et stratégies d'adaptation au changement climatique. *Les Cahiers d'Outre-Mer. Revue de géographie de Bordeaux*, 68(270), pp.243-270.
- Versini, P.A., Joannis, C. and Chebbo, G., 2015. *Guide technique sur le mesurage de la turbidité dans les réseaux d'assainissement* (p. 82p). Onema.
- Vicat, J.P., Léger, J.M., Ahmed, Y. and Willems, L., 1994. Les indices de déformations plioquaternaires de la bordure occidentale du bassin des Iullemmeden dans la région de Niamey. *Revue de Géographie Alpine, (numéro hors-série) I*, pp.15-24.
- Vigiak, O., Ribolzi, O., Pierret, A., Sengtaheuanghoung, O. and Valentin, C., 2008. Trapping efficiencies of cultivated and natural riparian vegetation of northern Laos. *Journal of Environmental Quality*, 37(3), pp.889-897.
- Vinueza, D., Ochoa-Herrera, V., Maurice, L., Tamayo, E., Mejía, L., Tejera, E. and Machado, A., 2021. Determining the microbial and chemical contamination in Ecuador's main rivers. *Scientific reports*, 11(1), pp.1-14.
- Vörösmarty, C.J., McIntyre, P.B., Gessner, M.O., Dudgeon, D., Prusevich, A., Green, P., Glidden, S., Bunn, S.E., Sullivan, C.A., Liermann, C.R. and Davies, P.M., 2010. Global threats to human water security and river biodiversity. *nature*, 467(7315), pp.555-561.
- Walker, C.L.F., Rudan, I., Liu, L., Nair, H., Theodoratou, E., Bhutta, Z.A., O'Brien, K.L., Campbell, H. and Black, R.E., 2013. Global burden of childhood pneumonia and diarrhoea. *The Lancet*, 381(9875), pp.1405-1416.

- Walters, E., Graml, M., Behle, C., Müller, E. and Horn, H., 2014. Influence of particle association and suspended solids on UV inactivation of fecal indicator bacteria in an urban river. *Water, Air, & Soil Pollution*, 225(1), pp.1-9.
- Wardrop, N.A., Hill, A.G., Dzodzomenyo, M., Aryeetey, G. and Wright, J.A., 2018. Livestock ownership and microbial contamination of drinking-water: Evidence from nationally representative household surveys in Ghana, Nepal and Bangladesh. *International journal of hygiene and environmental health*, 221(1), pp.33-40.
- Wasson, R.J., 2002. What approach to the modelling of catchment scale erosion and sediment transport should be adopted. Modelling erosion, sediment transport and sediment yield, pp.1-11.
- WaterAid.2021. BeyondAccess:Water Quality from Resource to User. En ligne : <https://washmatters.wateraid.org/sites/g/files/jkxoof256/files/ms-all-del-accesso-calidad-del-agua-de-recurso-a-usuario-resumen-de-evidencia.pdf> (dernier accès 27/12/2022).
- Weller, D., Brassill, N., Rock, C., Ivanek, R., Mudrak, E., Roof, S., Ganda, E. and Wiedmann, M., 2020. Complex interactions between weather, and microbial and physicochemical water quality impact the likelihood of detecting foodborne pathogens in agricultural water. *Frontiers in microbiology*, 11, p.134.
- Willems, L., Pouclet, A., Lenoir, F. and Vicat, J.P., 1996. Phénomènes karstiques en milieux non carbonatés. Etudes de cavités et problématique de leur développement au Niger Occidental. *Zeitschrift für Geomorphologie*.
- Winemiller, K.O., McIntyre, P.B., Castello, L., Fluet-Chouinard, E., Giarrizzo, T., Nam, S., Baird, I.G., Darwall, W., Lujan, N.K., Harrison, I. and Stiassny, M.L., 2016. Balancing hydropower and biodiversity in the Amazon, Congo, and Mekong. *Science*, 351(6269), pp.128-129.
- World Gastroenterology Organisation Global (WGO) Guidelines, 2012. La diarrhée aigüe chez les adultes et les enfants : une approche globale. 28 p.
- World Wide Fund for Nature. The river Niger, River of Rivers [online], 1986, <http://assets.panda.org/downloads/Niger.pdf> (accès 03/11/2022).
- Wren, D.G., Bennett, S.J., Barkdoll, B.D. and Kuhnle, R.A., 2000. The effect of spatial and temporal separation on suspended-sediment concentration measurements. In *Proc., Int. Conf. on Hydroinformatics, International Association of Hydraulic Research, Iowa City, Iowa*.
- Xue, F., Tang, J., Dong, Z., Shen, D., Liu, H., Zhang, X. and Holden, N.M., 2018. Tempo-spatial controls of total coliform and E. coli contamination in a subtropical hilly agricultural catchment. *Agricultural Water Management*, 200, pp.10-18.

- Yacouba Moussa, B, Mousa, Y., Saqalli, M., Laffly, D. and Chapron, E., 2022. Pratiques de pêche de poissons et changement climatique sur le fleuve Niger à Niamey, Niger. *Afrique SCIENCE*, 21(3), pp.142 - 156. *AFRIQUE SCIENCE*.
- Yaou, T.H., Younoussa, B.H., Abdourhamane Tour'e, A., Issaka, A.M., Hassane, B., Garba, Z., 2019. Analyse géomorphologique des risques liées aux mouvements de terrain à Niamey. Niger. *Rev. Ivoir. Sci. Technol.* 34, 247–263.
- Zebracki, M., 2008. Devenir des polluants métalliques associés aux sédiments contaminés dans un cours d'eau en relation avec la dynamique sédimentaire. *Université Paris-Sud XI, France*.
- Zhang, Y., Huang, C., Zhang, W., Chen, J. and Wang, L., 2021. The concept, approach, and future research of hydrological connectivity and its assessment at multiscales. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(38), pp.52724-52743.
- Zibordi, G., Berthon, J.F., Mélin, F., D'Alimonte, D. and Kaitala, S., 2009. Validation of satellite ocean color primary products at optically complex coastal sites: Northern Adriatic Sea, Northern Baltic Proper and Gulf of Finland. *Remote Sensing of Environment*, 113(12), pp.2574-2591.

**Webographie :**

[http://dx.doi.org/10.1016/S1473-3099\(17\)30276-1](http://dx.doi.org/10.1016/S1473-3099(17)30276-1).

[http://www.horiba.com/fileadmin/uploads/Scientific/Documents/PSA/BRO\\_LA960\\_FR\\_Aout\\_2016\\_LR.pdf](http://www.horiba.com/fileadmin/uploads/Scientific/Documents/PSA/BRO_LA960_FR_Aout_2016_LR.pdf)

<https://e-cours.univ-paris1.fr/modules/uved/envcal/html/msg/index.html>

<https://labo.obs-mip.fr/multitemp/maccs-how-it-works/>

[https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user\\_guides/sentinel-2-msi/resolutions/spatial](https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user_guides/sentinel-2-msi/resolutions/spatial)

<https://worldpopulationreview.com/world-cities> (last access: 11/01/2022).

[https://www.humeau.com/media/blfa\\_files/FT\\_Microplaque-MUG\\_EC\\_77010010802\\_FR\\_150321\\_bb6ff725ba3a781324535de957888393.pdf](https://www.humeau.com/media/blfa_files/FT_Microplaque-MUG_EC_77010010802_FR_150321_bb6ff725ba3a781324535de957888393.pdf)

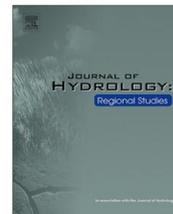
<https://www.jlindquist.com/microbiology102/cfupage.html>.



Contents lists available at [ScienceDirect](https://www.sciencedirect.com)

## Journal of Hydrology: Regional Studies

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/ejrh](http://www.elsevier.com/locate/ejrh)



### Spatio-temporal dynamics of suspended particulate matter in the middle Niger River using in-situ and satellite radiometric measurements

Moussa Boubacar Moussa <sup>a,b,\*</sup>, Amadou Abdourhamane Touré <sup>a</sup>, Laurent Kergoat <sup>b</sup>, Bruno Lartiges <sup>b</sup>, Emma Rochelle-Newall <sup>c</sup>, Elodie Robert <sup>d</sup>, Marielle Gosset <sup>b</sup>, Bachir Alkali Tanimoun <sup>e</sup>, Manuela Grippa <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Abdou Moumouni University; Faculty of Science and Technology (FAST) - Department of Geology, PB 10662 Niamey, Niger

<sup>b</sup> G'eoSciences Environnement Toulouse (GET, UMR 5563 / Paul Sabatier University Toulouse III / CNRS / IRD / CNES), France

<sup>c</sup> Sorbonne Universit'e, Univ Paris Est Creteil, IRD, CNRS, INRA'e, Institute of Ecology and Environmental Sciences of Paris (iEES-Paris), 4 Place Jussieu, 75005 Paris, France

<sup>d</sup> LETG-Nantes (UMR 6554 CNRS, Universit'e de Nantes, France)

<sup>e</sup> Niger Basin Authority (NBA), Niamey, Niger

#### ARTICLE INFO

##### Keywords:

Middle Niger River Suspended particulate matter Optical remote sensing Discharge

Kaolinite

Sentinel-2 MSI data

#### ABSTRACT

*Study Region:* Middle Niger River Basin (MNRB), Ansongo to Niamey, Sahel, West Africa.

*Study Focus:* Although MNRB hydrology and the red flood phenomena have been addressed in the past literature, water quality parameters and suspended particulate matter (SPM) dynamics remain poorly known. SPM impacts dam silting, exacerbating flooding, and microbial water quality. This study couples in-situ SPM measurements to radiometric measurements by in-situ and satellite sensors to analyse the temporal and spatial evolution of SPM in the MNRB and assess the contribution of the local flood (red flood) to SPM in Niamey.

*New Hydrological Insights for the Region:* SPM is composed of very fine kaolinites with a major mode around 200–300 nanometers which results in high reflectance in the visible and infrared bands. Radiometric measurements by both radiometer and Sentinel-2 MSI sensors are well correlated to in-situ SPM, allowing efficient spatio-temporal monitoring of SPM concentration. SPM increases very rapidly at the beginning of the rainy season, reaching a peak, characterized by very high SPM values, about one month before the red flood. Satellite data highlight the significant contribution of the right bank tributaries to SPM in the MNRB during this period. SPM then decreases and remains low despite the second runoff increase (black flood) arriving in Niamey after the end of the rainy season from the upper basin.

## 1. Introduction

The Niger River basin plays a major cultural, historical and socio-economical role in West Africa (Autorit'e du Bassin du Fleuve Niger ABFN, 2018). It is home to more than 130 million people throughout nine countries (Niger Basin Nexus profile, 2018). The river

---

\* Corresponding author at: Abdou Moumouni University, Faculty of Science and Technology (FAST) - Department of Geology, PB 10662 Niamey, Niger.

E-mail addresses: [mboubacar63@gmail.com](mailto:mboubacar63@gmail.com), [moussa.boubacar@get.omp.eu](mailto:moussa.boubacar@get.omp.eu) (M. Boubacar Moussa).

<https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.101106>

Received 18 January 2022; Received in revised form 8 May 2022; Accepted 9 May 2022

Available online 20 May 2022

2214-5818/© 2022 The Authors. Published by Elsevier B.V. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

is an essential resource for drinking water, fishing, irrigation, hydroelectric power generation, and navigation/transportation (Dieye et al., 2020; Droy and Morand, 2013; Paturel et al., 2020). Moreover, many large cities are located on the banks of the Niger River, such as Bamako (2.71 million people in 2020) in Mali and Niamey (1.3 million people in 2020) in Niger (worldpopulationreview, 2022).

The Niger River originates in the humid Guinean zone, which receives more than 2000 mm of rain per year and the basin is divided into four units (Fig. 1): the upper Niger, the inner delta, the middle Niger and the lower Niger (Amogu, 2009). In its middle part, the river runs more than 1000 km through the Sahelian region and shows distinct flow regime at different locations. At Ansongo, located in Mali about 350 km upstream of Niamey, the annual hydrograph displays one discharge peak typically occurring between October and March (Olivry, 2002). This flood (black flood) has its origins in water contributions from the upper basin and arrives at Ansongo well after the end of the rainy season because of a two-to-three months residence time in the inner Niger delta. Two different discharge peaks are observed in Niamey (Fig. 2). In addition to the previous flood, a large second flood (the red flood) occurs during the local rainy season typically between June and September (Amani and Nguetora, 2002). This flood is the result of rainfall and water inputs from tributaries located downstream of Ansongo in the middle part of the Niger River basin. The low water period in Niamey extends between April and May.

The Sahelian part of the Niger River watershed is very sensitive to climatic variations and anthropogenic constraints (Nicholson et al., 1998). Since the 1960's, this region has experienced rainfall deficits (beginning in the late 1960's to 1990's) of 20–40% and a retreat of isohyets (1970–1989) over 200 km to the south (Hulme et al., 2001; Lebel and Ali, 2009). Severe droughts in the early 1970's and the early mid 1980's led to a decrease in vegetation cover and an increase of erosion processes (Descroix et al., 2012; Descroix et al., 2015; Descroix et al., 2018; Janicot et al., 1996). In 1985, the Niger River even stopped flowing in Niamey (Billon, 1985). After the drought period, the vegetation globally recovered following the return of precipitations (Dardel et al., 2014a, Dardel et al., 2014b). However, some small areas show a persistent decrease in vegetation cover and, consequently, an increase in surface runoff (Descroix et al., 2018; Gal et al., 2017).

In addition, the MNRB is a highly populated area. Strong demographic growth (3.8% per year in Niger over the last seven decades, World Bank, 2017) has led to an extension of cultivated areas and an intensification of natural resource exploitation (forest, savannah, rangeland) (Leblanc et al., 2008; Tidjani, 2008). The deforestation in these areas has increased the amount of bare surfaces and weakened the Sahelian soils that undergo erosive actions of wind and rain (Abdourhamane Tour'e et al., 2010). Overall, changes in land cover, due to climatic variations and/or anthropogenic factors, have led to a general increase in runoff and have caused endorheism breaks in the middle Niger River watershed (Amogu et al., 2010; Descroix et al., 2018; Favreau et al., 2009; Mah'e et al., 2013). An example of this situation is the intensification of the red flood phenomenon that was observed in Niamey after the 90's and the recurrent floodings occurring in Niamey, causing severe damage in the river plain (Cass'e et al., 2016; Mahamadou et al., 2018). The greatest flood ever registered in Niamey was recorded in 2020 (Lebel et al., 2020; Tiepolo et al., 2021, Fig. 2).

Past, ongoing and future changes in the Niger River hydrology are supposed to deeply affect water resources but also water quality parameters. In particular, increased erosion and/or increase in precipitation amount and intensity (Panthou et al., 2018; Taylor et al., 2017) would lead to an increase of sediment transport and of suspended particulate matter (SPM) in surface waters. This would impact

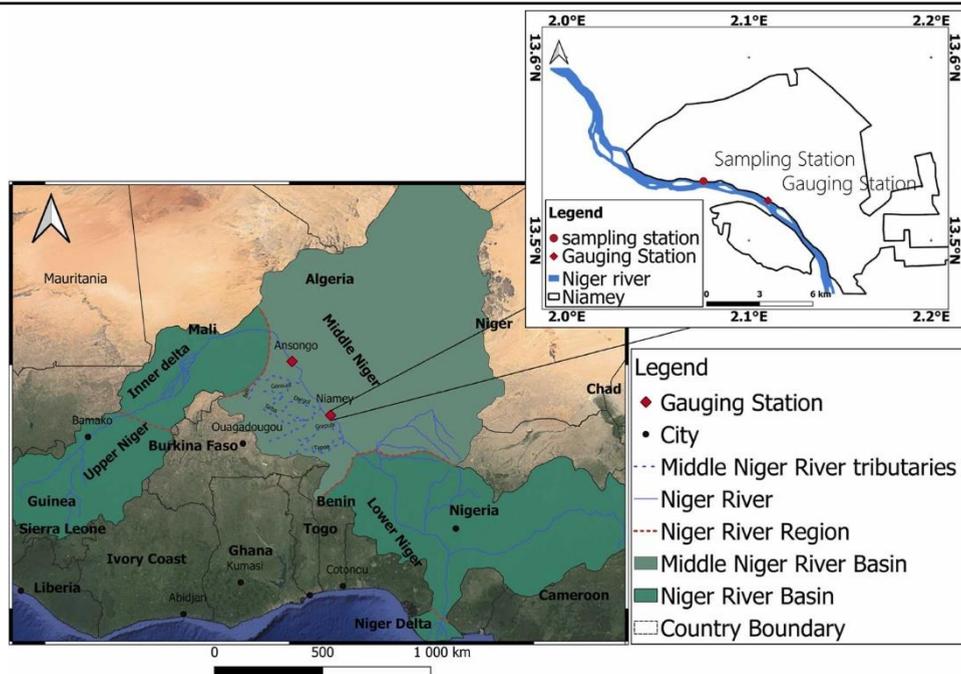


Fig. 1. Study area with the location of the in-situ SPM, radiometric measurement sampling points and showing input from the Sirba tributary.

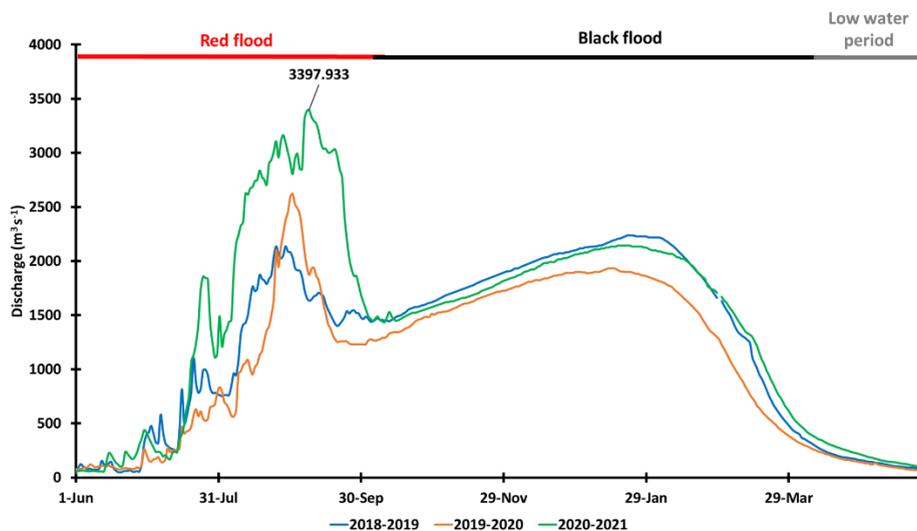


Fig. 2. Niger River hydrographs at the Niamey hydrological station (2018–2021).

in turn water flow and dam silting with further consequences on floods. In addition, SPM plays also an important role on aquatic ecosystems (i.e. Hauer et al., 2018; Pennock and Sharp, 1994) and human health by facilitating the transport and the development of pathogens (Robert et al., 2021; Rochelle-Newall et al., 2015; Zheng and DiGiacomo, 2017).

If the Niger River hydrology and the red flood phenomena have been widely addressed in the literature from a quantitative point of view, water quality and SPM monitoring has received much less attention. Measurements of SPM in the Niger River basin are generally sparse and limited in time. In the middle part of the Niger watershed, the earliest SPM measurements were carried out between 1976 and 1982 for the feasibility study of a dam at Kandadji (Gallaire, 1995). More recently, Amogu (2009) reported SPM concentrations in the middle Niger and Alhou et al. (2016) recorded two years (fortnightly sampling from April 2011 to March 2013) of SPM measurements at Niamey. However, a detailed assessment of the spatio-temporal dynamics of SPM at a fine temporal scale has yet to be done. This study fills this information gap by providing SPM at a daily scale and during several hydrological cycles.

Remote sensing techniques have been developed for inland water studies in the last 20 years to provide estimates of SPM variability in space and time. Data from optical radiometers detect near-surface sediments, but this information has been successfully used to assess total suspended solid and sediment transport in various rivers (Martinez et al., 2009; Nechad et al., 2010; Petus et al., 2010; Pinet et al., 2017). Most of the studies addressing SPM dynamics in rivers use data from medium resolution sensors such as the MEdium Resolution Imaging Spectrometer (MERIS) and Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) because a high temporal frequency is necessary to correctly sample the rapid dynamics of rivers. However, their coarse spatial resolution [ranging from 250 m in the visible and the Near-infrared (NIR) to 1 km in the Short Wave InfraRed (SWIR) bands for MODIS is not sufficient to accurately monitor the Niger River, particularly during low water periods when river reaches are narrower. Only recently have high resolution satellite data been available at the temporal frequency necessary to monitor SPM over smaller dynamics rivers. In particular, the MultiSpectral Instrument (MSI) sensor on-board the Sentinel-2 provides data every 5 days at a 10 m spatial resolution in the visible and near infrared bands and 20 m in the SWIR bands. Such data have proved efficient to monitor SPM dynamics in different water bodies (i. e. Caballero et al., 2018; Liu et al., 2017; Pahlevan et al., 2017). Several algorithms have been developed to retrieve SPM from radiometric measurements from satellite over turbid waters using theoretical (Nechad et al., 2010) semi-empirical (Shen et al., 2010) and empirical approaches, mostly site specific (Doxaran et al., 2002; Robert et al., 2017; Caballero et al., 2018; Li et al., 2019; Renosh et al., 2020). Employing wavelengths in the NIR domain, in combination with those in the visible range (Li et al., 2019) or alone (Robert et al., 2017), has been shown useful to avoid saturation for high SPM values. Switching algorithms (Shen et al., 2010; Han et al., 2016; Novoa et al., 2017; Caballero et al., 2018; Renosh et al., 2020) have been proved efficient to address a wide range of SPM values.

Until now, few studies have focused on the Sahelian region as it is quite challenging for optical remote sensing. This is because on the one hand, the very high atmospheric aerosol loading (mineral dust and biomass burning) and the highly variable water vapor content make atmospheric corrections difficult and, on the other hand, the very high values of reflectance of West African waters challenge inversion algorithms classically used in other regions. Some encouraging result have been obtained on a few lakes using data from LANDSAT (Kaba et al., 2014; Robert et al., 2016; Robert et al., 2017) and Sentinel-2 MSI (Robert et al., 2021) but further validation, especially for rivers, is needed.

The main objective of this work was to analyse the spatio-temporal dynamics of SPM in the middle Niger River together with the hydrological variability and water discharge at Niamey and in the upstream part of the basin. To do this, we first assess the potential of radiometric measurements by both an in-situ SKYE radiometer and Sentinel-2 MSI to monitor SPM in this area. SKYE data are then employed to complete the temporal series of SPM sampled in-situ to get daily time series over three years. Finally, Sentinel-2 MSI data are used to explore the spatial variability of SPM in the middle Niger River and to assess the overall contribution of the red flood to SPM arriving at Niamey.

## 2. Material and methods

### 2.1. Study site

In-situ measurements were carried out in Niamey located downstream of the confluences of some major middle Niger River tributaries like the Sirba, the Dargol and the Gorouol (Fig. 1). The area is characterized by a semi-arid tropical climate with well-marked contrasting seasons: a rainy season (May - September) and a dry season (October - April). The average rainfall between 1970 and 2017 in Niamey was equal to 527,36 mm per year (Hamadou Younoussa et al., 2020). The Potential Evapotranspiration (ETP) is around 3000 mm per year (Allies et al., 2020). In Niamey, two drinking water treatment plants ensure the supply of the potable water, 72% of which is provided by the Goudel station (our sampling site) with remaining water provided by the Yantala station. Both plants are located on the left bank of the Niger River.

Discharge data were obtained from the Niger Basin Authority (NBA). The flow rate is measured daily at 00:00 with an automatic hydrometer SEBA PS Light 2GSM. The data used in this study cover three hydrological cycles between 2018 and 2021 (Fig. 2). During

this period, maximum discharge was 2136 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>, 2620 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> and 3998 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> for the red floods of 2018, 2019 and 2020, respectively. The record value in 2020 is the highest discharge peak ever measured since the station was built in 1929, largely exceeding the

previous 2492 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> record of 2012 (Lebel et al., 2020). The maximum discharge recorded for the black flood during this study was the 22th of January 2019 with 2238 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>. The low water period occurring between April and May with very low discharges (60 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> in April 2020).

### 2.2. Suspended particulate matter (SPM) measurements

SPM measurements were conducted between July 17, 2018 and August 16, 2020. River water samples were collected between 10 a. m. and 1 p.m. from the top 20 cm of the water column in 500 mL bottles. The sampling point (lat 13.520313 North, lon 2.066145 East) is located on the left bank and is approximately 7 m from the shoreline (Fig. 1). The river water was collected at different time steps to follow the hydrological variability. During the red flood, the sampling time step was daily from July 1 to August 15, 2019 and every 2nd day from

July 1 to August 15, 2020. Outside the red flood period, the sampling time step varied from one week until the end of the rainy season to one month during the remaining of the hydrological cycle.

The sampled water was homogenized and then 50 mL were collected and filtered through a Whatman fiberglass filter with a porosity of 0.7  $\mu\text{m}$ . The filters were previously heated to 105  $^{\circ}\text{C}$  and weighed. The sediment deposited on the filter was heated again at

105  $^{\circ}\text{C}$  for 1h30 and then re-weighed.

The SPM concentration was calculated for each sampling date from the SPM mass and the volume of filtered water Eq. (1).

$$[\text{SPM}] = (\text{Mfs} - \text{Mf}) / \text{Vw} \quad (1)$$

where Mfs is the Filter mass with sediment; Mf is the Original filter mass; Vw is the filtered water volume. Two or three replicates were made for each water sample and averaged to reduce noise and check consistency.

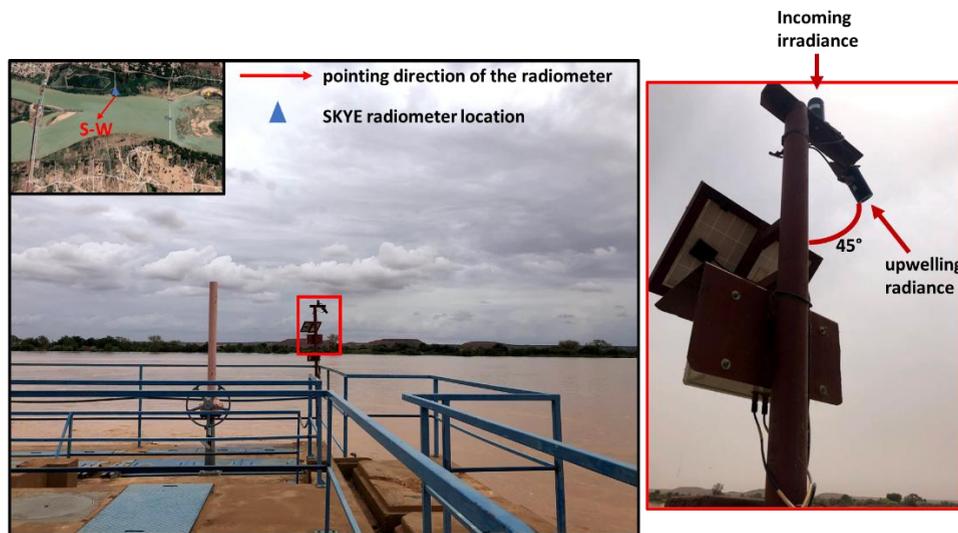


Fig. 3. SKYE radiometer at the Sampling station monitoring Niger River water reflectance.

The particle size distribution and mineralogy of sediments were assessed over few water samples collected during the black flood (2017–10–06 and 2017–10–24) and the red flood (2018–07–03, 2018–07–08, 2018–07–09 and 2019–08–06). The particle size distribution was measured with a Partica LA-950V2 laser granulometer (Partica LA950-V2, Horiba, 2022). The particles were also observed with a JEOL JEM 2100 F Transmission Electron Microscope (TEM) with an operating voltage of 200 kV and a resolution of 2.3  $\text{\AA}$  (CMOS Gatan RIO 16IS 4 K camera). The mineralogy was determined using EDXS Analysis (Ultim Max TEM 80 mm<sup>2</sup> Windowless – Oxford Instruments). For TEM imaging and microanalysis, the sample was resuspended under ultrasonication, a drop of suspension was deposited on a formvar-coated copper grid, and excess water was blotted with filter paper.

### 2.3. Niger River water reflectance

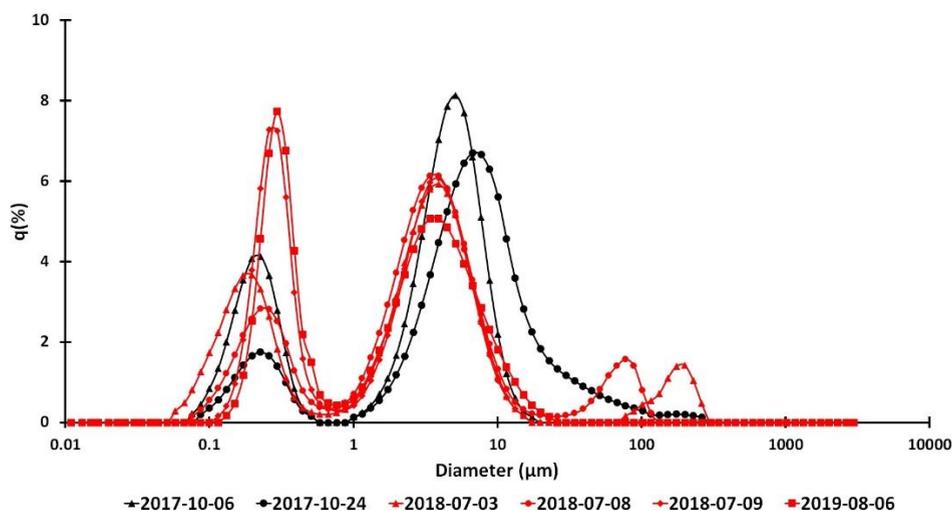
The Niger River water reflectance was measured in situ with a SKYE radiometer installed at the water sampling point location since July 2018. The radiometer is composed of two sensors (SKR1840D/I Two channel Sensor, SKYE Instruments Ltd, Wales, UK) measuring the incoming radiation in the red and infrared bands at the same wavelengths as the Sentinel-2 MSI sensor, centred at 665.4 nm and 829.0 nm. Data were recorded every 30 min with a datahog2 + (SKYE). One sensor steered to the southwest looks at the water surface at a 45 $^{\circ}$  angle (Fig. 3) to measure the total radiance (IFOV 25 $^{\circ}$ , sensor height 2 m above the highest water), the other one measures the incoming irradiance (cosine response sensor to integrate hemispherical irradiance). Remote sensing reflectance is computed as the ratio of upwelling radiance by incoming irradiance and then multiplied by a factor to give the dimensionless surface reflectance Eq. (2) to be compared to Sentinel-2 MSI surface reflectance. Total up-welling radiance comprises water-leaving radiance and specular reflection at the water surface caused by skylight.

$$R_{rs} = \frac{L}{E_d} \quad (2)$$

where  $R_{rs}$  is the SKYE radiometer surface reflectance (dimensionless),  $R_{rs}$  the SKYE remote sensing reflectance (sr-1),  $L$  is the total observed radiance (  $\text{mol sr}^{-1} \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) and  $E_d$  the down-welling irradiance (  $\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ).

Sentinel-2 MSI data are collected by two polar orbiting satellites (Sentinel-2A and Sentinel-2B launched in 2015 and 2017, respectively) placed on the same orbit, allowing a revisit time of 5 days at the equator. They carry a multi spectral instrument (Drusch et al., 2012) with four bands at 10 m, six bands at 20 m, and three bands at 60 m spatial resolution. For this work we used the three visible bands (bands 2, 3, and 4 respectively at 490 nm, 560 nm and 665 nm), and the near infrared band (NIR, band 8 at 842 nm) at 10 m spatial resolution, as well as the shortwave infrared band (band 12 at 2190 nm) at 20 m spatial resolution.

Sentinel-2 MSI surface reflectance (level 2 A) products are made available over the study area by the THEIA land data center ([www.theia-land.fr](http://www.theia-land.fr)). They are corrected for atmospheric effects using the MACCS-ATCOR Joint Algorithm (MAJA) processing chain (Hagolle et al., 2015). The processing chain (Hagolle et al., 2017) analyses temporal series of Level-1 C images and ancillary data to detect clouds and clouds shadows, to estimate the atmospheric optical thickness (including aerosols), the adjacency effects (including atmospheric scattering and multiple reflections between the surface and the atmosphere), and to apply a terrain correction based on topography. The atmospheric corrections are performed for pixels classified as land and extrapolated for pixels classified as water. The MAJA processing chain has been developed for land surface reflectance. It benefits from previous algorithm evaluations and is widely used. Other atmospheric corrections schemes exist, some targeting aquatic surface specifically (Kuhn et al., 2019; Pahlevan et al., 2021).



**Fig. 4.** Volumetric distribution of suspended particulate matter samples collected during the red flood (2018–07–03, 2018–07–08, 2018–07–09 and 2019–08–06) and the black flood (2017–10–06 and 2017–10–24) with SPM concentration equal to respectively 2.34 g L<sup>-1</sup>, 1.44 g L<sup>-1</sup>, 0.71 g L<sup>-1</sup>, 1.034 g L<sup>-1</sup>, 0.065 g L<sup>-1</sup> and 0.073 g L<sup>-1</sup>.

SPM is only retrieved for clear-sky pixels classified as open water. Sentinel-2 MSI pixels not already masked by the MAJA chain as clouds, aerosols or cloud shadows are classified as water pixels if the Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI which is calculated as the difference between the green band and the SWIR band divided by their sum) is lower than 0.2 (Robert et al., 2017). An additional threshold on the green band reflectance is added to avoid unmasked residuals clouds (values lower than 0.4 are retained).

In order to avoid possible land-adjacency effects the Sentinel-2 MSI data employed at the Goudel sampling station and at the Ansongo site were averaged over a square box three pixels away from the shores.

Measurements of SPM concentration made at a day difference (day before and day after) with the satellite acquisition were considered in order to increase the number of match-ups (10 dates).

### 3. Results

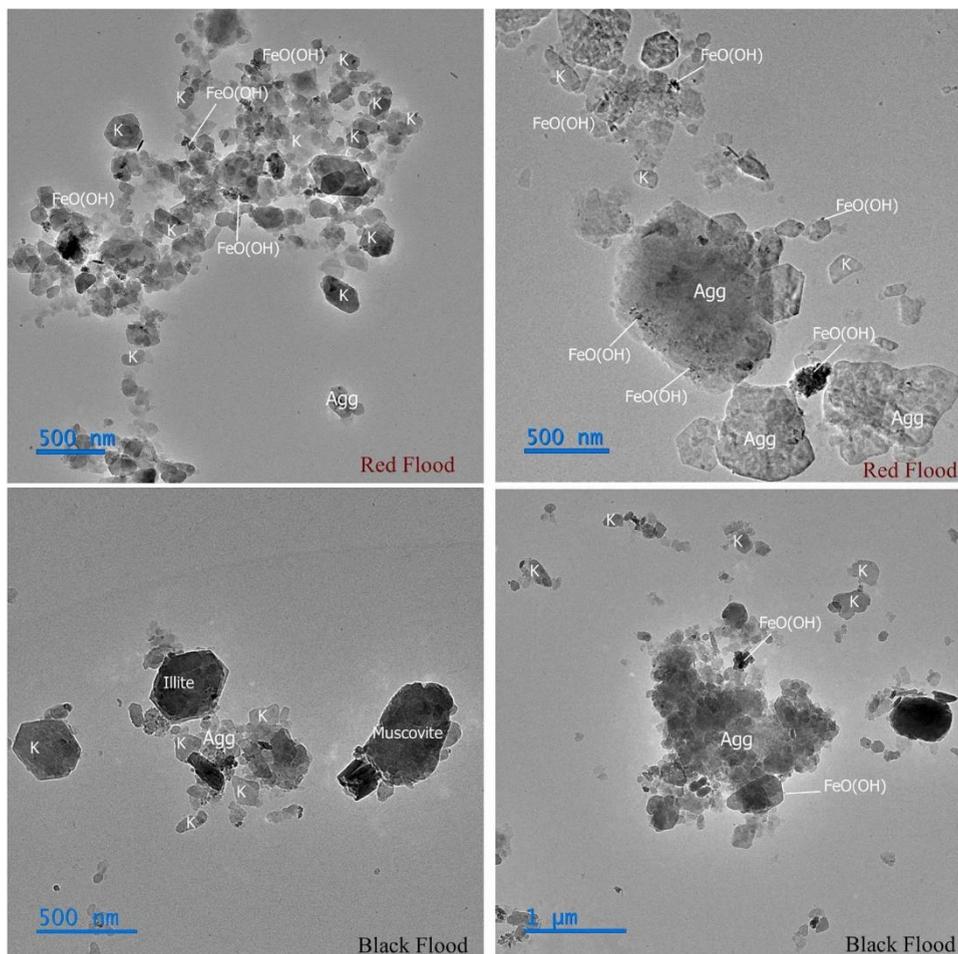
#### 3.1. SPM nature and granulometric sizes

Over the study period SPM concentration ranges from 0.01 g L<sup>-1</sup> to 1.9 g L<sup>-1</sup>. The lowest concentrations occur at the beginning of the dry season (mean = 0.0416 g L<sup>-1</sup> and standard deviation = 0.0324 g L<sup>-1</sup> calculated over the 1st October – 28th February 2019

period). The SPM concentration slightly increases over the March-May period and then more rapidly at the onset of the red flood, from June onwards, to reach its maximum, around 2 g L<sup>-1</sup>, in July.

The term “Suspended Particulate Matter” is used here for particles suspended in a water column from the nano-scale to sand-sized sediments (Bilotta et al., 2012). Niger River SPM’s size distributions curves reveal two well-pronounced modes during the red flood (Fig. 4). The two modes are centred around 0.172–0.296 and 3.9 μm ranging from medium sands to ultrafine clay particles. During the black

flood, the same modes were found with less fine particles now centred around 0.26  $\mu\text{m}$  and the larger one around 5.12–6.72  $\mu\text{m}$ . These fine particles are often associated in aggregates (Fig. 5) and are predominantly composed of kaolinite, and iron oxyhydroxides,



**Fig. 5.** Suspended Particulate Matter images obtained by the transmission electron microscope (TEM): red and black flood water samples. K: Kaolinite; Agg: Aggregate; FeO(OH): Iron Oxyhydroxide.

with minor occurrences of quartz, illite/muscovite, and ilmenite. Trace amounts of organic matter were also observed in the red flood samples.

### 3.2. Monitoring SPM with in-situ and satellite radiometry

Within a day, the temporal evolution of the SKYE radiometer reflectance is relatively constant in the morning but presents important peaks in the afternoon, more or less pronounced according to the period of the year, due to sunglint effect (i.e. specular reflection of direct sun radiation) observed on the red and NIR bands. This is consistent with the SKYE acquisition geometry and the sensor looking toward the south-west (Fig. 3). Sunglint effects are also observed on the band ratio NIR/red (Fig. 6). For each day, reflectance data were therefore averaged over the 9–11 a.m. period only, which corresponds to the time range with constant data, and sun-target-sensor geometry less prone to glint effect (glint angle larger than 50° at 10 h, relative azimuth in the 80°–160° interval). In addition, the match-up interval between morning radiometer data and SPM collection times is of the order of 2 h. Considering 9–11 h averages does not eliminate skyglint.

SKYE radiometer daily reflectance is then compared to Sentinel-2 MSI reflectance. Satellite and in situ data are well correlated in both the red and the NIR band (Fig. 7). The coefficient of determination  $r^2$  is 0.93 and 0.92, for the red and the NIR, respectively, the RMSD (root mean square difference) 0.02 and 0.03 and MAPE (Mean Absolute Percentage Error) 9.3% and 63.8%.

Reflectance measured by both the SKYE and the Sentinel-2 MSI sensors in the red and NIR bands showed a strong seasonality with extremely high values (Fig. 8), reaching 0.35–0.40 during the rainy season (June–September), that are rarely encountered in large rivers. The yearly maxima for the three years of the study period were similar. MSI values are generally higher than SKYE values during the dry season at the end of March beginning of April particularly on the NIR band, as is also apparent by the scatter in low NIR values shown in Fig. 7. This is likely due to the impact of high aerosol content, which is quite important at this period due to Harmattan wind coming from the Sahara desert and is probably not completely corrected by the MAJA scheme.

SPM concentrations measured in situ are strongly correlated with reflectance or reflectance ratio.

The best fit is obtained using power relationships between SPM and the NIR band for Sentinel-2 MSI (RMSE = 0.19; MAPE = 36.7%;  $n = 25$ ) and SPM and the NIR/red index for the SKYE radiometer (RMSE = 0.17; MAPE = 30.6%;  $n = 125$ ) [Fig. 9a, b, Eqs. (3) and (4) below].

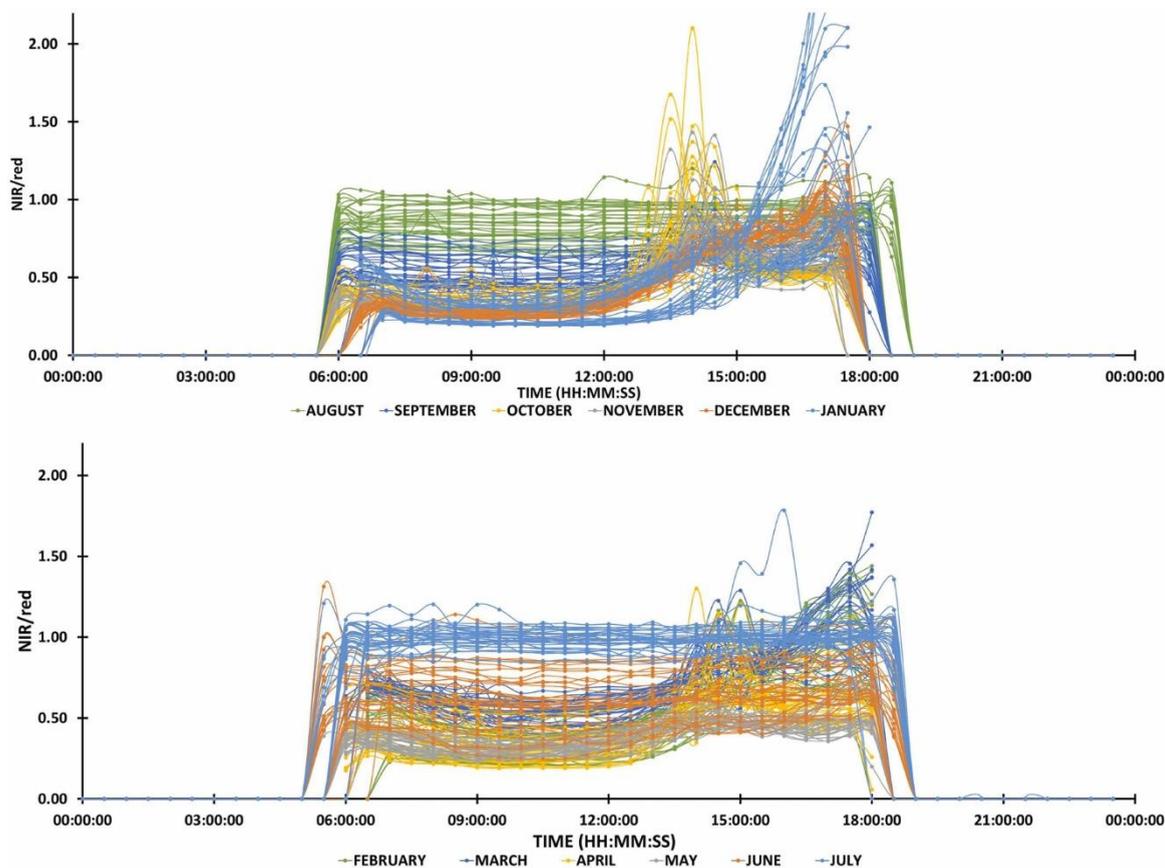


Fig. 6. Half hourly reflectance ratio (NIR/red index) for each day between the 1st of August 2018 and the 31th of July 2019. Night time data are set to zero.

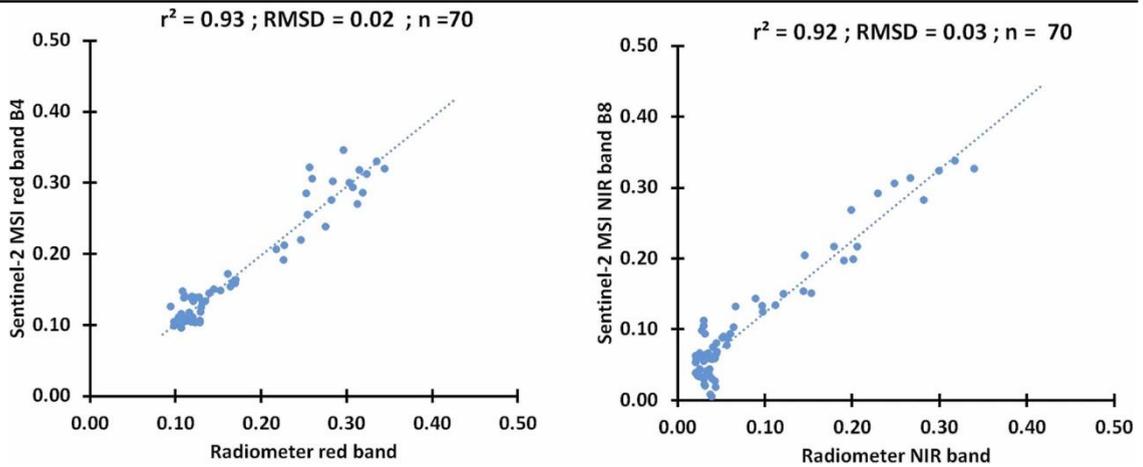


Fig. 7. Sentinel-2 MSI data vs SKYE reflectance in the red (left panel) and NIR (right panel) bands.

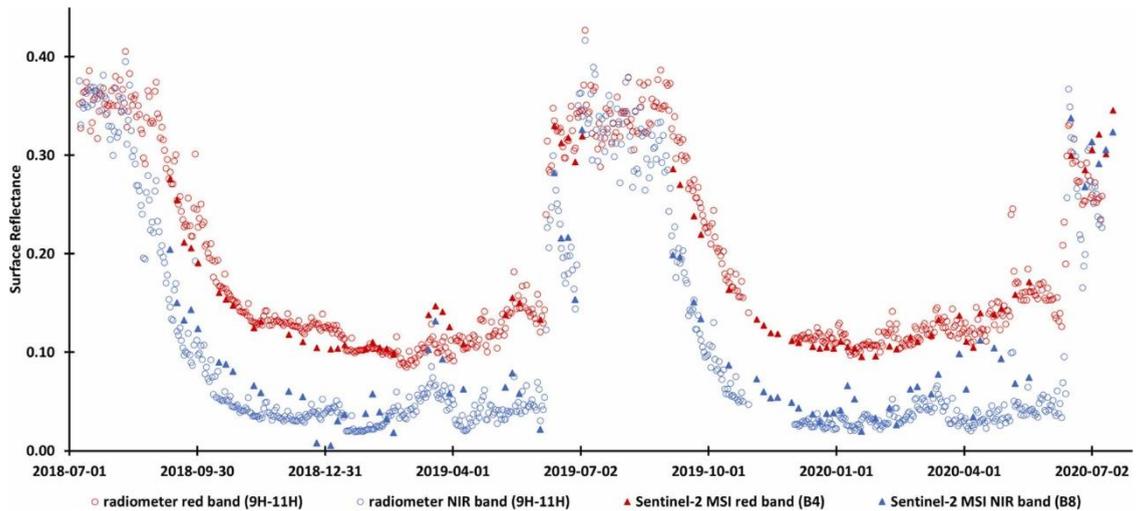


Fig. 8. Temporal evolution of the Niger water reflectance by the Sentinel-2 MSI and SKYE sensor in the red and near infrared bands.

$$[\text{SPM}] = 32\,7892 * (\text{B8})^{2.91417} \text{ (Sentinel-2 MSI)} \quad (3)$$

$$[\text{SPM}] = 1\,154 * (\text{NIR/red})^{3.430} \text{ (SKYE)} \quad (4)$$

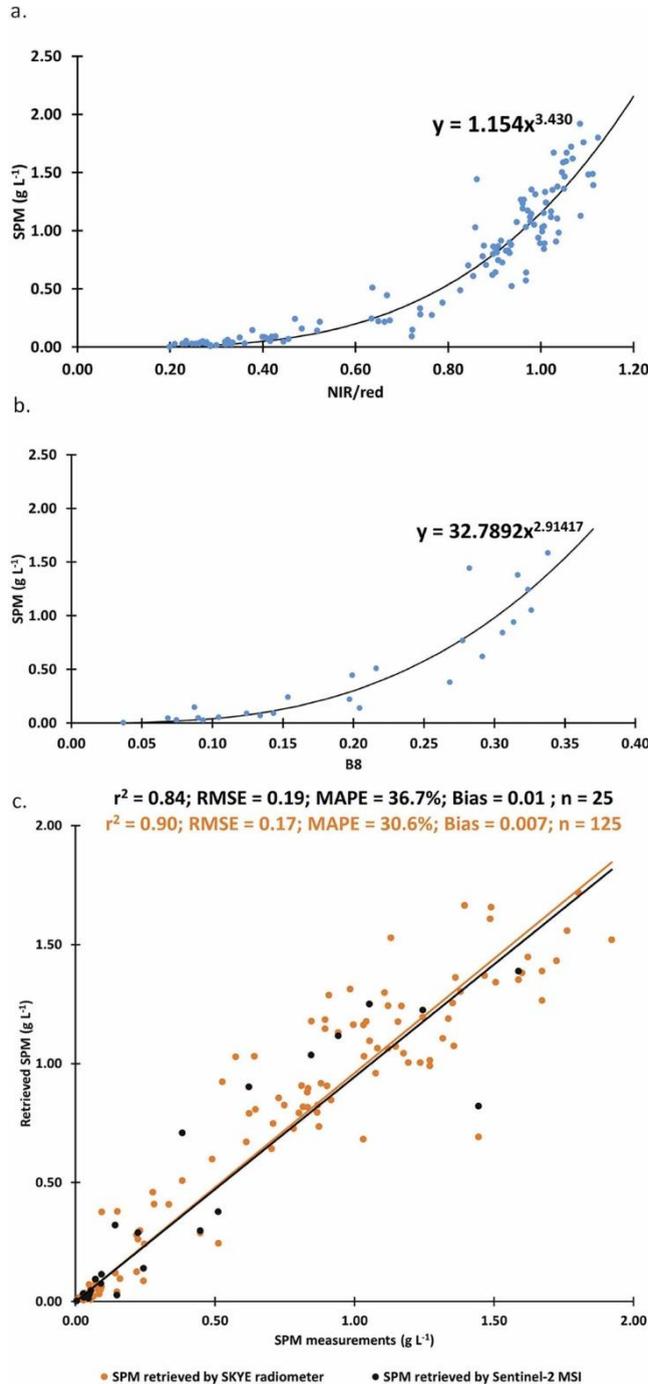
where [SPM] is Suspended Particulate Matter concentration, B8 is the Sentinel-2 MSI Near infrared band, and NIR/red is the SKYE radiometer band ratio.

The retrieved SPM obtained by the two equations above are well correlated to in-situ SPM measurements with RMSE equal to 0.19 g L<sup>-1</sup> and bias equal to 0.01 g L<sup>-1</sup> for Sentinel-2 MSI and RMSE equal to 0.17 g L<sup>-1</sup> and bias equal to 0.007 g L<sup>-1</sup> for the radiometer. The  $r^2$  quantifying the goodness of the fit between SPM measured and retrieved are equal to 0.84 for Sentinel-2 MSI and 0.90 for the in situ radiometer (Fig. 9c).

### 3.3. SPM dynamics and Niger River discharge

The evolution of SPM concentration is in phase advance in comparison to the river discharge dynamic (Fig. 10). At the beginning of the red flood period (June to September), the SPM concentration begins to increase and reaches its maximum at least one month before water level rises (Fig. 10) which is typically an effect of the first flush (Bertrand-Krajewski et al., 1998). The highest SPM concen -

trations of 0.5–2 g L<sup>-1</sup> are measured during low (less than 500 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>) to medium (500–1000 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>) river discharge. Then, while water discharge increases, the SPM concentration starts decreasing and continues to decrease during the peak of the red flood and afterwards (Fig. 11). When the black flood reached Niamey, the SPM concentration has already undergone a 10 time-decrease. This period is



**Fig. 9.** top: Relationships between SKYE (a) and Sentinel-2 MSI (b) reflectances and in-situ SPM; bottom: Relationship between SPM retrieved by radiometric measurements and in-situ SPM (c). Note that the same samples are used in the top and bottom panels.

characterized by discharges that can approach 2000 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> and low SPM concentration of about 0.1 g L<sup>-1</sup>, i.e. 5 to more than 20 times lower than those measured during the red flood conditions (Fig. 11). When the black flood decreases the SPM concentration is still low, but

shows some variations between February and April. The low water period displays the lowest discharge and SPM values around  $0.01 \text{ g L}^{-1}$ .

SPM interannual variability appears to be quite different at the beginning of the red flood with much lower SPM values in 2019 than in 2018 and 2020 during the month of June (Fig. 12). Interestingly, SPM values of those three years become more similar at the core of the red flood although a huge difference is observed in discharge. The highest discharge peak ever observed since the installation of the

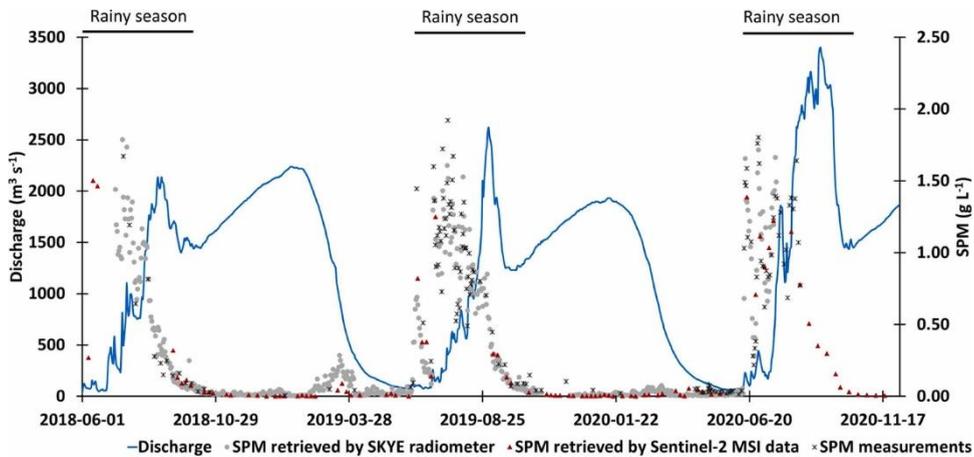


Fig. 10. Dynamics of SPM concentration and discharge at Niamey station between 2018 and 2020.

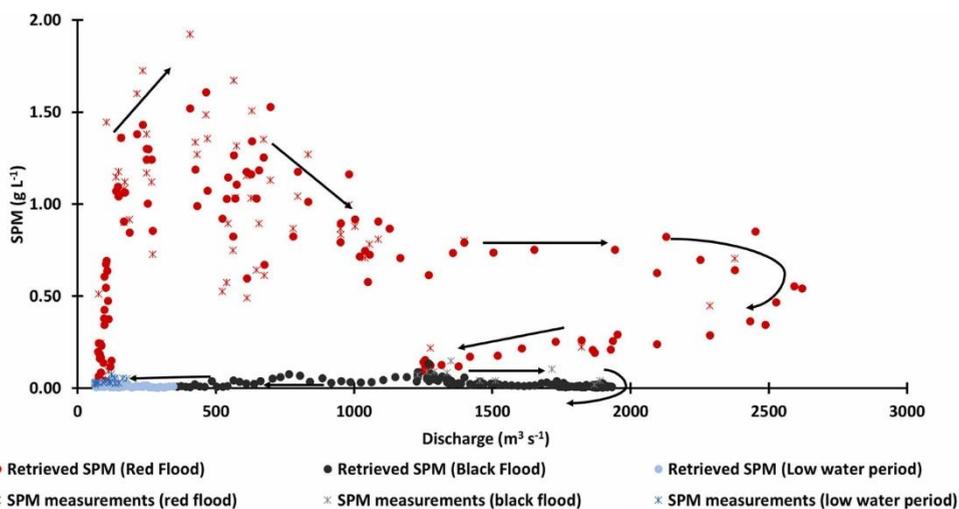


Fig. 11. SPM concentration (in-situ measurements and SKYE retrieval) vs discharge during the 2019 hydrological cycle at Niamey. The arrows represent the chronological evolution of the SPM concentration.

hydrographic station in the Niger River at Niamey occurred at the beginning of September 2020 ( $3398 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ). Despite this impressive discharge, the SPM concentration did not further increase and its value at this period in 2020 is similar with those observed in 2018 and slightly lower than the SPM values in 2019.

### 3.4. SPM spatial distribution and middle Niger basin contribution

The main tributaries of the Niger River contributing to the red flood are located downstream of Ansongo and the hydrographs at this location do not show the red flood discharge peak (Casse' et al., 2016). SPM concentrations retrieved from Sentinel-2 MSI are similar at Ansongo and Niamey during the black flood period, from October to May. During the rainy season (June – September periods), SPM peaks are observed at both locations, although with very different absolute values. While at Niamey the maximum concentration is about  $1.5 \text{ g L}^{-1}$ , at Ansongo it reaches only  $0.15 \text{ g L}^{-1}$  (Fig. 13). This clearly shows the role of the tributaries of the

Middle Niger in the SPM routing to Niamey during the red flood. The average SPM difference between Niamey and Ansongo is equal to 0.185 g L<sup>-1</sup> over this three-year period, 10 times higher than the mean SPM value at Ansongo for the same period.

The significant SPM contribution at the very beginning of the rainy season from the Sirba River (see the example in Fig. 14a, for the 17th of June 2020) further highlights this phenomenon. The Sirba river, a main tributary of the middle Niger River, contributes to 80% of the water supply recorded at the hydrological station of Niamey (Amani and Nguetora, 2002; Massazza et al., 2019). In contrast no major differences are found between the Sirba and the Niger river SPM concentration during the black flood (Fig. 14b).

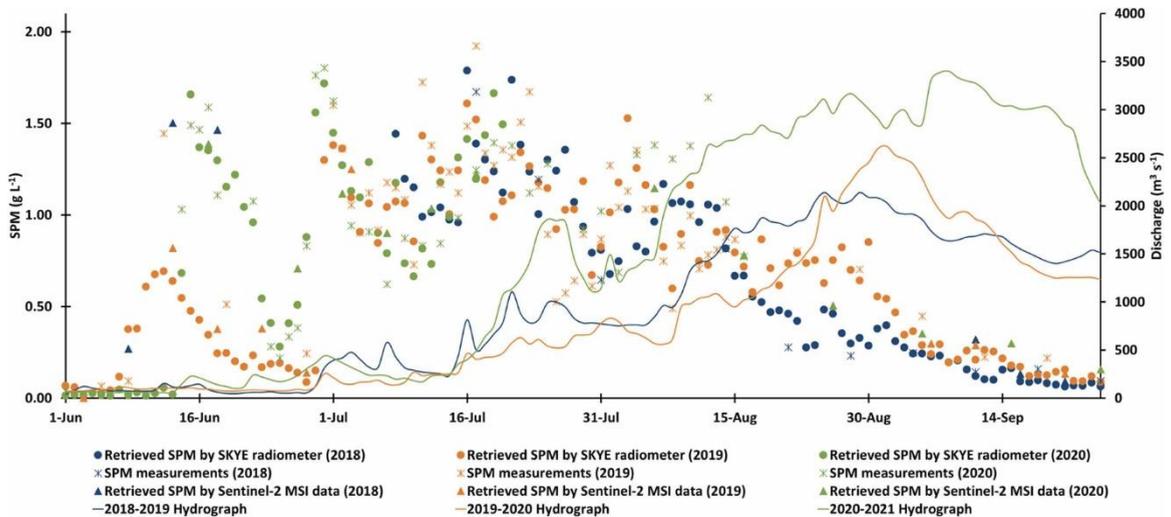


Fig. 12. Suspended particulate matter concentration retrieved and river discharge during the red flood in 2018, 2019 and 2020.

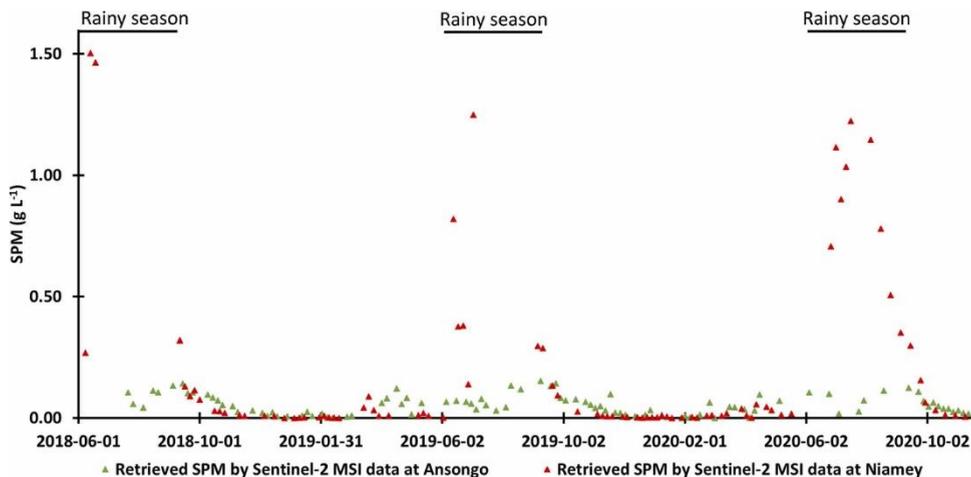


Fig. 13. Time series of Sentinel-2 MSI derived SPM at Niamey and Ansongo between 2018 and 2020.

#### 4. Discussion

The aim of this study was to estimate the SPM spatio-temporal variability in MNRB combining available information by in-situ measurements and satellite data. Simple relationships were therefore used to retrieve SPM ad hoc for the study site from the SKYE and MSI reflectances, based on commonly employed power functions as in Robert et al. (2017). Reflectance measurements by in-situ and satellite measurements proved efficient to monitor the SPM dynamics in the middle Niger basin. The retrieval performances obtained by both SKYE and Sentinel-2 MSI are very good and generally better than those obtained by other optical remote sensing sensors such as MODIS and Landsat in the same region (Kaba et al., 2014; Robert et al., 2016; Robert et al., 2017). However, employing a multi-band approach according to the SPM range, as suggested by Novoa et al. (2017) and Han et al. (2016), may provide a good option to improve SPM retrievals and derive a robust relationship widely applicable over different water bodies.

Sunglint was found to significantly affect the in-situ radiometric measurements and reflectance as well as the band ratio. As a result, only a portion of the measurements acquired within a day can be used to investigate SPM dynamics at a sub-daily scale. This could be overcome by using several radiometers pointing at different directions or by applying sunglint correction based on the SWIR reflectance (Harmel et al., 2018). Skyglint was not corrected for and causes fluctuations in the NIR and red reflectance, especially for overcast mornings. The reflectance ratio is less affected by this effect. This may be the reason why the ratio is more efficient for SPM retrieval for all-sky radiometer data, as opposed to the NIR reflectance for Sentinel-2 MSI, for which clear-sky conditions are selected. Although it is not obvious on our data, heavy dust loadings may also impact the SKYE radiometer NIR and red reflectances, but probably less so the reflectance ratio.

Overall, the reflectance ratio data display relatively small variability during the morning period suggesting that varying cloudiness

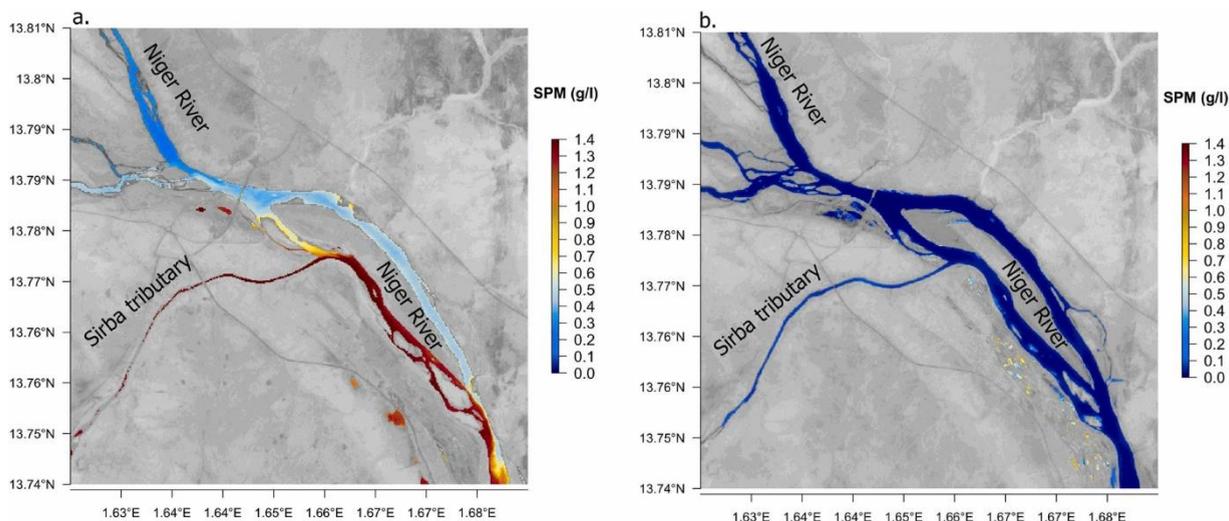


Fig. 14. Suspended particulate matter retrieved by Sentinel-2 MSI data showing input from the Sirba tributary.

or wind conditions are not major issues here and that rapid variability of SPM (sub-daily) is not common. The high values of the red and NIR reflectance in this river may attenuate sunglint and skyglint effects. Above-surface routine monitoring of water colour is mostly applied to ocean or coastal water where these issues are more severe (Mobley, 1999; Zibordi et al., 2009). The results shown in this study suggest that this kind of measurements could be used for tropical turbid rivers, either alone or in combination with high resolution satellite data.

Sentinel-2 MSI reflectance acquired for the Niamey station did not seem to be affected by sunglint problems: the Niamey station is located on the western edge of the Sentinel-2 swath and, given that the satellite overpasses at about 10h30 in the morning, specular reflection from the sun is unlikely at this site. This is not the case for the Ansongo site that is at the eastern edge of the Sentinel-2 swath and which may therefore be subject to sunglint effects. They would result in an overestimation of retrieved SPM at this site which would further increase the difference observed between Niamey and Ansongo and would not change our findings significantly.

Overall, the atmospheric correction scheme applied by the MAJA chain has proved accurate enough to monitor SPM variability. However, some issues remain. These concern particularly the impact of aerosols (mineral dust) on Sentinel-2 MSI reflectance, as indicated by the higher reflectance observed for Sentinel-2 MSI in both the NIR and the red band compared to SKYE reflectances in the March-April period (Fig. 8).

The SPM characteristics and their small size combined with their high concentration resulted in the very high values of reflectance observed in this area in both the visible and the NIR bands.

The nature of SPM in the Middle Niger at the latitude of Niamey is dominated by kaolinite, iron oxyhydroxides, and quartz. This composition is consistent with the nature of the sandy and sandy-silty Sahelian soils (Stroosnijder, 1982) and the outcropping rocks dominated by ferruginous sandstones of the terminal continental (Yaou et al., 2019). The iron oxyhydroxides would then come from the erosion of these surfaces. The kaolinite originates from the soils of the Middle Basin, which are recognized as not very reactive because of that kaolinitic nature (Mahamane et al., 2020).

SPM concentration showed an important intra-annual variability. The maximum concentration ( $\sim 2 \text{ g L}^{-1}$ ) was recorded at the beginning of the rainy season (June - July). It was much higher than in the upper basins ( $0.6 \text{ g L}^{-1}$  at Banankoro, Picouet et al., 2009) and lower than that observed on the Gorouol tributary at Alcongui ( $3.751 \text{ g L}^{-1}$  in 2007/08, Amogu, 2009). The high SPM concen-

tration in the middle part of the Niger River is likely related to the low vegetation cover at the beginning of the rainy season leading to strong soil erosion. Indeed, the soils have experienced significant crusting and increased erosion, resulting in tons of sediment drained into the river (Mamadou, 2012). Previous measurements of SPM concentration in the Middle Niger, although discontinuous, have

shown quantities of the same order about 0.182 g L<sup>-1</sup> to 1.5787 g L<sup>-1</sup> (Alhou et al., 2016). In the major rivers of West Africa, the Senegal (Faye et al., 2020) and the Black Volta in Tanguasie (Bowen and Tingan, 2020), the concentrations of SPM measured were respectively 1.4 and 2.15 times lower than those of the Middle Niger River.

SPM concentration decrease observed during the rising water should rather be related to the conjugation of vegetation development on the water basin and the net decrease of the free elements in surfaces already washed out by the first rains. A similar decrease in SPM concentration occurring at the same period was observed in the Bangou Kirey Lake (located East of the Niamey) and ascribed to water dilution due to the rise in the water table (Abdourhamane Touré et al., 2016).

At the end of the black flood, close to the low water season, the SPM concentration displays a slight increase, in the absence of any input of water flow by runoff. This increase may be ascribed to the decrease in water volume leading to a local production of particles by the phenomenon of bank erosion. Alternatively, the March-April period is characterized by an increase in the speed of the trade winds (harmattan) that could stir the water and resuspend particles (Abdourhamane Touré et al., 2018). A similar increase in the middle of the dry season has been observed for Sahelian lakes in northern Mali (Robert et al., 2017), with wind-driven turbulence

possibly inducing a recirculation of bottom and bank sediments.

The SPM/Discharge hysteresis of the Niger River at Niamey are quite different from most hydrological systems. During the red flood the SPM/discharge curve follow the classic scenario observed in the Tropics with the maximum of SPM occurring before the discharge peak. This is the case for example at the Congo River outlet (N'kaya et al., 2020), for the Mississippi (Snedden et al., 2007) or Orinoco (Gallay et al., 2019). However, a major difference lies in the fact that the discharge curve of the Niger River at Niamey presents a second peak absent in these other systems. This peak is characterized by low SPM values which produce a distinctive feature for the middle Niger river. In terms of inter-annual variability, it is striking that the 2020 red flood, which was severe in Niamey, did not notably increase the river's SPM concentration.

## 5. Conclusion

This study has documented the SPM spatio-temporal variability in the middle Niger River.

Radiometric measurements collected in-situ or by satellite proved useful to monitor SPM which, in this area, is characterized by very fine kaolinite and iron oxyhydroxide particles that at high concentrations resulted in extremely high values of reflectance.

Good relationships were established between the radiometric measurements (NIR/red for SKYE in situ radiometer and NIR (B8) for Sentinel-2 MSI) and SPM concentration. This allowed to retrieve SPM concentration at Niamey at a daily time step (SKYE measurements) and to analyse their spatial variability within the middle Niger River (Sentinel-2 MSI). The red flood was characterised by very high SPM values with the SPM maximum reached at least one month before the maximum of the discharge, while low SPM values were recorded during the black flood. We have highlighted the important SPM contribution from the main tributary of the middle Niger River during the red flood which explains the difference in SPM between Niamey and Ansongo, located upstream. Finally, the interannual variability of SPM during the red flood was not found to play a major role on SPM concentration. In particular, SPM values after July in 2020 were similar to those in the previous two years, despite that record discharge values measured in 2020. However, future changes in SPM concentration under climate and anthropic changes, as for example the intensification of the hydrological cycle or the dam construction planned at the upstream on Niamey, and their impacts on SPM concentration in Niamey cannot be excluded and strongly underline the need to maintain monitoring of SPM in this area.

## Author statement

Conceptualization, M.B.M., M.Gr., A.A.T., L.K., and E.R.; project administration, M.Gr.; investigation, M.B.M., M.Gr., A.A.T., L.K., B.L.; data acquisition, M.B.M., B.L., E.R-N., M.Go., B.A.T.; data analyzes, M.B.M., M.Gr., L.K., B.L.; writing-original draft preparation, M.B.M.; writing-review and edition, A.A.T., M.Gr., B.L., L.K., E.R., E.R-N.

## Declaration of Competing Interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

## Acknowledgements

The authors would like to thank Adrien Paris for help with radiometer set up in Niamey, Franck Timouk for the radiometer configuration, Aliko Mamane for in-situ measurements and radiometer maintenance, Amelie Picot for the first granulometric measurements and data analysis and Guillaume Favreau for discussion on Niger River hydrology. We also thank Olivier Hagolle for discussions about the MAJA processing and anonymous reviewers for useful suggestions. The authors also acknowledge the "SEEN" (Société d'Exploitation des Eaux du Niger) for hosting the radiometer, IRD (Institut de Recherche pour le Développement) in Niamey for logistic help and the Goudel water treatment station manager and agents for allowing access to the sampling station. This study was supported by the French Centre National d'Etudes Spatiales (CNES)

through the TELESSAO project (APR TOSCA Sant'e), by CREPE- NAAN project (INSU EC2CO) and by AMMA-CATCH observatory. This work is part of the Ph.D. thesis requirements on the first author (MBM) and was funded by "Institut de recherche pour le développement" (IRD) through ARTS program and the French Embassy in Niger through the "Service de coopération et d'action Culturelle (SCAC)".

## References

- Abdourhamane Tour'e, A., Guillon, R., Garba, Z., Rajot, J.L., Petit, C., Bichet, V., Durand, A., Sebag, D., 2010. Evolution des paysages sahéliens au cours des six dernières décennies dans la région de Niamey: de la disparition de la brousse tigrée à l'encroûtement de surface des sols. *Pangea* (48), 47, pp. 35–40.
- Abdourhamane Tour'e, A., Tidjani, A., Guillon, R., Rajot, J., Petit, C., Garba, Z., Sebag, D., 2016. Teneur en matières en suspension des lacs sahéliens en liaison avec les variations piézométrique et pluviométrique: cas des lacs Bangou Kirey et Bangou Bi, Sud-Ouest Niger. *Afrique. Science* 12 (2), 384–392.
- Abdourhamane Tour'e, A., Tidjani, A.D., Rajot, J.L., Bouet, C., Garba, Z., Marticorena, B., Ambouta, K.J.M., 2018. Quantification des flux d'érosion éolienne au cours d'une transition champ-jachère au Sahel (Banizoumbou, Niger). *Physio-Géo* 12, 125–142. <https://doi.org/10.4000/physio-geo.6287>.
- Alhou, B., Boukari, I., Darchambeau, F., 2016. Apports En Carbone Et Azote Dans Le Fleuve Niger A Tondibia (Niamey): Résultats De Deux (2) Ans D'observations. *Eur. Sci. J.* <https://doi.org/10.19044/esj.2016.v12n21p167>.
- Allies, A., Demarty, J., Olioso, A., Bouzou Moussa, I., Issoufou, H.B.A., Velluet, C., Bahir, M., Maïnassara, I., Oï, M., Chazarin, J.P., Cappelaere, B., 2020. Evapotranspiration estimation in the Sahel using a new ensemble-contextual method. *Remote Sens.* 12 (3), 380. <https://doi.org/10.3390/rs12030380>.
- Amani, A. and Nguetora, M., 2002. Evidence d'une modification du régime hydrologique du fleuve Niger à Niamey. IAHS PUBLICATION, pp.449–456.
- Amogu, O., 2009. La dégradation des espaces sahéliens et ses conséquences sur l'alluvionnement du fleuve Niger moyen (Doctoral dissertation, University of Grenoble 1).
- Amogu, O., Descroix, L., Y'ero, K.S., Le Breton, E., Mamadou, I., Ali, A., Vischel, T., Bader, J.C., Moussa, I.B., Gautier, E., Boubkraoui, S., 2010. Increasing river flows in the Sahel? *Water* 2 (2), 170–199. <https://doi.org/10.3390/w2020170>.
- Autorité du Bassin du Fleuve Niger (ABFN), 2018. Rapport sur l'état du fleuve Niger au Mali. Available on: <https://q-eau-mali.net/media/rapport-sur-letat-du-fleuve-niger-au-mali/#:~:text=Le%20rapport%20permet%20de%20conna%C3%AAtre,et%20de%20plans%20d'actions> (last Access: 17/01/2022).
- Bertrand-Krajewski, J.L., Chebbo, G., Saget, A., 1998. Distribution of pollutant mass vs volume in stormwater discharges and the first flush phenomenon. *Water Res.* 32 (8), 2341–2356. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(97\)00420-X](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(97)00420-X).
- Billon, B., 1985. Le Niger à Niamey. D'écrue et étiage 1985. *Cah. Orstom. Série Hydrol.* 21 (4), 3–22.
- Bilotta, G.S., Burnside, N.G., Cheek, L., Dunbar, M.J., Grove, M.K., Harrison, C., Joyce, C., Peacock, C., Davy-Bowker, J., 2012. Developing environment-specific water quality guidelines for suspended particulate matter. *Water Res.* 46 (7), 2324–2332. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.01.055>.
- Bowan, P.A., Tingan, E.M.A., 2020. Influence of Illegal Small-Scale Gold Mining on the Black Volta Water. *Commun. Appl. Sci.* 9, 1–18.
- Caballero, I., Steinmetz, F., Navarro, G., 2018. Evaluation of the first year of operational Sentinel-2A data for retrieval of suspended solids in medium-to high-turbidity waters. *Remote Sens.* 10 (7), 982. <https://doi.org/10.3390/rs10070982>.
- Cassé, C., Gosset, M., Vischel, T., Quantin, G., Tanimoun, B.A., 2016. Model-based study of the role of rainfall and land use–land cover in the changes in the occurrence and intensity of Niger red floods in Niamey between 1953 and 2012. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 20 (7), 2841–2859. <https://doi.org/10.5194/hess-20-2841-2016>.
- Dardel, C., Kergoat, L., Hiernaux, P., Grippa, M., Mougoin, E., Ciais, P., Nguyen, C.C., 2014a. Rain-use-efficiency: What it tells us about the conflicting Sahel greening and Sahelian paradox. *Remote Sens.* 6 (4), 3446–3474. <https://doi.org/10.3390/rs6043446>.
- Dardel, C., Kergoat, L., Hiernaux, P., Mougoin, E., Grippa, M., Tucker, C.J., 2014b. Re-greening Sahel: 30 years of remote sensing data and field observations (Mali, Niger). *Remote Sens. Environ.* 140, 350–364. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.09.011>.
- 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 in the Niamey region. *Glob. Planet. Change* 98, 18–30. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2012.07.009>.
- Descroix, L., Guichard, F., Grippa, M., Lambert, L.A., Panthou, G., Mah'e, G., Gal, L., Dardel, C., Quantin, G., Kergoat, L., Bouaita, Y., 2018. Evolution of surface hydrology in the Sahelo-Sudanian strip: an updated review. *Water* 10 (6), 748. <https://doi.org/10.3390/w10060748>.
- Descroix, L., Niang, A.D., Panthou, G., Bodian, A., Sane, Y., Dacosta, H., Abdou, M.M., Vandervaere, J.P., Quantin, G., 2015. Evolution récente de la pluviométrie en Afrique de l'Ouest à travers deux régions: La sénégambie et le bassin du Niger moyen. *Climatologie* 12, 25–43. <https://doi.org/10.4267/climatologie.1105>.
- Dieye M., Dia D., Barbier B., Sylla E.H.M., Sall M., Bader Jean-Claude, Bossa A.Y., Sanfo S., Fall C.S. (2020). L'agriculture de décrue en Afrique de l'Ouest et du centre: une certaine résilience face à la variabilité climatique et à la régulation des fleuves. In: Sultan Benjamin (ed.), Bossa A.Y. (ed.), Salack S. (ed.), Sanon M. (ed.). *Risques climatiques et agriculture en Afrique de l'Ouest*. Marseille: IRD, p. 121–131.

- Doxaran, D., Froidefond, J.M., Lavender, S., Castaing, P., 2002. Spectral signature of highly turbid waters: application with SPOT data to quantify suspended particulate matter concentrations. *Remote Sens. Environ.* 81, 149–161.
- Droy, I., Morand, P., 2013. Les grands aménagements sur le fleuve Niger: atout pour le Mali ou facteur de vulnérabilité pour ses populations rurales? *Mondes En. D'év.* 164, 57–70. <https://doi.org/10.3917/med.164.0057>.
- Drusch, M., Del Bello, U., Carlier, S., Colin, O., Fernandez, V., Gascon, F., Hoersch, B., Isola, C., Laberinti, P., Martimort, P., Meygret, A., 2012. Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services. *Remote Sens. Environ.* 120, 25–36. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.11.026>.
- Favreau, G., Cappelaere, B., Massuel, S., Leblanc, M., Boucher, M., Boulain, N., Leduc, C., 2009. Land clearing, climate variability, and water resources increase in semi-arid southwest Niger: a review. *Water Resour. Res.* 45 (7) <https://doi.org/10.1029/2007WR006785>.
- Faye, C., Grippa, M., Kergoat, L., Robert, E., 2020. Investigating the drivers of total suspended sediment regime in the senegal river basin using landsat 8 satellite images. *J. Environ. Geogr.* 13 (1–2), 31–42 <https://doi.org/10.2478/jengeo-2020-0004>.
- Gal, L., Grippa, M., Hiernaux, P., Pons, L., Kergoat, L., 2017. The paradoxical evolution of runoff in the pastoral Sahel: analysis of the hydrological changes over the Agoufou watershed (Mali) using the KINEROS-2 model. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 21 (9), 4591–4613. <https://doi.org/10.5194/hess-21-4591-2017>.
- Gallaire, R., 1995. Données sur les transports du Niger moyen entre Kandadji et Niamey, in *Grands Bassins Fluviaux P'ériatlantiques: Congo, Niger, Amazone*, edited by J. C. Olivry and J. Boul'egue, pp. 317–332, ORSTOM Editions, Paris.
- Gallay, M., Martinez, J.M., Mora, A., Castellano, B., Y'épez, S., Cochoy, G., Alfonso, J.A., Carrera, J.M., Lopez, J.L., Laraque, A., 2019. Assessing Orinoco river sediment discharge trend using MODIS satellite images. *J. South Am. Earth Sci.* 91, 320–331. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2019.01.010>.
- Hagolle, O., Huc, M., Desjardins, C., Auer, S., and Richter, R., 2017. MAJA ATBD Algorithm Theoretical Basis Document, section 3.5 pg 31–37, CNES report 2017 (ref MAJA-TN-WP2–030 V1.0 2017/Dec/07) available on line at [https://theia.sedoo.fr/wp-content-theia/uploads/sites/2/2018/12/atbd\\_maja\\_071217.pdf](https://theia.sedoo.fr/wp-content-theia/uploads/sites/2/2018/12/atbd_maja_071217.pdf) (last access: 04/05/2022).
- Hagolle, O., Huc, M., Villa Pascual, D., Dedieu, G., 2015. A multi-temporal and multi-spectral method to estimate aerosol optical thickness over land, for the atmospheric correction of FormoSat-2, LandSat, VEN S and Sentinel-2 images. *Remote Sens.* 7 (3), 2668–2691. <https://doi.org/10.3390/rs70302668>.
- Younoussa, B., Hassane Yaou, T., Abdourhamane Tour'e, A., Moussa Issaka, A., Hassane, B., Garba, Z., 2020. Dynamique récente et actuelle de l'érosion en nappe aux abords du fleuve Niger. *Afrique. Science* 16 (1), 247–259.
- Han, B., Loisel, H., Vantrepotte, V., Meriaux, X., Bryere, P., Ouillon, S., Dessailly, D., Xing, Q., Zhu, J., 2016. Development of a semi-analytical algorithm for the retrieval of suspended particulate matter from remote sensing over clear to very turbid waters. *Remote Sens.* 8. <https://doi.org/10.3390/rs8030211>.
- Harmel, T., Chami, M., Tormos, T., Reynaud, N., Danis, P.A., 2018. Sun glint correction of the Multi-Spectral Instrument (MSI)-SENTINEL-2 imagery over inland and sea waters from SWIR bands. *Remote Sens. Environ.* 204, 308–321. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.10.022>.
- Hauer, C., Leitner, P., Unfer, G., Pulg, U., Habersack, H., Graf, W., 2018. The Role of Sediment and Sediment Dynamics in the Aquatic Environment. In: Schmutz, S., Sendzimir, J. (Eds.), *Riverine Ecosystem Management, Aquatic Ecology Series*, vol 8. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-73250-3\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-319-73250-3_8).
- Horiba. Partica LA950-V2. [En ligne]. Available on: <http://www.horiba.com/fr/scientific/products/particle-characterization/particle-size-analysis/details/la-950-laser-particle-size-analyzer-108/> (last access: 11/01/2022).
- 2022 Anon <https://worldpopulationreview.com/world-cities> (last access: 11/01/2022).
- 2022 Anon <https://www.skyeinstruments.com/> (last access: 11/01/2022).
- Hulme, M., Doherty, R., Ngara, T., New, M., Lister, D., 2001. African climate change: 1900–2100. *Clim. Res.* 17 (2), 145–168.
- Janicot, S., Moron, V., Fontaine, B., 1996. Sahel droughts and ENSO dynamics. *Geophys. Res. Lett.* 23 (5), 515–518. <https://doi.org/10.1029/96GL00246>.
- Kaba, E., Philpot, W., Steenhuis, T., 2014. Evaluating suitability of MODIS-Terra images for reproducing historic sediment concentrations in water bodies: Lake Tana, Ethiopia. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 26, 286–297. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2013.08.001>.
- Kuhn, C., de Matos Valerio, A., Ward, N., Loken, L., Sawakuchi, H.O., Kampel, M., Richey, J., Stadler, P., Crawford, J., Striegel, R., Vermote, E., 2019. Performance of Landsat-8 and Sentinel-2 surface reflectance products for river remote sensing retrievals of chlorophyll-a and turbidity. *Remote Sens. Environ.* 224, 104–118. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.01.023>.
- Lebel, T., Ali, A., 2009. Recent trends in the Central and Western Sahel rainfall regime (1990–2007). *J. Hydrol.* 375 (1–2), 52–64. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.11.030>.
- Lebel, T., Panthou, G., Vischel, T., 2020. Inondations en Afrique: une nouvelle ère hydroclimatique. *Conversat. Fr.* 24.

- Leblanc, M.J., Favreau, G., Massuel, S., Tweed, S.O., Loireau, M., Cappelaere, B., 2008. Land clearance and hydrological change in the Sahel: SW Niger. *Glob. Planet. Change* 61 (3–4), 135–150. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2007.08.011>.
- Li, P., Ke, Y., Bai, J., Zhang, S., Chen, M., Zhou, D., 2019. Spatiotemporal dynamics of suspended particulate matter in the Yellow River Estuary, China during the past two decades based on time-series Landsat and Sentinel-2 data. *Mar. Pollut. Bull.* 149, 110518 <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.110518>.
- Liu, H., Li, Q., Shi, T., Hu, S., Wu, G., Zhou, Q., 2017. Application of sentinel 2 MSI images to retrieve suspended particulate matter concentrations in Poyang Lake. *Remote Sens.* 9 (7), 761. <https://doi.org/10.3390/rs9070761>.
- Mahamadou, B.I., Bouzou Moussa, I., Faran Maiga, O., 2018. Evolution des caractéristiques pluviométriques et recrudescence des inondations dans les localités riveraines du fleuve Niger. *Vertigo-la Rev. électronique En. Sci. De l'Environ.* <https://doi.org/10.4000/vertigo.19891>.
- Mahamane, M., Matchi, I.I., Hochschild, V., Mahamane, A., 2020. Evaluation du risque d'érosion du sol au Sahel: cas du paysage de Tillabéry. *Afrique. SCIENCE* 16 (5), 235–248.
- Mah'e, G., Lienou, G., Descroix, L., Bamba, F., Paturel, J.E., Laraque, A., Meddi, M., Habaieb, H., Adeaga, O., Dieulin, C., Chahnez Kotti, F., 2013. The rivers of Africa: witness of climate change and human impact on the environment. *Hydrol. Process.* 27 (15), 2105–2114. <https://doi.org/10.1002/hyp.9813>.
- Mamadou, I., 2012. La dynamique accélérée des koris de la région de Niamey et ses conséquences sur l'ensablement du fleuve Niger (Doctoral dissertation, University of Grenoble I (France) and Université Abdou Moumouni de Niamey (Niger)), p.290.
- Martinez, J.M., Guyot, J.L., Filizola, N., Sondag, F., 2009. Increase in suspended sediment discharge of the Amazon River assessed by monitoring network and satellite data. *Catena* 79 (3), 257–264. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2009.05.011>.
- Massazza, G., Tamagnone, P., Wilcox, C., Belcore, E., Pezzoli, A., Vischel, T., Panthou, G., Housseini Ibrahim, M., Tiepolo, M., Tarchiani, V., Rosso, M., 2019. Flood hazard scenarios of the Sirba River (Niger): evaluation of the hazard thresholds and flooding areas. *Water* 11 (5), 1018. <https://doi.org/10.3390/w11051018>.
- Mobley, C.D., 1999. Estimation of the remote-sensing reflectance from above-surface measurements. *Appl. Opt.* 38 (36), 7442–7455.
- N'kaya, G.D.M., Orange, D., Bayonne Padou, S.M., Datok, P., Laraque, A., 2020. Temporal variability of sediments, dissolved solids and dissolved organic matter fluxes in the Congo River at Brazzaville/Kinshasa. *Geosciences* 10 (9), 341. <https://doi.org/10.3390/geosciences10090341>.
- Neched, B., Ruddick, K.G., Park, Y., 2010. Calibration and validation of a generic multisensor algorithm for mapping of total suspended matter in turbid waters. *Remote Sens. Environ.* 114 (4), 854–866. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.11.022>.
- Nicholson, S.E., Tucker, C.J., Ba, M.B., 1998. Desertification, drought, and surface vegetation: an example from the West African Sahel. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 79 (5), 815–830. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1998\)079<0815:DDASVA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1998)079<0815:DDASVA>2.0.CO;2).
- Niger Basin Nexus profile, 2018. Available on: <https://www.water-energy-food.org/ru/resources/profil-nexus-bassin-du-niger> (last access: 11/01/2022).
- Novoa, S., Doxaran, D., Ody, A., Vanhellemont, Q., Lafon, V., Lubac, B., Gernez, P., 2017. Atmospheric Corrections and multi-conditional algorithm for multi-sensor remote sensing of suspended particulate matter in low-to-high turbidity levels coastal waters. *Remote Sens.* 9, 61. <https://doi.org/10.3390/rs9010061>.
- Olivry, J.C., 2002. Synthèse des connaissances hydrologiques et potentiel en ressources en eau du fleuve Niger. Authority, Provisional Report. World Bank, Niger Basin, p. 160.
- Pahlevan, N., Mangin, A., Balasubramanian, S.V., Smith, B., Alikas, K., Arai, K., Barbosa, C., B'elanger, S., Binding, C., Bresciani, M., Giardino, C., 2021. ACIX-Aqua: A global assessment of atmospheric correction methods for Landsat-8 and Sentinel-2 over lakes, rivers, and coastal waters. *Remote Sens. Environ.* 258, 112366 <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112366>.
- Pahlevan, N., Sarkar, S., Franz, B.A., Balasubramanian, S.V., He, J., 2017. Sentinel-2 MultiSpectral Instrument (MSI) data processing for aquatic science applications: demonstrations and validations. *Remote Sens. Environ.* 201, 47–56. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.08.033>.
- Panthou, G., Lebel, T., Vischel, T., Quantin, G., Sane, Y., Ba, A., Ndiaye, O., Diongue-Niang, A., Diopkane, M., 2018. Rainfall intensification in tropical semi-arid regions: The Sahelian case. *Environ. Res. Lett.* 13 (6), 064013 <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aac334>.
- Paturel, J.E., Poussin, J.C., Braquet, N., Ferry, L., Mah'e, G., Ogilvie, A., Diello, P., Hertzog, T., 2020. Avenir du Fleuve Niger. 204. (<https://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:010080259>) .
- Pennock, J.R., Sharp, J.H., 1994. Temporal alternation between light-and nutrient-limitation of phytoplankton production in a coastal plain estuary. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 275–288.
- Petus, C., Chust, G., Gohin, F., Doxaran, D., Froidefond, J.M., Sagarmirina, Y., 2010. Estimating turbidity and total suspended matter in the Adour River plume (South

- Bay of Biscay) using MODIS 250-m imagery. *Cont. Shelf Res.* 30 (5), 379–392. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2009.12.007>.
- Picouet, C., Hingray, B., Olivry, J.C., 2009. Modelling the suspended sediment dynamics of a large tropical river: the Upper Niger River basin at Banankoro. *Hydrol. Process.*: *Int. J.* 23 (22), 3193–3200. <https://doi.org/10.1002/hyp.7398>.
- Pinet, S., Martinez, J.M., Ouillon, S., Lartiges, B., Villar, R.E., 2017. Variability of apparent and inherent optical properties of sediment-laden waters in large river basins—lessons from in situ measurements and bio-optical modeling. *Opt. Express* 25 (8), A283–A310. <https://doi.org/10.1364/OE.25.00A283>.
- Renosh, P.R., Doxaran, D., Keukelaere, L.D., Gossn, I.J., 2020. Evaluation of atmospheric correction algorithms for sentinel-2-MSI and sentinel-3-OLCI in highly turbid estuarine waters. *Remote Sens.* 12 (8), 1285. <https://doi.org/10.3390/rs12081285>.
- Robert, E., Grippa, M., Kergoat, L., Pinet, S., Gal, L., Cochonneau, G., Martinez, J.M., 2016. Monitoring water turbidity and surface suspended sediment concentration of the Bagre Reservoir (Burkina Faso) using MODIS and field reflectance data. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 52, 243–251. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2016.06.016>.
- Robert, E., Grippa, M., Nikiema, D.E., Kergoat, L., Koudougou, H., Auda, Y. and Rochelle-Newall, E., 2021. Environmental determinants of E. coli, link with the diarrheal diseases, and indication of vulnerability criteria in tropical area (Kapore, Burkina Faso). medRxiv. <https://doi.org/10.1101/2021.04.21.21255867>.
- Robert, E., Kergoat, L., Soumaguel, N., Merlet, S., Martinez, J.M., Diawara, M., Grippa, M., 2017. Analysis of suspended particulate matter and its drivers in Sahelian ponds and lakes by remote sensing (Landsat and MODIS): Gourma region, Mali. *Remote Sens.* 9 (12), 1272. <https://doi.org/10.3390/rs9121272>.
- Rochelle-Newall, E., Nguyen, T.M.H., Le, T.P.Q., Sengtaheuanghoung, O., Ribolzi, O., 2015. A short review of fecal indicator bacteria in tropical aquatic ecosystems: knowledge gaps and future directions. *Front. Microbiol.* 6, 308. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.00308>.
- Shen, F., Verhoef, W., Zhou, Y., Salama, M.S., Liu, X., 2010. Satellite estimates of wide-range suspended sediment concentrations in Changjiang (Yangtze) estuary using MERIS data. *Estuar. Coast* 33, 1420–1429.
- Snedden, G.A., Cable, J.E., Swarzenski, C., Swenson, E., 2007. Sediment discharge into a subsiding Louisiana deltaic estuary through a Mississippi River diversion. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 71 (1–2), 181–193. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2006.06.035>.
- Stroosnijder, L., 1982. La p'edologie du Sahel et du terrain d'etude. In *La productivite des paturages Saheliens*. In Penning de Vries M.A. Djiteye F.W.T No., 918, 1982, pp. 52–71.
- Taylor, C.M., Belu'si'c, D., Guichard, F., Parker, D.J., Vischel, T., Bock, O., Harris, P.P., Janicot, S., Klein, C., Panthou, G., 2017. Frequency of extreme Sahelian storms tripled since 1982 in satellite observations. *Nature* 544 (7651), 475–478. <https://doi.org/10.1038/nature22069>.
- Tidjani, A.D., 2008. Erosion 'eolienne dans le Damagaram Est (Sud-Est du Niger): param'etrisation, quantification et moyens de lutte. (Doctoral dissertation, Univ. Catholique de Louvain), p.171.
- Tiepolo, M., Belcore, E., Braccio, S., Issa, S., Massazza, G., Rosso, M., Tarchiani, V., 2021. Method for fluvial and pluvial flood risk assessment in rural settlements. *MethodsX* 8, 101463. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2021.101463>.
- World Bank 2017. Republic of Niger, Priorities for ending poverty and boosting shared prosperity: systematic country diagnostic. Report No. 115661-NE, pp126. Available at: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/28994?show=full&locale-attribute=fr>.
- Yaou, T.H., Younoussa, B.H., Abdourhamane Touré, A., Issaka, A.M., Hassane, B., Garba, Z., 2019. Analyse géomorphologique des risques liés aux mouvements de terrain à Niamey, Niger. *Rev. Ivoir. Sci. Technol.* 34, 247–263.
- Zheng, G., DiGiacomo, P.M., 2017. Uncertainties and applications of satellite-derived coastal water quality products. *Prog. Oceanogr.* 159, 45–72. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2017.08.007>.
- Zibordi, G., Berthon, J.F., M'elin, F., D'Alimonte, D., Kaitala, S., 2009. Validation of satellite ocean color primary products at optically complex coastal sites: Northern Adriatic Sea, Northern Baltic Proper and Gulf of Finland. *Remote Sens. Environ.* 113 (12), 2574–2591. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.07.013>.



## ***Résumé***

### **Qualité des eaux de surface de la zone de Niamey : caractérisation physico-chimique, dynamique spatio-temporelle des concentrations en matières en suspension (MES) et en bactéries d'origine fécale (*E. coli*)**

Au Sahel les eaux de surface constituent une ressource précieuse pour les populations qui y ont recours pour des usages multiples et le suivi de leur qualité est un enjeu crucial. L'objectif de cette thèse est d'améliorer la connaissance de la dynamique spatio-temporelle des concentrations en matières en suspension (MES) et en bactéries d'origine fécale des eaux de surface dans la zone de Niamey. Trois années de mesures de MES, teneur en *E. coli* et paramètres physico-chimiques ont été effectuées dans le fleuve Niger et les lacs à proximité de Niamey. Elles ont permis de montrer l'efficacité des mesures radiométriques pour le suivi spatio-temporel de MES et de quantifier l'apport des affluents de la rive droite pendant la saison de pluie. La contamination fécale s'est avérée significative pendant toute l'année avec des pics plus importants au début de la saison des pluies qui précèdent les pics de MES et de débit. La pollution microbiologique est exacerbée par le milieu urbain avec des valeurs d'*E. Coli* en moyenne 16 fois plus importantes en aval de la ville.

**Mots clés :** *Sahel, fleuve Niger moyen, microbiologie, hydrologie, télédétection Escherichia coli, matières en suspension, Sentinel-2.*

### **Surface water quality in Niamey area: physico-chemical characterization, suspended particulate matter (SPM) and bacteria of fecal origin (*E. coli*) spatio-temporal dynamics**

Surface waters in the Sahel are a precious resource for the populations who use it for multiple purposes. Monitoring their quality is therefore crucial. The objective of this thesis is to improve knowledge on the spatio-temporal dynamics of suspended particulate matter (SPM) and fecal bacteria concentration in surface waters in the Niamey area. Measurements of SPM, *E. coli* and physico-chemical parameters were carried out over a three-year period in the Niger River and in lakes near Niamey. Radiometric measurements have proved effective to monitor the SPM spatio-temporal dynamics and highlighted the significant SPM contribution from the right bank tributaries during the rainy season. Fecal contamination was found to be significant throughout the year with higher peaks at the beginning of the rainy season, preceding SPM and discharge peaks. The microbiological pollution is exacerbated by the urban context with values on average 16 times higher downstream of the city than upstream.

**Keywords:** *Sahel, Middle Niger River, microbiology, hydrology, remote sensing, Escherichia coli., suspended particulate matter, Sentinel-2.*

**Discipline :** Géologie / Surfaces et interfaces continentales, Hydrologie.

**Universités :** Abdou Moumouni de Niamey / Toulouse III Paul Sabatier

**Laboratoires :** Laboratoire de Géologie / Géosciences Environnement Toulouse (GET) – UMR 5563