

Avenir du fleuve Niger

R
A
P
P
O
R
T

F
I
N
A
L



Mars 2019

IRD, UMR HSM et UMR G-EAU

Table des matières

1. Exorde	13
1.1. Contexte	13
1.2. Objectifs	14
1.3. Remarques et portée de l'étude	15
1.4. Plan du rapport.....	15
2. Description du bassin du fleuve Niger	17
2.1. Caractéristiques des bassins versants du Niger Supérieur et du Bani et de leurs sous-bassins versants.....	17
2.1.1. Localisation et relief de la région du Niger Supérieur et du Bani	17
2.1.2. Les bassins versants du Niger Supérieur et du Bani et leurs principaux sous bassins versants	20
2.2. Caractéristiques du Delta Intérieur du Niger	39
2.2.1. Le réseau hydrographique	41
2.2.2. Le régime climatique.....	43
2.2.3. Le fonctionnement hydrologique	44
2.2.4. Milieu humain et activités	48
2.2.5. Dynamique spatio-temporelle et activités	50
2.3. Caractéristiques du Niger Moyen.....	51
2.4. Remarques et conclusions.....	52
3. Que sait-on aujourd'hui du contexte hydroclimatique?.....	53
3.1. Mécanismes et forçages de la variabilité hydroclimatique du bassin du Niger.....	54
3.2. Variabilité climatique	56
3.2.1. La pluviométrie	57
3.2.2. Les températures	66
3.2.3. L'évapotranspiration potentielle	71
3.2.4. Synthèse.....	71
3.3. Variabilité hydrologique	73
3.3.1. Une différence fondamentale entre domaine sahélien et domaine soudanien	73
3.3.2. Les étiages.....	73
3.3.3. Les crues.....	77
3.3.4. Le Delta Intérieur du Niger	79

3.3.5.	Éléments pour un outil de gestion opérationnelle du Delta Intérieur du Niger.....	80
3.4.	Evolutions futures	85
3.5.	Cas d'une étude exploratoire : vulnérabilité des ressources en eau superficielle du bassin du Bani aux évolutions anthropiques et climatiques.....	90
3.5.1.	Un constat : une pression démographique de plus en plus importante... ..	91
3.5.2.	... qui impacte sur l'évolution des cultures	93
3.5.3.	Une tentative de modélisation de ces évolutions	94
3.5.4.	Essais de prospectives.....	97
3.5.5.	Conclusions de cette étude exploratoire	103
3.6.	Remarques et conclusions.....	103
4.	Que sait-on aujourd'hui des usages de l'eau et de leurs impacts ?.....	106
4.1.	Les grands systèmes irrigués sur le fleuve Niger et ses affluents	110
4.1.1.	Les Offices et les grands périmètres irrigués	111
4.1.2.	Etat des lieux des surfaces aménagées et exploitées dans les grands systèmes irrigués et problématique de gestion de l'eau.....	112
4.1.3.	Questions transversales et enjeux de développement de la « grande hydraulique »	118
4.2.	Agriculture irriguée dans le Delta Intérieur du Niger et la zone lacustre	119
4.2.1.	Le Delta Intérieur du Niger	120
4.2.2.	La zone lacustre	120
4.3.	L'irrigation de proximité	122
4.4.	La petite irrigation	123
4.4.1.	Les petits aménagements hydrauliques	123
4.4.2.	Motopompage en rivière	124
4.5.	Les autres usages et impacts.....	125
4.5.1.	Pêche collective sur le cours supérieur du Niger	125
4.5.2.	Mares et pêches traditionnelles	127
4.5.3.	Alimentation en eau domestique et pollution.....	130
4.5.4.	Extraction de sable et de gravier	131
4.6.	Éléments de prospective : évolution des usages et de la disponibilité de l'eau.....	134
4.6.1.	Une demande croissante de surfaces aménagées	135
4.6.2.	Les aménagements hydro-agricoles existants sur le Haut et Moyen Niger	137

4.6.3.	Les aménagements hydro-agricoles prévus dans le Niger Supérieur.....	141
4.6.4.	Influences cumulées des changements anthropiques (et climatiques) sur le Nexus eau-énergie-alimentation-écosystèmes.....	145
5.	À quelles évolutions est confronté le cadre institutionnel et juridique de gestion de l'activité liée au Fleuve Niger ?	156
5.1.	Bref rappel de l'histoire institutionnelle et juridique du secteur de l'eau au Mali.....	156
5.2.	Acteurs institutionnels de la gestion de l'eau au Mali	158
5.2.1.	Les acteurs institutionnels principaux	158
5.2.2.	Les organisations autonomes de gestion et d'exploitation	159
5.2.3.	Les organisations de coordination et de consultation.....	160
5.2.4.	Les institutions internationales liées au fleuve Niger	161
5.2.5.	Les acteurs non étatiques	161
5.3.	Cadre juridique actuel du secteur de l'eau au Mali	161
5.4.	Multiplicité des acteurs et insuffisance de coordination	162
6.	Synthèse, propositions et recommandations	164
6.1.	Synthèse	164
6.1.1.	Connaissances scientifiques et cadre institutionnel.....	164
6.1.2.	Rappel des recommandations de l'expertise 2007 et constat 10 ans après	167
6.2.	Propositions et recommandations pour les années à venir.....	170
6.2.1.	Besoins et thématiques de recherche	170
6.2.2.	Recommandations générales pour la gestion du fleuve au Mali.....	173
7.	Bibliographie	175
8.	Annexes.....	189
8.1.	Annexe 1 : Cahier des charges	190
8.2.	Annexe 2 : Composition du collège d'experts.....	191
8.3.	Annexe 3 : Tableau synoptique des projets et programmes en cours qui concernent le bassin versant du fleuve Niger (décembre 2018)	192

Table des cartes

Carte 1: Bassin versant du Niger depuis la dorsale guinéenne jusqu'à son delta maritime nigérian.....	16
Carte 2: Localisation et relief de la région du Niger Supérieur et du Bani.....	18
Carte 3: Bassins versants et principaux sous-bassins du Niger Supérieur et du Bani (bassin versant > 4 000 km ²)	19
Carte 4 : Géologie des bassins versants du Niger Supérieur et du Bani	26
Carte 5 : Précipitations moyennes annuelles sur les bassins versants du Niger Supérieur et du Bani (période 1951-1989)	28
Carte 6 : Densités de population sur les bassins versants du Niger Supérieur et du Bani en 2018 (estimations)	32
Carte 7 : Occupation des terres en Guinée en 2013 (in Alfari <i>et al.</i> , 2016)	35
Carte 8 : Occupation des terres au Mali en 2013 (in Alfari <i>et al.</i> , 2016).....	36

Table des tableaux

Tableau 1 : Valeurs extrêmes de quelques caractéristiques morphologiques des 38 bassins versants sélectionnés	20
Tableau 2 : Superficies relatives et pentes moyennes de quelques classes d'altitude des bassins versants du Niger Supérieur et du Bani	20
Tableau 3 : Caractéristiques des bassins versants du Niger Supérieur et du Bani de leurs principaux sous-bassins (bassin versant > 4 000 km ²)	22
Tableau 4 : Répartition des pays par bassin versant.....	23
Tableau 5 : Estimation de la répartition des terrains géologiques par bassin versant.....	27
Tableau 6 : Précipitations moyennes annuelles (1951-1989) par bassin versant	29
Tableau 7 : Estimation de la population et de la densité de population par bassin versant en 2018.....	30
Tableau 8 : Répartition des classes d'occupation des sols par bassin versant en 2000 (d'après carte de Ruelland <i>et al.</i> , 2008).....	34
Tableau 9 : Principaux mécanismes impliqués dans les téléconnexions entre la Méditerranée (MED), l'Atlantique (ATL) et le Pacifique (PAC) et les précipitations en Afrique de l'Ouest (d'après Rodriguez <i>et al.</i> (2011) cité par Fontaine <i>et al.</i> (2012))	54
Tableau 10 : Coordonnées et localisation des stations de mesure	58
Tableau 11 : Liste de quelques indices pluviométriques étudiés	58
Tableau 12 : Quelques résultats d'analyse des séries chronologiques d'indices liés à la pluie sur les périodes 1950-2000, 1961-1990 et 1971-2000 – niveau de signification : 90%.....	60
Tableau 13 : Diminution moyenne de la pluviométrie annuelle par décennie à l'échelle du Mali	60
Tableau 14 : Evolution décennale des dates moyennes de début et de fin des saisons des pluies à l'échelle du Mali.....	62
Tableau 15 : Liste de quelques indices de température étudiés	67
Tableau 16 : Quelques résultats d'analyse des séries chronologiques d'indices liés à la température sur les périodes 1950-2000, 1961-1990 et 1971-2000 – Test de corrélation sur le rang (niveau de signification : 90%)	67
Tableau 17 : Augmentation décennale des extrêmes de température sur la période 1950-2000	70
Tableau 18 : Déficit d'écoulement après la sécheresse de 1970 (in Mahé <i>et al.</i> , 2011b)	79
Tableau 19 : Principales caractéristiques des superficies inondées dans le Delta Intérieur du Niger d'après différents travaux.....	80
Tableau 20 : Estimation de la population du bassin du Bani à Douna à partir des RGPH du Mali et de la Côte d'Ivoire.....	91
Tableau 21 : Ressources en eau globales (Ministère des Mines, de l'énergie et de l'eau, 2006)	106
Tableau 22 : Superficies irriguées (Direction Nationale du Génie Rural, 2017).....	109
Tableau 23 : Superficies irriguées par rapport au potentiel irrigable pour six pays de la sous-région	110
Tableau 24 : Superficies irriguées dans les grands systèmes irrigués au Mali.....	112
Tableau 25 : Besoin en eau des cultures à l'Office du Niger (BRLI et BETICO, 2014)	115
Tableau 26 : Réalisations en irrigation de proximité par région (période 2012-2017).....	122
Tableau 27 : Caractéristiques des barrages principaux sur le bassin du Niger.....	138
Tableau 28 : Principales caractéristiques des barrages de Fomi, Taoussa et Kandadji (in ABN et BRLI, 2007).....	142
Tableau 29 : Caractéristiques des quatre options en discussion pour le barrage de Fomi-Moussako (ONISDIN d'après AECOM, 2017).....	143
Tableau 30 : Textes et lois de référence du secteur de l'eau au Mali	157
Tableau 31 : Synthèse des recommandations de l'expertise 2007 et constat 10 ans après	169

Table des figures

Figure 1 : Hypsométrie, altitudes et pentes moyennes du bassin versant du Bani.....	24
Figure 2 : Hypsométrie, altitudes et pentes moyennes du bassin versant du Niger Supérieur	24
Figure 3 : Classe d'occupation des sols sur le bassin versant du Niger Supérieur en 2000 (d'après Ruelland <i>et al.</i> , 2008)	33
Figure 4 : Carte topographique du réservoir de Sélingué (in Ferry <i>et al.</i> , 2018)	37
Figure 5 : Retenue de Sélingué - diachronique de profils transversaux (à gauche) - Courbes altitude/surface et altitude/volume (à droite) (in Ferry <i>et al.</i> , 2018)	38
Figure 6 : Le réseau hydrographique du Delta Intérieur du Niger (in Mariko, 2004)	41
Figure 7 : Isohyètes moyennes (depuis l'ouverture des stations jusqu'en 1991) du Niger Supérieur et du Delta Intérieur du Niger (in Bouaré, 2012).....	43
Figure 8 : Schéma du fonctionnement hydrologique du Delta Intérieur du Niger (in Zaré, 2015).....	46
Figure 9 : Schéma du système d'alimentation des lacs périphériques du Delta Intérieur du Niger (in Zaré, 2015)	47
Figure 10 : Répartition schématique des végétaux dans une plaine inondée lors de la crue (in Zaré, 2015).....	49
Figure 11 : Cycle hydrologique et activités dans le Delta Intérieur du Niger (in Zaré, 2015)	51
Figure 12 : Evolution de l'indice standardisé des précipitations (ISP) sur l'ensemble du bassin du Niger à Niamey de 1900 à 2012 (in Descroix <i>et al.</i> , 2013a)	57
Figure 13 : Evolution de la pluviométrie moyenne annuelle (mm) au Mali sur la période 1950-2000.....	61
Figure 14 : Evolution du nombre annuel de jours de pluie au Mali : > 10 mm (à gauche) et > 20 mm (à droite).....	61
Figure 15 : Indices centrés réduits pour quelques indices liés à la pluie sur le bassin du Bani sur la période 1950-2005 (* signifie que l'indice moyen ne prend pas en compte quelques postes qui ont trop de lacunes sur cette période).....	63
Figure 16 : Indices centrés réduits pour la date moyenne de fin des saisons des pluies sur le bassin du Bani sur la période 1950-2005.....	63
Figure 17 : Indices centrés réduits pour la longueur des séquences sèches au sein de la saison des pluies sur le bassin du Bani sur la période 1950-2005.....	63
Figure 18 : Evolution de 1951 à 2013 de l'indice standardisé des précipitations (ISP) et de sa moyenne mobile sur 5 ans pour la Sénégalie et le bassin du Niger Moyen (in Descroix <i>et al.</i> , 2015)	64
Figure 19 : Evolution de la pluviométrie annuelle moyenne en Sénégalie et dans le bassin du Niger Moyen de 1951 à 2013 (in Descroix <i>et al.</i> , 2015).....	65
Figure 20 : Nombre d'événements par décennie et par classe de cumul précipité par événement sur le bassin du Niger Moyen (in Descroix <i>et al.</i> , 2013b)	66
Figure 21 : Nombre de mm de pluie par an et par catégorie sur le bassin du Niger Moyen (in Descroix <i>et al.</i> , 2013b)	66
Figure 22 : Evolution de la température maximale journalière moyenne annuelle (°C) au Mali sur la période 1950-2000.....	68
Figure 23 : Evolution de la température minimale journalière moyenne annuelle (°C) au Mali sur la période 1950-2000	69
Figure 24 : Histogrammes de fréquence des dates de rupture détectées sur les séries annuelles d'indicateurs de pluie et de température sur le bassin du Bani (test de Pettitt à 90%).....	72
Figure 25 : Bani à Douna - Evolution du coefficient de tarissement (trait fin) et des écoulements du mois de janvier (trait plein) (in Mahé, 2009)	75
Figure 26 : Bani à Douna – Evolution du débit de base (écoulement souterrain) et part de l'écoulement souterrain et de surface dans l'écoulement total (in Mahé <i>et al.</i> , 2013)	75
Figure 27 : Evolution des coefficients de tarissement sur des affluents du Haut-Niger.....	76
Figure 28 : Niger à Koulikoro – Evolution des modules annuels.....	76
Figure 29 : Bani à Douna – Décomposition-type de l'écoulement total entre écoulement de surface et souterrain (in Mahé, 2009).....	77

Figure 30 : Gorouol, Sirba et Dargol - coefficients d'écoulement de trois affluents de rive droite du fleuve Niger provenant du Burkina Faso et du Mali (In Descroix <i>et al.</i> , 2015)	78
Figure 31 : Dates de passage des maxima de crue en amont et à l'entrée du Delta Intérieur du Niger en fonction des années et des périodes sèches ou humides.....	81
Figure 32 : Relation hauteur d'eau à Mopti et surfaces inondées (in Mariko <i>et al.</i> , 2013).....	82
Figure 33 : Evolution probable des surfaces inondées depuis le début des observations à Mopti - Comparaison sur la période 1990-2000 des estimations de surfaces inondées à partir d'images Landsat ou à partir de la Relation hauteur d'eau et surfaces inondées à Mopti (in Mariko <i>et al.</i> , 2013).....	83
Figure 34 : Hydrogrammes de crue du fleuve Niger en entrée et sortie du Delta Interieur du Niger en annee sèche (à gauche) et en annee humide (à droite) (In Zaré, 2015)	84
Figure 35 : Cartes des moyennes multimodèles CMIP5 pour les scénarios RCP 2.6 et RCP 8.5 sur la période 2081–2100 (in GIEC, 2007).....	86
Figure 36 : Cascade d'incertitudes tout le long de la scénarisation climatique et hydrologique (in Wilby, 2010)	88
Figure 37 : Calculs d'indices climatiques caractérisant la durée moyenne des épisodes secs sur le bassin du Bani	90
Figure 38 : Densité de population du bassin du Bani à Sofara par unités administratives (RGPH 1976, 1987-1988 et 1998).....	92
Figure 39 : Cartographie de l'occupation du sol sur le bassin du Bani vers 1970, 1985 et 2000 à partir de traitements d'images haute-résolution (in Ruelland <i>et al.</i> (2010, 2011) et IER Bamako (2011)).....	93
Figure 40 : Résultats de modélisation d'évolution des surfaces cultivées pour 3 dates (1960, 1980 et 2000) et selon 3 sources de données : télédétection, statistiques agricoles et capacité de travail.....	96
Figure 41 : Résultats de modélisation d'évolution des surfaces cultivées à l'horizon 2040 selon 3 sources de données : télédétection, statistiques agricoles et capacité de travail	98
Figure 42 : Carte du potentiel productif des terres du bassin du Bani (partie malienne) selon le PIRT	101
Figure 43 : Carte d' « arabilité » des terres du bassin du Bani (partie malienne) selon le PIRT	101
Figure 44 : Bassin du Bani - carte d'implantation des bas-fonds et des marchés	102
Figure 45 : Prélèvements en eau par secteurs dans le bassin du Niger au Mali, au Niger et au Nigéria en 2005 (in Clanet et Ogilvie, 2014).....	106
Figure 46: Surfaces irriguées par pays en maitrise total et autres systèmes (in Clanet et Ogilvie, 2014).....	108
Figure 47 : Typologie des modes de mise en valeur agricole des plaines alluviales du Niger Supérieur entre Baro et Ségou (in Renard-Toumi, 2013).....	112
Figure 48 : Superficies des systèmes rizicoles irrigués dans le Delta Intérieur du Niger (in Clanet et Ogilvie (2014) d'après Barbier <i>et al.</i> (2009)).....	114
Figure 49 : Evolution des rendiments rizicoles du Mali, Niger, Nigéria et de l'Office du Niger entre 1961 et 2007 (Clanet et Ogilvie (2014) d'après Barbier <i>et al.</i> (2009)).	114
Figure 50 : Destination des prélèvements en eau dans l'Office du Niger (in Clanet et Ogilvie, 2014)	116
Figure 51 : Nombre d'aménagements recensés sur le bassin versant du Bani en amont de Douana de 1970 à 2008	123
Figure 52 : Localisation des petits aménagements hydrauliques sur le bassin versant du Bani en amont de Douana	123
Figure 53 : Localisation des motopompes dans la vallée de la Sankarani en aval du barrage de Sélingué (in Ferry <i>et al.</i> , 2012)	124
Figure 54 : Organisation des pêches collectives des villages de Gassala-Couro et de Dombala sur le Fié et le Niger Supérieur (in De la Croix <i>et al.</i> , 2014).....	126
Figure 55 : Plaine alluviale et mares de la plaine de Bankon (in Renard-Toumi, 2013)	127
Figure 56 : La mare de Bolé et la mise en valeur agricole de la plaine de Baro	128
Figure 57 : Relation entre la quantité de poissons pêchée et commercialisée à Mopti et l'amplitude de la crue (in Clanet et Ogilvie (2015) d'après Morand <i>et al.</i> (2009)) ...	129
Figure 58 : Pourcentages de personnes utilisant des points d'eau non améliorés	130
Figure 59 : Profils en travers du Niger à Kéniéroba, Samaya et Koulikoro en 1982 et 2009-2010.....	131
Figure 60 : Principaux sites d'extraction et de ports sabliers entre Kangaba et Koulikoro en 2010	132

Figure 61 : Exemple de déplacement du chenal principal du fleuve Niger	133
Figure 62 : Indice de ressources en eau renouvelables réelles totales (TARWR)	134
Figure 63 : Indice de pauvreté en eau (WPI).....	134
Figure 64 : Localisation des principaux barrages dans le bassin du fleuve Niger (in Clanet et Ogilvie, 2014)	137
Figure 65 : Barrages construits ou en projet sur les bassins versants Niger Supérieur et du Bani.....	140
Figure 66 : Augmentation des prélèvements en eau dans le bassin du fleuve Niger selon les besoins du PADD	141
Figure 67 : Augmentation des prélèvements pour l'irrigation selon les besoins du PADD à l'échelle nationale.....	141
Figure 68 : Augmentation des prélèvements pour l'irrigation dans le bassin du Niger entre 2005 et 2025 selon les prévisions du PADD (in Clanet et Ogilvie 2014)	145
Figure 69 : Evolution de la population du bassin du Niger d'ici 2050 selon 4 scénarios de croissance démographique.....	146
Figure 70 : Indice de ressources en eau renouvelables réelles totales (TARWR) par habitant par an et par pays 2000-2050 selon scénario médian de croissance démographique (in Clanet et Ogilvie, 2014).....	147
Figure 71 : Débits moyens mensuels de janvier à juin observés à la station hydrométrique de Koulikoro sur le Niger	148
Figure 72 : Simulation sur la période 1965-1990 de la baisse de la superficie maximale inondée avec le développement de Fomi, Dlaraguéla, Taoussa et Kandadji	151
Figure 73 : Résultats de simulations de l'impact du changement climatique sur le Nexus Eau-énergie-alimentation-environnement dans le Bassin du fleuve Niger (in Grijssen <i>et al.</i> , 2013)	153
Figure 74 : Résultats de simulations de l'impact du changement climatique et des barrages FO-TA-KD sur le Nexus Eau-énergie-alimentation-environnement dans le fleuve Niger (in Grijssen <i>et al.</i> , 2013)	154

Table des sigles et acronymes

ABFN : Agence du Bassin du Fleuve Niger (<http://www.abfn-mali.org/>)

ABN/NBA : Autorité du Bassin du Niger / Niger Basin Authority (<http://www.abn.ne/>)

ACDI : Agence Canadienne de Développement International (<http://acdi-canada-direction.e-monsite.com/>)

AFD : Agence Française de Développement (<https://www.afd.fr/fr>)

AHA : Aménagement Hydro-Agricole

AMMA : Analyse des Mécanismes de la Mousson Africaine

ANR : l'Agence Nationale de la Recherche (<http://www.agence-nationale-recherche.fr/>)

AVHRR : Advanced Very High Resolution Radiometer (<https://noaasis.noaa.gov/NOAASIS/ml/avhrr.html>)

BAD : Banque Africaine de Développement (<https://www.afdb.org/fr/>)

BRLi : BRL Ingénierie (<https://brli.brl.fr/>)

CCRE : Centre de Coordination des Ressources en Eau

CEDEAO : Communauté Economique des Etats de l'Afrique de l'Ouest

CIEH : Comité Inter-états d'Etudes Hydrauliques (aujourd'hui disparu)

CILSS : Comité permanent Inter-états de Lutte contre la Sécheresse dans le Sahel (<http://www.cilss.int/>)

CMDT : Compagnie Malienne pour le Développement des Textiles (<https://www.cmdt-mali.net/>)

CMIP5 : Coupled Model Intercomparison Project Phase 5

CRU : Climatic Research Unit (<http://www.cru.uea.ac.uk/>)

DIN : Delta Intérieur du fleuve Niger

DNGR : Direction Nationale du Génie Rural

DNH : Direction Nationale de l'Hydraulique

DNHE : Direction Nationale de l'Hydraulique et de l'Énergie

EDI : Effective Drought Index

ENSO : El Nino Southern Oscillation

EPIC : Établissement public à caractère industriel et commercial

ETM+ : Enhanced Thematic Mapper Plus

ETP : EvapoTranspiration Potentielle

FAD : Fonds Africain de Développement

FAO : Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture / Food and Agriculture Organization of the United Nations (<http://www.fao.org/home/fr/>)

FED : Fonds Européen de Développement

FIDA / IFAD : Fonds International de Développement Agricole / Internationa Fund for Agricultural Development (<https://www.ifad.org/fr/>)

MCG / GCM : Modèle de Circulation Générale / General Circulation Model

G-EAU : UMR Gestion de l'Eau, Acteurs, Usages (<https://g-eau.fr/index.php/fr/>)

GIEC / IPCC : Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat / Intergovernmental Panel on Climate Change (<https://www.ipcc.ch/>)

GIZ : Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (agence de coopération internationale allemande pour le développement - <https://www.giz.de/de/html/index.html>)

HAPEX-Sahel : Hydrological and Atmospheric Pilot Experiment in the Sahel

HSM : UMR HydroSciences Montpellier (<http://www.hydrosiences.org/>)

ICCARE : Identification et Conséquences d'une variabilité du Climat en AfRIque de l'Ouest non Sahélienne

IER : Institut malien d'Economie Rurale

IGN : Institut National de l'information géographique et forestière (<http://www.ign.fr/>)

INS : Institut National de la Statistique (Guinée - <http://www.stat-guinee.org/index.php/institut-national-statistique/mission#>)

INSD : Institut National de la Statistique et de la Démographie (Burkina Faso - <http://www.insd.bf/n/>)

INSTAT : Institut National de la Statistique (Mali - <http://www.instat-mali.org/>)

IRD : Institut de Recherche pour le Développement

kfW : Kreditanstalt für Wiederaufbau (institution de droit public allemande - <https://www.kfw.de/kfw.de-2.html>)

LuxDev : agence luxembourgeoise pour la Coopération au développement (<https://luxdev.lu/fr>)

MNT : Modèle Numérique de Terrain

MSS : Multi-Spectral Scanner

NASA : National Aeronautics and Space Administration (<https://www.nasa.gov/>)

NDVI : normalized difference vegetation index (Index de vegetation par difference normalisée)

NOAA : National Oceanic and Atmospheric Administration (<https://www.noaa.gov/>)

ODD : Objectifs du Développement Durable (<https://www.un.org/sustainabledevelopment/fr/objectifs-de-developpement-durable/>)

ODRS : Office de Développement Rural de Sélingué

OHVN : Office de la Haute Vallée du Niger

OMB : Office du Moyen Bani

OMVS : Organisation pour la mise en valeur du fleuve Sénégal (<http://www.omvs.org/>)

ON : Office du Niger (<http://www.on-mali.org/on/>)

ONG : Organisation Non Gouvernementale

ONISDIN : Observatoire du bassin supérieur et du Delta Intérieur du Niger (https://onisdin.info/fr/acceuil?set_language=fr)

OP : Organisations Paysannes

OPIB : Office du périmètre irrigué de Baguinéda

ORM : Office Riz de Mopti

ORS : Office Riz de Ségou

ORSTOM : Office de la recherche scientifique et technique outre-mer (aujourd'hui IRD)

PADD : Plan d'Action de Développement Durable du bassin du Niger

PADR-DHK : Projet d'Appui au Développement Durable de Daye, Hamadja et Korioumé

PADR-TKT : Projet d'Appui au Développement Rural de Tien Konou et Tamani

PAPAM : Projet d'Accroissement de la Productivité Agricole au Mali

PARIIS : Projet d'Appui Régional à l'Initiative pour l'Irrigation au Sahel

PDI-BS : Programme de Développement de l'Irrigation dans le bassin du Bani et à Sélingué
PIRT : Projet Inventaire des Ressources Terrestres
PIV : Périmètre Irrigué Villageois
PNIP : Programme National d'Irrigation de Proximité
PNUE / UNEP : Programme des Nations Unies pour l'Environnement / United Nations for Environment Program (<http://web.unep.org/fr>)
PPIV : Petit Périmètre irrigué villageois
PRESA-DCI : Projet de Renforcement de la Sécurité Alimentaire par le Développement des Cultures Irriguées
PRESAN-KL : Projet de Renforcement de la Sécurité Alimentaire et Nutritionnelle dans la Région de Koulikoro
PTF : Partenaire Technique et Financier
MRC / RCM : Modèle Régional du Climat / Regional Climate Model
RCP : Representative Concentration Pathway
RESSAC : vulnérabilité des Ressources en Eau Superficielle au Sahel aux évolutions Anthropiques et Climatiques à moyen terme
RGPH : Recensements Généraux de la Population et de l'Habitation au Mali
SIG : Système d'Information Géographique
SIEREM : Système d'Informations Environnementales sur les Ressources en Eau et leur Modélisation (<http://www.hydrosociences.fr/sierem/>)
SPI : Standardized Precipitation Index
SRTM : Shuttle Radar Topography Mission
SWAT : Soil and Water Assessment Tool
TARWR : Total actual renewable water resources (Indice de ressources en eau renouvelables réelles totales)
TM : landsat Thematic Mapper
UE : Union Européenne
UICN / IUCN : Union Internationale pour la Conservation de la Nature / International Union for Conservation of Nature (<https://www.iucn.org/>)
UMR : Unité Mixte de Recherche
PNUD / UNDP : Programme des Nations Unies pour le Développement / United Nations for Development Program (<http://web.unep.org/fr>)
SEI : Stockholm Environment Institute
USAID : Agence des États-Unis pour le développement international (<https://www.usaid.gov/>)
USGS : U.S. Geological Survey (<https://www.usgs.gov/>)
WPI : Water Poverty Index (indice de pauvreté en eau)
WRF : Weather Research and Forecasting model
WWF : World Wildlife Fund (<https://www.worldwildlife.org/>)

1. EXORDE

1.1. Contexte

La gestion durable des ressources en eau (Objectif du Développement Durable n°6 – ODD 6), la lutte contre le changement climatique et ses répercussions (ODD 13) et la préservation des écosystèmes terrestres (ODD 15) comptent parmi les thématiques prioritaires dans les questions environnementales des pays au Sud du Sahara. Sous ces latitudes, les évolutions récentes du climat et leurs impacts sur l'environnement, les ressources en eau et les populations (en constante croissance), sont de nos jours de véritables enjeux pour le développement et la survie des communautés.

Le cas du Mali est un exemple typique de ces problématiques puisque traversé par les fleuves Sénégal et Niger qui constituent « des artères vitales » pour le pays. Ces deux fleuves sont au cœur de ces enjeux et celui du Niger, objet de la présente étude, est emblématique puisqu'il est sujet :

- à de fortes variations saisonnières liées aux facteurs climatiques (précipitations),
- aux impacts des changements climatiques (états de surface¹),
- aux impacts des divers usages (irrigation, hydroélectricité, eau potable, pêche...) et
- à la forte pression démographique (tension et mode de gestion, rejets domestiques et industriels, orpaillage, extraction de sable, qualité, santé...).

En réponse à une demande des gestionnaires publics du fleuve Niger au Mali, une expertise collégiale avait été réalisée en 2007 (Marie *et al.*, 2007) par l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD) et l'Institut malien d'Economie Rurale (IER) avec le soutien du Fonds Européen de Développement (FED), de l'Union Internationale pour la Conservation de la Nature (UICN), de la Coopération Technique Allemande et du Ministère français des Affaires Étrangères. À travers les six questions énoncées ci-dessous cette expertise avait pour objectif principal de déterminer comment garantir un partage équitable des ressources en eau du fleuve vis-à-vis des usagers, respectueux de l'environnement et favorable au développement des responsabilités locales :

- Quelles données, quels paramètres et quels aménagements doivent être pris en compte pour assurer une gestion et un partage des ressources en eau en rapport avec les besoins de l'ensemble des usagers du fleuve Niger au Mali dans une perspective d'équité, d'efficacité et de durabilité ?
- Quelles variables doivent être prises en compte pour une régulation satisfaisante des utilisations de l'eau dans les aménagements hydro-agricoles (AHA) ?
- De quelles connaissances validées dispose-t-on sur le régime du fleuve et sur les processus d'évolution à moyen et long terme de l'environnement ? Et sur quels indicateurs peut-on compter pour suivre ces processus ?
- Peut-on mieux prévenir les risques que les excès du régime du fleuve font porter sur l'intégrité des personnes et des biens ? Et peut-on mettre en place des procédures de gestion d'éventuelles catastrophes ?

¹ Le terme « état de surface », au sens de Casenave et Valentin (1988), désigne toute surface élémentaire, toute association de surfaces élémentaires, toute juxtaposition de surfaces élémentaires, et tout système interdépendant de surfaces élémentaires. La surface élémentaire se définit comme tout ensemble homogène constitué à un instant donné, du couvert végétal, du type de sol et des organisations pédologiques superficielles qui ont subi des transformations sous l'effet des facteurs météorologiques, fauniques ou anthropiques (les croûtes).

- À quelles évolutions est confronté le cadre institutionnel et juridique de gestion de l'activité liée au fleuve ? Peut-on dégager des éléments de diagnostic sur le fonctionnement de ce cadre et sur son adaptation au développement des responsabilités des collectivités locales ?
- Compte tenu, d'une part, des outils et des techniques existants aujourd'hui et d'autre part, de l'analyse des besoins d'information exprimés sur les points précédents, quelles sont les principales caractéristiques des systèmes d'information qui peuvent être mis en place ?

L'expertise de 2007 avait permis de constater que (i) le fleuve était globalement peu aménagé, (ii) des investissements étaient nécessaires afin d'assurer l'approvisionnement en électricité du pays dans un proche avenir et (iii) le fleuve avait perdu une partie de sa biodiversité notamment au niveau du Delta Intérieur du Niger. Les recommandations formulées par les experts sur la base de ces constats concernaient la collecte de données scientifiques, l'évaluation de l'impact de tout nouvel aménagement et les améliorations nécessaires du dispositif institutionnel.

Une décennie après cette première expertise, où en sont les préoccupations initiales des gestionnaires publics du fleuve Niger relatives à garantir un partage équitable entre usagers des ressources en eau du fleuve, respectueux de l'environnement et favorable au développement des responsabilités locales ? Les recommandations formulées par les experts en 2007 ont-elles été suivies d'effet ? Quelles nouvelles connaissances scientifiques, quels nouveaux aménagements de taille conséquente et quelles nouvelles activités anthropiques concernant le fleuve Niger doivent être prises en compte aujourd'hui pour actualiser les résultats de l'expertise de 2007 ?

C'est dans ce contexte que l'Agence Française pour le Développement (AFD) a identifié la nécessité d'actualiser les analyses et recommandations de l'expertise collégiale de 2007 et commandité cette étude à l'IRD.

1.2. Objectifs

Il n'entre pas dans la fonction de l'IRD de dresser pour les pouvoirs publics des « projets d'action » : les choix d'action sont éminemment politiques, ils font appel à d'autres données, extérieures au monde scientifique (Marie *et al.*, 2007). Les auteurs de ce travail entendent, plus modestement, contribuer à rassembler sur un sujet donné les connaissances disponibles dans la littérature spécialisée, à en dégager la portée dans le cas spécifié, à distinguer les conclusions fermes sur lesquelles les scientifiques peuvent se mettre d'accord, à identifier les points encore controversés et à préciser les domaines sur lesquels les travaux disponibles sont insuffisants pour en tirer quelque conclusion pratique que ce soit.

Les principaux objectifs de cette étude sont les suivants :

- faire un état des lieux du fleuve Niger et de son évolution depuis la décennie précédente en termes (i) de nouvelles connaissances scientifiques relatives à son contexte hydroclimatique, (ii) d'impacts liés aux prélèvements et aux aménagements significatifs sur la disponibilité/variabilité de la ressource en eau (iii) et d'impacts liés aux différents usages,
- faire un état des lieux de l'évolution du cadre institutionnel relatif à la gestion intégrée du fleuve,
- alimenter les réflexions des divisions « Eau et Assainissement » et « Agriculture, développement Rural et Biodiversité » de l'AFD dans la définition de leurs futurs interventions sur des projets situés dans la zone du bassin du Niger ou ayant un impact sur celui-ci et
- fournir quelques éléments pouvant éclairer les choix des décideurs maliens dans le cadre d'interventions importantes ou mobilisant le fleuve Niger.

1.3. Remarques et portée de l'étude

La sécurisation alimentaire et de la population au Mali passe par une maîtrise de l'eau et une bonne connaissance des régimes hydrologiques des cours d'eau qui drainent le pays : valeurs moyennes, valeurs extrêmes, répartition dans le temps et dans l'espace de la ressource. C'est pourquoi le fleuve Niger est au centre des préoccupations de l'administration malienne. L'expertise réalisée en 2007 avait donc mobilisé un collège fortement interdisciplinaire d'une douzaine d'experts autour de la question de « l'Avenir du Fleuve Niger » au Mali. Elle s'était basée pour partie sur des données bien antérieures à l'année de son édition.

Cette étude est le fruit d'un collectif centré sur l'eau et principalement sur ses dimensions ressources et usages agricoles (annexe 8.2). Ainsi, par rapport à l'expertise de 2007, des compléments dans le domaine des régimes d'écoulement et des différents usages hydroagricoles sont apportés, alors que d'autres aspects sont abordés de façon plus superficielle. Elle porte sur le fleuve Niger dans sa partie malienne, en particulier, le Niger Supérieur et le Bani, son principal affluent ; plus ponctuellement, certains développements concernent le Delta Intérieur du Niger (DIN) et la partie malienne du Niger Moyen. Compte tenu du temps et des moyens impartis à cette étude, les informations présentées ici ne sont évidemment pas exhaustives. Certaines de ces informations, inédites, ont été élaborées pour les besoins de l'étude alors que d'autres sont extraites d'articles scientifiques, d'ouvrages de synthèse et de rapports d'étude, parfois relativement anciens.

Cette étude concerne non seulement le fleuve lui-même dans les limites citées ci-dessus mais également le socio-écosystème que constituent le fleuve et son bassin. Elle s'efforce, à travers une méthodologie appropriée et des éléments pertinents relatifs aux évolutions récentes du contexte du fleuve (impacts accrus des changements climatiques, augmentation des prélèvements, nouveaux grands aménagements), d'apporter un éclairage sur les réalités actuelles du fleuve et de son avenir à court et moyen termes.

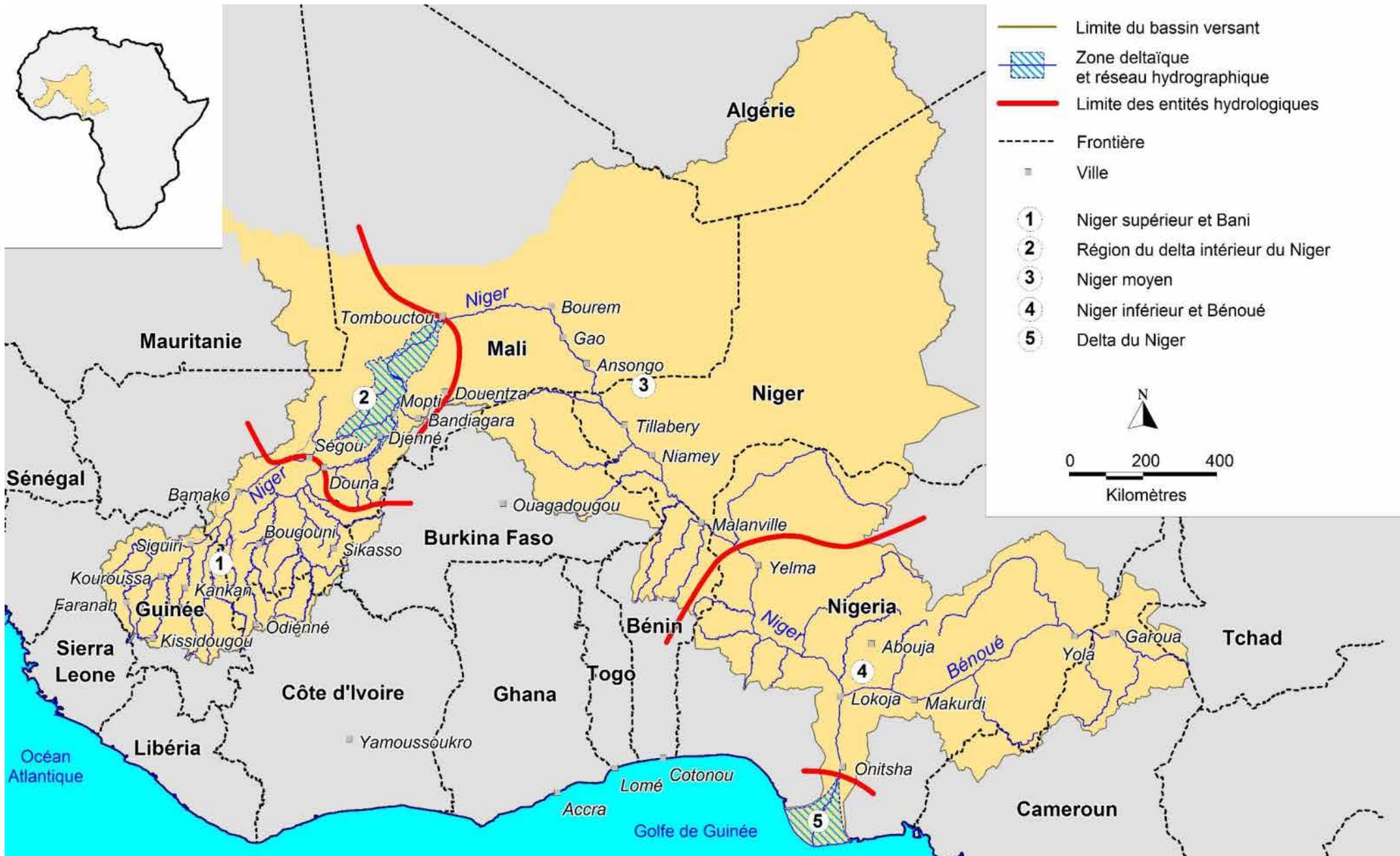
1.4. Plan du rapport

Après une description du bassin du fleuve Niger, nous tenterons de répondre à un certain nombre d'interrogations :

- Que sait-on aujourd'hui du contexte hydroclimatique passé et à venir du bassin du fleuve Niger ?
- Que sait-on aujourd'hui des usages de l'eau et de leurs impacts ?
- À quelles évolutions est confronté le cadre institutionnel et juridique de gestion de l'activité liée au fleuve Niger ?

C'est à travers ces trois questions que sera traitée l'actualisation de l'expertise collégiale de 2007 sur « l'Avenir du fleuve Niger ».

Nous terminerons par une synthèse des chapitres précédents et des propositions et recommandations afin de déterminer comment garantir un partage équitable entre usagers des ressources en eau du fleuve, respectueux de l'environnement et favorable au développement des responsabilités locales.



CARTE 1: BASSIN VERSANT DU NIGER DEPUIS LA DORSALE GUINEENNE JUSQU'À SON DELTA MARITIME NIGERIAN

2. DESCRIPTION DU BASSIN DU FLEUVE NIGER

Le bassin versant du fleuve Niger peut être divisé en cinq entités (Carte 1):

- le Niger Supérieur (en amont de la confluence avec le Bani),
- la région du Delta Intérieur du Niger,
- le Niger Moyen malo-nigérien et bénino-nigérien avec ses affluents de rive droite, et spécifiquement nigérien avec ses affluents de rive gauche,
- le Niger Inférieur et le bassin de la Bénoué et
- le Delta maritime du Niger.

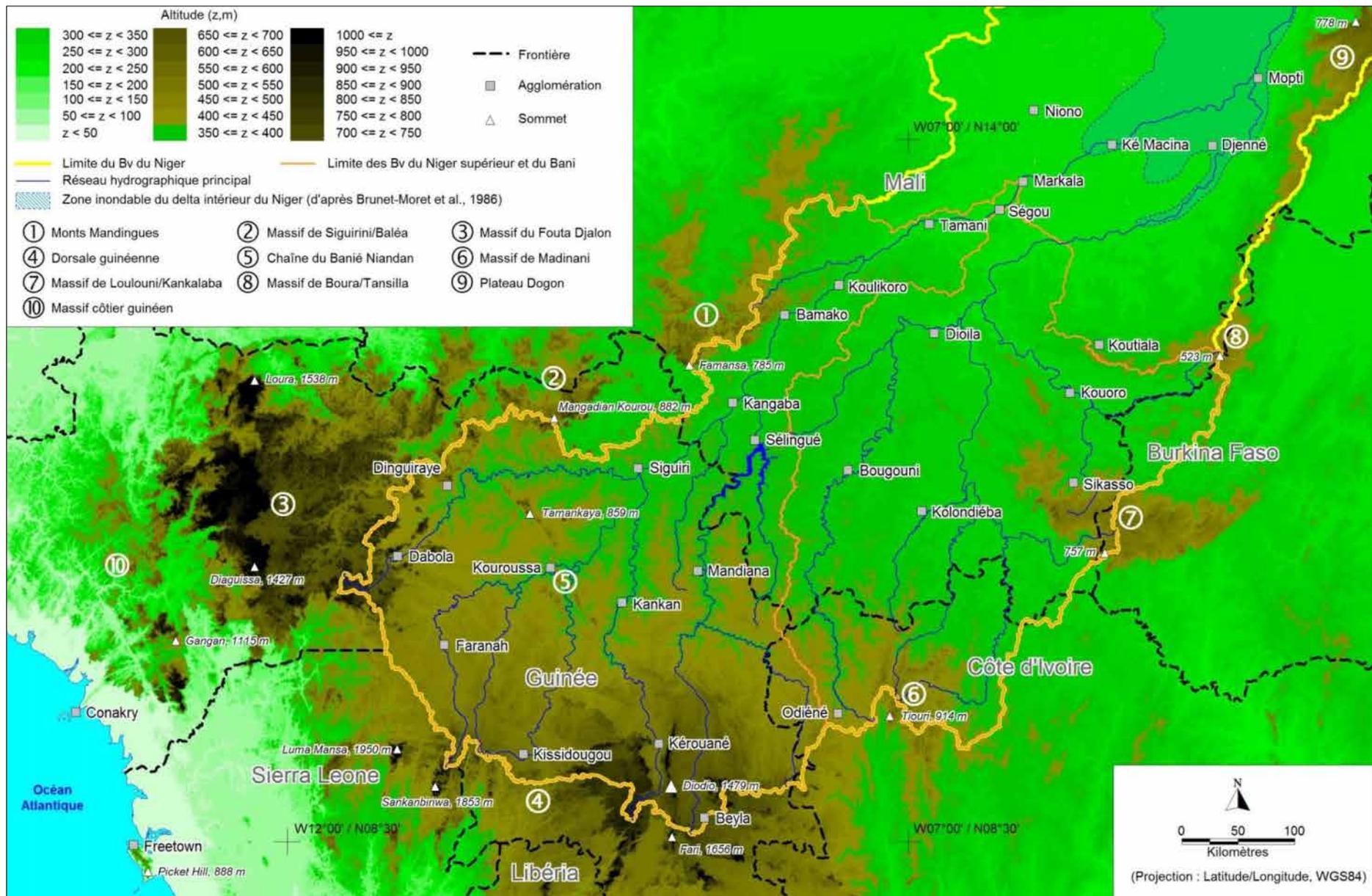
Au Mali, seuls sont concernées les trois premières entités.

2.1. Caractéristiques des bassins versants du Niger Supérieur et du Bani et de leurs sous-bassins versants

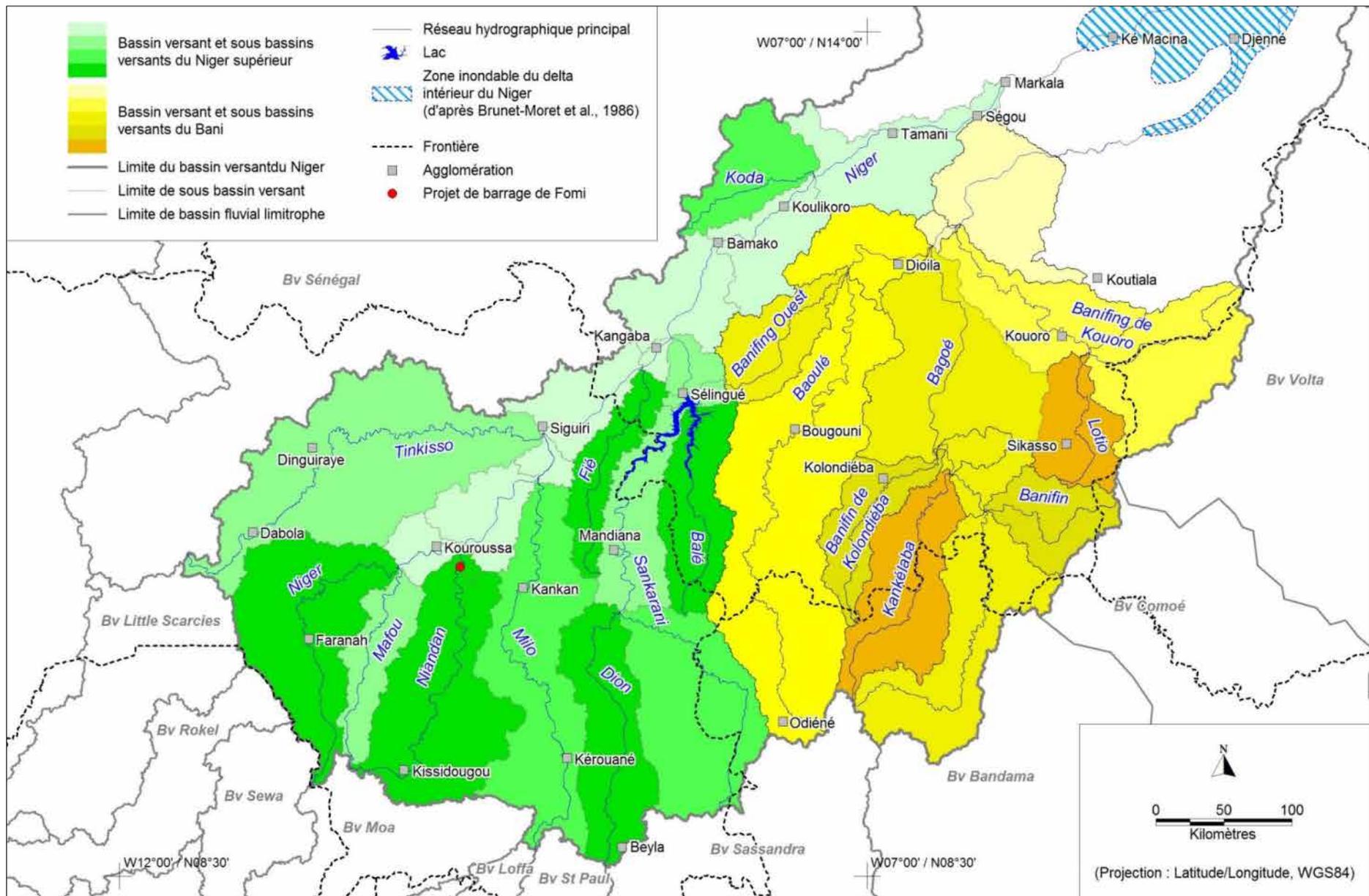
2.1.1. Localisation et relief de la région du Niger Supérieur et du Bani

Le bassin versant du fleuve Niger en amont de la région du DIN est occupé par deux grands bassins versants : le bassin versant du Niger Supérieur et celui du Bani. Ces deux bassins versants d'une superficie totale d'environ 234 000 km² ont une importance majeure sur le fonctionnement hydrologique du DIN et, en aval, sur celui du fleuve Niger au moins jusqu'aux environs de Niamey.

- La limite amont du bassin versant du Niger Supérieur se situe à moins de 250 km de l'océan Atlantique et sa limite aval peut être considérée comme située à Markala (Carte 2). En aval de Markala, le fleuve Niger entre dans la région du DIN. Le bassin versant a une superficie d'environ 131 000 km² et s'étend principalement sur la Guinée (73%), le Mali (24%) et la Côte d'Ivoire (3%). La limite sud-ouest du bassin versant marque en partie la frontière entre la Guinée et la Sierra Leone. Moins de 1% du bassin versant se situerait en Sierra Leone. Le bassin versant est bordé par quatre massifs montagneux (Aurouet et *al.*, 2017) : (1) les Monts Mandingues et leurs extensions vers le nord et le nord-est, (2) le massif de Siguirini/Baléa, (3) le massif du Fouta Djallon et (4) la Dorsale Guinéenne. Un petit massif montagneux, la chaîne du Banié/Niandan (5) traverse le bassin versant du nord-ouest au sud-est au niveau de la ville de Kouroussa. Le massif ayant la plus importante extension sur le bassin versant est la Dorsale Guinéenne. Contrairement aux idées reçues, le Niger Supérieur ne prend pas sa source dans le massif du Fouta Djallon mais est alimenté par la totalité de son bassin versant avec une part très importante de la Dorsale Guinéenne. Le massif du Fouta Djallon ne concerne en réalité qu'une part assez modeste du bassin versant. Le massif du Fouta Djallon et la Dorsale Guinéenne, constituent ce que l'on a coutume d'appeler le « château d'eau de l'Afrique de l'Ouest », massifs montagneux dans lesquels dix-huit grands fleuves de la région dont les fleuves Niger, Sénégal, Gambie, Konkouré et Sassandra, prennent certaines de leurs sources.



CARTE 2: LOCALISATION ET RELIEF DE LA REGION DU NIGER SUPERIEUR ET DU BANI



CARTE 3: BASSINS VERSANTS ET PRINCIPAUX SOUS-BASSINS DU NIGER SUPERIEUR ET DU BANI (BASSIN VERSANT > 4 000 KM²)

- La limite aval du bassin versant du Bani a toujours été considérée comme étant située à Mopti. Les images satellites (Google Earth par exemple) montrent clairement des diffluences du Bani situées à moins de 25 km en aval de Douna (pont routier entre Ségou et Bla) à proximité du village de Niansira. On peut donc considérer que la limite aval du bassin versant du Bani se situe au niveau du village de Niansira. En aval de cette limite, particulièrement en hautes eaux, il y a une complète confusion entre le Bani (cours d'eau) et le DIN et ses multiples bras. Le bassin versant a une superficie d'environ 103 200 km² et s'étend sur le Burkina Faso (5%), la Côte d'Ivoire (20%), la Guinée (<1%) et le Mali (75%). Il est bordé à l'est par trois petits massifs montagneux² : Madinani (6), Loulouni/Kankalaba (7) et Boura Tansila (8).

Les bassins versants fluviaux limitrophes des bassins versants du Niger Supérieur et du Bani sont les bassins versants des fleuves Bandama, Comoé, Little Scarcies, Loffa, Moa, Rockel, Sassandra, Sénégal, Sewa, St Paul et Volta (Carte 3).

2.1.2. Les bassins versants du Niger Supérieur et du Bani et leurs principaux sous bassins versants

2.1.2.1. LOCALISATION ET CARACTERISTIQUES MORPHOLOGIQUES DES BASSINS VERSANTS ET DE LEURS SOUS-BASSINS

Bassin versant	Altitudes et pentes des bassins versants			Cours d'eau
	Altitudes maximales (m)	Altitudes moyennes (m)	Pentes moyennes (%)	Pentes moyennes (cm/km)
Niger supérieur	476 - 1479	378 - 583	4.3 - 9.3	45.1 - 171.5
Bani	574 - 846	353 - 406	3.4 - 5.0	18.0 - 137.2
cours d'eau = plus long talweg				

TABLEAU 1 : VALEURS EXTREMES DE QUELQUES CARACTERISTIQUES MORPHOLOGIQUES DES 38 BASSINS VERSANTS SELECTIONNES

Bassin versant	Tranche d'altitude (z, m)	Superficie Relative (%)	Pente Moyenne (%)
Niger supérieur	300 <= z < 700	93.5	6
	700 <= z < 1100	4.4	18
	1100 <= z	0.05	44
Bani	300 <= z < 475	90.9	4
	475 <= z < 650	3.5	9
	650 <= z	0.04	28

TABLEAU 2 : SUPERFICIES RELATIVES ET PENTES MOYENNES DE QUELQUES CLASSES D'ALTITUDE DES BASSINS VERSANTS DU NIGER SUPERIEUR ET DU BANI

La délimitation des bassins versants topographiques est une information de premier ordre dans de nombreux domaines : recherche environnementale, gestion intégrée des ressources en eau, aménagement des territoires... Au niveau national et régional, les bassins versants fluviaux et leurs sous-bassins constituent des unités géographiques au niveau desquelles ont été créés de nombreux organismes de coopération et de gestion : Autorité du Bassin du Niger (ABN), Organisation pour la Mise en Valeur du fleuve Sénégal (OMVS), comités de sous-bassins versants...

Jusqu'à une date récente, les bassins versants étaient tracés à partir des cartes topographiques à diverses échelles éditées par les instituts géographiques nationaux. Aujourd'hui, l'utilisation de modèles numériques de terrain (MNT) permet un tracé plus précis et plus homogène des bassins versants à l'aide de logiciels spécialisés. Le tracé des bassins versants du Niger Supérieur et du Bani, ainsi que de leurs sous-bassins, a été réalisé au moyen du SRTM à 3" d'arc de la NASA et de l'ABN (mailles d'environ 90 m de côté et précision métrique en altitude) et du logiciel RiverTools.

² Les noms donnés à ces massifs ne correspondent à aucune réalité toponymique

Les paramètres présentés dans le Tableau 1, le Tableau 2, le Tableau 3 et le Tableau 4 ont été calculés à partir du SRTM à 3" d'arc. A chaque point du MNT est attribuée une valeur de pente déterminée à partir des huit points voisins. La valeur retenue est la plus forte pente calculée entre le point central et les huit points périphériques. Pour chaque bassin versant sélectionné, sont calculés : la superficie (km²), le périmètre (km), la répartition des altitudes (z en mètres, 90%, 75%, 50%... du bassin versant à une altitude supérieure à z), les altitudes maximum (m) et moyenne (m), la répartition des pentes (en %, 90%, 75%, 50%... du bassin versant à une pente supérieure à p), la pente moyenne (%), la longueur du cours d'eau (km), son altitude maximale (m), sa pente moyenne (cm/km) et la répartition des pays par bassin versant (%). Soulignons que les valeurs présentées dans ces tableaux sont des valeurs brutes qu'il faut plutôt considérer comme des indices. Il est probable que l'utilisation d'un MNT à plus forte résolution donnerait des résultats sensiblement différents sur certains paramètres.

Parmi l'infinité de bassins versants qu'il serait possible de tracer³, seuls les bassins versants de plus de 4 000 km² ont été retenus (Carte 3). Soulignons qu'à chaque confluence du réseau hydrographique deux sous-bassins ont été identifiés (pour les confluences simples). Ainsi, à la confluence du Niger et du Sankarani par exemple, les sous-bassins (1) du Sankarani et (2) du Niger en amont de la confluence Niger/Sankarani ont été retenus.

Ce mode de sélection basé uniquement sur la surface des bassins versants permet d'identifier huit branches-mères principales sur le bassin versant du Niger Supérieur (le Fié, le Koda, le Mafou, le Milo, le Niandan, le Niger en amont de sa confluence avec le Mafou, le Sankarani et le Tinkisso) et trois branches-mère principales sur le bassin versant du Bani (le Baoulé, la Bagoé et le Banifing de Kouoro). Les caractéristiques de leurs bassins versants et de leurs sous-bassins ainsi que des bassins versants du Niger en amont de Bamako, du Sankarani en amont du barrage de Sélingué et du Niandan en amont du projet de barrage de Fomi sont donnés dans le Tableau 3.

³ En suivant le mode de sélection adopté, il y aurait plus de 350 bassins versants de plus de 200 km² sur la seule portion guinéenne du bassin versant du Niger Supérieur.

Identification	Bassin versant																Cours d'eau (plus long talweg)		
	Sup. (km ²)	Périm. (km)	Altitude (m)								Pente (%)						Longueur (km)	Alt. max.(m)	Pente (cm/km)
			Min.	90 % BV >	75 % BV >	50 % BV >	25 % BV >	10 % BV >	Max.	Moy.	90 % BV >	75 % BV >	50 % BV >	25 % BV >	10 % BV >	Moy.			
Niger AM Markala	131157	3804	280	351	383	420	484	602	1479	452	1.6	2.6	4.2	6.7	11.6	6.9	1070	825	51
Koda	4939	496	287	327	345	375	404	428	608	378	1.2	2.0	2.9	4.6	9.0	5.2	155	528	156
Niger AM conf. Niger/Koda	119296	3130	287	365	392	427	494	614	1479	463	1.8	2.7	4.5	6.9	12.0	7.2	890	825	60
Niger AM Bamako (station hydro. Brig. fluviale)	114843	2860	311	370	395	430	498	619	1479	467	1.9	2.8	4.6	7.0	12.1	7.3	791	825	65
Sankarani	33455	1527	326	372	394	429	511	634	1477	469	1.9	2.7	4.2	6.1	9.5	6.4	660	748	64
Sankarani AM barrage de Sélingué	32135	1425	347	377	398	432	519	636	1477	473	2.0	2.8	4.3	6.3	9.7	6.5	608	748	66
Dion	8346	676	372	419	463	596	649	704	1477	583	2.7	4.1	6.0	9.3	15.7	9.3	299	866	165
Sankarani AM conf. Sankarani/Dion	11395	673	372	412	430	454	506	588	1224	479	2.2	3.1	4.5	6.0	8.4	6.3	306	748	123
Balé	6196	588	348	365	377	390	405	420	476	392	1.3	2.1	2.9	4.2	5.7	4.3	217	462	53
Sankarani AM conf. Sankarani/Balé	25383	1367	348	389	415	451	570	649	1477	495	2.2	3.1	4.8	6.9	11.0	7.1	598	748	67
Niger AM conf. Niger/Sankarani	76374	2373	326	377	400	434	500	611	1479	471	2.1	3.0	5.0	7.6	13.4	7.8	703	825	71
Fié	4038	638	324	356	370	385	402	419	506	387	1.6	2.4	3.7	5.4	7.7	5.3	253	438	45
Niger AM conf. Niger/Fié	71860	2329	330	381	404	439	506	622	1479	477	2.1	3.1	5.1	7.8	13.8	8.0	672	825	74
Tinkisso	19434	1231	340	380	398	416	452	676	1059	466	1.8	2.8	4.6	8.2	17.1	8.5	581	864	90
Niger AM conf. Niger/Tinkisso	48569	1745	340	391	418	461	519	616	1479	489	2.3	3.5	5.3	7.9	13.0	8.0	577	825	84
Milo	13591	1164	347	386	408	454	580	792	1479	526	2.1	3.1	5.0	7.8	15.4	8.2	497	939	119
Niger AM conf. Niger/Milo	34038	1446	347	399	426	463	508	566	1108	477	2.4	3.7	5.5	8.0	12.5	8.0	530	825	90
Niandan	12931	870	358	415	445	495	543	601	1108	504	2.8	4.2	5.9	8.7	14.7	8.7	382	780	110
Niandan AM projet de barrage de Fomi	12626	853	367	418	448	497	544	602	1108	506	2.8	4.2	5.9	8.7	14.7	8.7	347	780	119
Niger AM conf. Niger/Niandan	17381	978	358	411	434	462	491	536	1051	473	2.5	3.7	5.5	7.8	11.7	7.9	438	825	107
Mafou	4075	556	372	418	438	466	512	547	961	478	2.8	4.2	5.7	7.9	10.9	7.6	229	765	172
Niger AM conf. Niger/Mafou	11664	822	372	423	443	466	491	536	1051	480	2.5	3.7	5.5	8.0	12.5	8.2	355	825	128
Bani AM Niansira (amont DIN)	103208	2510	278	308	329	352	383	424	846	362	1.0	1.6	2.5	3.7	5.5	4.1	945	448	18
Banifing de Kouoro	19607	1095	278	304	319	343	382	439	751	359	0.8	1.4	2.3	3.4	5.6	3.9	451	519	53
Lotio	4458	437	304	323	349	393	459	510	751	406	1.1	1.7	2.6	3.9	6.1	4.3	173	542	137
Banifing Kouoro AM conf. Banifing Kouoro/Lotio	8786	598	304	311	324	343	371	410	575	353	0.9	1.5	2.4	3.5	5.5	3.9	217	519	99
Bani AM conf. Bani/Banifing Kouoro	76147	2037	278	320	337	358	387	426	846	368	1.2	1.8	2.7	3.9	5.7	4.3	832	448	20
Bagoé	43047	1572	282	317	333	352	383	438	846	367	1.2	1.8	2.6	3.8	5.7	4.5	688	619	49
Banifin de Kolondiéba	4458	553	301	325	338	353	371	390	682	357	1.2	1.8	2.5	3.4	4.6	3.8	235	551	107
Bagoé AM conf. Bagoé/Banifing Kolondiéba	26058	1179	301	329	342	362	403	465	846	381	1.2	2.0	2.8	4.0	6.3	4.9	472	619	67
Kankélaba	8387	697	301	333	346	366	395	439	836	378	1.2	2.0	2.7	3.9	6.1	5.0	302	638	111
Bagoé AM conf. Bagoé/Kankélaba	16524	1172	301	329	341	361	412	478	846	385	1.2	2.0	2.8	4.1	6.4	4.8	431	619	74
Banifin	4383	419	308	326	337	354	457	514	757	395	1.2	1.9	2.7	4.1	7.0	4.8	188	533	120
Bagoé AM conf. Bagoé/Banifin	10604	904	308	334	347	367	407	461	846	385	1.2	2.0	2.8	4.1	6.1	4.9	368	619	85
Baoulé	32632	1562	279	328	345	365	391	419	792	370	1.2	1.8	2.7	4.0	5.7	4.2	803	448	21
Banifing Ouest	4670	489	303	335	347	358	370	379	574	359	0.9	1.4	2.2	2.9	4.0	3.4	189	410	57
Baoulé AM conf. Baoulé/Banifing Ouest	23691	1293	303	338	353	374	402	426	792	380	1.4	2.1	3.0	4.4	6.0	4.5	696	448	21

Avec :
AM = "en amont de (du)"
AM conf. = "en amont de la confluence"

TABLEAU 3 : CARACTERISTIQUES DES BASSINS VERSANTS DU NIGER SUPERIEUR ET DU BANI DE LEURS PRINCIPAUX SOUS-BASSINS (BASSIN VERSANT > 4 000 KM²)

Bassin versant	Superficie (km ²)	Burkina Faso	Côte d'Ivoire	Guinée	Mali	Sierra Leone
Niger AM Markala et Bani AM Niansira	234353	2%	10%	41%	46%	<1%
Niger AM Markala	131147	0%	3%	73%	24%	<1%
Koda	4939	0%	0%	0%	100%	0
Niger AM conf. Niger/Koda	119296	0%	3%	80%	17%	<1%
Niger AM Bamako (station hydro. Brig. fluviale)	114843	0%	3%	84%	14%	<1%
Sankarani	33455	0%	10%	66%	24%	0
Sankarani AM barrage de Sélingué	32135	0%	10%	69%	21%	0
Dion	8346	0%	0%	100%	0%	0
Sankarani AM conf. Sankarani/Dion	11395	0%	29%	71%	0%	0
Balé	6196	0%	0%	21%	79%	0
Sankarani AM conf. Sankarani/Balé	25383	0%	13%	82%	5%	0
Niger AM conf. Niger/Sankarani	76374	0%	0%	97%	3%	<1%
Fié	4038	0%	0%	76%	24%	0
Niger AM conf. Niger/Fié	71860	0%	0%	99%	1%	<1%
Tinkisso	19434	0%	0%	100%	0%	0
Niger AM conf. Niger/Tinkisso	48569	0%	0%	100%	0%	<1%
Milo	13591	0%	0%	100%	0%	0
Niger AM conf. Niger/Milo	34038	0%	0%	100%	0%	<1%
Niandan	12931	0%	0%	100%	0%	0
Niandan en amont du projet de barrage de Fomi	12626	0%	0%	100%	0%	0
Niger AM conf. Niger/Niandan	17381	0%	0%	100%	0%	<1%
Mafou	4075	0%	0%	100%	0%	0
Niger AM conf. Niger/Mafou	11664	0%	0%	100%	0%	<1%
Bani AM Niansira (amont DIN)	103206	5%	20%	<1%	75%	0
Banifing de Kouoro	19607	26%	0%	0%	74%	0
Lotio	4458	3%	0%	0%	97%	0
Banifing Kouoro AM conf. Banifing Kouoro/Lotio	8786	57%	0%	0%	43%	0
Bani AM conf. Bani/Banifing Kouoro	76145	<1%	27%	<1%	72%	0
Bagoé	43045	1%	30%	0%	69%	0
Banifin de Kolondiéba	4458	0%	2%	0%	98%	0
Bagoé AM conf. Bagoé/Banifing Kolondiéba	26056	2%	50%	0%	49%	0
Kankélaba	8387	0%	57%	0%	43%	0
Bagoé AM conf. Bagoé/Kankélaba	16522	3%	49%	0%	48%	0
Banifin	4381	10%	0%	0%	90%	0
Bagoé AM conf. Bagoé/Banifin	10604	0%	77%	0%	23%	0
Baoulé	32632	0%	23%	<1%	77%	0
Banifing Ouest	4670	0%	0%	0%	100%	0
Baoulé AM conf. Baoulé/Banifing Ouest	23691	0%	31%	1%	68%	0

TABLEAU 4 : REPARTITION DES PAYS PAR BASSIN VERSANT

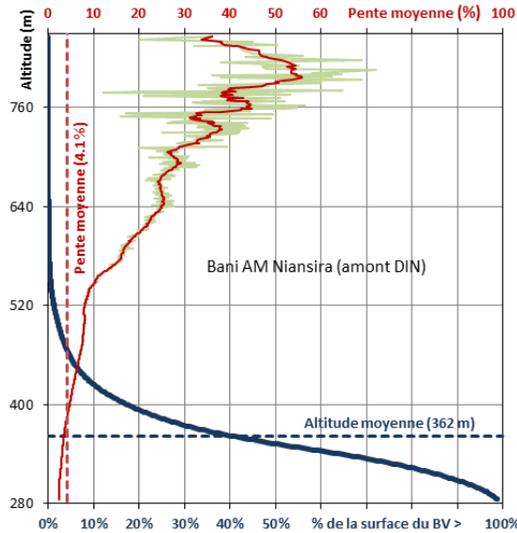


FIGURE 1 : HYSOMETRIE, ALTITUDES ET PENTES MOYENNES DU BASSIN VERSANT DU BANI

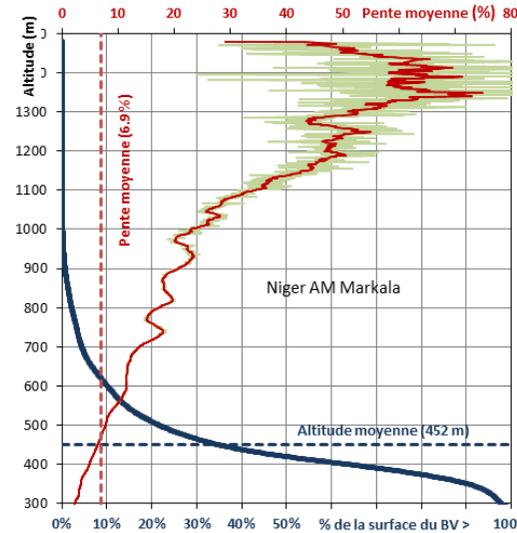


FIGURE 2 : HYSOMETRIE, ALTITUDES ET PENTES MOYENNES DU BASSIN VERSANT DU NIGER SUPERIEUR

Les caractéristiques morphologiques des bassins versants du Niger Supérieur et du Bani et de leurs sous-bassins sont très différentes (Figure 1, Figure 2, Tableau 1, Tableau 2). Les altitudes maximales, les altitudes moyennes, les pentes moyennes et les pentes des cours d'eau sont systématiquement plus importantes sur le bassin versant du Niger Supérieur que sur celui du Bani.

Ces différences s'expliquent par la position des bassins versants par rapport aux massifs montagneux mentionnés précédemment.

La forte variabilité des pentes marque un vallonnement prononcé au-dessus de 1 100 m pour le Niger Supérieur (< 1% du bassin versant, pente moyenne = 44%) et 640 m pour le Bani (< 1% du bassin versant, pente moyenne = 27%).

2.1.2.2. GEOLOGIE

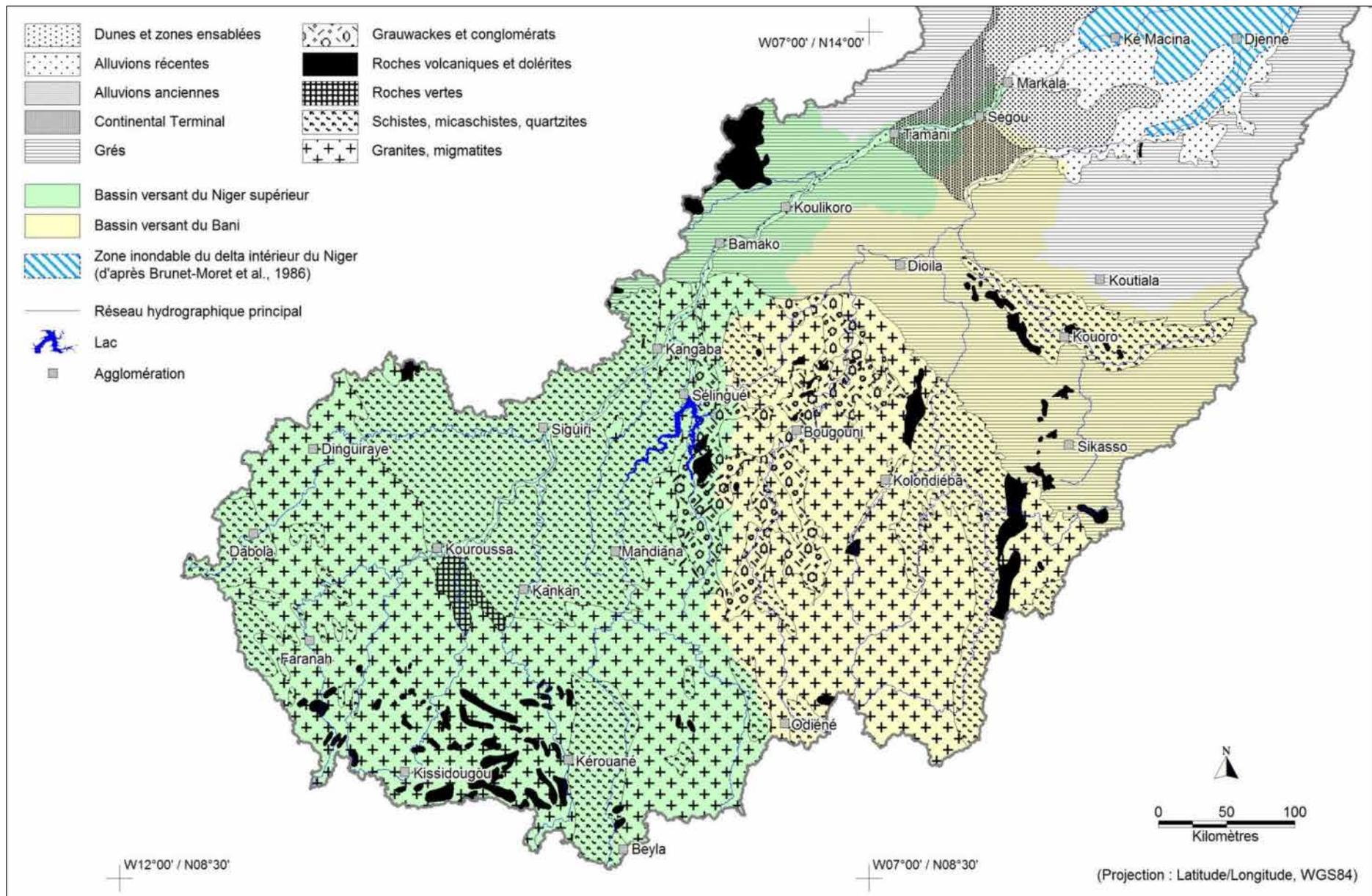
La Carte 4, carte géologique simplifiée, a été élaborée à partir de la carte géologique de la monographie hydrologique du fleuve Niger (Brunet-Moret et *al.*, 1986) avec quelques modifications et compléments mineurs apportés à partir des cartes géologiques au 1:1 500 000 du Mali (Bassot et *al.*, 1980) et de la carte au 1:500 000 de la Guinée (Bouféév, 2006). Cette carte simplifiée montre neuf ensembles de terrains géologiques. Leur répartition par bassin versant est donnée dans le Tableau 5.

Les trois types de terrain géologique ayant les plus fortes extensions sur le bassin versant du Niger Supérieur et du Bani sont (1) des grès (20%), (2) des schistes, des micaschistes, et des quartzites (25%) et (3) des granites et des migmatites (42%) avec des répartitions très différentes entre les deux bassins versants :

- sur le bassin versant du Niger Supérieur : 10% de grès, 32% de schistes, de micaschistes et de quartzites et 47% de granites et de migmatites ;
- sur le bassin versant du Bani : 33% de grès, 17% de schistes, de micaschistes et de quartzites et 36% de granites et de migmatites.

Evidemment, la répartition des terrains géologiques par sous-bassin est également très différente selon leur localisation. Ainsi, les formations de grès sont prédominantes sur le sous-bassin du Koda (65%), situé au nord du fleuve Niger et sur les petits sous-bassins situés en aval de la confluence Niger/Sankarani.

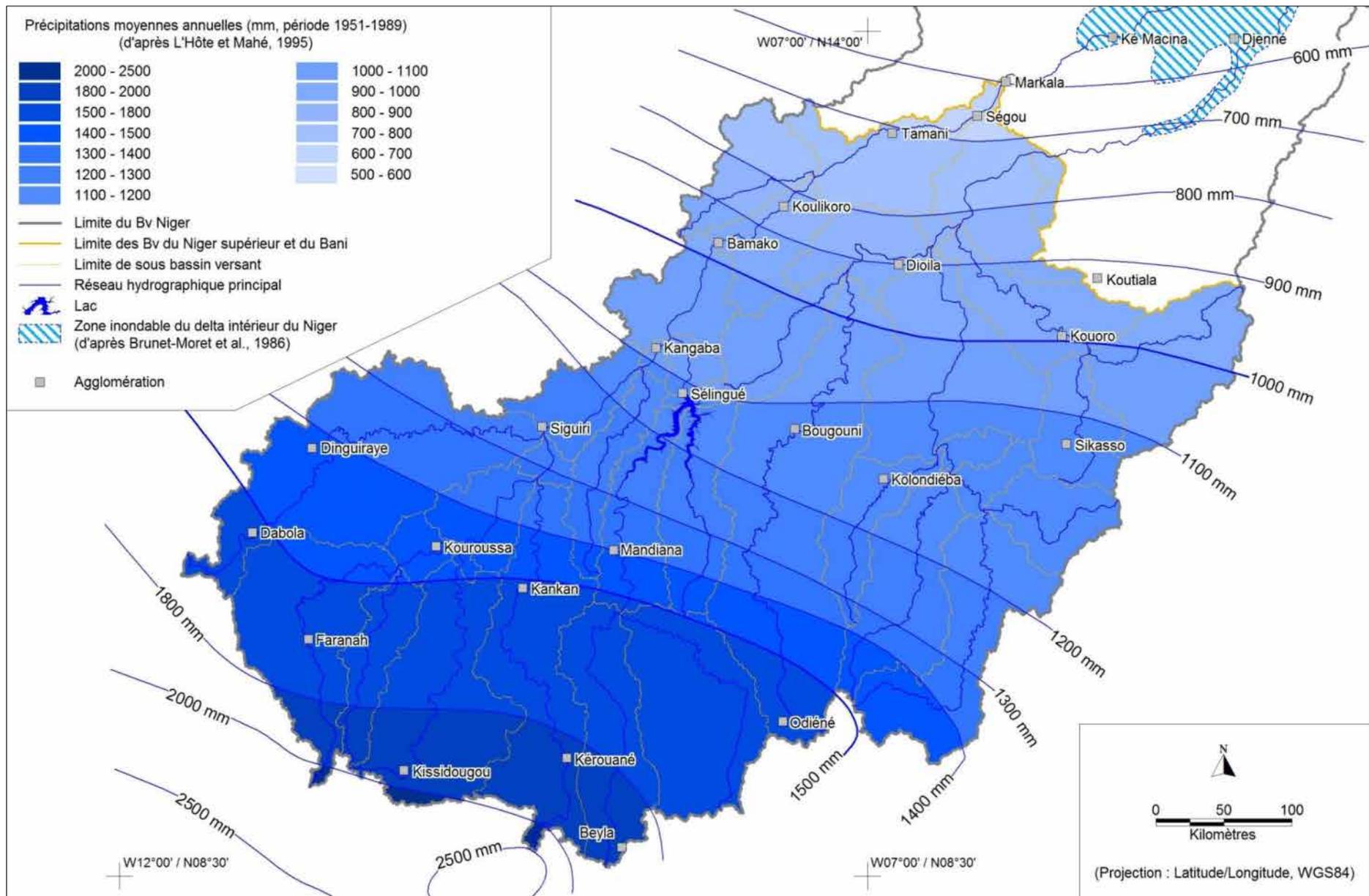
De manière générale, les bassins versants du Niger Supérieur et du Bani sont très différents en ce qui concerne leur géologie avec une plus forte hétérogénéité sur le bassin versant du Bani. Soulignons que les "*terrains anciens, souvent cuirassés par la latéritisation, sont imperméables sauf fracturation et petits gisements aquifères. Des nappes superficielles peuvent cependant exister dans la frange d'altération, notamment dans les bas-fonds et c'est souvent la seule ressource en eau des populations rurales éloignées des cours d'eau*" (in Olivry, 2002).



CARTE 4 : GEOLOGIE DES BASSINS VERSANTS DU NIGER SUPERIEUR ET DU BANI

Bassin versant	Superficie (km ²)	Alluvions récentes	Alluvions anciennes	Continental Terminal	Grès	Grauwackes, conglomérats	Roches volcaniques, dolérites	Roches vertes (gabbros)	Schistes, micaschistes, quartzites	Granites, Migmatites
Niger AM Markala et Bani AM Niansira	234355	1%	<1%	1%	20%	5%	4%	<1%	25%	42%
Niger AM Markala	131157	2%	<1%	1%	10%	3%	4%	1%	32%	47%
Koda	4939	<1%	0%	0%	65%	0%	35%	0%	0%	0%
Niger AM conf. Niger/Koda	119296	2%	0%	0%	4%	3%	3%	1%	35%	52%
Niger AM Bamako (station hydro. Brig. fluviale)	114843	2%	0%	0%	1%	3%	3%	1%	36%	53%
Sankarani	33455	<1%	0%	0%	0%	11%	2%	0%	31%	57%
Sankarani AM barrage de Sélingué	32135	0%	0%	0%	0%	11%	2%	0%	31%	57%
Dion	8346	0%	0%	0%	0%	0%	<1%	0%	49%	50%
Sankarani AM conf. Sankarani/Dion	11395	0%	0%	0%	0%	0%	<1%	0%	9%	90%
Balé	6196	0%	0%	0%	0%	51%	6%	0%	2%	41%
Sankarani AM conf. Sankarani/Balé	25383	0%	0%	0%	0%	0%	<1%	0%	38%	62%
Niger AM conf. Niger/Sankarani	76374	2%	0%	0%	0%	0%	4%	2%	40%	52%
Fié	4038	<1%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	96%	4%
Niger AM conf. Niger/Fié	71860	2%	0%	0%	0%	0%	4%	2%	37%	55%
Tinkisso	19434	<1%	0%	0%	0%	0%	<1%	0%	51%	48%
Niger AM conf. Niger/Tinkisso	48569	2%	0%	0%	0%	0%	6%	3%	27%	63%
Milo	13591	<1%	0%	0%	0%	0%	8%	<1%	40%	51%
Niger AM conf. Niger/Milo	34038	2%	0%	0%	0%	0%	5%	4%	20%	69%
Niandan	12931	<1%	0%	0%	0%	0%	11%	9%	3%	77%
Niandan en amont du projet de barrage de Fomi	12626	0%	0%	0%	0%	0%	11%	8%	3%	79%
Niger AM conf. Niger/Niandan	17381	1%	0%	0%	0%	0%	2%	<1%	17%	79%
Mafou	4075	0%	0%	0%	0%	0%	3%	0%	2%	95%
Niger AM conf. Niger/Mafou	11664	0%	0%	0%	0%	0%	2%	0%	23%	75%
Bani AM Niansira (amont DIN)	103208	<1%	<1%	2%	33%	8%	3%	0%	17%	36%
Banifing de Kouoro	19607	0%	0%	0%	71%	0%	4%	0%	25%	0%
Lotio	4458	0%	0%	0%	95%	0%	4%	0%	<1%	0%
Banifing Kouoro AM conf. Banifing Kouoro/Lotio	8786	0%	0%	0%	78%	0%	<1%	0%	21%	0%
Bani AM conf. Bani/Banifing Kouoro	76147	0%	0%	0%	20%	11%	3%	0%	16%	49%
Bagoé	43047	0%	0%	0%	23%	1%	5%	0%	23%	49%
Banifin de Kolondiéba	4458	0%	0%	0%	0%	<1%	2%	0%	14%	83%
Bagoé AM conf. Bagoé/Banifing Kolondiéba	26058	0%	0%	0%	8%	0%	6%	0%	28%	58%
Kankélaba	8387	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	19%	81%
Bagoé AM conf. Bagoé/Kankélaba	16524	0%	0%	0%	12%	0%	9%	0%	30%	50%
Banifin	4383	0%	0%	0%	34%	0%	17%	0%	5%	45%
Bagoé AM conf. Bagoé/Banifin	10604	0%	0%	0%	0%	0%	6%	0%	35%	59%
Baoulé	32632	0%	0%	0%	15%	24%	<1%	0%	9%	51%
Banifing Ouest	4670	0%	0%	0%	10%	13%	1%	0%	28%	48%
Baoulé AM conf. Baoulé/Banifing Ouest	23691	0%	0%	0%	<1%	31%	1%	0%	6%	61%

TABLEAU 5 : ESTIMATION DE LA REPARTITION DES TERRAINS GEOLOGIQUES PAR BASSIN VERSANT



CARTE 5 : PRÉCIPITATIONS MOYENNES ANNUELLES SUR LES BASSINS VERSANTS DU NIGER SUPÉRIEUR ET DU BANI (PÉRIODE 1951-1989)

2.1.2.1. PRECIPITATIONS MOYENNES ANNUELLES

En première approche, l'estimation des précipitations moyennes annuelles est un excellent indicateur (parmi d'autres) pour la compréhension de l'état d'occupation des sols, de l'érosion sur les bassins versants ou encore des usages de l'eau. Evidemment, une étude plus fine de ces thèmes demanderait une analyse interannuelle et intra-annuelle des précipitations et des écoulements.

La Carte 5 et le Tableau 6, qui estime la pluviométrie annuelle moyenne par bassin versant, sont issus de la carte au 1:6 000 000 des précipitations moyennes annuelles de l'Afrique de l'Ouest et Centrale (L'Hôte et Mahé, 1995). Cette carte présente l'avantage de couvrir l'ensemble de la zone d'étude et d'avoir été établie sur la période 1951-1989, période qui intègre des années humides (1951-1969), une période intermédiaire (1970-1981) et des années sèches (1982-1989) (Ferry et *al.*, 2012).

Bassin versant	P. ann. (mm)	Bassin versant	P. ann.(mm)
Niger supérieur et Bani AM Niansira (amont DIN)	1300	Niandan en amont du projet de barrage de Fomi	1775
Niger AM Markala	1425	Niger AM conf. Niger/Niandan	1650
Koda	825	Mafou	1700
Niger AM conf. Niger/Koda	1500	Niger AM conf. Niger/Mafou	1650
Niger AM Bamako (station hydro. Brig. fluviale)	1525	Bani AM Niansira (amont DIN)	1125
Sankarani	1525	Banifing de Kouoro	1025
Sankarani AM barrage de Sélingué	1550	Lotio	1125
Dion	1725	Banifing Kouoro AM conf. Banifing Kouoro/Lotio	1000
Sankarani AM conf. Sankarani/Dion	1650	Bani AM conf. Bani/Banifing Kouoro	1175
Balé	1275	Bagoé	1175
Sankarani AM conf. Sankarani/Balé	1600	Banifin de Kolondiéba	1200
Niger AM conf. Niger/Sankarani	1550	Bagoé AM conf. Bagoé/Banifing Kolondiéba	1250
Fié	1275	Kankélaba	1275
Niger AM conf. Niger/Fié	1575	Bagoé AM conf. Bagoé/Kankélaba	1250
Tinkisso	1400	Banifin	1150
Niger AM conf. Niger/Tinkisso	1675	Bagoé AM conf. Bagoé/Banifin	1300
Milo	1700	Baoulé	1200
Niger AM conf. Niger/Milo	1675	Banifing Ouest	1025
Niandan	1775	Baoulé AM conf. Baoulé/Banifing Ouest	1275

TABLEAU 6 : PRECIPITATIONS MOYENNES ANNUELLES (1951-1989) PAR BASSIN VERSANT

Sur la période 1951-1989, les précipitations moyennes annuelles sur la zone d'étude sont relativement importantes (pluviométrie annuelle = 1 300 mm). Hors le bassin versant du Koda (pluviométrie annuelle = 825 mm) qui occupe une position très marginale sur le bassin versant du Niger Supérieur, les précipitations moyennes annuelles sur les bassins versants du Niger Supérieur et du Bani et sur leurs sous-bassins sont très différentes :

- bassin versant et sous-bassins du Niger Supérieur : entre 1 275 mm et 1 775 mm ;
- bassin versant et sous-bassins du Bani : entre 1 000 mm et 1 300 mm.

2.1.2.2. POPULATION

Bassin versant	Population	Densité de population (hab./km ²)	Bassin versant	Population	Densité de population (hab./km ²)
Niger AM Markala et Bani AM Niansira	12888000	55	Niandan en amont du projet de barrage de Fomi	419000	33
Niger AM Markala	8393000	64	Niger AM conf. Niger/Niandan	422000	24
Koda	352000	71	Mafou	63000	15
Niger AM conf. Niger/Koda	7182000	60	Niger AM conf. Niger/Mafou	283000	24
Niger AM Bamako (station hydro. Brig. fluviale)	4816000	42	Bani AM Niansira (amont DIN)	4495000	44
Sankarani	782000	23	Banifing de Kouoro	1333000	68
Sankarani AM barrage de Sélingué	727000	22	Lotio	520000	117
Dion	187000	22	Banifing Kouoro AM conf. Banifing Kouoro/Lotio	468000	53
Sankarani AM conf. Sankarani/Dion	185000	16	Bani AM conf. Bani/Banifing Kouoro	2655000	35
Balé	164000	26	Bagoé	1610000	37
Sankarani AM conf. Sankarani/Balé	528000	21	Banifin de Kolondiéba	130000	29
Niger AM conf. Niger/Sankarani	2596000	34	Bagoé AM conf. Bagoé/Banifing Kolondiéba	885000	34
Fié	164000	40	Kankélaba	209000	25
Niger AM conf. Niger/Fié	2459000	34	Bagoé AM conf. Bagoé/Kankélaba	621000	38
Tinkisso	524000	27	Banifin	227000	52
Niger AM conf. Niger/Tinkisso	1620000	33	Bagoé AM conf. Bagoé/Banifin	348000	33
Milo	601000	44	Baoulé	1021000	31
Niger AM conf. Niger/Milo	957000	28	Banifing Ouest	175000	37
Niandan	428000	33	Baoulé AM conf. Baoulé/Banifing Ouest	596000	25

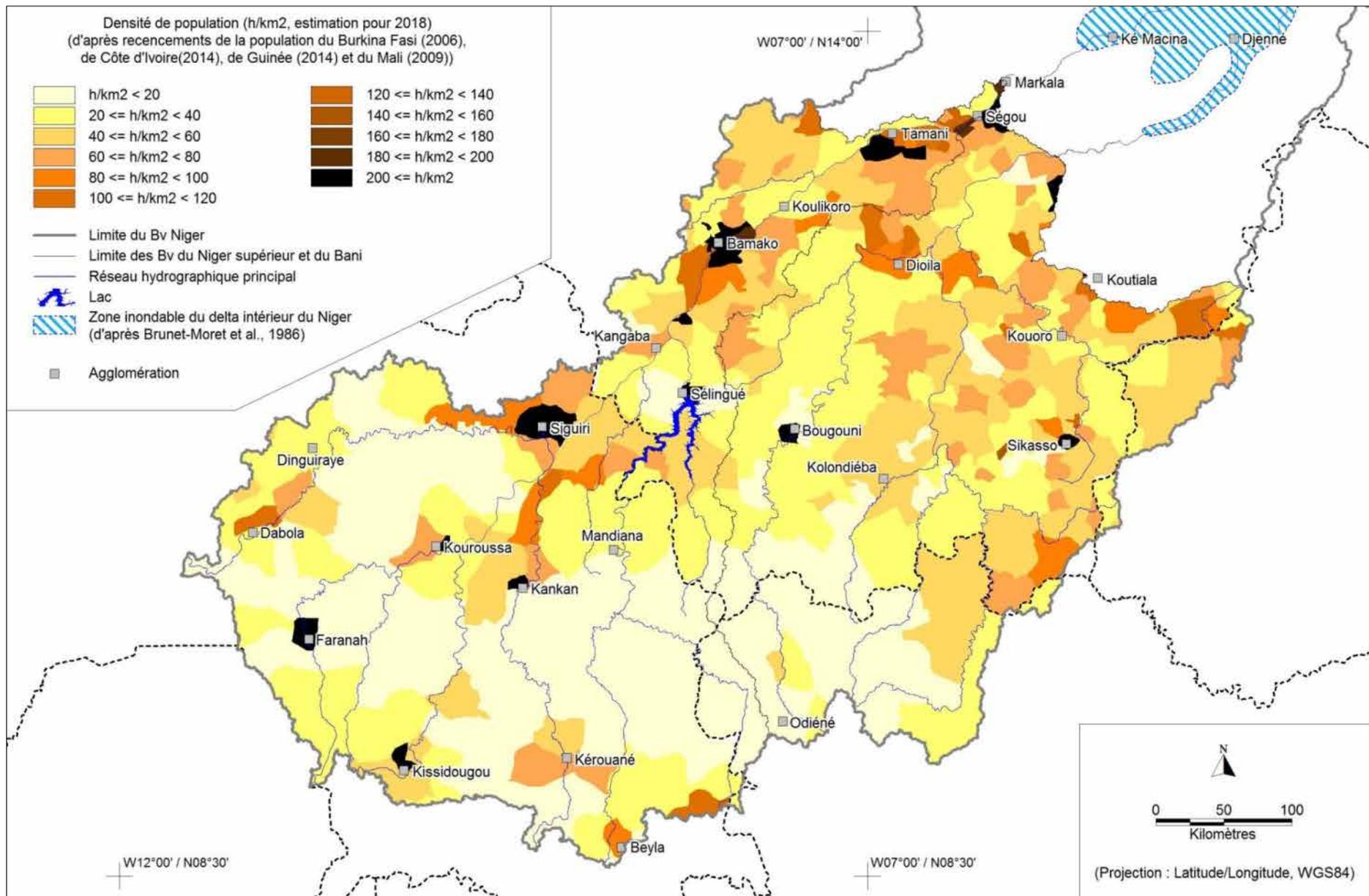
TABLEAU 7 : ESTIMATION DE LA POPULATION ET DE LA DENSITE DE POPULATION PAR BASSIN VERSANT EN 2018

Les résultats présentés ici sont issus des recensements de la population au Burkina Faso en 2006 (INSD / Burkina Faso, 2008), en Côte d'Ivoire en 2014 (INS / Côte d'Ivoire, 2015), en Guinée en 2014 (INS / Guinée, 2015) et au Mali en 2009 (INSTAT / Mali, 2009). Les recensements n'étant pas synchrones, la population en 2018 a été estimée en prenant un taux de croissance de la population de 3.5% par an sur l'ensemble des communes ou préfectures ou sous-préfectures, à l'exception du district de Bamako pour lequel un taux de croissance de 4.8% par an a été appliqué.

La population et la densité de population par bassin versant et sous-bassins ont été estimées (Tableau 7 et Carte 6) à partir des résultats obtenus pour chaque entité territoriale et pondérés en fonction de leur emprise sur les bassins versants. Evidemment, compte tenu de ces estimations, il ne faut considérer les chiffres présentés que comme des ordres de grandeur.

La population sur les bassins versants du Niger Supérieur et du Bani en 2018 est estimée à 12 888 000 habitants (soit 55 habitants/km²). La répartition de la population et les densités de population sur les bassins versants du Niger Supérieur et du Bani sont très différentes :

- sur le bassin versant du Niger supérieur :
 - 8 393 000 habitants (soit 64 habitants/km²) dont 2 759 000 habitants sur le district de Bamako et 5 634 000 habitants (soit 43 habitants/km²) en dehors du district de Bamako ;
 - les plus fortes densités de population se situe sur l'axe Kouroussa/Kankan-Siguiri-Makala, les plus faibles en tête de bassin versant : 33 habitants/km² sur le bassin versant du Niger en amont de la confluence Niger/Tinkisso (en amont de Siguiri), 15 habitants/km² sur le bassin versant du Mafou, 16 habitants/km² sur le bassin versant du Sankarani en amont de la confluence Sankarani/Dion ;
- sur le bassin versant du Bani :
 - 4 495 000 habitants (soit 44 habitants/km²) ;
 - la population est relativement plus homogène que sur celui du Niger supérieur ;
 - les plus faibles densités de population se situent sur les parties les plus en amont des bassins versants du Baoulé (entre Bougouni et Odienné), du Kankélaba et du Banifin de Kolondiéba.



CARTE 6 : DENSITES DE POPULATION SUR LES BASSINS VERSANTS DU NIGER SUPERIEUR ET DU BANI EN 2018 (ESTIMATIONS)

2.1.2.3. OCCUPATION DES SOLS

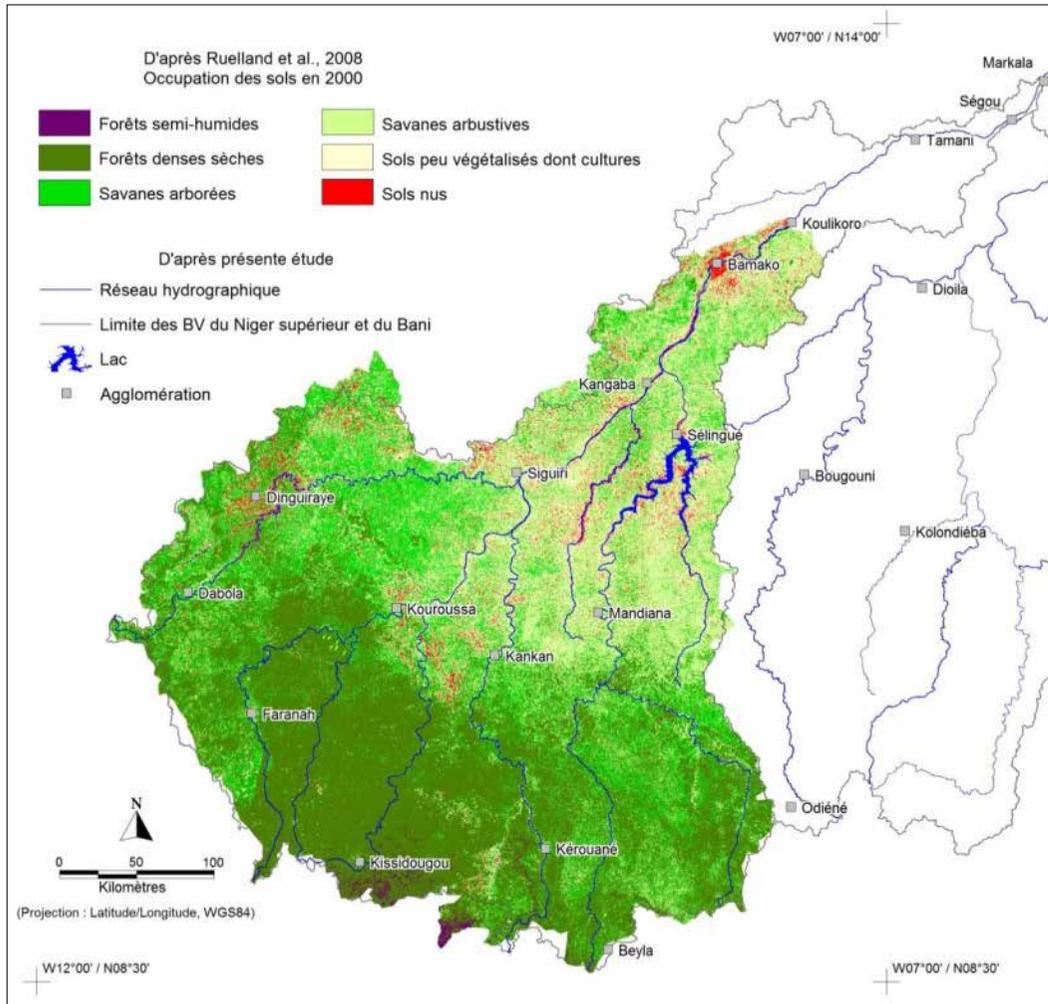


FIGURE 3 : CLASSE D'OCCUPATION DES SOLS SUR LE BASSIN VERSANT DU NIGER SUPERIEUR EN 2000 (D'APRES RUELLAND ET AL., 2008)

Ce chapitre repose essentiellement sur les résultats de recherche présentés dans Ruelland et *al.* (2008).

Une étude diachronique (1975, 1985, 2000) de l'état d'occupation de sols a été menée pour le bassin versant du Niger Supérieur en amont de Koulikoro à partir d'une analyse des images satellites Landsat. Une des principales conclusions de cette étude est une tendance modérée de la déforestation avec une augmentation correspondante des sols dénudés, des sols à faible densité végétation et arbustes entre les années 1970 et 2000 (Figure 3 et

Tableau 8).

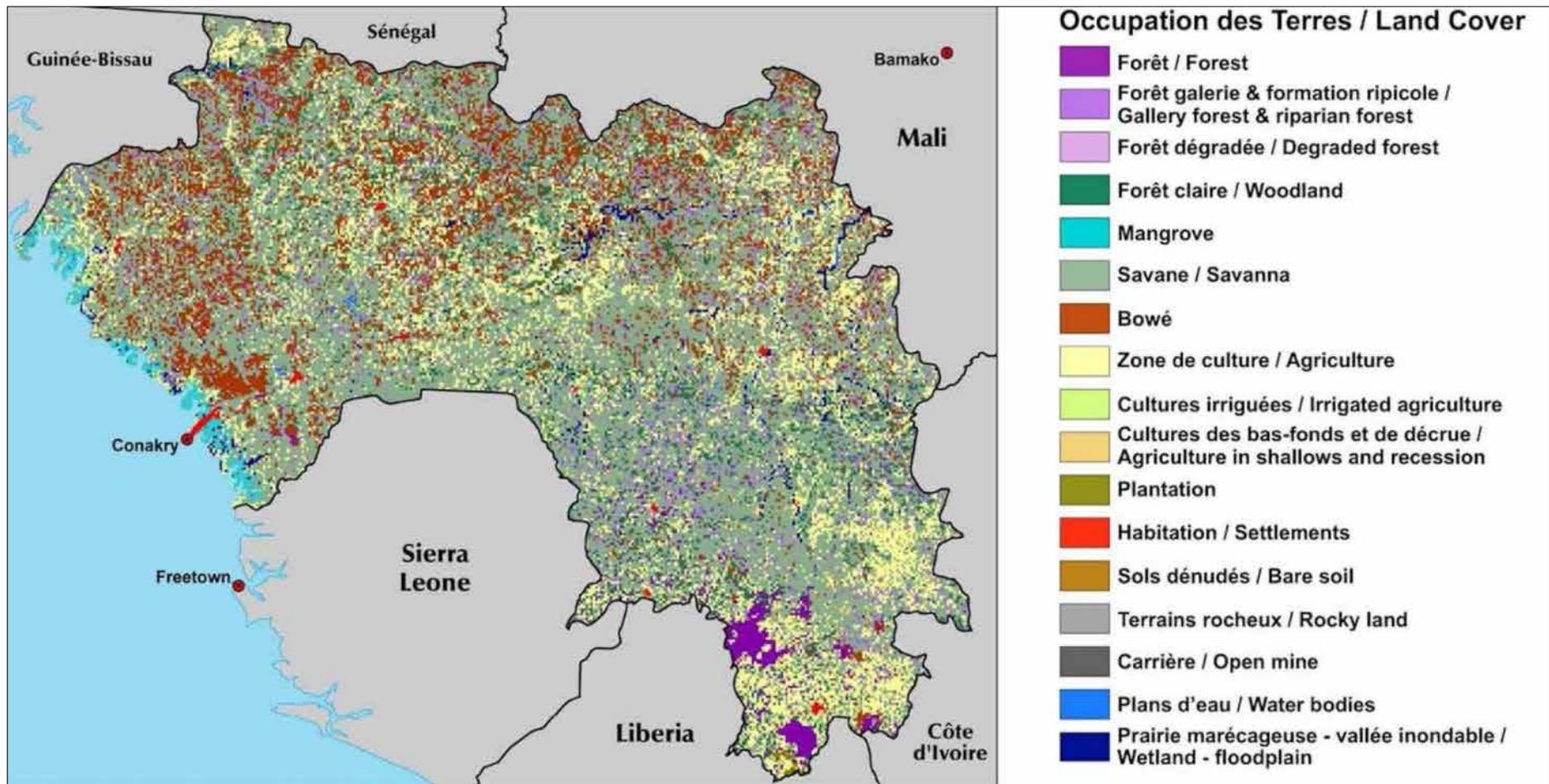
La faiblesse de la dégradation de l'état d'occupation des sols est à mettre en relation avec la faiblesse de l'érosion sur le bassin versant du Sankarani et l'incision du fleuve Niger en amont de Bamako.

Le bassin versant du Bani, au moins sur sa portion malienne, est une grande région agricole (coton, sorgho et maïs) (Lerebours Pigeonnière *et al.*, 2001) et est donc beaucoup plus anthropisé que le bassin versant du Niger Supérieur sur sa portion guinéenne. Les sols peu végétalisés et les cultures devraient y occuper une place importante.

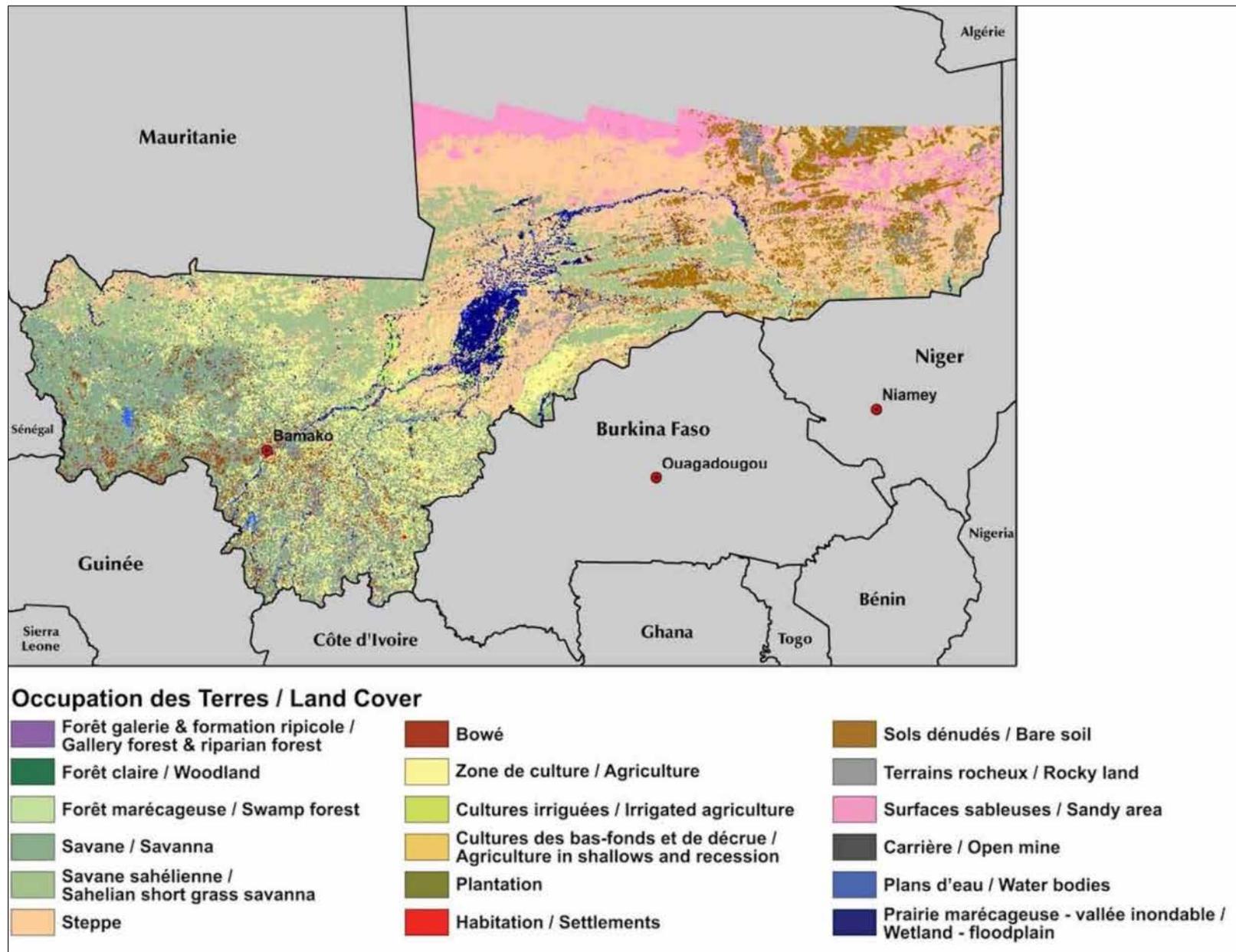
La synthèse récente de Alfari *et al.* (2016) donne l'occupation des terres pour dix-sept pays d'Afrique de l'Ouest dont le Burkina Faso, la Côte d'Ivoire, la Guinée (Carte 7) et le Mali (Carte 8). Les résultats présentés dans cette synthèse semblent, a priori, très différents de ceux de Ruelland *et al.* (2008). Cependant les nomenclatures utilisées ne sont pas les mêmes, notamment en ce qui concerne les savanes. Seule une confrontation des méthodes et des résultats pourrait donner un éclairage.

Bassin versant	Sols nus	Sols végétalisés peu dont cultures	Savanes arbustives	Savanes arborées	Forêts sèches denses	Forêts semi-humides
Niger AM Bamako (station hydro. Brig. fluviale)	3.9%	7.6%	24.0%	23.5%	38.1%	0.5%
Sankarani	2.6%	7.1%	31.3%	22.7%	33.1%	0.3%
Sankarani AM barrage de Sélingué	2.5%	6.8%	30.2%	22.8%	34.4%	0.3%
Dion	0.4%	1.4%	14.0%	27.7%	54.5%	0.6%
Sankarani AM conf. Sankarani/Dion	0.4%	1.8%	14.1%	29.8%	52.2%	0.4%
Balé	5.5%	15.9%	57.7%	11.3%	2.8%	0.0%
Sankarani AM conf. Sankarani/Balé	1.7%	4.4%	23.1%	25.7%	42.9%	0.4%
Niger AM conf. Niger/Sankarani	4.2%	7.2%	19.5%	23.8%	42.6%	0.7%
Fié	10.3%	20.5%	51.4%	15.3%	0.7%	0.0%
Niger AM conf. Niger/Fié	3.8%	6.4%	17.5%	24.3%	45.2%	0.7%
Tinkisso	6.4%	8.1%	20.0%	42.3%	21.1%	0.0%
Niger AM conf. Niger/Tinkisso	2.3%	4.4%	14.1%	17.8%	58.5%	1.1%
Milo	2.3%	5.8%	21.2%	20.8%	46.6%	0.9%
Niger AM conf. Niger/Milo	2.2%	3.4%	10.1%	16.7%	64.8%	1.1%
Niandan	2.0%	2.3%	6.0%	9.2%	76.5%	2.8%
Niandan en amont du projet de barrage de Fomi	1.9%	2.1%	5.2%	8.5%	78.2%	2.8%
Niger AM conf. Niger/Niandan	1.4%	1.9%	6.3%	18.7%	69.5%	0.2%
Mafou	0.2%	0.5%	2.0%	8.2%	88.8%	0.3%
Niger AM conf. Niger/Mafou	1.3%	1.9%	6.1%	21.0%	66.5%	0.2%

TABLEAU 8 : REPARTITION DES CLASSES D'OCCUPATION DES SOLS PAR BASSIN VERSANT EN 2000 (D'APRES CARTE DE RUELLAND ET AL., 2008)



CARTE 7 : OCCUPATION DES TERRES EN GUINEE EN 2013 (IN ALFARI ET AL., 2016)



CARTE 8 : OCCUPATION DES TERRES AU MALI EN 2013 (IN ALFARI ET AL., 2016)

2.1.2.4. FAIBLESSE DE L'EROSION SUR LE BASSIN VERSANT DU NIGER SUPERIEUR

Ce chapitre est en grande partie extrait d'un rapport de recherche de l'UMR G-EAU (Ferry *et al.*, 2018) qui met en lumière l'absence de sédimentation significative au sein du réservoir du barrage de Sélingué.

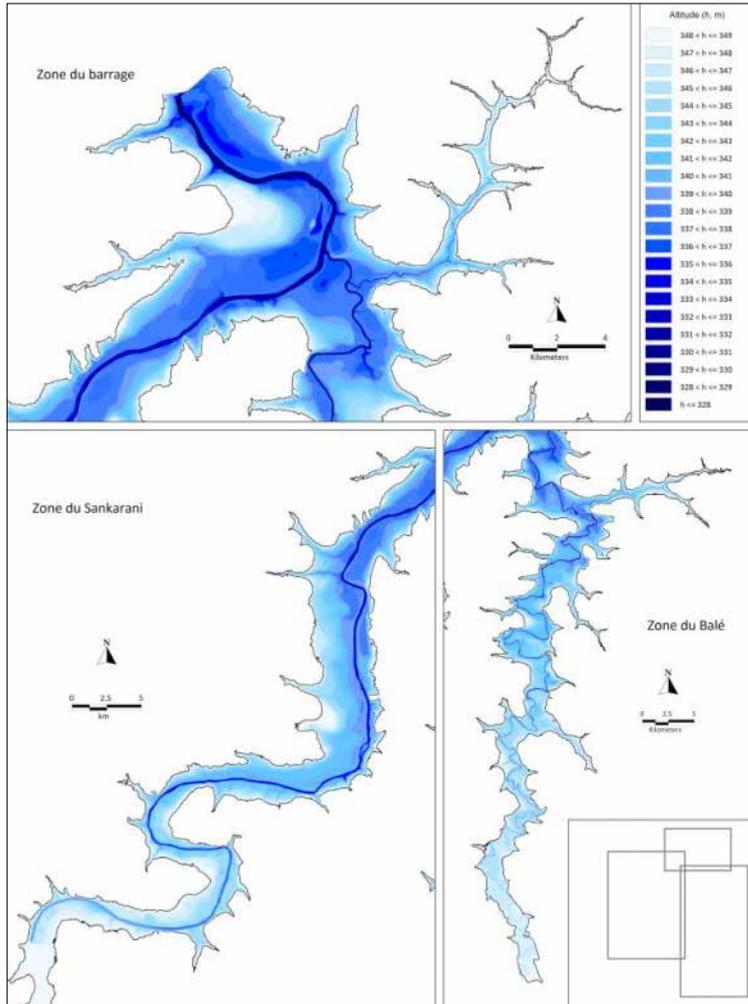


FIGURE 4 : CARTE TOPOGRAPHIQUE DU RESERVOIR DE SELINGUE (IN FERRY ET AL., 2018)

Les résultats de cette étude reposent principalement sur la réalisation en 2008 d'une carte topographique de la retenue de Sélingué basée, entre autres, sur 732 km d'enregistrement bathymétrique et plus de 680 000 points GPS. Cette carte topographique, calée dans le référentiel de l'échelle limnimétrique du barrage, a été comparée à celle réalisée par Italconsult en 1964 avant la construction du barrage. De manière générale, les profils topographiques issus des enregistrements bathymétriques réalisés en 2008, illustrés par la Figure 4, montrent que les formes d'origine étaient parfaitement conservées. On y repère encore très distinctement les plaines alluviales, les lits mineurs aux bords abrupts ainsi que leurs îles ou leurs bancs de sable, les bourrelets de berge, les chenaux secondaires et les petits affluents. Dans certains secteurs, les anciennes forêts galeries ont pu être détectées. La superposition de trois profils transversaux réalisés à partir des cartes d'Italconsult (1964) et de l'IRD (2008) sur des sections identiques (Figure 5) montrent également la permanence des formes préexistantes.

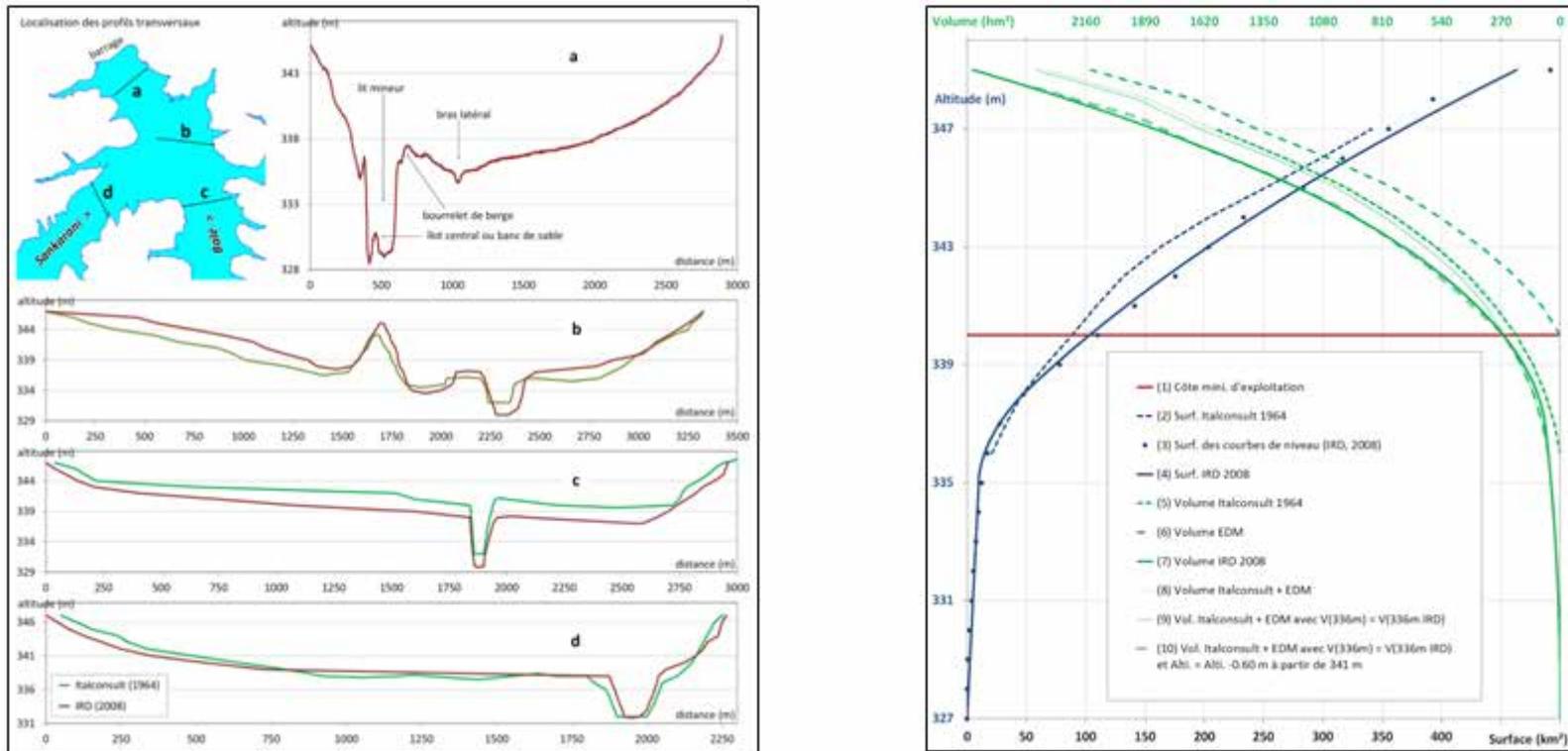


FIGURE 5 : RETENUE DE SELINGUE - DIACHRONIQUE DE PROFILS TRANSVERSAUX (A GAUCHE) - COURBES ALTITUDE/SURFACE ET ALTITUDE/VOLUME (A DROITE) (IN FERRY ET AL., 2018)

En premier lieu, l'étude illustre le comportement en termes d'érosion spécifique d'un bassin versant en milieu sud-soudanien. En effet, le réservoir de Sélingué présente l'avantage exceptionnel d'être à l'exutoire d'un bassin versant étonnamment homogène compte tenu de sa superficie, à l'inverse d'une majorité des grands bassins versants étudiés à l'échelle mondiale, beaucoup plus hétérogènes et anthropisés, peu représentatifs de ce fait d'une formation climacique donnée. A Sélingué, le bassin versant peu anthropisé est au contraire composé à 90% de savanes et forêts denses sèches, avec une très faible proportion de sols nus (2.6%) ou cultivés (7.3%). Cette étude permet donc de traduire réellement le comportement en terme d'érosion d'un milieu bioclimatique, en l'occurrence le domaine sud-soudanien. Il corrobore ce qui a été déjà démontré à une échelle beaucoup plus fine, celle de la parcelle expérimentale, à savoir le caractère pénestable de ce milieu en l'absence d'une forte pression anthropique. Cette stabilité est liée, on le rappelle, à l'existence d'un double écran arbres-herbacées, ces dernières (graminées hautes et basses) jouant certainement un rôle prépondérant vis-à-vis de l'érosion pluviale et du ruissellement. Seuls les feux de brousse, particulièrement les feux tardifs, vulnérabilisent ces milieux mais leur effet à l'échelle d'un grand bassin versant est relativement limité du fait des discontinuités de transfert. Parmi l'ensemble des facteurs conditionnels de l'érosion hydrique, le couvert végétal et son corollaire, l'occupation du sol, apparaît ici comme le facteur essentiel.

En second lieu, l'étude permet de mettre à jour, 26 ans après la mise en eau du réservoir en 1982, les estimations préliminaires faites précédemment sur le comblement du réservoir. Elle se fonde sur des sondages bathymétriques d'une grande précision et des profils cumulés de plus de 700 km. Cette mise à jour des données permet d'infirmer

les prédictions des Nations Unies faites en 1973. L'accumulation sédimentaire envisagée n'a pas eu lieu et les marges d'erreurs induites par la méthodologie suivie ne suffisent pas à rendre ce résultat incertain.

Enfin, ce travail permet d'informer les multiples gestionnaires sur la capacité réelle et actuelle de la retenue à ses différents niveaux de remplissage (Figure 5), l'évaluation de la sédimentation étant associée à une actualisation des données surfaciques et volumiques de la retenue. Cette connaissance est indispensable pour concilier les intérêts divers des différents gestionnaires, et notamment pour résoudre des conflits d'usage entre irrigants et producteurs d'électricité.

Dans la dernière étude d'actualisation de la faisabilité des travaux d'aménagement du barrage de Fomi, « *le transport solide est considéré comme insignifiant* » au niveau du projet de barrage (ABN *et al.*, 2009). Ce constat qui repose sur une campagne de relevés sédimentaires réalisée entre mars et octobre 2017, ainsi que le non renouvellement du matelas sableux suite à l'extraction de matériaux dans le lit du fleuve Niger en amont de Bamako (chapitre 4.5.4) montreraient que l'ensemble du bassin versant du Niger Supérieur est caractérisé par une faiblesse de l'érosion.

2.2. Caractéristiques du Delta Intérieur du Niger

Pour rappel, le bassin versant du fleuve Niger recense de nombreux écosystèmes d'eau douce d'importance internationale. Ceux-ci incluent des parcs nationaux (comme le parc du W au Burkina Faso et Niger) et de nombreuses zones protégées. Le World Wildlife Fund (ABN, 2007) a notamment recensé dix-neuf aires d'importance biologique pour la conservation des poissons, trente-cinq pour les oiseaux et vingt-six pour les autres vertébrés. Ces sites ont été désignés car ils sont favorables à certains taxons (oiseaux d'eau, poissons, vertébrés) et aux processus hydrologiques et écologiques.

Parmi ceux-ci, le DIN constitue une zone prioritaire, compte tenu de son importance internationale. Ce site est le 3^e plus grand site classé au titre de la convention RAMSAR des zones humides (4 119 ha classés en 2004). Il regroupe cent-trente-huit espèces et sous-espèces de poissons dont au moins vingt-quatre sont endémiques, ainsi que trois à quatre millions d'oiseaux d'eau migrateurs et résidents dont les colonies les plus importantes d'Afrique de hérons et cormorans nicheurs. Soumis à de fortes pressions humaines, les populations de reptiles comme le varan (*Varanus niloticus*) et le python (*Python sebae*) ont été fortement réduites. Le crocodile (*Crocodylus niloticus*) serait menacé d'extinction sur ce site. Les mammifères dépendants de ces habitats humides ont également souffert, même si des populations de lamantins d'Afrique de l'Ouest et d'hippopotames existent encore. Les antilopes ont aussi été fortement décimées par les sécheresses du passé, le commerce de gibier et la compétition pour le fourrage avec les troupeaux. Seule une petite population des gazelles (*Gazella rufifrons*) serait toujours présente mais peu d'information existe. De même, plusieurs espèces recensées en 1997 ne furent plus observées lors de campagnes de terrain entre 1998-2004 et peu de données existent sur le statut d'espèces comme les hyènes (*Hyaena hyaena* et *Crocuta crocuta*), le Serval (*Felis serval*) ou certaines loutres (*Lutra maculicollis*, *Aonyx capensis*) (Wymenga *et al.*, 2002 ; Zwarts *et al.*, 2005). Les réductions de crue rassemblent ces individus sur des zones plus réduites, augmentant leur vulnérabilité à l'exploitation humaine.

En outre, le DIN abrite une population humaine bien plus importante que les environnements secs environnants, avec une densité de 25 habitants/km². Plus d'un million d'éleveurs, pêcheurs et agriculteurs vivent grâce au formidable potentiel agro-sylvopastoral et halieutique de cette vaste plaine d'inondation. Il héberge des centaines de milliers de bovins, ovins et caprins et reçoit chaque année cinq millions de têtes de bétail venant du Mali, Burkina Faso et Mauritanie pour profiter de ses bourgoutières. Les pêches permettent de capturer entre 40 000 et 130 000 tonnes de poissons.

Contrairement à d'autres zones riveraines du fleuve, l'homme est peu intervenu directement sur cette zone, mis à part autour de l'Office du Niger (De Noray, 2003). Cette zone humide subit les influences du climat qui modifie depuis toujours l'ampleur de la crue et par conséquent les services écosystémiques. Les grandes sécheresses à partir de 1974 dans le Sahel ont bousculé les dynamiques d'inondation (étendue, durée, hauteur de la crue). Poncet et Troubat (1994) estiment que la crue max aurait atteint 36 100 km² dans les années 1955-1965 lors des années de fortes pluies. D'autres estiment le maximum de crue autour de 25 000 km² (Orange *et al.* 2002), ce qui contraste

toujours avec les 12 400 km² régulièrement inondés entre 1970 et 1990 selon Poncet et Troubat (1994). Inversement, le retour des grandes crues (par ex. 1994) a également causé beaucoup de dégâts suite à l'installation progressive des populations dans les parties basses du DIN, occasionnant ainsi pertes de récolte, bétail, villages et personnes (notamment à cause des épidémies de choléra). Le barrage de Sélingué à plus de 600 km en amont modifie aussi les écoulements du fleuve. Il fournit quelques lâchers en saison sèche (pour l'électricité de Bamako notamment) mais surtout, son stockage réduit l'ampleur maximale de la crue et des services associés. Les aménagements proposés dans le cadre du Plan d'Action pour le Développement Durable (PADD) de l'Autorité du Bassin du Niger, notamment le développement de barrages et l'augmentation de prélèvements agricoles, pourront modifier considérablement les écoulements du fleuve et l'inondation dans la zone du DIN. Ces aspects sont discutés au chapitre 4.6.4.

2.2.1. Le réseau hydrographique

Ce chapitre repose essentiellement sur les résultats de recherche présentés dans l'article de Zaré *et al.* (2016) et l'ouvrage de Ferry *et al.* (2012).

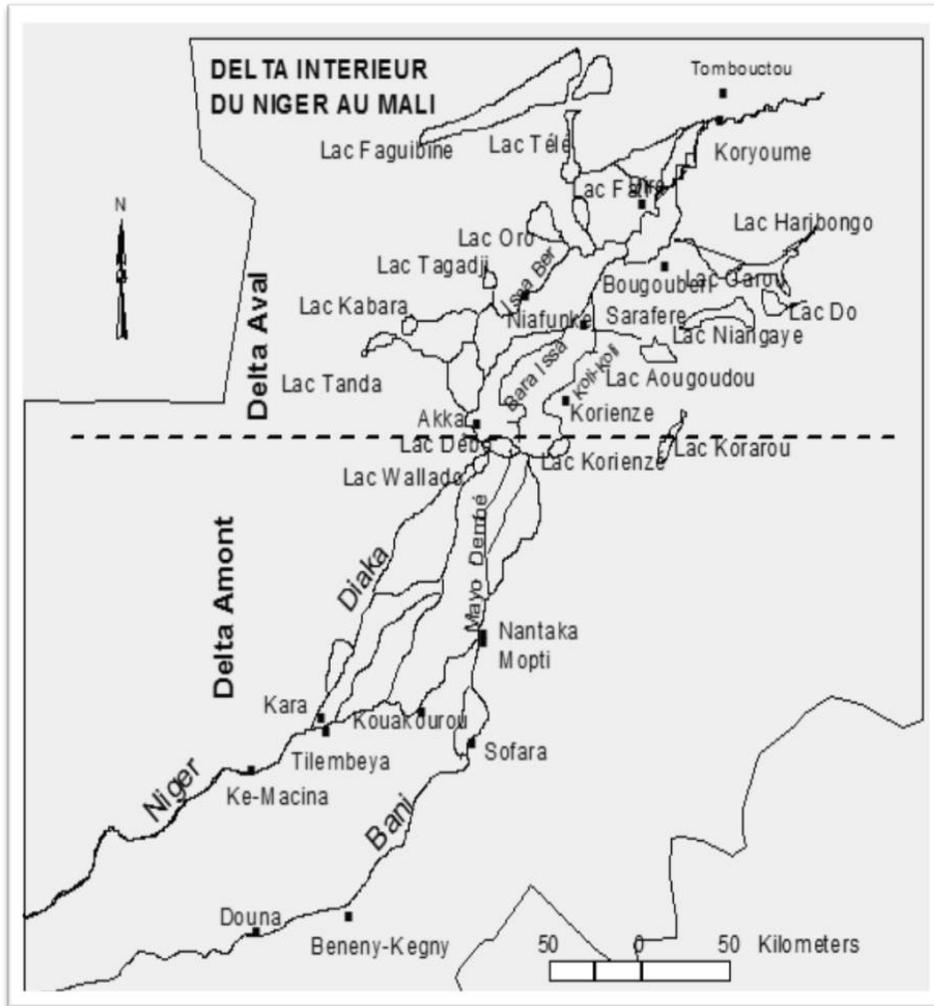


FIGURE 6 : LE RESEAU HYDROGRAPHIQUE DU DELTA INTERIEUR DU NIGER (IN MARIKO, 2004)

En aval de Markala pour le Niger et de Douna pour le Bani, le réseau fluvial entre dans une immense plaine d'alluvions quaternaires et actuelles. Sa sortie se situe à Koryoumé, port fluvial de Tombouctou. La zone inondable forme un grand parallélogramme d'axe sud-ouest à nord-est de 400 km de longueur et 125 km de largeur connu sous différents noms : delta central, cuvette lacustre, cuvette intérieure, ou Delta Intérieur du Niger (DIN). Géographiquement, le DIN correspond à l'extension maximale des eaux de crue et des lacs périphériques. Il est limité :

- à l'est et au sud, par les reliefs du plateau de Bandiagara,
- à l'ouest, par le "delta mort", zone de dépôts anciens au-dessus de l'actuel delta et
- au nord, par une série de dunes orientées est-ouest.

Les superficies inondées varient selon l'hydraulicité de l'année et peuvent atteindre jusqu'à 40 000 km². L'inondation dépend de la pluviométrie des bassins supérieurs du Niger et du Bani, les pluies locales ne contribuant que pour 5 à 10% des débits (Mahé, 2009).

La morphologie du DIN est constituée de deux entités principales (Gallais, 1967; Picouet *et al.*, 2002). On distingue le delta amont, ou cuvette sud, et le delta aval, ou cuvette nord (Figure 6).

Le delta amont s'étend des entrées du DIN (Ké-Macina sur le Niger et Douna sur le Bani) jusqu'aux lacs centraux (Wallado – Débo - Korientzé). Les principaux axes d'écoulement sont le Niger, le Bani qui forme la mésopotamie Niger-Bani (axe Tilembeya - Beneny-Kegny - Mopti) et le Diaka. Le Diaka, principal défluent du Niger, prend naissance sur la rive gauche et rejoint les eaux du Niger-Bani dans le système lacustre Walado-Débo. Le delta amont se caractérise par de nombreux défluent et mayos (bras d'eau libre) et par la présence de nombreuses mares et chenaux creusés ou sur-creusés de façon artisanale.

Le delta aval se déploie des lacs centraux à la sortie du DIN (Koryoumé). On distingue trois axes drainants à l'aval du lac Débo (Olivry 1995). A l'ouest, le bras principal du Niger, l'Issa Ber ; ensuite le Bara-Issa, bras central qui rejoint l'Issa Ber à 16 km en amont de Diré ; le troisième bras est le Koli-Koli situé à l'est du Débo qui alimente le lac Korientzé et rejoint le Bara-Issa aux environs de Saraferé. De part et d'autre des deux rives du delta aval, existent de grands lacs périphériques. En rive droite, il y a les lacs Korientzé, Korarou, Aougoundou, Niangaye, Do, Haribongo et Garou. En rive gauche, il y a les lacs Tanda, Kabara, Horo, Fati, et le système Télé-Faguibine.

Les différents éléments de l'hydrosystème du DIN lui confèrent un fonctionnement unique et complexe.

2.2.2. Le régime climatique

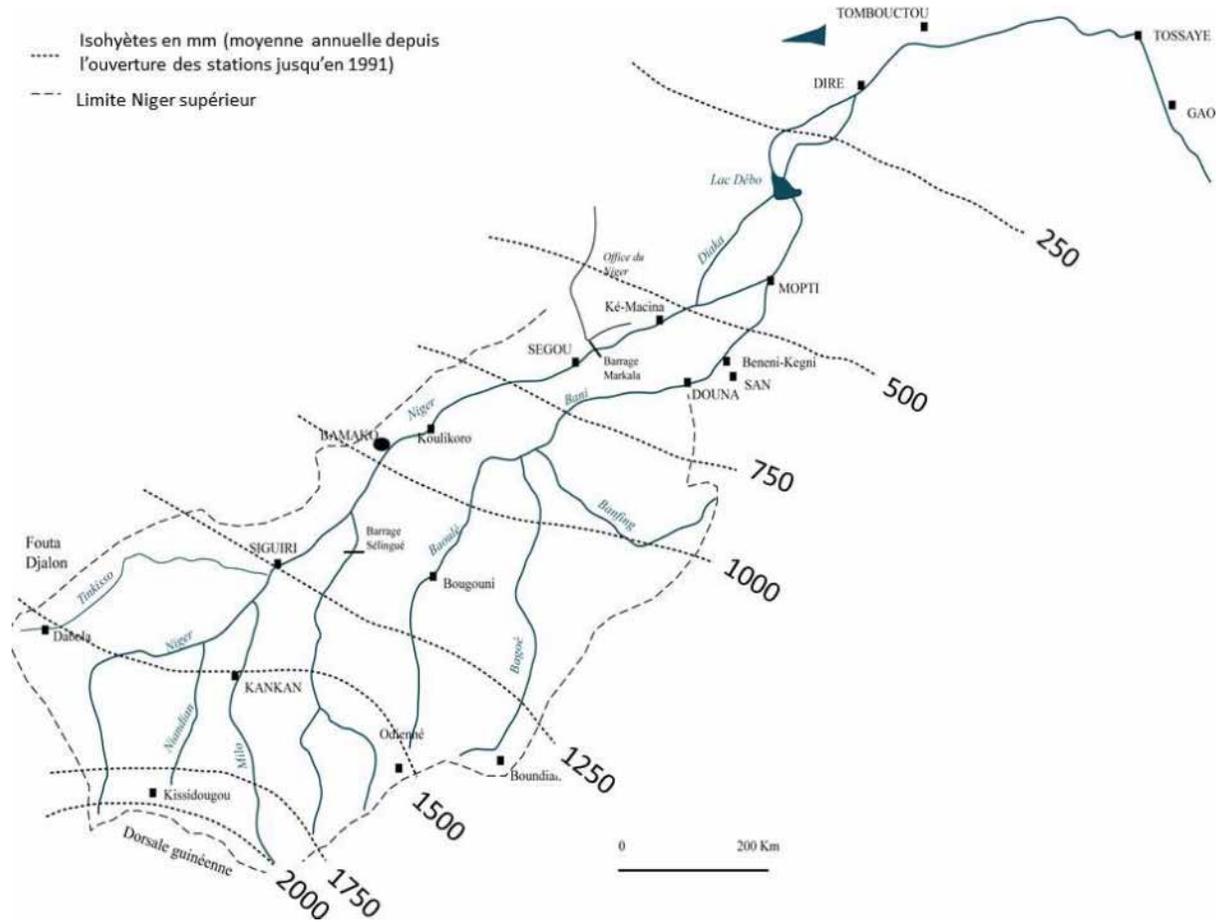


FIGURE 7 : ISOHYETES MOYENNES (DEPUIS L'OUVERTURE DES STATIONS JUSQU'EN 1991) DU NIGER SUPERIEUR ET DU DELTA INTERIEUR DU NIGER (IN BOUARE, 2012)

De l'entrée à la sortie du DIN, on distingue deux zones climatiques (Figure 7).

Une zone, qui couvre le delta amont, à climat tropical semi-aride (climat sahélien) correspondante à la zone comprise entre les isohyètes 700 et 300 mm, qui englobe une zone de transition à nuance soudano-sahélienne entre les isohyètes 700 et 500 mm. Le climat est caractérisé par la longueur de la saison sèche et une courte durée de la saison des pluies qui s'étale sur trois à quatre mois (juin- juillet à août-septembre), avec une moyenne de trente jours de pluies par an, et une amplitude thermique annuelle forte (environ 12°C).

Une zone à climat semi-aride (climat sub-saharien) entre les isohyètes 300 et 150 mm. Elle couvre la zone des lacs (delta aval) jusqu'au nord de la région de Tombouctou. Le climat se caractérise par des précipitations très irrégulières qui tombent sous forme de tornades en rapport avec la faible épaisseur de la mousson. Le régime thermique ne

connaît qu'un seul maximum alors que partout ailleurs au Mali il en possède deux. L'amplitude thermique annuelle moyenne forte (environ 16°C) est très inférieure à l'amplitude thermique journalière moyenne en hiver.

2.2.3. Le fonctionnement hydrologique

2.2.3.1. LES ELEMENTS DU REGIME HYDROLOGIQUE

Le delta amont

Les principaux éléments du régime hydrologique sont issus des Monographies du fleuve Niger (Auvray, 1960; Brunet-Moret *et al.*, 1986).

La zone du DIN ne peut être dissociée du Niger Supérieur et du Bani. En effet, le Niger à Koulikoro (300 km en amont du DIN) contrôle la totalité des apports du bassin amont du Niger pour une superficie estimée à 120 000 km² (Figure 8). A Ké-Macina commencent les plaines d'inondation du DIN et la station de Ké-Macina mesure les volumes d'eau à l'entrée du DIN sur le Niger.

De Koulikoro à Ké-Macina, différents facteurs influencent le régime du Niger : les apports de la pluviométrie locale, les prélèvements de l'office du Niger et l'évaporation. Nous pouvons distinguer deux sous-sections sur le bief Koulikoro – Ké-Macina : Koulikoro - Kirango (200 km) et Kirango - Ké-Macina (200 km). Les apports de la pluviométrie locale se font sur la section Koulikoro - Kirango pour un bassin intermédiaire de 17 000 km² où s'effectuent les prélèvements de l'Office du Niger. Ces prélèvements représentent en moyenne 10% des apports en eau du Niger à Koulikoro mais peuvent aller jusqu'à 80% en période d'étiage (Zwarts *et al.*, 2005). Sur la section Kirango – Ké-Macina, les apports par ruissellement sont nuls à cause de l'étroitesse du bassin versant et des contre-pentes perpendiculaires aux rives. De Kirango à Ké-Macina, le fleuve s'élargit, occasionnant des débordements latéraux pendant les hautes-eaux et induisant une augmentation de l'évaporation. Aussi, pendant l'étiage, il y a un renforcement des débits par drainage et restitution naturelle des zones inondées et de la nappe quand le débit à Kirango devient inférieur à 1 800 m³/s. Ceci peut doubler ou même tripler les débits d'étiage à Ké-Macina. Le débit moyen transitant à Ké-Macina entre 1952 et 1990 est de 1 207 m³/s (Olivry *et al.*, 1995), soit un volume de 38 km³ par an.

A 45 km en aval de Ké-Macina, le défluent Diaka dont la station de référence est Kara reçoit un tiers du volume d'eau écoulé à Ké-Macina. Les deux tiers restants transitent par Tilembeya, station située sur le Niger après la diffluence du Diaka. Tout comme à Ké-Macina, les débits d'étiage peuvent être triplés à Tilembeya par effet de drainage des zones inondées et restitution de la nappe au fleuve. A Ké-Macina, Kara et Tilembeya, Auvray (1960) et Brunet-Moret *et al.* (1986) observent un laminage des crues à partir d'une certaine valeur. Ce laminage des crues serait dû aux déversements latéraux sur les plaines d'inondation dont les superficies croissent avec les cotes atteintes et en limitent les maximums de crue. En plus des débordements latéraux, le laminage des crues s'explique par la proximité de la diffluence du Diaka à Ké-Macina et par la présence de marigots jouant le rôle de seuil déversant qui absorbe la quasi-totalité des surplus à Tilembeya. Cette caractéristique importante est qualifiée d'*effet de seuil*. La valeur-seuil oscille autour de 5 300 m³/s à Ké-Macina, 3 300 m³/s à Tilembeya et 1 700 m³/s à Kara (Auvray, 1960 ; Brunet-Moret *et al.*, 1986).

Les apports en eau du Bani au DIN sont contrôlés par la station de Douana pour un bassin collecteur de 102 000 km². Sur la période 1953-1990, Olivry *et al.* (1995) estiment les apports moyens du Bani à 419 m³/s soit un volume moyen de 13.2 km³ par an. Ce volume représente environ le tiers des volumes transitant à Ké-Macina. La station de Mopti mesure la combinaison des apports du Bani et du Niger. Dès le mois de septembre, on observe un écoulement du Bani vers le Niger jusqu'au moment où le Bani retourne dans son lit mineur. La mésopotamie dont la superficie avoisine 7 000 km² serait principalement alimentée par les eaux du Bani. En période de hautes-eaux, vers la cote de 4.3 m, le débit d'apport du Niger devient constant (influence amont des zones d'inondation et des débordements) et les apports du Bani constituent le sommet de la crue à Mopti. Pendant l'étiage, il y a un apport de la nappe au débit du fleuve.

Les eaux du Diaka et du Niger-Bani se rejoignent dans le système lacustre Wallado-Débo qui constitue le point de passage des écoulements provenant du bassin supérieur du Niger.

Le delta aval

À l'aval du lac Débo, le bras principal du Niger, l'Issa Ber, achemine 80 à 87% des eaux du lac Débo, le Bara-Issa 10 à 12% et le Koli-Koli 3 à 10% des sorties du lac. Ces différents bras participent à l'alimentation des lacs périphériques.

Le Koli-Koli alimente le lac Korientzé. Le Bara-Issa alimente les lacs Niangaye et Aougoundou. Le lac Aougoundou alimente Kobarou en plus des apports locaux. Le lac Niangaye alimente le lac Do quand il atteint une capacité de 800 Mm³. A partir de 600 Mm³, le lac Do se déverse dans le Garou, qui se déverse à son tour dans le Titolaouen et le Gakoré. Le Gakoré alimente le Tinguéré et le Titolaouen se déverse dans le lac Haribongo et Kabongo.

L'Issa Ber alimente le système lacustre de rive droite.

Le lac Faguibine est alimenté par le marigot de Goudam et par le lac Télé qui est alimenté par deux canaux, le Kondi et le Tassakane. Les volumes dérivés pour le remplissage des lacs périphériques ne sont pas restitués au système deltaïque et sont lentement évaporés. Du fait de la présence des lacs périphériques et des températures élevées, le delta aval prélève au réseau hydrographique cinq fois plus d'eau par unité de surface que le delta amont (Mahé *et al.*, 2002).

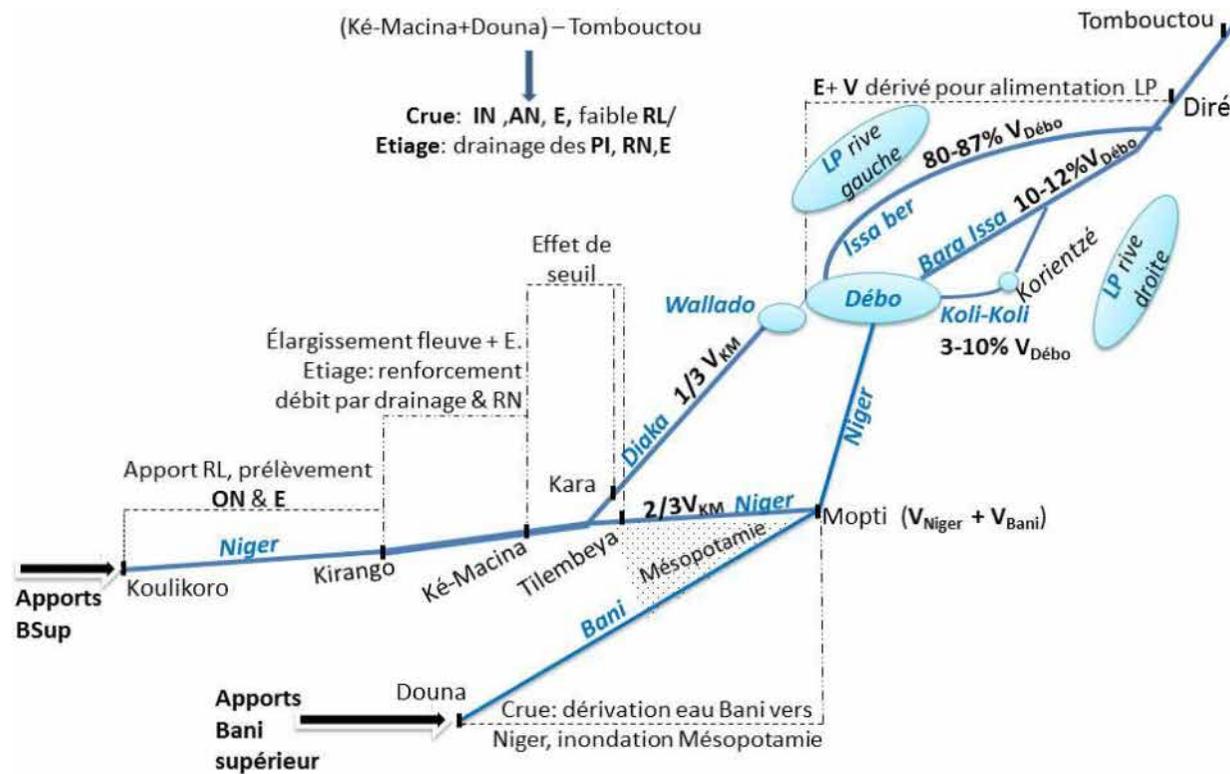
Les écoulements des trois axes transitant les volumes du Débo sont réunis à Diré après la confluence de l'Issa Ber et du Bara Issa. A Diré, les principaux facteurs intervenant dans la composition du maximum de crue sont les apports du Niger et du Bani à Mopti, les pertes en eau au niveau de la cuvette. Il y a également l'état de remplissage résiduel de la cuvette à la fin de la crue précédente (retard ou avance de la crue par rapport au degré de tarissement de la réserve).

Les principaux facteurs du régime des différents biefs de la cuvette sont résumés sur la Figure 8 et le système de remplissage des lacs périphériques sur la Figure 9.

Olivry (1995) synthétise les éléments du régime hydrologique annuel du DIN en deux périodes : une période de progression de l'inondation des plaines avec un piégeage des volumes débordés puis une période de restitution des volumes.

Le piégeage des volumes correspond à des pertes comme l'infiltration, l'évaporation et surtout un stockage de volumes importants dans les plaines d'inondation. Correspondant à la période de crue du fleuve Niger et de son tributaire le Bani, le stockage des volumes atteint son maximum entre septembre et octobre puis diminue rapidement entre octobre et novembre.

La restitution des volumes correspond à un déstockage partiel des volumes piégés, avec un volume résiduel constitué par le bilan évaporatoire de la région et le stockage dans les lacs périphériques : c'est la vidange des plaines d'inondation encore appelé décrue. Les mois de très forte restitution vont de décembre à février. Le déstockage ne concerne que les zones d'inondation en liaison avec le réseau hydrographique ; il y a progressivement coupure entre certaines zones basses ou mares et le fleuve.



Bsup : Bassin Supérieur, **ON**: Office du Niger, **E**: Evaporation, **IN**: Inondation des plaines, **AN**: alimentation de la Nappe, **RN**: Restitution de la Nappe, **RL**: Ruissellement bassin Locale, **PI**: Plaines Inondées, **V_{KM}**: Volume charrié à Ké-Macina, **V**: Volume, **LP**: Lacs Périphériques

FIGURE 8 : SCHEMA DU FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE DU DELTA INTERIEUR DU NIGER (IN ZARE, 2015)

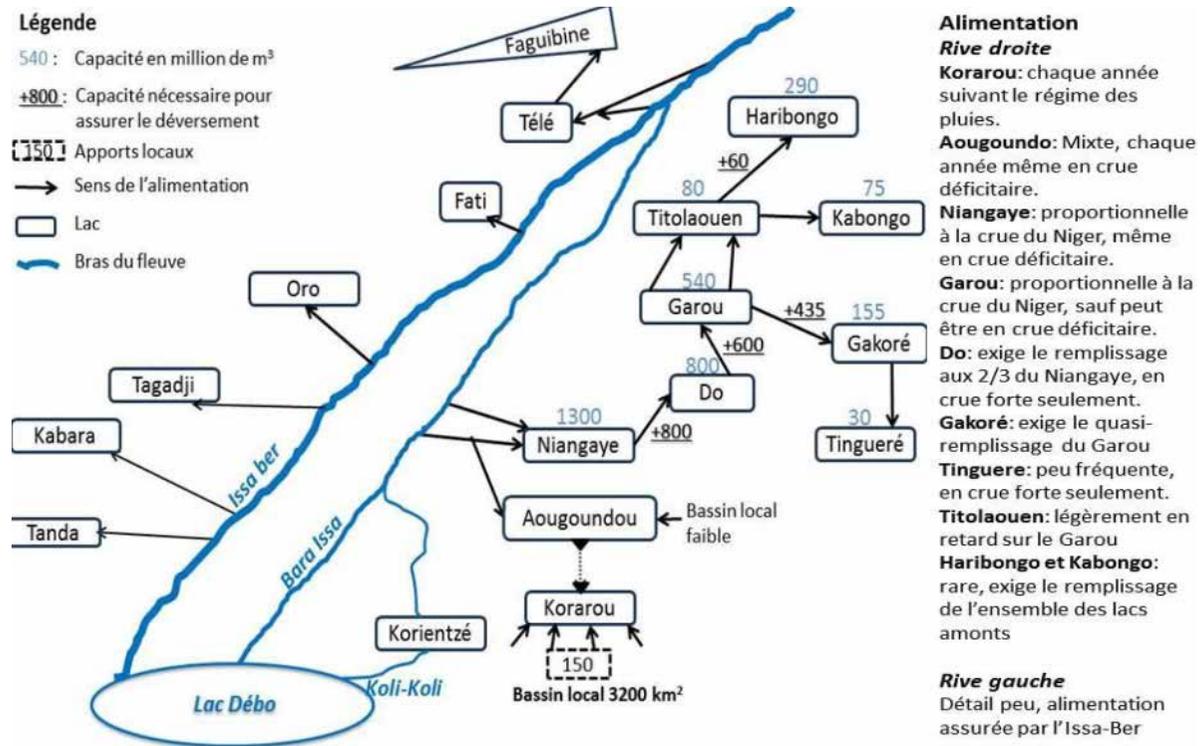


FIGURE 9 : SCHEMA DU SYSTEME D'ALIMENTATION DES LACS PERIPHERIQUES DU DELTA INTERIEUR DU NIGER (IN ZARE, 2015)

2.2.4. Milieu humain et activités

Il existe dans le DIN une diversité ethnique où le lien ethnique-milieu demeure important. Il faut noter qu'en l'absence de toute organisation politique durable du DIN, les vagues successives de populations attirées par ses possibilités n'ont pas été fondues progressivement. Ainsi, à l'intérieur d'un même village peuvent exister plusieurs groupes (Diakité, 1986).

D'après Jean Gallais (1962), les Bozo sont les premiers autochtones. Ils sont considérés comme une entité ethnique et comme une entité socioprofessionnelle pratiquant la pêche. A la suite du dessèchement du Sahara et, plus tard, de la décadence de l'empire du Ghana au XI-XIIème siècles, des Soninké sont venus s'ajouter à ce vieux fonds. Les Soninké agriculteurs ont probablement été attirés par les potentialités du DIN.

Sous l'Empire du Mali (1250-1450), on assiste à l'émergence des groupes Marka et Somono (Gallais 1984). Les Marka ou « *mali-ka* » (qui signifie « *homme du Mali* »), représentent une communauté marchande et comportent des agriculteurs. Les Marka, créateurs et maîtres de la riziculture deltaïque, cultivent la partie profonde de la strate rizicole, terrains submergés sous une nappe de deux à trois mètres d'eau et détiennent la maîtrise des terres rizicoles (Gallais, 1962). Les Somono issus des populations Bozo locales, effectuent les transports le long des fleuves et pêchent dans les zones peu profondes. Cette époque a vu aussi l'installation des Dogon et des Bobo (Fay 1995), qui se tiennent le plus souvent à l'écart de la zone inondée et cultivent les sables des terrasses sèches (Gallais, 1962).

A l'Empire du Mali succède le royaume Songhaï pendant la période 1450-1590. Les Songhaï s'installent dans le DIN et cultivent les rives du fleuve (Gallais, 1962). Le DIN va connaître un profond brassage des populations et la plupart des groupes ethniques du Soudan occidental et central s'y côtoient (Diakité, 1986). En 1591 succéderont au royaume Songhaï, les marocains puis, au XVII-XIXème siècle, les Arma issus du métissage des Marocains et des Songhaï.

C'est probablement à partir du XIVème siècle que les Peul venant du Fouta Toro dans la vallée du fleuve Sénégal, s'installent dans le DIN (Bâ et Daget 1984). Les Peul, à la recherche de pâturages pour les troupeaux, soumettent vite les groupes locaux. Ils asservissent ainsi les agriculteurs (Barrière et Barrière 1995), donnant ainsi naissance à un groupe ethnique esclave, les Rimaïbé. Les Rimaïbé cultivaient des céréales pour le compte des Peul, afin que ces derniers puissent se consacrer à leur mobilité saisonnière.

Parallèlement à l'installation des Peuls, le royaume Bambara de Ségou avait mis sous sa tutelle entre 1710 et 1750 l'ensemble de la zone centrale du DIN et de ses régions voisines. Les Bambara sont des agriculteurs des terres sableuses exondées des bordures du DIN.

Les Maure et les Touareg sont des éleveurs et étrangers à toute référence historique mandingue (Gallais 1962). Les Bella, captifs des Maure et des Touareg sont des agriculteurs. Il y a aussi les Toucouleur, qui mirent fin au règne des Peuls en 1862.

De façon historique, les Peul sont des éleveurs ; les Marka, Songhaï, Bambara, Rimaïbé, Dogon et Bella sont agriculteurs ; les Bozo et les Somono, des pêcheurs (Gallais, 1962 ; Crane *et al.*, 2011).

Ces trois groupes, les agriculteurs, les pêcheurs et les éleveurs, sont les trois principaux groupes socioprofessionnels qui tirent leurs moyens de subsistance de l'écosystème du DIN. Ils exploitent le même espace mais à des échelles d'espace et de temps différentes.

L'agriculture du DIN se divise entre les cultures sèches sur les parties non inondables et la riziculture sur les parties inondables. La riziculture est la culture prédominante, Parmi les systèmes rizicoles, on distingue quatre types (Figure 48):

- la riziculture irriguée en maîtrise totale de l'eau par pompage,

- la riziculture en submersion contrôlée avec maîtrise partielle de l'eau aux moyens de digues et prises d'eau,
- la riziculture pluvio-fluviale à submersion libre ou traditionnelle ; c'est le système rizicole le plus ancien dans le DIN qui occupe le plus d'espace et
- la riziculture dite pluviale qui est plutôt une riziculture de bas-fonds qui s'est développée récemment dans les parties dites exondées du DIN mais où il est possible de cultiver du riz avec l'eau de pluie et le ruissellement des versants des bas-fonds.

Dès le retrait progressif des eaux des superficies inondées, le DIN offre aussi la possibilité de pratiquer la culture de décrue, essentiellement du sorgho, surtout développée dans la région des lacs et dans la partie aval.

L'activité de pêche dans le DIN fournit 80% de la production halieutique du Mali. On trouve deux types de pêcheurs, les migrants et les sédentaires. La pêche collective existe également à l'échelle du village. Elle est toujours précédée d'une mise en défens et se pratique à pied et à l'aide de filet à deux mains dans le fleuve et les mares (Durand, 1994).

En plus d'être le domaine de l'eau, le DIN est le domaine de l'herbe et, de par la richesse de ses pâturages, il est le domaine par excellence de l'élevage. Les pâturages du DIN ont l'avantage d'un calendrier de production décalé par rapport aux prairies semi-arides environnantes. Pâturages de contre-saison, ils aident à la survie du bétail. Les pâturages inondables sont constitués de bourgoutières (*Echinochloa stagnina*), de vétiveraies et d'oryzaies (Figure 10). La principale source d'alimentation du bétail est le bourgou qui pousse dans les zones profondes et qui a une capacité de charge potentielle quatre fois supérieure aux autres types de végétation. Le DIN est fréquenté chaque année par environ deux millions de têtes de bovins et autant d'ovins et de caprins. Les pâturages sont exploités lors de la transhumance des troupeaux qui représentent 20% du cheptel national.

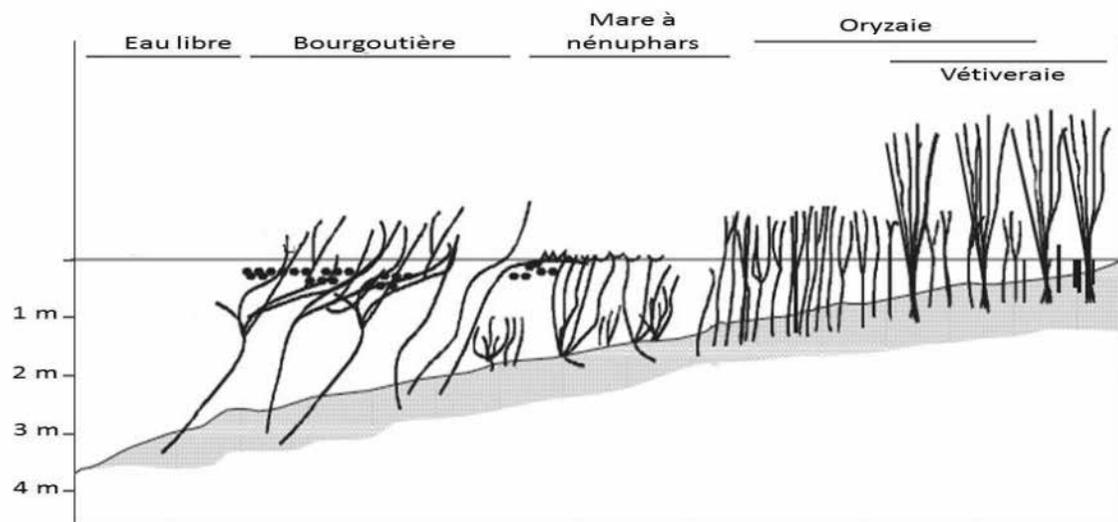


FIGURE 10 : REPARTITION SCHEMATIQUE DES VEGETAUX DANS UNE PLAINE INONDEE LORS DE LA CRUE (IN ZARE, 2015)

2.2.5. Dynamique spatio-temporelle et activités

Au cours d'une même année et selon les différentes périodes (montée de la crue, hautes-eaux, décrue et étiage), un même site peut successivement être une rizière, une pâture ou un lieu de pièges à poisson (Poncet, 2002). La fin de l'étiage et l'installation des premières pluies, généralement en mai, correspondent aux activités de semis pour les agriculteurs et à la sortie des animaux du DIN pour les éleveurs vers juin. Pendant la crue et les hautes-eaux, les activités se limitent à l'entretien des rizières et à la préparation du matériel de pêche à savoir pirogues et filets. La décrue marque la période de récolte du riz (novembre-décembre), le début des cultures de décrue, le retour des animaux dans le DIN et le début de la campagne de pêche qui se poursuivra jusqu'à la fin de l'étiage et souvent jusqu'à la période de montée de la crue.

La pêche collective a essentiellement lieu en période d'étiage quand le fleuve et les mares sont en cours d'assèchement. En général, les pêcheurs ne cherchent pas à capturer les poissons lorsque ceux-ci sont dispersés dans les plaines pendant les hautes-eaux. Ils préfèrent attendre que le cycle hydrologique les « remette à leur disposition » un peu plus tard, en période de décrue et d'étiage (Kodio *et al.*, 2002). Les grands pêcheurs sont généralement migrants (« nomades du fleuve »). Dès novembre-décembre ils descendent vers le delta amont où la décrue est déjà amorcée puis suivent l'onde de décrue en se déplaçant vers le delta aval.

Tout comme le pêcheur, le calendrier de l'éleveur est fonction de la décrue. Dès qu'il cesse de pleuvoir dans les zones sèches et que les pâtures y sont épuisées, les éleveurs entreprennent le retour dans le DIN. Les animaux rentrent dans le DIN par Diafarabé, dans le delta amont, et remontent vers le nord au fur à mesure que les eaux se retirent. Le DIN est non seulement une aire de production mais aussi un territoire de migrations et de transhumances à l'intérieur de ses propres limites et avec son voisinage non inondable (Poncet, 2002). La Figure 11 schématise l'utilisation des ressources du DIN en fonction de la dynamique spatio-temporelle de la crue.

Le système de gestion des ressources du DIN est aussi complexe que l'articulation et la juxtaposition des activités dans le temps et l'espace.

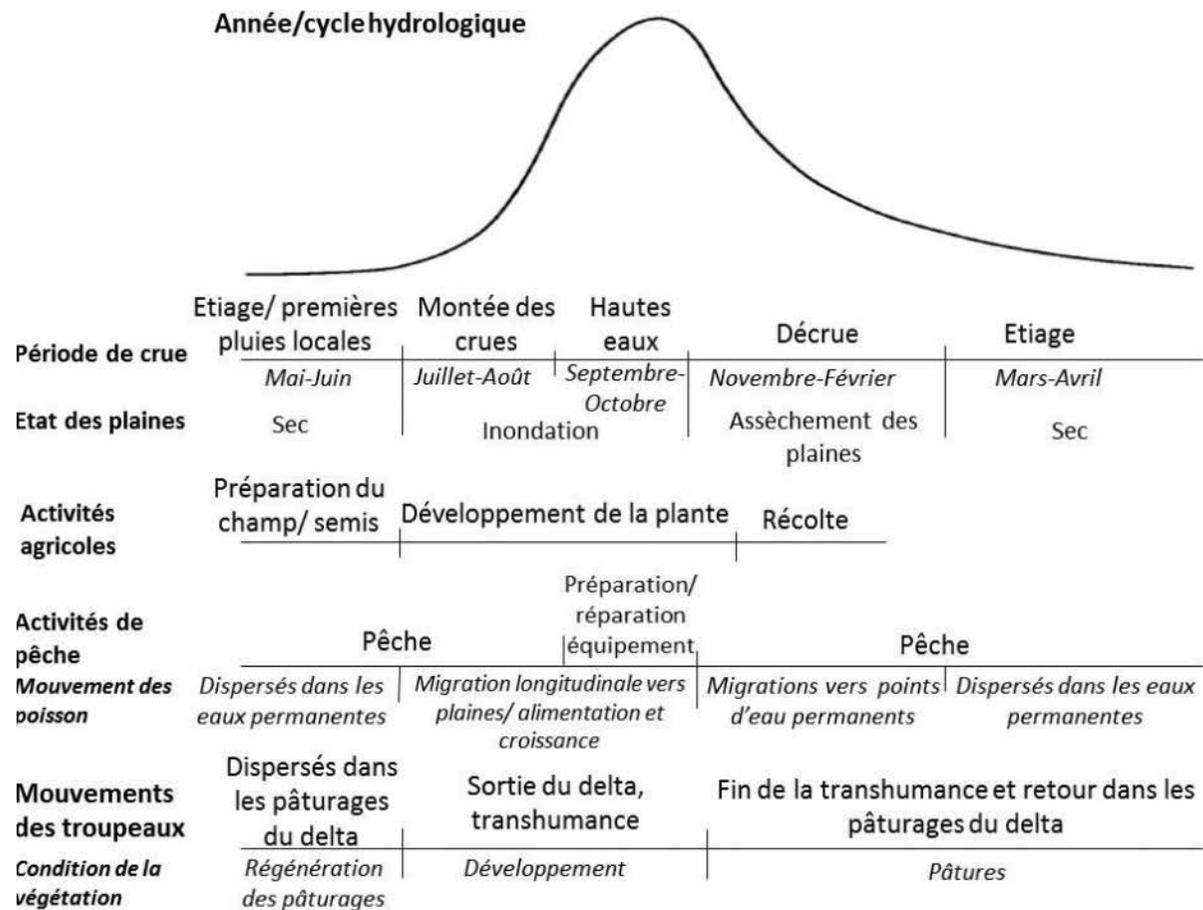


FIGURE 11 : CYCLE HYDROLOGIQUE ET ACTIVITES DANS LE DELTA INTERIEUR DU NIGER (IN ZARE, 2015)

2.3. Caractéristiques du Niger Moyen

Ce chapitre repose sur l'ouvrage de Ferry *et al.* (2012).

En aval du DIN, entre Koryoumé, port fluvial de Tombouctou, et la frontière malo-nigérienne, le Niger coule dans la partie dite non contributive du bassin versant. Même si, lors de la saison des pluies, certains petits bassins versants peuvent localement connaître des crues brutales, les écoulements proviennent presque exclusivement du DIN par où transitent les eaux des bassins versants du Niger Supérieur et du Bani.

Sur le bief Taoussa-Ansongo, les alluvions quaternaires s'étalent dans une vallée dont le lit majeur a une largeur moyenne de 4 km et reposent sur la série sédimentaire du Continental Terminal ; les falaises précambriennes du Gourma bordent le lit majeur en rive droite. En rive gauche, les confluences des vallées fossiles issues de l'Adrar des Iforas, de l'Oued Essalaoua en amont de Bourem, du Tilemsi en amont de Gao, sont obstruées par des dépôts éoliens.

Les difficultés rencontrées par la navigation fluviale sur le Niger Moyen (également dans le DIN) depuis une trentaine d'années ont induit l'idée que le transport des sables par charriage avait considérablement augmenté, provoquant le dépôt de bancs sableux et l'ensablement de biefs autrefois navigables. L'ensablement du fleuve, lié à la concomitance d'une double dynamique, éolienne et de ruissellement, est incontestable. Mais, il est assez subjectif de penser qu'il y a plus de sables transportés par le fleuve aujourd'hui parce que l'on voit dans son lit un paysage de bancs de sables pendant six mois au lieu de trois, ou que les bancs de sables ont engraisé parce que la navigation n'est plus possible que quatre mois au lieu de six. Une autre raison de cette perception de l'ensablement du fleuve tient à ce que la tranche d'eau empruntée par la navigation est moins épaisse du fait de la faiblesse des crues. En effet, les bancs de sable se déplacent et leur cartographie change au cours des décennies, entraînant ici ou là des nuisances dans les conditions d'accès fluvial à certains villages.

Enfin, soulignons que le projet de barrage de Taoussa, dont la première pierre a été posée en 2010, se situe sur le Niger Moyen malien.

2.4. Remarques et conclusions

Cette partie descriptive du bassin versant du fleuve Niger et de ses sous-bassins ne s'est pas limitée qu'à sa seule partie malienne : la partie guinéenne a été intégrée car elle est indissociable et indispensable pour la compréhension de tout ce qui se passe à son aval.

La profondeur de la description du bassin du fleuve Niger n'est pas la même tout le long de son fleuve, mettant en cela en avant le degré d'importance que l'on donne (ou que l'on a donné), à tort ou à raison, à certaines parties du fleuve plutôt qu'à d'autres. Il est important de pouvoir mener des travaux qui décrivent l'ensemble du bassin versant avec la même finesse d'information.

Les informations présentées sont majoritairement issues de travaux menés ou de travaux vérifiés par les auteurs de la présente étude. Elles fournissent un instantané à un moment donné, dans un lieu donné. Ainsi, d'autres cartes, figures et/ou tableaux d'autres sources auraient pu être présentés. Les auteurs ont fait ces choix car ils s'appuient sur la certitude d'une maîtrise et d'un contrôle de ce qui est présenté. Néanmoins, dans le chapitre consacré à l'occupation du sol, les résultats de deux études sont confrontés et aboutissent à des résultats apparemment différents. Les raisons de ces différences peuvent être nombreuses : le traitement d'une information spatiale peut s'appuyer sur des images de sources différentes, sur des échelles de précision différentes, sur des images de périodes différentes, sur des méthodes de traitement d'images différentes, sur des contrôles terrains très différents, sur des classifications d'occupation du sol très différentes..., sur des analyses très différentes. Comme Brandt *et al.* (2014) le suggèrent, un effort doit surtout porter sur un traitement homogène appliqué à l'ensemble du bassin versant et qui puisse être répété dans le temps. Ils indiquent également qu'une validation qualitative de ce genre de travaux ne peut se faire qu'à une échelle locale où des informations auxiliaires et une connaissance experte ont pu être apportées.

Ce chapitre sur la description du bassin versant du fleuve Niger, de type monographie hydrologique incluant aussi des aspects anthropiques, est incontournable pour mieux comprendre la transformation de la pluie en une évaporation, une infiltration et un ruissellement, et pour mieux comprendre le bilan hydrologique du bassin dans chacune de ses parties. Ceci permettra d'envisager la mise en place d'usages de la ressource appropriés pour aider au développement durable du bassin et la sécurité de sa population.

3. QUE SAIT-ON AUJOURD'HUI DU CONTEXTE HYDROCLIMATIQUE?

En termes de variabilité hydroclimatique, d'écoulement et de ressources associées, le bassin du Niger se subdivise en trois zones : la zone soudanienne qui occupe le sud du bassin, sous une ligne imaginaire passant à la latitude de Ségou, et la zone sahélienne au nord ; l'extrême nord du bassin se trouve dans une zone semi-aride à aride (zone saharienne) où la question de la ressource en eau concerne essentiellement les eaux souterraines, même si localement quelques écoulements d'orages en juillet-août peuvent créer des mares temporaires utiles pour le bétail, surtout à l'ouest des petits massifs comme l'Adrar des Ifoghas, dans la région de Kidal.

Le climat du Mali est caractérisé par l'alternance d'une longue saison sèche et d'une saison des pluies qui va de deux mois au nord à cinq-six mois au sud. Du nord au sud, on distingue trois types de climats:

- saharien (pluviométrie annuelle de 200 mm, saison des pluies entre juillet et septembre),
- sahélien (pluviométrie annuelle comprise entre 200 et 700 mm, saison des pluies entre juin et octobre) et
- soudanien (pluviométrie annuelle comprise entre 700 et 1500 mm, saison des pluies entre mai et octobre).

3.1. Mécanismes et forçages de la variabilité hydroclimatique du bassin du Niger

Le climat de la bande soudano-sahélienne d’Afrique de l’Ouest est l’un des plus complexes et des plus sensibles au monde car il résulte d’une combinaison unique de forçages externes et internes. Les sécheresses récurrentes des années 1970 et 1980 ont sérieusement entamé la résistance des socio-écosystèmes de cette région (GIEC, 2001) et interpellé la communauté scientifique sur la nécessité de mieux connaître et documenter la variabilité de la mousson africaine.

Le phénomène d’oscillation océano-atmosphérique le plus connu et qui touche le climat du bassin du Niger est El Niño (ENSO) qui influence le système mondial des moussons d’été de la Chine à l’Afrique Occidentale (Quan *et al.*, 2003). Fontaine *et al.* (2012) et Monerie *et al.* (2012) ont montré que les récents travaux menés dans le cadre de la première phase du projet AMMA (2003-2010) ont permis de confirmer le poids des températures de surface marine et des téléconnexions pour les fluctuations interannuelles et décennales tout en réévaluant l’importance de la variabilité interne de l’atmosphère.

Les principaux mécanismes impliqués dans les téléconnexions entre la Méditerranée, l’Atlantique et le Pacifique, et les précipitations en Afrique de l’Ouest sont présentés dans le Tableau 9. Cependant, Traoré et Hourdin (2012), cités par Fontaine (2012), montrent que la variabilité interne de l’atmosphère, indépendante du forçage océanique, peut moduler de façon importante celle de la mousson africaine, même à l’échelle décennale.

Forçage thermique		Mécanismes atmosphériques impliqués			Précipitations en Afrique de l’Ouest
MED plus chaude (surtout bassin Est)		Plus d’humidité disponible avec convergence des flux sur MED	Plus d’humidité advectée au Sud du Sahara par la circulation moyenne	Convergence renforcée sur le Sahel et flux de mousson plus intense	Positionnement anormalement nord de la Zone de Convergence Intertropicale avec excédent sur le Sahel
ATL plus chaud (surtout partie Est équatoriale)		Affaiblissement des gradients Océan-continent de température et de pression	Circulation de mousson affaiblie sur le continent	Moins de convergence sur le Sahel	Déficit aux latitudes sahéliennes
				Maintien de la convergence anormalement au Sud	Excédent plus au Sud sur la Basse Côte
PAC Ouest équatorial plus froid	PAC Est équatorial plus chaud	Refroidissement sur le continent maritime	Génération d’onde de Rossby	Subsidence renforcée sur le Sahel	Déficit sur Sahel central et oriental

TABLEAU 9 : PRINCIPAUX MECANISMES IMPLIQUES DANS LES TELECONNEXIONS ENTRE LA MEDITERRANEE (MED), L’ATLANTIQUE (ATL) ET LE PACIFIQUE (PAC) ET LES PRECIPITATIONS EN EN AFRIQUE DE L’OUEST (D’APRES RODRIGUEZ ET AL. (2011) CITE PAR FONTAINE ET AL. (2012))

Les travaux de Janicot *et al.* (2011) ont permis d’isoler trois principaux modes de variabilité intrasaisonnière en Afrique de l’Ouest en général et donc pour le bassin du Niger en particulier :

- Le mode « guinéen » correspondant à un dipôle d'anomalies zonales modulant la convection entre l'Afrique et l'Atlantique, centré sur 14-15 jours et répondant à la dynamique de modes atmosphériques équatoriaux vers l'est et d'interactions entre la surface et l'atmosphère.
- Le mode « sahélien » centré aussi sur 15 jours. Limitée en Afrique de l'Est équatoriale, cette anomalie convective se déplace sur le Sahel vers 15°N puis migre vers l'ouest avant de se dissiper à l'approche de l'Atlantique. Elle est marquée par une anomalie de circulation cyclonique dans les basses couches sur le Sahel générant des vents de sud, ce qui à l'est de 15°E augmente l'humidité et donc la convection. Le déplacement vers l'ouest de la structure amène la phase inverse. Ce mode explique en partie l'origine des épisodes secs et humides pendant la saison des pluies sahélienne (Roehrig, 2010).
- Des oscillations de l'ordre de 30 à 90 jours de type Madden-Julian se propageant vers l'ouest. Elles sont repérées sur l'Afrique entre le nord du Tchad et l'Atlantique en lien avec des trains d'ondes équatoriales de Rossby couplées à la convection.

Les observations intensives et les expériences numériques dédiées du projet AMMA ont permis de préciser les forçages de surface associés aux échelles interannuelle et décennale de la variabilité de la mousson ouest africaine. Les résultats ont confirmé que ceux-ci résultaient d'abord des températures de surface océanique des différents bassins intertropicaux via des téléconnexions atmosphériques et, au deuxième ordre, des interactions avec la surface continentale (albédo, eau du sol, végétation) qui induisent des effets mémoire et jouent sur la dynamique atmosphérique par des anomalies de subsidence et de vent.

Taylor *et al.*, (2011) ont cependant montré que les effets océaniques dominent les réponses des modèles car ceux-ci prennent mal en compte l'évolution interannuelle de la végétation et de l'eau du sol. Des études précédentes (Zeng *et al.*, 1999) avaient déjà mis en évidence le fait que le couplage avec la végétation continentale est nécessaire pour reproduire la variabilité interannuelle et décennale au Sahel.

Dans ce même ordre d'idées, plusieurs études (Mahé *et al.*, 2005a ; Diello, 2007 ; Paturol *et al.*, 2009) ont permis de préciser le rôle des états de surface dans la capacité des modèles à reproduire la variabilité hydroclimatique en Afrique de l'Ouest.

3.2. Variabilité climatique

La pluie et la température sont les principales variables qui déterminent le climat. Plusieurs études ont analysé les modifications en moyenne survenues sur ces variables. A notre connaissance, seuls Paturol *et al.* (1998) et Servat *et al.* (1998) ont mené un travail d'ampleur régionale qui a mis en évidence sur l'ensemble de l'Afrique de l'Ouest vers 1970 une modification du régime pluviométrique se traduisant principalement par une baisse drastique de la pluviométrie. Les auteurs ont même parlé de changement climatique. Ce phénomène a touché l'ensemble de la région mais avec une intensité différente selon les endroits analysés. Une telle étude devrait être répétée.

Le changement climatique peut aussi être perçu à travers l'analyse des événements extrêmes. Cependant, les travaux sur les événements extrêmes sont plus rares car ils nécessitent d'avoir des données journalières qui ne sont pas toujours facilement disponibles. Ils permettent également d'aborder le problème de la vulnérabilité et du risque, qui est d'actualité de nos jours.

Selon Beniston et Stephenson (2004), la définition d'un événement extrême peut être appréhendée selon trois notions fondamentales :

- celle liée à la fréquence d'apparition de l'événement, sa rareté,
- celle faisant allusion à son intensité, ce qui implique une notion de dépassement de seuil et
- celle liée à son impact environnemental ou socioéconomique, en termes de dégâts et coûts par exemple.

Selon le quatrième rapport du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC, 2007), la définition de « rare » varie, mais « [...] un événement météorologique extrême est normalement aussi rare ou plus rare que le 10^{ème} ou le 90^{ème} centile ». Cette définition se rapporte donc à un critère de statistique descriptive qui retient les 10^{ème} ou 90^{ème} valeurs qui divisent les données triées en 100 parts égales, de sorte que chaque partie représente 10% ou 90% de l'échantillon de population.

3.2.1. La pluviométrie

3.2.1.1. ÉVOLUTIONS PASSES DE LA PLUVIOMETRIE

Il est aujourd'hui admis au sein de la communauté scientifique que le contexte hydroclimatique de la région ouest-africaine a été marqué par une rupture climatique à partir des années 1970 suivie d'une sécheresse dans les années 1980. Les premiers travaux ayant mis en évidence ce phénomène ont été menés dans le cadre du projet ICCARE (Paturel *et al.*, 1998 ; Servat *et al.*, 1998) à l'échelle de l'Afrique de l'Ouest et HAPEX-Sahel (Le Barbé et Lebel, 1997 ; Lebel *et al.*, 1997) au Sahel dans la région de Niamey. À travers une analyse de séries pluviométriques de longues durées dans seize pays d'Afrique de l'Ouest et Centrale, Paturel *et al.* (1998) ont rapporté une succession de décennies humides et sèches au cours du XX^{ème} siècle avec une manifestation spatiale hétérogène. Plusieurs études ont par la suite mis en évidence une succession quasi ininterrompue d'années anormalement sèches depuis le début des années 1970 (Nicholson 2001, L'Hôte *et al.*, 2002 ; Peugeot *et al.*, 2003 ; Séguis *et al.*, 2004, Mahé *et al.*, 2005b ; Goula *et al.*, 2007 ; Omotosho, 2008, Lebel *et al.*, 2009).

À l'instar de toute la région ouest-africaine, le bassin du Niger a aussi connu cette rupture climatique intervenue dans les années 1970 comme le montre la Figure 12 qui donne l'évolution de l'Indice Standardisé des Précipitations (ISP), tel que défini par Balme *et al.* (2006).

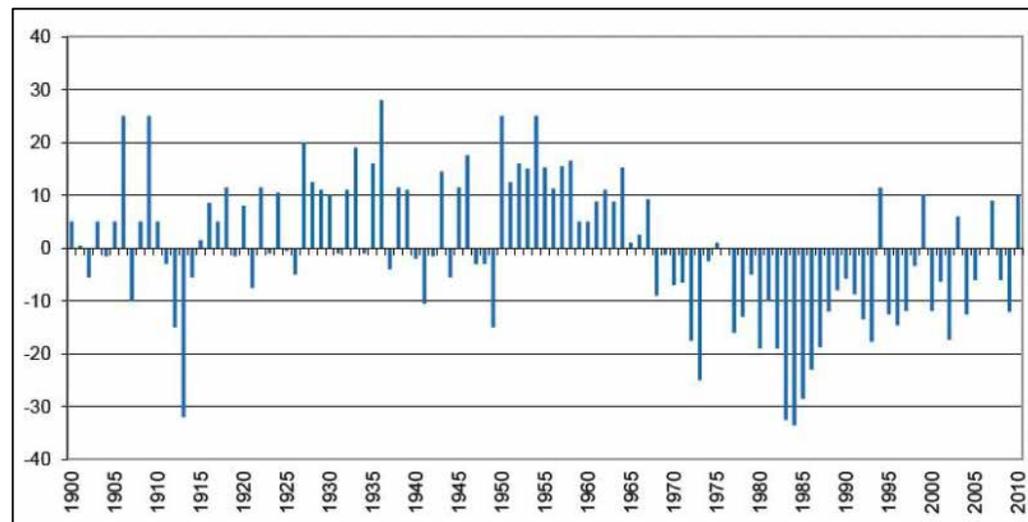


FIGURE 12 : ÉVOLUTION DE L'INDICE STANDARDISÉ DES PRÉCIPITATIONS (ISP) SUR L'ENSEMBLE DU BASSIN DU NIGER A NIAMEY DE 1900 A 2012 (IN DESCROIX ET AL., 2013A)

Sur la période 1950 à 2000, Ouédraogo (2014) et Paturel et Zorom (2014) ont caractérisé à un pas de temps plus fin les manifestations de ce changement climatique sur des stations, situées majoritairement sur le bassin du Niger amont et du DIN, à partir d'un certain nombre d'indices pluviométriques (Tableau 10 et Tableau 11).

Station	Longitude (°)	Latitude (°)
Bougouni	-7.48333	11.41667
Kieneba	-11.35	12.8
Kita	-9.48333	13.05
Koutiala	-5.46667	12.38333
Menaka	2.4022	15.9182
Mopti	-4.2	14.5
Nara	-7.28333	15.16667
San	-4.90	13.30
Ségou	-6.26667	13.45
Sikasso	-5.66667	11.31667
Tombouctou	-3.01667	16.76667

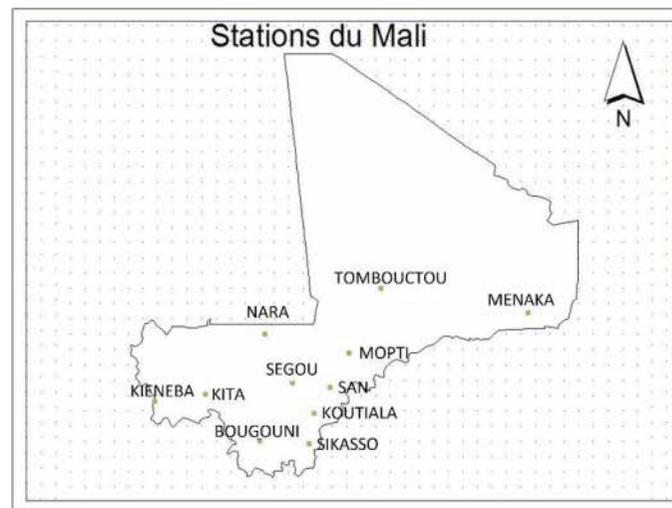


TABLEAU 10 : COORDONNEES ET LOCALISATION DES STATIONS DE MESURE

ID	Définition	Unités
RX1day	Maximal mensuel de la pluie journalière	mm
Rx5day	Maximal mensuel de 5 jours consécutifs de pluie	mm
SDII	Quotient de la précipitation annuelle sur le nombre de jours humides (pluie \geq 1mm)	mm/jr
R10mm	Nbre de jours pluie \geq 10mm	Jours
R20mm	Nbre de jours pluie \geq 20mm	Jours
Rnnmm	Nbre de jours pluie \geq nn mm	Jours
CDD	Nbre maximal annuel de jours consécutifs avec la pluie $<$ 1mm	Jours
CWD	Nbre maximal annuel de jours consécutifs avec la pluie \geq 1mm	Jours
R95p	Cumul des jours pluvieux dépassant le 95 ième percentile des jours humides ⁴	mm
R99p	Cumul des jours pluvieux dépassant le 99 ième percentile des jours humides	mm
PRCPTOT	Quantité totale de pluie des jours humides	mm

TABLEAU 11 : LISTE DE QUELQUES INDICES PLUVIOMETRIQUES ETUDIES

L'analyse traduit une diminution globale de ces indices depuis 1950 (Tableau 12). Cependant, la période 1971-2000 se distingue des périodes 1951-2000 et 1961-1990 puisque sur cette période (1971-2000), la plupart des indices liés à la pluie ne connaissent pas d'évolution notable, voire augmentent légèrement : à partir de 1990, il y a une légère reprise de la plupart des indices liés à la pluie. Les observations les plus nettes et qui touchent l'ensemble du pays sont :

- Le cumul pluviométrique annuel (PRCPTOT) a nettement diminué, même si une légère reprise s'observe depuis le milieu des années 1990 (Figure 13). Toutefois, la moyenne annuelle reste en dessous de la moyenne annuelle 1950-2000 (Tableau 13). Au cours de ces décennies, les isohyètes annuelles se sont déplacées d'une centaine de kilomètres vers le sud. La décennie 1980 apparaît comme la décennie la plus sèche jamais observée en Afrique de l'Ouest avec un paroxysme au cours de l'année 1983.
- De manière corrélative, le nombre de jours de pluie a nettement diminué, en particulier les jours de pluie où le cumul pluviométrique dépasse 10 (R10mm), voire 20 mm (R20mm) (Figure 14).
- Corrélativement aux cumuls annuels de pluies, les cumuls mensuels de pluie en fin de saison des pluies (août et septembre) ont également nettement diminué.
- Le quotient du cumul annuel de pluie divisé par le nombre de jours de pluie > 1 mm (SDII) qui traduit la hauteur précipitée moyenne par jour de pluie, n'évolue pas et reste constant dans le temps.
- Le cumul annuel de pluie et le nombre de jours de pluie par an varient dans le même sens et proportionnellement.

Stations	1951-2000							1961-1990					1971-2000				
	CDD	PRCPTOT	R10mm	R20mm	SDII	RX1day	Rx5day	CDD	PRCPTOT	R10mm	R20mm	SDII	CDD	PRCPTOT	R10mm	R20mm	SDII
Bougouni																	
Kieneba																	
Kita																	
Koutiala																	
Menaka																	
Mopti																	
Nara																	
San																	
Segou																	
Sikasso																	
Tombouctou																	

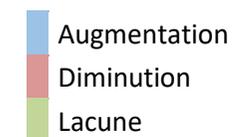


TABLEAU 12 : QUELQUES RESULTATS D'ANALYSE DES SERIES CHRONOLOGIQUES D'INDICES LIES A LA PLUIE SUR LES PERIODES 1950-2000, 1961-1990 ET 1971-2000 – NIVEAU DE SIGNIFICATION : 90%

Décade	Moyenne (mm)	Ecart (mm)
1950-1959	958	
1960-1969	859	-99
1970-1979	764	-95
1980-1989	687	-77
1990-1999	745	58

TABLEAU 13 : DIMINUTION MOYENNE DE LA PLUVIOMETRIE ANNUELLE PAR DECENNIE A L'ECHELLE DU MALI

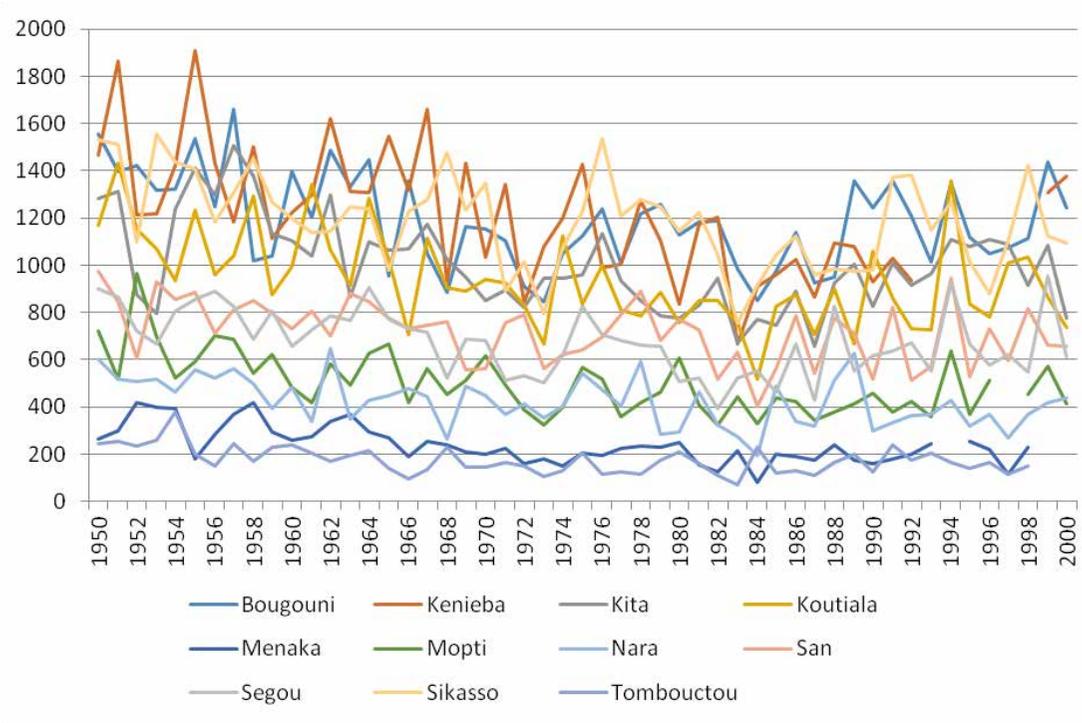


FIGURE 13 : EVOLUTION DE LA PLUVIOMETRIE MOYENNE ANNUELLE (MM) AU MALI SUR LA PERIODE 1950-2000

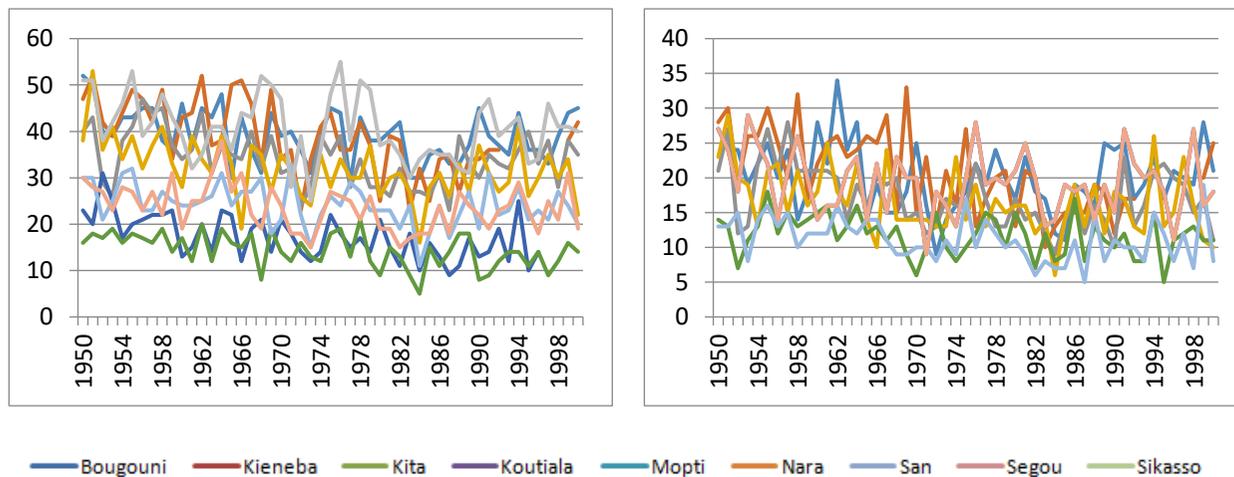


FIGURE 14 : EVOLUTION DU NOMBRE ANNUEL DE JOURS DE PLUIE : > 10 MM (A GAUCHE) ET > 20 MM (A DROITE)

Pour les autres indices, les résultats varient dans l'espace mais ne sont pas régionalisables : ils sont propres au poste de mesure et à son aire d'influence immédiate et aucune organisation géographique ne ressort. Ainsi les cumuls de pluie sur 5 jours (RX5mm) ont globalement tendance à diminuer. Le signal est moins net pour ce qui concerne le maximum annuel de pluie journalière (RX1mm) alors qu'il l'est un peu plus pour la durée des périodes sèches au sein de la saison des pluies : les séquences sèches au sein de la saison des pluies s'allongent.

En utilisant les critères de Sivakumar (1988) pour déterminer les dates de début et de fin de saisons des pluies au cours des dernières décennies et à l'échelle du Mali, la saison des pluies débute en moyenne toujours au même moment, mais se termine en moyenne de façon plus précoce. Au cours de la décennie 1990, en moyenne, la saison des pluies s'est terminée plus tardivement mais plus précocement que les décennies pluvieuses 1950 et 1960 (Tableau 14). Cela implique globalement une diminution de la durée de la saison des pluies aux dépens de la durée de la saison sèche.

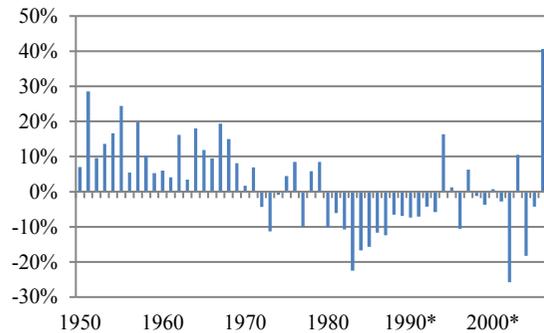
Date de début de la saison des pluies		Date de fin de la saison des pluies	
Décennie	Date moyenne	Décennie	Date moyenne
1950-1959	13-juin	1950-1959	18-oct
1960-1969	13-juin	1960-1969	16-oct
1970-1979	13-juin	1970-1979	12-oct
1980-1989	12-juin	1980-1989	07-oct
1990-1999	13-juin	1990-1999	13-oct

TABLEAU 14 : EVOLUTION DECENNALE DES DATES MOYENNES DE DEBUT ET DE FIN DES SAISONS DES PLUIES A L'ECHELLE DU MALI

A une échelle plus réduite, le bassin du Bani en amont de Mopti, Ouédraogo (2014) et Paturel et Zorom (2014) précisent certains résultats.

Les indices centrés réduits liés au cumul annuel de pluie et au nombre annuel de jours de pluie ont tendance à diminuer jusqu'au début de la décennie 1990 puis à augmenter (Figure 15). Cependant ces indices ne reviennent pas au niveau des décennies 1950 et 1960. A partir du milieu de la décennie 1990, ces deux indices varient toujours dans le même sens : l'hypothèse d'une reprise de la pluviométrie annuelle, corrélée à une augmentation du nombre de jours pluvieux, se confirme.

Nombre annuel de jours de pluie



Précipitations annuelles

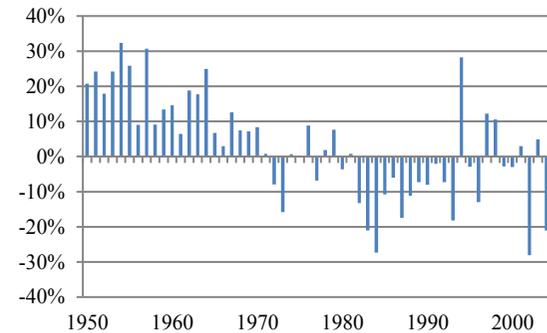


FIGURE 15 : INDICES CENTRES REDUITS POUR QUELQUES INDICES LIES A LA PLUIE SUR LE BASSIN DU BANI SUR LA PERIODE 1950-2005 (* SIGNIFIE QUE L'INDICE MOYEN NE PREND PAS EN COMPTE QUELQUES POSTES QUI ONT TROP DE LACUNES SUR CETTE PERIODE)

Sur le bassin du Bani, alors que la date moyenne du début de la saison des pluies n'évolue pas au cours de la période 1951-2005, la date moyenne de la fin de la saison des pluies survient plus précocement jusqu'au début de la décennie 1990, puis plus tardivement sans toutefois revenir à la date des décennies 1950 et 1960 (Figure 16).

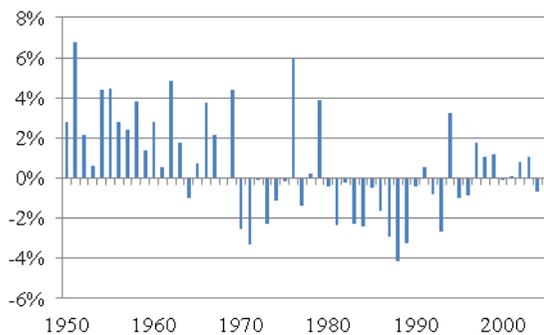


FIGURE 16 : INDICES CENTRES REDUITS POUR LA DATE MOYENNE DE FIN DES SAISONS DES PLUIES SUR LE BASSIN DU BANI SUR LA PERIODE 1950-2005

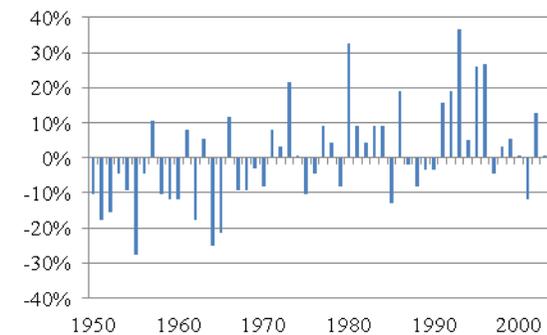


FIGURE 17 : INDICES CENTRES REDUITS POUR LA LONGUEUR DES SEQUENCES SECHES AU SEIN DE LA SAISON DES PLUIES SUR LE BASSIN DU BANI SUR LA PERIODE 1950-2005

Par ailleurs, la longueur des épisodes secs au sein de la saison des pluies n'a de cesse d'augmenter (Figure 17) : cela a probablement un impact conséquent sur les cultures.

3.2.1.2. ÉVOLUTIONS RECENTES DE LA PLUVIOMETRIE

Retour vers des conditions pluviométriques plus humides

Depuis 1990-2000, l'hypothèse d'un retour à des conditions pluviométriques plus humides en Afrique de l'Ouest se confirme mais à des moments différents selon la zone étudiée.

- Ardoin *et al.* (2003) montrent qu'on aurait observé un « arrêt » de la sécheresse pendant la décennie 1990 pour seulement six stations en Afrique de l'Ouest.
- Omotosho (2008) rapporte que, depuis 1931, la période 1996-2000 est la période de 5 ans la plus humide jamais observée à la station de Kano, dans la partie sahélienne du Nigéria.
- L'Hôte *et al.* (2002, 2003) affirment que la sécheresse des années 1970 et 1980 continuait toujours, mais Ozer *et al.*, (2003) leur opposent le fait qu'une dizaine d'années supplémentaires (2001- 2010) étaient nécessaires pour confirmer ou infirmer le retour à une période humide.
- Ali et Lebel (2009) mettent en évidence qu'un retour à des conditions plus humides était réel dans la partie est du Sahel mais pas encore à l'ouest.

Plus récemment des études ont montré que l'ensemble de la sous-région ouest africaine a connu une reprise globale de la pluviométrie annuelle : dès 1993 dans le bassin du Niger Moyen (Descroix *et al.*, 2013b), vers 1998 au Sénégal (Bodian, 2014) où cette reprise est plus franche dans les zones soudaniennes, et durant la décennie 2001-2010 pour les postes sahéliens.

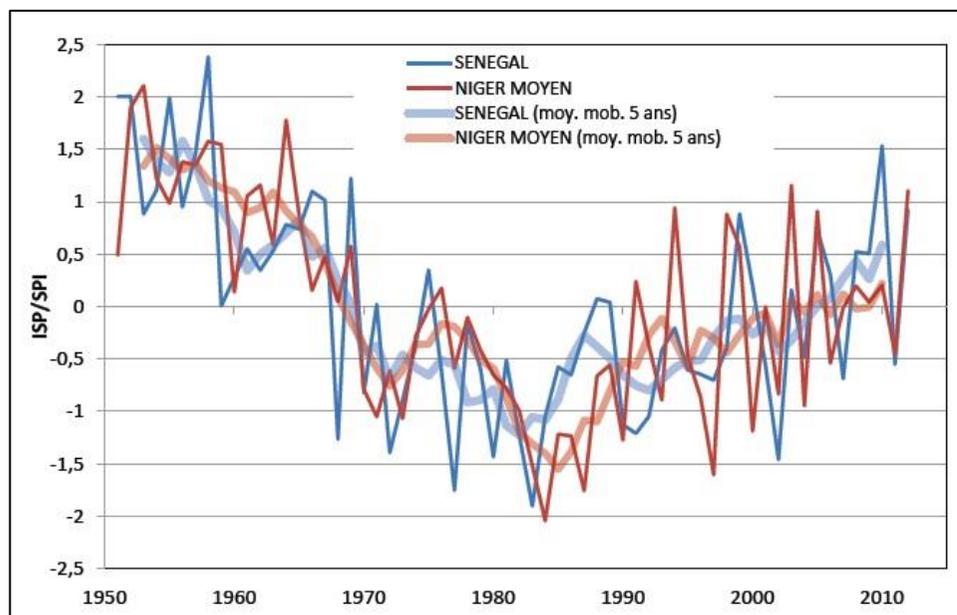


FIGURE 18 : ÉVOLUTION DE 1951 A 2013 DE L'INDICE STANDARDISÉ DES PRÉCIPITATIONS (ISP) ET DE SA MOYENNE MOBILE SUR 5 ANS POUR LA SENEGAMBIE ET LE BASSIN DU NIGER MOYEN (IN DESCROIX ET AL., 2015)

Descroix *et al.* (2015) ont analysé la variable pluviométrique en opposant deux régions de taille similaire (environ 200 000 km²) : la Sénégambie et le bassin du Niger Moyen. Une douzaine de stations pluviométriques sans aucune lacune sur la période 1950-2013 a été retenue dans chacune des deux régions. Il faut noter que cette étude s'est concentrée sur ces deux seules fenêtres pour des raisons de coût d'acquisition des données auprès des Directions Nationales de la Météorologie du Burkina Faso, du Mali et du Niger. Les auteurs constatent (Figure 18) que dans les deux cas on observe la phase humide des décennies 1950-1970, puis la longue période sèche qui lui a succédé, avec ensuite une lente remontée qui se manifeste plus tôt au Sahel Intérieur (après 1993) que sur le littoral (après 1999). Cette remontée est confirmée par Panthou *et al.* (2014), ainsi que par Sanogo *et al.* (2015) et Dong et Sutton (2015). Sanogo *et al.* (2015) signalent qu'elle est significative dans la bande soudano-sahélienne, mais pas pour les stations proches du Golfe de Guinée.

L'analyse montre aussi que la même dynamique d'ensemble de la moyenne mobile sur cinq ans des précipitations annuelles est valable au Sénégal et dans le bassin du Niger Moyen (Figure 18). Toutefois, ces toutes dernières années, la reprise des pluies semble « s'essouffler » dans le Niger Moyen, alors qu'elle se poursuit en Sénégambie (Figure 18 et Figure 19). Dans les deux régions, l'évolution est globalement la même quelle que soit la latitude, comme le montre la Figure 19 où les données des deux régions ont été découpées en trois sous-espaces (nord, centre et sud) pour illustrer le gradient pluviométrique latitudinal.

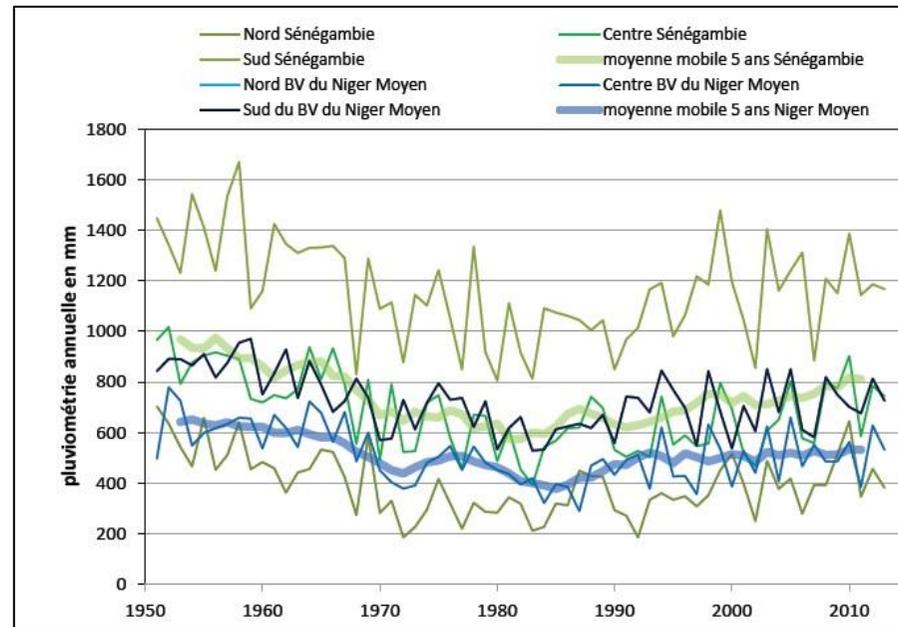


FIGURE 19 : EVOLUTION DE LA PLUVIOMETRIE ANNUELLE MOYENNE EN SENEGAMBIE ET DANS LE BASSIN DU NIGER MOYEN DE 1951 A 2013 (IN DESCROIX ET AL., 2015)

Hausse du nombre de pluies de fort cumul

Un facteur climatique important détecté dans l'évolution récente de la pluviométrie dans le bassin du Niger concerne la hausse du nombre de pluies de fort cumul. En effet, une étude statistique des pluies de fort cumul journalier réalisée par Descroix *et al.* (2013b) montre que le nombre d'événements de plus fort cumul est en hausse (Figure 20) et se rapproche beaucoup, dans le bassin du Niger Moyen, des valeurs lors des décennies humides. C'est déjà le cas pour les événements de plus de 60 mm (Figure 21).

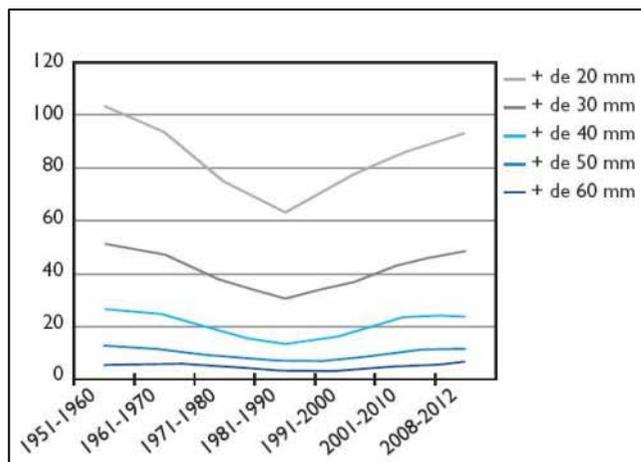


FIGURE 20 : NOMBRE D'ÉVÉNEMENTS PAR DÉCENNIE ET PAR CLASSE DE CUMUL PRÉCIPITÉ PAR ÉVÉNEMENT SUR LE BASSIN DU NIGER MOYEN (IN DESCROIX ET AL., 2013B)

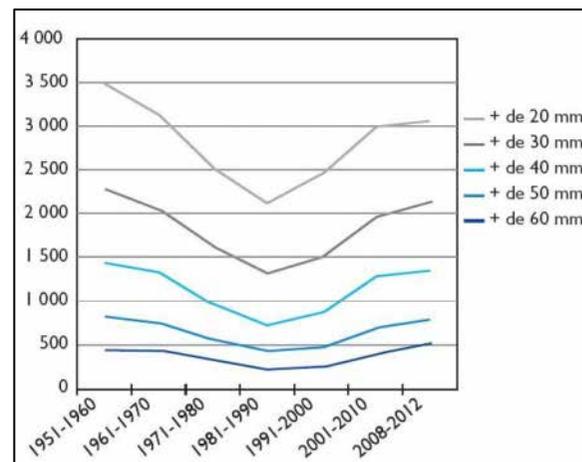


FIGURE 21 : NOMBRE DE MM DE PLUIE PAR AN ET PAR CATÉGORIE SUR LE BASSIN DU NIGER MOYEN (IN DESCROIX ET AL., 2013B)

Sur une fenêtre plus large allant de 10° W à 5° E et de 10° N à 15° N, englobant le bassin du Niger au Mali, Panthou (2013) met également en évidence un accroissement récent du nombre d'événements pluviométriques « extrêmes », en fait des événements de fort cumul pluviométrique, depuis le milieu des années 2001-2010.

Depuis quelques années, certaines études se focalisent plus particulièrement sur les extrêmes de pluie en relation à une tendance à une augmentation de leur occurrence. Panthou (2013) observe que la sécheresse de la fin du XX^{ème} siècle a été avant tout associée à une baisse d'occurrence des précipitations, leur intensité demeurant relativement inchangée. Il note en revanche un comportement singulier sur la dernière décennie (2000-2009) durant laquelle la persistance d'un déficit d'occurrence de précipitations est compensée par des pluies plus intenses qui expliquent un retour vers une meilleure pluviométrie annuelle, associée cependant à des extrêmes plus marqués et donc porteurs de risque hydrologique.

3.2.2. Les températures

Dans leurs travaux sur le Mali, Ouédraogo (2014) et Paturol et Zorom, (2014) analysent des indices liés à la température (Tableau 10 et Tableau 15). Les résultats indiquent un réchauffement global depuis 1950 (Tableau 16) :

- les températures minimales journalières (TNx) augmentent ;
- le pourcentage de nuits chaudes (TN90p) augmente alors que celui des nuits froides (TN10p) diminue ;
- le nombre de jours où la température minimale journalière est supérieure à 20°C (TR20) augmente ;
- l'amplitude diurne (TX – TN) a tendance à diminuer.

ID	Définition	Unités
SU25	Nbre de jours température maximum $\geq 25^\circ$	Jours
TR20	Nbre de jours température minimum $\geq 20^\circ$	Jours
TXx	Valeur maximale mensuelle températures max journalières	$^\circ\text{C}$
TNx	Valeur maximale mensuelle températures min journalières	$^\circ\text{C}$
TXn	Valeur minimale mensuelle températures max journalières	$^\circ\text{C}$
TNn	Valeur minimale mensuelle températures min journalières	$^\circ\text{C}$
TN10p	Pourcentage de jours TN < 10ème percentile (Nuits froides)	%
TN90p	Pourcentage de jours TN > 90ème percentile (Nuits chaudes)	%
TX10p	Pourcentage de jours TX < 10ème percentile (Jours froids)	%
TX90p	Pourcentage de jours TX > 90ème percentile (Jours chauds)	%
WSDI	Nbre de périodes avec au moins 6 jours consécutifs où TX > 90ième percentile (vague de chaleur)	Jours
CSDI	Nbre de périodes avec au moins 6 jours consécutifs où TN < 10ième percentile	Jours
DTR	Moyenne mensuelle de la différence entre TX et TN	$^\circ\text{C}$

TABLEAU 15 : LISTE DE QUELQUES INDICES DE TEMPERATURE ETUDIES

Stations	1951-2000							1961-2000							1971-2000							
	TR20	TNn	TN10P	TN90P	TX10P	TX90P	TXx	TR20	TNn	TN10P	TN90P	TX10P	TX90P	TXx	TR20	TNn	TN10P	TN90P	TX10P	TX90P	TXx	
Bougouni																						
Kieneba																						
Kita																						
Koutiala																						
Menaka																						
Mopti																						
Nara																						
Ségou																						
Sikasso																						
San																						
Tombouctou																						

Augmentation
Diminution

TABLEAU 16 : QUELQUES RESULTATS D'ANALYSE DES SERIES CHRONOLOGIQUES D'INDICES LIES A LA TEMPERATURE SUR LES PERIODES 1950-2000, 1961-1990 ET 1971-2000 – TEST DE CORRELATION SUR LE RANG (NIVEAU DE SIGNIFICATION : 90%)

Ce sont principalement les températures minimales journalières (TNx) qui ont eu tendance à augmenter, bien plus que les températures maximales journalières (TXx). La Figure 22 et la Figure 23 montrent comment ces variables ont évolué au cours de la période 1950-2000.

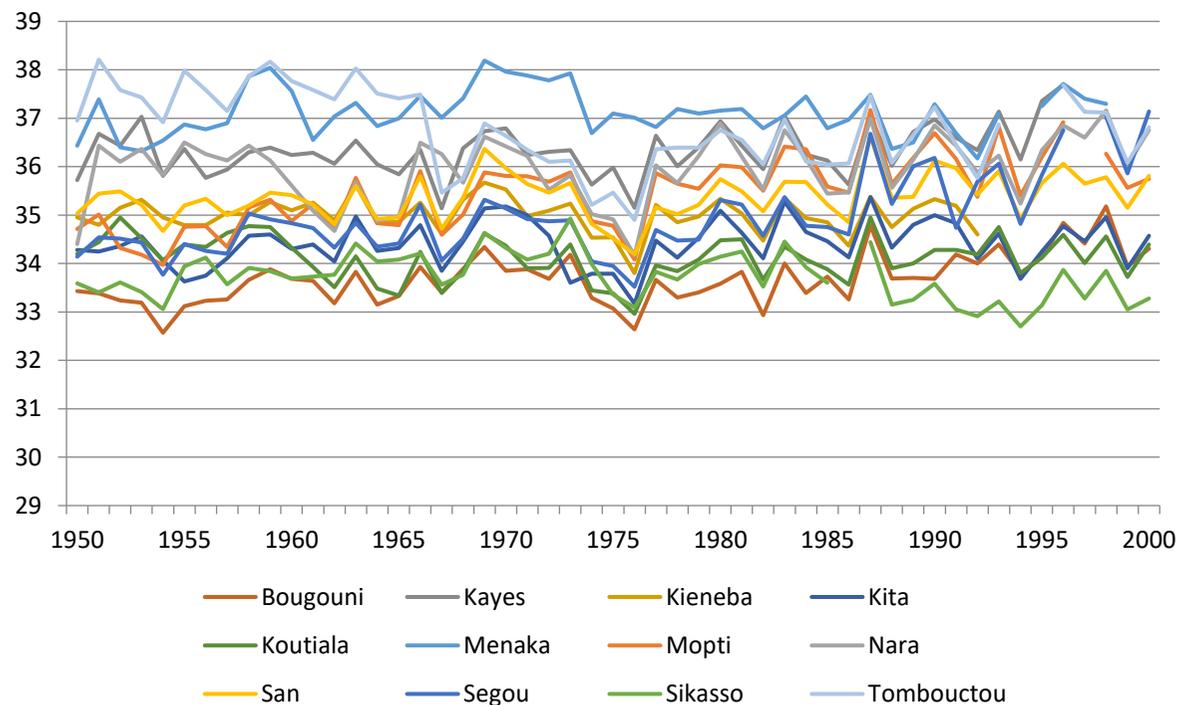


FIGURE 22 : EVOLUTION DE LA TEMPERATURE MAXIMALE JOURNALIERE MOYENNE ANNUELLE (°C) AU MALI SUR LA PERIODE 1950-2000

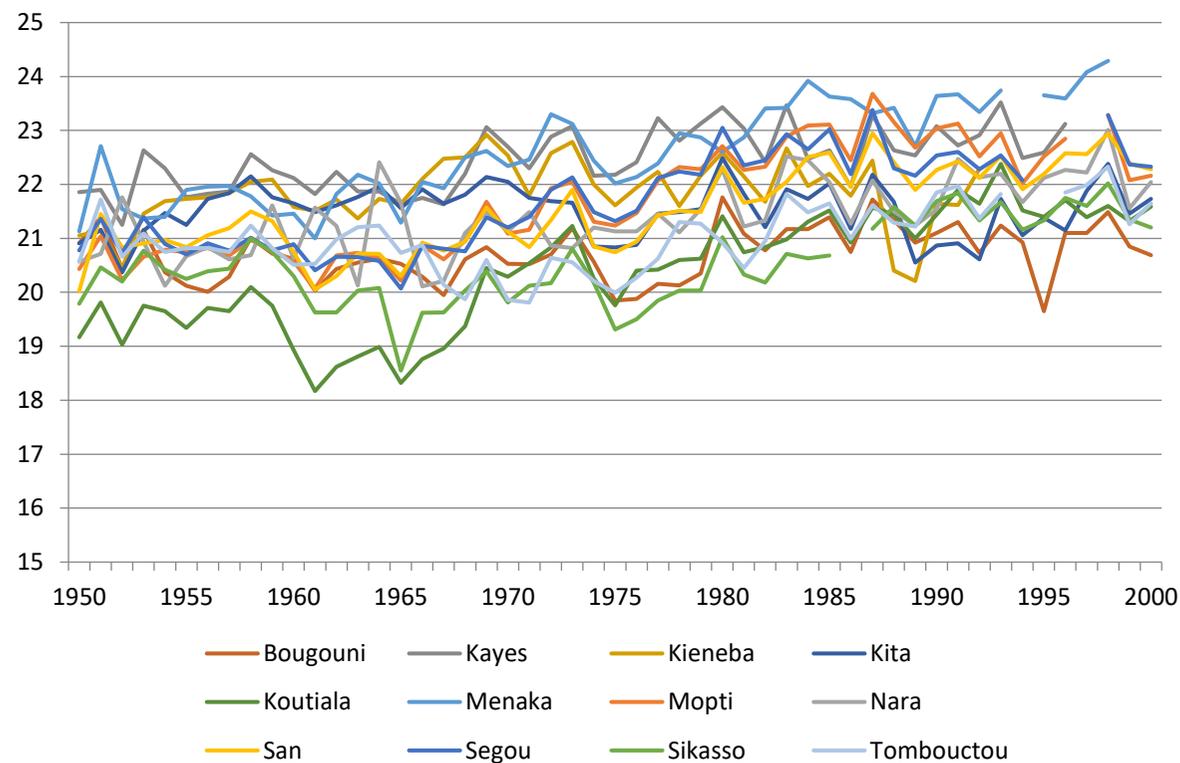


FIGURE 23 : EVOLUTION DE LA TEMPERATURE MINIMALE JOURNALIERE MOYENNE ANNUELLE (°C) AU MALI SUR LA PERIODE 1950-2000

Le Tableau 17 reporte l'augmentation moyenne des températures journalières sur la période 1950-2000 : elle est proche de 0.1°C par tranche de 10 ans pour la température maximale journalière (TXx), alors qu'elle est de 0.33°C par tranche de 10 ans pour la température minimale journalière (TNx). On peut penser que cette nette augmentation des températures minimales journalières aura un impact sur les cultures mais aussi sur la santé des populations, surtout celles âgées et/ou malades.

Station	ΔT_{max} (°C / 10 ans)	ΔT_{min} (°C / 10 ans)
Bougouni	+0.20	+0.11
Kayes	+0.14	+0.28
Kieneba	-0.00	+0.07
Kita	+0.06	+0.00
Koutiala	-0.02	+0.61
Menaka	+0.01	+0.52
Mopti	+0.36	+0.59
Nara	+0.13	+0.31
San	+0.10	+0.43
Segou	+0.38	+0.50
Sikasso	-0.01	+0.33
Tombouctou	-0.23	+0.22
Moyenne	+0.09	+0.33

**TABLEAU 17 : AUGMENTATION DECENNALE DES EXTREMES DE TEMPERATURE
SUR LA PERIODE 1950-2000**

Pour les autres indices, les résultats varient dans l'espace mais ne sont pas régionalisables : ils sont propres au poste de mesure et à son aire d'influence immédiate et aucune organisation géographique ne ressort. Cependant, il apparaît que, globalement, le nombre de jours chauds (TX90p) et de vagues de chaleur (WSDI) sont en augmentation.

De nombreux travaux suggèrent que le réchauffement atmosphérique global s'accompagne d'une intensification du cycle de l'eau, conduisant à plus d'événements hydrométéorologiques extrêmes.

3.2.3. L'évapotranspiration potentielle

L'évapotranspiration potentielle (ETP) ne se mesure pas ; elle se calcule. Parmi les différentes formules qui existent, la formule sur laquelle s'accorde le plus grand nombre de chercheurs est celle de Penman. Cependant, cette formule fait intervenir de très nombreuses variables climatiques qui ne sont pas toujours mesurées, même aux stations météorologiques nationales des pays. Un certain nombre de ces variables sont donc estimées à partir d'hypothèses qui ne sont pas toujours vérifiables et qui sont encore moins vérifiées ! Les services météorologiques nationaux utilisent ainsi une formule de Penman simplifiée qui fixe certaines variables. Parmi ces variables qui sont considérées comme invariables dans le temps, l'albédo qui est le pouvoir réfléchissant d'une surface, c'est-à-dire le rapport de l'énergie lumineuse réfléchie à celle incidente. L'albédo est donc lié à l'évolution de l'environnement de la station de mesure...

Les estimations de l'ETP sont donc à utiliser avec beaucoup de précautions. C'est peut-être une des principales raisons pour lesquelles trop peu d'études ont été menées sur cette variable qui est pourtant essentielle dans l'équation du bilan hydrologique dans les pays africains comme le Mali. Les quelques études qui se sont intéressées à l'ETP s'appuient sur des grilles issues de modèles climatiques globaux ou régionaux. Les résolutions spatiales sont de l'ordre de 50 km x 50 km, et en termes de résolution temporelle, les données sont fiables au pas de temps mensuel mais pas à des pas de temps plus courts. En général, les sorties de ces modèles surestiment, plus ou moins, les ETP calculées aux postes de mesures. Elles nécessitent d'être corrigées par différentes méthodes qui se basent sur des hypothèses simplificatrices.

Il est toutefois admis que l'augmentation des températures conduit à une plus grande évaporation selon la relation Clausius-Clapeyron, où la pression de vapeur de saturation augmente exponentiellement avec la température.

3.2.4. Synthèse

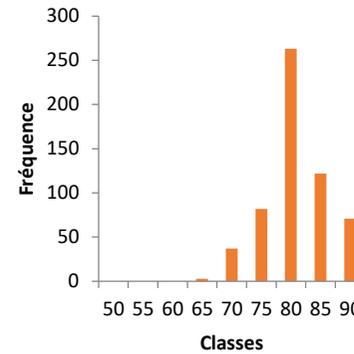
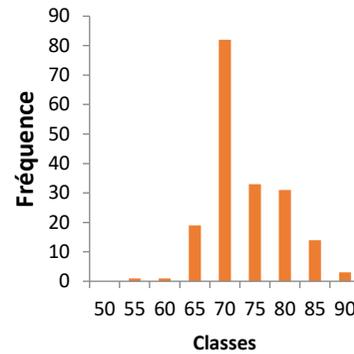
Il ressort de la plupart des études climatiques menées ces dernières années que le climat dans différentes régions du monde a connu une variabilité croissante depuis les années 1950 ; cette variabilité observée est souvent attribuée au relâchement accru dans l'atmosphère des gaz à effet de serre (Hegerl *et al.*, 2007). Le rapport du GIEC (2013) indique qu'il y a une très forte probabilité que ce changement climatique soit en grande partie dû aux activités humaines.

Depuis 1950, les résultats montrent que le Mali a été le lieu de changements significatifs en termes d'indices de pluies et de températures. Les changements les plus nets concernent :

- Les extrêmes de température associés à un réchauffement en particulier pour les indices dérivés des températures minimales journalières. L'ensemble de la zone d'étude montre une diminution significative du nombre de nuits froides et une augmentation significative du nombre de nuits chaudes.
- Les cumuls annuels de pluie et ceux des mois du cœur et de fin des saisons des pluies (Août et Septembre) ont nettement diminué. Il en est de même pour ce qui est des nombres de jours pluvieux.

Il est à noter que les changements ont d'abord concerné les variables relatives à la pluie avant celle relatives à la température (Figure 24). Ce décalage de près de 10 ans peut s'expliquer par le probable rôle tampon joué par la végétation de la zone d'étude.

A notre connaissance, aucune étude sur des données infrajournalières n'a été menée depuis ces 30 à 40 dernières années. Cela est très pénalisant pour de nombreux projets comme ceux liés aux normes hydroclimatiques qui permettent entre autres de dimensionner des infrastructures hydrauliques, nécessaires à une meilleure gestion de la ressource en eau dans un pays dont l'économie est majoritairement fondée sur l'agriculture pluviale. Ainsi, les courbes Intensité-Durée-Fréquence utilisées par les gestionnaires et/ou les bureaux d'étude datent du début des années 1980.



indices de pluie

Indices de température

FIGURE 24 : HISTOGRAMMES DE FREQUENCE DES DATES DE RUPTURE DETECTEES SUR LES SERIES ANNUELLES D'INDICATEURS DE PLUIE ET DE TEMPERATURE SUR LE BASSIN DU BANI (TEST DE PETTITT A 90%)

Les résultats climatologiques confirment que la sécheresse de la fin du XX^{ème} siècle a été avant tout associée à une baisse d'occurrence des précipitations, leur intensité demeurant relativement inchangée. On note en revanche un comportement singulier sur la décennie 2000-2009 durant laquelle un déficit persistant d'occurrence est compensé par une intensification des précipitations qui explique un retour vers une meilleure pluviométrie annuelle, associée cependant à des extrêmes plus marqués et donc porteurs de risque hydrologique.

3.3. Variabilité hydrologique

Les travaux sur la variabilité hydrologique sont bien moins nombreux que ceux concernant la variabilité pluviométrique. Contrairement à ce qu'affirme Tarhule *et al.* (2016), il n'a pas fallu attendre leurs travaux pour analyser les principales caractéristiques de cette variabilité hydrologique. Dans le cadre du programme ICCARE mené par Servat *et al.* (1998), les auteurs ont montré à l'échelle de l'Afrique de l'Ouest, sur l'ensemble des cours d'eau de la région, que les débits avaient, comme les pluies, diminué à partir de 1970, parfois 1980 pour certains cours d'eau comme le haut bassin du Niger en Guinée. Les raisons de ces décalages sont à rechercher à la fois en direction de la relation eau de surface – eau souterraine qui apparaît complexe sur ce bassin et de l'influence de l'homme sur le bassin qui est mal maîtrisée et méconnue. Il est à noter que la diminution des écoulements a été généralement plus forte que celles des pluies. Ainsi, alors que les pluies ont dû diminuer globalement de 20%, les écoulements ont pu baisser de 70% comme sur le bassin du Bani. Les extrêmes hydrologiques (crues et étages) ont diminué comme les modules annuels ou mensuels. Sont présentées par la suite des résultats de travaux menés par les auteurs de cette étude. Ce sont probablement les seuls qui aient été faits à une telle échelle et à partir de mesures hydrologiques critiquées. Ces mesures ont été actualisées lorsque c'était possible.

Les stations de mesures hydrologiques maliennes se trouvent principalement en domaine soudanien. Dans la partie sahélienne du Mali, il n'y a aucune rivière suivie régulièrement. On peut cependant tirer des enseignements des rivières du Burkina Faso, du Niger et de Mauritanie, dont les suivis prolongés jusqu'aux années 2000 pour certaines, permettent de documenter sans ambiguïté ce qui est communément appelé aujourd'hui le « *paradoxe sahélien* », c'est-à-dire « moins de pluie a provoqué plus d'écoulement ».

3.3.1. Une différence fondamentale entre domaine sahélien et domaine soudanien

La baisse prolongée des pluies a eu des répercussions durables sur les ressources en eau, différentes selon les domaines soudanien ou sahélien. En domaine soudanien, les rivières ont vu leurs débits baisser considérablement, de l'ordre de 40 à 60%, alors que la baisse des pluies n'était que de l'ordre de 15 à 20%. En domaine sahélien, durant la même période, les débits ont augmenté malgré la baisse des pluies.

La diminution amplifiée des débits en domaine soudanien est liée à la diminution durable des ressources en eau souterraines, du fait de nombreuses années de déficit pluviométrique. Ceux-ci ont provoqué chaque année une moindre recharge naturelle des nappes, et ce déficit s'est cumulé au fil des années de sécheresse, faisant baisser graduellement le niveau moyen des nappes.

L'augmentation des écoulements dans le domaine sahélien a été attribuée à une augmentation du ruissellement due à une aridification des états de surfaces, provoquée par la combinaison des impacts anthropiques et du changement climatique.

3.3.2. Les étiages

Il faut spécifier ce que signifie un étiage. L'étiage se différencie de la décrue. Il correspond à un écoulement de surface issu exclusivement des réservoirs souterrains ; on parle alors de vidange des nappes. Cette vidange suit une loi exponentielle inverse qu'il est facile d'extrapoler et dont les caractéristiques sont directement liées au niveau de la nappe. Plus la nappe a été rechargée en eau pendant la saison des pluies, plus son niveau a augmenté et plus la vidange va être forte et longue. Le coefficient de tarissement se calcule à partir des données de débit journalier ; il est inversement corrélé à la vitesse de vidange des nappes à l'origine de l'écoulement de surface mesuré. Un coefficient de tarissement faible indique un niveau élevé du stock d'eau souterrain disponible dans les nappes, et donc un tarissement lent. Un coefficient de tarissement élevé indique au contraire une faible capacité des nappes à soutenir les débits d'étiage et donc une vidange rapide. Le terme d'étiage ne concerne donc que les cours d'eau dont les écoulements de surface sont en partie constitués d'apports en eaux souterraines.

Les étiages de tous les cours d'eau du Mali se sont aggravés depuis le début de la sécheresse (Mahé *et al.*, 2000 ; Mahé, 2009).

Il y a peu de séries piézométriques anciennes et facilement accessibles. En l'absence de données piézométriques, le coefficient de tarissement est le meilleur indicateur de la disponibilité en eaux souterraines. On a donc pris l'habitude de suivre le niveau des nappes de façon indirecte avec ce coefficient. Pour illustrer l'évolution de ce coefficient au cours des dernières décennies au Mali, la Figure 25 compare l'évolution de ce coefficient pour le Bani à la station de Douna aux écoulements du mois de janvier. En janvier, les débits sont issus uniquement des eaux souterraines et ne sont jamais nuls ; ils sont donc un très bon marqueur de l'évolution de la disponibilité en eaux souterraines. A partir du début des années 1970, le coefficient de tarissement augmente régulièrement et corrélativement les débits de janvier diminuent. On voit clairement les deux courbes s'inverser.

On a pu estimer la part des écoulements souterrains (débits de base) pour les écoulements totaux du Bani de 1984 à 1996, période durant laquelle il y a eu suffisamment de données piézométriques disponibles pour faire la comparaison avec la part des écoulements de surface (Figure 26). On voit l'impact de la sécheresse avec des apports souterrains très faibles durant toute la période, et une valeur plus élevée pour 1994, année de pluies supérieures à la normale interannuelle pour l'ensemble du bassin du Haut Niger. On y voit aussi comment en 1984 les écoulements de nappes peuvent être extrêmement réduits. Ceci illustre une autre caractéristique des nappes du domaine soudanien sur le bassin du Niger, elles sont pour l'essentiel dans des matériaux fracturés et de faible capacité de stockage. Elles subissent rapidement l'impact de quelques années de déficit de pluie. Inversement, comme en 1994, elles peuvent se régénérer rapidement.

Les coefficients de tarissement augmentent aussi régulièrement depuis la fin des années 1970 sur les tributaires du haut bassin du Niger en Guinée (Figure 27, Descroix *et al.*, 2018), malgré une légère ré-augmentation des précipitations et des débits moyens depuis la fin des années 1990 comme le montre la série des débits du Niger à Koulikoro (Figure 28). Ceci semble traduire une moindre recharge des nappes sur le haut bassin, qui impacte tout le reste du fleuve jusqu'au Mali. Une des premières hypothèses avancées pour expliquer ce phénomène serait la disparition de zones humides naturelles au profit de zones cultivées où la recharge des nappes est moindre.

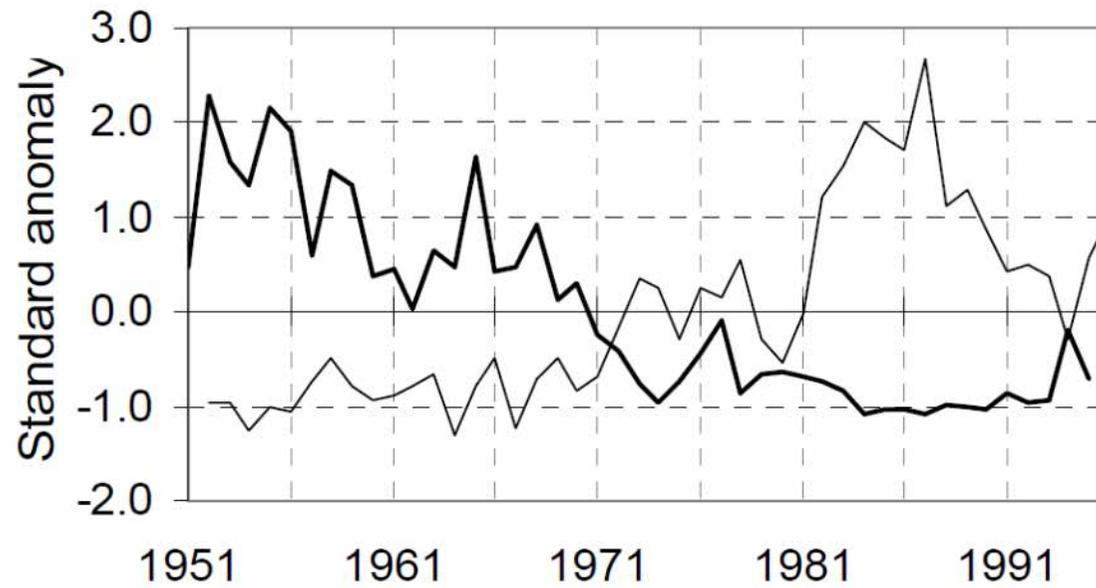


FIGURE 25 : BANI A DOUNA - EVOLUTION DU COEFFICIENT DE TARISSEMENT (TRAIT FIN) ET DES ECOULEMENTS DU MOIS DE JANVIER (TRAIT PLEIN) (IN MAHE, 2009)

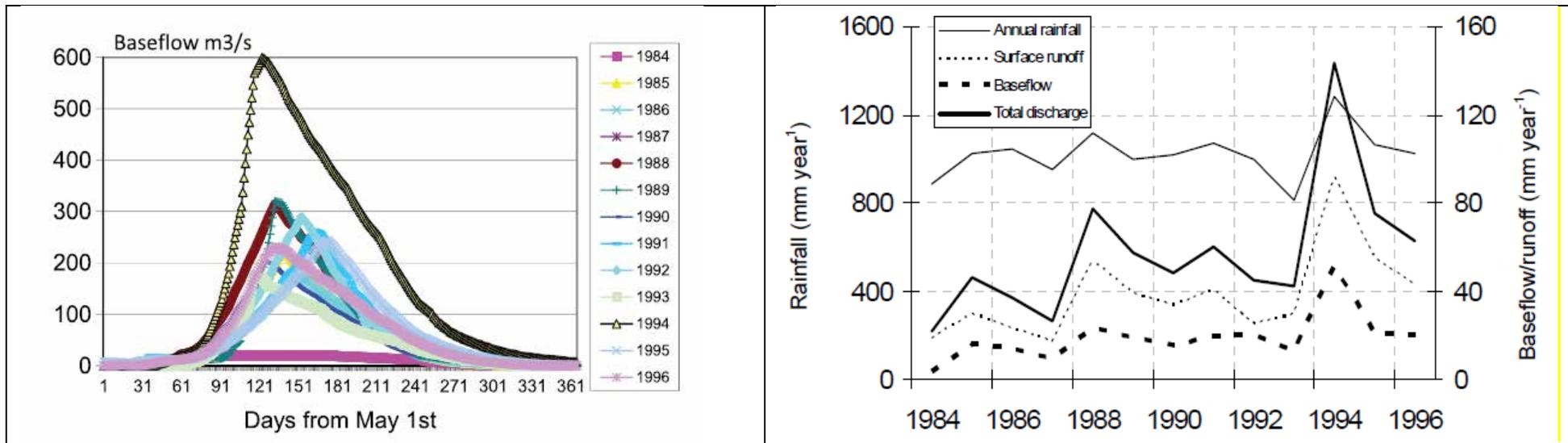


FIGURE 26 : BANI A DOUNA – EVOLUTION DU DEBIT DE BASE (ECOULEMENT SOUTERRAIN) ET PART DE L'ECOULEMENT SOUTERRAIN ET DE SURFACE DANS L'ECOULEMENT TOTAL (IN MAHE ET AL., 2013)

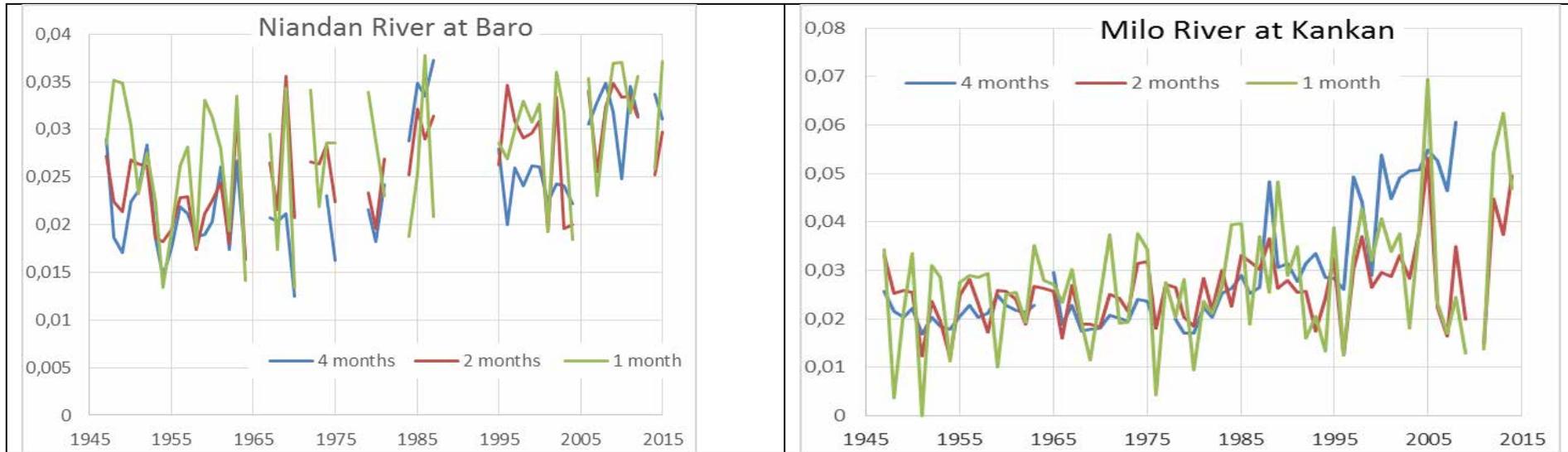


FIGURE 27 : EVOLUTION DES COEFFICIENTS DE TARISSEMENT SUR DES AFFLUENTS DU HAUT-NIGER

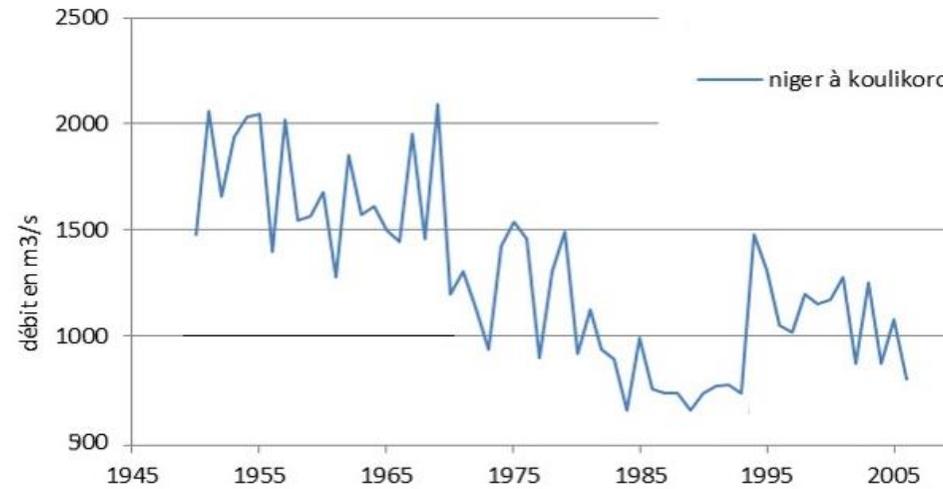


FIGURE 28 : NIGER A KOULIKORO – EVOLUTION DES MODULES ANNUELS

3.3.3. Les crues

Les résultats dépendent du domaine considéré.

En domaine soudanien, les crues sont formées par des écoulements rapides de surface et les écoulements souterrains retardés (Figure 29). Comme depuis les années 1970, les pluies sont systématiquement moins fortes qu'avant la sécheresse, les écoulements rapides diminuent mécaniquement, sans changement observé de la relation entre pluie et ruissellement de surface.

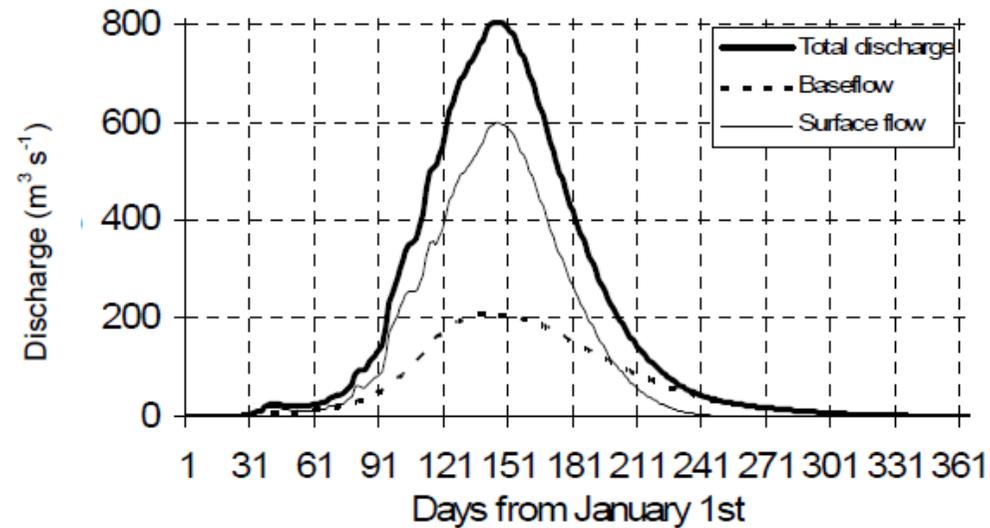


FIGURE 29 : BANI A DOUNA – DECOMPOSITION-TYPE DE L'ÉCOULEMENT TOTAL ENTRE ÉCOULEMENT DE SURFACE ET SOUTERRAIN (IN MAHE, 2009)

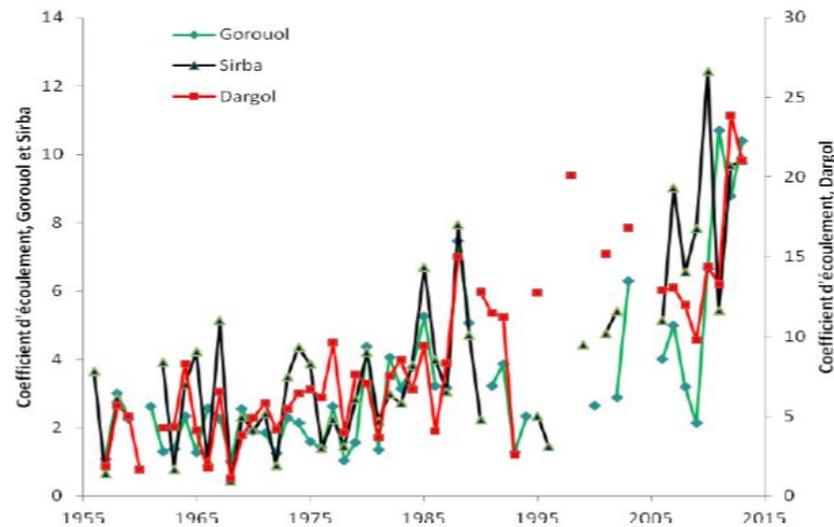


FIGURE 30 : GOROUOL, SIRBA ET DARGOL - COEFFICIENTS D'ÉCOULEMENT DE TROIS AFFLUENTS DE RIVE DROITE DU FLEUVE NIGER PROVENANT DU BURKINA FASO ET DU MALI (IN DESCROIX ET AL., 2015)

En domaine sahélien, la situation est radicalement différente. L'effet des changements anthropiques dépasse celui du changement climatique dans le cycle de l'eau au Sahel : les écoulements ont augmenté dès le début de la période très sèche observée de 1968 à 1993 comme le montre l'évolution des coefficients d'écoulement de trois affluents de rive droite du fleuve Niger – Gorouol, Sirba et Dargol – qui rejoignent le fleuve en amont de Niamey (Figure 30). On a attribué cette augmentation des écoulements à la diminution de la couverture végétale, elle-même liée (i) au signal climatique, les pics de sécheresse très prononcés ayant entraîné une surmortalité de la végétation naturelle, (ii) au signal anthropique, la coupe de bois destinée aux besoins domestiques (cuisine, construction...) étant responsable d'un déboisement important, bien que difficilement quantifiable et (iii) la mise en culture de nouveaux champs associée à la réduction ou la suppression de la jachère et au surpâturage. Les surfaces cultivées ont en effet fortement augmenté dans de nombreux pays (Burkina-Faso, Niger entre autres) provoquant un changement de végétation et de cycle saisonnier de l'occupation du sol propice à l'augmentation du ruissellement (Mahé *et al.*, 2005a ; Paturel *et al.*, 2017). Cependant, le rôle du climat seul sur la dégradation des états de surface au Sahel peut être appréhendé par plusieurs résultats, entre autres ceux de El Vilaly *et al.* (2017), qui mettent en évidence l'intense exode rural qui a fait suite aux sécheresses répétées en Mauritanie, qui n'a pas empêché les états de surface de se dégrader très fortement et de provoquer là aussi une augmentation très forte des écoulements sahéliens (Mahé *et al.*, 2005b, Mahé et Paturel, 2009). Durant la période 1994-2013, les changements d'usage des sols se combinent avec le retour des pluies (les précipitations annuelles ont augmenté sans atteindre toutefois leur niveau des années 1950-1970) et un accroissement des précipitations de forte intensité et cumul journalier (Descroix *et al.*, 2013b ; Panthou, 2013 ; Panthou *et al.*, 2014) pour expliquer l'augmentation des débits et de l'occurrence des crues (Aich *et al.*, 2015 ; Cassé, 2015 ; Cassé *et al.*, 2015 ; Cassé et Gosset, 2015 ; Descroix *et al.*, 2013b).

On observe donc en zone sahélienne une augmentation des ressources en eau, en général de bonne qualité pour les eaux souterraines, mais très mauvaise pour les eaux de surface. En effet, le volume annuel ruisselé a souvent doublé, mais la durée d'écoulement est plus courte. Dans un cas comme dans l'autre, cet accroissement des ressources est la conséquence d'une diminution de la capacité de rétention en eau des sols, diminution synonyme de désertification et qui entraîne des graves dommages aux infrastructures (routes, digues, ponts, ...).

La taille des bassins et la nature des événements pluvieux jouent également un rôle dans la réponse observée. L'impact des événements pluvieux intenses sera visible essentiellement sur les petits bassins, même si le cumul annuel de pluie peut rester inférieur à la normale des pluies. Pour des grands bassins versants, l'impact de la variabilité des ressources souterraines est fort et rémanent. Néanmoins, concernant les bassins sahéliens, les écoulements de surface sont « additifs horizontalement » car il n'y a pas de flux souterrain notable, et ce qui s'observe sur de petites surfaces s'observe donc aussi sur de plus grandes surfaces.

En zones urbaines, l'augmentation des événements extrêmes de ruissellement est surtout dû à l'imperméabilisation anthropique et l'agrandissement des surfaces drainantes. Le second facteur en jeu depuis quelques années est l'augmentation des événements de pluies très intenses (Panthou *et al.*, 2014). L'urbanisation de zones inondables s'ajoute à ces facteurs.

3.3.4. Le Delta Intérieur du Niger

La diminution des précipitations sur le bassin depuis les années 1970 a considérablement réduit la zone d'inondation (Mahé *et al.*, 2009 ; 2011b).

L'hydrologie du DIN a subi des modifications suite aux sécheresses qui ont débuté dans les années 1970.

Station	Koulikoro	Douna	Diré
Période étudiée	1907 - 2000	1922 - 2000	1924 - 2000
Débit moyen avant 1970	1 552 m ³ /s	639 m ³ /s	2 244 m ³ /s
Débit moyen 1970-2000	1 039 m ³ /s	235 m ³ /s	1 346 m ³ /s
Déficit d'écoulement	33%	69%	40%

TABLEAU 18 : DEFICIT D'ÉCOULEMENT APRES LA SECHERESSE DE 1970 (IN MAHE ET AL., 2011B)

Les apports fluviaux ont baissé suite aux sécheresses surtout pour le Bani avec un déficit de 69% des apports à l'entrée du DIN (Tableau 18). Cette diminution des apports fluviaux a eu un impact sur la surface inondée dans le DIN. Sur ces périodes et en appliquant différentes méthodes, des auteurs ont estimé les superficies maximales inondées (Tableau 19).

Les périodes d'observations et les méthodes de ces travaux étant différentes, il est difficile de comparer les caractéristiques des superficies maximales inondées dans le DIN. Toutefois, le modèle d'Olivry (1995), basé sur la méthode du bilan hydrologique, tend à donner les valeurs les plus fortes alors que le modèle agro-écologique de Orange *et al.* (2002) donne les valeurs les plus faibles, probablement car la méthode hydrologique d'Olivry (1995) prend en compte également les pertes en eau liées au remplissage de lacs périphériques. Des travaux plus récents (Mahé *et al.*, 2011a; Ogilvie *et al.*, 2015), qui ne prennent pas en compte les années à forte hydraulité antérieures à 1970, estiment des superficies maximales inondées bien inférieures. La relation entre les surfaces inondées et les hauteurs d'eau à Mopti et quelques autres stations hydrologiques du DIN, par Mariko *et al.* (2003) et Mahé *et al.* (2011b), permet cependant une extrapolation intéressante des hauteurs et surfaces, basée sur 10 ans d'observations satellite.

Références	Méthodes d'obtention	Périodes d'étude	Maximum	Moyenne	Minimum
Olivry (1995)	Bilan hydrologique	1953-1992	43 900 km ² (1957)	26 300 km ²	9 500 km ² (1984)
Poncet (1994)	Cartes topographiques et thématiques, photographies aériennes	1955-1990	36 100 km ² (1955, 1965)	19 000 km ²	8 000 à 10 000 km ² (1986 à 1992)
Orange <i>et al.</i> (2002)	Modèle agro-écologique	1955-1996	25 000 km ² (1955)	17 000 km ²	6 000 km ² (1984)
Mariko <i>et al.</i> (2003), Mahé <i>et al.</i> (2011a)	Imagerie satellitaire de type NOAA / AVHRR	1990-2000	23 000 km ² (1999)	15 000 km ²	8 000 km ² (1991)
Ogilvie <i>et al.</i> (2015)	Imagerie satellitaire de type MODIS	2000-2011	20 000 km ² (2008)	16 000 km ²	10 300 km ² (2011)

TABLEAU 19 : PRINCIPALES CARACTERISTIQUES DES SUPERFICIES INONDEES DANS LE DELTA INTERIEUR DU NIGER D'APRES DIFFERENTS TRAVAUX

3.3.5. Éléments pour un outil de gestion opérationnelle du Delta Intérieur du Niger

Dans le DIN, on distingue deux caractères spécifiques suivant le type d'année.

- Le premier caractère relatif au maximum de crue et particulier aux années de forte hydraulité est l'effet de seuil qui se manifeste sur toutes les stations du delta amont sauf à Douna.
 - Sur le Niger à Ké-Macina, Tilembeya et Kara les débits maximums sont écrêtés.
 - L'effet de palier à Ké-Macina s'explique par la proximité en aval de la diffluence du Diaka.
 - A Kara et Tilembeya, l'écrêtement des crues est dû à l'effet des déversements latéraux dont l'importance croît avec le niveau des crues (Brunet-Moret *et al.*, 1986).
 - L'existence de ces valeurs-seuils impacte également la variabilité interannuelle de l'inondation dans le Diaka qui, contrairement au delta en aval des lacs centraux, atteint très rapidement un palier de surface inondée, quel que soit le module annuel atteint par le fleuve Niger (Mahé *et al.*, 2009).
 - Spécifique aux années de bonne hydraulité, ces seuils avoisinent 5 500 m³/s pour Ké-Macina, 3 300 m³/s pour Tilembeya et 1 700 m³/s pour Kara. Sur le Bani, ce seuil s'observe autour de 2 800 m³/s à Bénény-Kégné et de 1 640 m³/s à Sofara.
- Le second caractère est relatif à l'évolution des dates de passage des maximums de crue (Zaré *et al.*, 2016) (Figure 31).
 - Sur le Niger amont, les dates de passage des maximums de crue n'ont guère évolué en dépit de la succession des périodes de sécheresse qu'a connue la région.

- Par contre, sur le Bani, on observe que les dates de passage des maximums de crues sont plus précoces durant les années sèches qu'en années humides, majoritairement antérieures à 1970.
- Ce décalage temporel constaté à Douna l'est également à Mopti, et ne cesse de s'accroître en descendant le fleuve.

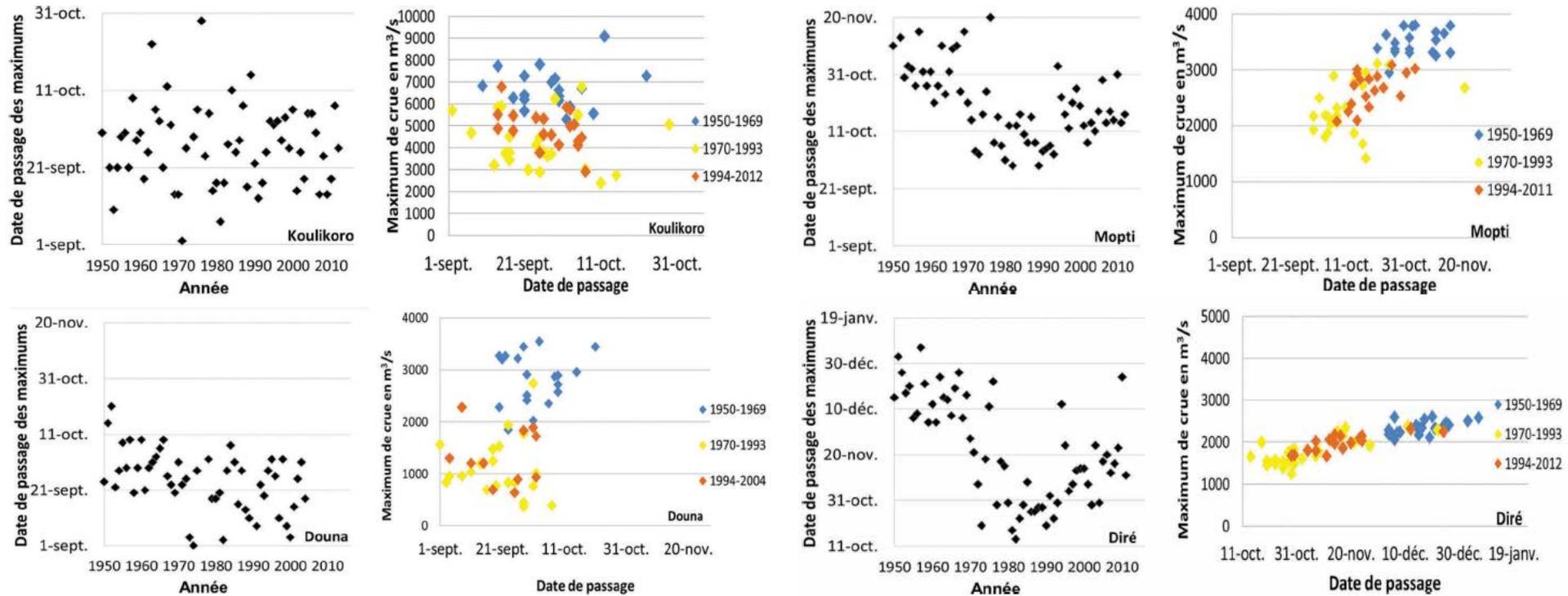


FIGURE 31 : DATES DE PASSAGE DES MAXIMA DE CRUE EN AMONT ET A L'ENTREE DU DELTA INTERIEUR DU NIGER EN FONCTION DES ANNEES ET DES PERIODES SECHES OU HUMIDES

D'après Mahé *et al.* (2000), le volume de pluie tombé sur le bassin versant du Bani à Douna représente 39% des pluies tombées sur le bassin du Niger à Koulikoro. Le Niger apporte plus de ressource hydrique au DIN, mais c'est le Bani qui impose le signal des dates de passage des maximums de crue de Mopti jusqu'au delta aval, avec des dates de passage d'autant plus tardives que la valeur du maximum journalier est élevée.

Cette particularité hydrologique du DIN, et son incidence sur les dates de passage du maximum de crue en particulier, peut être intéressante pour améliorer la gestion des eaux du DIN et pour les populations de pêcheurs et d'éleveurs dont les calendriers d'activité sont calés par rapport à la décrue. La réduction du décalage temporel entre l'aval et l'amont du DIN tend à rendre les migrations aléatoires. En effet, les années sèches, les pêcheurs migrants doivent migrer environ un mois plus tôt vers la région des lacs en aval du DIN qui est plus propice à la pêche. Également, l'attente des éleveurs dans la partie amont peut être réduite car ils peuvent accéder plus tôt aux pâturages du delta aval.

Depuis la sécheresse, l'inondation couvre de moins grandes surfaces dans le DIN ; elle est également plus courte, et les plaines inondées s'assèchent plus vite. Ainsi, la décrue a lieu à peu près toujours en septembre-octobre quelle que soit l'année dans la partie amont du delta (au sud des lacs centraux), alors qu'elle se produit dans la partie aval un mois après en année sèche, et deux à trois mois après en année humide.

Afin de simuler l'impact futur de la modification du régime du fleuve sur l'extension de la zone inondée, plusieurs études ont relié les niveaux d'eau d'une station de mesure aux zones inondées (Mariko *et al.*, 2003 ; 2013 ; Mahé *et al.*, 2011b ; Ogilvie *et al.*, 2015). La relation est de très bonne qualité entre la station de Mopti et l'inondation du delta amont et un peu moins bonne entre celle de Diré et le delta aval. La relation entre les hauteurs à Mopti et l'ensemble du DIN est également de très bonne qualité (Figure 32).

Une relation entre hauteurs à Mopti ou Diré et surfaces inondées est établie à partir d'un suivi de 10 ans d'images Landsat comparées aux séries de hauteurs d'eau aux stations hydrologiques majeures du réseau national. Elle permet de retrouver la surface inondée à partir des hauteurs d'eau sans images disponibles et de tracer l'évolution probable des surfaces inondées (entre 5 000 et 35 000 km²) depuis le début des observations à Mopti (Figure 33).

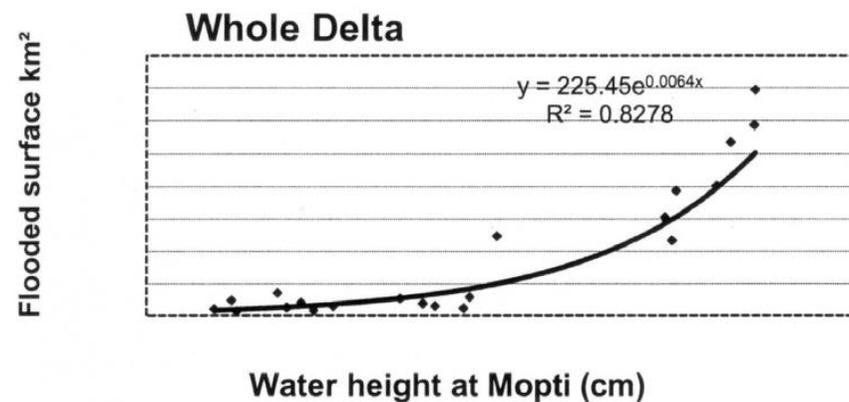


FIGURE 32 : RELATION HAUTEUR D'EAU A MOPTI ET SURFACES INONDEES (IN MARIKO ET AL., 2013)

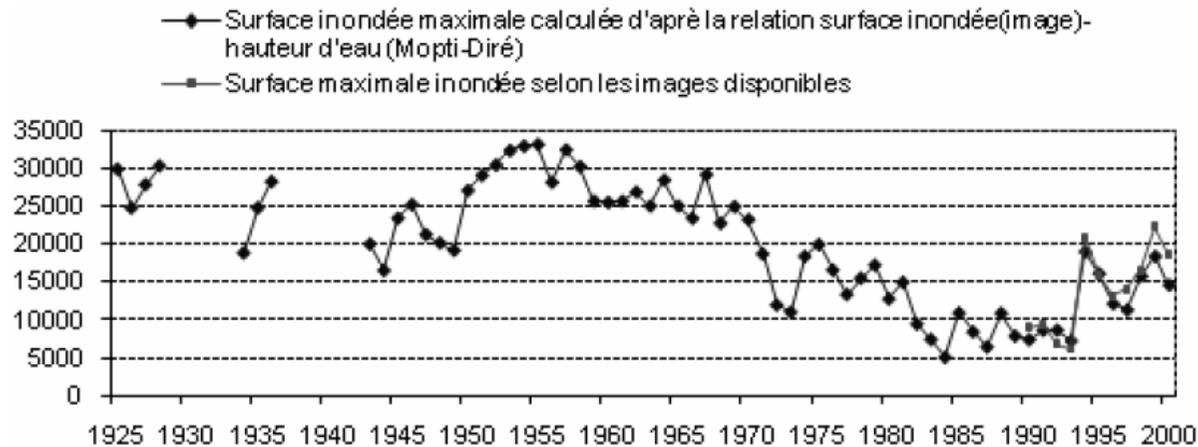


FIGURE 33 : EVOLUTION PROBABLE DES SURFACES INONDEES DEPUIS LE DEBUT DES OBSERVATIONS A MOPTI - COMPARAISON SUR LA PERIODE 1990-2000 DES ESTIMATIONS DE SURFACES INONDEES A PARTIR D'IMAGES LANDSAT OU A PARTIR DE LA RELATION HAUTEUR D'EAU ET SURFACES INONDEES A MOPTI (IN MARIKO ET AL., 2013)

Cette relation peut être utilisée pour prévoir environ un mois à l'avance les surfaces inondées dans la partie aval du DIN, après les lacs centraux, du fait du temps de propagation moyen de la crue depuis Mopti.

On peut donc établir une corrélation entre les débits maximums afin d'estimer à l'avance les superficies maximales inondées. A partir des observations à Douna, on peut déterminer le débit maximum à Mopti avec un coefficient de corrélation R^2 égal à 0.908. A partir de Douna on peut donc prévoir le débit maximum à Diré avec en moyenne 22 jours d'avance en saison sèche et 92 jours, soit 3 mois, en année humide (Figure 34).

Bien que la marge de manœuvre des usagers soit passée de 3 mois (années humides) à 3 semaines ces dernières années, il est possible d'estimer la productivité du milieu à partir des superficies maximales inondables. En effet, avec de bonnes corrélations entre les maximums observés à Douna et Mopti ($R^2 = 0.908$) puis Mopti et Diré ($R^2 = 0.911$), on peut calculer le maximum de crue probable à Diré et déterminer la superficie maximale inondée du delta aval.

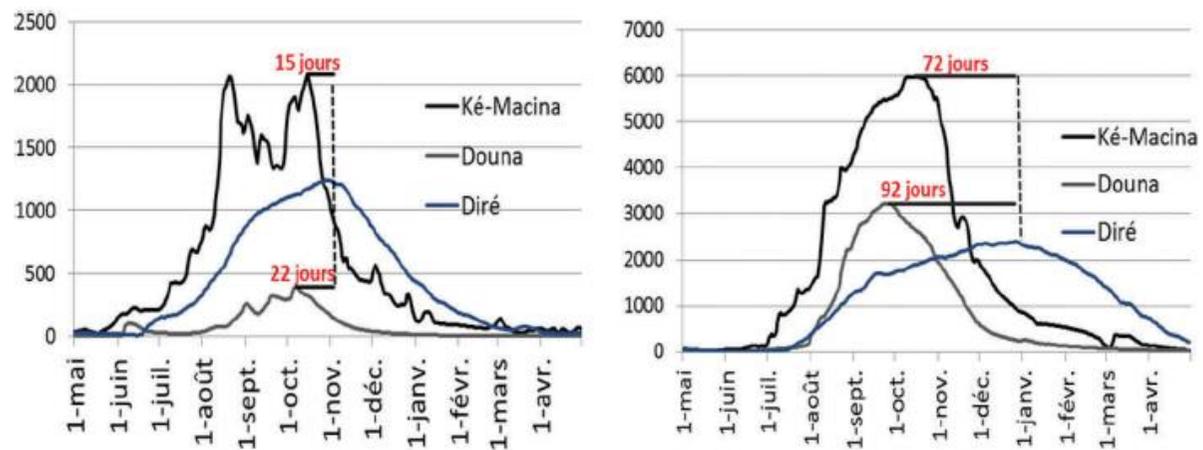


FIGURE 34 : HYDROGRAMMES DE CRUE DU FLEUVE NIGER EN ENTREE ET SORTIE DU DELTA INTERIEUR DU NIGER EN ANNEE SECHE (A GAUCHE) ET EN ANNEE HUMIDE (A DROITE) (IN ZARE, 2015)

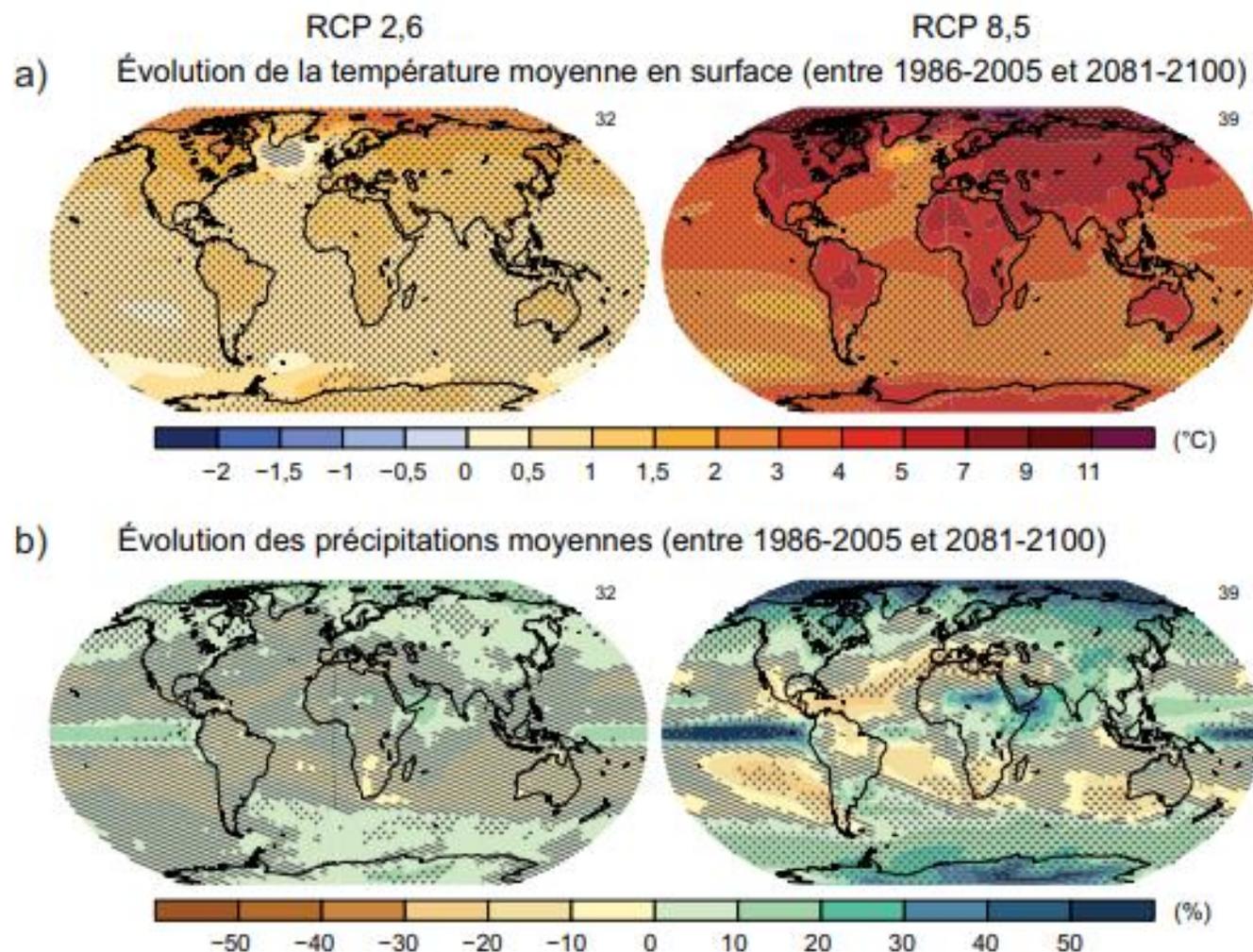
3.4. Evolutions futures

Ce chapitre reprend principalement le résumé à l'attention des décideurs du volume 1 du 5^{ème} Rapport d'évaluation du GIEC (GIEC, 2013). Ce résumé examine les nouveaux éléments concernant le changement climatique sur la base d'analyses scientifiques, d'observations du système climatique, des études théoriques des processus climatiques et des simulations de modèles climatiques.

Contrairement aux précédents rapports, les auteurs ont associé un degré de certitude aux principaux résultats présentés : « *Le degré de certitude [...] est fonction de l'appréciation, par les comités de rédaction, des connaissances scientifiques sous-jacentes et est exprimé par un niveau de confiance qualitatif (de très faible à très élevé) et, lorsque c'est possible, quantifié en termes de probabilités (extrêmement improbable à extrêmement probable). La confiance dans la validité d'un résultat se fonde sur la nature, la quantité, la qualité et la cohérence des éléments correspondants (données, compréhension d'un mécanisme, théorie, modèles, avis d'experts...) et le degré de cohérence. Les estimations probabilistes de mesures quantifiées de l'incertitude d'un résultat se fondent sur l'analyse statistique d'observations ou de résultats de modèles, ou les deux, et l'avis d'experts. Le cas échéant, les résultats sont également formulés sous forme d'énoncés des faits, sans recourir à des qualificatifs d'incertitude* ».

Il n'est pas inutile de rappeler, selon le GIEC, quelques-unes des observations faites ces dernières décennies et quelles devraient être les grandes tendances futures à l'échelle mondiale des éléments scientifiques sur les changements climatiques. Elles sont globalement valables pour le Mali :

- « *Chacune des trois dernières décennies a été successivement plus chaude à la surface de la Terre que toutes les décennies précédentes depuis 1850. Les années 1983 à 2012 constituent probablement la période de 30 ans la plus chaude qu'ait connue l'hémisphère Nord depuis 1 400 ans (degré de confiance moyen)* ».
- « *L'influence de l'homme sur le système climatique est clairement établie [...]. On a gagné en certitude à ce sujet depuis le quatrième Rapport d'évaluation. Il est extrêmement probable que l'influence de l'homme est la cause principale du réchauffement observé depuis le milieu du XX^{ème} siècle* ».
- « *Effectuées à partir d'observations et de modèles, les études des changements de température, des rétroactions climatiques et des changements que subit le bilan énergétique de la Terre apportent des éléments fiables concernant l'amplitude du réchauffement de la planète en réponse au forçage passé et futur* » (Figure 35).
- La moyenne annuelle des précipitations augmentera *probablement* dans les hautes latitudes et l'océan Pacifique équatorial d'ici la fin de ce siècle dans le cas d'un scénario de forçage radiatif « RCP 8.5 » (correspondant à un forçage radiatif de +8.5 W/m²). Dans de nombreuses régions des moyennes latitudes et dans les régions subtropicales arides, les précipitations diminueront *probablement*, tandis que dans de nombreuses régions humides des moyennes latitudes, les précipitations moyennes augmenteront *probablement* d'ici la fin de ce siècle dans le cas du RCP 8.5 (Figure 35).
- Les épisodes de précipitations extrêmes deviendront *très probablement* plus intenses et fréquents sur les continents des moyennes latitudes et dans les régions tropicales humides d'ici la fin de ce siècle, en lien avec l'augmentation de la température moyenne en surface.



Légende :

a) l'évolution de la température moyenne annuelle en surface,

b) l'évolution moyenne en pourcentage des précipitations moyennes annuelles.

Les changements indiqués dans les cartes (a) et (b) sont relatifs à la période 1986-2005. Le nombre de modèles CMIP5 utilisés pour calculer la moyenne multimodèle figure dans l'angle supérieur droit de chaque image. Pour les cartes (a) et (b), les hachures signalent les régions dans lesquelles la moyenne multimodèle est faible par rapport à la variabilité naturelle interne (c'est-à-dire inférieure à un écart type de la variabilité naturelle interne sur des moyennes de 20 ans). Les pointillés signalent les régions dans lesquelles la moyenne multimodèle est grande par rapport à la variabilité naturelle interne (c'est-à-dire supérieure à deux écarts types sur des moyennes de 20 ans) et dans lesquelles 90% au moins des modèles s'accordent sur le signe du changement).

FIGURE 35 : CARTES DES MOYENNES MULTIMODELES CMIP5 POUR LES SCENARIOS RCP 2.6 ET RCP 8.5 SUR LA PERIODE 2081-2100 (IN GIEC, 2007)

Transposées à l'échelle du Mali et du bassin du fleuve Niger et complétées par certaines études :

- il est très probable que les températures vont continuer à augmenter (+1 à +3.5°C en 2050, +1.8 à + 6°C en 2100) entraînant une hausse de l'ETP (3 à 8% en 2050 et 5 à 20% en 2100) (<http://climatewizard.ciat.cgiar.org/index1.html>). De même, les extrêmes de température et de pluie (vagues de chaleur, pluies violentes, sécheresses marquées) seront de plus en plus forts et fréquents ;
- il y a par contre beaucoup d'incertitudes pour ce qui concerne les pluies : le Mali est dans une zone intermédiaire entre l'est où les pluies pourraient augmenter en moyenne et l'ouest où les pluies pourraient diminuer en moyenne d'ici 2100 (Fontaine *et al.*, 2012). Ainsi, les sorties de modèles climatiques sont très différentes entre elles.

Ces différents degrés de certitude/incertitude transparaissent sur la Figure 35 puisque les pointillés traduisent une bonne robustesse et concordance des modèles (cas des températures) alors que les hachures traduisent le contraire (cas des pluies). Il est accepté que les changements climatiques ont un impact sur les systèmes hydrologiques mais ces impacts sont variables à toutes les échelles, de l'échelle continentale à l'échelle locale (Gleick, 2000).

Ce qui suit reprend une partie du travail bibliographique de Aich *et al.* (2016). Pouyaud *et al.* (1987) ont décrit la variabilité spatiale et temporelle du bilan hydrique sur quelques bassins d'Afrique de l'Ouest en analysant la relation entre les précipitations et le ruissellement dans les petits et grands bassins versants. De même, Albergel *et al.* (1987) ont constaté qu'en raison des processus de surface, les fortes pluies provoquent plus de ruissellement de surface pendant les périodes sèches que pendant les périodes humides sur des bassins burkinabés au Sahel. Plusieurs études comme Amogu *et al.* (2014), Descroix *et al.* (2012) et Mahé *et al.* (2005a, 2005b) ont examiné l'augmentation des débits au Sahel et en sont venus à la conclusion que les changements dans l'utilisation des terres et la formation de croûtes dans les sols ont conduit à une augmentation des écoulements en surface lorsque le climat est devenu plus sec dans cette région. En utilisant des approches de modélisation, Séguis *et al.* (2004) ont également constaté un fort impact du changement d'affectation des terres sur les tendances des écoulements dans la région. Mamadou *et al.* (2015) mettent en avant également une autre raison : ils ont constaté que l'augmentation du ruissellement dans les régions sahéniennes du fleuve Niger a déclenché une « rétroaction positive », de sorte que les anciennes mares endoréiques sont de plus en plus souvent reliées au cours d'eaux principaux et contribuent de plus en plus à l'écoulement. Toutefois, pour ce qui concerne les extrêmes hydrologiques, les crues, en comparant les séries chronologiques de débits maxima en Afrique de l'Ouest avec les indices de précipitations et de végétation, Nka *et al.* (2014) ont trouvé principalement des tendances à la hausse pour le Sahel avec une corrélation avec les précipitations mais pas avec la végétation. Ces derniers travaux sont cependant encore trop rares pour leur donner un caractère régional et définitifs.

Aujourd'hui, au-delà du seul changement climatique, on parle donc de changement global : le terme inclut bien sûr le changement climatique, mais aussi les autres changements d'origine anthropique ayant des conséquences globales. Les changements hydrologiques d'origine anthropique sont principalement de deux natures : ceux qui sont extrinsèques et ceux qui sont intrinsèques aux changements climatiques. Leurs effets peuvent se conjuguer et conduire à deux catégories très préoccupantes pour les habitants (Paturel, 2014).

- dans la première catégorie, on peut évoquer la pression démographique et la faible fertilité des sols en Afrique qui obligent les agriculteurs à défricher de plus en plus d'espaces naturels pour parvenir à nourrir la population ;
- dans la seconde catégorie, on peut citer la dégradation de la diversité végétale (voire la disparition de certaines espèces) comme la ressource ligneuse qui ne s'adapte pas assez rapidement aux nouvelles conditions climatiques rencontrées.

Au vu du rôle important des ressources en eau dans la vie économique de ce continent, un certain nombre de travaux ont été menés sur l'Afrique de l'Ouest sur la prévision de la ressource en eau dans un contexte climatique et environnemental non stationnaire. Cependant, il faut reconnaître que la difficulté est grande dans cette région puisque

le GIEC (2013) souligne qu'il ne se dégage des travaux de ses commissions aucun consensus sur l'évolution future des pluies (la scénarisation climatique) et, donc, de la ressource en eau (la scénarisation hydrologique). Une telle incertitude est un frein au développement économique de cette région et peut exacerber des tensions sociales et politiques déjà bien présentes à un niveau local et régional. Certains auteurs notent que la prévision climatique n'est qu'une des données majeures qui auront une influence sur n'importe quel effort d'adaptation (Hulme et Dessai 2008); le climat n'est même pas toujours le facteur clé (Dessai *et al.*, 2009). D'autres informations telles que la démographie, l'économie et ses priorités à plus ou moins longs termes, les modifications des préférences culturelles (par exemple, en Afrique, la modification des habitudes alimentaires qui accompagnent souvent le phénomène de migration de la campagne vers la ville) sont au moins aussi importantes que la capacité à prévoir le climat.

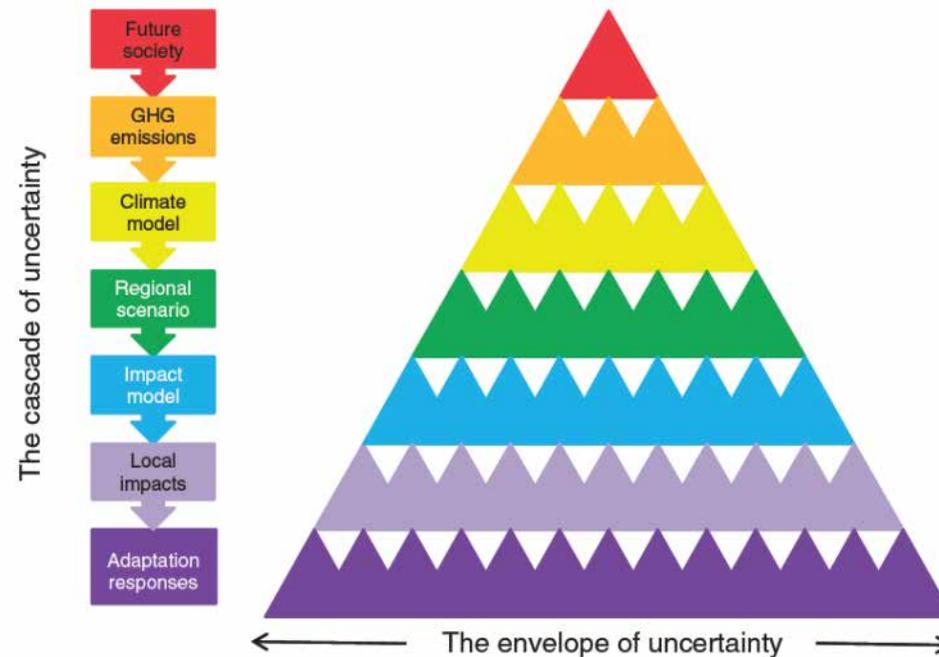


FIGURE 36 : CASCADE D'INCERTITUDES TOUT LE LONG DE LA SCÉNARISATION CLIMATIQUE ET HYDROLOGIQUE (IN WILBY, 2010)

Le schéma des travaux d'études de prévision ou d'impact de la ressource en eau est immuable : un modèle hydrologique est forcé par un modèle ou un ensemble de modèles de climat. Tout le long de cette chaîne, de nombreuses incertitudes interviennent (Figure 36) et il est important de les connaître (Harding *et al.*, 2012 ; Wilby 2005, 2010). Ces incertitudes peuvent se compenser, s'additionner ou se multiplier entre elles :

- au niveau de la scénarisation climatique, les incertitudes concernent le choix du scénario de SRES (Special Report on Emissions Scénarios) et du modèle de circulation globale ou régionale, et la mise en adéquation des sorties des modèles climatiques aux entrées des modèles hydrologiques ;
- au niveau de la scénarisation hydrologique, les incertitudes concernent le choix du modèle hydrologique et la détermination des paramètres du modèle.

Il n'y a bien souvent aucune justification aux différents choix qui sont faits, et il est donc plus judicieux d'utiliser le terme de projection ou de scénario plutôt que de prévision, qu'elle soit climatique ou de ressource en eau, lorsqu'il est question d'estimer la ressource en eau dans le futur, et d'évaluer les impacts d'un changement global.

La scénarisation hydrologique pose de nombreuses questions qui ne sont guère traitées : comment déterminer le jeu de paramètres du modèle qui conduira la scénarisation hydrologique et quel en sera l'impact sur les résultats de cette scénarisation ? Elle est souvent considérée comme ayant une incertitude moindre que la scénarisation climatique (Prudhomme et Davies, 2009a, 2009b). D'après Muerth *et al.* (2012), cela dépend des variables considérées : leur étude sur des bassins du Québec et de Bavière montre que dans le cas de débits de hautes-eaux et de basses-eaux, le choix du modèle hydrologique a une influence du même ordre que le choix du modèle climatique.

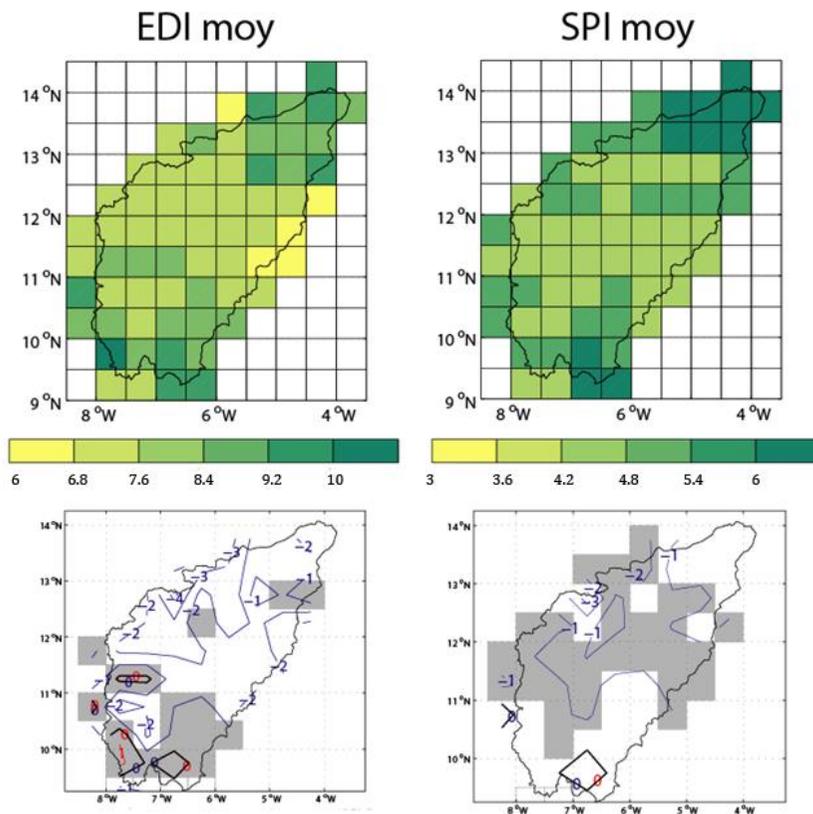
L'exercice de prévision des ressources en eau est donc sujet à de très nombreuses interrogations. Un certain nombre d'auteurs s'y sont prêtés : Aich *et al.* (2016), Déqué *et al.* (2017). Mais comme l'écrit Roudier *et al.* (2014), il y a un besoin d'études supplémentaires sur l'évaluation des ressources en eau futures en Afrique de l'Ouest. Malgré le consensus sur la grande vulnérabilité de cette région au changement climatique, il y a un réel manque d'études portant sur cette région. Les études futures devraient examiner plus en détail les variations des extrêmes hydrologiques (crues et étiages), qui sont fondamentales pour l'économie des pays africains. Il est également urgent de prendre en compte les autres facteurs impactant la répartition de la pluie en un ruissellement, une évaporation et une infiltration, notamment les changements d'utilisation de l'eau et des terres. Ce n'est qu'à cette condition que l'on pourra obtenir une évaluation des écoulements plus exacte et de guider l'élaboration de bonnes stratégies d'adaptation. Roudier *et al.* (2014) proposent l'utilisation de modèles intégrés basés sur des processus qui incluent simultanément les processus moteurs qui lient la dynamique du climat, du carbone, de l'eau et de la végétation terrestre (Guimberteau *et al.*, 2014 ; Gerten, 2013)

De plus, aux fortes incertitudes des résultats des modèles climatiques s'ajoutent des incertitudes liées (i) à la mise à l'échelle de ces résultats à celle du bassin versant, (ii) au choix du modèle hydrologique et (iii) au calage du modèle hydrologique. Les travaux scientifiques sont rares mais aboutissent quand même à certaines constatations : Ouermi *et al.* (2015) montrent qu'il vaut mieux caler les modèles hydrologiques sur une période sèche qu'humide, les simulations étant alors plus fiables...

3.5. Cas d'une étude exploratoire : vulnérabilité des ressources en eau superficielle du bassin du Bani aux évolutions anthropiques et climatiques

Ce chapitre se base sur un résumé des résultats obtenus entre 2007 et 2010 lors d'un projet de recherche intitulé RESSAC (vulnérabilité des Ressources en Eau Superficielle au Sahel aux évolutions Anthropiques et Climatiques à moyen terme) dans le cadre de l'ANR « Vulnérabilité, Milieux et Climat ». Ce projet de recherche s'est uniquement focalisé sur le bassin du Bani dans sa partie malienne, ivoirienne et burkinabé. L'ensemble de ces travaux a été mené à une résolution du ½ degré carré, soit une maille d'environ 50 km x 50 km.

La vulnérabilité est souvent analysée d'un point de vue climatique à travers des indices climatiques (SPI, EDI, nombre de jours secs). Sur le bassin du Bani, ces indices montrent que la vulnérabilité ne suit pas forcément un gradient sud-nord puisque c'est la partie centrale du bassin qui apparaît comme la plus vulnérable (Roudier et Mahé, 2010 ; Louvet *et al.*, 2011) (Figure 37).



Légende :

en haut : durée moyenne des sécheresses estimées par l'EDI-10 jours et le SPI entre juillet et septembre pour la période 1950-1969 ;

en bas : différence entre la période 1970-2000 et 1950-1969

les zones ombrées indiquent les différences significatives au sens du test « t de Student » au seuil de confiance de 5%.

FIGURE 37 : CALCULS D'INDICES CLIMATIQUES CARACTERISANT LA DUREE MOYENNE DES EPISODES SECS SUR LE BASSIN DU BANI

3.5.1. Un constat : une pression démographique de plus en plus importante...

Les données des Recensements Généraux de la Population et de l'Habitation au Mali (RGPH Mali 1976, 1987 et 1998) et en Côte d'Ivoire (RGPH Côte d'Ivoire 1976, 1988 et 1998) permettent d'estimer la population totale du bassin (Tableau 20 et Figure 38).

Année	Population totale	population rurale	population urbaine	Taux population urbaine
1976	1 620 715	1 463 665	157 050	9.7%
1987-1988	1 982 556	1 695 677	286 879	14.5%
1998	2 634 619	2 147 589	487 030	18.5%

TABLEAU 20 : ESTIMATION DE LA POPULATION DU BASSIN DU BANI A DOUNA A PARTIR DES RGPH DU MALI ET DE LA COTE D'IVOIRE

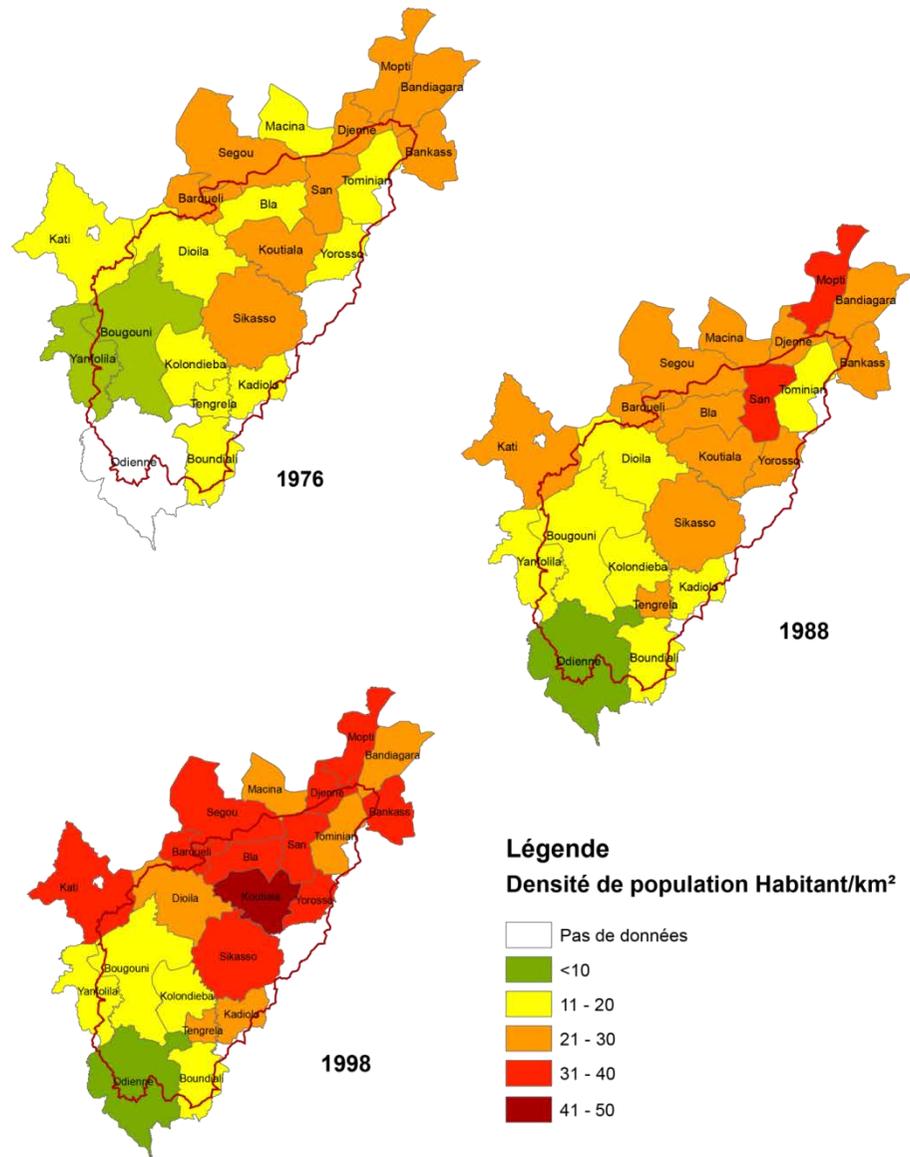


FIGURE 38 : DENSITE DE POPULATIONS DU BASSIN DU BANI A SOFARA PAR UNITES ADMINISTRATIVES (RGPH 1976, 1987-1988 ET 1998)

3.5.2. ... qui impacte sur l'évolution des cultures

L'augmentation de la population a un impact sur l'évolution du paysage. Pour y faire face, soit on augmente les rendements des cultures, soit on augmente les superficies cultivées.

Un suivi rétrospectif de l'occupation du sol par télédétection a été effectué par analyse de l'évolution de l'occupation du sol entre les années 1970, 1985 et 2000 à partir d'images haute résolution Landsat MSS, TM, ETM+, retenues à des dates-clés. A partir de sites-témoins choisis dans des zones particulières et représentatives du bassin, un traitement supervisé d'images sur l'ensemble du bassin du Bani a été réalisé. Cependant, de nombreux biais peuvent intervenir liés à la difficulté de traiter de nombreuses images acquises à des dates / saisons différentes et représentant des niveaux phénologiques différenciés à cause de la forte variabilité interannuelle des précipitations ou de la date de prise de vue plus ou moins avancée dans la saison sèche. D'autres biais peuvent être liés aux sites-témoins choisis. Ainsi, deux analyses menées distinctement à partir de sites-témoins différents mais basées toutes deux sur la comparaison d'images classifiées indépendamment aboutissent à des résultats sensiblement différents (Figure 39).

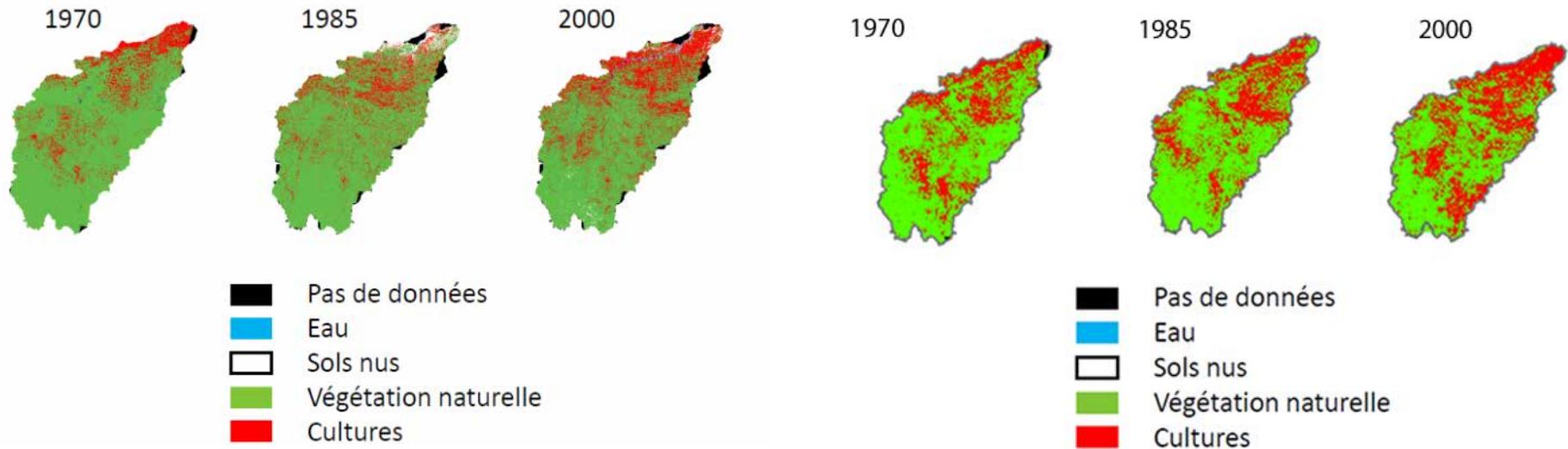


FIGURE 39 : CARTOGRAPHIE DE L'OCCUPATION DU SOL SUR LE BASSIN DU BANI VERS 1970, 1985 ET 2000 A PARTIR DE TRAITEMENTS D'IMAGES HAUTE-RESOLUTION (IN RUELLAND ET AL. (2010, 2011) ET IER BAMAKO (2011))

Malgré ces limites, certaines parties du bassin (en particulier la partie aval sahélienne) ont connu d'évidence d'importants changements de couverts végétaux. L'analyse des résultats révèle cependant les mêmes tendances :

- une augmentation des surfaces cultivées aux dépens de la végétation naturelle entre 1970 et 2000 (Ruelland *et al.*, 2010 ; 2011) aux échelles de sites-témoins et du bassin,
- une cartographie des zones cultivées qui se cale bien avec la carte de la population et
- une densification extrême (probablement proche de la saturation) de ces mêmes zones dans le nord du bassin et autour des grands axes routiers et villes, particulièrement dans le sud du bassin.

Ce même travail a été également mené à partir d'images basse résolution AVHRR du satellite NOAA. Les traitements d'images de basse résolution associés à des calculs de NDVI montrent un reverdissement de la zone dans les années 90 sans toutefois parvenir à mettre en évidence des liens évidents avec la variabilité de la pluie ou avec une augmentation des superficies cultivées (Bégué *et al.*, 2011).

3.5.3. Une tentative de modélisation de ces évolutions

3.5.3.1. POPULATION

En fonction des recensements existants et de paramètres de modèle de population calés à l'échelle du pays (Ruas et Benoit-Cattin, 1991 ; projections des Nations Unies (<http://esa.un.org/unpp>)), le modèle de transition démographique a été retenu. Les hypothèses du modèle supposent que la natalité et la mortalité suivent une fonction anti-logistique qui conduit à un modèle logistique (courbe en « S » aplatie ou sigmoïde) de la population (Artzrouni, 1986 ; Hillion, 1986). Le modèle logistique de population a été calé à l'échelle de chaque ½ degré-carré (environ 50 km x 50 km) qui constituent le bassin du Bani à Douna.

Alors que dans la majeure partie des pays on observe un ralentissement de l'accroissement de la population, le Mali comme beaucoup d'autres pays africains se trouve encore dans une phase où l'accroissement croît encore. La part de la population urbaine ne cesse de croître aux dépens des ruraux qui assument pourtant la production agricole du Mali. La densité moyenne du bassin est de l'ordre de 25 habitants au km². La Figure 38 permet de se rendre compte de la variabilité spatiale de la densité de population sur le bassin du Bani en amont de Sofara où la partie sud du bassin est bien moins anthropisée que la partie nord.

3.5.3.2. EVOLUTION DU MILIEU

L'évolution du milieu est déterminée par un ensemble de facteurs en interaction permanente. En Afrique de l'Ouest, l'environnement totalement naturel, au sens de « sans influence humaine », n'existe presque plus. Les paysages que l'on peut observer lorsque l'on parcourt la région résultent d'un équilibre entre une pression naturelle qui tend à sélectionner une végétation en équilibre avec les conditions climatiques et une pression humaine, qui tend globalement à dégrader le milieu, en diminuant la biomasse naturelle et en modifiant les états de surface et les conditions locales d'infiltration. Ces interactions entre le climat, l'homme et son environnement représentent donc les éléments moteurs de la dynamique environnementale. Deux groupes de facteurs se dégagent, donc, qui conditionnent l'évolution du milieu : les facteurs naturels et les facteurs anthropiques. En réponse à la pression démographique, l'homme a augmenté les superficies cultivées aux dépens de la végétation naturelle. Le changement climatique que connaît le continent depuis 1970 n'a fait qu'accentuer cet état de fait. On en déduit deux types principaux d'occupation du sol : les sols en végétation naturelle (jachères y compris) et les sols cultivés.

Il est aisé à partir des informations disponibles et de la littérature de construire le scénario suivant pour le développement des superficies cultivées :

- lorsque le bassin était peu peuplé (avant 1950), les rendements des superficies cultivées couvraient les besoins alimentaires des populations ; les aires cultivées étaient à leur niveau le plus bas et fluctuaient plus ou moins ;
- par la suite, la population a augmenté entraînant une demande supplémentaire des besoins alimentaires mais les meilleures conditions climatiques des décennies 1950 et 1960 ont permis une augmentation des rendements des cultures, ne nécessitant pas alors une extension des surfaces ;
- à partir de 1970, les conditions climatiques se sont dégradées et la sécheresse a atteint un paroxysme pendant la décennie 1980 ; la population continuant à croître, les paysans ont réduit les temps de jachère de leurs champs et ont défriché de plus en plus leur espace naturel, les terres arables mais aussi marginales ;

- au-delà, dans certaines parties du bassin, les plus anthropisées, l'espace cultivable est saturé et les superficies cultivées se stabilisent ; pour satisfaire les besoins des populations, les solutions adoptées sont une modernisation des moyens et techniques de production, et des techniques de régénérations de sols anciennement cultivés ou à rendements très faibles.

Ce scénario se rapproche du modèle de transition démographique de population évoqué plus haut et il a été donc proposé un modèle similaire d'évolution logistique pour la dynamique des superficies cultivées sur le bassin du Bani à Douna. Les caractéristiques de ce scénario ne sont pas forcément homogènes sur l'ensemble du bassin, aussi la modélisation s'est faite par $\frac{1}{2}$ degré-carré.

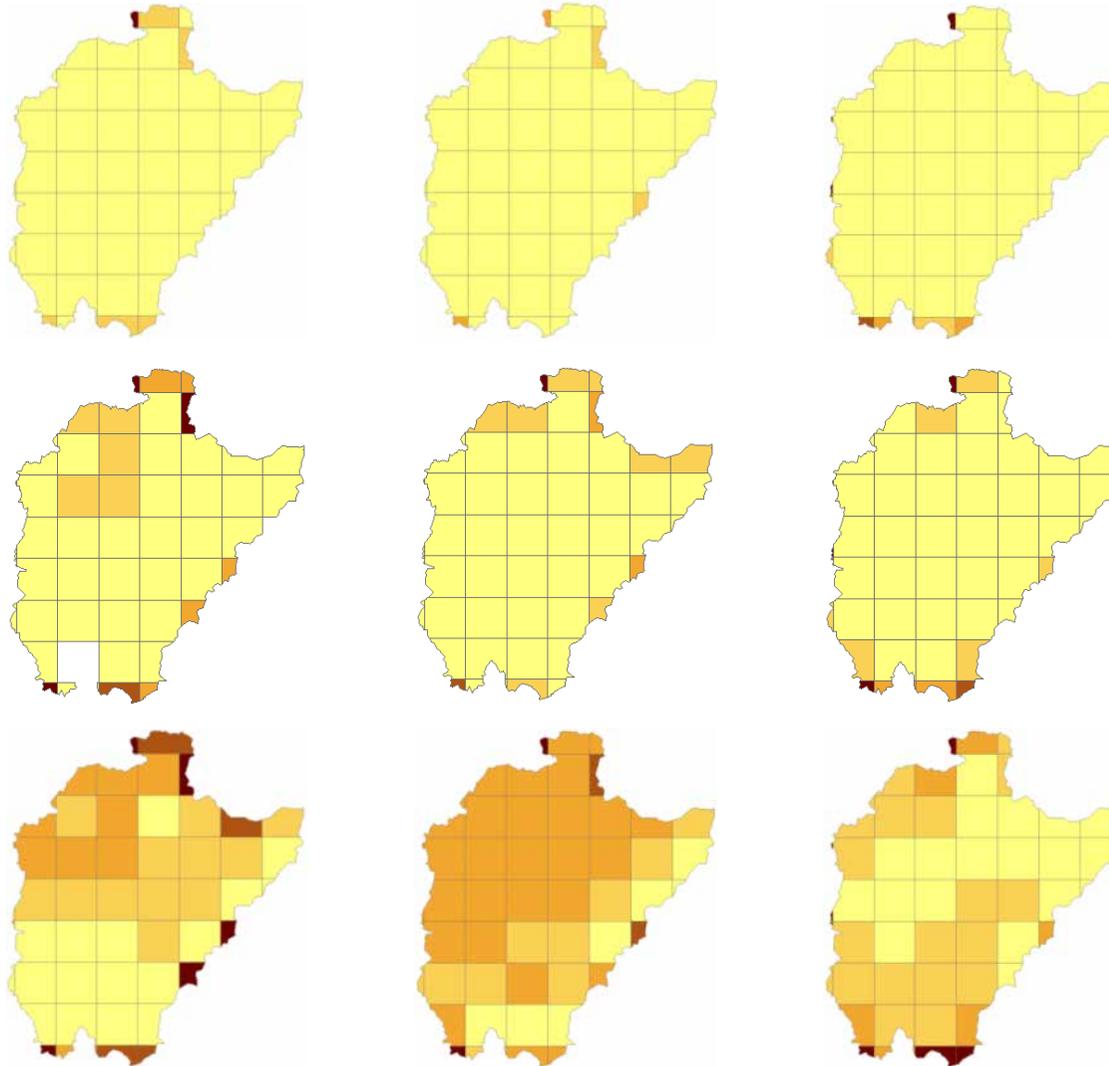
Afin de caler ce modèle (Figure 40), il a fallu des données d'observations. Trois sources de données ont été identifiées :

- télédétection : images de 1970, 1985 et 2000 ;
- statistiques agricoles du Ministère de l'Agriculture du Mali (extrapolées pour la Côte d'Ivoire) : 1985-1994, 1999 et 2001-2003 ;
- données de capacité de travail exprimée en hectares/rural sur la période 1961-1992 pour l'ensemble du Mali extraite du fichier Agrostat (FAO 1992).

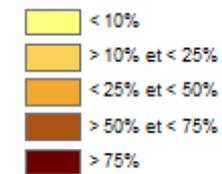
Téledétection

Statistiques agricoles

Capacité de travail



Légende :



Pourcentage de surfaces cultivées par 1/2 degré-carré en 1960, 1980 et 2000

FIGURE 40 : RESULTATS DE MODELISATION D'EVOLUTION DES SURFACES CULTIVEES POUR 3 DATES (1960, 1980 ET 2000) ET SELON 3 SOURCES DE DONNEES : TELEDETECTION, STATISTIQUES AGRICOLES ET CAPACITE DE TRAVAIL

Le modèle basé sur la capacité de travail s'éloigne quelque peu de ce que l'on observe sur le terrain. Les deux autres modèles donnent des résultats différents mais avec une tendance identique : une augmentation des surfaces cultivées.

3.5.4. Essais de prospectives

Une voie vers l'amélioration de l'aptitude à simuler les écoulements aux exutoires des bassins versants est de pouvoir prendre en compte dans les modèles la dynamique du milieu. Cette dynamique résulte soit de processus internes ou de forçages externes naturels, soit de changements anthropiques persistants.

Pour évaluer la dynamique du bassin, il existe des outils qui permettent de suivre ses dimensions temporelles et spatiales ainsi que de nouvelles méthodes qui permettent d'effectuer des transferts d'échelle d'observation de cette dynamique:

- des modèles climatiques globaux (GCM) et régionaux (RCM), permettant d'évaluer les tendances climatiques futures, associés à des techniques de désagrégation des signaux globaux des GCMs à des échelles compatibles de l'observation et de la modélisation hydrologique ;
- des modèles socio-économiques permettant d'évaluer les conséquences d'une pression démographique croissante sur le milieu.

Ces outils couplés à des modèles hydrologiques permettent d'évaluer les ressources en eau à l'avenir du bassin et d'appréhender sa vulnérabilité.

3.5.4.1. SCENARIOS CLIMATIQUES

Des scénarios climatiques ont été définis par application de la méthode des deltas (Ardoin-Bardin *et al.*, 2010 ; Déqué *et al.*, 2007). A l'échelle du bassin du Bani, les sorties de quatre GCMs désagrégées au ½ degré carré ne révèlent que des tendances pluviométriques très faibles : entre -2.4% et 4.1% à l'horizon 2050 par rapport à la période 1961-1990. Le RCM WRF, forcé par Arpège, aboutit également à des tendances pluviométriques de faible ampleur mais cohérentes avec une légère hausse des pluies à moyen terme (Vigaud *et al.*, 2009).

3.5.4.2. SCENARIOS ENVIRONNEMENTAUX

Des modèles d'évolution des superficies cultivées (cf. 3.5.3.2) calés sur les données satellites, sur les statistiques agricoles et la « capacité de travail » peuvent servir de base pour les scénarios du futur (Figure 41).

Cependant, d'autres considérations devraient être prises en compte.

L'agriculture du Sud-Mali a connu des transformations profondes au cours des trois/quatre dernières décennies accompagnées d'une mise en place progressive d'une plus grande association agriculture-élevage (Dufumier, 2005) : les paysans ont remplacé leurs anciens systèmes d'agriculture sur abattis-brûlis par un système dans lequel les champs cultivés le sont désormais tous les ans, sans retour à la jachère. Ces parcelles sont situées sur un *ager* fertilisé par des apports de matières organiques en provenance d'aires réservées à la pâture des animaux (*saltus*). Ces transformations n'ont pas été homogènes dans toutes les zones du bassin du Bani. Les missions et enquêtes de terrain ont également montré le développement d'une « agroforesterie » associant des arbres et/ou arbustes aux systèmes de cultures annuelles et d'élevage. Les analyses (Louvet *et al.*, 2009) montrent que la partie septentrionale du bassin est déjà proche de la saturation et les seuls espaces qui devraient à l'avenir se transformer sont les espaces méridionaux et sud du bassin comme le suggère Dufumier (2005). Dans les premiers, apparaissent en proportion plus abondantes les terres de parcours. Au sud, vers la frontière ivoirienne, on trouve encore d'importantes superficies dévolues à l'agriculture d'abattis-brûlis, en rotation avec des friches de longue durée (10 à 15 ans).

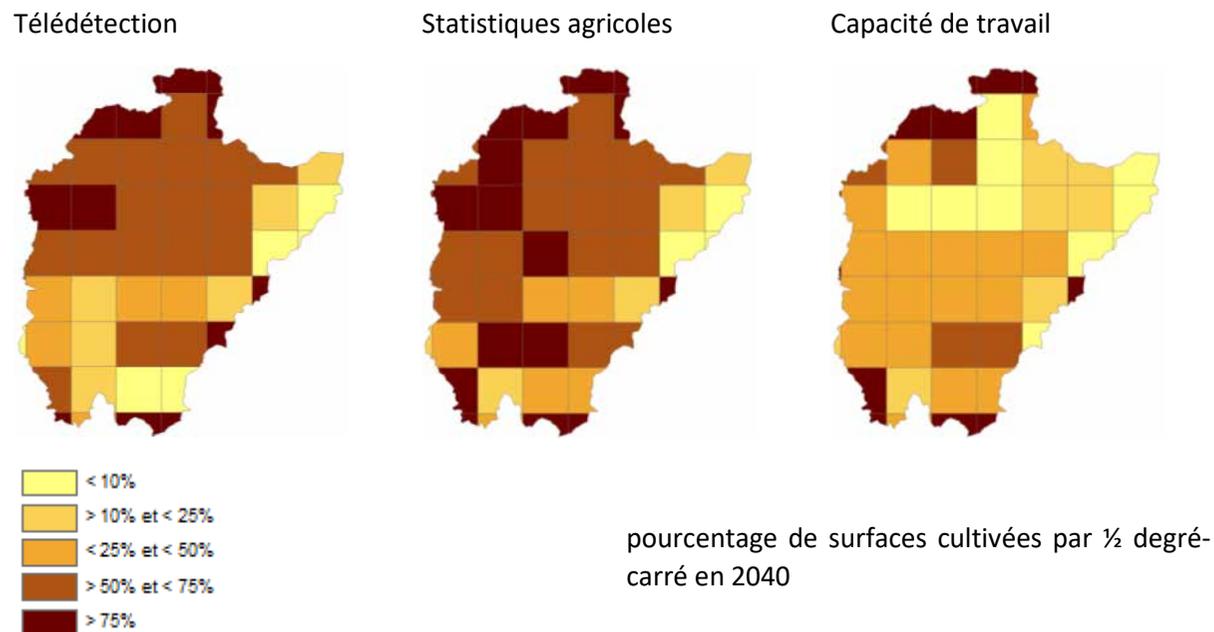


FIGURE 41 : RESULTATS DE MODELISATION D'EVOLUTION DES SURFACES CULTIVEES A L'HORIZON 2040 SELON 3 SOURCES DE DONNEES : TELEDETECTION, STATISTIQUES AGRICOLES ET CAPACITE DE TRAVAIL

Les transformations de ces régions méridionales ou sud du bassin pourraient être accélérées si une planification d'aménagement régionale à l'échelle nationale était prise. Sur la partie ivoirienne du bassin, les événements politiques passés sont encore trop récents pour prévoir quel sera à l'avenir les décisions prises.

3.5.4.3. SCENARIOS HYDROLOGIQUES

Deux types de modèles hydrologiques ont été utilisés afin de simuler les ressources en eau de surface : un modèle à base physique (SWAT) et des modèles à base conceptuelle (GR4J et HydroStrahler) où l'objectif est de reproduire au mieux les écoulements sans trop se soucier des différents processus mis en jeu lors de la redistribution de la pluie en ruissellement, infiltration et évapotranspiration.

Malgré la difficulté à appliquer une modélisation à base physique du fait de la faible disponibilité de données, les résultats de calage et de validation en journalier du modèle SWAT ont été satisfaisants sur l'ensemble des stations du bassin. Le modèle SWAT présente une bonne robustesse aux variations climatiques et une transposition spatiale satisfaisante. Il peut produire de plus des éléments de compréhension des processus « eaux de surface / eaux souterraines » en jeu (Laurent et Ruelland, 2010), à condition de bien représenter tous les processus mis en jeu.

A priori, la modélisation conceptuelle à réservoirs semble plus appropriée pour le bassin. Au pas de temps journalier, les simulations d'écoulement à partir des modèles HydroStrahler (Ruelland *et al.*, 2008 ;2009 ;2011) et GR4J (Ruelland *et al.*, 2010) sont d'ailleurs supérieures. Comme on pouvait s'y attendre, les performances de GR2M au pas de temps mensuel sont légèrement inférieures à celles obtenues au pas de temps journalier avec GR4J. Une voie d'amélioration du modèle proposée est de prédéterminer un des paramètres du modèle (hauteur du réservoir sol) à l'aide d'indices NDVI estimés en fin de saison sèche (en avril) par traitement d'images NOAA-AVHRR (Dezetter et Ruelland, 2010). On observe une amélioration des performances du modèle GR4J en simulation mais pas sur l'ensemble des bassins testés.

Dans un cadre prospectif,

- la seule prise en compte des scénarios climatiques, sous réserve de leur fiabilité, conduit à des écoulements plus précoces avec une décrue moins rapide et une sévérité moindre des étiages par rapport à la période avant 1970 ;
- la prise en compte de l'évolution de l'occupation du sol sur le bassin au cours des dernières décennies dans le modèle conceptuel GR4J n'a pas permis d'améliorer les résultats de la modélisation hydrologique ;
- l'intégration simultanée des scénarios climatiques et socio-économiques nécessite donc encore quelques développements qui se poursuivent.

Cependant d'autres voies résultant d'observations de résultats de modélisation ont été explorées :

- une première voie se base sur des calages du modèle sur des périodes glissantes. Des tendances ou des espaces contraints de variation des jeux de paramètres peuvent apparaître et permettre alors de définir des jeux de paramètres plausibles pour le futur qui peuvent résulter d'un changement global, c'est-à-dire bien évidemment un changement climatique mais aussi les autres changements d'origine anthropique ayant des conséquences globales ; ces analyses doivent être faites en même temps qu'une analyse de sensibilité du modèle à ses paramètres ;
- une seconde voie se base sur l'observation que les modèles hydrologiques en Afrique de l'Ouest calés sur des périodes sèches reproduisent mieux les écoulements en période plus humides qu'inversement (Ouermi *et al.*, 2014).

3.5.4.4. DES CONTRAINTES : L'ARABILITE DES TERRES ET LE DEVELOPPEMENT ECONOMIQUE

Il est apparu utile de compléter la carte pédologique des sols existant au Mali par une carte des aptitudes culturales des terres en regroupant les sols en fonction de leurs qualités intrinsèques de fertilité, de la possibilité de les améliorer, de leur pente, de leur susceptibilité à l'érosion et du stade que celle-ci a déjà pu y atteindre. A partir des informations récoltées dans le cadre du Projet Inventaire des Ressources Terrestres (PIRT), deux cartes ont été établies :

- une carte du potentiel productif des terres (Figure 42) et
- une carte d' « arabilité » des terres qui dérive directement de la précédente par regroupement de certaines classes du potentiel productif (Figure 43).

De même, dans un contexte de croissance démographique et de réduction des ressources naturelles, l'évaluation des potentialités agro-climatiques du bassin en vue d'une gestion rationnelle des ressources naturelles est indispensable. Les terres arables devenant insuffisantes, des terres jugées au préalable impropres à l'agriculture ou difficiles à cultiver sans aide mécanique ou animale sont à nouveau mises en valeur. Pour ces dernières, c'est le cas des bas-fonds, terre autrefois « lourde » à travailler vers lesquelles se retournent maintenant les paysans. Une évaluation des zones favorables aux cultures de bas-fonds a été menée dans le bassin du fleuve Bani (Figure 44). Mais pour l'écoulement de ces produits, il faut identifier leur accessibilité et leur position géographique par rapport aux centres de consommation (villes) et, surtout, de commercialisation (marchés). Pour ce faire, des données physiques et socio-économiques ont été collectées et analysées suivant les techniques SIG. La superposition de ces différentes couches d'informations, a permis d'identifier dans le bassin du Bani d'importantes zones favorables aux cultures de bas-fonds. La superficie des zones de bas-fonds est estimée à environ 35 200 km². Respectivement, 41, 51 et 60% des localités maliennes, burkinabés et ivoiriennes du bassin du Bani ont un accès relativement facile aux bas-fonds. Cependant l'étude montre une insuffisance du nombre des centres urbains à l'échelle du bassin versant pour la commercialisation des productions de bas-fonds. Ainsi, une exploitation agricole intensive de ce bassin devrait tenir compte de cette contrainte.

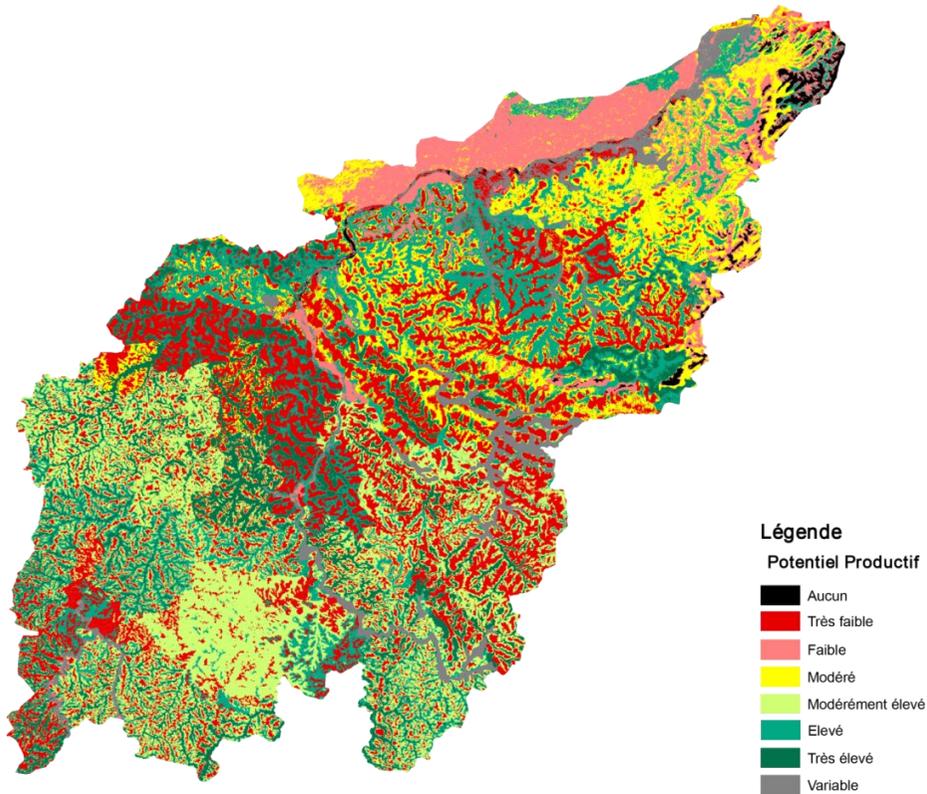


FIGURE 42 : CARTE DU POTENTIEL PRODUCTIF DES TERRES DU BASSIN DU BANI (PARTIE MALIENNE) SELON LE PIRT



FIGURE 43 : CARTE D' « ARABILITE » DES TERRES DU BASSIN DU BANI (PARTIE MALIENNE) SELON LE PIRT

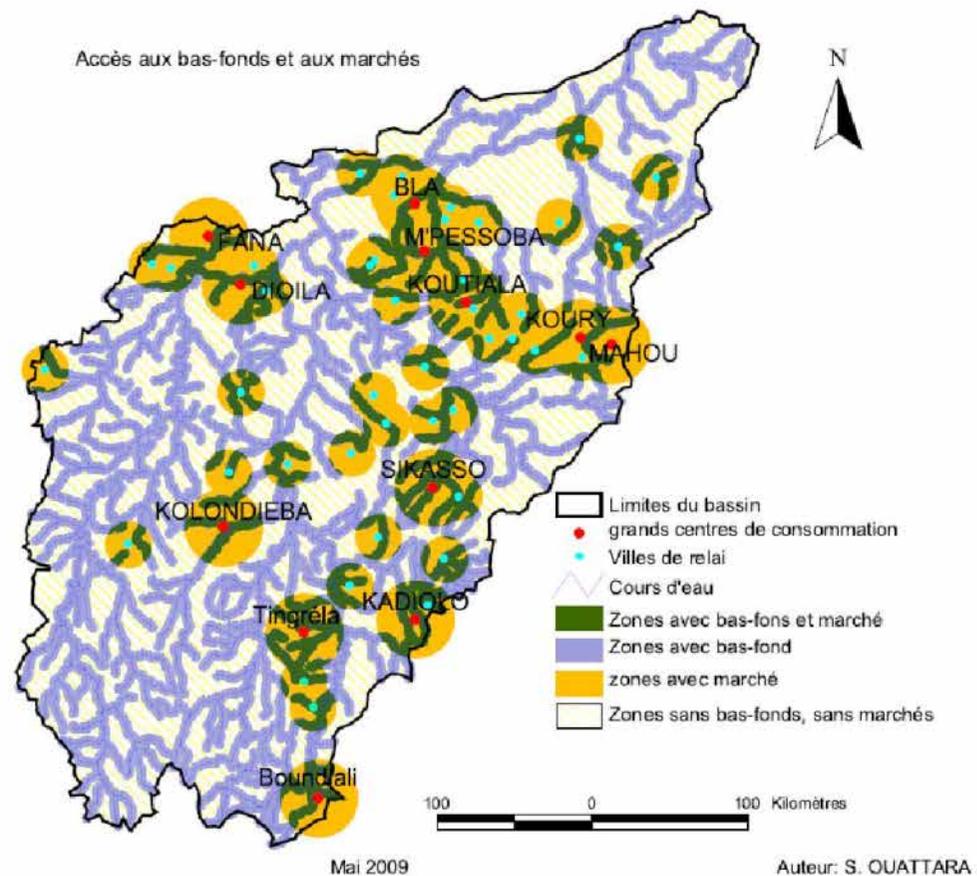


FIGURE 44 : BASSIN DU BANI - CARTE D'IMPLANTATION DES BAS-FONDS ET DES MARCHES

3.5.5. Conclusions de cette étude exploratoire

Cette étude a appliqué une méthodologie de travail qui avait été mise au point dans un environnement sahélien, le bassin du Nakanbé au Burkina Faso (Paturel *et al.*, 2017). A une échelle mensuelle qui peut sembler suffisante pour faire de la prospective de ressources en eau, les auteurs ont essayé d'améliorer la qualité des simulations d'écoulement en intégrant dans des modèles hydrologiques une dynamique de l'environnement du bassin du Bani. Ce travail avait deux originalités : i) la prise en compte d'une variabilité de la capacité en eau du sol à l'aide d'images satellites et ii) la prise en compte de données démographiques afin de caractériser le degré d'anthropisation du bassin. Les résultats attendus sont moins bons que ceux qui étaient espérés. A cela, on peut émettre plusieurs raisons : le manque de données fiables, quelles qu'elles soient, à l'échelle du bassin du Bani ; les multiples incertitudes (liées au choix des modèles climatiques, population, environnemental et hydrologiques, au choix du SRES, au choix des périodes de calage, au choix des méthodes d'analyse du changement global, ...) qui se combinent et qui sont telles qu'elles ne permettent pas au final d'avoir un début de réponse à la question de l'estimation des ressources en eau dans le futur...

Cependant, cette étude exploratoire ouvre des pistes prometteuses d'intégration de données autres que celles utilisées classiquement dans les modèles hydrologiques afin de simuler les écoulements.

Cette étude pose aussi beaucoup de questions autour de la vulnérabilité et du risque et de leur définition. Le risque est la rencontre entre un événement perturbateur et un élément vulnérable (Blancher et Rycus, 1988 ; Paturel, 1991). Il est inhérent à l'hydrosystème et il faut vivre avec et donc le gérer. Cela passe nécessairement par une bien meilleure connaissance de l'élément vulnérable et de l'élément perturbateur.

3.6. Remarques et conclusions

D'une manière générale, en Afrique de l'Ouest, l'analyse du contexte et des évolutions hydroclimatiques d'une région se heurte au problème récurrent de l'accès aux données, en particulier des données climatiques car ce sont bien souvent les services météorologiques nationaux qui font le plus de difficultés pour mettre à disposition leurs données. Cet écueil franchi, l'expérience montre que se pose alors le problème de la qualité des données mises à disposition, problème généralement dû à une mauvaise gestion de la donnée.

Un certain nombre de travaux scientifiques ont été menés sur la caractérisation du « changement/variabilité » climatique qu'a connu l'ensemble de l'Afrique de l'Ouest, voire Centrale à partir de la décennie 1970. Ces travaux se sont souvent centrés sur des « hot-pots » de l'Afrique, ont utilisé des jeux de données qui n'ont pas toujours été contrôlés et qui couvraient des périodes et des aires distinctes, ont utilisés des méthodologies d'analyse différentes... Cela contribue à un ensemble de résultats qu'il n'est pas toujours simple à synthétiser en raison de ces multiples différences et qui concluent à des résultats parfois contradictoires. Il est d'ailleurs intéressant mais aussi curieux de noter que certains acteurs locaux (agriculteurs, techniciens agricoles, responsables politiques...) infirment encore aujourd'hui certains résultats de recherche : la sécheresse ou le déficit pluviométrique persiste et conduit à de mauvais rendements de leurs cultures (Descroix *et al.*, 2015).

Aujourd'hui fleurissent de plus en plus sur « la toile » des « grilles de variables climatiques », passées ou futures. Elles résultent le plus souvent de sorties de modèles climatiques, de réanalyses et/ou de nouvelles méthodes de mesures indirectes des variables climatiques : radar, infra-rouge... Elles permettent de couvrir de très larges espaces mais elles se heurtent encore à un problème de taille : elles ont besoin de mesures ponctuelles de terrain ... qui sont peu denses et pas toujours fiables... Leurs échelles temporelles sont pour la plupart mensuelles, voire journalières, même si à cette échelle journalière, les résultats semblent être très éloignés de ce qui est observé.

Malgré leurs insuffisances, ces grilles sont complémentaires des données ponctuelles de terrain car elles donnent un aperçu spatial des phénomènes... à condition de pouvoir valider les indispensables interpolations ou 'descentes d'échelles » faites. Ces produits ont besoin d'être évalués entre eux avec des grilles issues d'observations directes.

Pour ce qui est des observations, certains produits existent sous forme de grilles à un pas de temps mensuel et à une résolution du ½ degré carré (environ 50 km x 50 km, soit environ 2 500 km² à la latitude du bassin du fleuve). Parmi les plus connus, on peut citer les grilles climatiques du CRU (Climate Research Unit). Ces données sont libres d'accès sur « la toile » et couvrent le monde entier depuis 1900 jusqu'à nos jours. Ces grilles s'appuient sur des techniques diverses d'interpolation de données qui n'ont cependant guère de justification scientifique. Sur l'Afrique de l'Ouest, la densité de l'information de mesure est faible car elle n'avoisine « que » 0.5 poste/2 500 km², les années où il y a le plus de données. Les stations de mesure principalement utilisées sont les stations dites « synoptiques » ou encore « stations primaires » gérées par les services nationaux de la météorologie et qui ont été pour la grande majorité installées au cours de la décennie 1940.

HSM/SIEREM (HydroSciences Montpellier – Système d'Informations Environnementales sur les Ressources en Eau et leur Modélisation) met également à disposition sur la « toile » des grilles de pluie sur l'Afrique issues de données ponctuelles de terrain. Ces grilles sont également à la résolution du ½ degré-carré mais ne couvrent que la période 1940-1999. Ses auteurs se sont limités à cette fenêtre temporelle afin d'assurer une certaine qualité aux données produites. Les grilles HSM/SIEREM sont plus précises car elles se basent sur les données historiques de l'ORSTOM qui a accompagné dans la plupart des pays de l'Afrique de l'Ouest et Centrale la gestion des bases de données climatiques : avec l'ex Comité Inter-états d'Etudes Hydrauliques (CIEH), l'ORSTOM et le Ministère de la Coopération française ont publié en 1974 des annuaires des « précipitations journalières de l'origine des stations à 1965 », puis en 1989 des annuaires des « précipitations journalières de 1966 à 1980 » que l'on retrouve sous forme numérisée et en libre accès dans la base « horizon pleins textes » de l'IRD (<http://horizon.documentation.ird.fr>). Ainsi, de l'origine des stations jusqu'en 1980, l'ensemble des données pluviométriques existantes ont été critiquées, analysées et numérisées. C'est une base de données unique au monde qui fournit une information de base beaucoup plus dense que celle du CRU : au Mali, en moyenne, plus de 200 stations pour HSM/SIEREM contre seulement quelques dizaines pour le CRU. Au-delà de 1980, malheureusement, aucun travail d'une telle ampleur n'a été effectué. Les grilles HSM/SIEREM mises à disposition sur « la toile » sont donc, pour partie, une valorisation du travail de mesure, de critique et d'analyse de techniciens, d'ingénieurs et de chercheurs de terrain, pour la plupart de l'ORSTOM mais aussi du CIEH et des services nationaux de la Météorologie Nationale des pays concernés. Depuis un an, IRD/HSM souhaite initier dans le cadre d'un vaste projet sur la révision des normes hydrologiques en Afrique de l'Ouest et Centrale, une mise à jour de ces anciennes séries chronologiques à une grande échelle et avec la précision du travail précédent.

La présente étude s'est appuyée sur de nombreux travaux scientifiques pour faire ressortir les grandes lignes de ce qui a été observé sur le bassin du fleuve Niger au Mali.

En termes de pluviométries et d'écoulement, à l'échelle du bassin, les décennies 1950 et 1960 ont été fortement excédentaires. Les décennies 1970 et 1980 ont enregistré une sécheresse qui n'a jamais eu d'équivalent de mémoire d'homme en termes d'intensité, de durée et d'étendue spatiale. Au cours de la décennie 1990, les pluies et les écoulements ont réaugmentés, sans toutefois revenir au niveau des décennies 1950 et 1960. Au cours de la décennie 1990 et les suivantes, les événements extrêmes (sécheresses et inondations) ont augmenté en fréquence et en intensité.

Pour ce qui est des températures, elles n'ont cessé d'augmenter au cours des dernières décennies. Ce sont plus particulièrement les températures minimales journalières qui ont augmenté, conduisant à des nuits plus chaudes qu'auparavant.

La baisse prolongée des pluies a eu des répercussions durables sur les ressources en eau, différentes selon les domaines soudanien ou sahélien. En domaine soudanien, les rivières ont vu leurs débits baisser considérablement, de l'ordre de 50 à 70%, alors que la baisse des pluies n'était que de l'ordre de 20 à 25%. La diminution amplifiée des débits en domaine soudanien est expliquée par la diminution durable des ressources en eau souterraines, du fait de nombreuses années de déficit pluviométriques, qui ont réduit tous les ans la recharge naturelle des nappes, dont le déficit s'est cumulé au fil des années de sécheresse. En domaine sahélien, les débits ont dans le même temps, et

malgré la baisse des pluies, augmenté. L'augmentation des écoulements dans le domaine sahélien a été attribuée pour partie aux états de surface qui ont été modifiés par l'homme et le climat.

Il est important de préciser que ces résultats sont à nuancer à l'échelle locale avec des variations plus ou moins fortes autour des valeurs moyennes trouvées à l'échelle du bassin : les variations ne sont pas les mêmes sur tout le bassin.

Concernant le fonctionnement du DIN, une caractéristique importante a été mise en évidence. Le Niger apporte plus de ressource hydrique au DIN, mais c'est le Bani qui impose le signal des dates de passage des maximums de crue de Mopti jusqu'au delta aval, avec des dates de passage d'autant plus tardives que la valeur du maximum journalier est élevée. Il est cependant difficile d'apporter une justification à cet impact du fleuve Bani.

Le programme AMMA piloté par l'IRD entre 2003 et 2010, a permis d'améliorer la connaissance sur les mécanismes et les forçages de la variabilité climatique en Afrique de l'Ouest.

Cependant, cette connaissance ne permet pas encore de faire des simulations/prospectives fiables dans l'avenir :

- pour ce qui concerne les pluies, les résultats des modèles sont contradictoires et le GIEC ne donne aucune tendance fiable pour celles-ci dans le futur, sauf à une probable augmentation des événements extrêmes. Fontaine (2012) et Monerie *et al.* (2012) estiment qu'au niveau de l'Afrique de l'Ouest dans la bande sahélienne les pluies pourraient augmenter en moyenne à l'est et diminuer à l'ouest en moyenne d'ici 2100 ;
- à cette incertitude, pour ce qui est de l'estimation des ressources en eau dans le futur, s'ajoutent beaucoup d'autres incertitudes qui résultent de nombreuses étapes (scénarisation climatique et scénarisation hydrologique), plus incertaines les unes que les autres, et qui conduisent à des résultats en termes d'écoulement qui ne sont pas fiables ;
- concernant les températures, il est raisonnable de penser qu'elles devraient continuer à augmenter si rien n'est fait pour y remédier à un niveau mondial.

4. QUE SAIT-ON AUJOURD'HUI DES USAGES DE L'EAU ET DE LEURS IMPACTS ?

Cette étude se focalise sur les usages agricoles de l'eau qui mobilisent à eux seuls plus de 85% des ressources en eau de surface (Figure 45). Quelques éléments sur les autres usages (eau domestique, industries) sont abordés dans le chapitre 4.5.4.

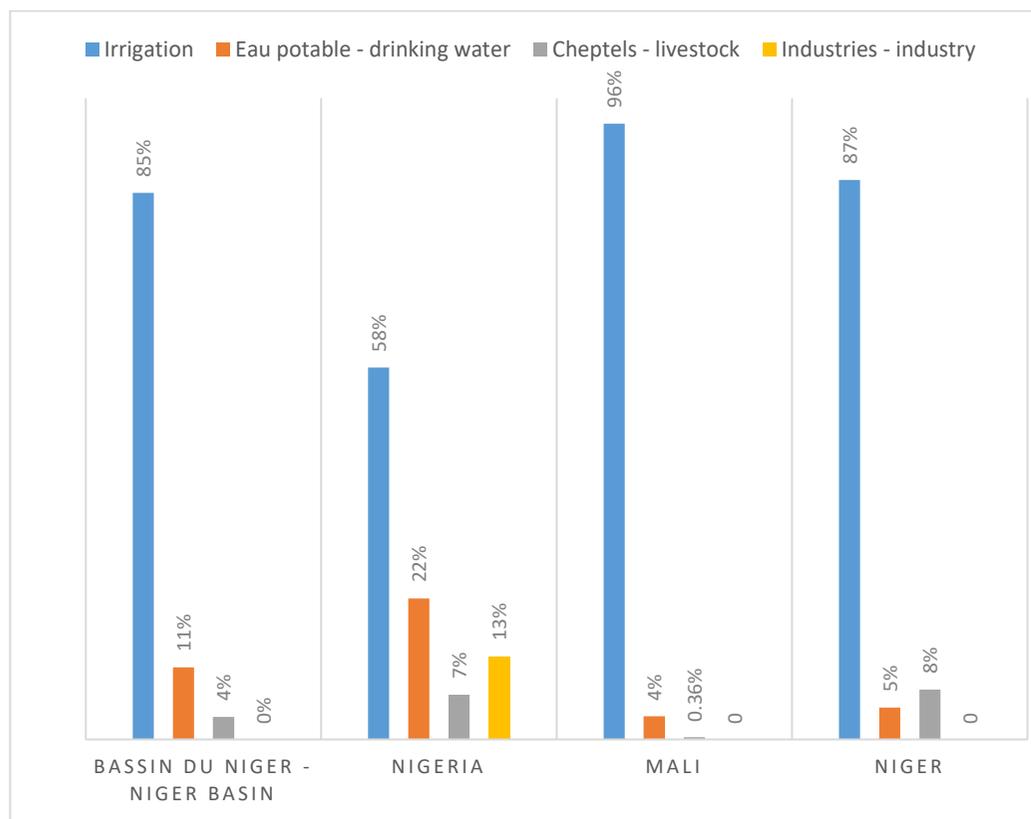


FIGURE 45 : PRELEVEMENTS EN EAU PAR SECTEURS DANS LE BASSIN DU NIGER AU MALI, AU NIGER ET AU NIGERIA EN 2005 (IN CLANET ET OGILVIE, 2014)

Les usages agricoles mobilisent la ressource en eau par pompage ou par dérivation (écoulement gravitaire depuis une prise d'eau). L'irrigation par pompage peut concerner à la fois l'eau souterraine et l'eau de surface. L'étude conduite en 2007 sur le fleuve Niger avait souligné le manque de connaissance sur l'évolution des nappes phréatiques et l'enjeu de maintien de leur qualité. Force est de constater que peu d'éléments nouveaux ont été apportés depuis pour une meilleure compréhension de l'état quantitatif et qualitatif des eaux souterraines. Les données utilisées en 2006 dans la politique nationale de l'eau datent en effet des années 1990 (Tableau 21).

Type de ressources	Volume (milliards de m ³)
Précipitations	415
Eaux de surface pérennes	70
Eaux de surface non pérennes	15
Eaux souterraines renouvelables	66
Total Ressources renouvelables	138

TABLEAU 21 : RESSOURCES EN EAU GLOBALES (MINISTRE DES MINES, DE L'ENERGIE ET DE L'EAU, 2006)

Il existe donc un réel manque de connaissances. Il s'agit à la fois d'un défaut d'actualisation, mais également du hiatus créé par ces lacunes, à savoir l'impression d'abondance globale des ressources en eau au Mali alors qu'il existe une grande variabilité inter et intra-annuelle de ces ressources selon les zones agro-climatiques ; variabilité qui impacte directement les possibilités de développement des différents usages de l'eau.

Pour les ressources en eau souterraines renouvelables, le volume repris dans la Politique nationale de l'eau correspond à l'estimation du volume de pluie infiltré et non celle de la recharge des eaux souterraines. Ces approximations sont difficiles à évaluer.

Malgré ce manque de connaissances, on constate néanmoins une multiplication des forages à vocation agricole. Ce phénomène est observable en périphérie des villes, dans les concessions rurales majoritairement plantées de vergers, qui sont irrigués à partir de forages individuels. Ces forages ne sont pas suivis/connus, mais le nombre croissant d'entreprises spécialisées est un indicateur de la vivacité du secteur. La multiplicité des entreprises de forage a permis de réduire les délais d'attente et de diminuer les coûts (surtout suite à l'arrivée d'entreprises chinoises puis indiennes). Cependant, le manque d'expérience de certaines sociétés, couplé à l'absence de connaissance sur les nappes phréatiques, conduit à un important taux d'échec des forages. La répartition des aquifères fissurés sur le territoire malien, pour lesquelles le taux de succès des forages est de 45 à 70%, n'est en effet pas documentée. Un meilleur suivi des échecs (géolocalisation et profondeur atteinte) pourrait fournir des informations intéressantes sur la répartition des nappes. Le manque d'information sur cette dynamique récente d'exploitation des nappes ne permet pas non plus d'évaluer ses impacts sur les ressources en eau souterraine. Sur le plan quantitatif, l'impact des forages individuels ne semble pas encore être significatif à l'échelle de l'ensemble des ressources en eau du Mali. En effet, ces forages sont utilisés pour l'irrigation par aspersion ou localisée (goutte-à-goutte) et d'après la FAO, la superficie irriguée par aspersion ou localisée représentait en 2011 (aucune donnée plus récente n'est disponible) moins de 0.2 % des superficies irriguées au Mali. L'enjeu à court terme est plutôt d'évaluer l'impact de ces forages sur la qualité des eaux souterraines, car ils sont réalisés à des profondeurs très variables et peuvent établir des connexions entre des aquifères de surfaces pollués et des aquifères profonds.

Du fait de ce manque de connaissances, les usages agricoles de l'eau abordés dans cette étude se limitent à l'utilisation de l'eau de surface pour l'irrigation, que l'eau soit mobilisée par pompage ou par dérivation. La consommation des systèmes irrigués constitue en effet le principal prélèvement d'eau dans le fleuve Niger et ses affluents (la consommation d'eau par l'inondation dans le DIN est également très importante).

Les typologies usuelles des systèmes irrigués au Mali distinguent les aménagements selon le niveau de maîtrise de l'eau :

- submersion libre sans contrôle de l'entrée et de la sortie de l'eau, ni de la hauteur de la lame d'eau (e.g. bordure de fleuve pour les cultures de décrue) ;
- submersion contrôlée ou maîtrise partielle lorsque des ouvrages permettent d'ajuster l'entrée et/ou la sortie de l'eau ;
- maîtrise totale lorsque l'aménagement permet de contrôler les entrées, les sorties et la hauteur de lame d'eau dans les parcelles cultivées.

Le Ministère malien de l'agriculture, à travers sa Direction Nationale du Génie Rural (DNGR), utilise cette typologie et en distinguant les aménagements de bas-fonds. Ceci est discutable sur le plan technique car le niveau de maîtrise de l'eau dans les aménagements de bas-fonds peut être considéré comme de la submersion contrôlée ou maîtrise partielle. L'intérêt d'un suivi spécifique des superficies de bas-fonds aménagées s'explique surtout par l'existence de stratégies nationales particulières pour la mise en valeur des bas-fonds mobilisant des financements spécifiques des partenaires techniques et financiers (PTF).

En distinguant ou non les bas-fonds, les typologies des systèmes irrigués restent donc résolument influencées par les dimensions techniques de l'irrigation (génie rural et hydraulique).

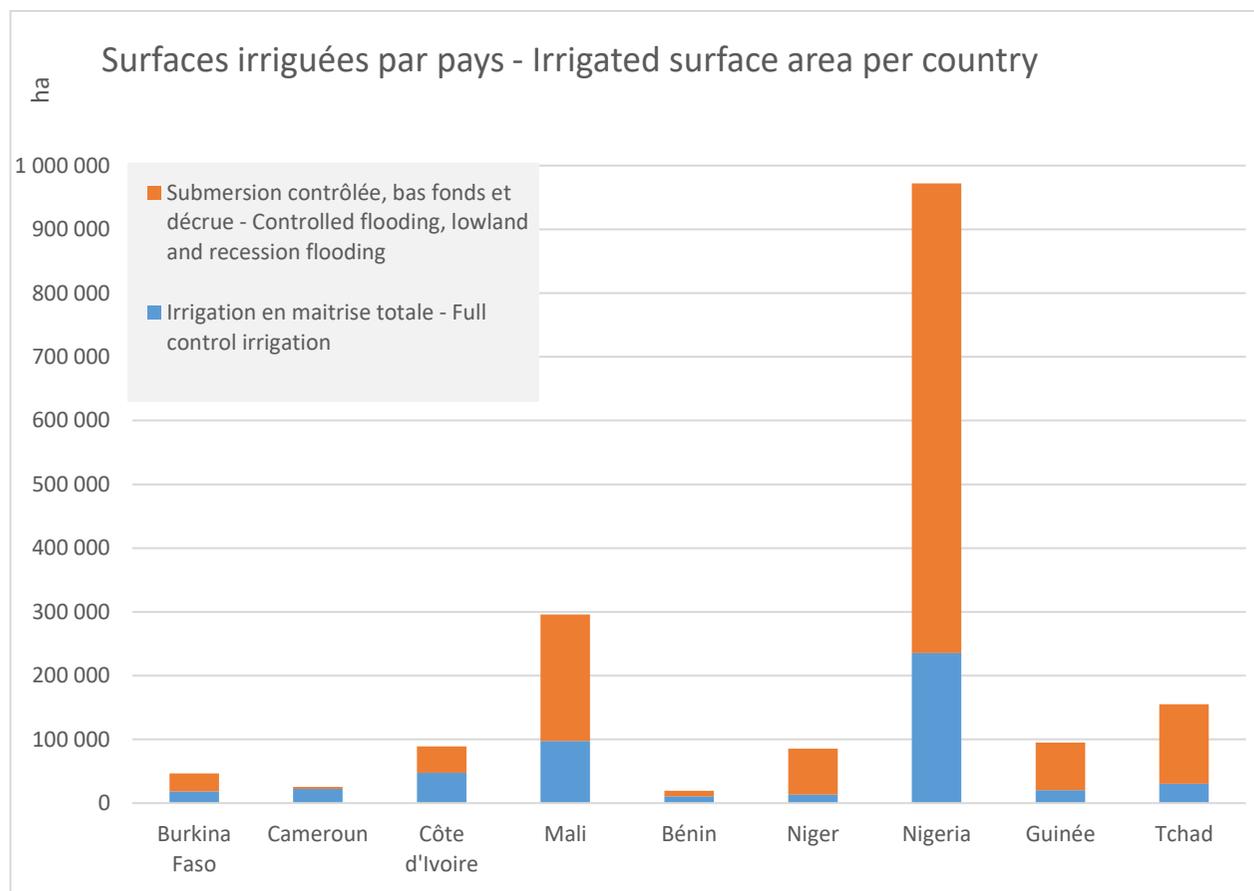


FIGURE 46: SURFACES IRRIGUEES PAR PAYS EN MAITRISE TOTAL ET AUTRES SYSTEMES (IN CLANET ET OGILVIE, 2014)

La Figure 46 présente les superficies aménagées à l'échelle nationale dans le bassin du Niger et le Tableau 22 présente les superficies aménagées au Mali selon la typologie de la DNGR.

Régions	Superficies aménagées pour l'irrigation (ha)				
	Maîtrise totale	Submersion contrôlée	Bas-fonds	Périmètres maraîchers	Total
Kayes	1 748	202	3 604	131	5 685
Koulikoro	6 249	10 181	5 858	285	22 573
Sikasso	1 166	6 813	9 761	117	17 857
Ségou	131 587	44 718	14 409	175	190 889
Mopti	9 375	61 581	1 759	144	72 859
Tombouctou	44 606	59 133	24 748	33	128 520
Gao	1 316	16 303	270	28	17 917
Kidal	14	-	84	13	111
Total	196 061	198 931	60 493	926	456 411

TABLEAU 22 : SUPERFICIES IRRIGUEES (DIRECTION NATIONALE DU GENIE RURAL, 2017)

Une nouvelle typologie des systèmes irrigués, à l'initiative de la Banque Mondiale et du Comité Inter-états de Lutte contre la Sécheresse au Sahel (CILSS), intègre en plus une dimension socio-économique. La Task Force Irrigation Sahel, dont le quatrième atelier sous-régional a eu lieu en juin 2015 à Bamako, a proposé la typologie suivante :

- Type 1 : Systèmes irrigués grâce au contrôle partiel des eaux de pluie (systèmes de bas-fonds et plaines de décrue) ;
- Type 2 : Systèmes privés (individuels ou groupes restreints) irrigués par motopompage ou dérivation ;
- Type 3 : Systèmes communautaires à gestion collective (équipements, tour d'eau...) ;
- Type 4 : Systèmes irrigués à moyenne ou grande échelle basés sur des plans/schémas de développement intégrés (combinaison de techniques de mobilisation et gestion de l'eau, infrastructures routières, gouvernance...) et des modes de gouvernance complexes (organisations paysannes, institutions de gestion...) ;
- Type 5 : Systèmes irrigués à moyenne ou grande échelle associant le gouvernement, une entité privée et les communautés (Partenariat Public Privé).

Dans cette typologie, le type 1 est spécifique aux bas-fonds aménagés et fait écho à la distinction opérée par le Ministère malien de l'agriculture. Les types 2 et 3 concernent des systèmes irrigués de petite taille, qui se différencient selon le type de gestion (privée type 2 ou communautaire type 3). Les types 4 et 5 correspondent à des systèmes irrigués de plus grande taille, et se distinguent par l'implication du secteur privé dans l'investissement au travers un partenariat public-privé (type 5). Ce dernier type est révélateur de la dynamique observée au Mali depuis 2007-2008 avec l'arrivée d'investisseurs dans les grands périmètres irrigués et l'adoption de la Loi d'Orientation Agricole en 2006, qui associe la modernisation de l'agriculture au partenariat avec les investisseurs privés.

En s'inspirant des deux typologies présentées ci-dessus, les usages de l'eau pour l'irrigation abordés dans cette étude seront non seulement distingués selon le niveau de maîtrise de l'eau, mais aussi décrits selon les types d'acteurs impliqués dans la création et/ou la gestion des systèmes irrigués.

4.1. Les grands systèmes irrigués sur le fleuve Niger et ses affluents

La déclaration de Dakar en 2013 a fait un état des lieux des superficies irriguées et du potentiel total irrigable dans les six pays sahéliens et a fixé l'objectif d'augmenter les superficies irriguées de 400 000 à 1 000 000 ha d'ici 2020 (Tableau 23).

Le Mali dispose d'un potentiel irrigable de 566 000 ha à partir des ressources en eau de surface pérennes. Actuellement, 236 000 ha sont aménagés et 177 000 ha sont irrigués. Ces surfaces aménagées et irriguées sont supérieures à celles des autres pays concernés par la déclaration de Dakar. Ces données montrent également que 25 % des superficies aménagées pour l'irrigation ne sont pas mises en valeur. A notre connaissance, il n'existe pas d'état des lieux récent des aménagements non exploités pour expliquer cette situation : vétusté des infrastructures, solution technique inadaptée pour la mobilisation de l'eau, difficultés d'approvisionnement en eau dues aux modifications de l'hydrologie du fleuve et/ou de ses affluents, organisations de gestion non fonctionnelles/conflits... Néanmoins, ces chiffres montrent qu'il existe des marges de progression importantes, non seulement par l'aménagement de nouvelles superficies, mais aussi par une mise en valeur des aménagements déjà réalisés.

Pays	Potentiel irrigable (ha)	Superficie aménagée (ha)	Superficie irriguée (ha)	Proportion Surface irriguée/Potentiel (%)
Burkina Faso	165 000	25 000	25 000	15%
Tchad	335 000	30 000	26 000	8%
Mali	566 000	236 000	177 000	31%
Mauritanie	250 000	45 000	23 000	9%
Niger	270 000	74 000	66 000	24%
Sénégal	407 000	120 000	70 000	14%
Total	1 995 000	530 000	387 000	19%

TABLEAU 23 : SUPERFICIES IRRIGUEES PAR RAPPORT AU POTENTIEL IRRIGABLE POUR SIX PAYS DE LA SOUS-REGION

Le potentiel irrigable au Mali qui a été utilisé comme référence pour le forum de Dakar en 2013 est issu des données FAO-Aquastat de 2011. L'ordre de grandeur de 500 000 ha irrigables au Mali avait déjà été défini en 1999 dans la stratégie nationale de développement de l'irrigation comme une limite au-delà de laquelle l'impact serait trop important sur les débits disponibles pour les usagers à l'aval du Mali, en particulier au Niger. Depuis le travail d'inventaire de 2011, aucune donnée nationale n'a été diffusée.

Les plus fortes incertitudes concernent les superficies irriguées de type « submersion libre ». En effet, puisqu'elles ne nécessitent aucun aménagement, leur évolution est peu ou mal suivie par les services déconcentrés de l'Etat qui collectent essentiellement les données issues de projets de réalisation d'infrastructures.

Les grands systèmes irrigués à gestion collective constituent les symboles du développement agricole au Mali. La diminution de la vulnérabilité aux aléas climatiques par la réhabilitation ou la création de périmètres irrigués reste l'une des priorités affichées par le gouvernement du Mali dans son Plan national d'investissement dans le secteur agricole (Ministère du Développement Rural, 2014).

4.1.1. Les Offices et les grands périmètres irrigués

Il existe au Mali plusieurs institutions de gestion appelées « Offices ». Il faut distinguer les « Offices » dont la compétence se limite à un système irrigué, comme l'Office de Développement Rural de Sélingué (ODRS), l'Office du Périmètre Irrigué de Baguineda (OPIB) et l'Office du Niger (ON), de ceux qui ont une compétence étendue à une portion de bassin versant du fleuve Niger, comme l'Office de la Haute Vallée du Niger (OHVN) et l'Office du Moyen Bani (OMB).

L'OMB, créé en 2017, est le plus récent. Il a pour vocation de veiller au développement intégré du bassin versant du Bani (gestion des ouvrages et mise en valeur). L'OHVN qui couvre les cercles de Kangaba, Kati et Koulikoro a été créé en 1991. Sa zone d'intervention va jusqu'à la rive gauche de la Sankarani. Elle est donc juxtaposée à celle de l'ODRS, créé en 1996, qui supervise les activités des périmètres irrigués de Sélingué et Maninkoura.

L'OPIB et l'ON datent de l'époque coloniale (années 1930). D'abord rattachés aux services de l'administration du Soudan français, ils sont aujourd'hui des Etablissements Publics à caractère Industriel et Commercial (EPIC). Au cours de leur longue histoire, l'OPIB et l'ON ont connu plusieurs périodes et logiques d'intervention. Leur différenciation est essentiellement liée pour l'ON à ses vastes terres irrigables par écoulement gravitaire qui permettent d'envisager d'importantes extensions, et pour l'OPIB à la proximité de la ville de Bamako (située à 30 km) qui a favorisé la culture de contre-saison (riz et maraîchage) pour répondre à une demande urbaine croissante.

Il existe néanmoins une différence entre le périmètre de l'ODRS (Sélingué et Maninkoura) et les autres grands systèmes irrigués, qui datent de l'époque coloniale et qui ont été créés pour répondre à un défi de production, principalement de coton et de riz, avec le recours à des exploitants extérieurs à la zone aménagée (autres zones du Mali, actuel Burkina Faso...). Le périmètre de Sélingué a été créé pour compenser les espaces cultivés par les populations et perdus lors de la construction et de la mise en eau du barrage de Sélingué. Il s'agissait donc d'exploitants originaires de la zone auxquels a été donnée la possibilité de diversifier leur système de production avec l'irrigation. Le périmètre de Maninkoura a été aménagé dans les années 2000 (mais mis en exploitation à partir de 2007) pour répondre à une forte demande de terres irriguées, améliorer les conditions de vie des populations locales, et améliorer l'approvisionnement de la ville de Bamako. Ces deux derniers périmètres s'inscrivent donc dans des stratégies de développement plus récentes de l'hydroélectricité d'une part (Sélingué) et d'autre part de réduction de la pauvreté et d'amélioration des circuits d'approvisionnement (Maninkoura).

4.1.2. Etat des lieux des surfaces aménagées et exploitées dans les grands systèmes irrigués et problématique de gestion de l'eau

4.1.2.1. LES DIFFERENTS TYPES DE SYSTEMES SELON LE NIVEAU DE MAITRISE DE L'EAU

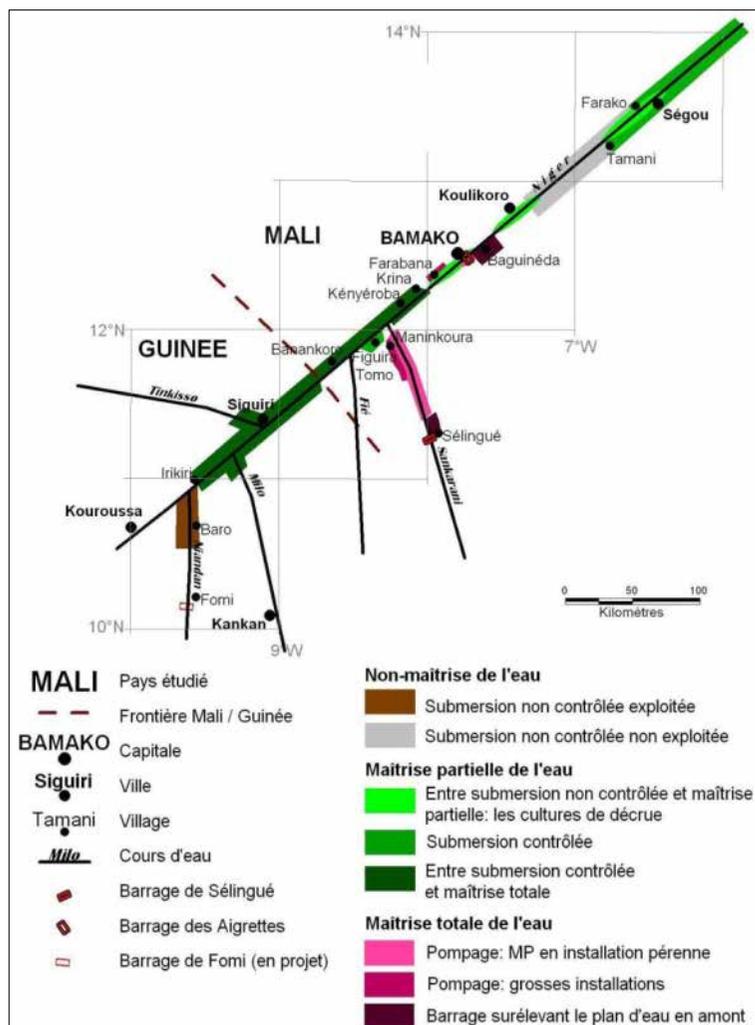


FIGURE 47 : TYPOLOGIE DES MODES DE MISE EN VALEUR AGRICOLE DES PLAINES ALLUVIALES DU NIGER SUPERIEUR ENTRE BARO ET SEGOU (IN RENARD-TOUMI, 2013)

Au Mali, trois grands systèmes irrigués à écoulement gravitaire bénéficient d'une maîtrise totale de l'eau : le système irrigué de Sélingué, de Baguineda et de l'Office du Niger (Figure 47).

Dans les régions de Ségou et Mopti, l'Office Riz Ségou (ORS) et l'Office Riz Mopti (ORM) gèrent essentiellement des plaines et cuvettes cultivées par submersion contrôlée ainsi que des périmètres à maîtrise totale (Tableau 24). L'ORS a bénéficié du projet du Projet de développement rural de Tien Konou et Tamani (PADER-TKT) à partir de 2013 pour recalibrer 20.7 km du chenal d'alimentation des complexes hydrauliques de Dioro (15 167 ha) et Tamani (9 122 ha). Cette opération s'inscrit dans une volonté plus large d'améliorer la gestion hydraulique de l'ORS et d'opérer une reconversion des zones favorables de la submersion contrôlée vers la maîtrise totale de l'eau afin de réduire l'impact de la variabilité de la pluviométrie et de la crue du fleuve Niger sur les rendements (de l'ordre de 2 t/ha, Figure 49) et les surfaces cultivées (variation interannuelle des superficies de 20 à 30%).

Système irrigué (Office)	Superficie sous maîtrise totale (ha)	Superficie sous submersion contrôlée (ha)
ODRS (Sélingué)	1 350	-
OPIB	3 000	-
ON	110 000	-
ORS	1 271 (+ 1 125)*	32 000
ORM	364**	33 820

TABLEAU 24 : SUPERFICIES IRRIGUEES DANS LES GRANDS SYSTEMES IRRIGUES AU MALI

Légende :

* 1 271 aménagés à Tinen-Konou, 1 125 ha en cours à Sokè
 ** répartis en 12 PPIV

4.1.2.2. SYSTEMES DE CULTURE ET CALENDRIERS, ET IMPACTS SUR LES BESOINS EN EAU

Les études techniques pour la construction du barrage de Sélingué ont permis d'identifier un potentiel irrigable de 18 500 ha réparti entre 10 600 ha en amont du barrage et 7 900 ha en aval. Aucun périmètre irrigué n'a pu être réalisé avec succès en amont. En 1980-82, le périmètre de Sélingué (1 350 ha de surface brute) a été aménagé en aval du barrage. Un second périmètre (1 094 ha) a ensuite été aménagé à Maninkoura. Ces deux périmètres sont gérés par l'ODRS. Selon les études techniques, la totalité des superficies aménagées ne représente que 13.2 % du potentiel irrigable.

Les systèmes de culture sont assez semblables dans les périmètres irrigués de Sélingué et Maninkoura. La double culture de riz représente plus de 80 % des superficies cultivées ; la banane entre 7 % (Sélingué) et 10 % (Maninkoura) et les cultures maraîchères environ 7 % sur les deux périmètres avec une dominance de tomate, pomme de terre et oignon/échalote. Dans le périmètre de Sélingué, les superficies de riz et de maraîchage sont en augmentation à cause de l'effet conjugué de la forte demande sur les marchés, de la hausse des rendements (3.5 à 5 t/ha pour les parcelles de riz repiquées) et du gain de superficies sur les bordures des périmètres aménagés. Au contraire, les superficies cultivées en banane sont stables voire diminuent. Dans le périmètre de Maninkoura, la dynamique est différente car la mobilisation de l'eau par pompage constitue un facteur de risque pour les cultures irriguées (coût de pompage, panne l'électricité...). Les cultures maraîchères de contre-saison ont ainsi connu des fluctuations très importantes depuis la création du périmètre, passant de 453 ha en 2009 à seulement 91 ha en 2010 et 197 ha en 2011. Une étude révèle que la contre-saison a même dû être suspendue à partir de 2011 à cause du manque d'eau et des coûts de pompage (Kergna *et al.*, 2013).

A l'ODRS, les producteurs spécialisés dans les cultures irriguées et tournés vers la commercialisation représentent seulement 5 % des producteurs pour environ 10 % des superficies. La majorité des producteurs exploite donc à la fois des terres irriguées et des terres de culture pluviale. Cette absence de spécialisation crée une situation de concurrence dans le calendrier de travail et il n'est pas rare que les opérations de mise en boue, labour ou repiquage dans le périmètre soient retardées du fait des travaux sur les cultures pluviales. Ces décalages couplés aux différences d'équipement des producteurs (sans ou avec une traction animale, sans ou avec motoculteur) créent d'importants décalages dans le calendrier agricole. Ces décalages, différents selon les producteurs, engendrent un étalement des besoins en eau, qui ne sont pas pris en compte par le gestionnaire du système qui planifie les apports selon le calendrier agricole défini dans le cahier des charges.

Le périmètre irrigué de l'OPIB est cultivé en riz durant l'hivernage avec 2 800 ha emblavés en moyenne chaque année. Environ 1 500 ha sont cultivés en contre-saison chaque année, à raison de 500 ha en riz et 1 000 ha de cultures maraîchères. Ainsi, la superficie cultivée en contre-saison représente plus de 50 % de la superficie de culture hivernale. Cette pratique est fortement influencée par la demande de Bamako en produits maraîchers et a une incidence directe sur les besoins en eau lors de l'étiage du fleuve Niger. La culture de contre-saison à l'OPIB attire de nombreux jeunes actifs. Ces jeunes retournent ensuite dans leur région d'origine (Sikasso, Ségou...) pour pratiquer les cultures pluviales dans leurs villages.

Les superficies réellement cultivées à l'Office du Niger sont d'environ 110 000 ha (les surfaces cultivées hors des casiers aménagés sont toujours difficiles à comptabiliser). Elles sont essentiellement cultivées en riz. La culture de contre-saison représente environ 10% de la superficie cultivée en hivernage. La canne à sucre est également cultivée depuis les années 1960 avec l'installation de l'usine sucrière de la société Sukala. Sukala cultive environ 5 000 ha de canne à sucre. Récemment, cette société s'est étendue sous le nom de N'Sukala en augmentant les surfaces cultivées en canne à sucre. Une nouvelle usine a été construite en 2012-2013 et l'augmentation de surface a été réalisée grâce à 2 000 ha environ de casiers de canne à sucre et 66 pivots de 70 ha en moyenne chacun.

N.B. Le barrage de Markala est opérationnel depuis 1947 et devait soutenir le développement de près d'un million d'hectares (Zwarts *et al.*, 2005). En 2005, 113 000 ha étaient cultivés (BRL et Betico 2016). Selon Liersch *et al.* (2019), l'objectif est de développer jusqu'à 460 000 ha en 2045.

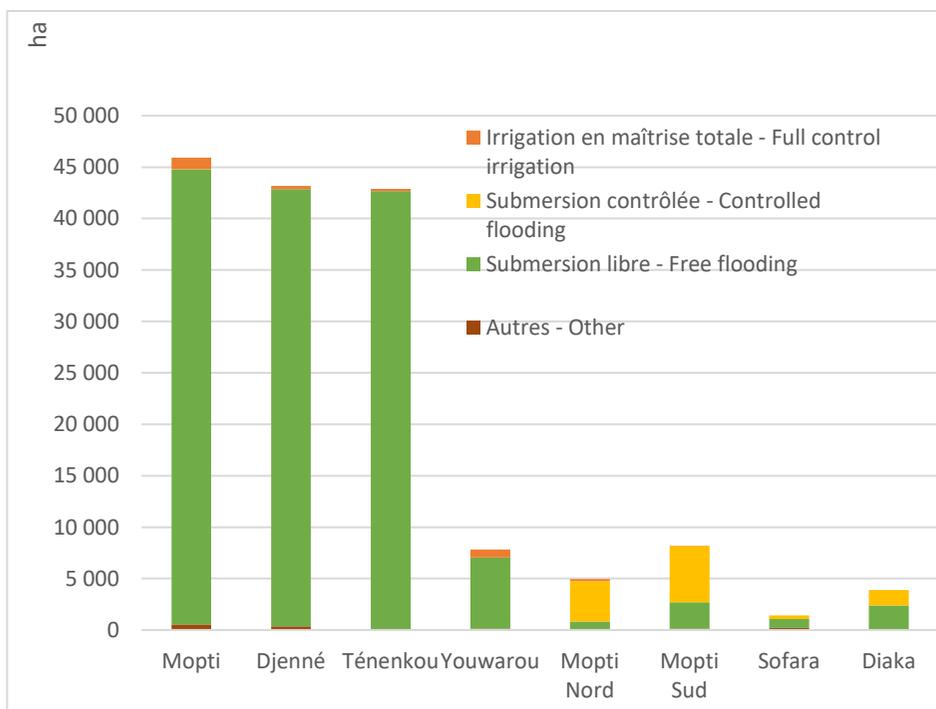


FIGURE 48 : SUPERFICIES DES SYSTEMES RIZICOLES IRRIGUES DANS LE DELTA INTERIEUR DU NIGER (IN CLANET ET OGILVIE (2014) D'APRES BARBIER ET AL. (2009))

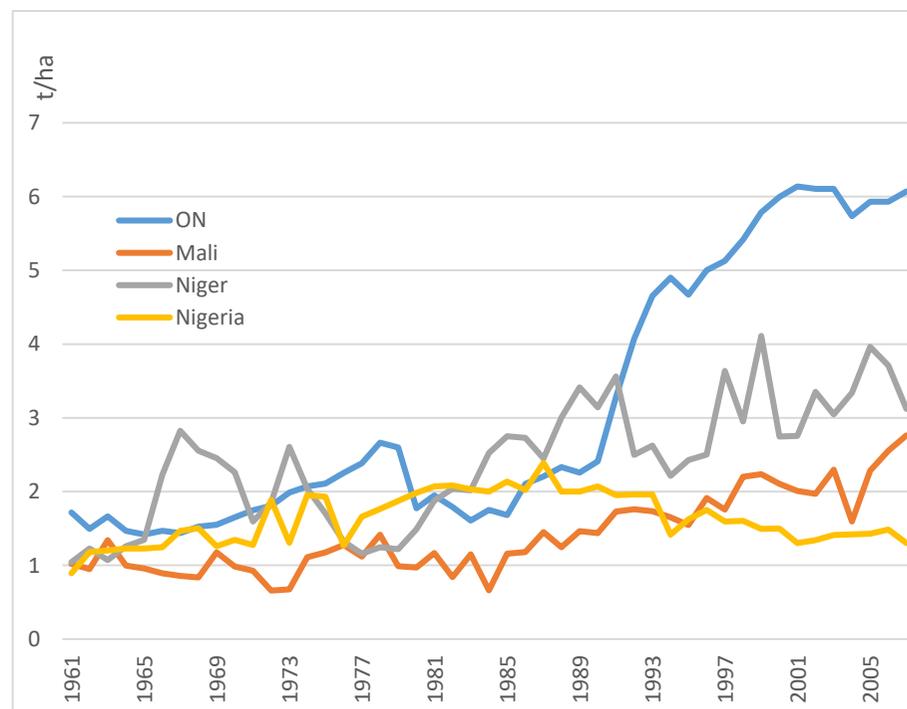


FIGURE 49 : EVOLUTION DES RENDIN EMENTS RIZICOLES DU MALI, NIGER, NIGERIA ET DE L'OFFICE DU NIGER ENTRE 1961 ET 2007 (CLANET ET OGILVIE (2014) D'APRES BARBIER ET AL. (2009))

4.1.2.3. PRATIQUES DE GESTION DE L'EAU

La gestion de l'eau dans les grands systèmes irrigués concerne autant l'irrigation que le drainage. Dans ces systèmes à maîtrise totale de l'eau, la vidange de l'eau en excès dans les parcelles ou la mise à sec avant la récolte sont des conditions essentielles à l'obtention de rendements élevés.

A l'ON par exemple, l'engorgement des drains est une problématique majeure car elle conduit à l'inondation des parcelles situées à l'aval. Cet engorgement est dû à leur comblement/enherbement, leur sous-dimensionnement (de nouvelles superficies ont été aménagées sans adapter le réseau de drainage pour évacuer l'eau supplémentaire) et par l'installation en bordure du réseau de drainage d'exploitants qui n'ont pas pu devenir attributaires de parcelles dans les casiers aménagés (espaces cultivés appelés « hors casiers »). Des travaux importants ont été réalisés en 2012 sur financement kfW pour la réhabilitation et le prolongement du drain collecteur Kala inférieur est, et d'autres en 2017 pour la réhabilitation de 54.6 km de drains dans la zone de Molodo sur financement de la Banque africaine de développement (BAD).

A l'ODRS, le drainage est effectué par un réseau de colatures. La performance du système de drainage est améliorée par une station d'exhaure dotée de trois électropompes qui permet d'évacuer les eaux drainées lorsque le niveau est trop élevé pour un drainage gravitaire. Toutefois, des parcelles restent mal drainées et ce malgré des redevances hydrauliques uniformes sur l'ensemble du périmètre.

4.1.2.4. EFFICIENCE DE L'IRRIGATION DANS LES SYSTEMES GRAVITAIRES NON REVETUS

La faible performance de l'irrigation dans les grands systèmes gravitaires est une problématique récurrente. A l'ON par exemple, les pertes sont essentiellement dues à l'évaporation (la superficie de l'eau dans les falas est très importante), à l'infiltration dans les canaux non revêtus (Tangara, 2011) et à la gestion inappropriée de l'irrigation dans les parcelles (Vandersypen *et al.*, 2006). Ainsi, les besoins bruts des cultures en eau d'irrigation sont très supérieurs à leurs besoins nets (Figure 50 et Tableau 25).

Culture	Saison de culture		Besoins nets (m ³ /ha)	Besoins bruts (m ³ /ha)
	Hivernage	Contre-saison		
Riz			9 200	21 000
Riz			11 900	27 100
Maraîchage			6 300	14 400
Canne à sucre			24 600	34 800
Arboriculture			10 700	24 500

TABLEAU 25 : BESOIN EN EAU DES CULTURES A L'OFFICE DU NIGER (BRLI ET BETICO, 2014)

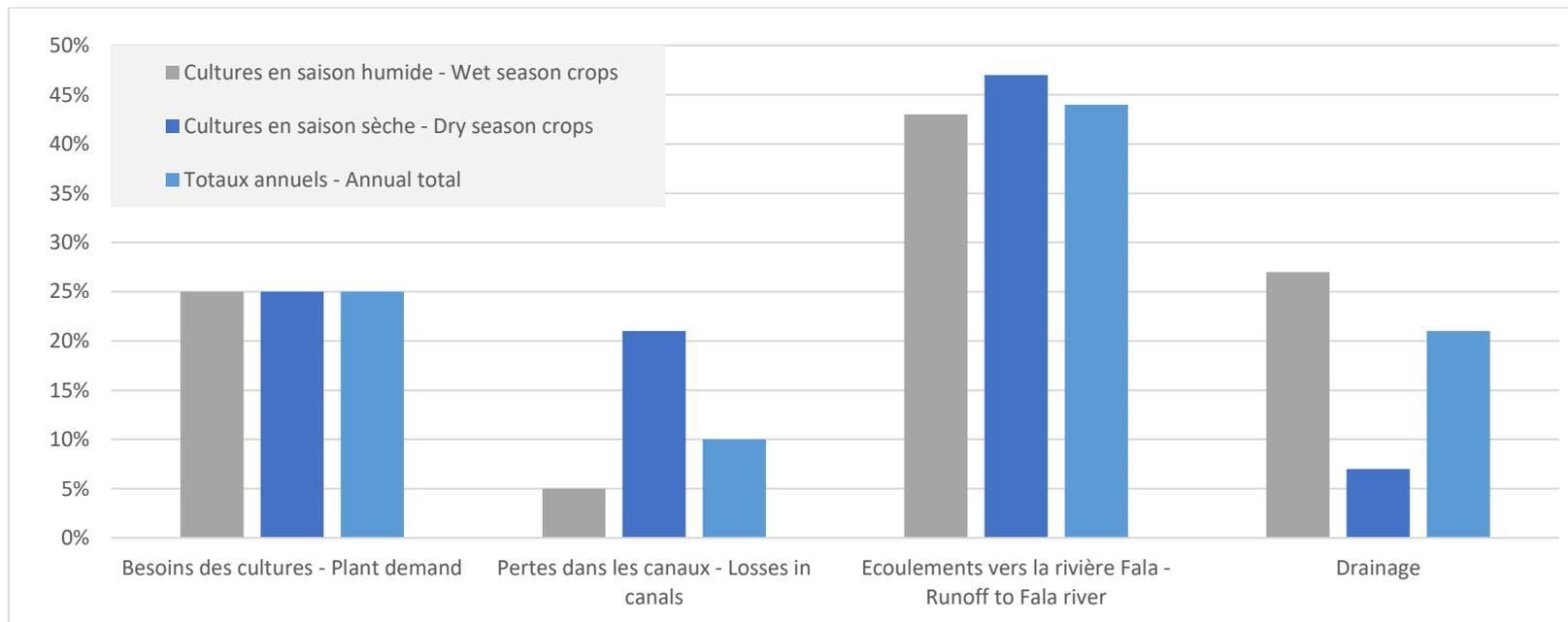


FIGURE 50 : DESTINATION DES PRELEVEMENTS EN EAU DANS L'OFFICE DU NIGER (IN CLANET ET OGILVIE, 2014)

A l'ON, certaines portions réhabilitées du réseau ont pu être revêtues en béton (e.g. distributeur Retail dans le cadre du programme d'appui au développement de l'ON financé par l'AFD). Toutefois, compte tenu des coûts importants et de la fraction limitée de réseau traitée, ces opérations sont davantage justifiées par le besoin de stabiliser les canaux pour éviter des apports par ruissellements latéraux, pour faciliter la circulation et/ou faciliter les usages domestiques (e.g. à Niono). De même à l'OPIB, les 37 km du canal principal non revêtu étaient une cause majeure de pertes par infiltration. Certains biefs du canal principal ont été revêtus et re-calibrés en 2005 sur une longueur totale de 10.5 km. Il est également prévu le revêtement de 8.7 km additionnels dans le canal principal et de 56.7 km de canaux secondaires (première tranche de 24 km) dans le cadre du Projet de Renforcement de la Sécurité Alimentaire et Nutritionnelle dans la région de Koulikoro (PRESAN-KL). La réhabilitation de cinquante-deux prises secondaires et de huit évacuateurs de crue ainsi que le planage de parcelles à problèmes figurent parmi les activités au compte du PRESAN-KL qui pourront améliorer la performance de l'irrigation à l'OPIB.

L'efficacité de l'irrigation est également diminuée par la présence de jacinthes d'eau qui freine l'écoulement et contribue aux pertes par évaporation. L'invasion des jacinthes est un problème récurrent sur le fleuve Niger, avec des conséquences visibles dans les canaux des grands systèmes irrigués, en particulier à l'OPIB et à l'ON. La lutte contre la jacinthe d'eau est devenue une priorité pour les organismes de gestion : ajouts de pièges à jacinthes à l'OPIB en 2005 sur dix passes, contrats annuels pour l'élimination/compostage des jacinthes à l'ON.

La principale conséquence de cette faible efficacité est la difficulté à apporter l'eau d'irrigation en quantité suffisante et à temps aux zones situées les plus à l'aval du système, particulièrement en contre-saison.

Pour mieux maîtriser les consommations d'eau à l'ON, Marie *et al.* (2007) soulignaient la nécessité de diminuer (voire d'interdire) la culture de riz en contre-saison, et d'autre part, de réaliser prioritairement les nouvelles extensions à partir de la récupération de surfaces actuellement exploitées « hors casiers ». A partir de 2011, la redevance eau pour la culture de riz en contre-saison est passée à 66 000 FCFA/ha, identique à la culture du riz en hivernage, contre 33 000 FCFA/ha pour les cultures maraîchères. Ces mesures ne visent donc pas à interdire les cultures de contre-saison, mais à réduire les superficies cultivées en riz dont les besoins en eau sont plus importants. La récupération des surfaces cultivées hors-casiers pour les extensions est intégrée dans certains projets comme les extensions N'débougou et Siengo. Toutefois, cette récupération impacte directement les catégories d'exploitants les plus vulnérables, qui se sont installés « hors casier » plus par contrainte (absence d'attribution dans les zones aménagées) que par choix, et leur accès aux nouvelles zones aménagées n'est pas encore traité.

4.1.2.5. ENJEUX DE MOBILISATION DE L'EAU POUR L'IRRIGATION

Les grands systèmes irrigués par écoulement gravitaire au Mali ont pour point commun d'être gérés selon les niveaux d'eau (cotes dans les biefs du réseau d'irrigation) plus que selon des débits/volumes d'eau. En effet, pour que l'eau entre dans les parcelles cultivées, il faut que le niveau du plan d'eau en amont de la prise soit légèrement plus élevé que celui de la parcelle. Ceci oblige les gestionnaires à remplir la totalité du réseau même si une partie seulement des exploitants a besoin d'irriguer à cette période. Les prélèvements doivent donc couvrir à la fois les besoins en eau des cultures, remplir les biefs et maintenir le volume d'eau stocké dans ces biefs (compensation des pertes par évaporation et infiltration).

Les prélèvements par les grands systèmes irrigués sont fortement contraints durant les deux saisons de culture. En hivernage, la majeure partie de l'espace aménagé est cultivé en riz. Cette saison correspond à la crue du fleuve Niger dont le débit est largement supérieur aux besoins des gestionnaires. L'offre en eau n'est alors limitée que par la capacité maximale de transport des canaux adducteurs.

L'accroissement de la capacité de prélèvement par les grands Offices est une problématique récurrente. A l'OPIB, deux nouvelles passes ont par exemple été ajoutées en 2005 pour porter leur nombre total à dix et augmenter ainsi de 20% la capacité maximale de prélèvement. A l'ON, le retrait du merlon central du grand adducteur en 2011 a permis d'augmenter de 50% sa capacité de transport passant de 200 à 300 m³/s. En complément de l'accroissement des capacités de prélèvement, des actions ont été menées pour améliorer l'étanchéité des vannes du barrage des aigrettes (qui permet la remontée du niveau d'eau pour alimenter l'OPIB par dérivation) et du barrage de Markala (qui permet de dévier l'eau vers l'ON).

En contre-saison, la problématique est différente car le fleuve est à l'étiage. Or, tous les systèmes irrigués ont été marqués récemment par le développement des cultures de contre-saison (riz ou maraîchage). Les cultures maraîchères répondent à une forte demande des marchés et permettent d'accroître significativement les revenus des producteurs (Mariko *et al.*, 2000).

En contre-saison, les gestionnaires des systèmes irrigués de l'OPIB et de l'ON ont pour objectif de satisfaire les besoins en eau des irrigants tout en tenant compte de ceux des autres usagers. A l'OPIB, la principale limite est liée aux besoins en eau de l'usine hydroélectrique (centrale de Sotuba) du barrage-seuil des aigrettes situé 2.8 km à l'aval de la prise. La nécessité de fournir de l'électricité à la ville de Bamako oblige à réduire les prélèvements autorisés pour l'OPIB. En 2005, il a ainsi été envisagé que l'OPIB puisse bénéficier d'un débit garanti de 9.5 m³/s entre janvier et juillet afin de permettre le développement des cultures de contre-saison. A l'ON, la problématique est différente car c'est la même institution qui gère le barrage de Markala et le système irrigué situé en aval de la prise. Pour autant, la convention de partage des eaux de l'Autorité du Bassin de Niger fixe à 40 m³/s le débit minimum en aval du barrage de Markala. Néanmoins, on peut observer un débit inférieur en aval de Markala. Selon le gestionnaire, ce moindre débit est compensé par les retours d'eau dans le fleuve entre Markala et la station de Ke-Macina où la consigne de 40 m³/s est fixée.

4.1.2.6. LE CAS PARTICULIER DE LA PLAINE DE SAN OUEST IRRIGUE PAR POMPAGE DEPUIS LE BANI

En 2017, 2 835 ha ont été cultivés en riz en hivernage et 852 ha en contre-saison dans la plaine de San Ouest qui exploite l'eau du Bani. Ce taux de près de 30% de double culture est supérieur aux autres systèmes irrigués où il est plus proche de 10%. L'irrigation des surfaces cultivées en contre-saison dans la plaine de San nécessite des prélèvements d'eau dans le Bani pendant l'étiage.

La problématique d'économie d'eau a conduit les gestionnaires du périmètre à inciter à la pratique du SRI⁵ où le riz n'est plus cultivé dans une lame d'eau de 10 cm comme dans des systèmes de riziculture classiques pratiqués à l'OPIB ou à l'ON. Une stratégie de sensibilisation a également été opérée pour diversifier les cultures en contre-saison en privilégiant le maïs ou les légumineuses plutôt que le riz, car moins consommatrices d'eau.

La station de pompage, élément essentiel du système irrigué de la plaine de San Ouest, est constituée de cinq pompes alimentées par un groupe électrogène. Cette station a été installée à la création du périmètre en 1976 dans le cadre de « l'Opération Riz », puis gérée par la Compagnie Malienne Des Textiles (CMDT). La superficie cultivée sous irrigation était alors d'environ 500 ha. Après le désengagement de la CMDT, la gestion de la station de pompage a été confiée en 1989 à l'Association des Riziculteurs de la Plaine Aménagée de San Ouest (ARPASO). A partir des années 2007-2008, les défaillances répétées du groupe électrogène ainsi que des désaccords locaux sur la gestion du groupe et des pompes ont entraîné des difficultés d'irrigation. Malgré l'appui de la coopération luxembourgeoise (LuxDev), qui a renouvelé les pompes et les a raccordées au réseau électrique, l'ARPASO n'est pas parvenue à payer ses factures d'électricité. Cette situation fréquente dans les systèmes irrigués avec pompage rappelle l'avantage comparatif de l'irrigation par écoulement gravitaire.

Des études pour la réparation/remplacement des pompes sont en cours sur financement de la coopération luxembourgeoise. Le résultat attendu est la remise en état de l'ensemble des pompes pour un fonctionnement optimal du système. L'un des résultats attendus de cette étude sera l'ensemble des propositions visant à améliorer l'organisation des producteurs pour la bonne gestion des infrastructures de pompe et la collecte des redevances nécessaires au paiement des factures. Une réflexion est également en cours pour une extension du périmètre d'environ 400 ha pour tirer profit des ouvrages de Talo et Djenné qui améliorent la disponibilité de l'eau du Bani.

4.1.3. Questions transversales et enjeux de développement de la « grande hydraulique »

4.1.3.1. LES MODES DE FINANCEMENT DE LA « GRANDE HYDRAULIQUE »

En 2010, les PTF (dont l'AFD fait partie depuis de longues années) de l'ON se sont regroupés pour créer davantage de synergies entre leurs actions respectives. Ce groupe des PTF a initié un appui budgétaire sectoriel afin d'accompagner l'ON, son Ministère de tutelle et les exploitants agricoles.

Pour faire face aux coûts importants d'aménagement des périmètres irrigués et au défi de modernisation de l'agriculture, le gouvernement au Mali a fait appel aux investisseurs privés. Le modèle « partenariat public-privé » a été promu pour créer de nouveaux pôles de développement (production, transformation) à l'intérieur de la zone ON.

⁵ Système de Riziculture Intensive, qui se distingue du système de riziculture pratiquée ailleurs au Mali par le repiquage des plants dès 8 jours au lieu de 15 ou 20, un plus grand espacement entre les brins, ainsi qu'un assec périodique de la parcelle. Le SRI a été diffusé au Mali par Africare et US-Aid.

En effet, la « grande hydraulique » a subi une diminution progressive de l'aide publique au développement depuis les années 1990, notamment à cause de la faible efficacité de certains financements auprès des EPIC en charge de la gestion des grands systèmes irrigués. Ce changement de paradigme, qui n'est pas propre au Mali, s'est traduit par des appuis programmatiques avec davantage de composantes liées au renforcement des Organisations Paysannes (OP), des associations, des structures d'appui-conseil et des gestionnaires (introduction des SIG, assistance technique...).

4.1.3.2. MODALITES ET ENJEUX DE L'INVESTISSEMENT PRIVE FORMES ACTUELLES DE COHABITATION/COMPETITION ENTRE EXPLOITANTS AGRICOLES FAMILIAUX ET CADRES NON RESIDENTS, COMMERÇANTS ET INVESTISSEURS

Les périmètres irrigués de Baguineda, de Sélingué ou de l'ON ont pour point commun l'existence d'un cahier des charges qui fixe les systèmes de cultures pouvant être pratiqués (spécifications, calendrier...) ainsi que les devoirs incombant aux exploitants (entretien, paiement de la redevance eau...).

Les attributions à des personnes extérieures aux périmètres impliquent des phénomènes de sous-location ou de salariat qui constituent des contraintes dans l'application du cahier des charges. Dans le périmètre irrigué de Sélingué, les salariés et retraités de l'ODRS et d'autres cadres représenteraient 10% des attributaires, bien qu'aucune statistique fiable ne soit disponible. La principale conséquence sur la gestion de l'eau est le défaut d'entretien des canaux tertiaires d'irrigation et de drainage par des cultivateurs non attributaires qui ne s'impliquent pas dans les actions collectives car ils ne disposent d'aucune garantie sur la mise à disposition de la même parcelle pour la campagne agricole suivante.

Le financement octroyé au début des années 2000 par la BAD pour la réhabilitation et l'extension du périmètre de Baguineda était ainsi conditionné à un meilleur respect des procédures d'attribution afin d'assurer la pérennisation des actions entreprises. Cette problématique est particulièrement prégnante à l'OPIB du fait de sa proximité avec la ville de Bamako.

A l'ODRS, une étude récente a montré le manque d'encadrement des dynamiques de locations et ventes de parcelles qui crée des situations de rente foncière dans le cas des locations et de marché foncier dans le cas des ventes (Adamczewski-Hertzog, 2016).

4.2. Agriculture irriguée dans le Delta Intérieur du Niger et la zone lacustre

Le DIN est une vaste zone au centre du Mali d'environ 30 000 km² dont la mise en valeur et les écosystèmes dépendent de la crue du fleuve Niger. Le niveau de l'eau pendant la crue augmente de 3 m durant les années sèches à 6 m durant les années humides.

Avant toute analyse des usages de l'eau dans le DIN, il convient de rappeler qu'il est alimenté par le Niger et le Bani. Il est donc situé à l'aval des grands périmètres irrigués décrits précédemment qui jalonnent le fleuve et son affluent. Dans ce contexte, le développement des usages de l'eau et la réalisation de nouvelles infrastructures en amont peuvent avoir des impacts significatifs sur le fonctionnement hydrologique du DIN. Cette problématique ne doit pas être vue uniquement à travers la diminution du débit entrant dans le DIN et des volumes, mais aussi par l'impact sur la hauteur de l'eau en certains points du DIN. En effet, l'étendue d'eau du DIN au plus fort de l'inondation dépend du franchissement de seuils naturels qui permet d'inonder des sous-ensembles hydrauliques situés en périphérie (plaines annexes, cuvettes). La modélisation de Kuper *et al.* (2003) reprend cette structuration du DIN, de même que Oleksiak (2008) qui a utilisé un modèle en casiers. Le plus grand nombre de cuvettes vers le Nord du DIN marque le début de la zone lacustre. La délimitation entre DIN et zone lacustre est fixée aux environs d'Aka. La diminution de la hauteur d'eau dans le DIN par écrêtement de la crue à cause du développement des usages agricoles de l'eau en amont et de la mise en activité de nouveaux barrages-seuils pourrait réduire la superficie inondée du DIN, empêcher le remplissage des cuvettes (lacs et mares) de la zone lacustre et donc impacter significativement les milieux naturels et socio-agro systèmes.

4.2.1. Le Delta Intérieur du Niger

Dans cet espace inondable sujet aux variations interannuelles de la crue du fleuve, les zones cultivables se concentrent sur les berges. A notre connaissance, aucune étude n'a jusqu'à présent permis de définir avec précision la part cultivée du DIN. La majeure partie des surfaces cultivées semble constituée de systèmes de culture traditionnels de décrue (mil, sorgho, maïs) auxquels s'ajoutent les zones de submersion contrôlée (e.g. aménagement d'environ 2 300 ha à Diambacourou dans le cercle de Mopti) et de plus en plus de petits périmètres villageois cultivés en riz. Les aménagements de submersion contrôlée de la région de Mopti sont constitués d'une digue de ceinture munie d'ouvrage de prise (jouant généralement le rôle d'ouvrage de vidange) et de canaux d'irrigation également utilisés comme drains. Les casiers sont cultivés en riz flottant, riz dressé ou en bourgou selon le niveau atteint par la crue.

L'Office Riz Mopti (ORM) gère une vingtaine de périmètres irrigués dans la région de Mopti pour un total d'environ 1 200 ha en plus des zones de submersion contrôlée qui représentent 33 820 ha répartis en seize casiers.

Malgré des investissements conséquents pour l'aménagement de PIV par l'ORM, les difficultés de gestion rendent beaucoup de surfaces inexploitable. Le constat avait été fait dans le périmètre de 50 ha à Syn prévu pour la double culture et qui était inexploité en 2010 (source : cadre de la Direction régionale de l'agriculture Mopti) tandis que celui de Sinah de 42 ha pratiquait la double culture au même moment. Chaque année, la part des surfaces aménagées qui n'est pas exploitée (insuffisance de crue du Niger, défauts de gestion...) varie et il est difficile d'obtenir des données actualisées. L'ordre de grandeur de 10 à 20% inexploités semble réaliste.

Le développement des PIV est appuyé par différents PTF tels que la coopération allemande (GIZ, kfW), le Fonds International de Développement Agricole (FIDA) à travers le Projet d'Accroissement de la Productivité Agricole au Mali (PAPAM) ou encore le Fonds Africain de Développement (FAD) à travers son projet d'appui au développement rural de la région de Mopti. Le FAD a contribué au développement des périmètres dans la région de Mopti par la création de 760 ha de Petits Périmètres Irrigués Villageois (PPIV) et 1 110 ha de moyens périmètres à maîtrise totale de l'eau. Mais l'engagement de la coopération allemande dans la région depuis les années 1980 est à souligner. En association avec la coopération canadienne (ACDI) le projet de développement de l'irrigation dans le delta intérieur a pris la suite du programme Mali-Nord. Aujourd'hui, la coopération allemande a ainsi permis de créer 22 000 ha de PIV d'une taille moyenne de 40 ha alimentés par des motopompes depuis le fleuve Niger. Ces petites unités d'exploitation collective regroupant entre 75 et 90 producteurs sont dispersées dans la partie nord du DIN et dans la zone lacustre sur les berges du fleuve et contribuent à la sécurité alimentaire des villages bénéficiaires.

En l'état actuel, la bonne compréhension des enjeux du développement de l'agriculture irriguée dans le DIN passe par l'amélioration des connaissances sur :

- les prélèvements que représentent chacun de ces systèmes utilisant l'eau du Niger ;
- l'état des infrastructures et les taux réels de mise en valeur (en particulier pour les PIV et les AHA de submersion contrôlée les plus anciens) ;
- la vulnérabilité de ces usages de l'eau face au changement climatique et aux barrages réalisés en amont dont les impacts pourraient se conjuguer pour abaisser le niveau de la crue dans le DIN et ainsi rendre plus difficile la mobilisation de l'eau par motopompes (les PIV) ou admission gravitaire (casiers de submersion contrôlée).

4.2.2. La zone lacustre

Bien qu'ils soient moins nombreux que dans le DIN, des PIV ont également été développés dans la zone lacustre. Le rôle de la coopération allemande y est important (cf. chapitre ci-dessus) mais des programmes mis en œuvre par le Gouvernement du Mali ont également permis de réhabiliter et aménager des périmètres irrigués de plus grande taille. Le Projet d'Appui au Développement Durable de Daye, Hamadja et Korioumé (PADR-DHK) financé par le FAD a par exemple à partir de 2010 permis la réhabilitation des

périmètres irrigués des plaines de Daye, Hamadja et Korioumé dans la région de Tombouctou, pour un total de 1 690 ha répartis comme suit : Daye (390 ha), Hamadja (650 ha) et Korioumé (650 ha).

Ce type de périmètres a été aménagé dans les années 1990, en particulier dans le cadre du Projet Zone Lacustre du FIDA. Aux périmètres réhabilités dans le cadre du PADR-DHK s'ajoute par exemple le périmètre de Goubou (370 ha) qui constitue la principale zone de production rizicole du cercle de Niafunké. Sur le plan technique, ces systèmes irrigués doivent être vus comme une solution visant à améliorer les conditions d'alimentation en eau de vastes espaces naturels. Ainsi, on parle de la mare de Goubou ou de la plaine de Hamadja et non de périmètres irrigués en tant que tels. L'alimentation est généralement assurée à partir du fleuve Niger grâce à des vis d'Archimède. Ce système d'exhaure nécessite des moteurs puissants, ce qui peut constituer une faiblesse. Les coûts importants pour leur entretien et éventuellement leur remplacement peuvent limiter la durabilité de ces aménagements. Les parcelles rizicoles de Goubou ont par exemple connu une baisse importante de production jusqu'à ce que la coopération suisse finance de nouveaux moteurs en 2014. Cependant, les vis d'Archimède restent la principale option technique retenue lors des phases de réhabilitation des périmètres de moyenne superficie de la zone lacustre (e.g. plaine de N'gorfouhondou).

Ces périmètres de plusieurs centaines d'hectares chacun sont essentiellement cultivés en riz, exception faite des périmètres du cercle de Diré tels que Saouné qui produisent du blé de contre-saison et dont la demande en eau d'irrigation soulève alors des problèmes hydrologiques (prélèvement en dehors de la période de crue du fleuve) et techniques (pompage dans le lit mineur du fleuve Niger).

Enfin la culture de décrue représente une part importante des superficies cultivées dans la zone lacustre. Traditionnellement, elle est pratiquée en bordure de fleuve. Il s'agit alors de submersion libre. Mais certains lacs, tel que le lac Horo ou les lacs Tanda et Kabara, ont bénéficié d'aménagements. Le lac Horo est un cas particulier car son aménagement a débuté dans les années 1940, puis a été renforcé et complété dans les années 1980 sur financement allemand (GIZ). Le système complexe d'alimentation en eau du lac Horo permet la complémentarité dans le temps et dans l'espace entre les cultures irriguées grâce au canal de ceinture, et les cultures de décrue grâce à la mise en eau du lac par un chenal central (système de digues avec coexistence d'ouvrages de prise latéraux pour l'irrigation et d'un ouvrage central pour le remplissage). Le lac Horo constitue la principale zone de production de la région de Tombouctou et des productions sont même écoulées jusqu'à Mopti et Gao.

L'étude présentée par Adamczewski *et al.* (2011) offre une analyse complète de la coexistence entre cultures irriguées et cultures de décrue, et des enjeux sous-jacents.

En termes de piste de développement de l'irrigation dans la zone lacustre, les lacs apparaissent comme des pivots à la fois sociaux et économiques. Il est à noter que le lac Horo représente aujourd'hui un intérêt reconnu pour le développement de l'agriculture dans la zone lacustre et le renforcement de la résilience des populations comme en témoignent les études du PNUE (2009) ou la relecture de l'étude de faisabilité pour les AHA du lac Horo commandée par l'AFD Bamako en 2017. Toutefois, l'intervention dans ce type de système pose de nombreuses questions qui sont encore mal documentées. Ces questions sont d'ordre technique (lutte contre l'ensablement ou contre la salinisation des sols dans les cuvettes endoréiques), économique (intégration des productions dans les filières et chaînes de valeur) ou organisationnel (redynamisation des organisations de producteurs, fixation des populations déplacées pendant la crise sécuritaire du Nord Mali).

4.3.L'irrigation de proximité

Le concept d'irrigation de proximité est apparu au Mali dans les années 2010-2012. L'irrigation de proximité est définie comme étant « *tout aménagement hydro-agricole identifié et réalisé avec l'implication des communautés locales, inscrit dans les plans locaux de développement et visant à créer des zones de production agricole rentables, exploitables et gérables de façon autonome et durable par les communautés* » (Programme national d'irrigation de proximité, 2012-2021).

Le Gouvernement du Mali, en adoptant le Programme National d'Irrigation de Proximité (PNIP), entend mieux piloter, coordonner et harmoniser les interventions des différents PTF du Mali œuvrant dans la réalisation d'infrastructures hydroagricoles et l'accompagnement des populations. Le PNIP est un programme fédérateur de toutes les interventions dans l'irrigation de proximité de 2012 à 2022. Il prévoit l'aménagement de 126 000 ha, tous types d'AHA confondus.

Les AHA concernés sont :

- les PIV et la submersion contrôlée ;
- les seuils d'épandage de crue, petits barrages ou retenues d'eau au fil de l'eau ;
- les aménagements de mares ;
- les micro-barrages de retenue, les réservoirs de captage et de stockage des eaux de ruissellement ;
- les petits périmètres maraîchers.

Entre 2012 et 2017, environ 35 000 ha ont été aménagés dans l'ensemble des régions du Mali (Tableau 26) à travers les contributions d'une vingtaine de PTF pour un montant total évalué à 370 millions €.

Régions	Superficies aménagées en irrigation de proximité (ha)			Total
	Maîtrise totale (PIV)	Bas-fonds	Périmètres maraîchers	
Kayes	423	1 698	116	2 237
Koulikoro	-	873	85	958
Sikasso	40	5 054	-	5 094
Ségou	-	11 210	79	11 289
Mopti	2 626	1 448	111	4185
Tombouctou	4 587	7 026	-	11 613
Gao	-	-	-	0
Kidal	-	-	9	9
Total	7 676	27 309	400	35 385

TABLEAU 26 : REALISATIONS EN IRRIGATION DE PROXIMITE PAR REGION (PERIODE 2012-2017)

Les principaux contributeurs au sous-secteur de l'irrigation de proximité sont la coopération allemande (GIZ et kfw), l'Union Européenne (en délégation de fonds), la coopération canadienne (ACDI) et la coopération américaine (USAID). L'évolution semble montrer un intérêt croissant des PTF bilatéraux et multilatéraux pour l'irrigation de proximité. Notons par exemple le lancement du Projet d'Appui Régional à l'Initiative pour l'irrigation au Sahel (PARIIS) financé par la Banque Mondiale et géré par le CILSS qui souscrit également au PNIP au Mali.

4.4. La petite irrigation

4.4.1. Les petits aménagements hydrauliques

Ce chapitre est extrait de l'article de Ferry *et al.* (2012).

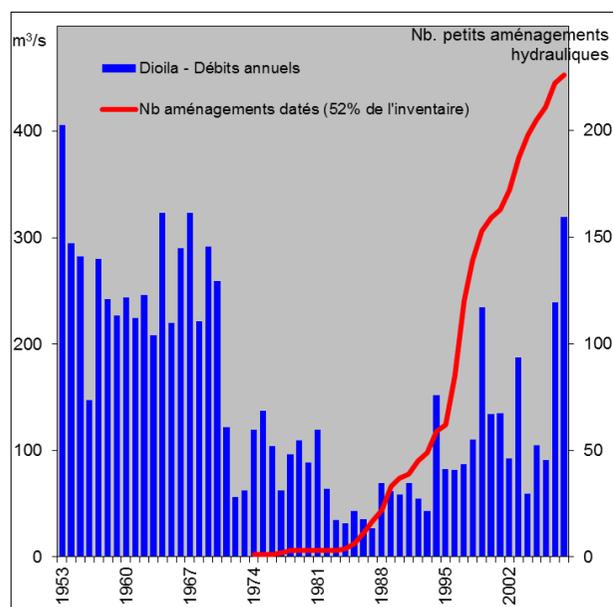


FIGURE 51 : NOMBRE D'AMENAGEMENTS RECENSES SUR LE BASSIN VERSANT DU BANI EN AMONT DE DOUNA DE 1970 A 2008

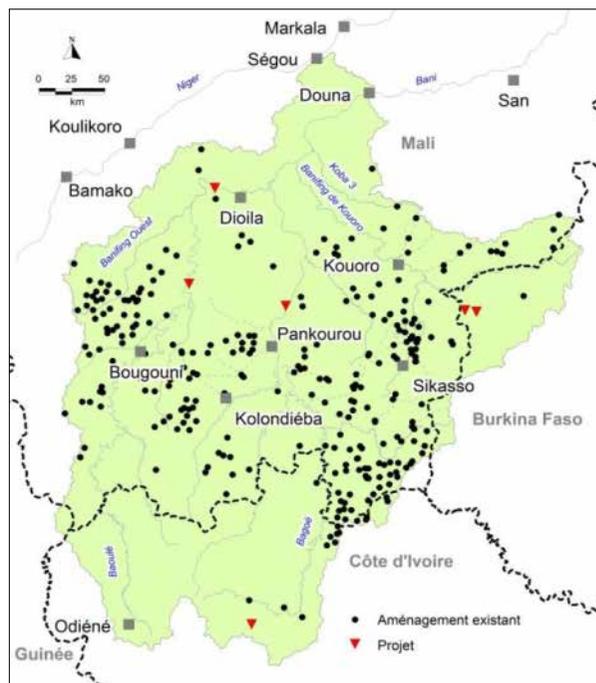


FIGURE 52 : LOCALISATION DES PETITS AMENAGEMENTS HYDRAULIQUES SUR LE BASSIN VERSANT DU BANI EN AMONT DE DOUNA

Malgré le peu d'information disponible sur la partie ivoirienne du bassin versant, on estime que plus de 500 petits aménagements hydrauliques de toutes tailles ont été construits sur le bassin versant du Bani en amont de Douna depuis le début des années 1980, soit environ 6 pour 1 000 km² (Figure 51 et Figure 52) : barrages en rivière et collinaires pour l'élevage et la pêche, seuils pour l'alimentation en eau potable, prises d'eau pour l'agriculture... Leur nombre n'a cessé de croître depuis cette époque et « *chaque village veut maintenant son barrage* ». La multiplication des petits aménagements hydrauliques a en effet commencé en 1982, qui coïncide avec le début de la période de grande sécheresse (1982-1993) (Figure 51). Enfin, soulignons que ces petits aménagements sont souvent en très mauvais état (Talin et Muther, 2009).

Alors que l'on s'interroge sur les déficits d'écoulement anormalement forts sur le bassin versant du Bani, ces quelques cinq cents petits aménagements hydrauliques n'ont jamais été pris en compte dans les travaux de recherche et dans les schémas d'aménagement, par ignorance ou par faute d'information. Tout comme l'anthropisation des bassins versants, ils ont très certainement une incidence sur le régime des écoulements à l'aval et le bilan hydrologique des bassins ; incidence qu'il est actuellement impossible de quantifier faute d'information précise sur la taille des réservoirs (surface en eau, capacité des réservoirs, leur fonctionnement hydrologique, les usages de l'eau...).

4.4.2. Motopompage en rivière

Ce chapitre est extrait de Ferry *et al.* (2012).

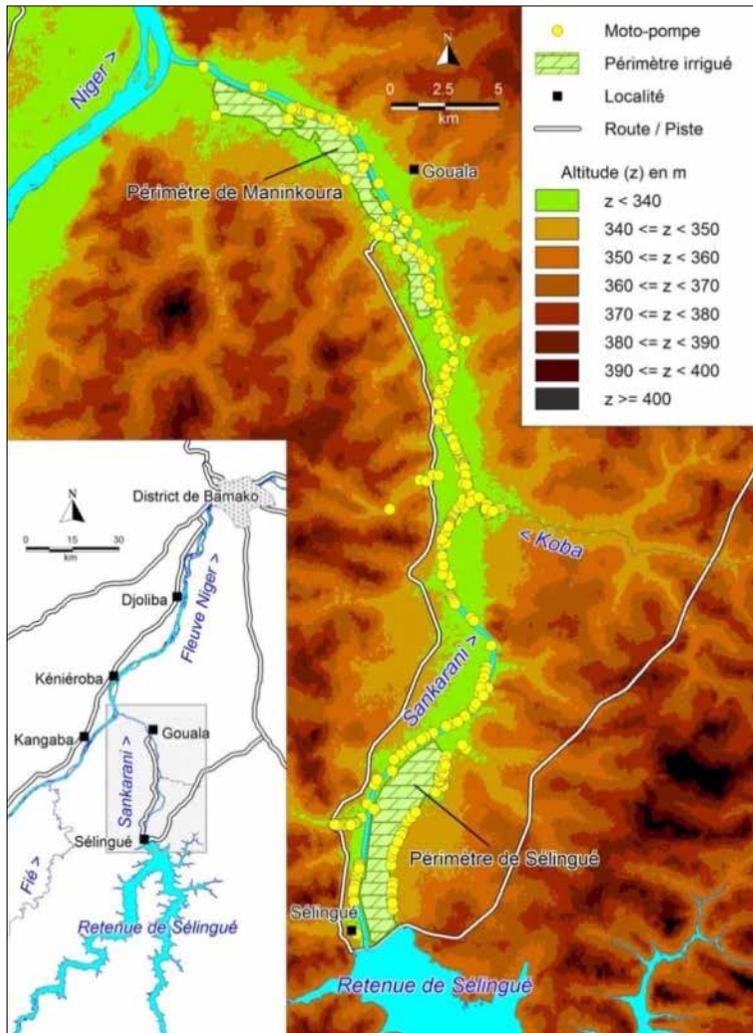


FIGURE 53 : LOCALISATION DES MOTOPOMPES DANS LA VALLEE DE LA SANKARANI EN AVAL DU BARRAGE DE SELINGUE (IN FERRY ET AL., 2012)

Plusieurs milliers de motopompes seraient à ce jour utilisées au Mali pendant la période sèche. A titre d'exemple, plus de 300 motopompes ont été inventoriées en 2010 dans la vallée de la Sankarani, sur environ 50 km entre le barrage de Sélingué et la confluence Niger-Sankarani (Figure 53). Elles permettent l'irrigation de plusieurs centaines d'hectares de petites parcelles familiales sur lesquelles les plantations de bananiers sont les plus fréquentes. On assiste actuellement à une diversification des cultures maraîchères et fruitières (mangues, papayes, agrumes) et à une augmentation rapide de ces surfaces irriguées par motopompage (augmentation de 20% des surfaces irriguées le long du marigot de Koba, affluent de la Sankarani, entre 2007 et 2010). Cette irrigation s'est développée spontanément sur les bourrelets de berge de la basse vallée de la Sankarani à partir de 1982, suite à la mise en service de l'usine hydroélectrique de Sélingué et à la stabilisation des niveaux d'eau qui en est résultée. D'après nos enquêtes et calculs, le débit correspondant au fonctionnement simultané des motopompes, dans des conditions optimales d'installation, serait d'environ 6 m³/s. Mais, sachant que chaque pompe ne fonctionne en moyenne que huit heures par semaine, on peut considérer que les débits prélevés dans la Sankarani sont actuellement insignifiants (quelques centaines de litres par seconde en moyenne) par rapport aux débits délivrés par l'usine de Sélingué (entre 100 et 200 m³/s entre janvier et juin). Mais l'essor prévisible de l'irrigation individuelle aura très rapidement un impact sur les débits d'étiage et devra être pris en compte dans une gestion intégrée des ressources en eau. L'exploitation agricole des berges par motopompage n'est pas seulement limitée par les débits d'étiage ; elle présente en effet une forte vulnérabilité aux crues. Ainsi, la crue de 2001 sur la Sankarani et les lâchers probables du barrage de Sélingué ont occasionné la destruction presque totale des exploitations bananières situées à l'aval de l'aménagement. Les grands barrages devront donc donner une place plus importante à la régulation des débits d'étiage et de crue au détriment de la seule production électrique ou de l'alimentation des grands périmètres irrigués.

L'irrigation par motopompage et plus généralement le développement de l'agriculture sur les bourrelets de berge et les petites plaines alluviales du Niger Supérieur semblent intéressants pour l'intensification et la diversification de la production agricole ainsi que pour l'amélioration de la sécurité alimentaire et des revenus en milieu rural. Malheureusement, les connaissances actuelles sont encore trop limitées pour en connaître le potentiel et les contraintes de développement.

4.5. Les autres usages et impacts

4.5.1. Pêche collective sur le cours supérieur du Niger

Ce chapitre est en partie extrait de de la Croix *et al.* (2014) et de la Croix (2015).

La pêche est l'un des sous-secteurs clés de l'économie malienne. En période hydrologique normale, la production halieutique se situe autour de 100 000 t/an (Marie *et al.*, 2007). L'essentiel de la production de la pêche au Mali se situe dans le DIN (80% des captures annuelles) et dans les lacs de retenue des principaux barrages hydroélectriques : Sélingué dans la vallée de la Sankarani et Manantali sur le Bafing (bassin versant du Sénégal).

On distingue trois catégories de pêcheurs :

- les agriculteurs-pêcheurs (Rimaïbé, Bambara, Marka, Songhai) dont l'activité principale reste l'agriculture ;
- les pêcheurs professionnels sédentaires (Bozo et Somono) pour qui la pêche est la première source de revenus ; ils peuvent toutefois diversifier leurs activités pour répondre aux aléas climatiques par des travaux agricoles par exemple ;
- les pêcheurs professionnels migrants (essentiellement Bozo), pour qui l'activité halieutique représente l'unique source de revenu.

L'étude des pratiques de pêches et de l'organisation des sociétés de pêcheurs (Somono et Bozo) a longtemps constitué un thème majeur de la recherche au Mali. Toutefois on observe que les études ont été consacrées presque exclusivement au DIN. De ce fait il n'existe que très peu de littérature scientifique ou technique consacrée à la pêche en amont du DIN. Pourtant, sur le Niger Supérieur, les activités de pêche sont intenses et l'on y trouve une forte diversité d'organisations sociales et politiques au sein de ces communautés Somono et Bozo. Malheureusement, les statistiques de pêche y sont pratiquement inexistantes.

L'étude des pratiques de pêche et de l'occupation territoriale des espaces aquatiques dans le Manden révèle deux types de situation sur le Niger Supérieur en amont et en aval de la confluence Niger/Sankarani ;

- la retenue de Sélingué a créé un réservoir halieutique conséquent et est ainsi devenu une zone importante de production (4 000 t/an) ; les stratégies de migration ont ainsi été perturbées, et des groupes de pêcheurs venus de la région du DIN et de Ségou se sont sédentarisés autour de la retenue (Togola, 2004) ;
- en aval du barrage de Sélingué, les pratiques de pêche collectives sont confrontées à de nombreuses contraintes sur le milieu physique (la variabilité des ressources aquatiques, les conséquences sur le régime des eaux des constructions de barrages), ainsi qu'à des contraintes liées à l'intrusion d'autres activités humaines sur le fleuve (prélèvements de sable et de gravier, orpaillage, urbanisation, ...).

Les pêches collectives reposent sur des mises en défens, c'est-à-dire l'application d'une interdiction de toute activité de pêche d'une section de fleuve bordant des espaces d'eau profonde afin de laisser les poissons se regrouper et se reposer. Au moment de la levée des mises en défens, les poissons ont atteint une taille importante et le fleuve est à son niveau le plus bas facilitant la mise en place d'engins de piégeage tels que les filets traversants. L'impact de cette pratique sur la ressource en poisson est controversé car elle ne favoriserait pas la croissance des poissons et détruirait le stock de géniteurs juste avant la période de reproduction de certaines espèces. Les débits d'étiage, désormais beaucoup plus importants depuis la mise en service du barrage du barrage de Sélingué perturberaient la pratique de pêches collectives en raison d'un espace aquatique dorénavant plus étendu latéralement.

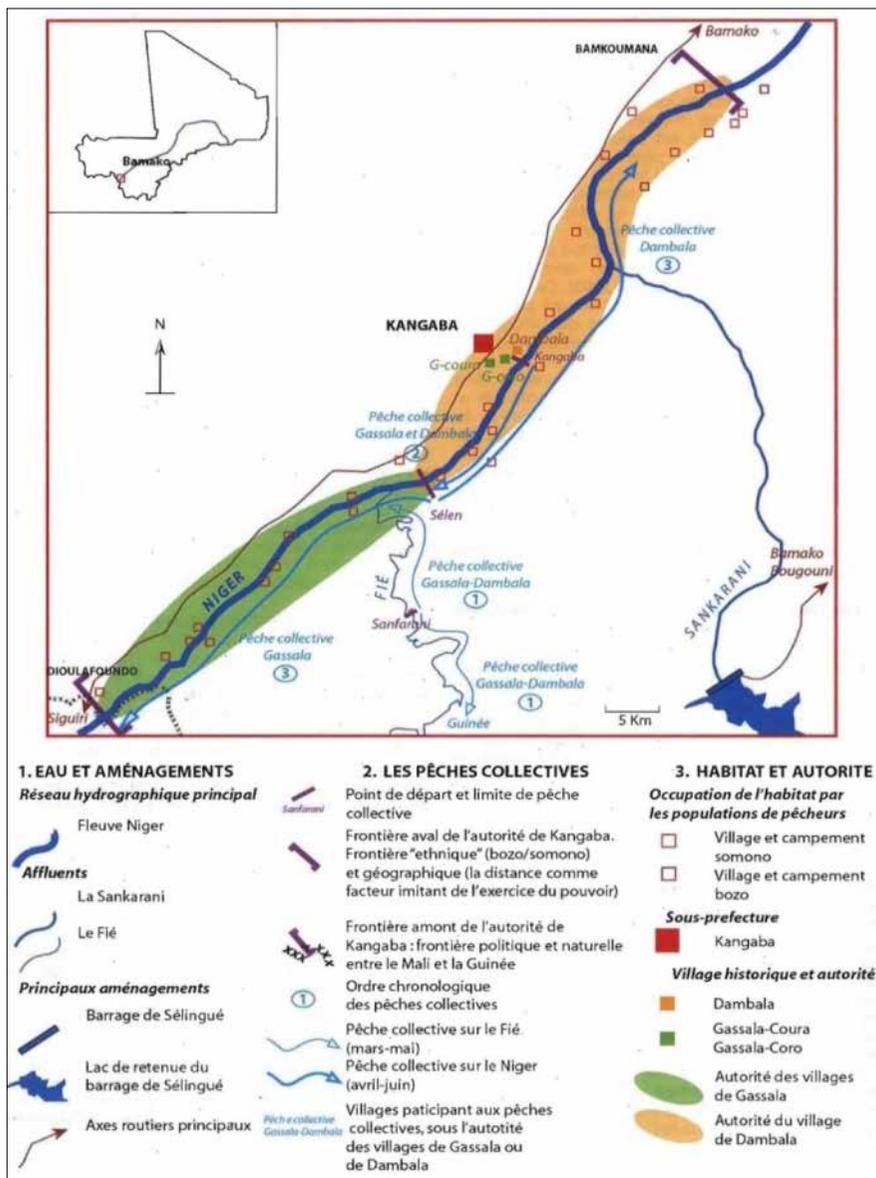


FIGURE 54 : ORGANISATION DES PÊCHES COLLECTIVES DES VILLAGES DE GASSALA-COURO ET DE DOMBALA SUR LE FIE ET LE NIGER SUPERIEUR (IN DE LA CROIX ET AL., 2014)

L'arrêt des campagnes de pêche collective en aval de la confluence Niger/Sankarani s'est traduit par une réappropriation sous forme segmentée des territoires de pêche ainsi laissés ouverts aux pratiques de pêche individuelles. En revanche, en amont de la confluence, la pratique de pêche collective sur un parcours défini par des groupes migrants, faisant halte successivement dans des finages mis en défens, perdue et demeure créatrice de cohésion sociale et garante des territorialités établies ; elle est l'expression tangible d'une autorité coutumière qui se renouvelle chaque année. L'exemple du Fié (Figure 54) en est un bon révélateur : les campagnes de pêche sont maintenues par les autorités de Dambala par souci de maintenir leurs prérogatives, en dépit de la difficulté d'appliquer dans cette zone difficile d'accès en étiage des mises en défens qui ne sont pas respectées par les pêcheurs extérieurs venus de la réserve de Sélingué.

Les fluctuations brutales de débits et par conséquent des niveaux d'eau imposés par le fonctionnement de l'usine hydroélectrique de Sélingué, le plus souvent de quelques dizaines de centimètres, gênent la pêche au filet (déplacements, échouages...) à en croire les Bozo et Somono. Comparées aux activités liées à l'extraction de sable et de gravier, les variations de niveau d'eau imposées par le barrage de Sélingué ne devraient pas être considérées comme une nuisance majeure. Pour les pêcheurs, il est sans doute plus simple de se plaindre d'un facteur extérieur de nuisance que d'une activité à laquelle ils participent probablement largement et qui constitue un nouveau marché et l'opportunité d'exporter leur production vers les centres urbains par route ou par pinasse. En revanche, la modification profonde de la morphologie du fleuve (incision) a probablement une forte répercussion sur l'ichtyofaune et les déplacements incessants des convois de pinasses interdisent maintenant la pose de grands filets y compris la nuit. Les "pêcheurs de sable", dont probablement beaucoup de pêcheurs (de poisson), ont pris possession du fleuve.

La situation de la pêche en aval de la confluence Niger/Sankarani préfigure celle qui pourrait apparaître en aval de la confluence Niger/Niandan dans la perspective de la construction du barrage de Fomi.

4.5.2. Mares et pêches traditionnelles

Ce chapitre est en partie extrait de Renard-Toumi (2013), de Renard-Toumi *et al.* (2014) et Ferry *et al.* (2015).

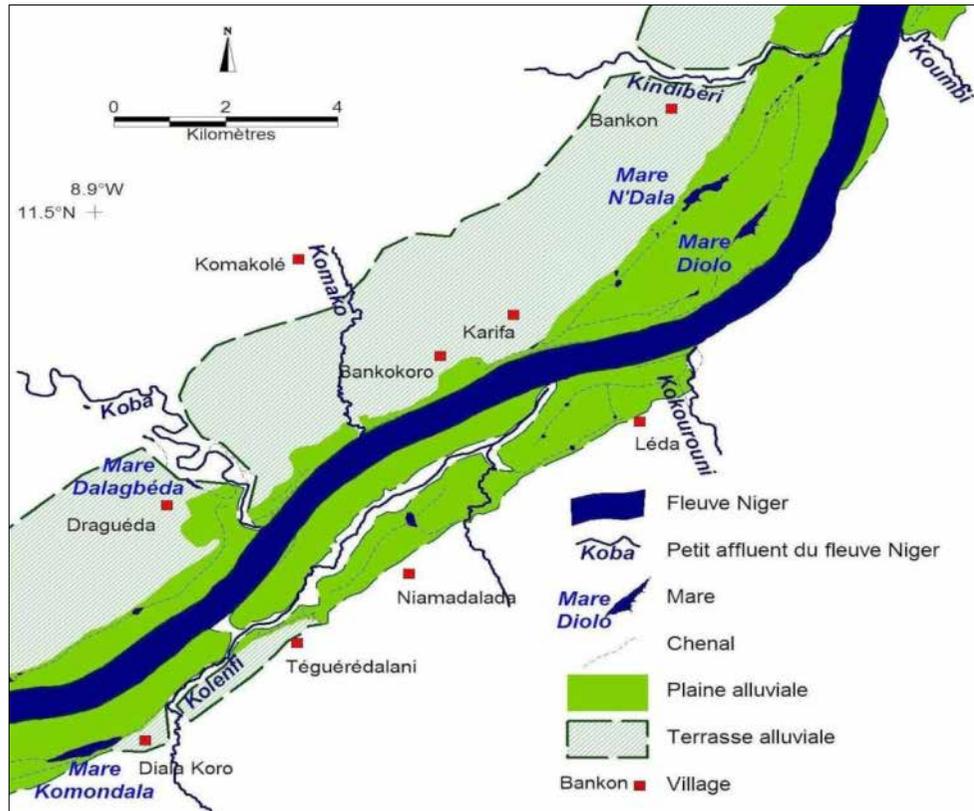


FIGURE 55 : PLAINE ALLUVIALE ET MARES DE LA PLAINE DE BANKON (IN RENARD-TOUMI, 2013)

Régulièrement inondées, les plaines alluviales du Niger Supérieur et de ses principaux affluents ont pour caractéristique d'être ponctuées de très nombreuses mares (1 700 recensées). De dimensions variables (jusqu'à plusieurs dizaines d'hectares), ces mares sont des éléments-clés du paysage culturel mandingue du fait des rassemblements festifs qu'occasionne leur pêche.

Les mares des plaines alluviales du bassin versant du Niger Supérieur sont alimentées par les précipitations directes, les ruissellements diffus ou concentré et par le débordement des cours d'eau voisins (exemple de la Figure 55). Si la plupart des bras sont remis en eau lors des crues, il est probable que certaines mares n'aient plus aucun rapport avec le cours d'eau proche dont elles ont pu être isolées par une divagation de bras ou une baisse d'hydraulicité.

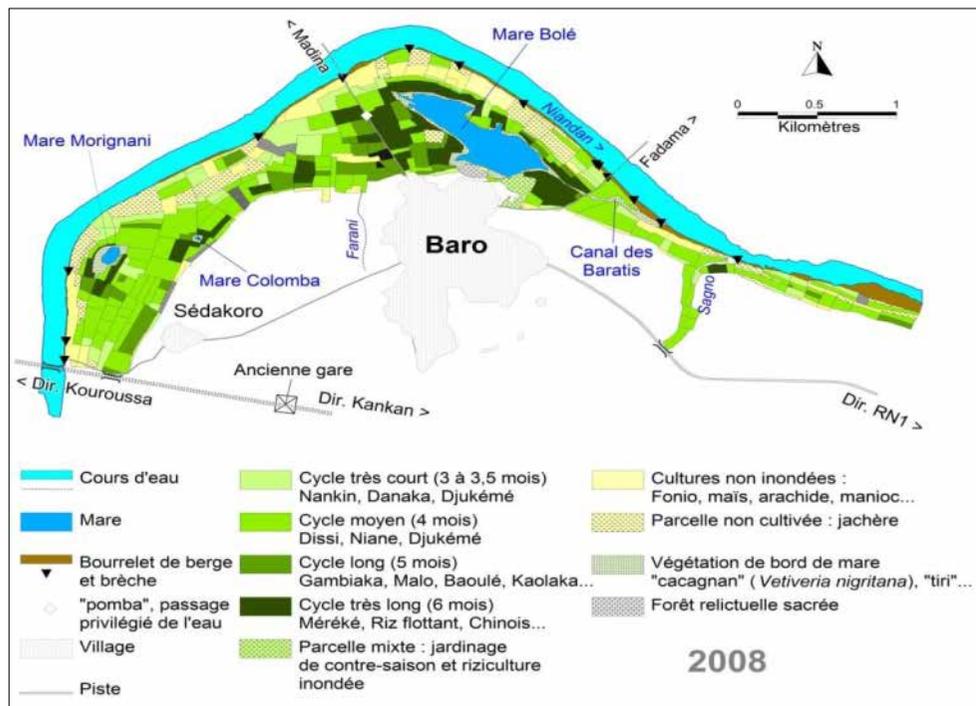


FIGURE 56 : LA MARE DE BOLE ET LA MISE EN VALEUR AGRICOLE DE LA PLAINE DE BARO

Ces mares sont encore peu connues. Les travaux menés autour de la mare de Bolé située sur la plaine alluviale de Baro (Figure 56) laissent toutefois présager un potentiel halieutique non négligeable et montrent surtout qu'elles sont un facteur de cohésion sociale en relation avec la mise en valeur agricole des plaines alluviales. Les mares du Haut Niger font pratiquement toutes l'objet de pêches collectives en fin de saison sèche lorsqu'elles sont à leur plus bas niveau ; pêches collectives auxquelles ne sont pas associés les pêcheurs professionnels Bozos et Somonos.

Ainsi, la mare de Bolé, fleuron de la culture mandingue, attire chaque année des milliers de personnes de toute la Guinée, voire de l'Afrique de l'Ouest. Les prises de poissons lors de la pêche traditionnelle annuelle de Baro à la fin du mois de mai ont plus une valeur symbolique que nutritive, mais ce rite, de haute importance sociale doit être préservé comme tel et pour cela le renouvellement de la faune halieutique doit être assuré. Durant chacune de ces pêches, ou pêches d'épuisement (Daget, 1988), rares sont les poissons qui échappent aux mailles, harpons et nasses.

Si la pérennité de certaines mares peut être assurée par les précipitations directes et le ruissellement sur leurs bassins versants, leur "ré-empeuplement" naturel demande qu'il y ait une communication, au moins temporaire, entre les mares et les cours d'eau. Cette communication et la remontée des poissons vers les mares peut avoir lieu lors des crues par débordement des cours d'eau sur les plaines alluviales. Le maintien des pêches collectives est donc étroitement lié au fonctionnement hydrologique des cours d'eau, qui lui-même peut être soumis à court ou moyen terme aux modalités de gestion de lâchers de barrages.

Comme pour l'inondation du DIN, la construction de nouveaux barrages accompagnée d'un écrêtement des crues, aura pour conséquence une limitation des échanges entre les cours d'eau et les mares et pour certaines d'entre elles, alimentées principalement par les cours d'eau, un assèchement complet. Cet impact négatif des grands barrages est actuellement difficile à quantifier faute de connaissance plus précise sur les mares et, plus généralement, sur les plaines alluviales (population concernée, topographie, fonctionnement hydrologique, potentiel halieutique, agronomique...). Sur le DIN, des travaux ont montré que le renouvellement des juvéniles dépend de l'extension de la zone inondée et donc de l'amplitude de la crue du fleuve. Ainsi, dans les plaines d'inondation du DIN, le débit entrant détermine l'étendue de la crue et fait varier le volume des prises de poisson (Figure 57). De ces corrélations on estime qu'une diminution des débits de $1 \text{ m}^3/\text{s}$, équivalant à 13 Mm^3 pour la crue de juillet à septembre, entraîne une baisse de 27.8 t des quantités de poissons pêchées l'année suivante (Laë, 1992 ; Morand *et al.*, 2009 ; Béné *et al.*, 2009).

Les faibles pentes calculées sur le bassin versant du Bani ainsi que sur ses cours d'eau et par conséquent de ses plaines alluviales indiquent que les mares y seraient également très nombreuses (parfois mentionnées sur les cartes au 1:200 000). Tout comme sur les plaines alluviales du Niger Supérieur, des pêches collectives en mare y ont lieu chaque année, mais leur fonctionnement et leur potentiel ne sont pas connus.

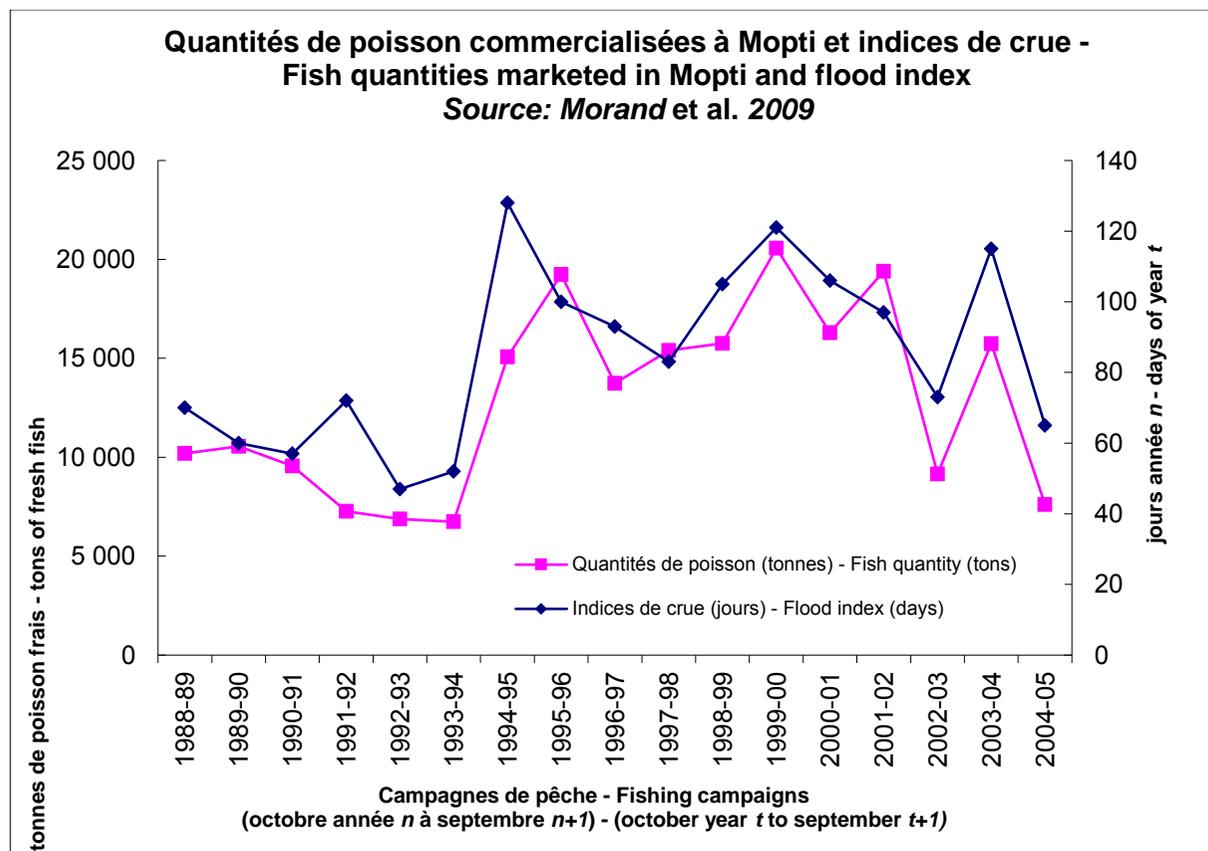


FIGURE 57 : RELATION ENTRE LA QUANTITE DE POISSONS PECHEE ET COMMERCIALISEE A MOPTI ET L'AMPLITUDE DE LA CRUE (IN CLANET ET OGILVIE (2015) D'APRES MORAND ET AL. (2009))

4.5.3. Alimentation en eau domestique et pollution

Le premier des usages de l'eau auquel la population comme les décideurs ou les médias sont sensibles est celui de l'alimentation en eau potable et plus généralement l'utilisation domestique de l'eau (boisson, hygiène, cuisine, nettoyage, ...).

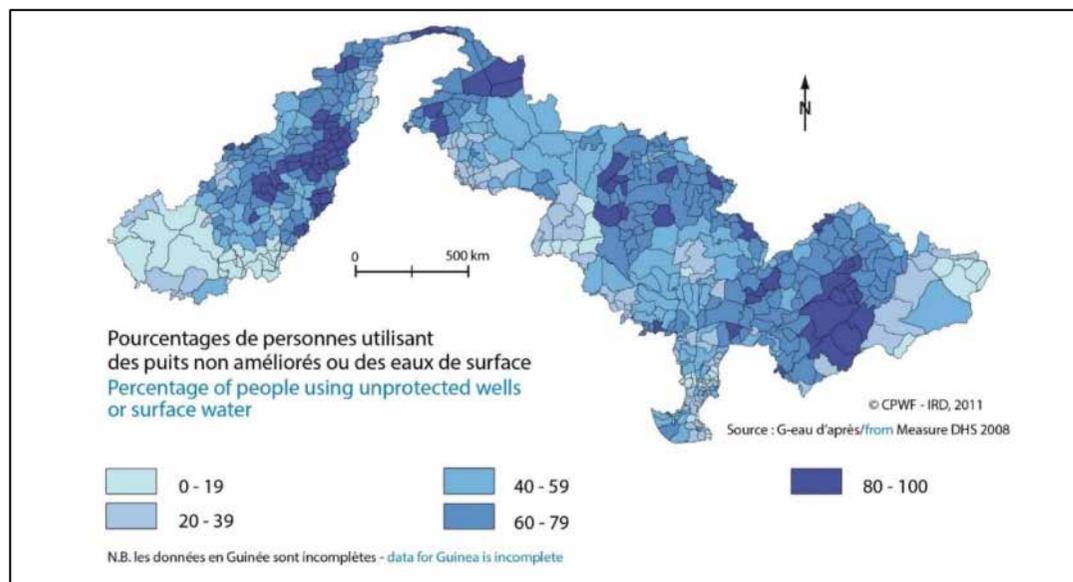


FIGURE 58 : POURCENTAGES DE PERSONNES UTILISANT DES POINTS D'EAU NON AMELIORES

Ceux-ci étaient estimés à 4% des prélèvements des ressources en eau de surface au Mali en 2005 (Figure 45). En supposant une consommation de 100 l/j/habitant, chiffre sans doute très supérieur à la réalité, la consommation en eau domestique de la ville de Bamako ne représenterait qu'environ 2% du plus faible débit journalier observé sur le Niger en 2010, sachant par ailleurs que certains quartiers excentrés de la ville doivent faire appel aux eaux souterraines. Ce seul exemple montre que les prélèvements en eau à usage domestique sur le fleuve Niger n'ont, pour le moment, que très peu d'impact sur son régime et sont insignifiants par rapport à ceux de l'agriculture irriguée (Ferry *et al.*, 2012). Bien que les ressources en eau soient disponibles en quantité pour l'eau domestique, des études pointent les difficultés en approvisionnement en eau de qualité. Par exemple, le pourcentage de personnes utilisant des puits non améliorés ou des eaux de surface non traitées est supérieur à 80% dans plusieurs régions du Mali (Figure 58).

L'usage de l'eau de qualité (mesurée par la proportion de personnes utilisant des points d'eau non protégés) est fortement corrélé à une moindre pauvreté (Ward *et al.*, 2009) ; ceci rappelle le rôle vital que l'eau et l'assainissement jouent dans la réduction de la pauvreté (PNUD et SEI, 2006).

Par ailleurs, les rejets des villes riveraines du fleuve (dont évidemment la ville de Bamako) dans le fleuve, « véritable égout à ciel ouvert », poseront à terme des problèmes croissants de santé publique si aucune disposition n'est prise dès maintenant. Au Mali, pour les médias comme pour les services techniques concernés, la pollution généralisée du fleuve est vue comme une vérité acquise et la qualité des eaux est un sujet très souvent abordé. La prolifération de plantes aquatiques envahissantes au niveau des villes riveraines du fleuve et dans les grands périmètres irrigués (Baguinéda, ON...) est un marqueur de cette pollution. L'augmentation de la population urbaine et la régulation future des débits par de grands barrages devraient accentuer le problème des plantes envahissantes. Ce rapide constat ne s'appuie bien souvent que sur de rares observations faites à proximité de quelques villes riveraines du fleuve, notamment la ville de Bamako. Si les pollutions d'origine urbaine et le pouvoir épuratif du fleuve sont peu connus, force est de constater que la question des pollutions d'origine industrielle (à priori peu importante) et minière est rarement abordé. Pourtant, à titre d'exemple, l'extraction industrielle ou artisanale de l'or largement développée sur le bassin supérieur du Niger devrait à elle seule être un sujet de préoccupation (Ferry *et al.*, 2009).

4.5.4. Extraction de sable et de gravier

Ce chapitre est en partie extrait de Ferry *et al.* (2012).

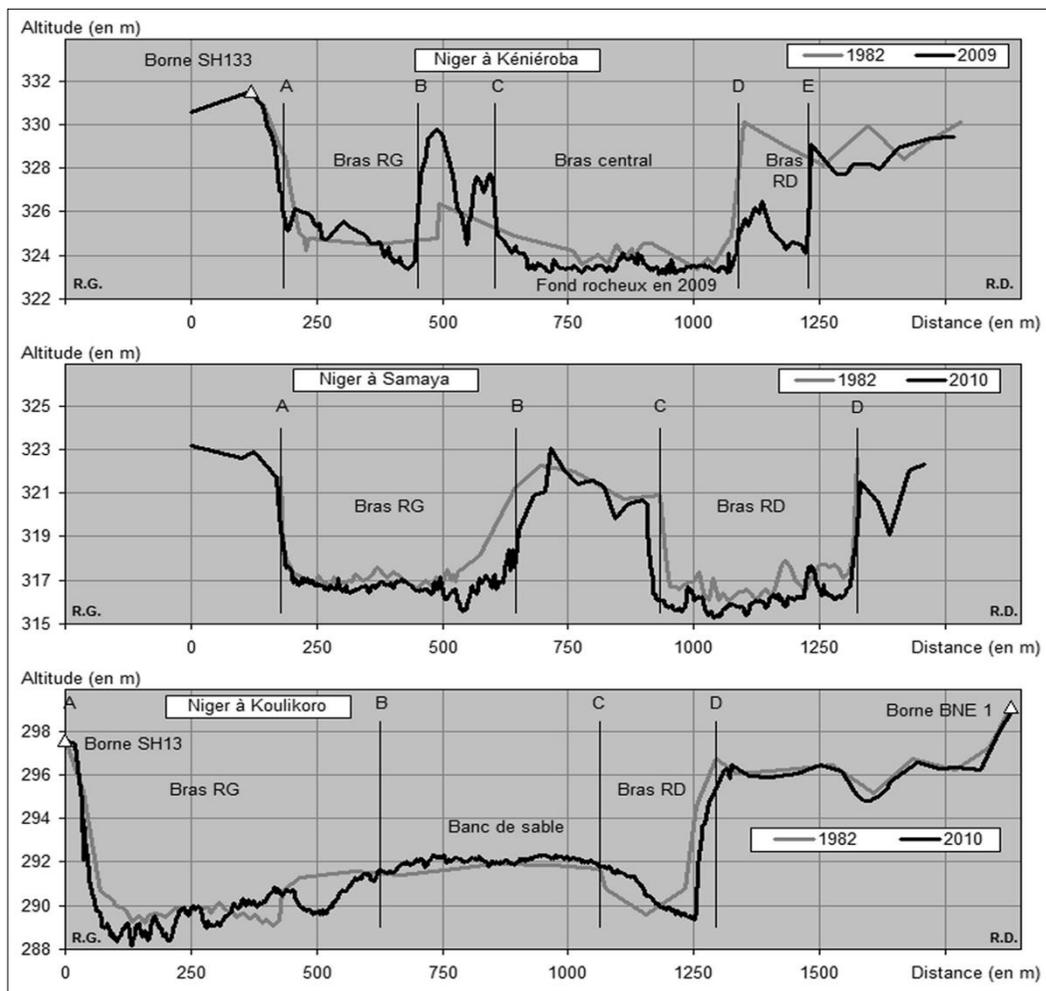


FIGURE 59 : PROFILS EN TRAVERS DU NIGER A KENIEROBA, SAMAYA ET KOULIKORO EN 1982 ET 2009-2010

Pour les médias, comme pour les organisations nationales et régionales, voire des scientifiques, l'ensablement du fleuve Niger ne fait pas de doute et le danger est dénoncé régulièrement. Sur son cours moyen (en aval du DIN), le fleuve est effectivement soumis à un ensablement qui serait dû essentiellement à la progression de cordons dunaires sous l'effet de la dynamique éolienne. En revanche, les travaux de recherche menés entre 2007 et 2010 montrent que, sur son cours supérieur, au moins sur sa partie malienne, le fleuve serait dans une phase d'incision (creusement).

L'incision du fleuve a été mise en évidence par trois approches différentes : (1) des enquêtes auprès de riverains (de nombreux témoignages indiquent que dans les années 1980, des bancs de sable, non visibles aujourd'hui, étaient encore présents à l'amont de Bamako), (2) des observations topographiques (comparaison des profils en travers du fleuve réalisés en 1982 par l'Institut Géographique National, puis en 2009 et 2010 à Kénieroba, Samaya et Koulikoro montre un surcreusement très net des trois biefs) (Figure 59) et (3) l'analyse des courbes de tarage de la station hydrométrique de Koulikoro (une courbe entre 1907 et 1982 (75 ans), puis deux depuis 1982). Cette incision est à mettre en relation avec les activités d'extraction de sable et de gravier pour la construction qui a pris une ampleur considérable sur près de 150 km de bief entre Kangaba et Koulikoro.

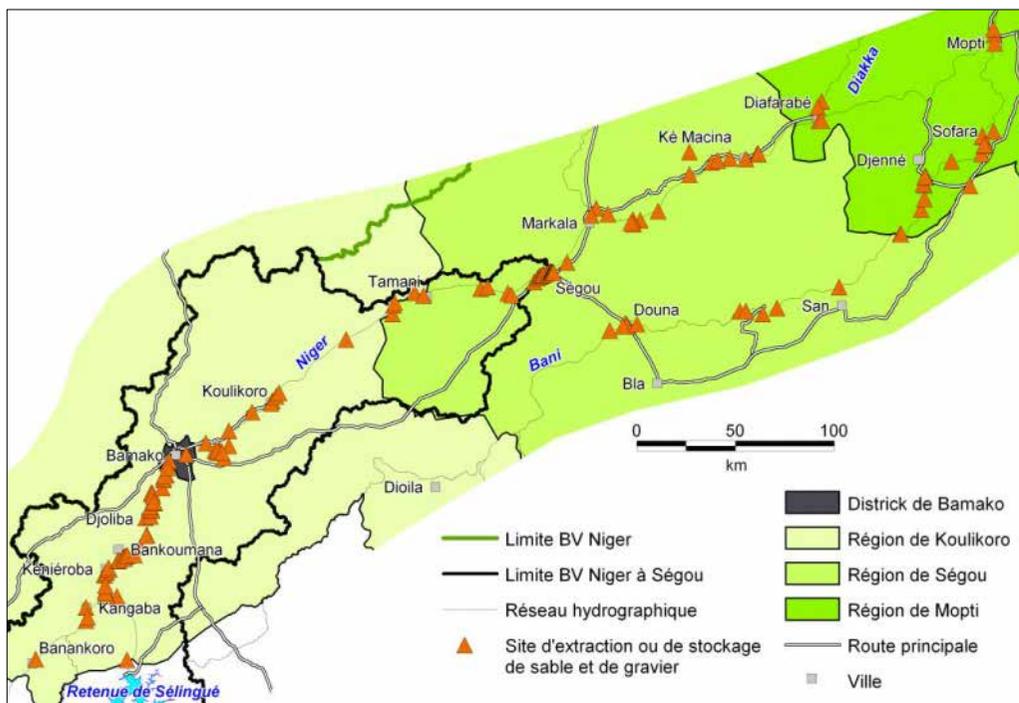


FIGURE 60 : PRINCIPAUX SITES D'EXTRACTION ET DE PORTS SABLIERES ENTRE KANGABA ET KOULIKORO EN 2010

La localisation des sites d'extraction de sable et de gravier est liée à la proximité des villes et des grands aménagements ainsi qu'à la possibilité d'exporter les matériaux prélevés par les routes, pistes et biefs navigables (Figure 60). L'extraction de matériaux est réalisée selon deux modes d'exploitation : (1) des prélèvements directs sur les berges sableuses (chargement de camions manuel ou mécanisé pratiqué en période d'étiage) et (2) des prélèvements dans la partie immergée des lits mineurs pratiqués toute l'année, de préférence en basses ou moyennes eaux (extraction manuelle en apnée ou par drague mécanique puis transport par pinasse vers les ports sabliers (Djoliba, Kalaban Koro, Koulikoro...)). En 2010, près de 20 000 personnes auraient été impliquées dans la filière « sable et gravier » (extraction et transport par pinasse ou routier), plus de 60 sites principaux d'extraction et de stockage de sable et de gravier ont été identifiés et plus de 3 000 pinasses (d'une capacité de 2 à 3 m³ par unité) étaient utilisées. Une mise en rapport avec les chiffres d'importation annuelle de ciment, montre que l'ablation annuelle dans le lit du Niger était d'ordre pluri centimétrique !

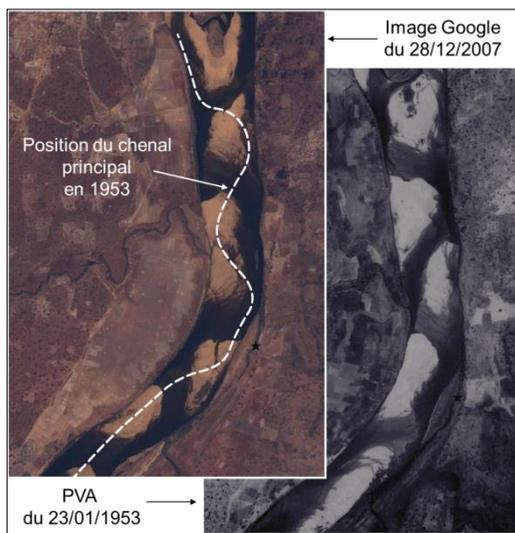


FIGURE 61 : EXEMPLE DE DEPLACEMENT DU CHENAL PRINCIPAL DU FLEUVE NIGER

Le non renouvellement du matelas sableux dans le lit du Niger et le non comblement de la retenue de Sélingué depuis la construction du barrage en 1982 confirment la faiblesse des apports sédimentaires dans le réseau hydrographique en amont de Bamako. Le type de végétation dominante paralyse efficacement le ruissellement élémentaire et joue un rôle de "peigne" vis-à-vis des particules sédimentaires. Les densités de population témoignent d'une pression anthropique peu importante (défrichage, mise en culture...). Ces deux facteurs montrent que, globalement, les apports sédimentaires "naturels" au fleuve peuvent être considérés comme insignifiants.

L'incision du fleuve se surimpose à sa dynamique hydro-sédimentaire naturelle. La prise de vue aérienne et l'image satellite (Figure 61) montrent le déplacement des bancs de sable et des chenaux du fleuve Niger en aval de sa confluence avec le Niandan entre 1953 et 2007 (54 ans) ; ces déplacements latéraux ont très bien pu se produire plusieurs fois entre ces deux dates. Cette dynamique hydro-sédimentaire peut donner lieu à des interprétations contradictoires selon l'occupation et l'usage des berges (village, cultures, débarcadère...), certains y verront leur sapement (érosion) et d'autres, l'ensablement du fleuve.

La présence de barrages (pièges à sédiments) ainsi que de tout autre aménagement susceptible de freiner les écoulements (route, digue...) engendrent une diminution des apports sédimentaires au réseau hydrographique, qui sont déjà naturellement très faibles. Ainsi, avec le barrage de Sélingué, 25% du bassin versant ne participe plus à l'alimentation du fleuve en charge solide (35% avec Dabola et le projet de Fomi). La construction prochaine de nouveaux aménagements sur le Niger Supérieur, dont le barrage de Fomi, et le prélèvement excessif de matériaux dans les biefs se traduiront, à terme, par de profondes modifications sur la morphologie du fleuve et plus généralement sur son écosystème.

4.6.Éléments de prospective : évolution des usages et de la disponibilité de l'eau

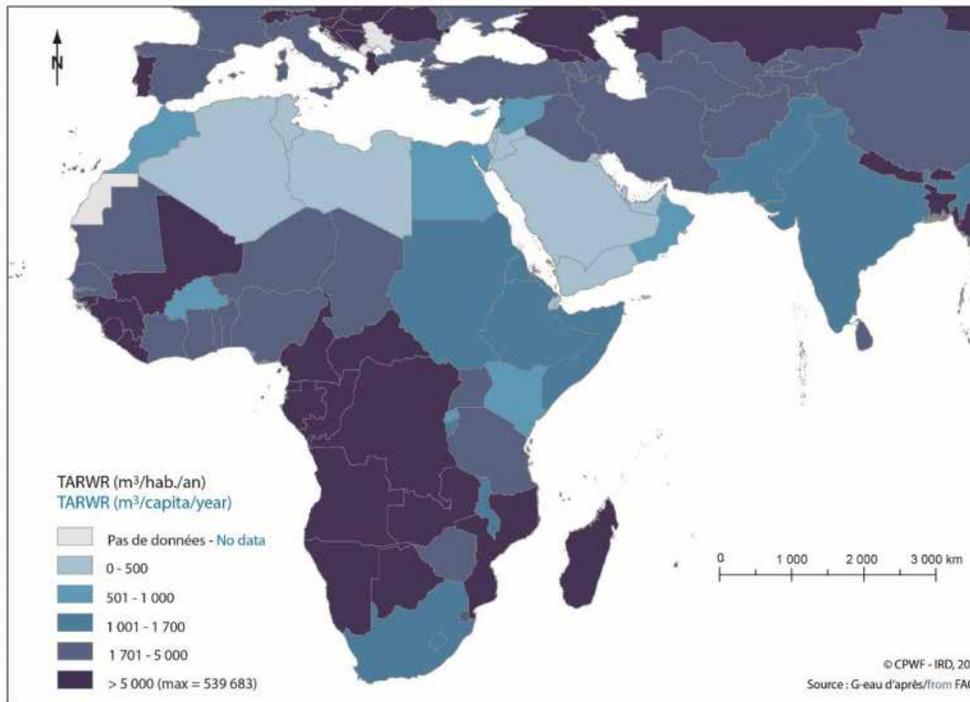


FIGURE 62 : INDICE DE RESSOURCES EN EAU RENOUVELABLES REELLES TOTALES (TARWR)

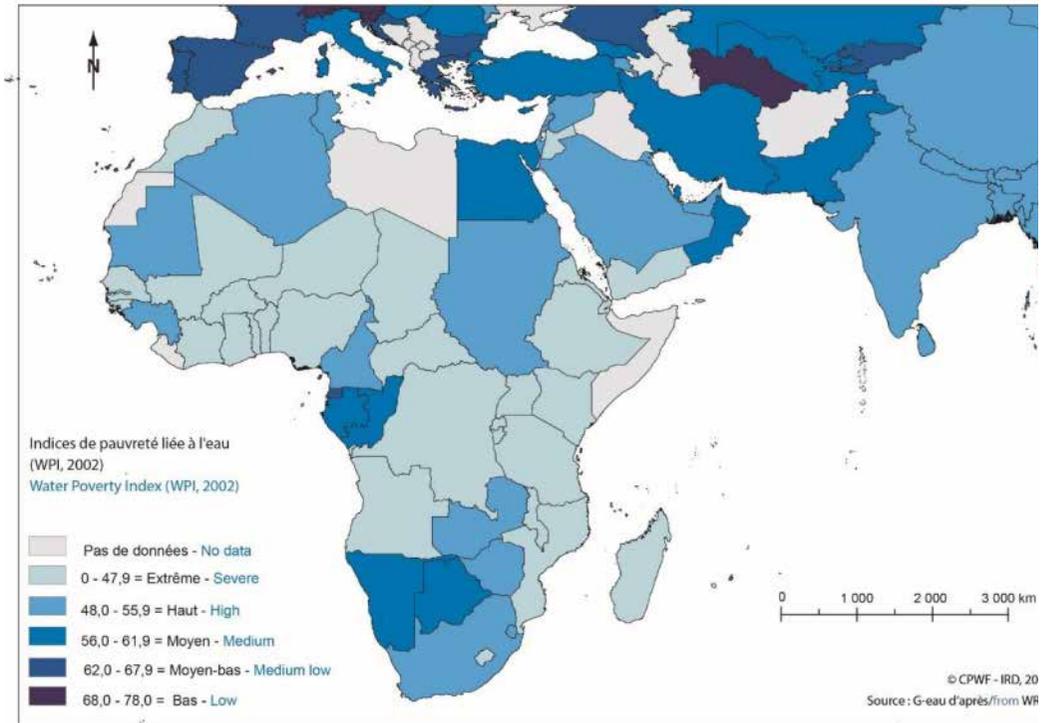


FIGURE 63 : INDICE DE PAUVRETE EN EAU (WPI)

Comparé aux pays voisins d'Afrique de l'Ouest, le Mali possède un potentiel de ressources en eau renouvelables par habitant élevé (plus de 5 000 m³/habitant/an) grâce au fleuve Niger et à une densité de population modeste (Figure 62). L'indice « Total Actual Renewable Water Resources » (TARWR) couramment utilisé (Falkenmark, 1989) définit les besoins nationaux à 1 700 m³/habitant/an de ressources en eau renouvelables réelles totales ; en deçà, un pays souffre de « stress hydrique », tandis qu'en dessous de 1 000 m³/habitant/an, il souffre pénurie d'eau. À l'exception du Burkina Faso, tous les états du bassin dépassent ces seuils, mais cet indice ne tient pas compte des variations spatiotemporelles des ressources hydriques. Cette lacune est notamment gênante au Mali, qui s'étend d'une zone sub-humide à l'hyper-aride, et qui subit la même année des sécheresses et des inondations (Rijsberman, 2006). Une cartographie plus fine des TARWR (e.g. Clanet et Ogilvie, 2014) localise des régions éloignées des rivières ou recevant peu de pluies, enregistrant moins de 1 700 m³/habitant/an. Les variations intra-annuelles de débit ou de précipitations réduisent également la disponibilité en eau dans d'autres régions. Toutefois, cet indice ne tient pas compte des difficultés d'accès à l'eau et ne fournit qu'une quantité d'eau théoriquement disponible pour l'agriculture. Le « Water Poverty Index » (WPI ; Sullivan, 2002) est plus exhaustif. Il englobe les ressources, les capacités, l'environnement et les possibilités d'accès et d'utilisation de l'eau des communautés paysannes, mais l'arbitraire de ses coefficients de pondération diminue sa portée. Les indices faibles que cette méthode attribue aux pays du bassin signalent des niveaux de pauvreté en eau élevés (Figure 63). Par ailleurs, le bassin du fleuve Niger et notamment le Mali sont exposés à des changements climatiques et anthropiques (aménagement hydrauliques, croissance démographique) importants qui viennent accroître la pression sur ces ressources en eau.

4.6.1. Une demande croissante de surfaces aménagées

4.6.1.1. ATTRACTIVITE DES PERIMETRES IRRIGUES, PROBLEMATIQUES FONCIERES ET INTEGRATION DE NOUVEAUX EXPLOITANTS

Dans le périmètre de Sélingué, l'arrivée de nouveaux exploitants (qui ne cultivaient pas dans la zone avant l'aménagement) est ancienne. En effet, l'accès à l'espace aménagé pour les personnes allochtones a débuté avec le refus de certains attributaires, qui avaient bénéficié de compensations lors de la construction du barrage, de continuer à exploiter selon le cahier des charges fixé par l'ODRS. A cela se sont ajoutées les évictions par l'ODRS de producteurs dont les rendements étaient jugés trop faibles. De nouveaux attributaires ont ainsi pu rejoindre le périmètre irrigué dès la fin des années 1980, y compris des producteurs qui n'exploitaient pas la zone avant aménagement et des producteurs non familiaux. Ceci s'est déroulé dans un contexte où les critères d'affectation des terres étaient et restent encore peu clairs, et s'est traduit par une diminution des superficies moyennes cultivées pour les catégories de producteurs les plus vulnérables (0,4 ha en moyenne par exploitation) et une accumulation du foncier pour certaines familles (jusqu'à 3 ha). Le périmètre de Maninkoura comprendrait également près de 10 % d'exploitants qui n'étaient pas dans la zone avant aménagement (migrants spontanés, cadres et commerçants).

Selon les rôles de redevance (listes officielles des attributaires tenus de payer la redevance eau), près de 40% des exploitations disposent de moins de 0.25 ha dans le périmètre aménagé de Sélingué, tandis que la superficie moyenne par exploitation est de 0.5 ha à Maninkoura. Il existe donc un double défi lié à la clarification des critères d'attribution du foncier aménagé : quels sont les producteurs prioritaires et quelle superficie peut/doit leur être attribuée pour permettre une exploitation viable ?

La zone de l'ON a été et demeure particulièrement attractive pour l'ensemble des populations alentours, populations venant de la zone lacustre du cercle de Tombouctou au moment des grandes sécheresses des décennies 1970 et 1980, et populations issues du DIN touché par l'insécurité en 2012-2013. Or, la pression foncière est déjà forte à l'intérieur de la zone aménagée de l'ON avec des superficies passées de plus de 7 ha/famille au début des années 1980 à moins de 2 ha/famille en 2010 (Bélières *et al.*, 2011). Dans ce contexte, l'intégration des groupes allochtones est un enjeu majeur pour éviter qu'ils ne développent à leur tour des surfaces hors casiers (avec les conséquences négatives déjà évoquées sur la performance du drainage), ou qu'ils deviennent locataires d'attributaires non résidents ou salariés précaires des projets agro-industriels.

En réaction à la précarisation des exploitants de la zone ON, le modèle du « paysan-investisseur » a germé et a été repris par les PTF et les OP pour promouvoir une exploitation de taille supérieure ou égale à 5 ha, surface considérée comme le seuil de reproductibilité et d'investissement des exploitations familiales rizicoles. Des titres fonciers sur 5 ha ont d'ailleurs été attribuées à des exploitants en contre partie du remboursement échelonné des coûts d'aménagement dans le cadre du Millenium Challenge Account. Toutefois, il n'existe pas encore assez de recul pour discuter de la durabilité de cette pratique.

4.6.1.2. L'INTERET GRANDISSANT DES ACTEURS PRIVES ET INVESTISSEURS

L'arrivée des entrepreneurs privés dans les grands systèmes irrigués au Mali n'est pas récente⁶. Il faut distinguer d'une part les petits ou moyens entrepreneurs qui souhaitent réinvestir les fonds constitués à travers d'autres activités professionnelles, et d'autre part, les investisseurs à l'origine de projets à grande échelle.

L'arrivée des cadres et commerçants dans les périmètres irrigués de l'ODRS et de l'OPIB (petits et moyens entrepreneurs) est intervenu dès les années 1980 à la faveur de la proximité des espaces cultivés de la ville de Bamako. A l'ON, la dynamique a été véritablement lancée avec les initiatives accompagnant l'aménagement des casiers de la zone

⁶ Les places « réservées » aux directeurs des offices, aux autorités coutumières ou administratives dans les périmètres irrigués ne sont pas considérées car il s'agit de pratiques anciennes, connues, et caractérisées par une forte inertie.

de production de M'béwani à la fin des années 1990 qui ont favorisé l'octroi de parcelles à des acteurs extérieurs disposant de plus grandes capacités d'investissement. Les listes de l'ON montraient en 2008 des surfaces par attributaires comprises entre 5 et 50 ha (documentation interne ON).

L'intérêt des grands investisseurs nationaux ou étrangers s'est accru⁷ dans la zone de l'ON à partir des années 2007-2008, lorsque l'appel aux investisseurs lancé par le gouvernement du Mali, assorti de facilité fiscales et douanières, a rencontré un contexte international de tension sur les prix agricoles permettant d'accroître la rentabilité de l'investissement dans le secteur primaire. Ce contexte national et international particulièrement favorable a créé un engouement sans précédent marqué par trois caractéristiques majeures : (i) une grande diversité d'investisseurs (privés, publics, nationaux, étrangers) et d'interlocuteurs ; (ii) une augmentation envisagée de la surface aménagée inédite (passant de 90 000 à plus de 700 000 ha) ; (iii) de fortes incertitudes sur les systèmes de culture pratiqués, les techniques d'irrigation et donc sur les futurs besoins en eau (Hertzog *et al.*, 2012). Cette dynamique a rapidement amené à confronter deux modèles d'agriculture, l'agriculture familiale et l'agrobusiness, en laissant peu de place à la réflexion sur ses conséquences à moyen et long terme sur la gestion de la terre et de l'eau (voir Hertzog *et al.*, 2014 pour plus de détails sur ces enjeux de gestion).

L'évolution du contexte géopolitique (guerre en Libye et menaces terroristes au Nord Mali) a considérablement ralenti la mise en œuvre des projets d'investissement envisagés. L'arrêt du projet emblématique Malibya portant sur 100 000 ha est un symbole de ce ralentissement. Globalement, l'ensemble des projets portés par des grands investisseurs étrangers ont été stoppés, parfois même avant le début de leur réalisation. Ceci ne signifie pas pour autant que ces projets soient abandonnés car aucune information n'existe sur la validité des lettres d'accord d'attribution octroyées et des baux emphytéotiques signés.

Deux catégories d'investisseurs ont malgré tout réussi à se développer : (i) les investisseurs privés nationaux (e.g. Modibo Keita) ; (ii) les investisseurs déjà implantés dans la zone ON (e.g. la compagnie N'Sukala, adossée à la société sino-malienne Sukala, représentant un total d'environ 16 000 ha cultivés en canne à sucre).

Sur le plan de la gestion de l'eau dans le système irrigué de l'ON, le nombre limité de projets ayant vu le jour permet de repousser le moment où l'offre ne suffira plus à répondre à la demande en eau d'irrigation. L'autre avantage est l'utilisation de l'aspersion (pivots, dont 66 installés par N'Sukala et 12 sur les terres de Modibo Keita), plus efficiente à la parcelle et donc plus économe en eau. Les principaux inconvénients des projets cités sont (i) leur implantation proche de l'amont du système irrigué qui leur donnera de fait un accès prioritaire à l'eau en cas de pénurie et (ii) les systèmes de culture nécessitant de l'eau en contre-saison (période la plus sensible pour le partage de l'eau du fleuve Niger) : cultures maraîchères (oignons, pommes de terre, semences...) et cultures pérennes (canne à sucre).

⁷ L'intérêt existait déjà dès les années 1960 avec la création de la compagnie sucrière Sukala grâce à des capitaux chinois et avec la participation de l'Etat malien.

4.6.2. Les aménagements hydro-agricoles existants sur le Haut et Moyen Niger

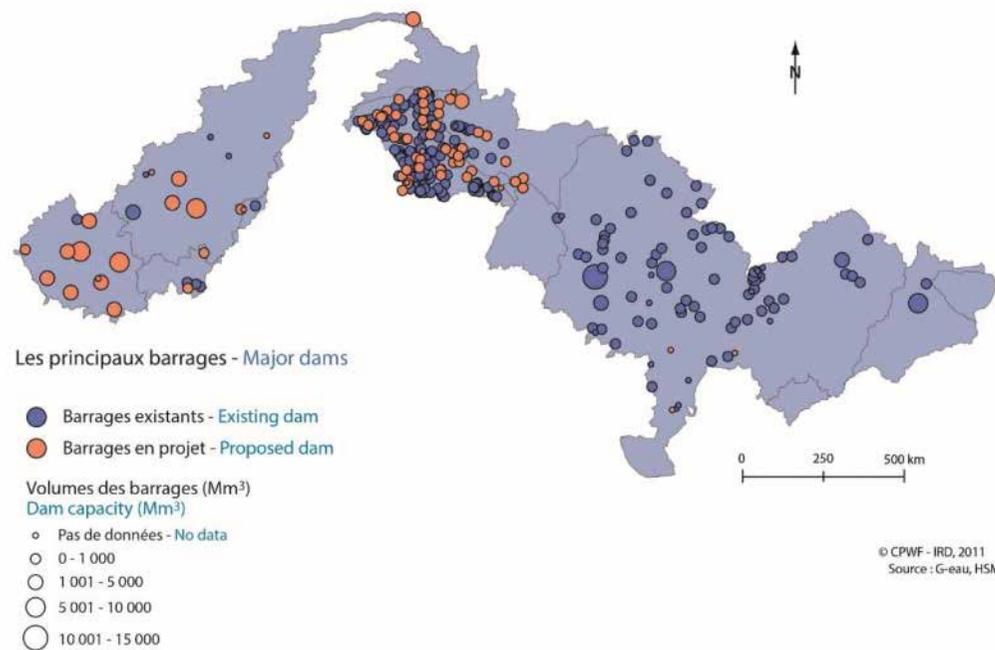


FIGURE 64 : LOCALISATION DES PRINCIPAUX BARRAGES DANS LE BASSIN DU FLEUVE NIGER (IN CLANET ET OGILVIE, 2014)

Comme le montrent le Tableau 27 et la Figure 64, les grands barrages dans le bassin du fleuve Niger se situent essentiellement sur le Niger Inférieur, notamment au Nigéria qui compte plus de 17 barrages. Deux de ceux-ci, Kainji et Jebba, sont les plus grands sites producteurs d'hydroélectricité au Nigeria. A ce jour, les seuls aménagements hydrauliques majeurs ayant un impact important (visible) sur les écoulements sont ceux de Sélingué et de Markala.

- Le barrage de Markala sur le Niger, construit en 1947, permet les prélèvements par l'ON de 2.69 km³ soit 86.5 m³/s, constants entre 1988-2011 malgré l'augmentation relative des terres irriguées. Ceci représente 7 à 16% du débit annuel en fonction des années. A l'échelle mensuelle, les prélèvements varient de 50 m³/s en décembre augmentant jusqu'à 130 m³/s en octobre. En mars les 100 m³/s représentent jusqu'à 60% du débit contre quelques pourcents seulement en septembre (ONISDIN).
- Le barrage de Sélingué, construit entre 1981 et 1982, est situé sur la Sankarani, affluent de rive droite du Niger, à 150 km environ au sud-ouest de la ville de Bamako. Son bassin versant couvre une superficie de 32 135 km², soit 25% du bassin versant du Niger Supérieur. A sa cote maximale d'exploitation, le barrage contient un réservoir d'environ 100 km de longueur, d'une superficie de 460 km² et d'une capacité de 2.7 km³ (Laval *et al.*, 2012 ; Ferry *et al.*, 2018).

Barrages existants			
Réservoirs	Pays	Capacité (Mm³)	Capacité installée (MW)
Dabola	Guinée		1,5
Sélingué	Mali	2700	48
Sotuba 1	Mali	Faible/seuil	5,2
Markala	Mali		N/A
Talo	Mali	180	
Djénné	Mali	360	
Kainji	Nigeria	15000	760
Kubli	Nigeria	75	
Goronyo	Nigeria	942	
Jibiya	Nigeria	142	
Zobe	Nigeria	177	
Bakalori	Nigeria	450	3
TungaKowa	Nigeria	22	
Jebba	Nigeria	3880	578
Omi	Nigeria	250	
Kontagora	Nigeria	18	
Kontagora-Auna	Nigeria	340	
Kangimi	Nigeria	74	
Shiroro (Kaduna)	Nigeria	7000	600
Iku	Nigeria	43	
Usuma	Nigeria	120	
Dadin Kowa	Nigeria	2800	34
Kiri	Nigeria	615	
Lagdo	Cameroun	6000	72

Barrages prévus			
Réservoirs	Pays	Capacité (Mm³)	Capacité installée (MW)
Fomi (Moussako)	Guinée	6160	90
Diaraguela	Guinée	2780	72
Morisanako	Guinée		100
Kogbédou-Frankonédou	Guinée		66
Taoussa	Mali	3150	20
Sotuba 2	Mali		12
Markala	Mali		13
Kénié	Mali		34
Bagoué 2	Mali		45
Baoulé 3	Mali		30
Baoulé 4	Mali		30
Labezanga	Mali		65
Kandadji	Niger	1600	130
Gambou	Niger		84
Diondyonga	Niger		26

TABLEAU 27 : CARACTERISTIQUES DES BARRAGES PRINCIPAUX SUR LE BASSIN DU NIGER

Mais, si les grands barrages (grands par leurs tailles ou par le volume des réservoirs) peuvent avoir des impacts importants, la multiplicité des petits aménagements hydrauliques peut, *in fine*, avoir des conséquences tout aussi importantes.

- Le seuil des Aigrettes à Sotuba sur le Niger en aval de Bamako a été construit en 1929 et est accompagné depuis 1960 d'une petite centrale hydroélectrique (5.2 MW). En tant que seuil, il n'a pas de capacité de stockage importante et le canal permet un prélèvement maximal de 10 m³/s (en pratique 6 à 8 m³/s) pour l'irrigation de 3 500 ha.
- Le barrage-seuil de Talo n'est pas situé sur le bassin versant du Bani mais son réservoir s'étend largement sur sa partie aval. D'une capacité de 180 Mm³ et superficie de 50 km², il constitue un élément-clé du projet de développement du Moyen Bani (PMB) : le seuil de Talo relève le niveau du Bani pour permettre l'augmentation des superficies cultivées. Il a été inauguré en 2007 pour mettre en valeur 20 000 ha par submersion contrôlée. Depuis sa réception définitive, 4 750 ha ont été aménagés pour la riziculture dans les plaines de Woloni et de Tounga, ainsi que 300 ha dans la plaine de Tiby. En 2008, 4 255 ha étaient cultivés en riz et 8 640 ha en 2017. A cela s'ajoutent près de 1 500 ha cultivés en contre-saison grâce à l'ouvrage de restitution de San. Le PMB a été prolongé par le Programme de Développement de l'Irrigation dans le bassin du Bani et à Sélingué (PDI-BS). L'un des objectifs du PDI-BS est l'aménagement de 10 540 ha supplémentaires au droit du seuil de Talo.
- La réalisation en cours du seuil de Djenné figure parmi les principales réalisations dans la zone du PDI-BS. La réhabilitation de ce seuil (capacité 360 Mm³) permettra la mise en valeur de 14 000 ha par submersion contrôlée dans le cercle de Djenné. L'aménagement du casier de submersion contrôlée de Djenné couvrant 5 670 ha est en cours, ainsi que de l'ouvrage de vidange du Pondori. A cela s'ajoutent les 758 ha du périmètre à maîtrise totale de Sarantomo Syn. Ce qui correspondra à la mise en valeur de 46 % du potentiel défini par les études techniques.

Les infrastructures achevées (Talo) ou en cours d'achèvement (Djenné) sur le Niger Supérieur et le Bani permettront d'accroître les superficies cultivées (Figure 65). Les effets sur le régime hydrologique du Bani pourront également être significatifs, ouvrant des perspectives sur l'extension de nouvelles surfaces en aval. La mise en activité du seuil de Talo en 2007 a ainsi permis d'accroître les débits du Bani enregistré à la station de Sofara entre février et juin de 20 à 30 m³ (comparaison des débits mensuels moyens avant et après 2007). Les systèmes de culture pratiqués seront basés sur la riziculture, avec ou sans double-culture, ou les cultures maraîchères en contre-saison dans des proportions qui devraient être proches de celles des autres périmètres du PDI-BS. La performance de l'irrigation y sera probablement identique à celle observée dans les autres systèmes irrigués par écoulement gravitaire, sauf si les financements permettent de revêtir les canaux d'irrigation. La principale variable influençant la future demande en eau sera donc la superficie réellement exploitée et irriguée dans ces périmètres.

Le fonctionnement complémentaire des seuils de Talo et Djenné souligne la volonté d'un développement intégré sur cet affluent du fleuve Niger. Les projets des ouvrages du Baoule 3 et 4 et Bagoé 4 sur le bassin versant du Bani s'inscrivent dans cette approche de développement intégré mais n'ont pas encore été concrétisés. Ces projets pourront être traités par le nouvel Office du Moyen Bani (OMB) créé en 2017.

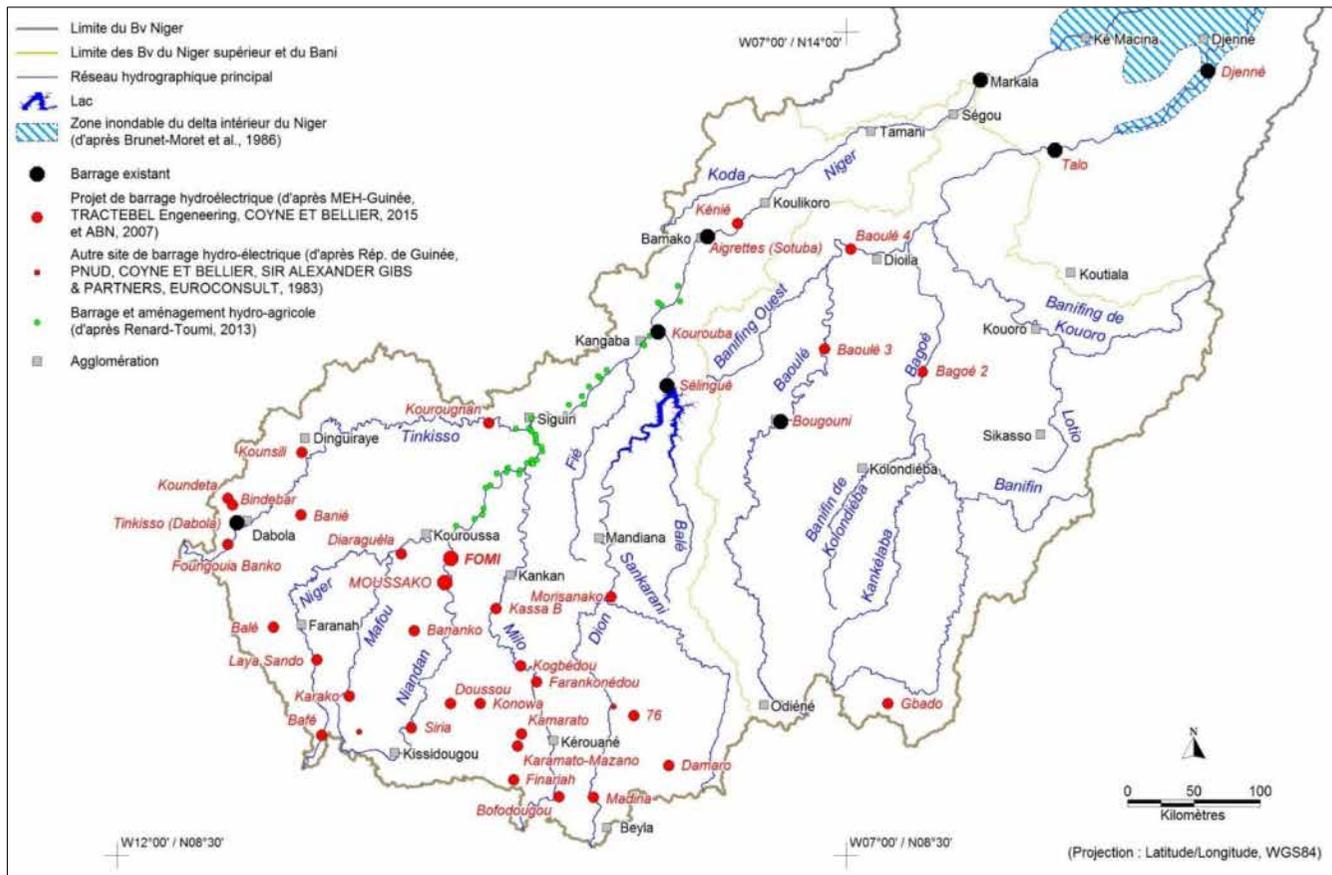


FIGURE 65 : BARRAGES CONSTRUITS OU EN PROJET SUR LES BASSINS VERSANTS NIGER SUPERIEUR ET DU BANI

4.6.3. Les aménagements hydro-agricoles prévus dans le Niger Supérieur

4.6.3.1. LES GRANDS BARRAGES

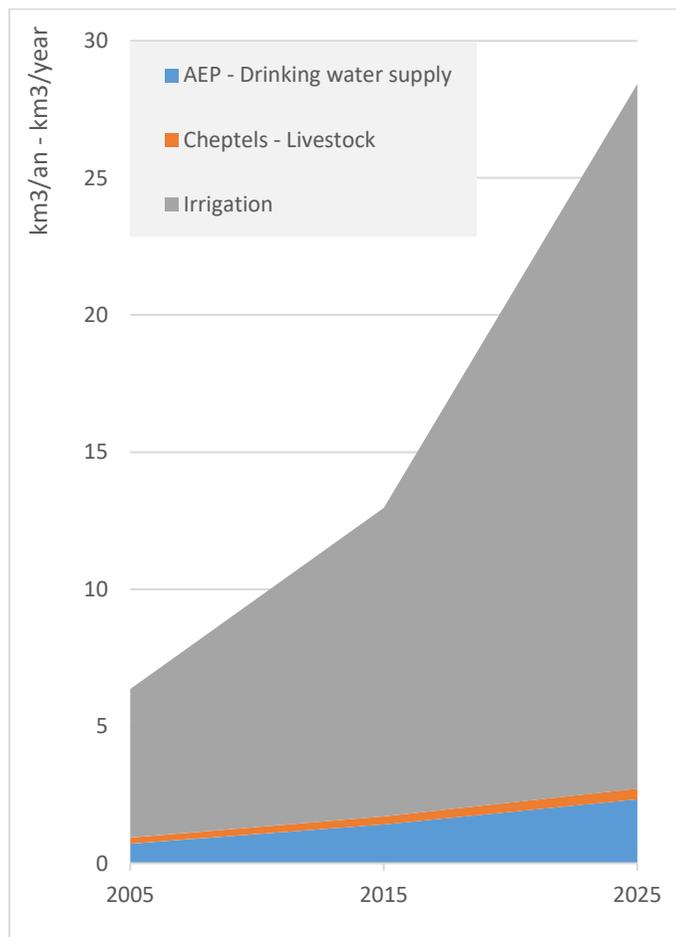


FIGURE 66 : AUGMENTATION DES PRELEVEMENTS EN EAU DANS LE BASSIN DU FLEUVE NIGER SELON LES BESOINS DU PADD

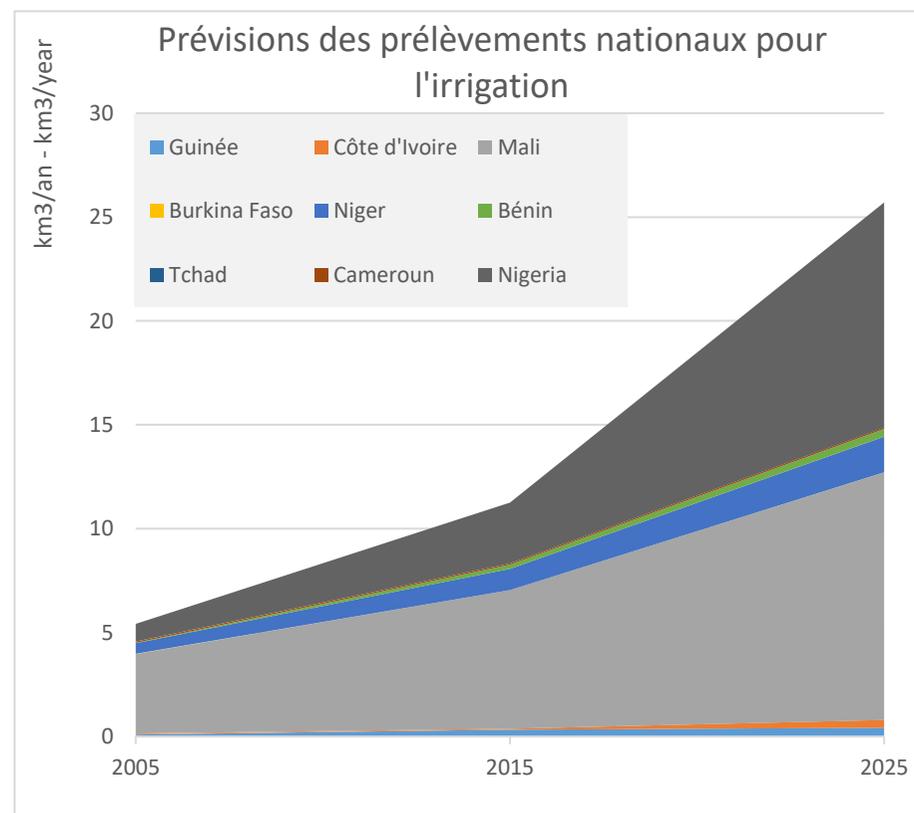


FIGURE 67 : AUGMENTATION DES PRELEVEMENTS POUR L'IRRIGATION SELON LES BESOINS DU PADD A L'ECHELLE NATIONALE

Le Plan d'Action et de Développement Durable (PADD) du bassin du Niger (ABN et BRLi 2007) recense plusieurs projets de grands barrages et de nombreux ouvrages de taille plus modeste sur le bassin amont. Ces aménagements visent à satisfaire la demande croissante en eau agricole mais également le développement de l'hydroélectricité. L'agriculture qui consommait déjà plus de 85% des ressources en eau dans le bassin du Niger en 2005, consommera alors 91% en 2025, contre 70% à l'échelle mondiale. Malgré 27 grands barrages (ABN et BRLi, 2007) et plus de 5 000 petits barrages (Cecchi, 2009) dans le bassin, les terres arables demeurent peu exploitées (20%) et la part de l'irrigation demeure très faible, 1 à 5% des terres cultivées contre près de 20% à l'échelle mondiale. Dans le bassin du fleuve Niger, 265 000 ha sont exploités en maîtrise

complète de l'eau dont 117 000 ha au Mali, 46 000 ha au Niger et 84 000 ha au Nigeria. Les systèmes traditionnels de cultures de décrue, de submersion libre et de bas-fonds continuent de dominer en termes de superficies « irriguées » (Figure 46). Pour faire face aux menaces récurrentes de sécheresse, les bailleurs souhaitent soutenir l'agriculture irriguée, essentiellement en maîtrise complète de l'eau. Le PADD de 2007 prévoit une augmentation des superficies irriguées de 400 000 ha (en théorie d'ici 2025) et le total irrigué pourrait atteindre 1.5 millions ha si tout le PADD était réalisé. Les prélèvements associés passeraient de 5 km³/an en 2005, à 9 km³ en 2015 et plus de 25 km³ en 2025 (Figure 66). Les besoins pour l'eau potable augmenteront avec la croissance démographique et devraient tripler d'ici 2025, mais leur part restera marginale par rapport aux besoins pour l'agriculture irriguée. Elle décline même de 12 à 8% car les besoins pour l'irrigation augmentent plus rapidement. De même la part pour le bétail augmente en valeur absolue mais sa part décroît de 3% en 2005 à 1% en 2025. C'est l'agriculture irriguée au Mali, où l'ETP est plus importante qu'au Nigeria, qui représente la part prépondérante des besoins des neufs pays riverains du bassin du fleuve Niger (Figure 67).

Sur la partie amont du bassin, la réalisation de ces objectifs du PADD repose sur la construction de trois grands barrages, Fomi en Guinée, Taoussa au Nord Mali et Kandadji au Niger (Figure 65) et l'extension des périmètres irrigués dans la zone de l'ON à partir du barrage de Markala. Sur les 400 000 ha, 360 000 ha sont prévus grâce aux trois barrages : 255 000 ha grâce à Fomi, 60 000 ha Taoussa et 45 000 ha Kandadji.

Caractéristiques	Fomi (Guinée)	Taoussa (Mali)	Kandadji (Niger)
Capacité installée (MW)	90	20	130
Niveau le plus haut admis (m)	390	259	228
Niveau de réserve d'eau morte (m)	370	254	215
Surface du lac (km ²)	508	1 460	282
Volume total (km ³)	6,16	3,15	1,60
Capacité utile (km ³)	5,49	2,70	1,56
Evaporation nette (km ³ /an)	0,11	2,52	0,43
E ₀ (mm/an)	1 513	2 949	2 804
Précip. (mm/an)	1 223	313	413
Nouvelle irrigation (ha)	255 000	60 000	45 000

TABLEAU 28 : PRINCIPALES CARACTERISTIQUES DES BARRAGES DE FOMI, TAOUSSA ET KANDADJI (IN ABN ET BRIL, 2007)

Le barrage de Fomi sur le Niandan, affluent du Niger en Guinée est à l'étude depuis de nombreuses années. L'étude Coyne et Bellier (2010) préconisait une cote maximale de 390 m pour une capacité utile de 6.16 km³. La superficie maximale associée de 508 km² dépasse la superficie du lac de Sélingué (409 km²), occasionnant une évaporation importante (pertes de 830 Mm³/an comme Sélingué ; Zwarts *et al.*, 2005) mais sur une profondeur bien plus importante (12 m). L'étude de 2017 (AECOM, 2017 ; TRACTEBEL *et al.*, 2017) propose quatre nouvelles options (Tableau 29) toujours en délibération, dont une à Fomi à 393 m et trois variantes au site de Moussako 21.7 km en amont de Fomi (ONISDIN, 2018).

Le choix définitif ainsi que la gestion du barrage auront des conséquences sur le potentiel de terres irriguées, la production hydroélectrique (90 MW de capacité), comme sur les populations déplacées et les écosystèmes environnants et en aval. Toutefois l'objectif demeure principalement d'optimiser le stockage d'eau en amont pour (i) la production hydroélectrique (entre 209 et 412 GWh/an, 356 GWh/an en moyenne ; Grijsen *et al.*, 2013) ; (ii) satisfaire les besoins en eau pour l'irrigation pendant la saison sèche sur 255 000 ha, notamment l'expansion de l'ON sur 242 000 ha dont 22 000 ha en canne à sucre vivace, et 13 000 ha en Guinée ; (iii) maintenir les débits environnementaux à travers le DIN (établis à 40 m³/s après Markala par la Charte de l'eau) pour préserver faune, pêche, élevage. Une option de « transparence » (SNC Lavalin 2006) pour laisser le fleuve s'écouler sans restriction entre le 15 août et le 7 septembre et réduire l'impact du stockage saisonnier dans le barrage de Fomi sur la crue du DIN a aussi été proposée.

Caractéristiques	Fomi	Moussako I	Moussako II	Moussako III
Cote du barrage	393	402	396	388.5
Superficie maximale (km ²)	479	417	278	157
Production hydroélectrique (GWh/an)	412	397	302	209

TABLEAU 29 : CARACTERISTIQUES DES QUATRE OPTIONS EN DISCUSSION POUR LE BARRAGE DE FOMI-MOUSSAKO (ONISDIN D'APRES AECOM, 2017)

En Guinée, le barrage Kogbédou-Frankonédou (22 MW prévu, capacité jusque 85 MW) est en cours de validation sur le Milo, un affluent au sud de Kankan. Un autre barrage près de Diaraguela (stockage de 890 Mm³, capacité 72 MW) et un vers Morisanako (capacité 100 MW) sont actuellement à l'étude. De même le barrage du Tinkisso1 (1.65 MW) à Dabola pourrait être soutenu par un second barrage à 10 km en amont.

A l'aval du DIN, le principal aménagement en cours sur le fleuve Niger est le barrage de Taoussa dans la région de Gao, dont les travaux, débutés en 2010 et prévus pour durer 6 ans, n'ont pas encore été achevés. Le barrage est situé à environ 400 km en aval de l'exutoire du DIN. A l'image d'autres barrages tels que Manantali, le barrage de Taoussa sera multifonctionnel : (i) production d'électricité avec une capacité de 25 MW ; (ii) amélioration des conditions de vie des populations du Nord Mali grâce à l'augmentation des superficies cultivées (60 000 ha supplémentaires, jusque 139 000 ha aménagés en 30 ans) ; (iii) soutien d'étiage pour délivrer en aval à la frontière Mali-Niger un débit minimal de 75 m³/s jusqu'à Malanville (frontière entre le Niger et le Bénin) pour respecter les engagements de la Charte de l'eau (cf. plus bas) ; (iv) amélioration des conditions de navigation avec en particulier la construction d'une écluse. Le développement de l'agriculture aux abords de la retenue prendra probablement la forme des systèmes de culture de décrue déjà pratiqués dans la région mais sur des surfaces plus importantes. L'augmentation des superficies à maîtrise totale de l'eau sera plus progressive. Un premier périmètre irrigué de 350 ha sera aménagé à court terme comme mesure de compensation dans la zone de Bourem. Ce barrage d'1km de large et 18 m de haut dans cette zone à faible dénivelée pourrait former une retenue d'eau de 1 500 km² sur seulement 3 m de profondeur (2.7 km³). L'influence de la lame d'eau amont du barrage a été fixée par les études techniques jusqu'à la localité de Koryoumé dans la région de Tombouctou. Or, cette localité n'est séparée que de quelques kilomètres du chenal du Tassakant qui participe avec le Kondi à l'alimentation en eau du système hydraulique Faguibine. Le lac Télé est inondé lorsque le fleuve Niger atteint la cote de 258 m IGN, le lac Faguibine est inondé lorsque le fleuve atteint la cote 261 m IGN (PNUE, 2009). Si l'influence du barrage de Taoussa venait jusqu'à cette partie de la zone lacustre, l'inondation des lacs serait assurée, permettant aux populations de retrouver environ 40 000 ha de terres de culture de décrue. De même s'il conservait l'eau durant la saison sèche, l'assèchement progressif du nord DIN pourrait être considérablement modifié.

Enfin le barrage de Kandadji au Niger, près de la frontière du Mali, d'une capacité de 1.56 km³ est prévu pour développer (i) l'irrigation sur 45 000 ha, (ii) l'hydroélectricité grâce aux capacités de 130 MW et contribuer à réduire la part importée du Nigéria (80% aujourd'hui), (iii) maintenir le débit environnemental fixé à 80 m³/s à Malanville et (iv) assurer la disponibilité en eau durant les périodes sèches. La construction de Kandadji a débuté en 2012 et devait durer 6 ans mais la situation sécuritaire a en partie retardé l'exécution des travaux.

Ces trois grands barrages doivent permettre un total supplémentaire de 400 GWH/an.

4.6.3.2. NOUVELLES INFRASTRUCTURES SECONDAIRES DANS LE NIGER SUPERIEUR

Le contrat-plan de l'ODRS pour la période 2017-2019 prévoit l'aménagement de trois plaines en maîtrise totale de l'eau par pompage depuis le Bani pour une superficie de 2 603 ha. Les financements sont déjà acquis pour aménager 176 ha à Sélingué et Kotouba. 606 ha devraient être rapidement aménagés à Fanzan.

La construction (en cours) du seuil de Kourouba sur la Sankarani et la consolidation du périmètre de Maninkoura doivent permettre la mise en valeur de 950 ha en maîtrise totale. Le potentiel total aménageable pour l'irrigation est estimé dans les études techniques à 5 374 ha, à raison de 5 000 ha en amont du seuil et 374 ha en aval au bénéfice du village de Kourouba. L'ouvrage mixte aura une capacité de production de 3.48 MW grâce à 12 turbines. Les pratiques de gestion de la retenue amont devront être définies pour une valorisation agronomique optimale des berges tout en effectuant les lâchers nécessaires à la production d'électricité. Soit 2 à 7 m³/s supplémentaires.

Le Projet de renforcement de la sécurité alimentaire par le développement des cultures irriguées (PRESA-DCI), financé par la BAD a été lancé en 2013. Il s'agit de réhabiliter des périmètres irrigués dans les régions de Koulikoro, Ségou et Sikasso. Les superficies concernées sont d'environ 5 000 ha, dont 1 050 ha pour la seule réhabilitation du périmètre de Sélingué. Ces actions de réhabilitation permettront de remettre en état les systèmes irrigués pour retrouver la totalité du potentiel cultivable des périmètres, tout en modernisant les dispositifs de mobilisation de l'eau (revêtement des canaux) et en re-calibrant les systèmes de drainage. Parmi les réalisations déjà visibles du PRESA-DCI figure la réhabilitation du périmètre de Farabana pour une superficie de 500 ha. La réhabilitation de ce périmètre, créé en 1980 par la coopération coréenne en amont de Bamako, a permis d'améliorer la performance de l'irrigation : création d'une nouvelle station de pompage sur le fleuve Niger et revêtement des canaux d'irrigation. Cette action vise à promouvoir la double-culture à 25 km de Bamako pour l'approvisionnement en riz de qualité et en produits maraîchers.

Le Projet de renforcement de la sécurité alimentaire et nutritionnelle dans la région de Koulikoro (PRESAN-KL) a été lancé en parallèle du projet PRESA-DCI. Parmi ses activités dans la zone de l'OHVN, l'aménagement a débuté pour 1 256 ha de périmètres irrigués par pompage depuis le fleuve Niger répartis en quatre périmètres de 200 à 500 ha chacun sur le bief du fleuve entre la Sankarani et la ville de Bamako. Le PRESA-DCI prévoit également l'aménagement de nouvelles surfaces d'ici 2019 en zone ODRS sur la Sankarani : 126 ha dans la plaine de Koutouba et 50 ha à Sélingué.

4.6.4. Influences cumulées des changements anthropiques (et climatiques) sur le Nexus eau-énergie-alimentation-écosystèmes

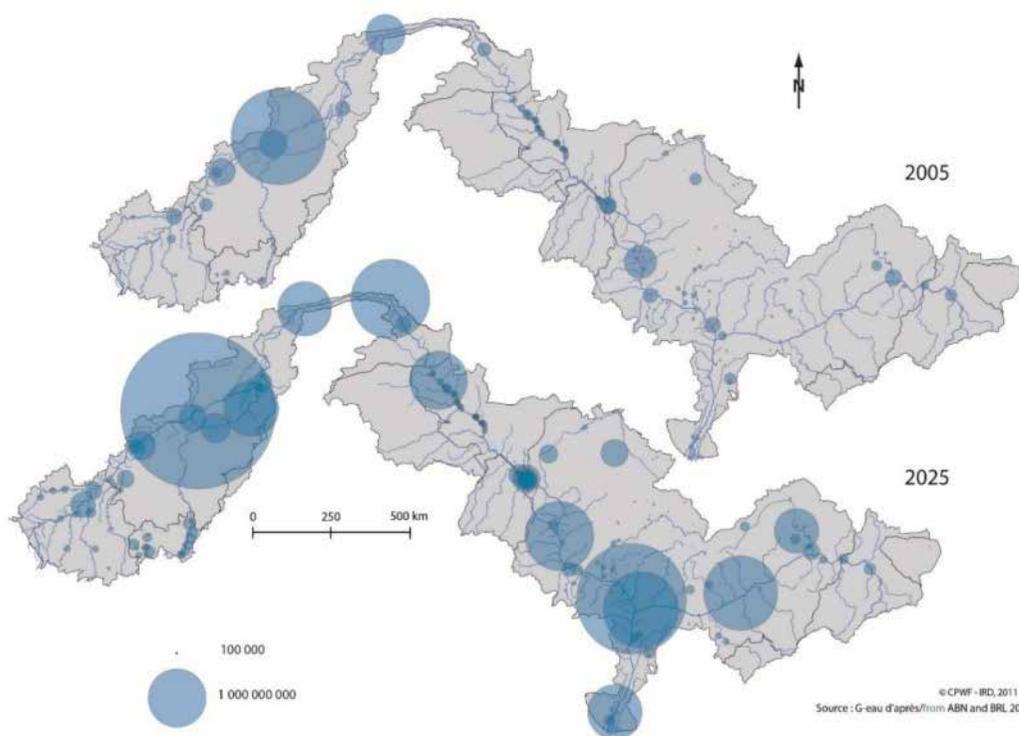


FIGURE 68 : AUGMENTATION DES PRELEVEMENTS POUR L'IRRIGATION DANS LE BASSIN DU NIGER ENTRE 2005 ET 2025 SELON LES PREVISIONS DU PADD (IN CLANET ET OGILVIE 2014)

Le terme nexus Eau-énergie-alimentation développé récemment (Hoff, 2011) reflète le besoin croissant de développer des approches intégrées qui considèrent les relations complexes et interdépendantes entre ces trois secteurs (Endo et al., 2015 ; Bhadhuri et al., 2015). Ces interactions sont centrales à la gestion intégrée de grands fleuves, et doivent faire l'objet de discussions, concertations en vue de prioriser les besoins des parties prenantes, de déterminer des compromis et identifier les moyens pour réduire les impacts négatifs. Dans le bassin du Niger, le développement de la « grande hydraulique » et leurs conséquences sont au cœur de discussions depuis plusieurs années, compte tenu de l'ampleur des modifications envisagées et des multiples enjeux pour les 130 millions de riverains du fleuve. La Figure 68 illustre l'augmentation considérable des prélèvements agricoles associés à la mise en œuvre du PADD de l'ABN d'ici 2025.

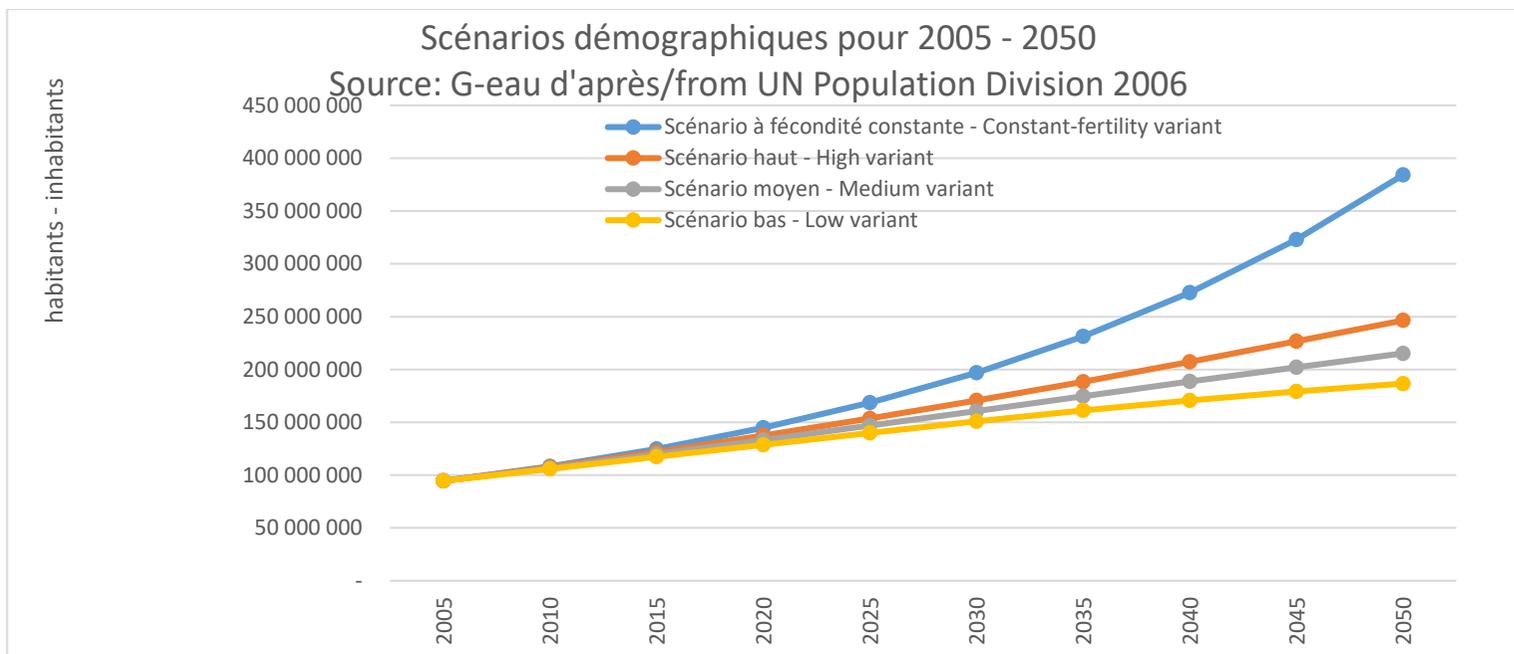


FIGURE 69 : EVOLUTION DE LA POPULATION DU BASSIN DU NIGER D'ICI 2050 SELON 4 SCENARIOS DE CROISSANCE DEMOGRAPHIQUE

De même, bien que les besoins en eau potable soient plus limités, l'importante croissance démographique (Figure 69) et la modification de la diète dans plusieurs pays du bassin multiplie la pression sur ces ressources en eau limités. . Ainsi, en ne considérant que la seule croissance démographique dans le bassin du Niger, trois pays en 2025 et cinq en 2050 pourraient être en situation de stress hydrique (TARWR < 1 700 m³/hab./an, Falkenmark 1989) contre un seul en 2010 (Figure 70).

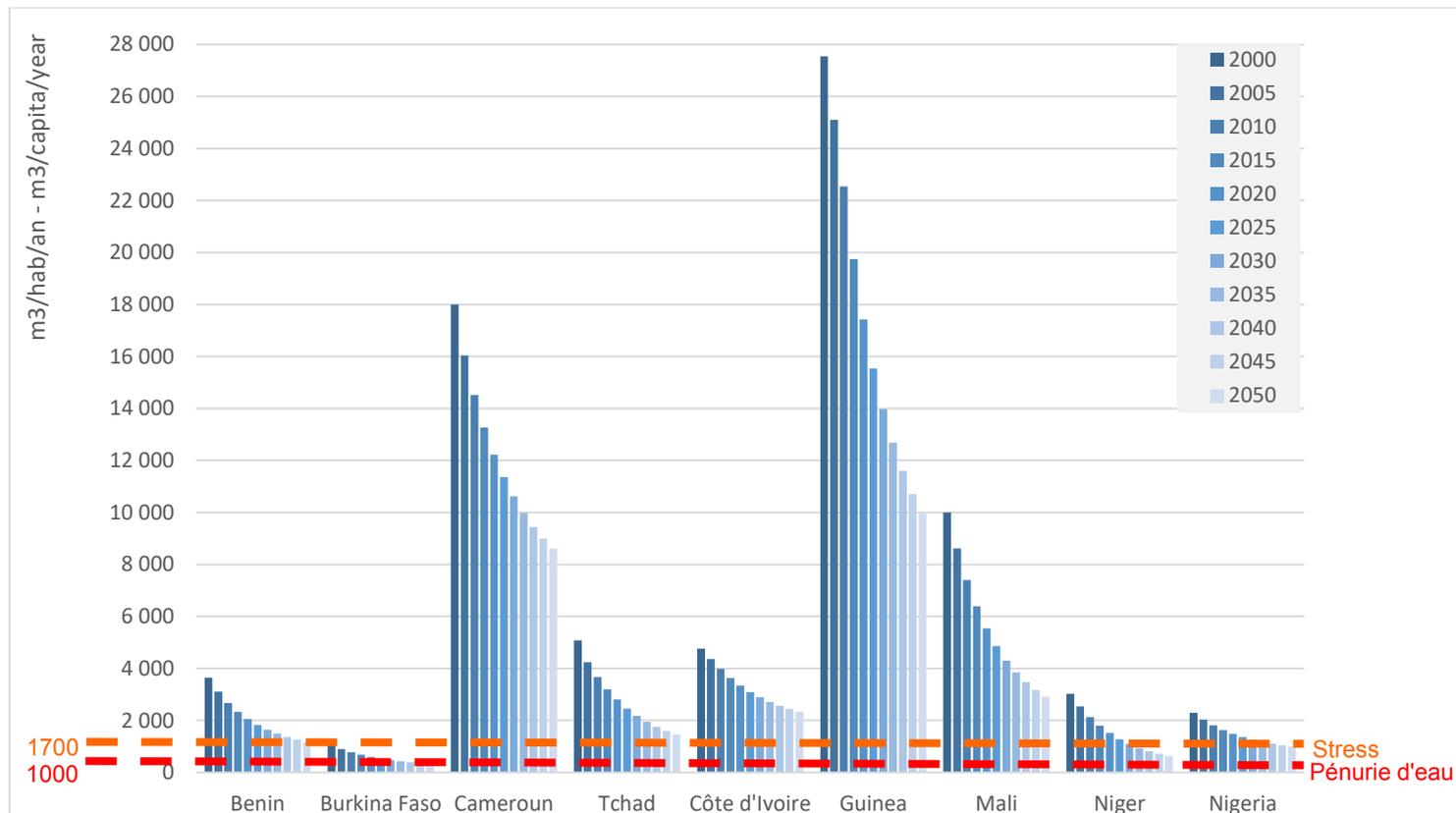


FIGURE 70 : INDICE DE RESSOURCES EN EAU RENEUVELABLES REELLES TOTALES (TARWR) PAR HABITANT PAR AN ET PAR PAYS 2000-2050 SELON SCENARIO MEDIAN DE CROISSANCE DEMOGRAPHIQUE (IN CLANET ET OGILVIE, 2014)

Malgré un potentiel pour l'irrigation en termes de superficies arables et aménageables, les ressources en eau ne sont pas suffisantes pour le développement de toutes ces terres et l'impact hydrologique peut déjà être significatif. Ces ouvrages hydrauliques visent à soutenir le développement de l'irrigation, de l'hydroélectricité et palier certains effets/menaces du réchauffement climatique sur l'agriculture, mais de multiples études identifient également les limites en termes de ressources disponibles et les impacts sur les différents secteurs et l'environnement.

En saison sèche, les prélèvements ont ainsi déjà un impact sur le DIN (De Noray, 2003 ; Zwarts *et al.*, 2005), sur le Delta du Nigeria, et sur la production hydroélectrique du barrage de Kainji au Nigéria (Barbier *et al.*, 2009) par exemple. L'ON indique également qu'en 2015, 2016 et 2017 le débit minimal de 40 m³/s à l'aval de Markala n'était pas atteint pour 105, 100, et 109 jours respectivement (Liersch *et al.*, 2019).

4.6.4.1. L'EXEMPLE DU BARRAGE DE SELINGUE

Pour illustrer les avantages et inconvénients des grands barrages sur le Niger Supérieur, le cas du barrage de Sélingué est présenté succinctement ci-après. Les aspects négatifs de la construction de grands barrages sur le fonctionnement des mares et les pêches collectives sont mentionnés dans les Chapitres 4.5.1 et 4.5.2.

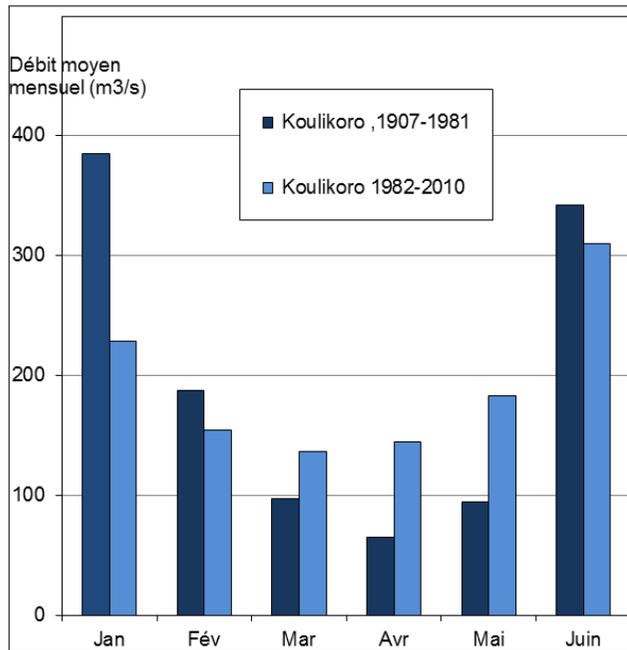


FIGURE 71 : DEBITS MOYENS MENSUELS DE JANVIER A JUIN OBSERVES A LA STATION HYDROMETRIQUE DE KOULIKORO SUR LE NIGER

Les observations hydrologiques faites au niveau de la station de Koulikoro sur le Niger et sur la Sankarani en aval du barrage de Sélingué permettent d'apprécier les grandes lignes de l'impact du barrage de Sélingué sur les écoulements du Niger. Le barrage restitue pendant la période sèche une partie de l'eau (autour de 0.2 km³/mois) stockée dans le réservoir pendant l'hivernage permettant le soutien des étiages de la Sankarani et du fleuve Niger jusqu'au Niger (état). Ainsi, les débits observés à Koulikoro entre les mois de mars et de mai sont en moyenne 1.8 fois plus importants entre 1982 et 2010 qu'entre 1907 et 1981 (Figure 71). Il s'agit là d'un aspect incontestablement positif, du moins pour l'agriculture irriguée de contre-saison fonctionnant en maîtrise totale de l'eau (gravitaire). Outre sa production électrique qui représente 25% à 30% de l'énergie produite au Mali (ABN et BRLi, 2007), le barrage de Sélingué permet l'alimentation de plusieurs périmètres fonctionnant en maîtrise totale de l'eau : Sélingué (1 350 ha), Maninkoura (1 094 ha), Baguinéda (2 600 ha) et Office du Niger (# 85 000 ha). Les prélèvements en eau de ces périmètres sont considérables et ont évidemment un impact sur les écoulements du fleuve. Il faut souligner toutefois que la gestion de ces grands aménagements hydrauliques est prévue pour garantir un débit minimum environnemental de 40 m³/s à l'aval du barrage de Markala, à l'entrée du Niger dans le DIN. Si l'on considère ces seuls aspects, ces aménagements hydro-électriques et hydro-agricoles peuvent être considérés comme autant de réussites.

D'un autre côté, l'impact négatif du barrage de Sélingué sur la partie malienne du Niger Supérieur est souvent dénoncé par les pêcheurs qui se plaignent des variations brutales de niveau d'eau imposées par le fonctionnement de la centrale hydro-électrique (Chapitre 4.5.1). Mais cette même augmentation des débits et par conséquent des niveaux d'eau a facilité le transport fluvial à partir des années 1980 et notamment le transport de sables et de graviers extraits du lit mineur du Niger (Chapitre 4.5.4).

Un des problèmes de la construction des grands barrages sur le bassin versant du Niger Supérieur est la préservation du DIN, la plus vaste zone humide d'Afrique de l'Ouest comprise entre 20 000 km² (Marie, 2009) et 36 000 km² (Zwarts *et al.*, 2005), d'importance internationale et protégée par la convention RAMSAR. Le DIN est formé d'un réseau très complexe de bras, de défluent, de lacs et de mares ainsi que de vastes plaines inondables. Les conflits d'usage des espaces aquatiques et des zones inondables font « traditionnellement » l'objet de tensions entre agriculteurs, éleveurs et pêcheurs. La pêche est un moyen de subsistance pour > plus de 300 000 personnes dans le DIN (Zwarts *et al.*, 2005) et il a été démontré que la production halieutique (Quensière, 1994 ; Laë, 1995), du DIN est fonction de l'ampleur de la crue et de la durée de l'inondation (Orange *et al.*, 2002 ; Marie *et al.*, 2007). Les surfaces en pâturage (bourgou) ou rizicoles (Liersch *et al.*, 2013) sont également tributaires de cette inondation. Or, la construction du barrage de Sélingué s'est traduite par un retard sur la montée des crues du Niger et un écrêtement de celles-ci et par conséquent a un impact négatif sur le DIN. Les débits sont réduits de 61% en moyenne en août et 36% en septembre pour collecter 1.8 km³ sur 2 mois (ONISDIN 2018). Zwarts *et al.* (2005) estiment que le pic de crue est réduit

de 15 cm par le remplissage du barrage et entraîne une réduction des superficies inondées de 600 km². Liersch *et al.* (2019) fournissent une estimation comparable, observant une réduction de la crue moyenne de 15 200 à 14 400 m³/s (soit 7%). Cet impact sur l'inondation du DIN demeure cependant difficile à évaluer avec précision en raison notamment d'une méconnaissance de la topographie du DIN (le faible dénivelé est mal représentée par le modèle numérique de terrain) et de la modification de l'écosystème suite aux bouleversements du régime naturel de crue. Les conséquences sur les activités humaines ou l'impact environnemental sont d'autant plus difficiles à mettre en évidence que les données statistiques sur la population, l'agriculture, l'élevage ou la pêche n'ont toujours été qu'approximatives dans cette région.

4.6.4.2. LE PADD ET LES ETUDES D'IMPACT

De nombreuses études existent sur la modélisation des influences de ces aménagements sur le développement (durable) du bassin du Niger. Ceux-ci cherchent à étudier l'influence de divers scénarios de développement du bassin dans son ensemble et quantifier les possibilités pour subvenir aux demandes croissantes en eau (potable), hydro-électricité et superficies irriguées, tout en préservant l'environnement.

ABN et BRLi (2007) ont notamment étudié l'influence de ces variations au travers d'un modèle MIKE Basin développé avec DHI. Transféré à l'ABN ce modèle et ces recommandations sont à la base du PADD développé par l'ABN. Ce PADD développe plusieurs scénarios, repris par de nombreuses études pour analyser et quantifier l'impact de ces grands aménagements dans le bassin. Leur impact sur le fonctionnement hydrologique du fleuve et l'inondation du DIN a fait l'objet de nombreuses recherches et études depuis une vingtaine d'années (Orange *et al.*, 2002 ; Swartz *et al.*, 2005 ; Marie *et al.*, 2007 ; ABN, 2007). Plusieurs travaux de modélisations hydrologiques développées sur le bassin entier (Aich *et al.*, 2014; BRLi et DHI, 2007; Dezetter *et al.*, 2008 ; Li *et al.*, 2005 ; Pedinotti *et al.*, 2012 ; Schuol *et al.*, 2008 ; Sheffield *et al.*, 2014 ; Sogreah, 1985) ou sur le bassin amont du Haut Niger jusqu'au DIN (Angelina *et al.*, 2015 ; Eisner *et al.*, 2017 ; Khan *et al.*, 2018 ; Liersch *et al.*, 2013 ; Neal *et al.*, 2012 ; Passchier *et al.*, 2005 ; Picouet *et al.*, 2001 ; Vetter *et al.*, 2017 ; Yang *et al.*, 2018), permettent d'approfondir les réflexions sur les modifications hydrologiques qui résultent des changements climatiques et développement d'aménagements proposés dans le bassin du Niger.

Ces travaux se basent sur la situation actuelle, l'optimisation du fonctionnement de Sélingué et le développement des barrages Fomi, Diaraguella, Taoussa et Kandadji individuellement ou collectivement, ainsi que la réhabilitation des centrales hydro-électriques à Kainji et Jebba. En parallèle du développement de ces ouvrages, l'aménagement de superficies irriguées au niveau des ouvrages ou en aval (par ex. ON grâce à Fomi) est modélisé. L'optimisation de Sélingué devrait notamment permettre l'extension de l'irrigation en saison des pluies à l'ON « *en préservant une partie du stockage du réservoir de Sélingué pour la période des pépinières et repiquage (juin-juillet) sur l'ON* ». Les autres scénarios sont relatifs au développement combiné ou non des autres barrages. Le scénario retenu par l'ABN est celui combinant Fomi-Taoussa-Kandadji. Les scénarios considèrent que les besoins en eau domestiques et élevage sont prioritaires et les modèles priorisent ces besoins afin qu'ils soient d'abord comblés. Ils considèrent aussi que les « contraintes et priorités environnementales » sont satisfaites, mais celles-ci se limitent à des indicateurs partiels comme discuté ci-après.

L'étude du PADD (ABN et BRLi, 2007) et sa mise à jour (Grijzen *et al.*, 2013) analysent l'impact du changement climatique sur les superficies irriguées et sur la production hydroélectrique au travers du modèle MIKE Basin. L'étude résumée en partie dans Grijzen *et al.* (2013) se fonde sur l'étude ABN et BRLi (2007) et exploite l'année 2005 comme année de référence, à défaut de données/recensements plus récents et au vu des difficultés à acquérir des données fiables sur l'étendue du bassin. Les besoins en eau agricoles sont calculés à chaque point de prise d'eau et estiment quelle superficie maximale peut être irriguée en entière satisfaction (sans déficit hydrique). Les besoins en eau domestique et du bétail sont extrapolés à partir de projections de croissance démographique. Pour l'irrigation, le développement prévu jusqu'en 2025 est jugé rapide et difficilement réalisable, donc l'étude Grijzen *et al.* (2013) considère que 2025 représente le scénario maximal de développement des infrastructures dans le bassin. En 2018 cela semble raisonnable compte tenu du temps pour développer les ressources en eau dans le bassin. Grijzen *et al.* (2013) considèrent que les demandes en eau industrielles et minières ne sont pas des consommateurs nets d'eau et donc non pris en compte. Une étude plus fine serait en effet nécessaire pour comprendre l'influence à une échelle locale et sur des pas de temps plus fins (périodes critiques) des prélèvements mais ces activités présentent des enjeux plus marqués sur la qualité des eaux.

Le PADD puis Grijsen *et al.* (2013) s'intéressent aussi à la navigation dans les différentes parties du bassin et aux débits environnementaux : valeurs minimales à respecter afin de limiter le stockage et la consommation d'eau notamment en période d'étiages et maintenir l'écosystème. Celui-ci fournit un nombre de services groupés en services d'approvisionnement, de régulation, de culture et de soutien obtenus par les êtres humains des écosystèmes. Au-delà d'une valeur intrinsèque / purement écologique, ces normes participent donc directement au maintien de certains usages agricoles de l'eau à l'échelle locale. Ces normes ont été définies par les pays riverains dans le cadre de la Charte de l'eau du bassin du Niger. Ils sont définis ainsi :

- 40 m³/s à Kirango (aval du barrage Markala et prélèvements de l'ON),
- 75 m³/s à la frontière Mali-Niger,
- 125 m³/s à Niamey et
- 80 m³/s à Malanville (frontière Niger-Nigéria).

Des statistiques Q10 et Q30 (moyennes mobiles sur 10 jours ou 30 jours des débits minimaux par an) sont ensuite utilisées pour quantifier le nombre de défaillances, c'est-à-dire le nombre de jours où ces valeurs ne peuvent pas être respectées sur la période de simulation.

Ces études développent également des analyses économiques à partir de valeurs agricoles en fonction de la zone, culture, période/saison, de valeurs pour l'hydroélectricité (ex. 68 FCFA/kWh en 2005) mais également écosystémiques à partir des pertes de pêches, élevage, zones cultivées ou empirique (e.g. 655 FCFA/an/habitant sur le pourcentage de population affectée). Celles-ci ne sont pas discutées ici.

L'étude de Yang *et al.* (2018) ont étendu ce type d'étude à 19 hot-spots de pêche et biodiversité déterminé par le World Wildlife Fund (WWF) et l'ABN qui sont des zones critiques en termes de diversité d'espèces de poissons et d'attributs associés comme la structure des habitats et les processus écologiques. Compte tenu des limitations de données, des indicateurs écologiques liés aux débits, aisément calculés doivent être utilisés, comme les indices d'altérations hydrologiques (Mathews et Richter, 2007 ; Richter *et al.*, 1996). Le minimum annuel des débits minimums sur 7 jours sont utilisés comme indicateur des débits d'étiage et la santé de l'écosystème riverain, avec un seuil d'un facteur 0.5 et 5. Les débits sont calculés par le modèle SWAT et couplés dans un modèle multi-agent (Khan *et al.*, 2017).

4.6.4.3. L'INFLUENCE DES BARRAGES SUR LE NEXUS EAU-ENERGIE-ALIMENTATION-ENVIRONNEMENT

Leurs résultats montrent qu'à l'échelle du bassin dans son ensemble, la construction des trois barrages du PADD a des conséquences défavorables sur la navigation, la production hydroélectrique (à cause de la réduction en aval à Kainji et Jebba) et la crue dans le DIN mais soutiennent en partie l'augmentation des superficies irriguées. Avec les barrages de Fomi, Taoussa et Kandadji et l'optimisation de la gestion de Sélingué, la production d'hydroélectricité diminue de 10%. Sur Kainji et Jebba, la production hydroélectrique diminue de 1 626 GWh/an avec le scénario Fomi-Taoussa-Kandadji par rapport au scénario de base de 5 007 GWh/an. Le nombre moyen de jours navigables pour les grands bateaux diminue de 21%, et de nouveau beaucoup au Nigéria (-29%).

La consommation en eau associée au barrage de Fomi (essentiellement pour les périmètres à Fomi et surtout les prélèvements supplémentaires à l'ON) sont estimés à 7.5 km³/an. Liersch *et al.* (2019) quantifie actuellement les besoins en eau en Guinée et Mali à 7% des débits interannuels du fleuve Niger. Ceux-ci augmenteraient à 33% d'ici 2045 sur la base du programme d'investissement. Bien que les débits minimaux seraient améliorés surtout sur les années sèches (e.g. quinquennale sèche) même Fomi ne pourrait satisfaire sur beaucoup d'années les besoins agricoles envisagés. Une partie des pertes du débit du fleuve étant compensée par la baisse de l'ampleur de la crue du DIN, le débit entrant à Taoussa réduirait de 4.5 km³ soit 140 m³/s, passant ainsi de 800 m³/s actuellement à 660 m³/s. Le barrage de Taoussa consommerait 2.5 km³/an pour

l'irrigation et autant par évaporation du réservoir. Kandadji consommerait 2 km³/an. Les superficies irriguées augmenteraient de 435% de 228 000 ha à 1 200 000 ha en hivernage mais aussi de 470% en contre saison passant de 112 000 ha à 638 000 ha. La transparence de Fomi fin aout-début septembre évoquée plus haut pour réduire l'impact de la retenue et soutenir l'amplitude de la crue du DIN n'a pas à ce jour été modélisée.

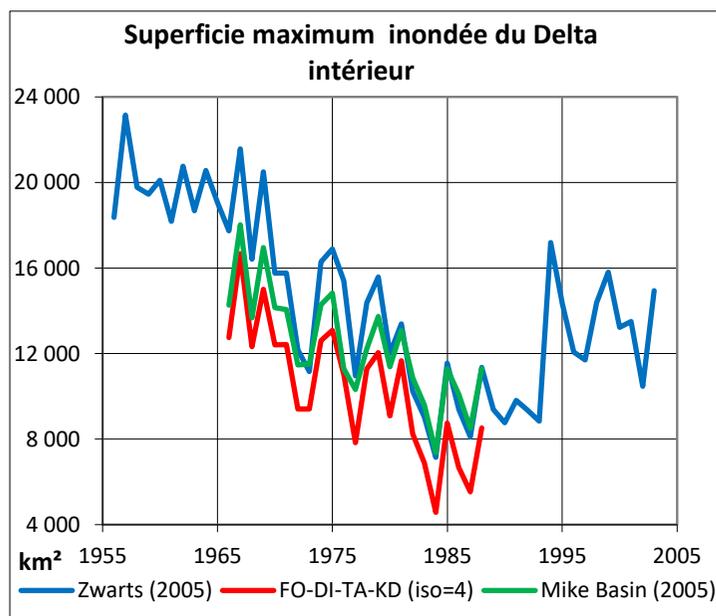


FIGURE 72 : SIMULATION SUR LA PERIODE 1965-1990 DE LA BAISSSE DE LA SUPERFICIE MAXIMALE INONDEE AVEC LE DEVELOPPEMENT DE FOMI, DIARAGUELA, TAOUSSA ET KANDADJI. Zwarts (2005) et le modèle MIKE BASIN, pour 2005 et avec

La construction du barrage de Fomi sur le Niandan, d'une capacité de plus de 6 km³ soit plus de deux fois celle du barrage de Sélingué, pour soutenir l'extension de l'ON aura un impact important sur l'inondation du DIN (Figure 72) avec une diminution de 10 à 14% des surfaces inondées (Coyné et Bellier *et al.*, 2009 ; Grijzen *et al.*, 2013). Son remplissage entrainerait une réduction supplémentaire des superficies inondées de l'ordre de 5% selon Liersch *et al.* (2019), soit en moyenne 1 000 km² ou 1 400 km² selon Zwarts *et al.* (2005). Avec le barrage de Sélingué, la superficie moyenne inondée réduirait ainsi de 15 200 à 13 400 km² (Liersch *et al.*, 2019). L'étude de faisabilité (AECOM, 2017) estime une réduction des superficies entre 8 et 12% avec Fomi. Une simulation de l'augmentation des prélèvements agricoles porterait la diminution globale (par rapport au régime naturel) du pic de crue à 21% d'ici 2045. Les calculs dépendent des données et hypothèses des modèles, notamment des choix d'aménagement (emplacement et hauteur du barrage de Fomi/Moussako) et de leur gestion.

Bien que la superficie maximale inondée aurait atteint près de 40 000 km² au début des années 1950 (Zwarts *et al.*, 2005), la superficie inondée sur 1955-2011 varie entre 10 000 et 20 000 km² (Zwarts *et al.*, 2005 ; Ogilvie *et al.*, 2016 ; Grijzen *et al.*, 2013). L'aménagement de nouveaux périmètres irrigués dans le DIN et une réduction de son inondation due aux grands barrages ne pourront qu'accroître les tensions déjà existantes au niveau local. La réduction de la crue affectera les moyens d'existence de plus d'un million d'éleveurs, riziculteurs et pêcheurs, comme les nombreux services rendus par les écosystèmes de cette zone humide. Les activités agricoles des plaines alluviales sans maîtrise d'eau (agriculture de décrue) ou en maîtrise partielle de l'eau (cas des périmètres en submersion contrôlée de Tamani et de Ségou) nécessitant une crue de forte amplitude seraient affectés par le barrage de Fomi, comme elles l'ont été par Sélingué. Les travaux de Zwarts *et al.* (2005) permettent de donner une appréciation quantitative de l'influence de cette variation des superficies inondées sur plusieurs services écosystémiques. Fomi entrainerait une baisse des superficies de bourgou (jusqu'à 62%) qui pourrait se traduire pour le secteur de l'élevage par une réduction de 10 à 15% du cheptel ovin et caprin, notamment dans la zone de Tombouctou. Il faut noter qu'entre 40 et 60% des cinq millions de bovins du Mali dépendent du fourrage sur les plaines inondables du DIN (Grijzen *et al.*, 2013 ; Liersch *et al.*, 2019). Sur la production traditionnelle de riz de décrue, Fomi pourrait réduire la production de 40% (34 500 t/an), alors que Sélingué la réduit actuellement de 8 900 t/an. Les pêches dans le DIN, qui représentent actuellement 80% de la production de poisson au Mali (Liersch *et al.*, 2019) pourraient être affectées par une perte de capture de poisson jusqu'à 37% (8 500 t/an selon Morand *et al.*, 2009) suite à la construction du barrage de Fomi.

Il faut cependant noter que ces pertes seraient en partie compensées (ou déplacées) suite au développement des pêches sur les retenues des barrages de Fomi, Taoussa et Kandadji et des cultures irriguées dans des périmètres. Des estimations sur la base des superficies et d'un rendement prudent de 50 kg/ha/an (Morand *et al.*, 2009 ; Grijsen *et al.*, 2013) et 28 000 ha pour Kandadji, 50 800 ha pour Fomi et 146 000 ha pour Taoussa mènerait à une production maximale (si la superficie maximale est atteinte) additionnelle de 11 240 t/an mais les contraintes socio-économiques n'ont pas été explorées.

4.6.4.4. L'INFLUENCE DES BARRAGES ET DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES

Les modèles climatiques du PADD (Grijsen *et al.*, 2013) projettent des modifications modérées du régime des précipitations sur le bassin (généralement entre -6% et +7%, en moyenne +2%) et tous les modèles climatiques projettent des augmentations significatives de la température, généralement entre 1.5 et 3°C pour 2050 (en moyenne 1.5°C en 2030, 2.1°C en 2050 et 2.7°C en 2070). La baisse moyenne projetée de l'écoulement est d'environ 2% ; la plupart des modèles projettent une variation moyenne de l'écoulement entre -18% et +10% avec un maximum de -20%. L'ETP et les besoins en eau augmenteront d'environ 5% et ces changements climatiques affecteront directement la production agricole et la sécurité alimentaire dans cette région d'Afrique de l'Ouest (Jalloh *et al.*, 2013 ; Sultan et Gaetani, 2016) ainsi que la disponibilité en eau. Surtout, ces changements viendront amplifier les modifications anthropiques qui affectent le régime hydrologique du fleuve Niger et les services écosystémiques qui en dépendent.

Indicateur de performance	Probabilité de non-dépassement	Référence	20 th C- demande en eau				20 th C + 10% demande en eau					Moyenne de l'élasticité du ruissellement
		2005 (SA) Valeur	+10% R Changements en pourcentage (%)	-10% R	-20% R	-30% R	+0% R	+10% R	-10% R	-20% R	-30% R	
Hydro-énergie												
Energie Basin (GWh)	moyenne	7,099	7.0	-7.8	-16.1	-25.6	-1.4	5.7	-9.2	-17.6	-27.1	0.8
	1/5(20%)	5,610	10.5	-10.3	-19.2	-29.0	-2.2	8.6	-12.0	-20.9	-30.9	1.0
Kainji/Jebba	moyenne	4,765	7.8	-8.5	-17.3	-27.5	-1.6	6.3	-10.2	-19.0	-29.2	0.9
	1/5(20%)	3,715	8.6	-8.7	-17.8	-28.1	-2.1	6.5	-10.8	-20.0	-30.3	0.9
Agriculture irriguée												
Totalité de l'irrigation	moyenne	228,138	0.0	0.0	0.0	-0.9	0.0	0.0	0.0	-0.5	-1.1	0.1
H (ha)	1/5(20%)	228,138	0.0	0.0	0.0	-1.5	0.0	0.0	0.0	-2.4	-3.0	0.1
Riz	moyenne	188,836	0.0	0.0	0.0	-0.9	0.0	0.0	0.0	-1.0	-1.1	0.1
H (ha)	1/5(20%)	188,836	0.0	0.0	0.0	-1.8	0.0	0.0	0.0	-2.9	-3.6	0.1
Totalité de l'irrigation	moyenne	111,820	0.5	-0.8	-1.9	-4.2	-1.1	-0.4	-2.1	-4.2	-5.2	0.2
CS (ha)	1/5(20%)	105,130	3.9	-2.6	-2.6	-4.6	-2.6	-2.6	-2.6	-4.7	-4.7	0.1
Riz	moyenne	32,425	1.1	-1.6	-2.4	-4.7	-2.3	-1.3	-3.7	-5.2	-6.5	0.2
CS (ha)	1/5(20%)	28,485	14.3	-9.5	-9.5	-10.3	-9.5	-9.5	-9.5	-10.8	-10.8	0.4
Canne à sucre (ha)	moyenne	6,800	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	1/5(20%)	6,800	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Navigation pour des différents tronçons (moyenne du nombre de jours)												
Moyenne gros bat.		171	5.8	-6.5	-14.1	-24.2	-0.6	5.0	-7.3	-15.0	-25.0	0.8
Inondation (km²)												
Delta Intérieur	mean	12,117	6.2	-7.1	-14.3	-22.7	-0.2	6.0	-7.4	-14.6	-23.0	0.7
	1/5(20%)	10,342	6.4	-9.4	-18.6	-29.9	-0.4	6.2	-9.8	-19.0	-30.3	1.0
Substance de 10 jours de débits minimaux moyens (m³/s)												
Markala	1/2(50%)	70	6	-7	-15	-23	-17	-11	-23	-31	-38	0.7
	1/5(20%)	51	6	-4	-9	-16	-19	-14	-25	-30	-35	0.5
Mali-Niger frontière	1/2(50%)	60	28	-33	-49	-60	-17	11	-49	-63	-75	2.0
	1/5(20%)	12	28	-27	-51	-66	-52	-37	-65	-75	-86	1.7
Niamey	1/2(50%)	55	31	-34	-52	-64	-17	14	-50	-66	-79	2.0
	1/5(20%)	9	35	-32	-61	-81	-62	-41	-79	-92	-95	2.0
Malanville	1/2(50%)	68	29	-29	-55	-72	-13	16	-42	-67	-83	2.3
	1/5(20%)	4	169	-47	-64	-69	-54	-2	-61	-68	-72	2.0

FIGURE 72: RESULTATS DE SIMULATION DE L'IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LE NEXUS EAU-ENERGIE-ALIMENTATION-ENVIRONNEMENT DANS LE BASSIN DU FLEUVE NIGER (IN GRIJSEN ET AL., 2013)

L'étude de Grijzen *et al.* (2013) simule l'influence des trois barrages Fomi-Taoussa-Kandadji couplée avec des variations de débits moyens de -30% à 10% par rapport aux conditions de base de 2005, ainsi qu'avec 10% de besoins supplémentaires en eau. Les débits moyens sont calculés sur la période 1967-1988 qui inclut les sécheresses de 1970 et 1980. La production hydroélectrique (-7,8% à -25.6%), la superficie maximale de l'inondation du DIN (-9.4% à -29.9%) et la navigation (-6.5% à -24.2%) sont profondément affectées si l'écoulement moyen diminue de 10 à 20% même sans la construction de barrages (Figure 73). Des réductions de plus de 20% des performances de base sont ainsi observées, qui dépassent le seuil de risque acceptable établi par les pays membres du bassin lors d'un atelier à Ouagadougou en mai 2010. Ce modèle favorise d'abord la satisfaction des besoins en eau potable (AEP) et pour l'irrigation, entraînant plus d'impacts sur la production d'hydro-électricité. De plus, la baisse des débits n'affecte quasiment pas l'irrigation en saison des pluies (-0.9% avec baisse des débits de 30%) ni le remplissage des barrages pour irriguer en saison sèche (-4.2% avec baisse des débits de 30%). Par contre, la production hydroélectrique diminue de 30% et Kainji et Jebba, comme précédemment, souffrent d'autant plus qu'ils doivent « absorber » l'effet des barrages en amont.

Mesures de performance	Probabilité de non-dépassement	Référence		20 th C- demande en eau ; scenario FO-TA-KD					20 th C + 10% demande en eau ; scenario FO-					Moyenne de l'élasticité du ruissellement
		2005 (SA)	FO-TA-KD	20 th C-R	+10% R	-10% R	-20% R	-30% R	+0% R	+10% R	-10% R	-20% R	-30% R	
		Valeur	% change	Valeur	Changements en pourcentage (%)				Changements en pourcentage (%)					
Hydro-énergie														
Energie Basin (GWh)	moyenne	7,099	14.2	8,107	7.9	-11.0	-21.6	-32.7	-5.3	3.7	-15.1	-25.5	-36.2	1.1
	1/5(20%)	5,610	1.8	5,709	12.2	-12.9	-26.3	-37.0	-7.0	5.7	-19.2	-30.6	-40.3	1.2
Kainji/Jebba	moyenne	4,765	-29.2	3,374	11.0	-15.7	-29.5	-43.6	-8.2	4.6	-21.8	-35.2	-48.5	1.4
	1/5(20%)	3,715	-40.8	2,200	14.5	-17.1	-34.1	-48.1	-10.1	5.2	-25.5	-41.8	-52.4	1.5
Agriculture irriguée														
Totalité de l'irrigation	moyenne	228,138	435	1,220,591	0.3	-0.5	-1.3	-2.9	-0.6	-0.1	-1.3	-2.3	-4.4	0.1
H (ha)	1/5(20%)	228,138	424	1,194,537	0.2	-1.0	-2.5	-5.9	-1.0	-0.4	-3.2	-5.8	-10.4	0.2
Riz	moyenne	188,836	362	872,968	0.1	-0.3	-1.1	-2.8	-0.4	0.0	-1.1	-2.0	-4.5	0.1
H (ha)	1/5(20%)	188,836	358	864,786	0.1	-1.2	-2.2	-6.1	-1.2	-0.4	-3.1	-6.0	-11.5	0.2
Totalité de l'irrigation	moyenne	111,820	470	637,537	0.2	-0.3	-0.7	-1.2	-1.6	-0.9	-2.1	-2.4	-3.1	0.1
CS (ha)	1/5(20%)	105,130	500	630,890	0.1	-0.4	-2.6	-12.6	-1.9	-1.5	-2.5	-8.4	-18.9	0.3
Riz	moyenne	32,485	776	284,524	0.2	-0.4	-1.1	-2.2	-2.8	-1.7	-3.8	-4.4	-5.4	0.1
CS (ha)	1/5(20%)	28,485	885	280,703	0.1	-0.6	-2.7	-8.6	-3.4	-2.8	-4.2	-7.5	-14.5	0.3
Canne à sucre (ha)	moyenne	6,800	365	31,617	0.0	-0.7	-1.9	-4.3	-1.2	0.0	-2.8	-4.3	-9.4	0.1
	1/5(20%)	6,800	365	31,617	0.0	-1.4	-2.8	-8.9	-1.6	-0.6	-3.8	-9.1	-17.9	0.2
Navigation pour des différents tronçons (moyenne du nombre de jours)														
Moyenne gros bat.		171	-21.6	134	8.4	-11.9	-23.1	-36.4	-4.5	4.9	-15.1	-26.3	-38.5	1.0
Innodation (km ²)	mean	12,117	-9.7	10,940	5.9	-10.3	-18.2	-28.0	-3.0	4.9	-11.4	-19.2	-29.2	0.9
Delta Intérieur	1/5(20%)	10,342	-14.1	8,887	8.0	-13.0	-23.9	-36.5	-3.3	6.3	-14.7	-25.6	-38.1	1.2
Subsistance de 10 jours de débits minimaux moyens (m³/s)														
Markala	1/2(50%)	70	-13	61	15	-19	-67	-100	-77	-65	-90	-100	-100	4.0
	1/5(20%)	51	-2	50	11	-47	-99	-100	-81	-73	-92	-100	-100	5.0
Mali-Niger	1/2(50%)	60	33	80	0	-7	-57	-84	-25	-6	-59	-73	-94	3.0
frontière	1/5(20%)	12	547	80	0	-48	-77	-96	-65	-32	-79	-87	-99	4.0
Niamey	1/2(50%)	55	78	99	6	-13	-19	-74	-18	-2	-20	-56	-88	2.0
	1/5(20%)	9	818	85	3	-7	-68	-95	-23	-4	-60	-79	-99	3.5
Malanville	1/2(50%)	68	35	91	6	-13	-44	-67	-21	-7	-41	-64	-76	2.5
	1/5(20%)	4	2,035	77	7	-39	-71	-97	-44	-12	-72	-96	-100	4.0

FIGURE 74 : RESULTATS DE SIMULATIONS DE L'IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE ET DES BARRAGES FO-TA-KD SUR LE NEXUS EAU-ENERGIE-ALIMENTATION-ENVIRONNEMENT DANS LE FLEUVE NIGER (IN GRIJSEN ET AL., 2013)
 Tableau 5.2. Matrice d'indicateurs de performance clés pour le scénario de développement du BAQD de Fomi-Taoussa-Kandadjji
 (Remarque : -10 % R signifie une réduction de 10 % de l'écoulement)

De plus l'élasticité qui mesure le ratio entre l'évolution des indicateurs et les variations des écoulements confirme que la production irriguée est peu sensible aux variations d'écoulement, alors que la production hydroélectrique, la navigation et la crue du DIN sont modérément sensibles, et que les débits minimums sont très sensibles (Grijzen *et al.*, 2013). Surtout, les indicateurs de performance sont moins sensibles au changement climatique dans la situation actuelle d'aménagement, qu'avec le scénario Fomi-Taoussa-Kandadjji.

Yang *et al.* (2018) confirment que les variations de pluie et de débits influencent la production hydroélectrique et les débits écologiques tandis que la production agricole irriguée sera plus influencée par les changements de température prévus. La construction d'aménagements augmente la résilience et la probabilité d'atteindre les objectifs en termes de production hydroélectrique, sauf dans les scénarios extrêmes (à partir de -30% de pluie) où la capacité de production supplémentaire aura trop de difficultés à être satisfaite. Les barrages augmentent le potentiel de terres irriguées mais ne semblent pas augmenter la résilience de l'agriculture irriguée lorsqu'on prend en compte les variations de température prévues. En termes d'écosystème, les résultats montrent que sur certaines variables, les barrages peuvent appuyer l'écosystème, notamment par la régulation offerte par les barrages lors de variations (soutien d'étiage) mais ont un impact défavorable sur la résilience suite à la modification du régime. A l'échelle de

On note également qu'à partir d'une baisse de 10% des débits moyens, les débits minimaux sont fortement réduits à partir de la frontière Mali-Niger (autour de -30%). La combinaison des barrages et du changement climatique mène à une amélioration de ces débits minimaux (Figure 74) grâce aux possibilités de soutien d'étiage, tant que la baisse des débits due au climat reste modérée (-10%). A Markala cependant, la construction des barrages et l'augmentation des prélèvements pour l'ON mènent à une dégradation des débits environnementaux qui est amplifiée par la réduction des débits. Lorsque les réductions de débits dues au changement climatique augmentent, , compte tenu aussi du paramétrage du modèle qui favorise les besoins agricoles, l'impact devient très marqué tout le long du bassin.

chacun des pays riverains, les résultats confirment que le Nigéria pâtira le plus du développement de barrages en amont, à la fois sur leur propre hydroélectricité, sur les possibilités de cultures irriguées et sur leurs écosystèmes ; ce qui conduit à réfléchir à des mécanismes de compensation amont-aval. Le besoin de recherches à une échelle temporelle adaptée au régime de fluctuations naturelles de la crue (à la fois intra-annuelle et interannuelle) pour comprendre l'impact des modifications en régime de crue et d'étiage sur le fonctionnement d'un écosystème (Ghile *et al.*, 2014 ; Kuper *et al.*, 2004) est souligné. Les écosystèmes sont complexes et leur santé dépend de plusieurs paramètres : l'amplitude de la crue, mais aussi l'alternance entre crue et étiage, la qualité, la composition et température de l'eau, et la connectivité hydraulique. Un indicateur écosystémique plus performant composé de plusieurs sous-indicateurs et la collecte de données associées est nécessaire afin d'éviter des recommandations partielles (à défaut, sur la base uniquement de débits d'étiage, les barrages pourraient être mis en avant comme favorables aux écosystèmes ; Yang *et al.*, 2018).

5. À QUELLES ÉVOLUTIONS EST CONFRONTÉ LE CADRE INSTITUTIONNEL ET JURIDIQUE DE GESTION DE L'ACTIVITÉ LIÉE AU FLEUVE NIGER ?

A l'instar des autres pays de la sous-région Ouest africaine, le Mali a retenu les principes de la gestion intégrée des ressources en eau (GIRE). Dans cette perspective, le pays s'est doté d'outils juridiques et institutionnels dans le but de gérer efficacement et durablement ses ressources en eau. Depuis 1929, date des premières lois et décrets relatifs à la gestion des ressources en eau ces instruments juridiques et institutionnels ont subi des évolutions et modifications de manière à permettre à l'Etat et aux gestionnaires de mieux s'adapter aux besoins et exigences du moment et corriger les insuffisances constatées dans le fonctionnement du secteur de l'eau au Mali.

L'expertise collégiale de 2007 avait mis en évidence plusieurs problématiques liées au cadre institutionnel de gestion des ressources en eau au Mali, en particulier celui du fleuve Niger. Il s'agit notamment (i) des difficultés de certaines institutions, telles que l'Agence du bassin du fleuve Niger (ABFN), à mettre en œuvre une gestion efficace de l'environnement et des ressources naturelles, (ii) du schéma institutionnel national complexe, et (iii) des difficultés d'adaptation aux nouvelles « règles du jeu » de la décentralisation.

Dix ans après, à quelles évolutions est confronté le cadre institutionnel et juridique de gestion de l'activité liée au fleuve ? Peut-on dégager des éléments de diagnostic sur le fonctionnement de ce cadre et sur son adaptation au développement des responsabilités des collectivités locales ? Ce chapitre essaye de répondre à ces questions.

5.1. Bref rappel de l'histoire institutionnelle et juridique du secteur de l'eau au Mali

Depuis l'époque coloniale, le cadre institutionnel et juridique du secteur de l'eau au Mali a évolué en fonction de la politique du pays en matière de gestion des ressources en eau. Le Tableau 30 présente un bref historique des textes et lois de référence du secteur de l'eau au Mali.

Il apparaît que, de l'époque coloniale jusqu'à la création de la Direction nationale de l'hydraulique et de l'énergie (DNHE) en 1967, les services chargés de la gestion de l'eau au Mali n'ont pas connu un grand bouleversement.

Ce n'est qu'avec l'avènement de la politique étatique de maîtrise totale de l'eau sous la Troisième République, que le contexte institutionnel de gestion de l'eau change et se diversifie au Mali. Tout le service de l'hydraulique est alors placé sous la tutelle du Ministère des mines, de l'hydraulique et de l'énergie, et la Direction nationale de l'hydraulique est créée en 1999. En 2002, les autorités gouvernementales maliennes décident de la création de l'ABFN, placée sous la tutelle du Ministère de l'environnement, de l'assainissement et du développement durable.

Périodes	Date/année	Décrets et lois	Finalités
Avant les indépendances	1929	-	Création du secteur de de l'hydraulique du Soudan Occidental
	1951 - 1952	-	Création de l'arrondissement 2 des travaux publics chargé des questions d'eau et d'électricité
	1957	Arrêté N°122D-1-2	Création du service de l'hydraulique du Soudan français
	1959	Loi N°95-24-A-1 et décret N°181	Création de la Direction de l'Hydraulique (DH)
Sous la première république (1960 – 1968)	1961	Décret N°128/PG-RM du 30 mars 1961	Organisation du Service de l'Hydraulique et de l'Électricité
	1967	Loi N°67-12/AN-RM du 13 avril 1967	Création de la Direction de l'Hydraulique et de l'Énergie
Sous la deuxième république (1968 – 1991)	1969 - 1989	-	Aucun changement au niveau du service de l'hydraulique
	1990	Décret 90-458/P-RM	Organisation et modalités de fonctionnement de la DNHE
Sous la troisième république (1991 - 2011)	1999	Ordonnance N°99-014/P-RM ratifiée par la loi N°99-023/P-RM du 11 juin 1999	Création de la Direction Nationale de l'Hydraulique (DNH)
	1999	Décret N°99-185 /P-RM du 05 juillet 1999	Fixant l'organisation et les modalités de fonctionnement de la DNH
	2002	Ordonnance N°02-049/P-RM du 29 mars 2002	Création de l'Agence du Bassin du Fleuve Niger (ABFN)

TABLEAU 30 : TEXTES ET LOIS DE REFERENCE DU SECTEUR DE L'EAU AU MALI

Dix ans après, il ressort que les conclusions de l'expertise de 2007 restent encore d'actualité. La nécessité de proposer une gouvernance de l'eau se heurte toujours à un environnement institutionnel peu favorable. La gestion de l'eau relève des compétences de nombreuses institutions et les mécanismes de coordination nécessaires sont inexistantes ou peu fonctionnels. Aujourd'hui, il demeure plusieurs incohérences et dysfonctionnements du cadre institutionnel de gestion de l'eau au Mali. Ce sont :

- la multiplicité des acteurs et l'insuffisance de coordination ;
- des conflits de compétences nés de la duplication et de l'interférence entre les missions
- une inadéquation des missions actuelles du gestionnaire de l'eau avec le Code de l'eau, la décentralisation et la GIRE ;
- un transfert de compétences de l'Etat aux Communes sans transfert de ressources
- une insuffisance de ressources humaines, matérielles et financières aux niveaux local, régional et national ;
- une insuffisance de clarification des rôles des organes consultatifs et la non application du Code de l'eau par l'administration en charge des ressources en eau.

L'ABFN peine à jouer son rôle de coordonnateurs de toutes les actions liées au bassin du fleuve Niger. Elle tient plus ou moins à jour la liste des projets en cours sur le fleuve Niger (annexe 8.3).

5.2. Acteurs institutionnels de la gestion de l'eau au Mali

De multiples acteurs, de différentes catégories, interviennent dans le secteur de l'eau au Mali :

- des acteurs institutionnels principaux ;
- des organisations autonomes de gestion et d'exploitation ;
- des organisations de coordination et de consultation ;
- des institutions internationales liées au fleuve Niger ;
- des acteurs non étatiques.

5.2.1. Les acteurs institutionnels principaux

- Le Ministère de l'énergie et de l'eau est le premier acteur du domaine de l'eau. Il est en charge :
 - de l'élaboration et du contrôle de l'application de la réglementation en matière d'eau ;
 - du développement des ressources en eau en vue d'assurer notamment la couverture des besoins du pays en matière d'eau potable ;
 - de la réalisation des études et travaux d'aménagement des cours d'eau, à l'exception des aménagements hydro-agricoles.

- La Direction nationale de l'hydraulique (DNH) est le service central chargé de l'exécution des missions assignées au Ministère de l'énergie et de l'eau. Ses principales missions portent sur l'élaboration de la politique nationale en matière d'hydraulique, la coordination et le contrôle technique des services régionaux, sub-régionaux et des services rattachés qui concourent à la mise en œuvre de la politique.
- L'ABFN est un Etablissement public à caractère administratif (EPA), doté de personnalité morale et d'autonomie financière. L'ABFN a pour mission la sauvegarde du fleuve Niger, de ses affluents et de leurs bassins versants maliens, et la gestion intégrée de leurs ressources sur le territoire du Mali. A ce titre, l'AFBN est chargée de :
 - promouvoir et veiller à la préservation du fleuve en tant qu'entité vitale du pays, protéger les écosystèmes terrestres et aquatiques ;
 - protéger les berges et les versants contre l'érosion et l'ensablement et améliorer la gestion de la ressource pour les usages ;
 - renforcer les capacités de gestion des ressources du fleuve, de ses affluents et de ses bassins versants ;
 - contribuer à la préservation des risques naturels (inondations, érosion, sécheresse), à la lutte contre les pollutions et nuisances et au maintien de la navigation du fleuve ;
 - entretenir des relations de coopération avec les organismes techniques similaires des pays riverains concernés ;
 - concevoir et gérer un mécanisme financier de perception de redevances auprès des organismes préleveurs et pollueurs d'eau et d'utilisation de ces redevances.
- Les Collectivités territoriales. Depuis la mise en œuvre de la réforme de la décentralisation, elles sont devenues des acteurs essentiels et incontournables de la gestion de l'eau au Mali. Elles sont issues d'un long processus historique et disposent de plusieurs responsabilités dans le domaine de l'eau qu'elles assument difficilement à cause de l'insuffisance de leurs ressources financières, de l'insuffisance, voire du manque, de ressources humaines qualifiées.

5.2.2. Les organisations autonomes de gestion et d'exploitation

- L'Office du Niger (ON), restructuré en 1994, est un EPIC placé sous la tutelle du Ministère de l'agriculture. Cette restructuration s'inscrivait dans la logique de la libéralisation de l'économie et du transfert de responsabilité de l'Etat vers les acteurs privés. Le décret de gérance n° 96-188/PRM de 1996 définit les principales règles de gestion de l'eau et des terres en précisant les différents statuts fonciers et en instituant notamment des comités paritaires de gestion permettant de faire participer les exploitants agricoles aux prises de décisions dans ces domaines. Ce schéma d'aménagement s'appuie sur les huit systèmes hydrauliques identifiés avec près de deux millions d'hectares potentiellement aménageables à partir du barrage de Markala (Kohler et al., 1971).
- L'Office Riz Ségou (ORS), est également un EPIC placé sous la tutelle du Ministère de l'agriculture. Il a été créé par l'ordonnance n°91-049/CTSP du 21/08/1991. Il est doté de personnalité morale et d'autonomie financière. La direction de l'ORS se trouve à Ségou. Sa mission fondamentale est de proposer et d'exécuter tous les programmes et projets concourant à la promotion de la filière riz à travers les actions visant le développement intégré de sa zone d'intervention. Les principaux objectifs de l'établissement sont définis dans un contrat- plan tripartite : Etat/ORS/producteurs. Ils concernent spécifiquement l'amélioration du service de l'eau dans les périmètres hydro-agricoles, l'intensification de la production agricole et renforcement des capacités des organisations paysannes dans le cadre de la décentralisation.
- L'Office Riz Mopti (ORM) est un établissement autonome qui n'a pas encore accédé à la maîtrise totale de l'eau. Malgré l'autonomie de gestion dont il jouit vis-à-vis de l'autorité de tutelle et des paysans, l'ORM est confronté à une insécurité foncière et ses activités restent encore soumises aux lois de la nature à travers le système de submersion contrôlée.
- L'Office du Périmètre Irrigué de Baguinéda (OPIB).
- L'Office de Développement Rural de Sélingué (ODRS).

- La société Energie du Mali (EDM SA) exerce ses attributions dans le cadre d'une convention de concession distincte de celle de l'électricité avec l'État. Son domaine de compétence couvre la création, la gestion et la protection des installations de captage, d'adduction, de traitement et de distribution d'eau potable pour les besoins urbains et industriels des grands centres définis d'accord- partie. A partir de 2005, l'Etat a décidé de réformer profondément EDM-Sa. Cette réforme visait à trouver la meilleure forme de gestion séparée favorisant à la fois le développement des services de l'électricité et ceux de l'eau potable. C'est ce processus qui a abouti en 2009 à la création de la Société malienne de gestion de l'eau potable (SOMAGEP). Cette nouvelle société poursuit les mêmes objectifs que l'ancienne direction des eaux d'EDM SA. **A l'image de EDM SA, elle a ses démembrements dans tous les grands centres urbains du pays.** A Ségou comme à Mopti, la SOMAGEP capte de l'eau dans le fleuve Niger pour la traiter et la distribuer à la population.
- L'Autorité pour l'aménagement de Taoussa.
- La Compagnie Malienne de Navigation (COMANAV).

5.2.3. Les organisations de coordination et de consultation

- Le Comité interministériel de coordination du secteur de l'eau a été créé par décret n°95-447/PM-RM du 27 décembre 1995. Les objectifs visés par les acteurs et les usages faits de l'eau n'étant pas toujours conciliables, ce comité a été mis en place pour des besoins de consultation et de coordination dans les secteurs de l'eau et de l'assainissement. Il comprend deux commissions de travail :
 - la commission « gestion des eaux » présidée par le Directeur de la DNH ;
 - la commission « environnement et santé » présidée par le Directeur national de la santé publique.
- Le Conseil national de l'eau, créé par la loi n°02-006 / du 31 janvier 2002 portant le Code de l'eau, est l'un des organes consultatifs du secteur de l'eau. Il a ses démembrements aux niveaux régionaux (Conseils régionaux de l'eau) et locaux (Conseils locaux de l'eau) et a pour mission d'émettre des propositions et avis consultatifs sur toutes questions relatives à l'eau, en particulier sur les projets de plan directeur et les schémas directeurs d'aménagement et de gestion des eaux, ainsi que sur les modifications y afférentes et les projets d'aménagement et de répartition des eaux ayant un caractère national ou régional.
- Les Conseil régionaux et locaux de l'eau sont formés par les collectivités territoriales (Commune, Cercle et Région). Ils ont pour mission d'émettre un avis sur toutes questions relatives à l'eau soumis par l'administration chargée de l'eau. Force est de constater cependant qu'en 2013 le Conseil national de l'eau n'était pas encore opérationnel, et que plusieurs Conseils régionaux et locaux de l'eau n'étaient pas mis en place. Cependant, l'idée de leur création dans le schéma des acteurs de l'eau constitue une avancée majeure concernant la mise en route d'une stratégie de gouvernance.
- Les Comités de bassins ou de sous-bassins sont des organes consultatifs et de coordination, qui ont entre autres pour missions de :
 - coordonner l'exploitation des ressources du bassin du Niger avec les différents acteurs bénéficiaires de ces ressources ;
 - informer les décideurs sur l'incidence de l'exploitation des ressources du bassin en tenant compte de tous les aspects techniques des activités liées au développement (production électrique, irrigation, navigation, pêche, santé, industrie, tourisme) ;
 - assurer une gestion intégrée et concertée des ressources du bassin avec tous les acteurs ;
 - collaborer avec les structures nationales et sous-régionales directement concernées par la gestion des ressources du bassin ;
 - contribuer à la prévention et la lutte contre les catastrophes naturelles et la dégradation du bassin par les effets anthropiques.

A ce jour, il existe deux Comités de bassins créés par Arrêtés interministériels par la DNH : le Comité de bassin du Niger Supérieur (CBNS) et le Comité de bassin du Bani (CBB). L'ABFN est également en train de mettre en place ses démembrements selon le découpage hydrologique du fleuve Niger. Elle a déjà créé trois comités de sous-bassins sur les quatre prévus : le Comité du sous-bassin du Delta Intérieur du Niger, avec son siège à Mopti, le Comité du sous-bassin n°1 de la boucle du Niger, avec son siège à Tombouctou, et le comité du sous-bassin n°2 de la boucle du Niger, avec son siège à Gao.

5.2.4. Les institutions internationales liées au fleuve Niger

- L'Autorité du Bassin du Niger (ABN) est l'une des premières organisations fluviales d'Afrique dotée du champ d'action le plus étendu. Suite à la Commission du Fleuve Niger (CFN) mise en place en 1964, l'ABN a été créée en 1980 à Faranah (Guinée) à l'issue du sommet des Chefs d'État et de Gouvernement. La CFN devient alors l'ABN ayant son siège à Niamey. Les neuf pays membres de l'ABN (Bénin, Burkina Faso, Mali, Niger, Nigeria, Cameroun, Côte d'Ivoire, Guinée et Tchad) sont liés par une convention, révisée en 1987, pour :
 - planifier le développement du bassin et assurer le contrôle et la régulation de la navigation ;
 - harmoniser et coordonner les politiques nationales de mise en valeur des ressources du bassin ;
 - concevoir et réaliser les ouvrages et les projets communs tout en assistant les études et travaux nécessaires au développement des ressources du bassin.
- Le Partenariat national de l'eau du Mali (PNE-Mali) est une organisation à but non lucratif, régie en conséquence par l'Ordonnance n°41/PCG du 28 mars 1959 (relue en 2004) relative aux associations. Il a mis ses démembrements en place dans toutes les capitales régionales du Mali qu'on appelle les partenariats régionaux de l'eau.
- L'Unité de coordination des ressources en eau de la Communauté économique des Etats de l'Afrique de l'Ouest, est la Haute Autorité de l'eau dans l'espace de la Communauté des Etats sahélo-sahariens.

5.2.5. Les acteurs non étatiques

- Le Conseil de pêche a été créé par la loi n°95- 032 du 20 mars 1995 fixant les conditions de gestion de la pêche et de la pisciculture et ses textes d'application. Cette loi a aussi prévu, dans son article 42, la création d'organes consultatifs de pêche au niveau national et au niveau des collectivités territoriales (commune, cercle, région) et dénommés Conseil national, régional ou local de pêche. La composition et les attributions des Conseils de pêche ont été fixées par décret n° 96-011/PRM du 17 janvier 1996.
- L'Assemblée permanente des Chambres d'agriculture du Mali (APCAM) est une organisation faîtière regroupant l'ensemble des organisations paysannes, notamment les associations des producteurs agricoles. Elle joue un rôle de représentation et d'encadrement du monde rural au Mali. **Elle est représentée par les Chambres régionales d'agriculture dans toutes les régions du Mali, qui se subdivisent en Chambre locale d'agriculture au niveau de chaque cercle.**
- L'Association malienne pour l'irrigation et le drainage (AMID).
- Les Associations d'usagers du fleuve Niger sont très nombreuses, notamment dans les Cercles de Ségou et de Mopti. Cependant, elles ne sont pas encore bien structurées et elles ont du mal à s'imposer aux côtés des autres acteurs impliqués dans la gouvernance de l'eau.
- Les Associations professionnelles des femmes rurales.

5.3. Cadre juridique actuel du secteur de l'eau au Mali

Trois points essentiels caractérisent le cadre juridique actuel du secteur de l'eau au Mali. Il s'agit (i) du caractère récent de la législation, (ii) de la non application des lois fautes de décrets d'application et (iii) de la méconnaissance des lois régissant le domaine de l'eau par les acteurs.

Le régime juridique des ressources en eau au Mali a été régi jusqu'en 2001 par la loi n° 90-17 AN-RM du 27 février 1990. Cette loi n'a pas connu d'application du fait (i) de l'absence de textes réglementaires et (ii) de la non prise en compte par cette loi de la satisfaction des besoins en eau des populations et la création d'un cadre adéquat de partenariat entre l'administration et les collectivités locales pour la gestion de la ressource. Cette loi, qui s'est avérée caduque, a été remplacée par une nouvelle loi en 2002, celle portant Code de l'eau.

Le Code de l'eau constitue le texte fondamental du secteur de l'eau. C'est un ensemble de dispositions relatives à l'eau au Mali. La loi n°02-006 du 31 janvier 2002 portant Code de l'eau abroge celle N°90-017 /AN-RM du 27 février 1990 fixant le régime des eaux et toutes dispositions antérieures contraires. Le code de 2002 consacre globalement le caractère public de l'eau. Il précise les modalités de gestion et de protection des ressources en eau en déterminant les droits et les obligations de l'Etat, des collectivités territoriales et des usagers.

En février 2006, le gouvernement de la république du Mali adopte en conseil des ministres la politique nationale de l'eau. Elle s'inscrit dans le cadre des grandes orientations de la politique de développement socio-économique du pays. La politique nationale de l'eau sert de cadre de référence pour une gestion durable des ressources en eau du pays, dans le respect de l'équilibre du milieu physique et des écosystèmes.

L'objectif général de la politique nationale de l'eau est de contribuer à la lutte contre la pauvreté et au développement durable en apportant des solutions appropriées aux problèmes liés à l'eau.

L'actuel Code de l'eau a eu le mérite de poser les jalons d'une gestion durable et intégrée des ressources en eau au Mali. Il faut cependant, noter qu'il existe encore des incohérences et des insuffisances par rapport au document de politique nationale de l'eau. Parmi ces insuffisances, on note que :

- le Code de l'eau ne contient aucune disposition relative à la gestion partagée des eaux alors que la majeure partie des cours d'eau du Mali sont partagée et le pays est partie prenante à toutes les conventions régionales les concernant ;
- le principe du préleveur payeur n'y est pas clairement formulé ;
- le Code ne contient aucune disposition relative à la déclaration de la construction des ouvrages de captage et prélèvement d'eau ;
- il n'existe aucune disposition relative à l'usage pastoral de l'eau, alors que le Mali est un pays à fortes potentialités agro-pastorales ;
- aucune disposition du Code de l'eau n'évoque la possibilité de créer des agences de bassin dotées de personnalité juridique et d'autonomie financière.

Au regard de ces insuffisances et pour une mise en œuvre cohérente de la GIRE, une relecture du code de l'eau a été faite. Un atelier national de concertation s'est tenu du 8 au 9 décembre 2016 à Bamako sur l'avant-projet de texte relatif à la relecture de la loi n°02-006 du 31 janvier 2002 portant Code de l'eau.

5.4. Multiplicité des acteurs et insuffisance de coordination

On assiste depuis une décennie à de profondes mutations dans le secteur de l'eau au Mali. Cela s'est caractérisé par une multiplicité des acteurs et une insuffisance de coordination. En effet, on compte aujourd'hui, pas moins d'une douzaine de départements ministériels directement ou indirectement concernés par le secteur de l'eau. Ce

sont notamment ceux de l'agriculture, des collectivités territoriales, des transports, de l'élevage, de la pêche, de l'environnement, de la santé, de l'industrie, de la coopération internationale... La multiplicité des acteurs aurait pu être un facteur positif si un minimum de concertation existait entre les différents intervenants.

On peut par exemple citer l'absence totale de supervision et de contrôle de la DNH sur les ONG actives dans le domaine de l'eau qui sont directement rattachées à la Cellule d'Appui au Développement à la base du ministère de l'administration territoriale et des collectivités locales. Par ailleurs, à la faveur de la décentralisation, de nombreux projets de la coopération décentralisée et du jumelage opèrent au Mali sans aucune emprise ni information de la DNH.

Par ailleurs, les structures d'aménagement et de gestion des bassins du fleuve Niger sont rattachées à des ministères différents. En effet la DNH est rattachée au ministère en charge de l'eau alors que l'ABFN l'est à celui en charge de l'environnement et de l'assainissement. Les raisons de cette situation sont plus d'ordres politique et institutionnel que juridique.

Les conflits de compétences constituent une des conséquences de la multiplicité des acteurs du secteur de l'eau au Mali. Nous citons ci-après quelques exemples.

- conflits de compétence entre la DNH et les organismes autonomes dans le domaine de l'eau ;
- conflits de compétence entre la DNH et le Laboratoire National de la Santé Publique ;
- conflits de compétence entre les Directions des secteurs de l'hydraulique et de l'assainissement ;
- conflits de compétence entre la DNH et l'ABFN ;
- conflits de compétence entre l'ABFN et le comité de gestion des Fonds de Développement du Service public de l'eau.

6. SYNTHÈSE, PROPOSITIONS ET RECOMMANDATIONS

6.1.Synthèse

6.1.1. Connaissances scientifiques et cadre institutionnel

6.1.1.1. CONTEXTE HYDROCLIMATIQUE

Cette étude s'est appuyée sur de nombreux travaux scientifiques pour faire ressortir les grandes lignes de ce qui a été observé sur la bassin du fleuve Niger au Mali.

Les températures n'ont cessé d'augmenter au cours des dernières décennies. Ce sont plus particulièrement les températures minimales journalières qui ont augmenté, conduisant à des nuits plus chaudes qu'auparavant.

Pour ce qui est de la pluviométrie, à l'échelle du bassin, les décennies 1950 et 1960 ont été fortement excédentaires. Les décennies 1970 et 1980 ont enregistré une sécheresse climatique de l'ordre de 20 à 25% qui n'a jamais eu d'équivalent, de mémoire d'homme, en termes d'intensité, de durée et d'étendue spatiale. Au cours de la décennie 1990, les pluies ont augmenté, sans toutefois revenir au niveau des décennies 1950 et 1960. Au cours de la décennie 1990 et des suivantes, les événements extrêmes (sécheresses et inondations) ont augmenté en fréquence et en intensité.

La baisse prolongée des pluies a eu des répercussions durables sur les ressources en eau, mais différentes dans les domaines soudanien et sahélien. En domaine soudanien, les rivières ont vu leurs débits baisser considérablement, de l'ordre de 50 à 70%. Cette baisse est due à la diminution durable des ressources en eau souterraines du fait du cumul de nombreuses années à déficit pluviométrique qui ont réduit la recharge naturelle annuelle des nappes. En domaine sahélien, les débits ont dans le même temps augmenté malgré la baisse de pluviométrie. Cette augmentation est attribuée pour partie aux états de surface, à l'occupation des sols, qui ont été modifiés par l'homme et le climat.

Il est important de préciser que ces résultats sont à nuancer à une échelle locale avec des variations plus ou moins fortes autour des valeurs moyennes à l'échelle du bassin du fleuve Niger ; ces variations ne sont pas les mêmes sur tout le bassin.

Concernant le fonctionnement du Delta Intérieur du Niger (DIN), une caractéristique importante a été mise en évidence. Le Niger apporte plus de ressource hydrique au DIN, mais c'est le Bani qui impose le signal des dates de passage des maxima de crue de Mopti jusqu'au delta aval : les dates de passage sont d'autant plus tardives que la valeur du débit maximum journalier du Bani est élevée. Il est cependant encore difficile d'expliquer cette influence du fleuve Bani.

Le programme AMMA, piloté par l'IRD entre 2003 et 2010, a permis d'améliorer la connaissance sur les mécanismes et les forçages de la variabilité climatique en Afrique de l'Ouest. Cependant, cette connaissance ne permet pas encore de faire des simulations/prospectives fiables dans l'avenir.

- pour ce qui concerne les pluies, les résultats des modèles climatiques sont contradictoires et le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) ne donne aucune tendance fiable dans le futur, sauf une probable augmentation des événements extrêmes. Toutefois, on estime qu'au niveau de l'Afrique de l'Ouest dans la bande sahélienne, les pluies pourraient augmenter en moyenne à l'est et diminuer en moyenne à l'ouest d'ici 2100 ;
- à cette incertitude sur l'estimation des ressources en eau dans le futur, s'ajoutent beaucoup d'autres incertitudes qui résultent de nombreuses étapes (scénarisation climatique et scénarisation hydrologique), plus incertaines les unes que les autres, et qui conduisent à des résultats en termes d'écoulement qui ne sont pas fiables ;

- concernant les températures, il est raisonnable de penser qu'elles devraient continuer à augmenter si rien n'est fait pour y remédier à un niveau mondial.

Cette variabilité hydroclimatique (et sa forte incertitude) à venir est problématique car elle concerne directement la sécurité des populations en termes d'inondations, de sécheresse et d'alimentation. Cette variabilité doit être prise en compte en termes d'impact et de mode de gestion, à l'avenir mais aussi dès maintenant.

Depuis peu, la problématique des inondations urbaines intéresse à la fois des ingénieurs mais aussi des chercheurs. Les connaissances à ce sujet sont rares et anciennes (les travaux de l'IRD datent de la fin des années 1980, début des années 1990). Au vu de l'urbanisation galopante que connaît le Mali et les autres pays de la région, c'est un sujet qu'il va falloir aborder rapidement afin de trouver comment atténuer ce phénomène ou comment s'y adapter pour éviter des catastrophes comme à Ouagadougou au Burkina Faso le 1^{er} septembre 2009.

De même, la qualité de l'eau n'est pas suivie à l'échelle du bassin. Le développement économique et l'urbanisation sont pourtant sources de pollutions qui peuvent devenir des menaces pour le socio-écosystème du bassin du fleuve Niger.

Enfin, il est important de souligner que la connaissance des ressources en eau du Mali et du bassin du fleuve Niger nécessite une connaissance de ce qu'il se passe en Guinée Conakry où prend naissance le fleuve, puisque tout ce qui s'y fait aura un impact en aval. Cela concerne les infrastructures hydrauliques (barrages), mais aussi l'occupation des sols qui joue un rôle majeur dans la transformation de la pluie en ruissellement, évaporation et infiltration.

6.1.1.2. EVOLUTIONS ET IMPACTS DES USAGES AGRICOLES DE L'EAU

L'agriculture pluviale domine toutes les autres formes d'activités rurales dans le bassin du Niger et fournit 78% du volume total de produits agricoles. Adaptées à la pluviométrie, les cultures s'étagent en latitude en fonction des isohyètes, fournissant mils, sorghos, puis maïs vers le sud du Mali. Seulement 1 à 5% des terres agricoles sont irriguées dans le bassin, alors que la moyenne mondiale avoisine 20%. De larges périmètres en maîtrise totale de l'eau existent au Mali (117 000 ha) mais les systèmes traditionnels (culture de décrue, bas-fond, submersion libre) dominant en termes de superficie.

Le potentiel en terres est considérable et le plan d'investissement de l'Autorité du Bassin du Niger (ABN) prévoit la construction de grands barrages, dont Fomi/Moussako en Guinée, afin d'irriguer jusqu'à 400 000 ha supplémentaires en 2025.

Ces programmes d'aménagements pour l'irrigation visent à renforcer l'autosuffisance alimentaire, quand ils ne favorisent pas des besoins alimentaires étrangers. Cependant l'augmentation de prélèvements dans le fleuve pendant la saison sèche requiert la construction de nouveaux aménagements aux conséquences multiples, à la fois localement et en aval. Au Mali, de nouveaux aménagements sont nécessaires pour étendre l'irrigation en saison sèche à l'Office du Niger (ON) et pour produire de l'hydroélectricité. Mais ces aménagements réduiront l'étendue de la crue dans le DIN, et donc réduiront les moyens de subsistance des pêcheurs, éleveurs et agriculteurs, et affecteront la navigation et l'équilibre de l'écosystème.

La pêche et l'élevage constituent des activités importantes au Mali et dans le bassin. L'intensification de l'agriculture restreint l'accès aux pâturages et aux points d'eau, et engendre de nombreux conflits entre éleveurs et agriculteurs. Une application rigoureuse de la législation doit venir soutenir le pastoralisme. L'importance de la pêche (environ 62 500 pêcheurs dans le DIN et plus de 40% des apports protéinés pour la population des pays du bassin) est souvent sous-évaluée. L'adaptation des pêcheurs à une réduction de la superficie inondée dans le DIN, voire leur migration vers de nouveaux sites (retenues des barrages), est malheureusement peu étudiée.

De multiples scénarios de construction de nouveaux barrages et de gestion de ces barrages ont été envisagés dans la littérature. Des discussions entre tous les acteurs doivent permettre de décider quels objectifs (hydroélectricité, irrigation, navigation, pêches, écosystèmes...) doivent être priorités et comprendre aux dépens de quels

autres. Malgré les incertitudes dans les prévisions climatiques (notamment sur la pluviométrie), l'élévation de la température, la variabilité de la pluviométrie (incluant le démarrage tardif ou l'arrêt précoce de la saison des pluies, les périodes sèches...) et la multiplication des épisodes extrêmes augmenteront les difficultés qui pèsent sur l'agriculture au Mali. La croissance de la population et la demande en eau associée (pour l'alimentation, l'industrie, l'électricité...) amplifiera inexorablement la pression sur les ressources naturelles et les écosystèmes, et la vulnérabilité des populations rurales.

Ces pressions sur les ressources en eau accroissent l'urgence de mettre en œuvre une Gestion Intégrée des Ressources en Eau, locale et transfrontalière. Celle-ci doit reposer sur une évaluation participative des usages de l'eau et des activités à favoriser. Les efforts menés à l'échelle nationale mais également régionale, notamment le Centre de Coordination des Ressources en Eau (CCRE) de la Communauté Economique Des Etats de l'Afrique de l'Ouest (CEDEAO), sont à encourager. En parallèle, les stratégies pour réduire les impacts, favoriser la résilience et l'adaptation des populations doivent être soutenues. Une législation adaptée doit s'attacher à préserver les droits, notamment en matière d'accès à l'eau et à la terre, des paysans les plus pauvres.

En outre, si les barrages augmentent le potentiel de terres irrigables, ils n'augmentent pas la résilience de l'agriculture irriguée lorsque l'on prend en compte l'élévation future des températures (plus de problèmes phytosanitaires, rendements potentiels moins élevés...) et/ou l'insuffisance des ressources du fleuve pour irriguer ces terres supplémentaires, suite aux réductions de débits et/ou aux faibles crues certaines années. Plusieurs études mettent en avant la nécessité, du moins en parallèle, d'améliorer l'efficacité de l'irrigation et de réduire les pertes dans les canaux, même si ces pertes d'eau retournent dans le système (recharge de nappe) ou sont exploitées à l'aval, comme à l'ON.

De nombreux projets sont également essentiels pour soutenir la petite agriculture familiale au Mali, vu son importance en termes d'usagers. Ces petits aménagements et « la petite hydraulique », dans un continuum pluvial-irrigué, doivent atténuer le risque de mauvaises récoltes qui freine l'intensification. Les solutions incluent le développement d'irrigation de complément ou la sélection de semences plus tolérantes à la sécheresse ou plus précoces, par exemple, pour s'adapter au retard de démarrage de la saison des pluies ou aux séquences sèches pendant cette saison ; ou bien encore, un meilleur accès aux intrants, aux marchés, au crédit, à la formation, au stockage et à la transformation des productions qui amélioreraient la productivité de la petite agriculture familiale. Des interventions ont été menées avec succès pour améliorer la gestion de l'eau agricole, mais leur ampleur et leur diffusion demeurent limitées face au besoin considérable en matière de sécurité alimentaire chez les populations les plus vulnérables.

Des systèmes d'alerte précoce doivent aussi contribuer à réduire l'impact d'événements extrêmes (sécheresses et inondations).

Une bonne gouvernance est faite pour favoriser, de manière participative, un partage équitable des ressources naturelles et un développement durable.

6.1.1.3. CADRE INSTITUTIONNEL ET JURIDIQUE DE GESTION DE L'ACTIVITE LIEE AU FLEUVE NIGER

L'actuel Code de l'eau a eu le mérite de poser les jalons d'une gestion durable et intégrée des ressources en eau au Mali. Il faut cependant noter qu'il existe encore des incohérences et des insuffisances par rapport au document de politique nationale de l'eau.

De profondes mutations dans le secteur de l'eau au Mali sont engagées depuis une décennie, mais de multiples acteurs interviennent à diverses échelles sans coordination suffisante. On ne compte aujourd'hui pas moins d'une douzaine de départements ministériels directement ou indirectement concernés par le secteur de l'eau : ce sont notamment ceux de l'agriculture, des collectivités territoriales, des transports, de l'élevage, de la pêche, de l'environnement, de la santé, de l'industrie, de la coopération internationale... La multiplicité des acteurs aurait pu être un facteur positif si un minimum de concertation existait, mais on a simplement affaire à un « millefeuille » institutionnel.

6.1.2. Rappel des recommandations de l'expertise 2007 et constat 10 ans après

L'expertise de 2007 avait permis de constater que (i) le fleuve était globalement peu aménagé, (ii) des investissements étaient nécessaires afin d'assurer l'approvisionnement en électricité du pays dans un proche avenir et (iii) le fleuve avait perdu une partie de sa biodiversité notamment dans le DIN.

Les recommandations formulées par les experts concernaient la collecte de données scientifiques, l'évaluation de l'impact de tout nouvel aménagement et les améliorations nécessaires du dispositif institutionnel. Le Tableau 31 est un état des lieux de ces recommandations de l'expertise 2007 et du constat que l'on peut faire 10 ans après. Le constat abrupt est que ces recommandations n'ont guère été suivies d'effet : les choses semblent ne pas avoir avancé, alors que les pressions sur le fleuve n'ont cessé de croître

- Un certain nombre de travaux a permis de faire avancer les connaissances scientifiques sur des sujets comme les mécanismes de la mousson africaine, le fonctionnement du DIN, l'impact du climat et des activités anthropiques... Mais ce n'est pas encore suffisant. De plus, la plupart de ces travaux de recherche n'ont été ni initiés suite aux recommandations de l'expertise, ni menés, pour leur majorité, à l'échelle de l'ensemble du pays mais à un niveau local. Le niveau des connaissances est très inégal selon les zones géographiques, alors que le Mali n'offre pas un terrain d'étude homogène. Il reste beaucoup à faire pour mieux décrire les processus, les écosystèmes, les systèmes de production et les usages et leurs impacts. Le développement d'un système d'informations et de modèles est toujours en cours et pénalise tous les travaux scientifiques qui seraient nécessaires.
- Le cadre institutionnel demeure un millefeuille institutionnel qui multiplie des acteurs toujours aussi peu coordonnés. Les acteurs de la société civile sont plus nombreux mais n'arrivent pas à se situer par rapport aux acteurs institutionnels et manquent de visibilité en raison de leur trop grand nombre et de leur gouvernance difficilement appréhendable.
- Le besoin d'options stratégiques équilibrées basées sur une approche intégrée a été compris mais il n'est guère suivi d'effet : les actions demeurent toujours locales.

La plupart des recommandations de l'expertise de 2007 restent d'actualité, même si elles peuvent être partiellement précisées.

Action proposée dans l'expertise de 2007 : Consolider la connaissance scientifique	Constat 10 ans après
- Sur l'évolution des états de surface du bassin dont les modifications peuvent conditionner la relation pluies/débits.	<ul style="list-style-type: none"> - Plusieurs études relatives à la caractérisation des états de surface sur le Bassin du Niger existent. Celles-ci adoptent des échelles spatiales différentes et la validation terrain demeure limitée. - Manque de données de terrain - Besoin de connaissances scientifiques supplémentaires (interactions surface-souterrain, évolution des coefficients de ruissellement...). - Pas d'études au niveau national.
- Sur les écosystèmes de la vallée du fleuve Niger, leur structure et les processus qui les animent, car ils évoluent constamment, en particulier sous la pression des usages et les études sur ces écosystèmes sont, pour certaines, incomplètes ou trop anciennes	<ul style="list-style-type: none"> - Connaissances sur les Mécanismes et forçages de la variabilité climatique du bassin du Niger ont progressé grâce au programme scientifique AMMA (2003-2010) - Etudes relatives aux prévisions/prospectives sur le Bassin du Niger existent. <ul style="list-style-type: none"> Etudes qui nécessitent des données terrain de bonne qualité. Etudes pas réalisées dans le but de répondre à cette recommandation du collègue d'expert. Pas d'études au niveau national. Besoin de connaissances scientifiques supplémentaires sur l'impact du climat et des activités humaines. - Description des écosystèmes insuffisantes - Description des systèmes d'usage du fleuve insuffisantes. - Description des besoins et de leurs impacts (quantité et qualité) - Manque de données suffisantes - Manque d'organisation des données - Manque de travaux sur la qualité des eaux du fleuve
- Sur les systèmes de production. Sur certains de ces systèmes (pêche, riziculture irriguée...), les connaissances accumulées sont importantes mais elles ne doivent pas rester figées. Sur d'autres, les connaissances sont imprécises ou trop anciennes (élevage, système rizicole pluvio-fluvial...)	<ul style="list-style-type: none"> - Statistiques nationales/régionales incomplètes et non vérifiées - Manque de données de terrain - Connaissances limitées sur les évolutions et stratégies d'adaptation des communautés (agriculteurs, pêcheurs, éleveurs) faces aux changements (sécheresses, barrages de Talo, Djenné...)
- Sur les usages de l'eau, « grands » et « petits »	<ul style="list-style-type: none"> - Estimations dans les études s'appuient surtout sur une estimation en 2007 par ABN et BRLi des prélèvements. Besoin de mise à jour. - Manque de données de terrain sur les grands et petits systèmes
- Utiliser les développements en matière de systèmes d'information (SI) et de modèles.	<ul style="list-style-type: none"> - Mise en place par l'ABFN d'une base de données des projets sur le fleuve Niger au Mali. - Lancement d'un Programme National de Sauvegarde du Fleuve Niger qui est sensé fédérer toutes les actions sur le fleuve Niger. - Beaucoup de projets qui se sont succédés : GIRENS (Gestion Intégrée des Ressources en eau du Niger Supérieur), GHENIS (Gestion Hydro-Écologique du Niger Supérieur) avec de nombreux résultats/recommandations - Manque de concertation entre les différents acteurs - Manque de vision globale prônée par les recommandations de l'expertise de 2007 - Développements nécessaires sur différents thèmes : réseaux de mesures, modélisation hydrologique et hydraulique (fleuve et DIN), systèmes d'alerte de crues, SIG, suivi des dégradations environnementales dans le bassin, développement de BD hydro-écologique...

Action proposée dans l'expertise de 2007 : Poursuivre les évolutions du cadre institutionnel	Constat 10 ans après
<p>- Clarifier, tant au plan national qu'au plan international, les relations entre les institutions chargées spécifiquement de la gouvernance de l'eau.</p> <p>- Redynamiser les collaborations entre, d'une part les organismes nationaux qui ne doivent pas être dépossédés de leurs rôles et, d'autre part, l'instance de coopération internationale qui doit clairement assumer son rôle, si besoin est, de fédérateur et d'arbitre.</p>	<p>- La nécessité de proposer une gouvernance de l'eau se heurte toujours à un environnement institutionnel peu favorable. La gestion de l'eau relève des compétences de nombreuses institutions et les mécanismes de coordination nécessaires sont inexistants ou peu fonctionnels. Aujourd'hui, il existe plusieurs incohérences et dysfonctionnements du cadre institutionnel de gestion de l'eau au Mali. Ce sont :</p> <ul style="list-style-type: none"> La multiplicité des acteurs et l'insuffisance de coordination ; Les conflits de compétences nés de la duplication et de l'interférence entre les missions L'inadéquation des missions actuelles du gestionnaire de l'eau avec le code de l'eau, la décentralisation et la GIRE ; Le transfert de compétences de l'Etat aux Communes sans transfert de ressources L'insuffisance de ressources humaines, matérielles et financières aux niveaux local, régional et national ; L'insuffisance de clarification des rôles des organes consultatifs et la non application du code de l'eau par l'administration en charge des ressources en eau
<p>- La société civile doit pouvoir peser davantage sur les décisions concernant les usages de l'eau et sur les orientations stratégiques.</p>	<p>- Les associations d'usagers du fleuve Niger sont très nombreuses notamment dans les Cercles de Ségou et de Mopti. Cependant elles ne sont pas encore bien structurées et ont du mal à s'imposer aux côtés des autres acteurs impliqués dans la gouvernance de l'eau.</p>
<p>- Privilégier une approche globale et intégrée pour la gestion du fleuve Niger.</p>	<p>- Des initiatives souvent indépendantes et non concertées ont permis d'avancer sur quelques questions scientifiques. Le développement de modèles bute toutefois sur l'absence de données (MNT précis du DIN, données hydro pour calibration/validation, données sur prélèvements, relations débits et usages/services écosystémiques...) et les incertitudes liées au développement de scénarios (climat, aménagements).</p>

Action proposée dans l'expertise de 2007 : Éléments pour des options stratégiques équilibrées	Constat 10 ans après
<p>- Privilégier une approche globale et intégrée pour la gestion du fleuve Niger.</p>	<p>- Des initiatives souvent indépendantes et non concertées ont permis d'avancer sur quelques questions scientifiques. Le développement de modèles bute toutefois sur l'absence de données (MNT précis du DIN, données hydro pour calibration/validation, données sur prélèvements, relations débits et usages/services écosystémiques...) et les incertitudes liées au développement de scénarios (climat, aménagements).</p>

TABLEAU 31 : SYNTHÈSE DES RECOMMANDATIONS DE L'EXPERTISE 2007 ET CONSTAT 10 ANS APRÈS

La dégradation du climat sécuritaire au Mali peut évidemment être mise en avant par les autorités maliennes pour expliquer cet immobilisme. Mais ce n'est ni la seule raison, ni la plus prépondérante, ce qui est problématique. La volonté politique malienne ne semble pas assez présente, alors qu'elle devrait guider la mise en place d'un interlocuteur principal malien pour toutes questions qui intéressent le bassin du fleuve Niger.

6.2. Propositions et recommandations pour les années à venir

Les recommandations de l'expertise de 2007 venaient en réponse à un certain nombre de problèmes identifiés qui semblaient pénaliser une gestion efficace de l'environnement et des ressources naturelles du bassin du fleuve Niger. Quatre catégories de problèmes avaient ainsi été cernées autour « d'intersections entre des dynamiques de forçage (telles que le climat), des dynamiques de certaines ressources vivantes, des dynamiques d'usage, voire des dynamiques sociétales et institutionnelles ». Les trois premières catégories avaient trait (i) aux « risques d'aléas » sur lequel l'homme n'a pas de contrôle, (ii) à des « tensions » sur le partage de l'eau et des ressources où l'homme a une part plus ou moins grande de responsabilité, et (iii) à des « menaces » qui pourraient peser dans le futur. La quatrième catégorie concernait les « difficultés institutionnelles » du Mali, qui renvoient « à l'épineuse question de l'amélioration du système de gouvernance dont on attend, justement qu'il parvienne à faire en sorte que les hommes ne se mettent pas en situation de vulnérabilité par rapport à l'environnement et qu'ils s'entendent entre eux pour le partage de ses richesses ».

Le fleuve Niger est une « artère vitale » du Mali, mais il est de morphologie multiple par ses caractéristiques morphodynamiques et hydroclimatiques, par ses usages qui évoluent le long de son cours, et par les populations qui habitent sur ses rives et l'exploitent. Il concentre au Mali des questions de développement qui se posent dans toute l'Afrique de l'Ouest et qui requièrent de plus en plus l'intervention de multiples disciplines, des sciences dites exactes et des sciences humaines et sociales.

6.2.1. Besoins et thématiques de recherche

Au cours du travail d'actualisation de l'expertise 2007, un problème a rapidement émergé : les données. Elles sont trop disparates, de qualité inégale, inégalement réparties dans l'espace et dans le temps... insuffisantes. Si on veut avancer en termes de connaissances, il faut appuyer les services nationaux qui assurent les mesures, pas seulement hydrologiques et climatiques, mais aussi environnementales, sociales, sociétales, de santé humaine... Il faut imaginer la mise en place d'observatoires multidisciplinaires, supports de développement de recherches fondamentales et appliquées, et donc représentatifs des différentes conditions santé-éco-socio...hydro-climatologiques que connaît le pays. Ces observatoires sont non seulement des outils pour la connaissance mais aussi des témoins des changements globaux qui ont lieu. Ils peuvent à la fois répondre à des questionnements finalisés et immédiats, mais aussi à des questionnements de recherche à moyen et à long termes. Ils doivent exister en complément des réseaux nationaux d'observations, lesquels doivent être maintenus, optimisés, développés en fonction des besoins. L'ensemble de ces données doit être partageable et accessible à tous.

Améliorer les données

- récupérer, voire sauver, des données collectées mais dispersées çà et là auprès de différents projets et institutions ;
- créer et/ou renforcer des réseaux d'observations multidisciplinaires (santé, écologie, environnement, société, hydrologie, climatologie) pour compléter les réseaux nationaux de mesure ;
- optimiser les réseaux nationaux de mesures hydroclimatiques et les statistiques nationales (productions agricoles, rendements, prélèvements...);
- mener régulièrement des inventaires de la biodiversité à l'échelle nationale ;
- obtenir une topographie à haute résolution et précision du fleuve et notamment le DIN (LIDAR, profils en travers, bathymétrie...) pour améliorer la modélisation hydraulique ;

- étudier l'apport des nouvelles technologies de mesures des pluies (satellite, radar, réseau téléphonique...) et de débits (interférométrie spatiale des hauteurs d'eau, suivi optique et radar des surfaces en eau) ;
- comparer les grilles de données hydroclimatiques issues d'observations de terrain et de produits satellites ou dérivés ;
- développer des systèmes d'information pour organiser les données.

Améliorer les connaissances

- améliorer la prévision hydrométéorologique et favoriser son utilisation à la gestion de l'eau (inondations, sécheresses), de l'agriculture, de la santé, de la qualité de l'eau ;
- réaliser des outils de simulation pour la gestion intégrée des ressources et l'aide à la décision dans le bassin du fleuve Niger : modèle hydraulique de l'ensemble du fleuve, modèle des usages de l'eau et modèles locaux communiquant avec les précédents et adaptés à des problématiques particulières ;
- développer/améliorer un outil de prédiction des inondations dans le DIN ;
- mener une étude plus poussée sur le fonctionnement hydrologique du DIN afin de mieux identifier les causes de l'influence du Bani sur le DIN, notamment sur la date de passage du pic de crue ;
- développer des outils de négociations entre les différents acteurs pour l'usage d'une ressource, d'un espace.... Ce peut être des modèles de type Systèmes Multi Agents qui peuvent, grâce à leur très grande souplesse d'utilisation, simuler un grand nombre de scénarios possibles ;
- étudier l'impact de la variabilité climatique et environnementale sur les ressources en eau et sur leurs extrêmes ;
- étudier l'impact des aménagements (barrages, prélèvements, changements d'occupation du sol) sur les ressources en eau et sur leurs extrêmes ;
- améliorer la modélisation hydraulique du DIN et modéliser l'impact des changements climatiques et anthropiques sur les services écosystémiques ;
- étudier la vulnérabilité des biens et personnes aux inondations en milieu rural et urbain ;
- actualiser les normes hydrologiques (formules et modèles) de dimensionnement d'ouvrages hydroélectriques et hydroagricoles pour tenir compte des évolutions du climat et des bassins ;
- optimiser le développement et la gestion des grandes infrastructures hydrologiques (efficience des Aménagements Hydro-Agricoles, des grands barrages / petite agriculture, petits aménagements / Développement et gestion de l'irrigation...) ;
- analyser l'évolution de la santé du bassin du fleuve Niger (faune, flore, qualité des eaux) et améliorer la gestion des déchets (pollution urbaine et industrielle, eaux usées...) ;
- améliorer le suivi et la représentation des écoulements urbains dans un contexte de changement climatique et d'urbanisation galopante ;
- utiliser les données disponibles à un niveau local et réaliser un changement d'échelle au niveau du bassin (concept de transfert d'échelles) ;
- étudier l'évolution des eaux souterraines et leurs interactions avec les eaux de surface ;
- étudier l'évolution des dunes (et interaction avec les zones cultivées) ;

- analyser l'évolution de l'érosion et l'ensablement ;
- analyser l'impact des pollutions urbaines et industrielles ;
- étudier le développement de l'orpaillage et ses impacts sur l'environnement et la société ;
- étudier les « sociétés du fleuve » et leur évolution au cours du temps.

Pour une meilleure communication et partage des connaissances

- informer (et/ou impliquer) l'ABN des projets de développement et des recherches ;
- élaborer des cadres de concertation (ateliers, forums, colloques...) entre décideurs, société civile, chercheurs, bureau d'études, ONG... :
 - informer les acteurs des activités de recherche afin de multiplier les collaborations, synergies... ;
 - favoriser l'échange d'expérience entre les acteurs ;
 - soutenir les réseaux de la société civile au niveau national ;
 - sensibiliser les acteurs sur l'objectif de la vision partagée (plan stratégique) ;
 - renforcer la communication entre usagers et opérateurs techniques (organismes nationaux, société civile...).
- centraliser, capitaliser et diffuser (via plateformes) les informations et les données.

6.2.2. Recommandations générales pour la gestion du fleuve au Mali

Il semble essentiel que le Mali désigne un interlocuteur unique pour toutes les questions qui concernent le bassin du fleuve Niger, et qu'il lui donne un poids suffisant pour qu'il puisse répondre aux nombreuses attentes de la population. Cet interlocuteur pourrait être l'Agence (maliennne) de Bassin du Fleuve Niger (ABFN) qui existe dans les textes mais qui nécessite des ressources humaines, un renforcement des compétences et une plus grande autonomie financière pour remplir pleinement son rôle.

Le rôle de l'ABFN doit être double :

- Au niveau national, elle doit être la plaque tournante entre l'Etat, ses ministères et directions/agences/offices multiples, les bailleurs, les scientifiques et les bureaux d'études. Elle doit centraliser tout ce qui est lié aux observations et à la connaissance, elle doit fédérer tous les projets qui concernent le bassin... Il faut lui donner les moyens d'exister pour qu'elle soit force de proposition pour l'Etat malien, quel que soit l'objet abordé à partir du moment qu'il concerne le bassin du fleuve. Il est important de préciser qu'elle doit coordonner et orienter les projets des différentes coopérations qui interviennent au Mali afin d'éviter les redondances/concurrences.
- Au niveau régional, elle doit être la courroie de transmission entre l'Etat malien et l'Autorité du Bassin du fleuve Niger (ABN) qui a pour objectif de favoriser la coopération régionale dans la gestion et la mise en valeur des ressources du bassin du fleuve Niger. Ces échanges doivent se faire dans les deux sens. La vision intégrée et partagée ne doit pas se faire qu'à l'échelle du pays, elle est nécessairement transfrontalière.

Il est important que le rôle respectif de l'ABFN et de l'ABN soit clarifié et distingué afin que ces deux agences soient complémentaires et non en concurrence, comme cela apparaît aujourd'hui. Ce travail doit se faire parallèlement au sein de l'ABN en concertation avec les structures concernées des pays riverains. Pour ne citer qu'un exemple, la gestion des réseaux de mesures doit être faite par les services maliens concernés avec une transmission des données à l'ABN qui doit être seulement dépositaire des données à un niveau régional. Il semble qu'il y ait trop souvent confusion à ce niveau-là. L'ABN peut aider les services nationaux en termes d'équipement et de gestion, mais seulement d'un point de vue financier, voire organisationnel ; le Mali devrait être seul décisionnaire. Pour aider les services nationaux, on pourrait imaginer que l'ABN paye une redevance aux pays riverains pour les données obtenues. Au Mali, cette redevance serait gérée par l'ABFN pour renforcer les services nationaux et le parc d'observations si nécessaire.

En résumé, il faut :

- une volonté politique d'identifier un interlocuteur principal malien, a priori l'ABFN, pour tout ce qui concerne le bassin du fleuve Niger ;
 - mettre en place un mécanisme de financement de cette structure ;
 - faire du lobbying afin d'obtenir des financements pérennes pour la collecte de données et pour des projets de recherche/développement ;
 - coordonner et orienter les collaborations entre les coopérations intervenant au Mali afin d'éviter les projets redondants ;
- favoriser la collaboration entre les structures maliennes pour coordonner les activités (recherches, aménagements...) :
 - mettre en place des outils de gestion des projets, des recherches et des données sur le bassin (système d'informations) ;
 - mettre à jour régulièrement les données existantes sur l'ensemble du bassin, quelle que soit la discipline concernée :
 - optimiser les réseaux nationaux de mesure ;
 - mettre en place des observatoires qui soient représentatifs des conditions santé-éco-socio...hydro-climatologiques du Mali.
 - mettre à jour régulièrement un inventaire des projets existants sur le bassin et favoriser la coordination entre les projets existants ;

- o mettre à jour régulièrement une synthèse des recherches réalisées et inventorier les projets de recherche en cours au niveau du bassin ;
- o identifier des priorités de recherche :
 - baser les recherches sur les priorités des Objectifs du Développement Durable ;
 - renforcer la recherche basée sur les demandes d'acteurs (bailleurs, acteurs techniques du développement) / Favoriser les approches combinant recherche et développement (éviter le cloisonnement recherche et développement) ;
 - créer des cadres de coopération favorable entre fournisseurs de données et projets de recherche ;
 - veiller à l'implication de tous les types d'acteurs dans la mise en œuvre des projets de recherche ;
 - veiller à l'intégration des questions de formation dans les projets de recherche (formation par la recherche, formation continue ;
 - définir les principaux verrous scientifiques nécessaires à la mise en place des prochains grands projets de développement.
 - diffuser les résultats des projets de recherche auprès des populations par le biais d'opérateurs intermédiaires (ex : sensibilisation/éducation par les ONG) ;
 - produire des outils finalisés d'aide à la décision (modèles de simulation).

7. BIBLIOGRAPHIE

ABN (2007) Atlas – Bassin du Niger, WWF – Wetlands – UNOPS, ABN, Niamey, Niger

ABN et BRLi (2007) Evaluation des prélèvements et des besoins en eau pour le modèle de simulation du bassin du Niger. Rapport définitif, 143 p.

ABN et BRLi (2007) Elaboration du modèle de gestion du bassin du Niger - Rapport final - Annexe - Manuel du modèle de référence. Résumé, ABN, BRLi, 146 p., 54 p. et 8 p.

ABN et BRLi (2007) Elaboration du Plan d'Action de Développement Durable du Bassin du Niger - Phase I : Bilan-Diagnostic. Rapport définitif, 418 p. Phase II : Schéma directeur d'aménagement et de gestion. Rapport définitif, 332 p.

ABN, Min. Mines Energie Hydraul. (Guinée), UE, COYNE ET BELLIER, Guide S.A., I-Mage Consult (2009) Projet d'aménagement du barrage de Fomi - Etude d'impact environnementale et sociale. Rapport d'étude d'Impact (rapport provisoire), 809 p.

ABN (2012) Investment plan and formulation of investment projects necessary for implementing the shared vision.

Adamczewski A., Hertzog T., Dosso M., Jouve P., Jamin J.-Y. (2011) L'irrigation peut-elle se substituer aux cultures de décrue? Cahiers Agricultures, 20 : 97-104.

Adamczewski A., Hertzog A. (2016) Sécurisation des producteurs des périmètres irrigués de Sélingué et Maninkoura. Les réalités de la mise en application des textes de gestion des espaces irrigués de Sélingué et Maninkoura. GWI.

AECOM (2017) Actualisation de l'étude d'impact environnemental et social du barrage à buts multiples de Fomi en Guinée, Phase 1: « Scoping » pour déterminer la configuration du barrage de Fomi. Commissionné par Ministère de l'Agriculture, Direction Nationale du Génie Rural, Rapport provisoire de la Phase 1 Novembre 2017.

Aich V., Koné K., Hattermann F.F., Paton E.N. (2016) Time Series Analysis of Floods across the Niger River Basin. *Water*, 8, 165; doi:10.3390/w8040165 www.mdpi.com/journal/water

Aich V., Liersch S., Vetter T., Andersson J.C.M., Müller E.N., Hattermann F.F. (2015) Climate or Land Use? Attribution of Changes in River Flooding in the Sahel Zone. *Water*, 7, 2796-2820; doi: 10.3390/w7062796

Aich V., Liersch S., Vetter T., Fournet S., Andersson J. C., Calmanti S., van Weert, F.H., Hattermann, F.F., et Paton, E. N. (2016) Flood projections within the Niger River Basin under future land use and climate change. *Science of The Total Environment*, 562, 666-677.

Aich V., Liersch S., Vetter T., Huang S., Tecklenburg J., Hoffmann P., Koch H., Fournet S., Krysanova V., Müller E.N., Hattermann F.F. (2014) Comparing impacts of climate change on streamflow in four large African river basins. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(4), 1305-1321.

Albergel J. (1987) Sécheresse, désertification et ressources en eau de surface—Application aux petits bassins du Burkina Faso. In *The Influence of Climate Change and Climatic Variability on the Hydrologic Regime and Water Resources*; International Association of Hydrological Sciences (IAHS): Wallingford, UK, Volume 168, pp. 355–441.

Alfari I., Botoni E., Soulé A., Cotillon S., Cushing M.W., Giese K., Hutchinson J., Pengra B., Tappan G., Herrmann S., Tchamou N. (2016) Les paysages de l'Afrique de l'Ouest - Une fenêtre sur un monde en pleine évolution, USAID, CILSS, USGS, 236 p.

Ali A. et Lebel T. (2009) The Sahelian standardized rainfall index revisited. *International Journal of Climatology*, 29, 1705–1714 ; doi:10.1002/joc.v29:12

- Amogu O., Esteves M., Vandervaere J.-P., Malam Abdou M., Panthou G., Rajot J.-L., Souley Yéro, K., Boubkraoui S., Lapetite J.-M., Dessay N. *et al.* (2014) Runoff evolution due to land-use change in a small Sahelian catchment. *Hydrol. Sci. J.*, 60, 78–95.
- Angelina A., Gado Djibo A., Seidou O., Seidou Sanda I., Sittichok K. (2015) Changes to flow regime on the Niger River at Koulikoro under a changing climate. *Hydrological Sciences Journal*, 60(10), 1709-1723
- Ardoin S. *et al.* (2003) Analyse de la persistance de la sécheresse en Afrique de l'ouest: caractérisation de la situation de la décennie 1990. In: *Hydrology of the international symposium held at Montpellier. April 2003*. IAHS Publ. no. 278. 223–228. *Mediterranean and Semiarid Regions (Proceedings of an international symposium held at Montpellier. April 2003)*. IAHS Publ. no. 278. 223–228.
- Aurouet A., Ferry L., Cougny G. (principaux rédacteurs) (2017) Atlas de l'eau du massif du Fouta Djallon - Le Château d'eau de l'Afrique de l'Ouest / Fouta Djallon highland - Water atlas, CEDEAO (ECOWAS), BM, CIWA, AnteaGroup, 114 p.
- Auvray C. (1960) *Monographie du Niger, B : la cuvette lacustre*. Paris: Orstom.
- Bachelot N. (2010) *Le Motopompage en aval du barrage de Sélingué : l'expérience individuelle et spontanée de l'irrigation contrôlée dans la vallée du Sankarani au Mali. Mémoire de Master 1 de l'Univ. de Lyon 3 (Jean Moulin)*, 71 p.
- Bachelot N. (2011) *Stratégies paysannes d'occupation du sol en aval du barrage de Sélingué (Mali)*. Univ. J. Moulin (Lyon 3), IRD, Mémoire de Master de l'Univ. de Lyon 3 (Jean Moulin), master 2, 62 p.
- Bader J.-C., Piedelievre J.P., Lamagat J.P. (2006) Seasonal forecasting of the flood volume of the Senegal River based on results of the ARPEGE Climate model. *Hydrological Sciences Journal*, 51 (3), 406-417.
- Balme M., Galle S., Lebel T. (2005) Démarrage de la saison des pluies au Sahel : variabilité aux échelles hydrologique et agronomique, analyse à partir des données EPSAT-Niger. *Sécheresse*, 16 (1), 15-22.
- Barbier B., Yacouba H., Maïga A.H., Mahé G., Paturel J.-E. (2009) Le retour des grands investissements hydrauliques en Afrique de l'Ouest : les perspectives et les enjeux. *Geocarrefour*, VOL 84-1-2/2009, 31-41
- Barry A.A. *et al.* (2018) West Africa climate extremes and climate change indices. *International Journal of Climatology* ; doi:10.1002/joc.5420
- Bassot J.-P., Diallo M.M., Traoré H., Méloux J. (1980) *Carte géologique au 1:1 500 000 de la République du Mali avec notice*, DNGM (Mali), BRGM, FAC, A0 et 143 p.
- Bazin F. (2017) *Analyse des systèmes de production du périmètre irrigué de Sélingué (Mali)*. GWI.
- Bélières J.-F., Hilhorst T., Kébé D., Keita M.S., Keita S., Sanogo O. (2011) Irrigation et pauvreté : le cas de l'Office du Niger au Mali. *Cahiers Agricultures*, 20 (1-2), 144-149.
- Beniston, Stephenson (2004) Extreme climatic events and their evolution under changing climatic conditions. *Global and Planetary Change* 44, 1–9
- Bhaduri A., Ringler C., Dombrowski I., Mohtar R., Scheumann W. (2015) Sustainability in the water–energy–food nexus. *Water International*, 40, 723-732

- Bodian A. (2014) Caractérisation de la variabilité temporelle récente des précipitations annuelles au Sénégal (Afrique de l'Ouest). *Physio-Géo* [En ligne], Volume 8 : 297-312 ; doi : 10.4000/physio-geo.4243.
- Bouféév Y. (2006) Carte géologique de la Guinée au 1:500 000, Min. Mines, Géologie, Environnement (Guinée), A0
- Brandt M., Verger A., Diouf A.A., Baret F. et Samimi C. (2014) Local Vegetation Trends in the Sahel of Mali and Senegal Using Long Time Series FAPAR Satellite Products and Field Measurement (1982–2010). *Remote Sensing*, 6, 2408-2434; doi:10.3390/rs6032408
- Bricquet J.-P., Bamba F., Mahé G., Touré M., Olivry J.-C. (1997) Evolution récente des ressources en eau de l'Afrique atlantique. *Revue des Sciences de l'eau*, 10, 3, 321-337.
- BRLi et DHI (2007) Establishment of a water management model for the Niger River Basin, Final Report. Niamey, Niger.
- BRLi et BETICO (2014) Etude du Programme d'aménagement hydroagricole de la zone Office du Niger. Phase I. Etat des lieux, version provisoire.
- Brown C., Ghile Y., Laverty M., Li K. (2012) Decision scaling: Linking bottom-up vulnerability analysis with climate projections in the water sector. *Water Resources Research*, 48(9).
- Brunet-Moret Y., Chaperon P., Lamagat J.-P., Molinier M. (1986) Monographie hydrologique du fleuve Niger - Tome I : Niger supérieur - Tome II : Cuvette lacustre et Niger moyen - Annexe : Débits moyens journaliers, IRD, Monographie hydrologique de l'IRD (ORSTOM), n° 8, Tome I : 410 p., Tome II : 521 p., Annexe : 1674 p.
- Casenave A. et Valentin C., (1988). Les états de surface de la zone sahélienne. Influence sur l'infiltration. CEE / ORSTOM, multigr. Paris, 202 pp.
- Cassé C. (2015) Impact du forçage pluviométrique sur les inondations du fleuve Niger à Niamey. Etude à partir de données satellitaires et in-situ. Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, 260 p.
- Cassé C., Gosset M. (2015) Analysis of hydrological changes and flood increase in Niamey based on the PERSIANN-CDR satellite rainfall estimate and hydrological simulations over the 1983-2013 period. *Proc. IAHS*, 370, 117-123.
- Cassé C., Gosset M., Peugeot C., Pedinotti V., Boone A., Tanimoun B.A., Decharme B. (2015) Potential of satellite rainfall products to predict Niger River flood events in Niamey. *Atmospheric Research*, 163, 162–176
- Clanet J.-C. et Ogilvie, A. (2014) Eau, agriculture et pauvreté dans le bassin du Niger, Atlas, Agropolis Editions, 96p. ISBN : 978-2-909613-49-9
- Collerie M. (2008) Etude et cartographie des sites d'extraction et de dépôt de sable et graviers sur le Niger entre Ségou et Kona et sur le Bani entre Douna et Mopti, UNESCO, CE, IRD, UMR G-EAU, Univ. François Rabelais (Tours), IMACOF, Mémoire de Master de l'Univ. de Tours (François Rabelais), master 1, 38 p.
- Collerie M. (2010) Approche préliminaire de la dynamique sédimentaire du fleuve Niger, de Banankoro à Markala au Mali, IRD, UMR G-EAU, Univ. François Rabelais (Tours), UNESCO, CE, Région Centre (France), MAE (France), Mission Val de Loire, Mémoire de Master de l'Univ. de Tours (François Rabelais), master 2, 88 p.
- Conway D.P., Persechino A., Ardoin-Bardin S., Hamandawana H., Dieulin C., Mahé G. (2009) Rainfall and river flow variability in sub-Saharan Africa during the 20th century. *Journal of Hydrometeorology*, 10, 1, 41-59.

Daget J. (1988) Évaluation et gestion rationnelle des stocks, IRD (ex ORSTOM), in Biologie et écologie des poissons d'eau douce africains - Biology and ecology of african freshwater fishes (C. Lévêque, M.N. Bruton, Ssentongo G.W., ORSTOM, 1988, 490 p.), p. 381-393

De la Croix K. (2007) De la ville au champ : l'incidence de la petite mécanisation agricole dans la région de Ségou (Mali), IRD, Univ. Paris X, UMR G-EAU, Mémoire de Master de l'Univ. Paris X (Nanterre), master 1, 117 p.

De la Croix K. (2015) Les Territoires-temps des communautés de pêcheurs bozo et somono sur le Niger supérieur (Mali, Guinée), Univ. Paris X, UMR G-EAU, Thèse de l'Univ. de Nanterre (Paris X), 483 p.

De la Croix K., Dao A., Ferry L., Landy F., Muther N., Martin D. (2014) Les systèmes de pêches collectives fluviales somono dans le Manden (Mali) - Un révélateur territorial et social unique en sursis sur le Niger supérieur, PUB, LGPA, Dynamiques Environnementales - Jour. internat. géosci. environ., 2d sem. 2013, n° 32, Chemins et territoires de l'eau dans les pays de la ceinture tropicale - Ressources et patrimoines (sous la direction de L. Ferry et M. Mietton), 220 p., 2014, p. 125-143

De la Croix K., Ferry L., Landy F., Traoré B., Muther N., Tangara B., Martin D. (2013) Quelle « place » pour des pêcheurs urbains ? Le cas de Bamako (Mali), CyberGéo, 34 p.

De Noray M. L. (2003) Delta intérieur du fleuve Niger au Mali—quand la crue fait la loi: l'organisation humaine et le partage des ressources dans une zone inondable à fort contraste. VertigO-la revue électronique en sciences de l'environnement, 4(3).

Déqué M., Calmanti S., Christensen O.B., Aquila A.D., Maule C.F., Haensler A., Nikulin G., Teichmann C. (2017) A multi-model climate response over tropical Africa at +2°C. Climate Services 7(2017) 87–95 ; <http://dx.doi.org/10.1016/j.cliser.2016.06.002>

Descroix L., Bouzou Moussa, I., Genthon, P., Sighomnou, D., Mahé, G., Mamadou, I., Vandervaere, J.P., Gautier, E., Maiga, O.F., Rajot, J.L., Malam Abdou, M., Dessay, N., Ingatan, A., Noma, I., Souley Yéro, K., Karambiri, K., Fensholt, R., Albergel, J., Olivry, J.C. (2013a). Impact of Drought and Land-Use Changes on Surface-Water Quality and Quantity: The Sahelian paradox. In: Current Perspectives in Contaminant Hydrology and Water Resources Sustainability, P.M. Bradley (Ed.), In Tech, Environmental Sciences, Croatia, ISBN 978-953-51-1046-0, DOI: 10.5772/54536

Descroix L., Diongue-Niang A., Dacosta H., Panthou G., Quantin G., Diedhiou A. (2013b) Evolution des pluies extrêmes et recrudescence des crues au Sahel. Climatologie, 10, 37-49.

Descroix L., Genthon P., Peugeot C., Mahé G., Malam Abdou M., Vandervaere J.-P., Mamadou I., Tanimoun B., Amadou I., Galle S., Vischel T., Quantin G., Dacosta H., Bodian A., Nazoumou Y., Zannou A. (2015) Paradoxes et contrastes en Afrique de l'Ouest : Impacts climatiques et anthropiques sur les écoulements. Géologues, 187 : 47-52.

Descroix L., Lambert L., Barry A., Dacosta H., Mendy A., Faty B., Mahé G., Diakite M., Konate, L. (2018) Coefficients de tarissement et vidange des zones humides des montagnes de Guinée. 3ème conférence internationale sur l'hydrologie des grands fleuves d'Afrique, FRIEND/UNESCO/IHP – IAHS, 6-8 May 2018, Alger.

Descroix L., Mahé G., Lebel T., Favreau G., Galle S., Gautier E., Olivry J.-C., Albergel J., Amogu O., Cappelaere B., Dessouassi R., Diedhiou A., Le Breton E., Mamadou I., Sighomnou D. (2009) Spatio-Temporal variability of hydrological regimes around the boundaries between Sahelian and Sudanian areas of West Africa: a synthesis. J. of Hydrology, 375, 1-2, 90-102.

Descroix L. *et al.* (2012) Change in Sahelian Rivers hydrograph: the case of recent red floods of the Niger River in the Niamey Region. Global Planetary Change, 98-99, 18–30. doi:10.1016/j.gloplacha.2012.07.009

- Dessai S. *et al.* (2009) Do we need better predictions to adapt to a changing climate? *Eos, Transactions, American Geophysical Union*, 90, 111–112
- Diakité D. (1986) Mise au point sur le delta intérieur du Niger. Les fondements historiques du peuplement du Delta. L'exemple de Korientzé. *Les Cahiers d'Outre-Mer*, 39-156, 425-434
- Direction Nationale du Génie Rural (2017) Base de données du Bureau Statistique et Suivi-Evaluation. Actualisation février 2018. Extraits.
- Dong B.W., Sutton R. (2015) Dominant role of greenhouse gas forcing in the recovery of Sahel rainfall. *Nature Climate Change*, doi :10.1038/nclimate2664.
- Dumerc J. (2017) Analyse de la distribution des pluies journalières extrêmes en Afrique de l'Ouest. Mémoire de Master Ingénierie Mathématique Statistique Economique, spécialité Modélisation statistique et stochastique, Université de Bordeaux, 71 p.
- Eisner S., Flörke M., Chamorro A., Daggupati P., Donnelly C., Huang J. (2017) An ensemble analysis of climate change impacts on streamflow seasonality across 11 large river basins. *Climatic Change*, 141(3), 401–417.
- El Vilaly M.A.S., El Vilaly A., Mahé G. (2017) Characterizing 40-years of inter-regional migration in Southern Mauritania as a result of environmental changes. EGU 2017 meeting, Vienna, Austria. <https://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2017/EGU2017-12429.pdf>
- Endo A., Burnett K., Orenco P. M., Kumazawa T., Wada C. A., Ishii A., ... Taniguchi, M. (2015) Methods of the water-energy-food nexus. *Water*, 7(10), 5806-5830.
- Falkenmark M. (1989) The massive water scarcity now threatening Africa: Why isn't it being addressed. *Ambio*, 18 (2), 112-118.
- Ferry L., Braquet N., Le Goulven P., Bader J.C., Malaterre P.-O., Molle F., Poussin J.-C. (2016) Barrages d'Afrique de l'Ouest. IRD, UMR G-EAU, 4 p.
- Ferry L., Mietton M., Cissé Coulibaly Y. (2011) L'équilibre du fleuve Niger perturbé par les "pêcheurs de sable". IRD, Fiche d'actualité scientifique de l'IRD, n° 376, 2 p.
- Ferry L., Mietton M., Fujiki K., Laval M., Coulibaly N., Braquet N., Martin D. (2018) Faiblesse de la sédimentation dans le barrage-réservoir de Sélingué (Mali-Guinée) Témoin de la stabilité des savanes sud-soudaniennes à l'échelle d'un grand bassin versant très peu anthropisé. UMR G-EAU, Univ. J. Moulin (Lyon 3), DNH-Mali, G-Eau Working Paper/Rapport de Recherche, n° 5a, 26 p.
- Ferry L., Mietton M., Muther N., Martin D., Coulibaly N., Laval M., Basselot F.X., Cissé Coulibaly Y., Collerie M., de la Croix K., Olivry J.-C. (2012) Extraction de sables et tendance à l'incision du Niger supérieur (Mali) - Sand extraction and trend of channel incision in the Upper Niger River (Mali). *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, n° 3, p. 351-368
- Ferry L., Mietton M., Muther N., Martin D., Renard A. (2012) Le Niger guinéen et malien : une ressource vitale pour l'Afrique de l'Ouest. *Dynamiques Environnementales* n° 29, L'eau en Afrique : source de conflits (sous la direction de C. Bouquet et D. Blanchon), juin 2012, 201 p., p. 67-79
- Ferry L., Mietton M., Renard-Toumi A., Martin D., Barry M.A., Muther N. (2015) Plaine alluviale du Niger supérieur et mare de Baro (Guinée) - Fonctionnement hydrologique, gestion traditionnelle des ressources et perspectives après-barrage. *Territoire en mouvement (TEM)*, n° 25-26, 22 p.
- Ferry L., Muther N., Coulibaly N., Martin D., Mietton M., Cissé Coulibaly Y., Olivry J.-C., Paturol J.-E., Barry B., Yéna M. (2012) Le fleuve Niger de la forêt tropicale guinéenne au désert saharien - Les grands traits des régimes hydrologiques. DNH-Mali, DNH-Guinée, IRD, UMR G-EAU, Univ. J. Moulin (Lyon 3), UMR HSM, UNESCO, CE, ANR, ABN, 50 p.

- Fontaine B., Roucou P., Camara M., Vigaud N., Konaré A. (2012) Variabilité pluviométrique, changement climatique et régionalisation en région de mousson africaine. *La Météorologie, Météo et Climat*, 2012, Spécial AMMA, pp.41-48.; doi :10.4267/2042/48131
- Gerten D. (2013) A vital link water and vegetation in the Anthropocene. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 17, 3841–3852, doi : 10.5194/hess-17-3841-2013.
- Ghile Y. B., Taner M. Ü., Brown C., Grijzen J. G., Talbi A. (2014) Bottom-up climate risk assessment of infrastructure investment in the Niger River Basin. *Climatic change*, 122(1-2), 97-110.
- GIEC (2001) Bilan 2001 des changements climatiques: Rapport de synthèse. Troisième rapport d'évaluation du GIEC, Genève.
- GIEC (2007) Bilan 2007 des changements climatiques: Rapport de synthèse. Quatrième rapport d'évaluation du GIEC, Genève.
- Gleick P.H. (2000) Water: The Potential Consequences of Climate Variability and Change for the Water Resources of the United States. National Water Assessment Group for the U.S. Global Change Research Program.
- Goula A.B.T. *et al.* (2007) Estimation des pluies exceptionnelles journalières en zone tropicale: cas de la Côte d'Ivoire par comparaison des lois lognormale et de Gumbel. *Hydrological Sciences Journal*, 52 (1), 49–67; doi:10.1623/hysj.52.1.49
- Grijzen J.G., Brown C., Tarhule A., Ghile Y.B., Taner M.Ü., Talbi A. (2013) Climate Risk Assessment for Water Resources Development in the Niger River Basin: Part I: Context and Climate Projections; Part II: Runoff elasticity and probabilistic analysis. InTech, Croatia in: *Climate Variability - Regional and Thematic Patterns* (intechopen.com/books/).
- Guimberteau, M., Ronchail, J., Espinoza, J., Lengaigne, M., Sul-tan, B., Polcher, J., Drapeau, G., Guyot, J., Ducharne, A., Ciais, P. (2013) Future changes in precipitation and impacts on seasonal extreme streamflows over Amazonian sub-basins. *Environ. Res. Lett.*, 8, 14–35, doi:10.1088/1748-9326/8/1/014035.
- Harding B.L., Wood A.W., Prairie J.R. (2012) The implications of climate change scénario selection for future streamflow projection in the Upper Colorado River Basin. *Hydrology and Earth System Sciences Discussion*, 9, 847–894.
- Hassane A., Kuper M., Orange D. (2000) Influence des aménagements hydrauliques et hydro-agricoles du Niger supérieur sur l'onde de la crue du delta intérieur du Niger au Mali. *Sud Sciences et Technologies*, 5, 16–31.
- Hegerl G.C., Zwiers F. W., Braconnot P., Gillett N.P., Luo Y., Marengo Orsini J.A., Nicholls N., Penner J.E., Stott P.A. (2007) Understanding and Attributing Climate Change. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor, H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Hertzog T., Adamczewsk, A., Molle F., Poussin J.-C., Jamin J.-Y. (2012) Ostrich-like strategies in sahelian sands? Land and water grabbing in the Office du Niger, Mali. *Water Alternatives*, 5(2): 304-321
- Hertzog, T., Poussin J.-C., Tangara B., Kouriba I., Jamin J.-Y. (2014) A role playing game to address future water management issues un a large irrigated system : Expertience from Mali. *Agricultural Water Management*, 137 : 1-14.

- Hoff H. (2011) Understanding the nexus. Background paper for the Bonn 2011 Conference: the water, energy and food security nexus. Stockholm Environment Institute, Stockholm.
- Hulme M. et Dessai S. (2008) Negotiating future climates: a critical review of the development of climate scénarios for the UK. *Environmental Science et Policy*, 11, 54–70
- INSD / Burkina Faso (2008) Recensement général de la population et de l'habitat (RGPH) du Burkina Faso de 2006, 52 p.
- INS / Côte d'Ivoire (2015) Recensement général de la population et de l'habitat (RGPH) de Côte d'Ivoire de 2014, 22 p.
- INS / Guinée (2015) Recensement général de la population et de l'habitat (RGPH) de la République de Guinée de 2014, 15 p.
- INSTAT / Mali (2009) Recensement général de la population et de l'habitat du Mali (RGPH) de 2009, 20 p.
- Jalloh A., Nelson G. C., Thomas T. S., Zougmore R., Roy-Macauley, H. (2013) West African agriculture and climate change: A comprehensive analysis. IFPRI Research Monograph. Washington, D.C. International Food Policy Research Institute.
- Janicot S. *et al.* (2011) Intraseasonal variability of the West African monsoon. *Atmos. Sci. Let*, 12: 58–66; doi : 10.1002/asl.280
- Jenkins G.S *et al.* (2002) Investigating the West African climate system using Global/Regional climate models. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 83(4); doi: 10.1175/1520-0477(2002)083<0583:ITWACS>2.3.CO;2
- Kergna A.O., Cissé I., Meïta F. (2013) Recherche-action sur les moyens de subsistance des agriculteurs et les options d'intervention de Global Water Initiative. Proposition d'un sommaire pour la rédaction du rapport indicatif par pays. Etude des cas des périmètres de Sélingué et de Maninkoura au Mali. GWI.
- Khan H. F., Yang Y. C. E., Xie H., Ringler C. (2017) A coupled modeling framework for sustainable watershed management in transboundary river basins. *Hydrology et Earth System Sciences*, 21, 6275–6288
- Koch H., Liersch S., Hattermann F. F. (2013) Integrating water resources management in eco-hydrological modelling. *Water Science and Technology*, 67(7), 1525-1533.
- Kuper M., Mullon C., Poncet Y., Benga, E. (2003) Integrated modelling of the ecosystem of the Niger River inland delta in Mali. *Ecological Modelling*, 164(1), 83-102
- Laval M. (2008) Etude bathymétrique et dynamique sédimentaire du barrage réservoir de Sélingué sur la Sankarani (Mali), IRD, Univ. J. Moulin (Lyon 3), Mémoire de Master de l'Univ. de Lyon 3 (Jean Moulin), master 2, 98 p.
- Laval M., Ferry L., Coulibaly N., Martin D., Muther N., Mietton M. (2012) Evolution et analyse de la dynamique sédimentaire dans le barrage-réservoir de Sélingué, *Revue de Géographie de l'Université de Ouagadougou (RGO)*, n° 00, p. 45-68
- Lebel T. et Ali A. (2009) Recent trends in the Central and Western Sahel rainfall regime (1990-2007). *Journal of Hydrology*, 375, 52–64 ; doi:10.1016/j.jhydrol.2008.11.030
- Lerebours Pigeonnière A., Arnaud J.-C., Bazin S., Cabrillac-Bazin D., Diallo S., Dumont F., Huysecom E., Leclerc E., Nouaceur Z., Togola-Cissouma D. (2001) Les Atlas de l'Afrique : Mali, Les édition J.A., 81 p.

- L'Hôte Y. et Mahé G. (1995) Carte au 1:6 000 000 des précipitations moyennes annuelles de l'Afrique de l'ouest et centrale (période 1951-1989), IRD, Carte de l'IRD et Coll. Cartes et notices de l'IRD (ou ORSTOM), format 60cm x 90cm
- L'Hôte Y., Mahé G., Somé B., Triboulet J.P. (2002). Analysis of a Sahelian annual rainfall index updated from 1896 to 2000 ; the drought still goes on. *Hydrological Sciences Journal*, 47, 4, 563-572. doi:10.1080/ 02626660209492960
- L'Hôte Y., Mahé G., Some B. (2003) The 1990s rainfall in the Sahel: the third driest decade since the beginning of the century. *Hydrological Sciences Journal*, 48, 493–496; doi:10.1623/hysj.48.3.493.45283
- Lienou G., Mahé G., Dieulin C., Paturel J.- E., Bamba F., Sighomnou D., Dessouassi R. (2010) The River Niger water availability: facing future needs and climate change. In: *Global Change: Facing Risks and Threats to Water Resources* (ed. by E. Servat *et al.*). Proc. Of the Sixth World FRIEND Conference, Fez, Morocco, October 2010, 637–645. IAHS Publ. 340. IAHS Press, Wallingford, UK.
- Liersch S., Cools J., Kone B., Koch H., Diallo M., Reinhardt J., Fournet S., Aich V., Hattermann F. F. (2013) Vulnerability of rice production in the Inner Niger Delta to water resources management under climate variability and change. *Environmental science et policy*, 34, 18-33
- Liersch S., Fournet S., Koch H., Djibo A.G., Reinhardt J., Kortlandt J., van Weert F., Seidou O., Klop E., Baker C., Hattermann F. (2019) Water resources planning in the Upper Niger River basin: Are there gaps between water demand and supply? *Journal of hydrology: regional studies*, 21, 176-194.
- Ly M. *et al.* (2013) Evolution of some observed climate extremes in the West African Sahel. *Weather and Climate Extremes*. DOI: 10.1016/j.wace.2013.07.005
- Mahé G. (2009) Surface/groundwater relationships in two great river basins in West Africa, Niger and Volta. *Hydrological Sciences Journal*, 54, 4, 704-712.
- Mahé G., Bamba F., Soumaguel A., Orange D., Olivry J.-C. (2009) Water losses in the River Niger inner delta: water balance and flooded surfaces. *Hydrological Processes* 23, 22, 3157–3160.
- Mahé G., Lienou G., Descroix L., Bamba F., Paturel J.-E., Laraque A., Meddi M., Habaieb H., Adeaga O., Dieulin C., Chahnez Kotti F., Khomsi K. (2013) The rivers of Africa: witness of climate change and human impact on the environment. *Hydrological Processes*, 27, 2105–2114. DOI: 10.1002/hyp.9813
- Mahé G., Olivry J.-C., Dessouassi R., Orange D., Bamba F., Servat E. (2000) Relations eaux de surface – eaux souterraines d'une rivière tropicale au Mali. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences, Série Ila*, 330, 689-692.
- Mahé G., Olivry J.C., Servat E. (2005a). Sensibilité des cours d'eau ouest-africains aux changements climatiques et environnementaux : extrêmes et paradoxes. Proc. AISH Conf. Int. Regional Hydrological Impacts of Climate Change – Hydroclimatological Variability, Foz do Iguaçu, Brésil. AISH Publ. 296, 169-177.
- Mahé G., Lienou G., Bamba F., Paturel J.E., Adeaga O., Descroix L., Mariko A., Olivry J.C., Sangare S. (2011a). Niger river and climate change over 100 years. In: *Hydroclimatology: Variability and Change*, S.W. Franks, E. Boegh, E. Blyth, D.M. Hannah, K.K. Yilmaz (Eds.). Proceedings of symposium J-H02 held during IUGG2011 in Melbourne, Australia, July 2011, IAHS Pub. 344, 131-137.

- Mahé G., Orange D., Mariko A., Bricquet J.-P. (2011b) Estimation of the flooded area of the Inner Delta of the River Niger in Mali by hydrological balance and satellite data. In: Hydro-climatology (ed. by S.W. Franks *et al.*). Proceedings of symposium J-H02 held during IUGG2011 in Melbourne, Australia, July 2011, 138–143. IAHS Pub. 344. IAHS Press, Wallingford, UK.
- Mahé G. et Paturel J.-E. (2009) 1896-2006 Sahelian rainfall variability and runoff increase of Sahelian rivers. *C.R. Geosciences*, 341, 538-546.
- Mahé G., Paturel J.-E., Servat E., Conway D., Dezetter A. (2005b) The impact of land use change on soil water holding capacity and river modelling in the Nakambe river, Burkina Faso. *Journal of Hydrology*, 300, 1-4, 33-43.
- Mahé G., Rouché N., Dieulin C., Boyer J.-F., Ibrahim B., Cres A., Servat E., Valton C., Paturel J.-E. (2012) Annual rainfall map of Africa. IRD Ed., Bondy, France.
- Mamadou I., Gautier E., Descroix L., Noma I., Bouzou Moussa I., Faran Maiga O., Genthon P., Amogu O., Malam Abdou M., Vandervaere J.-P. (2015) Exorheism growth as an explanation of increasing flooding in the Sahel. *Catena*, 131, 130–139.
- Marie J., Morand P., N'Djim H. (2007) Avenir du fleuve Niger - 1ère partie : Synthèse et recommandations - 2ème partie : Chapitres analytiques. IRD, Collection Expertise collégiale de l'IRD, 287 p. et 454 p.
- Mariko D., Kelly V., Chohin-Kuper A. (2000) Comment augmenter les revenus des producteurs ? Leçons de l'Office du Niger au Mali. US-Aid, Note de Synthèse n°53.
- Mariko A., Mahé G., Servat E. (2003). Les surfaces inondées dans le delta intérieur du fleuve Niger au Mali par NOAA/AVHRR. *Bulletin SFPT*, 172, 61-68.
- Mariko A., Mahé G., Orange D. (2013) Monitoring of flood propagation into the Niger Inner Delta: Prospective with the Low Resolution NOAA/AVHRR Data. In: *Deltas: landforms, ecosystems and human activities*, (G. Young, G. Perillo, A. Haksoy, J. Bogen, A. Gelfan, G. Mahé, P. Marsh, H. Savenije, Eds), IAHS Publ. 358, 101-109.
- Ministère de l'Agriculture (Mali) (2012) Programme National d'Irrigation de Proximité. 2012.
- Ministère de l'Hydraulique et de l'Energie (Guinée), Tractebel Engineering, Coyne et Bellier (2015) Carte des bassins versants en Guinée avec la localisation des sites potentiels - Projet "Définition d'une stratégie de développement du potentiel hydroélectrique de Guinée», A0
- Ministère des Mines, de l'Energie et de l'Eau (Mali) (2006) Politique Nationale de l'Eau. 64p.
- Ministère du Développement Rural (Mali) (2014) Plan National d'investissement dans le secteur agricole. 132 p.
- Monerie P.-A., Fontaine B., Roucou P. (2012) Expected future changes in the African monsoon between 2030 and 2070 using some CMIP3 and CMIP5 models under a medium-low RCP scénario, *J. Geophys. Res.*, 117, D16111, doi:10.1029/2012JD017510
- Muerth M. *et al.* (2012) Evaluation of different sources of uncertainty in climate change impact research using a hydro-climatic model ensemble. In: R. Seppelt *et al.*, eds. 2012 International congress on environmental modelling and software—Managing resources of a limited planet. Sixth Biennial Meeting. Leipzig, Germany: International Environmental Modelling and Software Society (iEMSs), 973–980
- Neal J., Schumann G., Bates P. (2012) A subgrid channel model for simulating river hydraulics and floodplain inundation over large and data sparse areas. *Water Resources Research*, 48(11).

- Nicholson S.E. (2001) Climatic and environmental change in Africa during the last two centuries. *Climate Research*, 17, 123–144 ; doi:10.3354/cr017123
- Ning-Zeng (2003) Drought in the Sahel. *Science*, Vol. 302, Issue 5647, pp. 999-1000 ; doi: 10.1126/science.1090849
- Ouedraogo A. (2014) Analyses statistiques de séries pluviométriques et de température en Afrique de l’Ouest (Burkina Faso et Mali) – Focus sur les valeurs extrêmes. Mémoire de Master 2, 2iE, Ouagadougou, Burkina Faso, 100 p.
- Ogilvie A., Belaud G., Delenne C., Bailly J.-S., Bader J.-C., Oleksiak A., Ferry L., Martin D. (2015) Decadal monitoring of the Niger Inner Delta flood dynamics using MODIS optical data. *Journal of Hydrology*, 523, 368-383.
- Ogilvie A., Mahé G., Ward J., Serpantié G., Lemoalle J., Morand P., Barbier B., Tamsir Diop A., Caron A., Namarra R., Kaczan D. (2010) Water, agriculture and poverty in the Niger River basin. *Water International*, 35(5), 594-622.
- Oleksiak A. (2008) Suivi par télédétection de la dynamique de crue du delta intérieur du Niger pour l'élaboration d'un modèle de fonctionnement hydraulique. Rapport de Master 2 professionnel TGAE.
- Olivry J.-C., (2002) Synthèse des connaissances hydrologiques et potentiel en ressources en eau du fleuve Niger. BM, ABN, 158 p.
- Omotosho J.B. (2008) Pre-rainy season moisture build-up and storm precipitation delivery in the West African Sahel. *International Journal of Climatology*, 28, 937–946; doi:10.1002/(ISSN)1097-0088
- ONISDIN (2018) Observatory Upper Niger Basin and Inner Niger Delta. <https://onisdin.info/en/hydrology/hydrological-infrastructure> (accessed 11.01.2019)
- Orange D., Arfi R., Kuper M., Morand P., Poncet Y. (2002) Gestion intégrée des ressources naturelles en zones inondables tropicales. IRD, 998 p.
- Ozer P. *et al.* (2003) The Sahelian drought may have ended during the 1990s. *Hydrological Sciences Journal*, 48 (3), 489–492 ; doi:10.1623/hysj.48.3.489.45285
- Panthou G. (2013) Analyse des extrêmes pluviométriques en Afrique de l’Ouest et de leurs évolutions au cours des 60 dernières années. Thèse. Université de Grenoble, 283 p.
- Panthou G., Vischel T., Lebel T. (2014) Recent trends in the regime of extreme rainfall in the Central Sahel. *International Journal of Climatology*, 34, 3998-4006.
- Passchier R. H., Maaten R., Meijer K. S. (2005) Integrated water resources modelling of the Upper Niger River (Mali). Q3254.
- Paturel J.-E. (1991) Etude des phénomènes pluvieux à une échelle fine d’espace – Contribution à l’analyse du risque en hydrologie urbaine. Thèse INSA Lyon, 266 p. + annexes
- Paturel J.-E. *et al.* (1998) Analyse de séries pluviométriques de longue durée en Afrique de l’Ouest et Centrale non sahélienne dans un contexte de variabilité climatique. *Hydrological Sciences Journal*, 43, 937–946 ; doi:10.1080/ 02626669809492188
- Paturel J.-E. (2014) Exercice de scénarisation hydrologique en Afrique de l’Ouest—Bassin du Bani, *Hydrological Sciences Journal*, 59:6, 1135-1153, DOI: 10.1080/02626667.2013.834340

- Paturel J.-E., Mahé G., Diello P., Barbier B., Dezetter A., Karambiri A., Yacouba H., Maiga H., Dieulin C. (2017) Using land cover changes and demographic data to improve hydrological modelling in Sahel. *Hydrological Processes*, 31, 4, 811-824, DOI: 10.1002/hyp.11057.
- Paturel J.-E. et Zorom M. (2014) Modifications des températures et des précipitations sur le Bani, un sous-bassin du fleuve Niger. In *Hydrology in a Changing World: Environmental and Human Dimensions Proceedings of FRIEND-Water 2014*, Montpellier, France, October 2014 (IAHS Publ. 363, 2014), p. 228-233.
- Pedinotti V., Boone A., Decharme B., Crétaux J.-F., Mognard N., Panthou G., Papa F., Tanimoun B. A. (2012) Evaluation of the ISBA-TRIP continental hydrologic system over the Niger basin using in situ and satellite derived datasets. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16, 1745-1773.
- Peugeot C. *et al.* (2003) Hydrologic process simulation of a semiarid, endoreic catchment in Sahelian West Niger. 1 Model-aided data analysis and screening. *Journal of Hydrology*, 279, 224–243; doi:10.1016/S0022-1694(03)00181-1
- Picouet C., Hingray B., Olivry, J.-C. (2001) Empirical and conceptual modelling of the suspended sediment dynamics in a large tropical African river: the Upper Niger river basin. *Journal of Hydrology*, 250(1), 19-39.
- PIRT (1983) *Les ressources terrestres au Mali*. Vol I, II et III. Ed. TAMS, New York.
- PNUD, Coyne et Bellier, Sir Alexander Gigg et Partners, EUROCONSULT (1983) *Plan général d'aménagement hydraulique de la Haute Guinée - Volume 01 : Rapport général*, 199 p.
- PNUE (2009) *Gestion des écosystèmes du Faguibine (Mali) pour le bien-être humain : adaptation aux changements climatiques et apaisement des conflits*. 4 Partie descriptive.
- Poncet Y. et Troubat J.J. (1994) *L'eau, 1980-1990. Cartes N°1 In: la Pêche dans le Delta Central du Niger. Approche pluridisciplinaire d'un système de production halieutique*. J. Quensière, IER-ORSTOM-Karthala éd.
- Pouyaud B. (1987) Variabilité spatiale et temporelle des bilans hydriques de quelques bassins versants d'Afrique de l'Ouest en liaison avec les changements climatiques. In *Actes du Symposium de Vancouver: Climate Change and Climatic Variability*; Orstom: Montpellier, France, Volume 168, pp. 447–461.
- Prudhomme C. et Davies H. (2009a) Assessing uncertainties in climate change impact analyses on the river flow regimes in the UK. Part 1: baseline climate. *Climatic Change*, 93,177–195.
- Prudhomme C. et Davies H. (2009b) Assessing uncertainties in climate change impact analyses on the river flow regimes in the UK. Part 2: future climate. *Climatic Change*, 93,197–222.
- Quan X.W., Diaz H.F., Fu C.B. (2003) Interdecadal change in the Asia-Africa summer monsoon and its associated changes in global atmospheric circulation. *Global Planet. Change*, 37, 171– 188
- Rebelo L. M., Johnston R., Hein T., Weigelhofe, G., D'Haeyer T., Kone B., Cools, J. (2013) Challenges to the integration of wetlands into IWRM: The case of the Inner Niger Delta (Mali) and the Lobau Floodplain (Austria). *Environmental science et policy*, 34, 58-68.
- Renard-Toumi A. (2013) *Mares et plaines alluviales du Niger supérieur et de ses affluents (Guinée, Mali) : Hydrodynamique et ressources associées - Document principal et annexes*. Univ. J. Moulin (Lyon 3), UMR G-EAU, Thèse de l'Univ. Jean Moulin (Lyon 3), document principal : 323 p., annexes : 38 p.

- Renard-Toumi A. et de la Croix K. (2014) Les mares des plaines alluviales du Niger supérieur - Des points d'eau et leurs pratiques sociales comme révélateur hydrodynamique et culturel. PUB, LGPA, Dynamiques Environnementales - Jour. internat. géoscien. environ., 2d sem. 2013, n° 32, Chemins et territoires de l'eau dans les pays de la ceinture tropicale - Ressources et patrimoines (sous la direction de L. Ferry et M. Mietton), 220 p., 2014, p. 15-35
- Rodriguez *et al.* (2011) Interannual and decadal SST-forced responses of the West African monsoon. *Atmos. Sci. Lett.* 12 : 67 – 74 ; doi: 10.1002/asl.308
- Roehrig R. (2010) Variabilité intrasaisonnière de la mousson Africaine : caractérisation et modélisation. Thèse Météo-France/Paris Est, 393 p.
- Roudier P., Ducharne A., Feyen L. (2014) Climate change impacts on runoff in West Africa: a review. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 18, 2789–2801 ; doi:10.5194/hess-18-2789
- Ruelland D., Dezetter A., Puech Ch., Ardoin-Bardin S. (2008) Long-term monitoring of land cover changes based on Landsat imagery to improve hydrological modelling in West Africa, IRD, UMR HSM, CEMAGREF, UMR TETIS, *International Journal of Remote Sensing*, 29, 12, p. 3533-3551
- Sangaré S., Mahé G., Paturol J.-E., Bangoura Y. (2002) Bilan hydrologique du fleuve Niger en Guinée de 1950 à 2000. **Sud Sciences et Technologies**, EIER, Ouagadougou, 9, 21-33.
- Sanogo S., Fink A.H., Omotosho J.A., Ba A., Redl R. et Ermet V. (2015) Spatio-temporal characteristics of the recent rainfall recovery in West Africa. *Int. J. Climatol* ; doi: 10.1002/joc.4309.
- Schuol J., Abbaspour K. C., Srinivasan R., Yang, H. (2008) Estimation of freshwater availability in the West African sub-continent using the SWAT hydrologic model. *Journal of Hydrology*, 352(1), 30–49.
- Séguis L., Cappelaere B., Milési G., Peugeot C., Massuel S., Favreau G. (2004) Simulated impacts of climate change and land-clearing on runoff from a small Sahelian catchment. *Hydrol. Process.* 2004, 18, 3401–3413
- Sheffield J., Wood E. F., Chaney N., Guan K., Sadri S., Yuan X. (2014) A drought monitoring and forecasting system for sub-Saharan African water resources and food security. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 95(6), 861–882.
- Sidibé Y., Williams T. O. (2016) Agricultural land investments and water management in the Office du Niger, Mali: options for improved water pricing. *Water International*, 41(5), 738-755.
- Sighomnou D., Descroix L., Genthon P., Mahé G., Bouzou Moussa I., Gautier E., Mamadou I., Vandervaere J.-P., DWN-BF, Rajot J.-L., Malam Issa O., Malam Abdou M., Dessay N., Delaitre E., Depraetere C., Faran Maiga O., Diedhiou A., Panthou G., Vische, T., Yacouba H., Karambiri H., Mougin E., Hiernaux P., Abdourahmane D., Adamou H. (2013) La crue de 2012 à Niamey : un paroxysme du paradoxe du Sahel ? *Sécheresse*, 24, 1, 3-13.
- Sivakumar M.V.K. (1988) Predicting rainy season potential from the onset of rains in southern Sahelian and Sudanian climatic zones of West Africa. *Agric For Meteorol* 42, 295-305
- Sogreah (1985) *Modele mathematique du fleuve niger annexe n° 6 construction et réglage du modele au mali de selingue a markala (mali)*. Autorite du Bassin du Niger.
- Sullivan C.A. (2002) Calculating a Water Poverty Index. *World Development* 30 (7), 1195-1210.

- Sultan B. et Gaetani M. (2016) Agriculture in West Africa in the Twenty-first Century: climate change and impacts scénarios, and potential for adaptation. *Frontiers in plant science*, 7.
- Talin E. (2009) Etude de quelques hydro-aménagements dans le cercle de Koutiala (Mali) - Document de travail. IRD, UMR G-EAU, ENSHMG, Grenoble, 27 p.
- Talin E. (2009) Etude de quelques hydro-aménagements dans le cercle de Sikasso (Mali) - Document de travail. IRD, UMR G-EAU, ENSHMG, Grenoble, 43 p.
- Talin E., Ferry L., Muther N., Martin D. (2009) Quels impacts des hydro-aménagements sur les écoulements (bassin versant du Bani)? Programme RESSAC - Table ronde sur le thème vulnérabilité - Bamako, 19 mai 2009, IRD, UMR G-EAU, diaporama, 7 p.
- Talin E. et Muther N. (2009) Etude de quelques hydro-aménagements dans le cercle de Bougouni (Mali) - Document de travail, IRD, UMR G-EAU, ENSHMG, Grenoble, 21 p.
- Tangara B. (2011) Conséquences du développement des cultures de contre-saison sur l'irrigation et la dynamique de la nappe phréatique à l'Office du Niger (Mali). *Milieux et Changements globaux*. Université de Bamako.
- Tarhule, A., Zume J.T., Grijzen J.G. (2014) Exploring temporal hydroclimatic variability in the Niger Basin (1901-2006) using observed and gridded data, *International Journal of Climatology* (<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/joc.3999/full>)
- Taylor *et al.* (2011) New perspectives on land– atmosphere feedbacks from the African Monsoon Multidisciplinary Analysis. *Atmospheric Science Letters* 12: 38–44, doi : 10.1002/asl.336
- Taylor C.M., Belušić 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*, Vol. 544, 475-478. <http://www.nature.com/doi/10.1038/nature22069>
- Tractebel (2017) Actualisation de la Faisabilité Relative aux Travaux d'Aménagement du Barrage de Fomi sur le Haut Niger (Phase 1), Rapport sur le Dimensionnement des Ouvrages Aménagement de Moussako. Commissionné par Ministère de l'Agriculture – Direction Nationale du Génie Rural, République de Guinée, P.010186 RP-2-001-Volume 4b rév.00
- Traore A.K. et Hourdin F. (2012) A multi configuration study of the decadal climate variability of the African monsoon with the LMDZ atmospheric model. *Soumis à Climate Dyn*
- Vandersypen K., Bengaly K., Keita A.C.T., Sidibe S., Raes D., Jamin J.-Y. (2006) Irrigation performance at tertiary level in the rice schemes of the Office du Niger (Mali): Adequate water delivery through over-supply. *Agricultural Water Management*, 83 (1-2), 144-152.
- Vetter T., Reinhardt J., Flörke M., van Griensven A., Hattermann F., Huang S., Koch H., Pechlivanidis I.G., Plötner S., Seidou O., Su, B. (2017) Evaluation of sources of uncertainty in projected hydrological changes under climate change in 12 large-scale river basins. *Climatic Change*, 141(3), 419-433
- Ward J., Kaczan D., Lukasiewicz A. (2009) BFP Niger: A water poverty analysis of the Niger River basin, West Africa. CSIRO, Australia, and Challenge Program on Water and Food, Colombo, Sri Lanka, 148p.
- Wilby R.L. (2005) Uncertainty in water resource model parameters used for climate change impact assessment. *Hydrological Processes*, 19, 3201–3219

- Wilby R.L. (2010) Evaluating climate model outputs for hydrological applications. *Hydrological Sciences Journal*, 55 (7), 1090–1093
- Wuillot J. (1994) Les phytocénoses aquatiques. La pêche dans le delta central du Niger: approche pluridisciplinaire d'un système de production halieutique, 66 70.
- Wymenga, E., B. Kone, L. Zwarts (eds). (2002) *Le Delta Intérieur du fleuve Niger: ecologie et gestion durable des ressources naturelles*. Wetlands International-Mali, Sévaré /RIZA, Lelystad /AetW conseillers ecologiques, Veenwouden.
- Wymenga E., Zwarts L., Kone B. (2011) *Water sharing in the Upper Niger Basin*. AetW-rapport 1739, Altenburg et Wymenga ecological consultants, Feanwâlden.
- Yang J., Yang Y. E., Khan H. F., Xie H., Ringler C., Ogilvie A. (2018) Quantifying the Sustainability of Water Availability for the Water-Food-Energy-Ecosystem Nexus in the Niger River Basin. *Earth's Future*, 6(9), 1292-1310.
- Zaré A. (2015) *Variabilité climatique et gestion des ressources naturelles dans une zone humide tropicale: une approche intégrée appliquée au cas du delta intérieur du fleuve Niger (Mali)*. Sciences de l'environnement. Thèse Univ. Montpellier et Institut International de l'Eau et de l'Environnement (2iE), 2015, 214 p.
- Zaré A., Mahé G., Pature, J.-E., Barbier, B. (2017) Influence du Bani sur la variabilité saisonnière et interannuelle de la crue du fleuve Niger dans le delta intérieur. *Journal des Sciences Hydrologiques*, 62, 16, 2737-2752.
- Zeng N., Neelin J.D., Lau K.M., Tucker C.J. (1999) Enhancement of interdecadal climate variability in the Sahel by vegetation interaction. *Science*, 286, 1537–1540
- Zwarts L., Van Beukering P., Koné B., Wymenga E. (2005) *Le Niger, une artère vitale - Gestion efficace de l'eau dans le bassin du haut Niger*. RIZA, Wetlands International, IVM, Altenburg et Wymenga, 305 p
- Zwarts L., Beukering P. V., Koné B., Wymenga E., Taylor, D. (2006) The economic and ecological effects of water management choices in the Upper Niger River: development of decision support methods. *Water Resources Development*, 22(1), 135-156.
- Zwarts L., Bijlsma R. G., van der Kamp J., Wymenga, E. (2009) *Living on the edge: wetlands and birds in a changing Sahel* (p. 564). Zeist: KNNV Publishing.

8. ANNEXES

Annexe 1 : Cahier des charges

Annexe 2 : Composition du collège d'expert

Annexe 3 : Tableau synoptique des projets et programmes en cours qui concernent le bassin versant du fleuve Niger (décembre 2018)

8.1. Annexe 1 : Cahier des charges

L'objet de cette étude est de cerner les grands enjeux liés à la question de l'avenir du fleuve Niger, principalement sur l'amont du fleuve et le Delta Intérieur. Cette étude permettra notamment de :

- mettre à jour les scénarii prospectifs en matière d'impacts avérés et potentiels des ouvrages hydrauliques (en cours de construction ou en projet) et du climat sur le régime hydrologique du fleuve et les usages/services du fleuve,
- recenser les principaux usages anthropiques (économiques ou sociaux-culturels) et environnementaux de l'eau le long du fleuve et
- définir des scénarios prospectifs d'évolution de ces principaux usages anthropiques, en particulier pour l'irrigation.

Plus ponctuellement, l'étude apportera des éléments de connaissance sur le Moyen Niger et Niger inférieur, notamment les variations hydroclimatiques, le paradoxe Sahélien (e.g. la forme de la crue à Niamey) et les infrastructures prévues pour le soutien de l'irrigation et l'hydroélectricité

Le travail des experts inclura une compilation des études et travaux existant sur :

- l'évolution du contexte hydroclimatique et des usages des ressources (eau et sol) autour du fleuve,
- les investissements prévus, et leurs impacts (avérés ou potentiels) sur la ressource en eau (au niveau quantitatif et qualitatif),
- les écosystèmes liés (en particulier le delta intérieur) et
- en corollaire, les impacts sur les différents groupes de la population dont l'activité est liée au fleuve.

Cette expertise sera menée en partenariat avec des Instituts de recherche maliens ainsi que l'Autorité du Bassin du Niger (ABN) avec un focus sur le fleuve Niger au Mali. Un comité de suivi de l'étude intégrant la Direction Nationale de l'Hydrologie, qui représente le Mali à l'ABN, l'AFD et l'IRD sera mis en place.

8.2. Annexe 2 : Composition du collège d'experts

Nom/Prénom	Institution	Domaine de Spécialisation
Nadine Braquet	IRD - France	Technicienne-Hydrologue / Base de données
Pierre Diello	Consultant - Mali	Hydrologue / Hydraulicien
Luc Ferry	Consultant - France	Hydrologue
Thomas Hertzog	Consultant – Sénégal/Mali/France	Agronome / Développement des systèmes irrigués, et approches participatives
Gil Mahé	IRD - France	Hydroclimatologue
Andrew Ogilvie	IRD - France	Hydrologue / Géomaticien-téledétection
Jean-Emmanuel Paturel	IRD - France	Hydrologue modélisateur / Impact des changements globaux sur la ressource en eau de surface
Jean-Christophe Poussin	IRD - Sénégal	Agronome / Fonctionnement des systèmes irrigués

8.3. Annexe 3 : Tableau synoptique des projets et programmes en cours qui concernent le bassin versant du fleuve Niger (décembre 2018)

N°	Intitulé des projets/Programmes	Coût total Millions FCFA	Durée	Zone d'intervention	Objectif	Ancrage	Indicateurs	Responsable
1	Travaux de protection des berges du fleuve Niger	1 629	2005-16	Bassin du fleuve Niger	<ul style="list-style-type: none"> Lutter contre l'érosion des berges et l'envasement du lit du fleuve Protéger les agglomérations riveraines des inondations 	MEADD	<ul style="list-style-type: none"> 6156 ml de protection mécanique 2912 ml de protection biologique 	ABFN
2	Projet de Dragage/ Protection berges de Diafarabé	13 792	2008-16	Diafarabé	<ul style="list-style-type: none"> Protéger les berges du fleuve Niger à Diafarabé 	MEADD	<ul style="list-style-type: none"> 1200 ml de berges protégées 2,9 Km curé dans le Diaka 1 pont de franchissement sur le Diaka de 210 m est construit 	ABFN
3	Projet de Réhabilitation Economique et Environnementale du fleuve Niger	36 000	2014-18	Delta Intérieur du Niger	<ul style="list-style-type: none"> Contribuer au développement économique et environnemental intégré dans la zone du delta intérieur du fleuve Niger au Mali 	MEADD	<ul style="list-style-type: none"> Nombre de points critiques dragués et curés Nombre de balises posées Nombre de ports/ quais réhabilités Longueur de berges protégées et stabilisées (mètre linéaire) Superficie de dunes de sable fixées (hectare) Superficie de périmètres restaurés (hectare) Superficie de plan d'eau désinfectée de végétaux flottants nuisibles (hectare) 	ABFN
4	Projet d'aménagement et de récupération des berges du fleuve Niger	200 000	2015-20	Bko DC	<ul style="list-style-type: none"> Aménager les berges de Bamako sur une vingtaine de kilomètres 	MEADD	<ul style="list-style-type: none"> 216 ha de réserve foncière constituée 	ABFN

N°	Intitulé des projets/Programmes	Coût total Millions FCFA	Durée	Zone d'intervention	Objectif	Ancrage	Indicateurs	Responsable
	dans le District de Bamako				de Sébénicoro à Sotuba à partir d'un recalibrage du lit du fleuve			
5	Projet d'aménagement des berges de Mopti et la digue route Mopti-Sévaré	200 000	2019-25	Mopti	<ul style="list-style-type: none"> Reconstituer la servitude le long de la route allant de l'embarcadère de la COMANAV au Gouvernorat Elargir la digue route entre Sévaré et Mopti 	MEADD	<ul style="list-style-type: none"> Superficie de réserve foncière constituée (ha) 	ABFN
6	Projet de dragage et de faucardage du Niger supérieur (Frontière guinéenne-Koulikoro)	45 358	2016-18	Niger supérieur	<ul style="list-style-type: none"> Contribuer à la régulation du régime du fleuve Niger, afin de favoriser la réalisation efficace des activités socioéconomiques liées à l'usage du fleuve 	MEADD	<ul style="list-style-type: none"> 200km curés et dragués 250 emplois créés 	ABFN
7	Projet de dragage du fleuve Niger entre Niafunké et Ansongo	54 000	2019-25	Tronçon Niafunké-Ansongo	<ul style="list-style-type: none"> Contribuer à la sauvegarde du fleuve, de ses affluents et leurs bassins versants 	MEADD	<ul style="list-style-type: none"> Volume de sables curés (m³) Superficie de dunes de sable fixé (ha) Superficie de plans d'eau désinfectés (hectare) Longueur de berges protégées (mètre linéaire) 	ABFN
8	Mécanisme de maîtrise des pollutions et nuisances issues de l'activité artisanale de teinturerie	1442	2015-16	Bko DC	<ul style="list-style-type: none"> Regrouper les teinturiers afin de circonscrire les effets des pollutions sur la qualité des eaux du fleuve Niger et réduire les risques de santé publique liés à la manipulation/diffusion des colorants utilisés. 	MEADD	<ul style="list-style-type: none"> Nombre de sites de regroupement Quantité d'eaux usées traitées 	ABFN

N°	Intitulé des projets/Programmes	Coût total Millions FCFA	Durée	Zone d'intervention	Objectif	Ancrage	Indicateurs	Responsable
9	Etude d'actualisation du Schéma Directeur d'assainissement de Bamako (SDAB)	2 021,4	12 mois (jan-déc 2015)	District de Bamako, Kalabancoro	<ul style="list-style-type: none"> • Définir des projets qui contribueront à la satisfaction durable des besoins en assainissement, des populations du DC Bko 	MEADD	<ul style="list-style-type: none"> • Nombre de projets 	DNACPN
10	Projet de mise en œuvre du SDAB: Projet prioritaire d'assainissement connexe au Projet AEP Bamako/Kabala (tranche prioritaire 2015-2016)	289 574	2016-18	District de Bamako, Kalabancoro	<ul style="list-style-type: none"> • Améliorer les conditions sanitaires et socio-économiques des populations de Bko DC 	MEADD	<ul style="list-style-type: none"> • A déterminer par les études d'actualisation du SDAB 	DNACPN
11	Phase II des travaux de réalisation de la station de traitement des eaux de teinturerie	500	2015-18	Bko DC	<ul style="list-style-type: none"> • Contribuer à la protection du fleuve Niger et ses berges 	MEADD	<ul style="list-style-type: none"> • 150 bassins construits ; • 2 spiros acquis ; • 2 documentaires ; • 3 sketches et • 30 émissions radio et télé réalisés et diffusés 	ANGESEM
12	Étude d'élaboration et mise en œuvre du schéma directeur d'assainissement des eaux usées et de faisabilité d'une tranche prioritaire de la ville de Ségou	30 000	2019-25	Région de Ségou	<ul style="list-style-type: none"> • Contribuer à l'amélioration du cadre de vie des populations 	MEADD	<ul style="list-style-type: none"> • 1 schéma directeur réalisé ; • 1 station d'épuration et ouvrages annexes construits • 	ANGESEM
13	Construction de stations de traitement des eaux usées industrielles	9 570	2019-25	Bassin du fleuve Niger	<ul style="list-style-type: none"> • Contribuer à la protection du fleuve Niger, de la nappe phréatique et du cadre de vie 	MEADD	<ul style="list-style-type: none"> • 8 stations d'épuration construites 	ANGESEM
14	Programme de Gestion intégrée des ressources	320	2009-18	Régions de Kayes, Koulikoro et	<ul style="list-style-type: none"> • Assurer la conservation et la gestion durable des 	MEADD	<ul style="list-style-type: none"> • 5 pépinières et périmètres maraichers créés ; 	AEDD

N°	Intitulé des projets/Programmes	Coût total Millions FCFA	Durée	Zone d'intervention	Objectif	Ancrage	Indicateurs	Responsable
	naturelles du Massif du Fouta Djallon			Cercles de Kéniéba et Kangaba	ressources naturelles du Fouta Djallon sur le moyen et le long terme (2025) en vue de contribuer à l'amélioration des conditions de vies des populations rurales directement ou indirectement tributaires du massif • • •		• 20 ha d'espaces reboisés	
15	Programme de développement de l'irrigation dans le bassin du Bani et du Sankarani	121 350	2010-16	Sélingué, Bla et Djenné	• Contribuer à l'accroissement de la sécurité alimentaire et à la réduction de la pauvreté	MDR	• Par an • 52 000 T de paddy ; • 3 620 T de légumes ; • 588 T de viande bovine • 6 000 litres de lait ; • 880 T de poissons	DNGR
16	Programme de Lutte Contre l'Enablement dans le Bassin du Niger – Composante Mali (PLCE/BN)	9 019	2004-16	Régions de Tombouctou et Gao	• Freiner, voire enrayer le processus d'ensablement qui menace directement le bassin du Fleuve Niger et restaurer de manière pérenne le potentiel agro – sylvo- pastoral et /ou piscicole	MEADD	• 6852 ha de dunes de sable fixées • 2230 ha de berges fixées • 680 ha de plantation de production de bois	DNEF
17	Projet Multinational de Gestion Intégrée des Plantes Aquatiques Proliférantes en Afrique de l'Ouest – Composante Mali	1 344	2005-15	Bassin hydrographique du fleuve Niger au Mali	• Contribuer à la maîtrise de la prolifération des plantes aquatiques dans 4 réseaux fluviaux partagés de l'Afrique de l'Ouest et de réduire au	MEADD	• 45ha de plans d'eau faucardé • 45 500 tonnes de compost produit • 2 000 000 d'agents de contrôle biologique de la	DNEF

N°	Intitulé des projets/Programmes	Coût total Millions FCFA	Durée	Zone d'intervention	Objectif	Ancrage	Indicateurs	Responsable
					minimum les effets résiduels de ces végétaux		jacinthe d'eau lâché	
18	Programme de Développement Durable du Delta Intérieur du Niger (PDD-DIN)	89 198	2013-16	Régions de Ségou, Mopti et Tombouctou	Contribuer à l'amélioration de la résilience des populations cibles à travers la prise de conscience accrue sur la gestion intégrée des ressources naturelles, les causes profondes de changement climatique, leur implication et les mesures d'adaptation	MEADD	<ul style="list-style-type: none"> • 350 ha de forêts inondées et exondées restauré ou mise en défens • Nombre d'ha de protection biologique de berge dégradée • 22 groupements de femmes appuyés aux AGR • 	DNEF
19	Projet Plan d'Action Gestion des Zones Humides (PAZU)	694	2004-15	Régions de Kayes, Kkro, Ségou, Mopti et Tombouctou	<ul style="list-style-type: none"> • Promouvoir l'utilisation rationnelle et la conservation des zones humides du Mali en vue de maintenir les fonctions écologiques, sociales et économiques de ces zones pour le bien être des générations présentes et futures 	MEADD	<ul style="list-style-type: none"> • 500 mètres linéaire de cordons pierreux réalisé ; • 10 Km de pare feux réalisés • 5 ha de surface reboisée • 9240 plants produits 	DNEF
20	Programme de Développement des Ressources en Eau et de Gestion Durable des écosystèmes dans le bassin du Niger	9 067	2008-16	Régions de Mopti, Gao et Tombouctou	<ul style="list-style-type: none"> • Améliorer la coordination régionale, le développement et la durabilité de la gestion des ressources en eau du bassin du Niger 	MEE	<ul style="list-style-type: none"> • 2336 ha aménagés en riz en submersion contrôlée ; • 590 ha aménagés en bourgou ; • 11 000 ml de protection mécanique des berges ; • 7 infrastructures de pêche ; • 9 étangs piscicoles aménagés 	DNH
21	Projet Protection du Fleuve Niger/KFW	7 049	2012-16	Région de Koulikoro	<ul style="list-style-type: none"> • Contribuer à la sauvegarde de 		<ul style="list-style-type: none"> • 783 ml de berges protégées • 16000 plants plantés sur les 	DNH

N°	Intitulé des projets/Programmes	Coût total Millions FCFA	Durée	Zone d'intervention	Objectif	Ancrage	Indicateurs	Responsable
					l'écosystème du fleuve Niger par la réduction de l'ensablement et de l'érosion hydrique		berges • 270 ml de mur de soutènement de pierres sèches érigé	
22	Projet d'entretien du Chenal navigable (Contrat Plan Etat-COMANAV)	1 120	2003-16	Régions de Kkro, Ségou, Mopti, Gao et Tombouctou	• Améliorer la coordination régionale, le développement et la durabilité de la gestion des ressources en eau du bassin du Niger	MEE	• 3 quais construits (Bourem, Gao, Diré) • 80 balises confectionnées et installées entre Kkro-Mopti-Gao	DNH
23	Station d'alerte pollution sur le fleuve Niger	105	2016-17	Samanko (cercle de Kati, commune rurale du Mandé)	• Surveiller le niveau de pollution du fleuve Niger à l'amont de la station de traitement d'eau de Kabala	MEE	• Nombre d'analyses effectuées	SOMAPEP SA
24	Vulgarisation du code de navigation et de transport sur les voies navigables	30		Toutes les régions et Bko DC	• Améliorer les conditions de navigation et de transport sur les voies navigables au Mali	METD	• Mise en œuvre du code	DNTTMF
25	Aménagement des équipements portuaires quais fluviaux	6 000	2018-21	Localités situées sur le fleuve	• Améliorer l'accessibilité, la mobilité des populations rurales	METD	• 6 quais fluviaux construits et équipés • 5km de chenaux navigables stabilisés (Tenenkou)	DNTTMF
26	Sécurisation des embarcations fluviales	60	2018-22	Localités situées sur le fleuve	• Elaborer une stratégie nationale de sécurisation des embarcations	METD	• Ensemble des unités fluviales répertoriés et immatriculés	DNTTMF
27	Doublement de la capacité de la centrale hydroélectrique de Sotuba (Sotuba II)	28 968	2019-25	Bamako	• Valoriser les ressources énergétiques nationales	MEE	• 5 MW installée	DNE
28	Projet de centrale hydroélectrique de Kénié	82 595	2019-25	Koulikoro	• Valoriser les ressources énergétiques nationales	MEE	• 42 MW installée	DNE

N°	Intitulé des projets/Programmes	Coût total Millions FCFA	Durée	Zone d'intervention	Objectif	Ancrage	Indicateurs	Responsable
29	Projet de centrale hydroélectrique de Markala	27 300	2019-25	Ségou	<ul style="list-style-type: none"> • Valoriser les ressources énergétiques nationales 	MEE	<ul style="list-style-type: none"> • 10 MW installée 	DNE
30	Projet de mini/micro barrages hydro électriques du programme de valorisation à grande échelle des énergies renouvelables	136 500	2019-25	Koulikoro Sikasso Ségou (Talo) Mopti (Djenné)	<ul style="list-style-type: none"> • Valoriser les ressources énergétiques nationales 	MEE	<ul style="list-style-type: none"> • Capacité installée 	DNE
31	Projet de barrage hydroélectrique de Bagoué II et Baoulé III et Baoulé IV	NC	2019-25	Rivière Bagoué près du village de Diakélé (Sikasso)	<ul style="list-style-type: none"> • -Régulariser le débit du cours d'eau tout en maximisant l'écrêtement de la crue ; • -Produire une quantité suffisante d'énergie ; • -favoriser le développement de l'agriculture dans la zone 	MEE	<ul style="list-style-type: none"> • Capacité installée 	DNE
32	Projet de secours nautique	576	2016-18	Régions traversées par le fleuve Niger et Sénégal	<ul style="list-style-type: none"> • Réduire la mortalité liée aux accidents fluviaux et préserver les fleuves en dotant chaque région de poste de secours 	MSPC	<ul style="list-style-type: none"> • -Réduction du délai d'intervention • -Nombre de personnes formés • -Nombre et qualité des escortes sur les fleuves • -Nombre de postes de secours créés et opérationnels 	DNPC
33	Projet de sécurisation des voies fluviales (Brigades fluviales)	14 025	2014-19	Bamako, Kayes, Kkro, Ségou, Mopti, Youwarou, Tbctou et Gao	<ul style="list-style-type: none"> • Appuyer la mise en œuvre de la stratégie de renforcement des capacités de gendarmerie 	MSPC	<ul style="list-style-type: none"> • Nombre de brigades installées, de missions de sécurisation, d'infractions relevées 	DNPC
34	Projet d'inscription du Delta Intérieur du Niger	30	2016-17	Ségou et Mopti	<ul style="list-style-type: none"> • -Délimiter le périmètre du fleuve à inscrire 	MCAT	<ul style="list-style-type: none"> • Nombre de Dossier constitué et soumis au Comité du 	DNPC

N°	Intitulé des projets/Programmes	Coût total Millions FCFA	Durée	Zone d'intervention	Objectif	Ancrage	Indicateurs	Responsable
	sur la liste du patrimoine mondial				<ul style="list-style-type: none"> -Constituer les documents graphiques et élaborer le dossier à classer 		patrimoine mondial	
35	Inventaire et la documentation du patrimoine culturel matériel et immatériel lié au fleuve Niger	100	2016-18	Ségou et Mopti	<ul style="list-style-type: none"> • Inventorier et documenter les patrimoines (culturels et naturels liés au fleuve Niger 	MCAT	<ul style="list-style-type: none"> • Nombre d'éléments du patrimoine culturel inventoriés 	DNPC
36	Soutien aux activités culturelles annuelles organisées le long du fleuve Niger : course de pirogues à Bamako et Mopti, Yaaral –Degal de Diafarabé, Dialloubé festival des mystères sur le fleuve Niger à Ansongo, Sortie des masques et marionnettes de Markala	NC	2016-17	Ségou, Mopti et Bamako	<ul style="list-style-type: none"> • Préserver les pratiques culturelles anciennes ayant valorisé les ressources du fleuve Niger 	MCAT	<ul style="list-style-type: none"> • Nombre et qualité d'activités organisées le long du fleuve 	DNPC
37	Etude de faisabilité de petits aménagements dans les têtes de sous-bassins versants des cours supérieurs des fleuves Niger et Bani pour la restauration de l'environnement	481	2016-17	Koulikoro, Bamako, Ségou et Sikasso	<ul style="list-style-type: none"> • Produire un document de projet visant à améliorer la gestion actuelle des ressources naturelles des têtes des sous bassins versants des affluents et sous affluents des fleuves Niger et Bani 	MEADD	<ul style="list-style-type: none"> • Un rapport de l'étude de faisabilité est disponible. 	ABFN
38	Etude globale sur la pollution des eaux du fleuve Niger dans le Niger supérieur au Mali	150	2016-17	Koulikoro, Bamako, Ségou	<ul style="list-style-type: none"> • Identifier toutes les sources importantes de pollution dans la zone d'étude 	MEADD	<ul style="list-style-type: none"> • Un rapport sur les sources de pollutions est disponible. 	ABFN

N°	Intitulé des projets/Programmes	Coût total Millions FCFA	Durée	Zone d'intervention	Objectif	Ancrage	Indicateurs	Responsable
39	Connaissance des contraintes d'écoulement par levés topographique et photographique par procédé LASER	1 200	2016-18	Ensemble du linéaire du fleuve Niger	<ul style="list-style-type: none"> Disposer d'une cartographie des zones sensibles le long du fleuve et aux environs des ouvrages hydro techniques (barrages) 	MEADD	<ul style="list-style-type: none"> Un rapport de l'étude est disponible (sur les 1750 km de la portion nationale) 	ABFN
40	Etude de faisabilité du calibrage du fleuve Niger dans les villes de Mopti et Bamako	1 000	2016-18	Mopti et Bamako	<ul style="list-style-type: none"> Redéfinir l'envergure du fleuve Niger dans les villes de Mopti et Bamako 	MEADD	<ul style="list-style-type: none"> Un rapport de l'étude de faisabilité est disponible. 	ABFN
41	Etude pour l'élaboration d'une stratégie de communication pour l'ABFN	275	2016-18	Bamako, Kangaba, Sikasso, Mopti, Gao	<ul style="list-style-type: none"> Doter l'ABFN d'une stratégie de communication et d'un Système d'Information pour une gestion intégrée des ressources du Bassin du fleuve Niger (SI-GIRBFN) 	MEADD	<ul style="list-style-type: none"> Une stratégie assortie de plan de communication est disponible. 	ABFN
42	Etude sur la conception de l'observatoire du fleuve Niger au Mali	75	2016-18	Bassin du fleuve Niger	<ul style="list-style-type: none"> Concevoir le scénario de fonctionnement de l'observatoire du fleuve Niger 	MEADD	<ul style="list-style-type: none"> -Un observatoire est mis en place. -Un système d'information sur les ressources du bassin est disponible. 	ABFN
43	Renforcement de capacités	3 350	2016-25	Bassin du fleuve Niger	<ul style="list-style-type: none"> Renforcer les capacités logistique et managériale 	MEADD	<ul style="list-style-type: none"> -Nombre d'équipements, logistiques ; -Nombre de formations 	ABFN
44	Information et Communication	4 290	2016-25	Bassin du fleuve Niger	<ul style="list-style-type: none"> Mettre en œuvre la stratégie de communication 	MEADD	<ul style="list-style-type: none"> Nombre activités de communication et sensibilisation 	ABFN
45	Coordination et Appui Institutionnel du programme	1 396	2016-25	Bassin du fleuve Niger	<ul style="list-style-type: none"> Mettre en place un cadre institutionnel de pilotage et de suivi du programme 	MEADD	<ul style="list-style-type: none"> Nombre de réunions, missions, appuis. 	ABFN
	TOTAL	1 431 553,4						

Responsables : ABFN (Autorité du Bassin du Fleuve Niger), AEDD (Agence de l'Environnement et du Développement Durable), ANGESEM (Agence Nationale de Gestion des Stations d'Épuration du Mali), DNACPN (Direction Nationale de l'Assainissement du Contrôle des Pollutions et des Nuisances), DNE (Direction Nationale de l'Énergie), DNEF (Direction Nationale des Eaux et Forêts), DNGR (Direction Nationale de Génie Rural), DNH (Direction Nationale de l'Hydraulique), DNPC (Direction Nationale du Patrimoine Culturel), DNTTMF(Direction Nationale des Transports Terrestres, Maritimes et Fluviaux), SOMAPEP SA (Société MALienne de Patrimoine de l'Eau Potable)

Ancrage (Ministère) – en septembre 2018, un nouveau gouvernement a été formé ; il est possible que certains ministères ont changé d'appellation : MCAT (Ministère de la Culture, de l'Artisanat et du Tourisme), MDR (Ministère du Développement Rural), MEADD (Ministère de l'Environnement, de l'Assainissement et du Développement Durable), MEE (Ministère de l'Énergie et de l'Eau), METD (Ministère de l'Équipement, des Transports et du Désenclavement), MSPC (Ministère de la Sécurité et de la Protection Civile)

La liste qui suit est moins renseignée...

N°	Intitulé des projets de grands ouvrages sur le Fleuve	Observations
1	Centrale hydro-électrique de Kenié	C'est PPP avec ERAVON / Kenie -Energie Renouvelable. La convention avec l'état malien a été signée. Les travaux n'ont pas encore démarré. Le projet est géré au niveau du Ministère de l'énergie du Mali
2	Barrage hydro-électrique de Djenné	financé par la BAD. Les travaux n'ont pas encore démarré mais il semblerait que ce soit imminent...
3	Seuil de Kourouba	
4	Barrage sur le Baoulé	Barrage de régulation à vocation agricole et énergétique. Les études de faisabilité et d'APS ont été réalisées par TRACTEBEL.
5	Bagué 2 sur le Bani	les études de faisabilité et d'APS sont bouclées.
6	Barrage de Fomi	L'EIES aurait demandé de déplacer le site du barrage à cause de l'impact sur les populations (déplacement massif)
7	Barrage de Taoussa	Les travaux sont actuellement arrêtés à cause de l'insécurité