

Le Delta Intérieur du Niger s'assèchera-t-il du fait du changement climatique et de l'utilisation de l'eau en amont?

A&W-rapport 1556



٥١١ { ٣ ٤٤.٨٤ ٤

Le Delta Intérieur du Niger s'assèchera-t-il du fait du changement climatique et de l'utilisation de l'eau en amont ?

A&W rapport 1556

L. Zwarts

Photo en couverture

Le Delta Intérieur du Niger pendant une forte crue; novembre 2009 , Leo Zwarts

L. Zwarts 2010

Le Delta Intérieur du Niger s'assèchera-t-il du fait du changement climatique et de l'utilisation de l'eau en amont ?,
A&W rapport 1556

Altenburg & Wymenga ecologisch onderzoek, Feanwâlden

L'étude a été réalisée dans le cadre du projet sur les zones humides et les moyens de subsistance (Wetlands & Livelihoods Programme WLP) : GIRE (*Gestion intégrée de ressources naturelles*) dans le bassin du Niger en amont de Taoussa

Commanditée par

Wetlands International

Horapark 9

6717 LZ Ede, Pays-Bas

Telefoon 0318-660910

Realisé par

Altenburg & Wymenga ecological consultants

Boite Postale 32

9269 ZR Feanwâlden, Pays-Bas

Tél 0031 511 47 47 64

Fax 0031 511 47 27 40

info@altwym.nl

www.altwym.nl

Número de projet

1573

Chef de projet

L. Zwarts

Statut

Rapport final

Autorisation

Approuvé

Paraphe

E. Wymenga

Date

25 octobre 2010

Tables de matières

1	Introduction	1
2	Le climat au Sahel	3
2.1	Données historiques	4
2.2	Qu'est ce qui détermine la variation des précipitations ?	7
2.3	Les changements climatiques au Sahel	7
2.4	L'évaporation dans le Delta Intérieur du Niger et le climat au Sahel occidental	10
3	Précipitations et débit fluvial	13
4	L'impact humain sur le débit fluvial	17
4.1	Sélingué	17
4.2	Petits systèmes d'irrigation dans le Haut Niger	18
4.3	L'Office du Niger	19
4.4	Fomi	20
4.5	Réduction du débit du fleuve Niger	20
4.6	Talo	21
4.7	Djenné	22
4.8	Réduction du débit du Bani	22
4.9	Le débit entrant des fleuves Niger et Bani dans le Delta Intérieur du Niger	23
5	Inondation maximale, débit entrant et précipitations	25
5.1	Inondation et débit entrant	25
5.2	Inondation et précipitations	29
6	Conclusions	31
7	Références	33

1 Introduction

Le Delta Intérieur du Niger au Mali est immense. Sur les cartes topographiques des années 1960, une surface totale de 36.000 km² est désignée comme zone inondable. Lorsque le niveau de l'eau commence à monter dans la partie sud-ouest du Delta en juillet, les plaines situées dans le nord sont toujours sèches. Deux mois plus tard, au moment où les plaines du nord deviennent inondées, le niveau de l'eau est déjà en baisse dans le sud. La zone à tout moment couverte par l'eau est de 25.000 km². Une aussi importante inondation n'est possible que lorsque le débit entrant combiné du fleuve Niger et du Bani, son principal affluent, dépasse les 55 km³ en saison des pluies. La plupart du temps, le débit entrant est plus faible. Au cours de la sécheresse catastrophique de 1984, le débit entrant n'était que de 15 km³, et l'étendue de la crue n'a pas dépassé 5500 km².

Le Delta Intérieur du Niger se distingue non seulement par sa taille, mais également par sa dynamique hydrologique. Entre juillet et décembre le niveau de l'eau dépasse les 6 m en saison humide, et se réduit d'autant durant les mois qui suivent. Cependant, au cours des saisons extrêmement sèches, le niveau des crues n'augmente que de 3 m.

Cette grande variation annuelle de la crue a un impact direct sur les ressources naturelles au niveau du Delta Intérieur du Niger. Plus la crue est faible, plus la production de poissons, de riz et de bourgou devient faible. L'impact d'une réduction du débit entrant du fleuve sur les fonctions écologiques et économiques du Delta Intérieur du Niger peut être quantifié. En effet, la production de ces ressources naturelles est étroitement liée à la crue qui, elle-même, dépend du débit entrant des fleuves. Zwarts et al. (2005) ont utilisé cette approche pour évaluer la valeur actuelle nette (VAN) des barrages et de l'irrigation dans le bassin du Haut Niger, en tenant compte de ces effets négatifs en aval.

Le changement climatique au Sahel aura un impact sur la crue du Delta Intérieur du Niger et, par conséquent, sur ses fonctions écologiques et économiques. Cependant, il serait erroné de prendre la situation hydrologique actuelle comme point de départ de l'extrapolation de l'impact du changement climatique sur l'étendue des crues. En effet, même sans aucun changement dans le climat, le Delta Intérieur du Niger affichera une baisse concernant l'étendue de la crue, du fait de la construction de nouveaux barrages et de systèmes d'irrigation en amont dans le bassin du Haut Niger. Cela implique qu'avant de donner un aperçu de l'impact du changement climatique sur l'inondation du Delta Intérieur du Niger, il est nécessaire de commencer par une description de la baisse attendue de l'inondation du fait de la construction de nouveaux barrages et de systèmes d'irrigation en amont.

Ce rapport évalue l'influence humaine sur les changements dans le régime hydrologique du Haut Niger et du probable impact additionnel lié au changement climatique. Nous avons ré-analysé les données utilisées par Zwarts et al. (2005), mises à jour (dans la mesure du possible) pour les années récentes :

- Précipitations annuelles dans le bassin du Haut Niger,
- Débit annuel des fleuves Bani et Niger en amont du Delta Intérieur du Niger,
- Utilisation de l'eau (barrages et systèmes d'irrigation en amont du Delta Intérieur du Niger),
- Inondations annuelles du Delta Intérieur du Niger

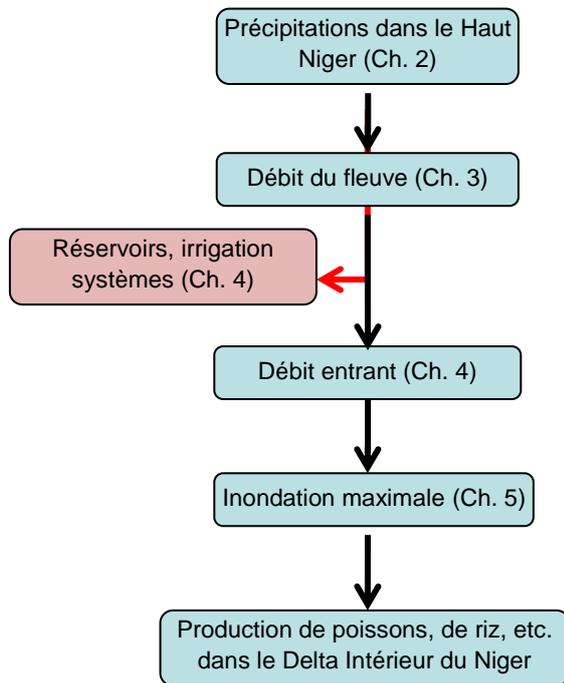


Figure 1-1- Si du fait du changement climatique, les précipitations vont diminuer (chapitre 2) et ainsi entraîner une réduction du débit du fleuve (chapitre 3), dont une grande partie est utilisée pour l'irrigation et le remplissage des réservoirs (chapitre 4). En conséquence, le débit du fleuve à l'entrée du Delta Intérieur du Niger va diminuer, entraînant moins d'inondations (chapitre 5) et, par conséquent, une perte des fonctions économiques et écologiques.

Afin de répondre à la question de savoir si le changement climatique va modifier les conditions de vie des 1,5 millions de personnes vivant dans le Delta Intérieur du Niger, il est nécessaire d'analyser une série de facteurs (Fig. 1-1) :

- L'impact des précipitations dans le bassin versant sur le débit des fleuves Niger et Bani.
- L'impact additionnel des infrastructures existantes et futures au niveau du Bani et du Niger en amont du Delta Intérieur du Niger sur le débit entrant des deux fleuves dans le Delta Intérieur du Niger.
- Le lien entre le débit des fleuves et l'étendue de la crue au niveau du Delta Intérieur du Niger,
- L'impact de l'étendue de la baisse de la crue sur les ressources naturelles et les valeurs écologiques du Delta Intérieur du Niger.

Ce rapport débute par une description du climat sahélien, la façon dont il a déjà changé et dont il pourrait être modifié (chapitre 2). Le chapitre 3 décrit la relation entre les précipitations dans le bassin versant et le débit fluvial, tandis que le chapitre 4 souligne l'impact des barrages et des systèmes d'irrigation en amont du Delta Intérieur du Niger sur le débit fluvial. Le chapitre 5 montre dans quelle mesure l'étendue de la crue du Delta Intérieur du Niger a déjà baissé du fait de la réduction sur long terme des précipitations dans le bassin versant et aussi du fait de toutes les infrastructures construites par l'homme. Le même chapitre montre également dans quelle mesure le niveau du Delta Intérieur du Niger va davantage baisser du fait de la construction de nouveaux barrages et du renforcement des systèmes d'irrigation. Pour finir, le chapitre 6 synthétise l'ensemble des informations et tire certaines conclusions relatives à la future perte des fonctions écologiques et économiques du Delta Intérieur du Niger.

Cette étude commanditée par Wetlands International a été réalisée dans le cadre du projet "GIRE (Gestion intégrée de ressources naturelles) dans le bassin du Niger en amont de Taoussa", - un volet du Programme « Zones Humides et moyens de subsistance » (Wetlands & Livelihoods Programme WLP).

2 Le climat au Sahel

Dans la zone du Sahel, il y a une forte augmentation des précipitations sur un champ latitudinal de seulement 500 km, allant de moins de 100 mm par an au nord à plus de 2000 mm au sud (Fig. 2-1). Cela est dû à la zone de convergence intertropicale (ZCIT), une ceinture de zones de basse pression, entourant l'équateur. Les masses d'air chaude et humide créant un mouvement ascendant au nord et au sud de l'équateur, sont immédiatement aspirées dans la zone de convergence intertropicale et transportées à une altitude de 10-15 km plus au nord et au sud de l'équateur. Pour compenser l'air qui s'élève dans la zone de convergence, le flux du nord descend dans la zone désertique, normalement centrée entre le 20 ° et le 30 ° N. L'air redescend et se réchauffe au fur et à mesure que la pression augmente, devenant sous-charge de vapeur d'eau et conduisant ainsi au ciel dégagé et à l'aridité générale typique du Sahara. Ce système de circulation d'air, connu sous le nom de cellules de Hadley, est affecté par la rotation de la terre, ce qui garantit que le vent dominant sur le Sahara, l'harmattan, souffle toujours depuis le nord-est et non le nord. L'harmattan, un phénomène bien connu en Afrique de l'Ouest, apporte l'air sec et poussiéreux vers le Sahel et au delà. Lorsque le soleil est au zénith dans le Sahara durant l'été boréal, il se forme une ceinture de basse pression sur le Sahel, amenant des nuages, de la pluie, de fréquents orages et une mousson soufflant à partir du Sud-est.

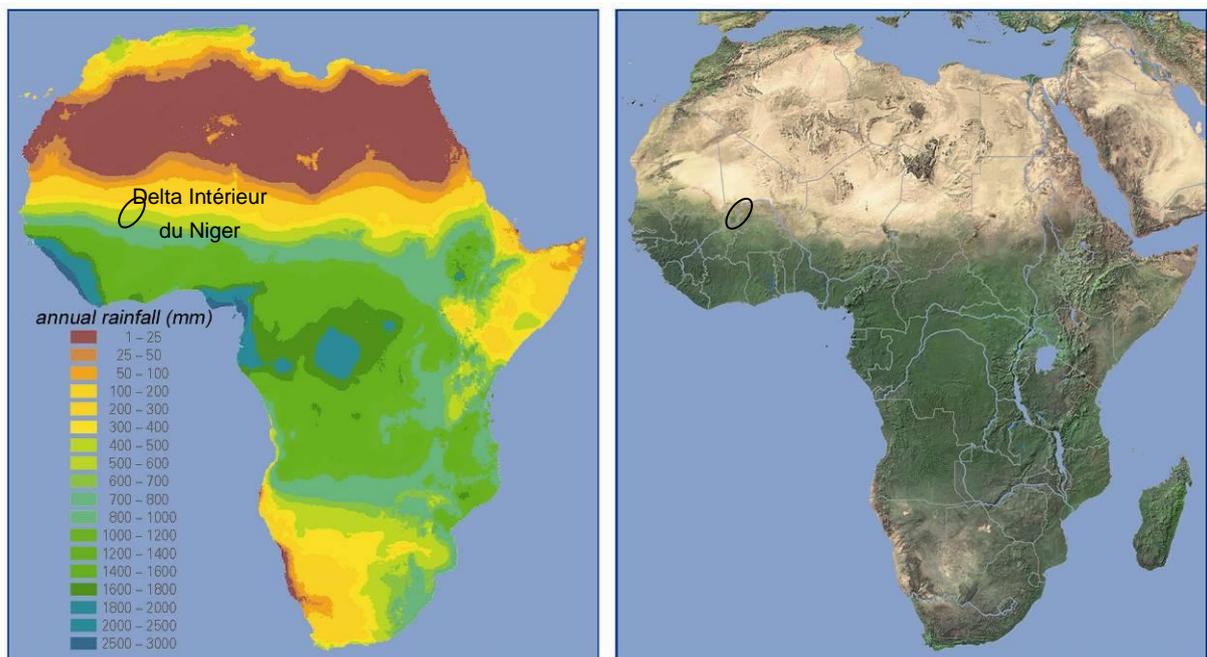


Figure 2-1- Le nord de l'Afrique est extrêmement sec et cela est valable - à un degré moindre -, pour l'est et le sud-ouest. L'Afrique centrale, au contraire, est extrêmement humide. Au sud du Sahara, la transition entre les endroits secs et humides est étonnante de par sa rapidité, avec un doublement de la pluie tous les 160 km en avançant vers le sud. Le Delta Intérieur du Niger (représenté par un ovale) est situé dans cette zone de transition, mais dépend pour sa crue de la pluie jusqu'à 1000 km plus au sud-ouest.

La ZCIT se déplace de façon saisonnière, en fonction de la position du soleil, entre le tropique du Cancer (21 juin) et le tropique du Capricorne (21 décembre). La limite nord de la régularité des pluies attendue dans le Sahel devrait se définir par la position de la ZCIT (avec les nuages porteurs de pluie généralement situés à 150-200 km au sud de celui-ci). La zone de convergence intertropicale étant le

principal mécanisme générateur de pluies en Afrique, cela explique pourquoi le nord et le sud de l'Afrique sont secs, tandis que l'Afrique centrale est humide (Fig. 2-1). Cela explique aussi pourquoi la pluie se manifeste au Sahel durant l'été boréal et en Afrique australe six mois plus tard.

Bien que le mouvement de la ceinture tropicale oscille autour de l'équateur selon un rythme annuel passant de l'hémisphère nord au sud et vice versa, il existe des différences d'année en année. Celles-ci provoquent de grandes variations dans les précipitations locales. Le Sahel connaît non seulement de rapides passages sans égal allant des endroits secs aux endroits humides, mais a également subi une baisse historique sans précédent de précipitations depuis environ 1960. Selon Hulme (1996) et Dai et al. (2004), le Sahel est l'exemple le plus spectaculaire jamais mesuré de la variabilité climatique. De nombreuses recherches ont été conduites afin de comprendre ce qui se trouve au cœur de cette baisse.

2.1 Données historiques

La plus longue série de mesures quotidiennes de la pluviométrie dans le Sahel est disponible au Sénégal pour Saint Louis, dont les précipitations, enregistrées depuis 1848, ont connu plus récemment une variation entre 937 mm en 1921 et 59 mm en 1992 (Fig. 2-2). Cette grande variation est néanmoins cohérente avec une tendance à la baisse au cours des 150 dernières années. Au 19e siècle, seules quelques stations pluviométriques étaient opérationnelles, d'abord uniquement le long de la côte Atlantique (par exemple, Lungi, Sierra Leone, depuis 1875, Banjul, en Gambie, depuis 1884 et à Dakar, au Sénégal, depuis 1898), puis plus tard également à l'intérieur des pays (ex : Tombouctou, Mali depuis 1887 et Kayes, Mali depuis 1896)

Tableau 2-1- La baisse moyenne des précipitations au niveau de sept stations météorologiques calculée pour les séries à long terme, illustrée dans la figure 3 (sauf pour Gambaga en Gambie). "Depuis" = 'année à partir de laquelle les mesures ont commencé'; «n»= le nombre d'années disponibles (jusqu'en 2004) sans données manquantes ; "R²" = variance expliquée dans une régression linéaire de la pluie par rapport à l'année ; " mm / année " = la baisse moyenne au cours des années telle qu'elle découle de la régression linéaire ; "1900" et "2000" : précipitations en 1900 et 2000, provenant de la régression linéaire; "% baisse " = différence relative entre les précipitations en 2000 et 1900.

Site	Depuis	n	R ²	mm/année	1900	2000	% baisse
<i>Saint Louis, Sénégal</i>	1848	152	0.184	-1.53	409.3	256.3	37.4
<i>Lungi, Sierra Leone</i>	1875	120	0.494	-14.02	4022.9	2621.0	34.8
<i>Banjul, Gambie</i>	1884	106	0.108	-3.29	1270.4	941.6	25.9
<i>Kayes, Mali</i>	1896	97	0.087	-1.57	765.4	608.2	20.5
<i>Tombouctou, Mali</i>	1897	99	0.047	-0.43	217.5	173.8	20.1
<i>Dakar, Senegal</i>	1898	107	0.134	-2.19	593.7	374.3	37.0
<i>Gambaga, Gambie</i>	1899	71	0.106	-3.31	1229.2	898.0	26.9

Il existe, en plus de certaines stations météorologiques situées le long du Golfe de Guinée, sept stations en Afrique de l'Ouest dont les mesures ont commencé avant 1900 (tableau 2-1). Toutes ont montré une baisse au cours du 20e siècle, variant entre 20,1% à Tombouctou et 37,4% à Saint Louis. Les précipitations ont affiché une baisse remarquable non seulement au Sahel, mais également plus au sud : les précipitations annuelles à Lungi ont diminué en un siècle de 34,8%, de 4022 mm en moyenne à 2621 mm (voir aussi la fig. 2-2). Lungi affichait également une baisse plus ou moins continue. Les autres stations présentent des variations plus prononcées, humides dans les années 1950, et devenues sèches dans les années 1970 et surtout dans les années 1980.

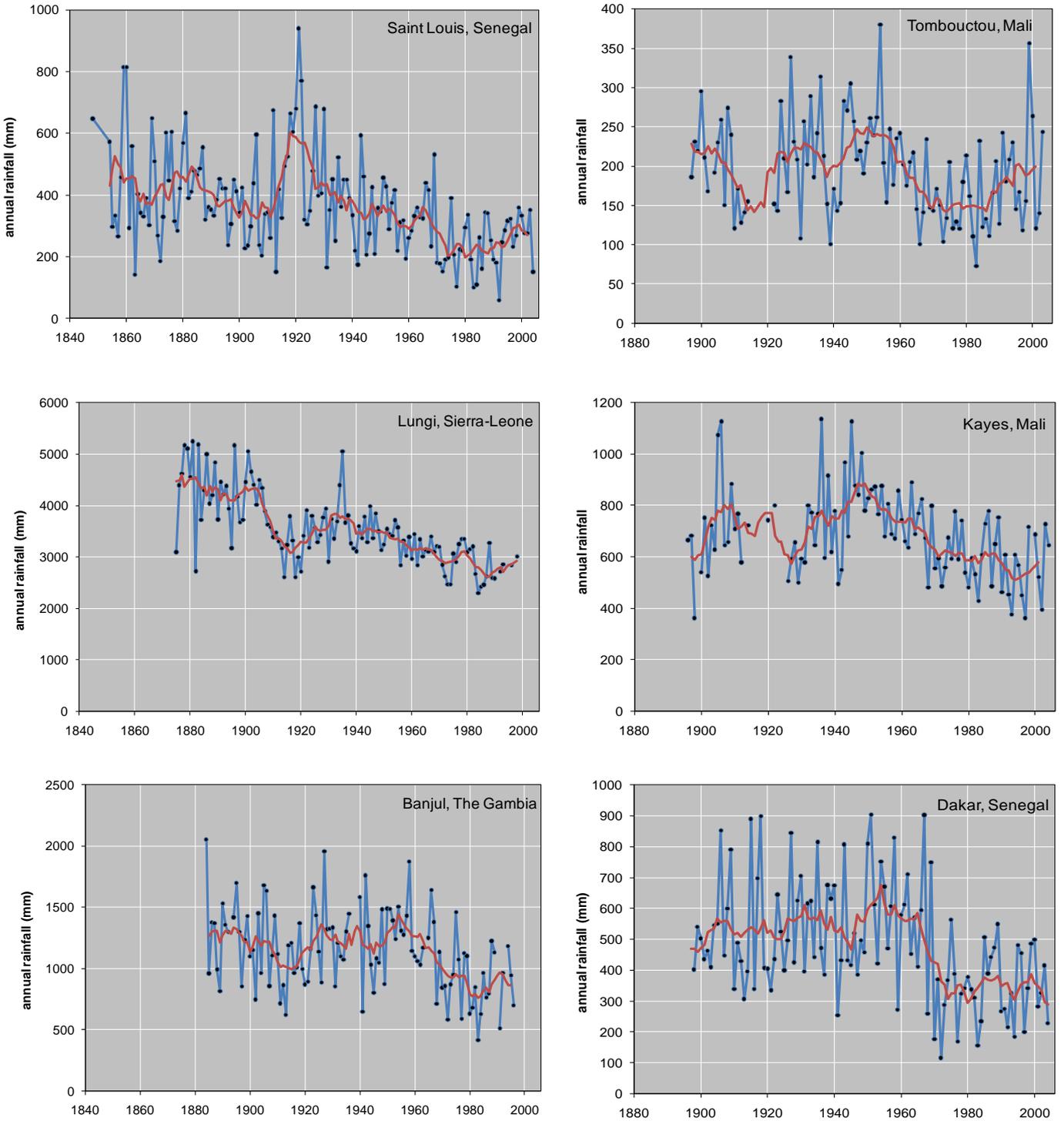


Figure 2-2- Les précipitations annuelles au niveau de six stations météorologiques en Afrique de l'Ouest, ayant les plus longues séries de mesures (chacune commencé avant 1900). La ligne rouge montre la moyenne glissante sur un intervalle de 9 ans (4 ans avant - 4 ans après l'année concernée).

La période des pluies dans le nord du Sahel est limitée à quelques mois, généralement ponctuée par des averses locales et des orages tropicaux. Elle cause de grandes variations locales concernant les précipitations quotidiennes à un point tel que la comparaison avec les stations pluviométriques adjacentes peut montrer des différences remarquables au cours de la saison des pluies. L'existence de ces grandes variations nécessite de nombreuses stations pluviométriques pour décrire de manière adéquate la variation annuelle des précipitations sur l'ensemble du Sahel. Depuis environ 1920, les précipitations ont été mesurées sur l'ensemble du Sahel, le nombre de stations pluviométriques atteignant une pointe entre environ 1950 et 1990, mais elles sont en baisse depuis.

Une analyse de toutes ces données montre que, bien qu'il existe des différences imperceptibles (voir aussi Nicholson 1986, 2005, Nicholson et Palao 1993, Balas et al. 2007), les variations des précipitations d'année en année dans la zone sahélienne à proprement parler (12-18° N), sont assez similaires pour les différentes latitudes. Par conséquent, les précipitations dans la zone Sahélienne à proprement parler peuvent être intégrées de manière adéquate dans un seul indice (Fig. 2-3).

Trois périodes de sécheresse peuvent être distinguées au cours du 20^e siècle : les deux premières, respectivement en 1900-1915 et 1940-1949, ont été suivies par des périodes de plus fortes précipitations. 30 ans plus tard, une autre sécheresse avait encore lieu, mais sans la reprise attendue des précipitations. L'on a assisté à une baisse jusqu'en 1984. Cette dernière période est appelée la Grande Sécheresse en Afrique (1972-1993). Depuis, les précipitations se sont progressivement améliorées.

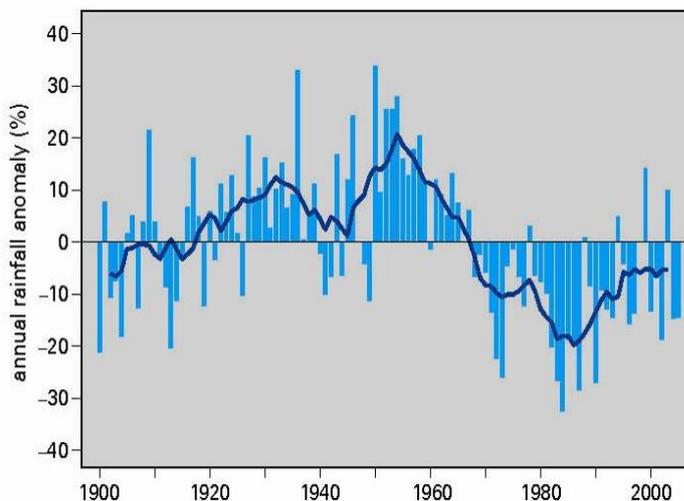


Figure 2-3- La moyenne des précipitations au Sahel depuis 1900 (barres), représentée en pourcentage par rapport à la moyenne au 20^eème siècle. La ligne indique la moyenne en cours calculée sur un intervalle de 9 ans (4 ans avant - 4 ans après l'année concernée).

La récente grande sécheresse n'est pas unique. La baisse observée dans les années 1980 semble importante, dans la mesure où la pointe de la fin des années 1950 a été exceptionnellement élevée. L'histoire climatique de l'Afrique, reconstituée sur la base de sources météorologiques, hydrologiques et historiques (Nicholson, 1981b, 1982, 2001) et de recherches paléohydrologiques (Gasse 1998), a montré plusieurs époques climatiques similaires au cours des derniers siècles. Les royaumes du Ghana, du Mali et du Songhaï se sont développées, ont prospéré puis connu leur déclin avec de longues périodes de pluies abondantes ou de sécheresse (McCann 1999). La période allant de 800 à 1300 est supposée avoir été relativement humide, suivie d'une période plus sèche de 1300 à 1450, une période plus humide jusqu'en 1800 et enfin une baisse graduelle depuis.

2.2 Qu'est ce qui détermine la variation des précipitations ?

L'hypothèse la plus évidente suppose que la baisse des précipitations au Sahel est due à un déplacement vers le sud de l'ensemble de la ZCIT. En effet, la ZCIT est demeurée plus au sud en 1972, la première année extrêmement sèche de la grande sécheresse que le Sahel a connue entre 1972 et 1992 (Fontaine & Janicot, 1996). Toutefois, lorsque l'on compare la longue série d'années sèches et humides, un déplacement vers le sud de la ZCIT ne pouvait pas expliquer la baisse continue des précipitations au Sahel. Aucune augmentation correspondante des précipitations au sud de l'équateur n'était en effet relevée. En revanche, il est apparu que l'action des cellules de Hadley est devenue moins intense (Nicholson, 1981b). D'autres recherches ont confirmé que la circulation atmosphérique au Sahel avait simplement varié entre années sèches et humides (Nicholson & Grist 2003). Cela signifiait qu'une nouvelle hypothèse était nécessaire pour expliquer la circulation atmosphérique changeante. Depuis 1977, il a été admis que les précipitations en Afrique dépendent en grande partie de la température de la surface de la mer (SST), même si le lien est complexe (Hastenrath & Lamb, 1977) et demeure ainsi 30 ans plus tard (Balas et al. 2007). La sécheresse au Sahel survient au cours des années où les températures des océans équatoriaux sont relativement chaudes et les températures des océans subtropicaux relativement basses. Compte tenu de cette complexité, il n'est pas surprenant qu'il ait fallu plus de 25 années de recherches intensives pour commencer à comprendre la relation entre les précipitations au Sahel et les séquences de température des océans des deux côtés du continent.

Les premières études sur la relation entre la température de l'eau de la mer et les précipitations au Sahel ne pouvaient qu'en partie expliquer la récente sécheresse en Afrique de l'Ouest. Une autre explication des changements dans la pluviométrie a concerné l'évolution rapide de l'utilisation des terres et du couvert végétal dans le Sahel et dans les zones de végétation adjacente, compte tenu du fait que le changement climatique avait apparemment provoqué une avancée du désert du Sahara dans le Sahel (Nicholson et al. 1998). La Convention des Nations Unies pour la lutte contre la désertification (CNU-LCD) a laissé entendre que ce processus avait été accéléré par la "désertification", c'est à dire "la dégradation des terres dans les zones arides, semi-arides et sub-humides sèches résultant de divers facteurs, notamment les variations climatiques et les activités humaines". Charney (1975) émit l'hypothèse selon laquelle cette perte de la végétation aurait provoqué un changement dans le flux d'énergie entre la surface et l'atmosphère. Des recherches ultérieures ont montré qu'il était peu plausible que le changement climatique avait été déclenché par la désertification elle-même (Nicholson 2000). Cependant, cela ne signifie pas pour autant que les processus au niveau de la surface ne jouent pas un rôle dans le maintien de la sécheresse. Wang et al. (2004) et Giannini et al. (2005) ont en réalité conclu que les dynamiques de la végétation avaient renforcé le degré de gravité de la sécheresse. Le climat régional peut également avoir été affecté par la poussière dans l'atmosphère (Tegen & Fung 1995). Au cours de la sécheresse survenue dans les années 1970 et 1980, le nombre de tempêtes de poussière dans le Sahel a fortement augmenté (Prospero et al. 2002).

En conclusion, les récents modèles climatiques sont mieux outillés pour permettre de capter conjointement la variation de la pluviométrie au Sahel et la température des océans, sans exclure l'importance attribuée aux effets régionaux.

2.3 Les changements climatiques au Sahel

Qu'est-ce qui par conséquent détermine la variation de la température à la surface des océans ? Si la température de la mer est si importante, quels ont été les changements dans les océans qui pourraient

expliquer la sécheresse persistante au Sahel ? En outre, si la sécheresse au Sahel a une incidence sur les gaz à effet de serre et sur le réchauffement de la planète, que réservera l'avenir ?

Le réchauffement est - en général - un phénomène mondial, et la moitié nord de l'Afrique n'échappe pas à cette tendance. Les six années les plus chaudes dans le nord de l'Afrique depuis 1860 ont été enregistrées après 1998. L'élévation de la température depuis 1970 a été encore plus rapide dans la zone Sahara-Sahel comparée aux autres parties du monde avec une hausse de 0,2 ° C par décennie dans les années 1980.

Les Modèles de Circulation Générale prévoient un réchauffement supplémentaire de l'Afrique au 21e siècle, variant entre 0,2 et 0,5 ° C par décennie (Hulme et al. 2001; Caminade et al. 2006). Le réchauffement devrait être encore plus important au Sahel. La température pourrait par conséquent augmenter de nouveau à 2-7° C dans les 80 prochaines années - une perspective effrayante !

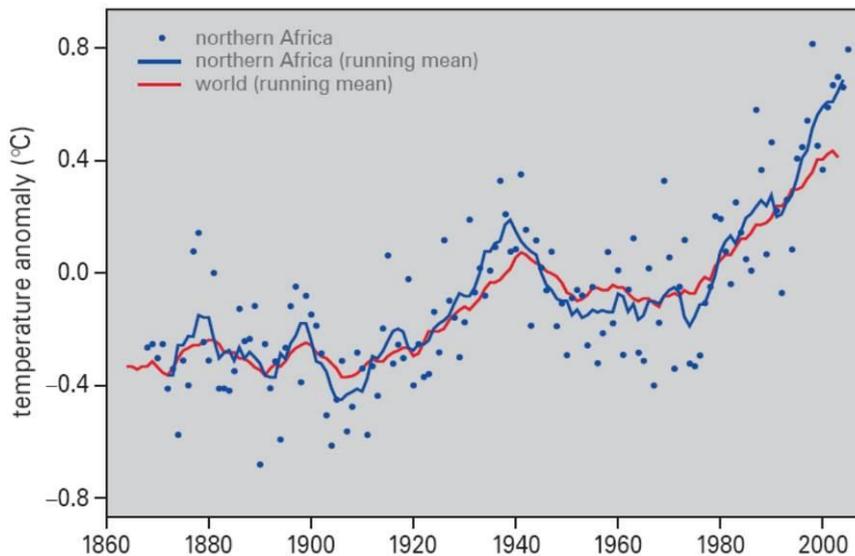


Figure 2-4- La température moyenne donnée comme point de départ de la moyenne 1961-1990 en Afrique du Nord (0-40 ° N, 20 ° W-60 ° E) et à travers le monde (source: www.met-office.gov.uk/research/hadleycentre/CRdata/Monthly/HadCRUG.txt). Les tendances montrent la moyenne glissante calculée sur un intervalle de 9 ans (4 ans avant - 4 ans après l'année concernée).

Les Modèles de Circulation Générale fournissent également des prévisions sur les précipitations. Compte tenu du rôle important que les températures de surface des océans exercent sur les précipitations en Afrique, il faut s'attendre à ce que le réchauffement continu des océans tropicaux conduise à une nouvelle réduction de la pluviométrie. Cependant, le réchauffement climatique peut également influencer sur le gradient de température dans les océans tropicaux et subtropicaux, ce qui compliquerait les prévisions sur les précipitations en Afrique.

Des études plus récentes tentent toujours d'expliquer le phénomène de la variation des précipitations au Sahel (comme souligné Giannini et al. 2008, Caminade & Terray 2010). Trois mécanismes conduisent à la baisse des précipitations :

1. Le refroidissement des océans de l'hémisphère sud et le réchauffement des océans de l'hémisphère nord conduisent à une augmentation des précipitations au Sahel, tandis que le réchauffement des océans de l'hémisphère sud et le refroidissement des océans de l'hémisphère nord auront l'effet inverse. Cette dernière situation semble être observée, ce qui conduirait alors à une baisse des précipitations au Sahel.

2. Une baisse des pluies au Sahel sera également observée en cas de réchauffement de l'Océan Indo-Pacifique (ce qui provoque une troposphère plus stable). Cela semble être le cas également.
3. La désertification au Sahel conduira également à une baisse des pluies.

Contrairement à ces trois mécanismes qui conduisent à une baisse des précipitations, il existe deux raisons de supposer qu'il pourrait y avoir plus de pluies au Sahel.

1. À une température plus élevée, l'atmosphère plus chaude devrait -mondialement- contenir plus d'eau et devenir ainsi plus humide.
2. En raison de la température plus élevée, les cellules de Hadley deviendront plus intenses pour deux raisons, conduisant à davantage de pluies. Il est indéniable que le Sahara deviendra plus chaud, ce qui occasionnera beaucoup plus de pluies dans la zone du Sahel, tandis que pour la même raison, la différence de température au-dessus du continent africain et de l'Océan Atlantique deviendra plus importante.

Dans la mesure où il existe plusieurs mécanismes différents pouvant conduire à l'augmentation ou à la baisse des précipitations au Sahel, il est extrêmement difficile de prévoir si les précipitations seront plus ou moins importantes au Sahel. Après avoir comparé les quatre scénarios de changement climatique et les sept modèles climatiques mondiaux, Hulme et al. (2001) ont conclu que les précipitations annuelles dans la zone du Sahel occidental devraient éventuellement rester au même niveau. Il est cependant plus probable que l'on assiste à une baisse de 10 à 20%, voire 40%.

L'une des difficultés rencontrées avec les Modèles de Circulation Générale se trouve dans l'impossibilité, lorsqu'ils sont appliqués au Sahel, d'y faire figurer la grande sécheresse survenue dans les années 1980. Toutefois, Held et al. (2005) ont récemment présenté un modèle qui semble être en mesure de simuler de manière fiable les précipitations du 20ème siècle pour le Sahel. Ils prévoient que les précipitations jusqu'en 2020-2040 resteront à peu près au même faible niveau que celui des vingt dernières années du 20e siècle, avant de diminuer progressivement d'environ 20% dans les 50-100 prochaines années.

Biasutti & Giannini (2006) ont montré que 16 des 19 modèles utilisés dans le 4ème Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC 4AR), reproduisent un Sahel plus sec à la fin du 20e siècle. Ils concluent que les émissions d'aérosols issus de l'industrialisation, provoquant l'assombrissement global, et donc le refroidissement, dans l'hémisphère nord, ont pu constituer l'une des causes de la sécheresse au Sahel. Au moins 30% de la tendance négative des précipitations observée sur la période allant de 1930 à 2000 étaient d'origine externe (et très probablement d'origine anthropique).

Après avoir comparé 21 scénarios climatiques différents, Caminade & Terray (2010) en ont tiré la conclusion suivante : " nos résultats convergent avec ceux mis en évidence dans Held et al. (2005), à savoir que les prévisions relatives à la sécheresse en Afrique subsaharienne au 21ème pourraient être considérées comme un scénario plausible, mais pas certain". Les rapports établis par l'ACMAD (Centre Africain pour les Applications de la Météorologie au Développement, 2009a et 2009b) pour l'Autorité du Bassin du Niger (ABN) donnent plus de détails sur les statistiques des différents modèles climatiques et sur l'augmentation prévue de la température et la probable baisse des précipitations locales jusqu'en 2025.

Agrhyment (2009) a utilisé les prévisions du changement climatique au niveau du bassin du Niger pour prévoir le débit du fleuve Niger entre 2011 et 2040. Cinq des six modèles en cours d'analyse, montrent une baisse des précipitations dans le Haut Niger et donc une baisse du débit du fleuve (voir cependant le chapitre suivant pour une analyse du lien entre les précipitations et le débit du fleuve).

En conclusion, Il reste encore beaucoup d'incertitudes. Cependant, une baisse des précipitations au niveau de la zone du Sahel semble être probable. Etant donné que les influences humaines sont jugées importantes, il est permis de s'inquiéter de l'avenir.

2.4 L'évaporation dans le Delta Intérieur du Niger et le climat au Sahel occidental

Naturellement, l'évaporation a un impact immédiat sur le climat local en régulant la température. Pendant la saison chaude et sèche, la température diurne au-dessus et à proximité des plaines inondables est inférieure de plus de 10° C par rapport aux endroits secs.

L'évaporation dans les zones inondées du Delta Intérieur du Niger est habituellement décrite comme une "perte d'eau". En réalité, une comparaison entre le débit entrant et sortant du Niger et du Bani dans le Delta Intérieur du Niger montre une grande différence, qui peut être attribuée à la perte d'eau due à l'évaporation (Mahé et al. 2009). La perte d'eau entre Ké-Macina et Douna à l'entrée et Diré de l'autre côté varie d'année en année. Cette variation peut être attribuée à la quantité totale d'eau apportée par les fleuves. Le total annuel du débit fluvial se déversant dans le delta intérieur varie entre 22 et 81 km³. Si la crue est faible, 15 km³ quittent le Delta Intérieur du Niger. Par conséquent, 7 km³, soit 32% du débit fluvial à l'entrée du delta intérieur est perdue par évaporation en saison sèche. En revanche, lorsque l'étendue de la crue est très grande, 40 km³ (soit 50%) du débit total du fleuve est perdu par évaporation. En d'autres termes, la perte d'eau augmente plus que proportionnellement avec la quantité d'eau qui s'écoule dans le Delta. La principale raison qui explique cette relation disproportionnée entre les entrées et la perte d'eau est le fait que dans les années de forte crue, une plus grande surface est recouverte d'eau, ce qui par la suite conduit à une plus grande évaporation. En fonction de la température et du soleil, l'évaporation varie entre 160 et 240 mm par mois, avec une moyenne de 200 mm par mois. Un autre facteur à prendre en compte est la durée du transport des eaux du Niger depuis l'entrée jusqu'à la sortie du Delta Intérieur du Niger. Cette durée varie entre 5 et 7 semaines, selon que la crue est respectivement faible ou élevée.

L'évaporation est une 'perte d'eau' dans un sens hydrologique strict, mais, comme soutenu par Mohamed et al. (2005), les processus atmosphériques ne devraient pas être ignorés dans une planification et une gestion appropriées des ressources en eau à l'échelle du bassin du fleuve. Mohamed et al. (2005) ont montré que 11% des précipitations totales au niveau du bassin du Nil sont générées localement (donc du fait de l'évaporation au niveau du bassin du Nil).

Le document de Taylor (2010), très pertinent pour notre étude, a comparé sur une période de 24 ans l'inondation maximale du Delta Intérieur du Niger avec la couverture nuageuse. Il a révélé en effet qu'il y avait plus de nuages dans une année présentant plus d'inondations. La principale conclusion mérite d'être reprise dans son intégralité:

"Cette étude révèle un lien entre les précipitations au niveau du bassin hydrographique supérieur du Niger et les nombreuses averses survenues à des centaines de kilomètres en aval du fleuve des semaines ou même des mois après. L'efficacité de l'effet de telles précipitations dépendra de la gestion du fleuve en amont des zones humides. Zwarts et al. (2005), en utilisant un modèle hydraulique, ont estimé que les

systemes d'irrigation et hydroélectriques peuvent avoir réduit le débit entrant dans les zones humides en septembre de 10-15%. Toutefois, ils suggèrent que la construction d'un grand barrage hydroélectrique proposé en Guinée se traduirait par une diminution supplémentaire de 33%, conduisant à une réduction de 48% dans la zone inondée en septembre. Un tel changement permettrait de réduire considérablement la fenêtre dans le cycle saisonnier lorsque la zone humide peut influencer sur les précipitations. Cela suggère la possibilité que les grands aménagements hydroélectriques en amont sur le Niger pourraient réduire les précipitations à l'échelle régionale, une suggestion qui pourrait bénéficier d'un examen plus approfondi avec un modèle atmosphérique"

En conclusion, l'abondance de pluies conduit à davantage d'inondations, mais la relation inverse existe aussi : «plus l'étendue de l'inondation du Delta Intérieur du Niger est grande, plus les précipitations seront importantes au niveau de la zone du Sahel occidental ».

3 Précipitations et débit fluvial

Les fleuves en Afrique de l'Ouest connaissent d'importantes variations de débit, entre les saisons. A Koulikoro par exemple, le débit moyen du Niger en septembre est quatre vingt fois supérieur à celui d'avril. Cela est dû à la courte mais intense saison des pluies qui atteint une pointe en août. Il faut un certain temps avant que toute cette eau de surface ne trouve son chemin à travers de faibles dénivellations dans le Haut Niger, qui atteint normalement sa hauteur maximale en septembre ou octobre. Sans cette grande variation saisonnière des précipitations, il n'y aurait pas de plaines inondables saisonnières, et ni par conséquent de Delta Intérieur du Niger.

La crue du Delta Intérieur du Niger est déterminée par le débit entrant des fleuves Niger et Bani, qui à son tour est lié aux précipitations relevées à 600-900 km au sud-ouest de la zone (Fig.3-1). Les précipitations locales sont trop limitées pour avoir un effet sur la hauteur des crues, même si des lacs temporaires peuvent être remplis grâce à l'eau de pluie. Les précipitations moyennes annuelles varient dans le Delta Intérieur du Niger entre 700 mm dans le sud-ouest et 200 mm dans le nord-est. L'essentiel des précipitations tombe en août. La saison des pluies dans le nord du Delta se limite à une période allant de juillet et septembre. Elle est plus longue dans le sud du Delta (juin – octobre ; Fig. 3-2). Dans les hautes montagnes de la Guinée (avec plus de 1500 mm de précipitation par an ; Fig. 3-1), les pluies commencent en avril pour atteindre une pointe en juillet et août (Fig. 3-2).

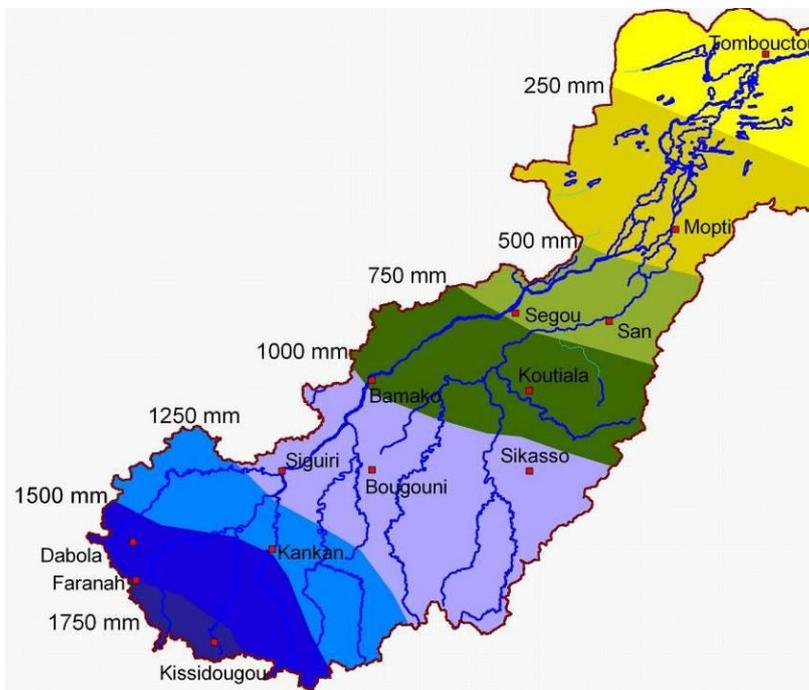


Figure 3-1- Les précipitations annuelles (mm / an) dans le bassin du Haut Niger dans huit zones différentes. Treize grandes stations météorologiques sont indiquées par des points rouges. De : Zwarts *et al.* (2005).

Le Niger et ses affluents (Niandan, Milo et Sankarani) montent dans les hautes montagnes guinéennes (Fig. 3-3). Le Tinkisso, la branche la plus au nord, prend sa source dans le Fouta-Djalon. Le Bani, principal affluent du Niger, draine la partie la plus méridionale du Mali et l'angle nord-est de la Côte-d'Ivoire. Après les crues du Bani dans le Niger, près de Mopti, à l'extrémité sud du Delta Intérieur du

Niger, il n'y a pas plus de débordement en provenance de l'est du Mali et du Niger. En conséquence, l'évaporation réduit progressivement le débit du fleuve.

L'ensemble du bassin versant du Bani (129000 km²) est presque aussi important que le reste du bassin du Haut Niger (147.000 km²). Pourtant, le débit du Bani n'atteint pas la moitié de celui du Niger, dans la mesure où le sous-bassin du Bani reçoit moins de précipitations que les autres sous-bassins du Haut Niger. Nous avons étudié séparément la relation entre les précipitations dans le Haut Niger et le débit du fleuve, ainsi que la relation entre celui du Bani et le reste du Haut Niger. Nous mettons en relation les données des 28 stations pluviométriques de longue durée (carreaux rouges, Fig. 3-3) dans le Bani supérieur et le débit constaté à Douna (carreaux bleus, Fig. 3-3). Voir la relation, Fig. 3-4.

Seules 15 stations de longue durée (points rouges, Fig.3-3) sont disponibles pour le Haut Niger. Afin d'augmenter la taille de l'échantillon, deux stations situées de l'autre côté des limites du bassin ont été incluses dans le calcul de la moyenne annuelle des précipitations.

Ces données sont comparées au débit relevé à Koulikoro (point bleu, Fig. 3-3). Voir la relation, Fig. 3-5.

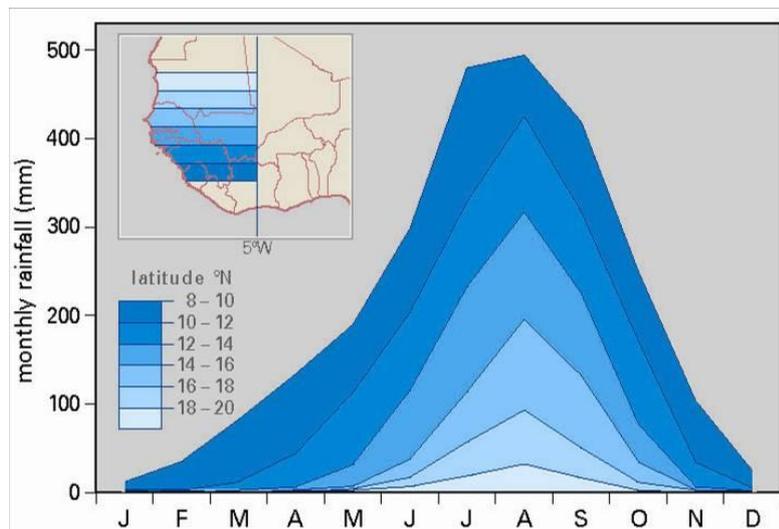


Figure 3-2-. Les précipitations mensuelles moyennes en Afrique de l'Ouest (à l'ouest de 5 ° W) données par latitude. Les pays sont indiqués. Les précipitations données pour les latitudes 14-16 °N et 12-14 °N se rapportent, au Nord puis au Sud du Delta Intérieur du Niger. Il pleut davantage dans le Sud du Delta (comme déjà indiqué, Fig. 3-1), et par ailleurs, la saison des pluies s'y étend sur une période plus longue que dans le Nord du Delta. La saison des pluies commence encore plus tôt dans le cours supérieur du Niger (8-12 °N). De: Zwarts *et al.* (2009).

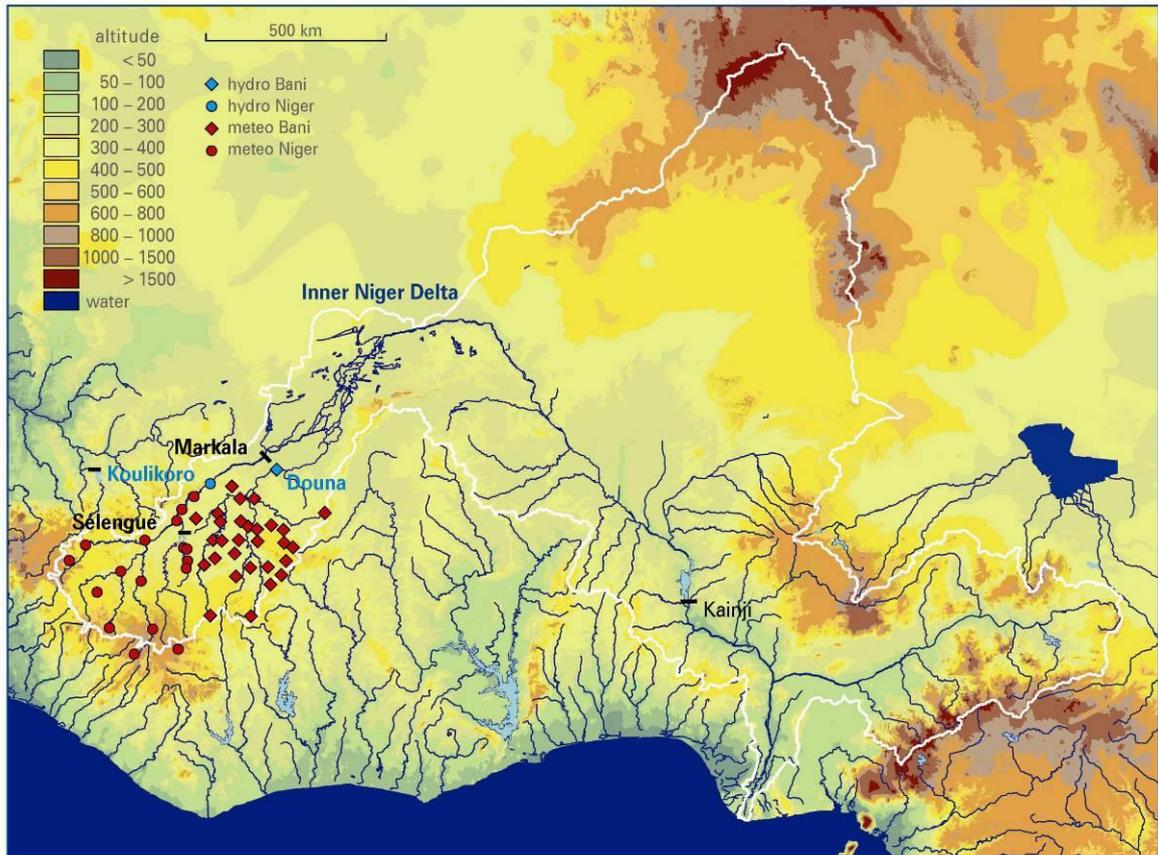


Figure 3-3. Le bassin du Niger, montrant trois barrages (Sélingué et Markala dans le Haut Niger et Kainji dans le Niger inférieur), les stations hydrologiques (Koulikoro et Douna) et 45 stations météorologiques de longue durée situées dans le Haut Niger. De : Zwarts *et al.* (2009).

Les précipitations annuelles dans le bassin du Bani varient généralement entre 1000 et 1200 mm (Fig. 3-4). Le débit du Bani en septembre est passé de 3000 m³/s à seulement 250 m³/s, lors de la sécheresse du début des années 1980. Il a par la suite progressivement augmenté. L'effet à long terme d'une succession d'années sèches sur le débit du Bani est évident. Le Bani était un fleuve dont le débit était entièrement naturel jusqu'en 2006, date à laquelle le barrage de Talo est devenu opérationnel.

Depuis 1922, la moyenne annuelle des précipitations dans le Haut Niger a varié entre 1300 et 1600 mm (Fig. 3-5). La tendance est similaire à celle observée pour le Bani (Fig. 3-4). Mais là où le Bani a perdu 80% de son débit au cours de la grande sécheresse des années 1980, la diminution du Niger a été légèrement inférieure à 50%.

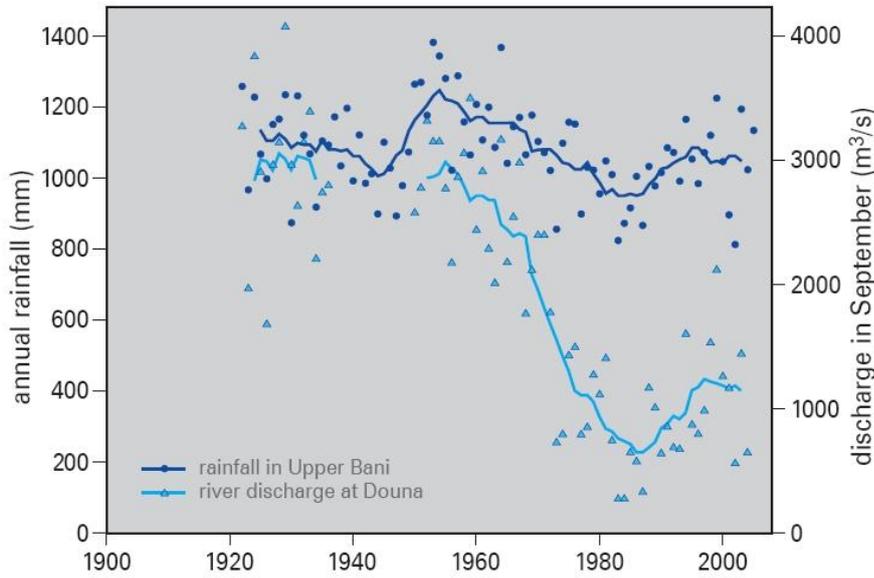


Figure 3-4- Les précipitations moyennes annuelles du Bani supérieur pour 28 stations pluviométriques dans la zone du bassin versant (symboles bleu foncé, axe des ordonnées de gauche y) et le débit du fleuve en septembre à Douna (symboles bleu clair, axe des ordonnées de droite). Les tendances montrent les moyennes sur 9 ans. Voir Fig. 3-3 pour la localisation de Douna et des stations pluviométriques. De : Zwarts *et al.* (2009).

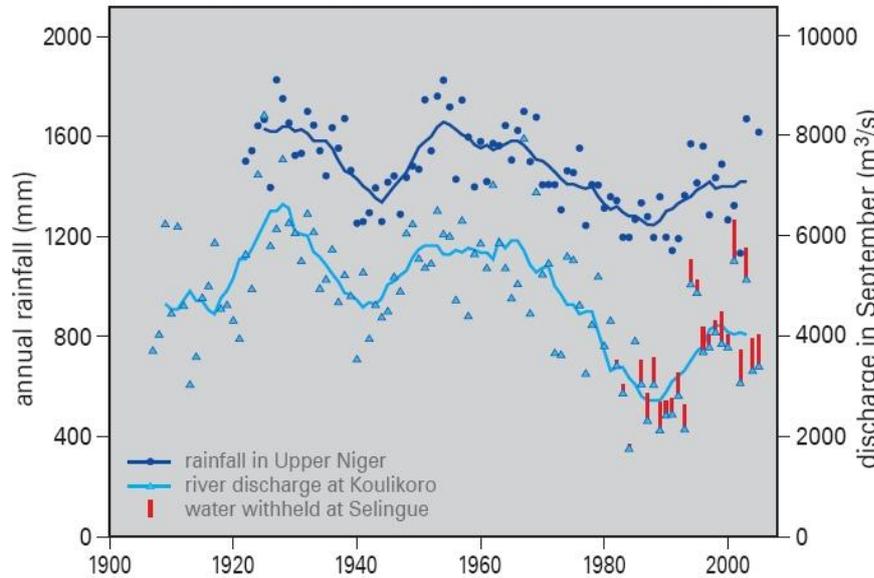


Figure 3-5- Les précipitations moyennes annuelles du Bani supérieur (symboles bleu sombre, axe des ordonnées de gauche) pour 17 stations pluviométriques dans la zone du bassin versant (symboles bleu sombre, axe des ordonnées de gauche) et le débit du fleuve en septembre à Koulikoro (symboles bleu clair, axe des ordonnées de droite). Les tendances montrent les moyennes sur 9 ans. Les barres rouges montrent l'effet du réservoir de Selingué sur le débit du fleuve en septembre. Voir Fig. 3-3 pour l'emplacement de Selingué, Koulikoro et des stations pluviométriques. De : Zwarts *et al.* (2009).

En conclusion, la comparaison entre les précipitations et l'écoulement dans les différents bassins révèle une grande variation dans le débit du fleuve et une variation beaucoup plus faible dans les précipitations. L'explication se trouve dans l'effet cumulatif des précipitations sur les débits du fleuve : les années sèches réduisent l'écoulement, mais un certain nombre d'années pluvieuses est ensuite nécessaire pour atteindre un haut débit. En d'autres termes : les écoulements du fleuve ne sont pas seulement liés aux pluies de la précédente saison humide, mais aussi, dans une large mesure, aux saisons humides antérieures. Par conséquent, une baisse de l'écoulement après une série d'années sèches, au cours desquelles l'écoulement est insuffisant pour maintenir la nappe phréatique à un certain niveau, entraîne à son tour une augmentation de l'infiltration des eaux de surface. Dans la zone du bassin versant du Bani, Mahé *et al.* (2000) ont observé qu'un faible écoulement allait de pair avec un bas niveau des eaux souterraines.

4 L'impact humain sur le débit fluvial

Le débit des fleuves Niger et Bani dépend de la pluviométrie, mais également des infrastructures humaines, telles que le barrage de Sélingué responsable de la réduction du niveau des crues du fleuve Niger. Le réservoir de Sélingué est l'une des trois grandes infrastructures hydrauliques existantes dans le bassin du Haut Niger. La construction de trois autres infrastructures est actuellement à l'étude (Fig. 4-1).

Les réservoirs existants et prévus ont un impact sur le débit du fleuve et, par conséquent, sur l'inondation du Delta Intérieur du Niger. Dans la mesure où la quantité d'eau consommée ne diffère guère durant les années sèches et humides, l'impact relatif de ces infrastructures sur le débit du fleuve s'accroît au cours des années à faibles crues.

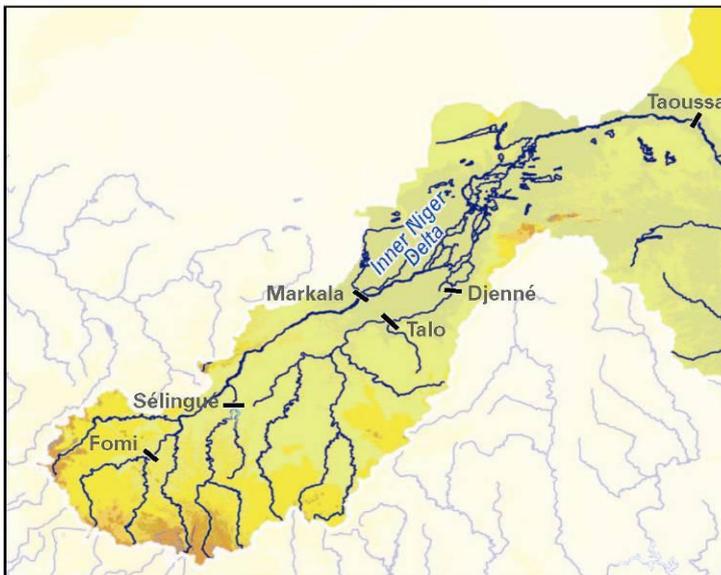


Figure 4-1- Le Haut Niger avec le fleuve Niger et ses embranchements. Les barrages existants (Sélingué, Markala, Talo) ou encore à l'étude (Fomi, Djenné, Taoussa) sont mentionnés.

4.1 Sélingué

Depuis 1982, le débit du Haut Niger n'a pas été entièrement naturel en raison de la construction du réservoir de Sélingué dans le Sankarani, qui couvre 450 km² lorsqu'il est plein (2,1 km³). Depuis sa construction, les débits entrants et sortants mensuels ont été enregistrés. Les quantités de pertes annuelles d'eau s'élèvent à 0,83 km³, dont 0,57 km³ qui sont perdus par évaporation, et le reste se transformant en eaux souterraines (Zwarts et al. 2005a.). L'on observe également un phénomène plus important que la perte d'eau : le changement de débit saisonnier d'eau. Le débit dans le réservoir (qui représente l'écoulement naturel) est réduit, en moyenne, de 61% en août et de 36% en septembre du fait du remplissage du réservoir. En revanche, lorsque l'eau est libérée à partir du barrage durant la saison sèche, le débit sortant est, entre février et avril, environ trois fois supérieur au débit naturel. Durant les

premières années de son existence, les effets du barrage de Sélingué ont été limités (barres rouges sur la Fig. 3-5), dans la mesure où le lac n'a été que partiellement vidé au cours de l'année et pas entièrement rempli à nouveau. Au-delà des premières années, 1,8 km³ du débit annuel est retenu par le réservoir de Sélingué en août et septembre, dont 0,5 km³ sont perdus par évaporation et 0,2 km³ par mois libérés durant la saison sèche. L'eau stockée chaque année dans le réservoir atteint 10 à 20% de la pointe de crue durant les années humides, et 20 à 30 % pendant les années sèches.

Tableau 4-1- L'écart moyen (m³/s) entre les débits entrants et sortants mensuels du réservoir de Sélingué dans la période 1989-2008 ("Moyenne"), pendant les cinq années où le débit du fleuve a été le plus faible (1989-1993; "Sèches") et les cinq années où le débit a été le plus important (1994, 1995, 2001, 2003; "Pluvieuses"»).

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Moyenne
Moyenne	-50,3	-62,3	-97,3	-124,8	-116,6	-92,7	7,8	344,4	348,1	98,4	15,7	-30,1	20,0
Sèches	-40,5	-51,9	-81,9	-121,0	-101,5	-93,1	-2,5	363,7	367,9	70,8	15,2	-46,3	23,2
Pluvieuses	-30,9	-50,6	-76,3	-124,6	-126,0	-144,4	-5,9	409,4	270,1	89,8	10,1	-28,4	16,0

Le tableau 4-1 montre, pour les années sèches et pluvieuses, l'eau stockée dans le réservoir (débit entrant plus important que le débit sortant) ou libérée à partir du réservoir (débit entrant inférieur au débit sortant). Durant une année qui connaît un débit entrant important, le réservoir est, pour une large part, déjà plein en août. En revanche, durant une année sèche, une quantité relativement plus importante d'eau est retenue en septembre. En outre, la variation annuelle du débit du fleuve n'a guère d'impact sur le régime saisonnier de stockage et d'écoulement de l'eau.

4.2 Petits systèmes d'irrigation dans le Haut Niger

Les rizières situées immédiatement en aval du barrage de Sélingué s'étendent sur 1400 ha ; le périmètre consomme 1,1 m³ / s (tableau 4-2). A 40 km en aval du barrage de Sélingué, le périmètre irrigué de Maninkoura représente 850 ha. Selon l'Enquête Agricole de Conjoncture, l'Office de la Haute Vallée du Niger (OHVN) envisage de mettre en oeuvre sept autres projets d'irrigation en aval, le long du Sankarani sur une surface totale 3700 ha (Schüttrumpf & Bökkers 2008). Le barrage de Kourouba (qui sera construit entre 2010 et 2015) dans le Sankarani, juste en aval du barrage de Sélingué, permettrait d'irriguer les rizières situées près de Maninkourou (5000 ha).

Le long du Haut Niger, l'OHVN gère 12.000 autres hectares de rizières (Schüttrumpf & Bökkers 2008 ; Enquête Agricole de Conjoncture).

Le périmètre irrigué de Baguinéda situé près du barrage de Sotuba comprend une superficie de 2400 ha. Hassane (1999) a mentionné une consommation annuelle d'eau de 6,8 m³/s pour Baguinéda, et Schüttrumpf & Bökkers 2008 donne une estimation distincte pour la saison sèche (3 m³/s) et la saison humide (9,5 m³/s) (tableau 4-2).

La consommation annuelle en eau pour l'irrigation des 17.776 ha de rizières irriguées situées le long du Haut Niger peut être estimée en 2008-2009 à environ 18 m³ / s. Cette consommation augmentera jusqu'à 20-25 m³/s si le barrage de Kourouba est fonctionnel.

Tableau 4-2- La quantité moyenne d'eau prélevée par mois (m^3/s), pour l'irrigation par l'ODRS près du barrage de Sélingué et par l'OPIB près du barrage de Sotuba (Baguinéda). Les données de Sélingué se réfèrent aux années 1982-2003 et sont tirées de Zwarts et al. (2005 ; leur annexe 2, basée sur les données de l'ODRS et EDM). Les données de Baguinéda, recueillies par l'OPIB, ont été tirées de Schüttrumpf & Bökkers (2008).

Site	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Moyenne
Sélingué	0,8	1,6	1,8	1,9	1,2	0,3	0,3	0,7	1,2	1,5	1,3	0,7	1,1
Baguinéda	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	3,0	6,8

4.3 L'Office du Niger

La zone d'irrigation gérée par l'Office du Niger a été rendue possible grâce au barrage de Markala. Ce barrage traversant le fleuve est utilisé pour élever le niveau d'eau de 5,5 m au-dessus du niveau d'eau le plus bas du fleuve, ce qui permet l'irrigation par gravitation. La zone d'irrigation de l'Office du Niger est située dans le Delta mort, un ancien bras du fleuve Niger. Le barrage de Markala est opérationnel depuis 1947, mais il a fallu de nombreuses années avant que le système d'irrigation se développe.

La consommation d'eau, telle qu'elle a été agréée par l'Office du Niger, s'élève à 2,69 km^3 par an, soit l'équivalent de 86,5 m^3/s . Malgré l'extension progressive de la zone irriguée, l'extraction totale de l'eau est restée au même niveau entre 1988 et 2009. Sur la même période, le débit annuel du fleuve à Markala a varié entre 539 et 1229 m^3/s . En conséquence, l'utilisation de l'eau par l'Office du Niger n'excède pas 7% d'un débit élevé du fleuve (1995), mais elle passe à 16 % lorsque le débit est faible (1989). La consommation annuelle d'eau ne diffère pas selon les années sèches et humides (tableau 4-3).

L'utilisation mensuelle de l'eau par l'Office du Niger varie selon les saisons et est de 60 m^3/s en janvier, pour augmenter progressivement et atteindre 130 m^3/s en octobre, puis diminuant à 90 m^3/s en novembre et atteindre 50 m^3/s en décembre. L'approvisionnement en eau disponible varie de 100 m^3/s en mars à 3200 m^3/s en septembre. Ainsi 60 % du débit d'eau est drainée en mars contre seulement quelques pour cent en septembre.

Tableau 4-3. La quantité d'eau prélevée en moyenne par mois (m^3/s) pour l'irrigation par l'Office du Niger près de Markala entre 1989 et 2009 ("moyennes", pendant les cinq années où le débit du fleuve a été le plus bas (1989-1993; "sèches") et les cinq années où le débit du fleuve a été le plus important (1994, 1995, 2001, 2003, 2008 ; "humides").

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Moyenne
Moyennes	58,3	62,5	71,1	74,5	87,0	95,8	95,7	97,1	121,4	131,4	88,7	54,6	86,5
Sèches	62,2	62,3	63,6	64,5	87,1	84,6	76,8	90,0	129,4	136,6	105,6	67,7	85,9
Humides	55,8	65,1	68,3	73,1	87,6	85,1	90,8	91,1	120,0	130,2	86,2	50,4	83,6

La consommation d'eau en septembre et octobre s'élève à 120-130 m^3/s (tableau 4-3) et n'a jamais excédé 146 m^3/s sur une période d'un mois. Cette limite est déterminée par les dimensions du système hydrologique. L'eau du fleuve située juste en amont du barrage de dérivation est dirigée à travers un grand canal d'une capacité maximale de 200 m^3/s vers le point A, à partir duquel elle se répartit entre trois grands canaux :

- Le Canal du Sahel (max. 100 m^3/s) déversant vers le nord dans le Fala de Molodo en direction des zones irriguées au nord de Niono.
- Le Canal Costes-Ongoïba (max. 13 m^3/s) approvisionnant les plantations de canne à sucre de Siribala.

- Le Canal du Macina (max. 45 m³/s) menant au Fala de Boky-Wéré, prenant la direction Est vers les polders du Macina.

La première priorité de l'Office du Niger est d'accroître la capacité du canal du Sahel (de 100 à 190 m³/s) et du Canal du Costes-Ongoïba (13 à 45 m³/s), et de ne pas augmenter le débit le long du Canal du Macina (45 m³/s). Cela signifie que l'extraction totale maximale de l'eau passerait de 130 m³/s en septembre-octobre à 280 m³/s.

Toutefois, l'attribution d'une concession de 100.000 ha à Malibya dans la zone d'irrigation à l'est, alimentée par le canal du Macina, a accru la demande en eau. Cette extension n'est possible que si le canal du Macina est agrandi ainsi que le canal principal menant au point A. Pour étendre l'Office du Niger à une superficie de 280.000 ha, la consommation totale d'eau augmentera davantage jusqu'à atteindre près de 500 m³/s, au lieu de 130 m³/s actuellement.

4.4 Fomi

Le barrage de Fomi est encore à l'étude. Il est prévu de construire le réservoir dans l'affluent Niandan en Guinée-Conakry. Le réservoir, combiné à l'irrigation et au contrôle des crues, est destiné à fournir de l'hydroélectricité. Le réservoir de Fomi aura environ la même superficie que le lac de Sélingué (500 km²), mais sera beaucoup plus profond (jusqu'à 12 m), et contiendra par conséquent trois fois plus d'eau que le réservoir de Sélingué. L'impact du réservoir de Fomi a été simulé par Zwarts & Grigoras (2005). Ces derniers ont formulé l'hypothèse que si la gestion de l'eau du barrage de Fomi était similaire à la gestion du réservoir de Sélingué, l'impact sur le débit au cours des périodes humides et sèches serait similaire à celui observé à Sélingué, même si son ampleur devrait être environ 2,9 fois plus importante.

Il importe cependant de prendre en compte le fait que le stockage d'eaux mortes est différent pour les deux réservoirs, soit de 0,24 km³ ou 11% du lac Sélingué s'il est plein, mais de 2,46 km³ ou 40% du lac Fomi s'il est plein. Le rapport du volume effectif est de 3,7 : 1,93. Ainsi, l'impact attendu de Fomi devrait être de l'ordre de 1.9 fois celui de Sélingué.

Ce qui différencie également Sélingué de Fomi concerne les débits entrants annuels dans le réservoir de Fomi qui seraient presque deux fois plus faibles que les débits entrants moyens du Sankarani (12 km³) vers le réservoir de Sélingué. En supposant que le réservoir de Fomi soit géré de la même manière que celui de Sélingué, si l'on prend en compte la limitation des débits entrants mensuel prévue et le volume effectif, nous pouvons en déduire que pour remplir le réservoir de Fomi, 1,0 km³ seront retenus en août, 1,6 km³ en septembre et 1,2 km³ en octobre (équivalant respectivement à 373, 617 et 448 m³/s).

4.5 Réduction du débit du fleuve Niger

Les réservoirs existants et futurs ont un impact sur le débit du fleuve (tableaux 4-1,4-2,4-3) et, par conséquent, sur les crues du Delta Intérieur du Niger. Dans la mesure où la quantité d'eau consommée ne diffère pas selon les années sèches et humides, l'impact relatif de ces infrastructures sur le débit du fleuve s'accroît durant les années où le fleuve connaît un faible débit. Le tableau 4-4 donne une reconstitution du débit naturel mensuel du fleuve Niger à Markala durant les années relativement sèches. Une sélection a été faite pour la période 1989-1993 lorsque le débit moyen était en septembre de 2050 m³/s, représentant un débit de 20% par rapport à celui des années 1989-2008 situées en dessous de ce niveau et 80% des années situées au-dessus de ce niveau.

Le débit naturel a été estimé en ajoutant l'eau retenue au débit actuel, ou en soustrayant l'eau libérée à Sélingué (tableau 4-1 ; Zwarts et al, 2005b: P. 273-275) et en ajoutant l'eau prélevée dans le Haut Niger pour l'irrigation (Tableau 4-2 ; Zwarts et al, 2005b : p. 278). Le changement attendu dans le débit du fleuve, dans l'hypothèse d'une nouvelle extension de l'Office du Niger et d'une arrivée d'eau croissante, est inconnu. La consommation d'eau entre juillet et décembre sera probablement deux fois plus élevée, mais elle pourrait devenir quatre fois plus élevée en cas d'agrandissement de l'arrivée le long du Canal du Macina.

Tableau 4-4- Le débit mensuel du fleuve Niger à Markala, sans infrastructures humaines («naturel»), avec les infrastructures existantes («réel», avec une consommation d'eau double par l'Office du Niger ("2020"), et dans l'hypothèse où le barrage de Fomi serait construit (" 2030? "). L'utilisation de l'eau est tirée du tableau 4-1 (Réservoir de Sélingué, année sèche), du tableau 4-2 (Irrigation à Sélingué et Banguineda) et du tableau 4-3 (irrigation de l'Office du Niger, année sèche). L'utilisation actuelle de l'eau par l'OHVN dans le Haut Niger est ignorée, mais est supposée être au moins aussi importante que l'utilisation actuelle combinée de l'eau de Sélingué et Banguineda. La consommation d'eau par l'Office du Niger anticipée peut être ramenée à 280 m³/s avec un système élargi d'arrivée d'eau. La consommation présumée d'eau de juillet à décembre est par conséquent deux fois plus importante qu'à l'heure actuelle. L'estimation de l'eau retenue à Fomi est expliquée dans le texte. Toutes les données se rapportent à une année relativement sèche (en prenant comme moyenne 1989-1993).

NIGER à Markala (m³/s)	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Moyenne
Naturel	161.5	106.8	74.5	40.4	126.9	172.7	524.1	1628.7	2557.6	2039.8	928.8	353.1	726.3
Réservoir de Sélingué	-40.5	-51.9	-81.9	-121.0	-101.5	-93.1	-2.5	363.7	367.9	70.8	15.2	-46.3	23.2
Irrigation à Sélingué	0.8	1.6	1.8	1.9	1.2	0.3	0.3	0.7	1.2	1.5	1.3	0.7	1.1
Irrigation à Banguineda	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	9.5	9.5	9.5	9.5	9.5	9.5	3.0	6.2
Irrigation Office de Niger	62.2	62.3	63.6	64.5	87.1	84.6	76.8	90.0	129.4	136.6	105.6	67.7	85.8
Actuel	136.0	91.8	88.0	92.0	137.2	171.4	440.0	1164.8	2049.6	1821.4	797.2	328.0	609.8
Irrigation Haut Niger	3.8	4.6	4.8	4.9	4.2	9.8	9.8	10.2	10.7	11.0	10.8	3.7	7.3
Extension Office du Niger							76.8	90.0	129.4	136.6	105.6	67.7	37.7
2020	132.2	87.2	83.2	87.1	133.0	161.6	353.4	1064.6	1909.5	1673.8	680.8	256.6	564.9
Réservoir Fomi								373.0	617.0	448.0			
2030 ?								691.6	1292.5	1225.8			

Le tableau 4-4 ne donne pas d'estimation du changement attendu concernant le débit du fleuve en aval de Markala pendant les mois secs. Il est à prévoir que, si le Fomi était construit, l'eau libérée du Fomi entre décembre et juillet serait utilisée, pour la plus grande part, par l'Office du Niger (Tableau 4-4). À l'heure actuelle, l'eau supplémentaire libérée par Sélingué durant les mois secs est également entièrement consommée par l'Office du Niger (tableau 4-4) et il est probable qu'il en soit de même avec l'eau du réservoir de Fomi. Par conséquent, Sélingué, et peut-être aussi Fomi, réduisent le débit entrant dans le Delta Intérieur du Niger pendant la crue, mais en raison de la consommation d'eau par l'Office du Niger, le débit n'augmente pas durant les mois secs.

4.6 Talo

Le barrage de Talo, construit en 2005 sur le fleuve Bani, est destiné à faciliter l'irrigation. Le projet consistait à développer 20.320 ha, dont 16.030 de rizières irriguées, le reste devant être converti en bourgou (prairies humides) et en étangs de poissons (Fonds Africain de Développement, 1997). L'on

s'attend à ce que, en raison du barrage de Talo, le débit du Bani à Mopti soit diminué de 0,39 km³ entre juillet et octobre (al BCROM et al. 2006a, 2006b, Lamagat 2006). Lamagat (2006) donne l'effet attendu sur le débit à Mopti sur des périodes de 10 jours entre début juillet et fin octobre. Ces données sont résumées pour chaque mois dans le tableau 4-5.

Tableau 4-5. La perte mensuelle prévue concernant le déversement du Bani (m³/s) dû au barrage de Talo au cours d'une année sèche. Source : Lamagat (2005), qui a défini une année sèche par une année où le débit du fleuve est plus élevé dans 90 % des années considérées.

Talo	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Moyenne
Sèche							3,0	49,7	15,3	29,7	59,7		31,5

4.7 Djenné

Le barrage de Djenné est destiné à compenser les pertes d'eau dans le Bani inférieur causées par le barrage de Talo. En raison du barrage, un réservoir de 150 km² et 0.357 km³ va se créer, 245 km² seront inondés et sont censés être couverts par une végétation de bourgou.

Lamagat (2006 ; voir aussi BCEOM et al. (2006a) a étudié la variation du débit du fleuve en raison de l'eau retenue au niveau du barrage de Djenné et de l'irrigation. Durant une année connaissant un débit moyen, le niveau d'eau à Sofara sera en septembre de 30 à 55 cm plus bas. Cependant, durant une année sèche, il sera de 64 à 90 cm plus bas. Plus en aval, l'impact sera moindre, même si à Mopti, où le Bani se jette dans le Niger, le niveau d'eau est encore réduit de 5 à 15 cm durant une année connaissant un débit moyen et de 17-27 cm durant une année sèche. La réduction mensuelle du déversement à Mopti en raison du barrage de Djenné est présentée dans le tableau 4-6 pour une année sèche et une année moyenne.

Tableau 4-6- La perte mensuelle prévue en termes débit du Bani à Sofara (m³/s) en raison du barrage de Djenné au cours d'une année sèche et d'une année moyenne. Source : BCEOM et al. (2006a).

Djenné	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Moyenne
Sèche							16	60	91	112	84		72.6
Moyenne							15	46	82	162	99		80.8

4.8 Réduction du débit du Bani

Le tableau 4-7 donne des indications sur les débits mensuels naturels, réels et prévus du Bani, en tenant compte de l'impact des barrages de Talo (tableau 4-5) et de Djenné (tableau 4-6). Aucun impact n'est indiqué pour la période décembre-juillet, mais la quantité d'eau retenue ou libérée durant ces mois sera probablement relativement faible.

Tableau 4-7- Le débit mensuel du Bani à Sofara (m³/s) sans le Talo («naturel»), avec le Talo («actuel») et avec Talo et le Djenné (« 2020 »). Les données sur l'utilisation de l'eau sont tirées du tableau 4-5 (Talo) et du tableau 4-6 (Djenné). Toutes les données se rapportent à une année relativement sèche (en prenant comme moyenne 1989-1993).

BANI à Sofara (m³/s)	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Moyenne
Naturel	41.6	21.8	9.5	4.0	1.7	7.3	51.6	303.5	605.8	504.8	202.4	81.0	152.9
Talo							3.0	49.7	15.3	29.7	59.7		31.5
Actuel							48.6	253.8	590.5	475.1	142.7		
Djenné							16.0	60.0	91.0	112.0	84.0		72.6
2020							32.6	193.8	499.5	363.1	58.7		

4.9 Le débit entrant des fleuves Niger et Bani dans le Delta Intérieur du Niger

L'impact combiné des infrastructures existantes et futures, et du débit entrant dans le Delta Intérieur du Niger est représenté dans la Fig. 4-2. À l'heure actuelle, 20 % des pointes de crue sont perdus en septembre, et cela devrait passer à 25 % en 2020 (avec une arrivée d'eau par l'Office du Niger deux fois plus importante qu'à l'heure actuelle) et à 50% si le barrage de Fomi deviendrait opérationnel. La ligne verte (extension ON) et la ligne violette (extension ON + Fomi) seront de 240 m³/s plus faibles si l'utilisation de l'eau par l'Office du Niger deviendrait quatre fois plus importante qu'à l'heure actuelle. Le débit du Bani en septembre a été réduit de 2,5% et ce chiffre passera à 17,5%. Les implications pour le Delta intérieur du Niger sont présentées dans le prochain chapitre.

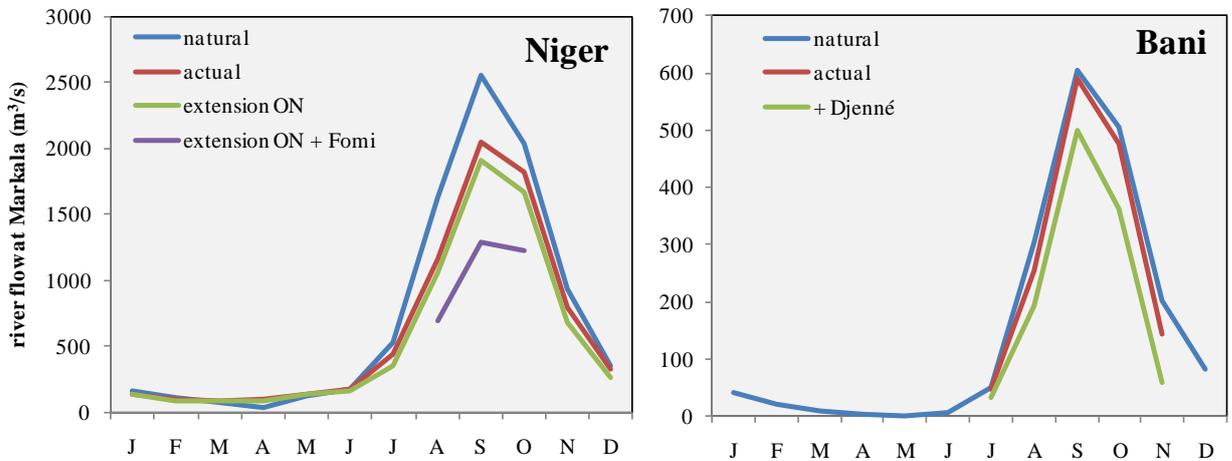


Figure 4-2- Le débit mensuel naturel, actuel et futur du fleuve Niger à Markala (en aval du barrage) (à gauche) et du fleuve Bani à Sofara (à droite). Toutes les données sont tirées du tableau 4-4 pour le fleuve Niger et le tableau 4-7 pour le Bani.

24 A&W rapport 1556 Le Delta Intérieur du Niger s'assèchera-t-il du fait du changement climatique et de l'utilisation de l'eau en amont ?

5 Inondation maximale, débit entrant et précipitations

L'inondation du Delta Intérieur du Niger dépend du débit entrant combiné du Niger et du Bani lors de la crue. Le débit de pointe en septembre a montré une variation considérable pour le Bani, mesuré à Douna depuis 1922. Le débit de pointe minimal, mesuré en 1984 (254 m³/s), est de 7,3% par rapport au débit de pointe maximal, mesuré en 1929 (3470 m³/s) (Fig. 3-4). La variation est moins extrême pour le Niger à Koulikoro, connue depuis 1906 : le débit de septembre a été minimal en 1984 (1649 m³/s) et a atteint son maximum en 1928 (7586 m³/s) (Fig. 3-4). En conséquence, il y a aussi une grande variation annuelle de l'étendue de l'inondation du Delta Intérieur du Niger.

5.1 Inondation et débit entrant

Les cartes topographiques de l'Institut Géographique National (IGN) indiquent que la zone d'inondation du Delta Intérieur du Niger mesure 36.470 km², dont 5340 km² de digues, de dunes et d'autres îles comprises dans cette dernière. Elles montrent également que la couverture en eau qui fait 31.130 km² en période humide passe à 3840 km² en période sèche (Fig. 5-1). Toute la zone de la plaine d'inondation est incluse dans la surface de 41 195 km² reconnue comme un Site Ramsar de Zone Humide d'Importance Internationale en janvier 2004.

Les cartes numériques permettent la détermination de la relation entre le niveau de l'eau et la zone inondée. Les cartes hydrologiques ont été combinées pour construire un modèle d'inondation numérique. Cela a été fait séparément pour la montée et la décrue des eaux. Pour la décrue des eaux, ils ont fait deux modèles d'inondation: une pour les années où le niveau maximal des crues a été élevé (inondant une grande surface) et une pour les années de faible inondation (où seules les plaines d'inondation de plus faible élévation reliées à la rivière sont inondées). Dans une année sèche (comme 1984), seulement un tiers du Delta est inondé; le nord du Delta n'a même pas été atteint par la crue. Dans une année humide (comme 1999) par contre, le Sud du Delta est complètement inondé, ainsi qu'une grande partie du Nord du Delta, y compris un bon nombre de lacs situés au Nord du Delta (Fig. 5-2).

Les cartes topographiques montrent la plaine inondable comme si elle était inondée à un niveau maximal (Fig. 5-1). Cependant, la superficie réellement inondée, varie considérablement en fonction des années. Zwarts & Grigoras (2005) ont utilisé des images satellites afin de créer un continuum de 24 cartes des eaux du Delta Intérieur du Niger couvrant toute la gamme des niveaux d'eau compris entre -2 et +511 cm, comme mesurés par la jauge à Akka dans les lacs du centre.

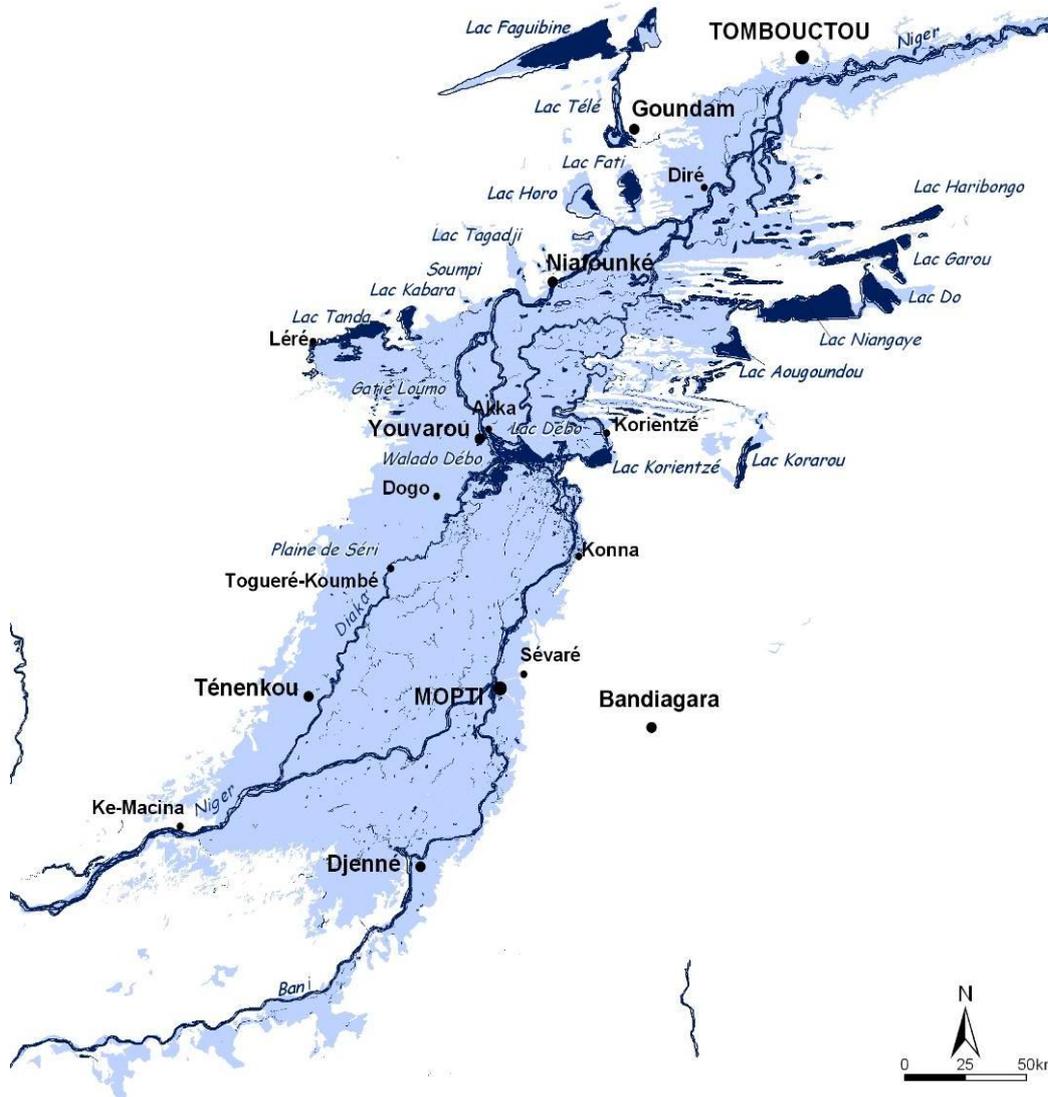


Figure 5-1. Les plaines d'inondation (bleu clair) et les plans d'eau permanents (bleu foncé) du Delta Intérieur du Niger, comme indiqués sur les cartes topographiques de l'Institut Géographique National (IGN). Les cartes datent de 1956, et ont été établies sur la base de photographies aériennes et de travaux de terrain réalisés au début des années 1950, une période de très fortes crues. La carte montre par conséquent l'étendue maximale de la zone d'inondation.

Le niveau des crues et leur étendue sont déterminés par le débit entrant du Bani et du Niger. Le niveau d'eau maximal à Akka, habituellement atteint en novembre, peut être sûrement prévu à partir du débit fluvial moyen combiné des deux fleuves en août, septembre et octobre (Fig. 5-3, axe de gauche). Un débit fluvial élevé produit non seulement une forte crue, mais inonde aussi une zone plus étendue (Fig. 5-3; axe de droite). Depuis le milieu des années 1950, le débit moyen en août - octobre pour le Bani et le Niger a varié entre 1850 et 7200 m³/s, l'équivalent d'un débit total saisonnier respectif de 14,7 et 57,2 km³. En 1984, le niveau d'eau à Akka n'a pas dépassé 336 cm et la zone inondée a été limitée à seulement 7800 km². En revanche, en 1957 et en 1964, l'eau à Akka a atteint un niveau très élevé d'environ 600 cm, amenant une zone inondée de 22.000 km². Il convient de noter que cela reste toujours sensiblement moins important que la plaine d'inondation totale de 31.000 km² comme indiqué sur les

cartes IGN (Fig. 5-1). Cette contradiction apparente est due à la pente peu profonde orientée vers le Nord qui retarde de deux - trois mois, l'inondation dans le Nord; A ce moment – là, la plaine inondable du Sud a déjà été vidée de son eau. Parce que notre télé-analyse est basée sur la couverture réelle de l'eau, la zone inondée à un moment donné est toujours inférieure à la superficie totale inondée dans le courant d'une année.

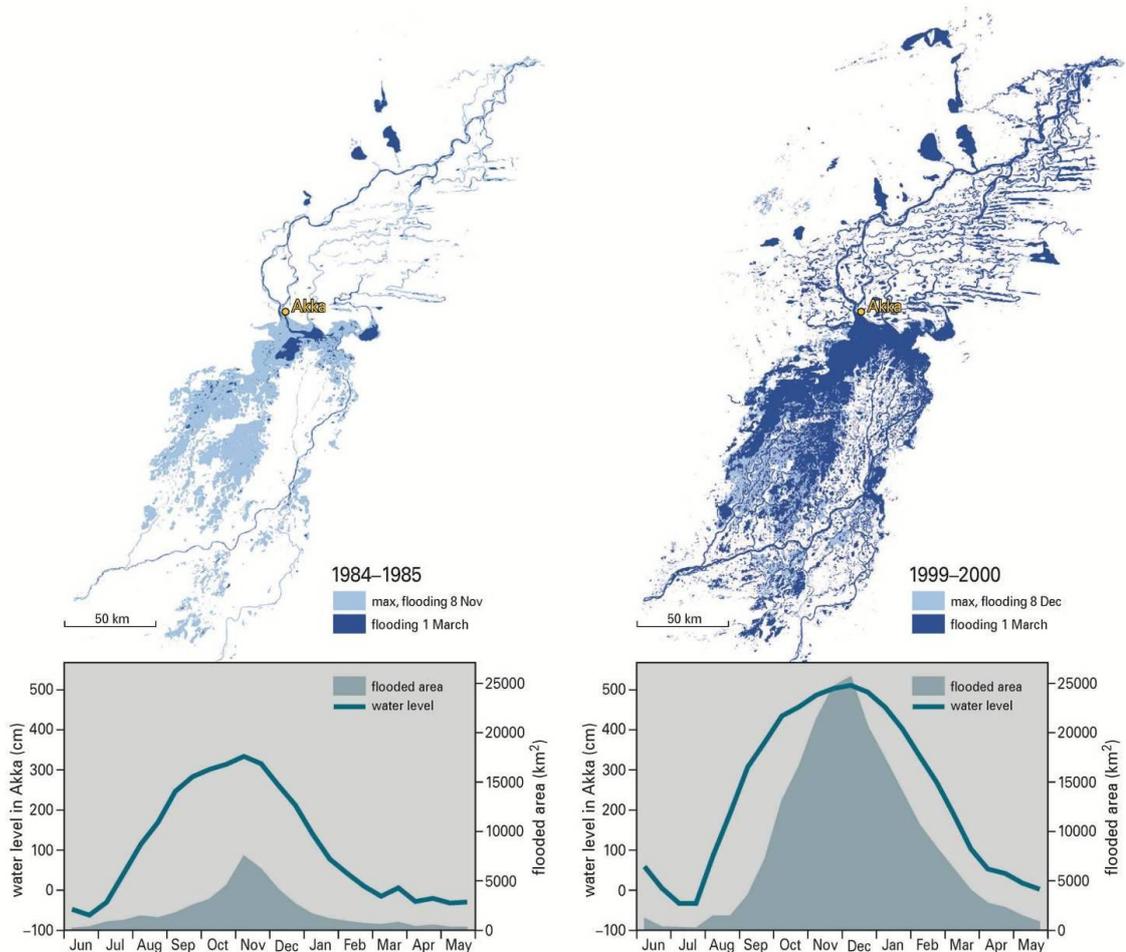


Figure 5-2-. Les graphiques montrent les mesures journalières du niveau d'eau à Akka (axe de gauche dans les deux graphiques) entre juin et mai de 1984/85 (graphique de gauche, le plus bas niveau de crue jamais mesuré) et en 1999-2000 (graphique de droite, l'un des plus hauts niveaux de crue depuis 1970, mais de hauteur normale par rapport aux crues qui ont eu lieu avant 1973). Les surfaces inondées (axe de droite dans les deux graphiques) en 1984/85 et 1999/2000, en gris dans le même graphique, sont basées sur les données du niveau d'eau, en utilisant les modèles numériques d'élévation de Zwartz & Grigoras (2005). Les cartes montrent les zones inondées lorsque le niveau d'eau à Akka a atteint son point culminant, et pour le 1er mars. Notez que le niveau maximal des crues en 1999 (511 cm) a été 1,5 fois plus élevé qu'en 1984 (336 cm), mais que l'étendue maximale de la crue a été presque 5 fois plus grande. La différence a été même plus grande quelques mois plus tard. L'étendue de l'inondation, le 1er mars (en bleu foncé sur la carte), a été 13 fois plus grande en 2000 qu'en 1985 (carte de droite). De: Zwartz *et al.* (2009).

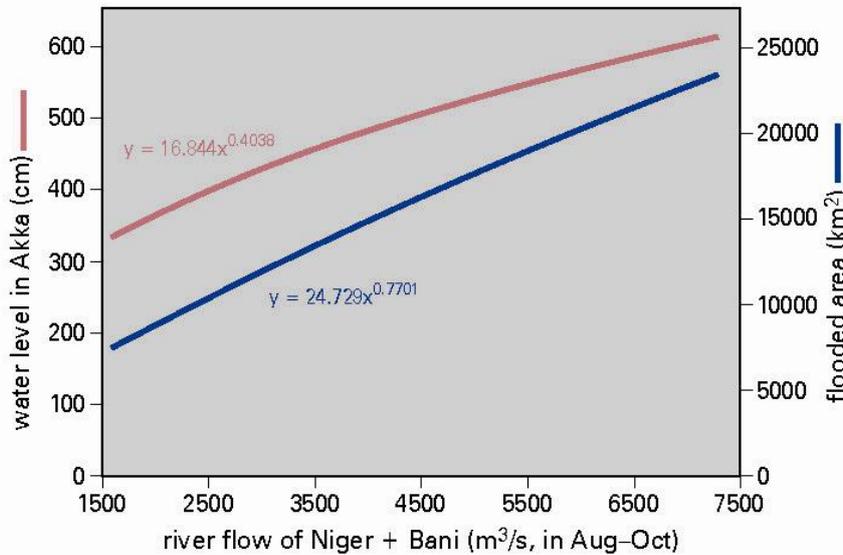


Figure 5-3- Le plus haut niveau de l'eau à Akka (cm; ligne rouge, axe de gauche) atteint en un an comme fonction du débit fluvial combiné du Niger (en aval du barrage de Markala) et du Bani (Douna), en moyenne en août - octobre de cette année. La ligne bleue donne la même relation pour la surface inondée (km²). De: Zwarts & Grigoras (2005).

Dans la situation actuelle, le débit moyen combiné du Niger et du Bani au cours d'une année sèche s'élève à 2191 m³/s dans la période août - octobre (tableaux 4-6 et 4-7), en utilisant les formules données dans la Fig. 5-3 on peut arriver à une situation où dans une telle année, le niveau d'eau à Akka atteindrait un niveau maximal de 375 cm et que 8.812 km² seraient inondés. Sans Sélingué et l'irrigation dans le Haut Niger, le débit aurait été supérieur de 430 m³/s, un cas où le niveau de crue aurait été supérieur de 28 cm et la surface inondée 1400 km² plus large (tableau 5-1). De la même manière nous pouvons arriver à une situation où la présumée consommation d'eau doublée par l'Office du Niger ferait baisser le niveau d'eau dans le Delta de 15 cm dans une année sèche, entraînant une perte de 700 km². Lors d'une consommation quadruplée par l'Office du Niger, ce ne serait pas 15 cm, mais 33 cm, et 1500 km² au lieu de 700 km². Aussi, si les barrages de Fomi et de Djenné étaient construits, le niveau maximal des crues baisserait à nouveau de 80 cm et l'étendue de l'inondation de 2000 km² encore (tableau 5-1).

Débit fluvial en août - octobre	Débit à Macina +Douna, m ³ /s	Niveau maximal des crues Akka, cm	Etendue de la crue, km ²
naturel	2620	403	10607
réel	2191	375	9244
2020	1974	360	8531
2020 ?	1736	342	7726
2030 ?	905	263	4679

Tableau 5-1- Le niveau maximal d'eau à Akka (cm) et l'étendue maximale de la crue (km²) du Delta Intérieur du Niger au cours d'une année sèche à (1) un débit naturel, (2) dans la situation actuelle, (3) en 2020 (consommation doublée de l'Office du Niger), (4) en 2020? (consommation par l'Office du Niger quatre fois plus importante qu'à l'heure actuelle et (5) en 2030? (En supposant que les barrages de Djenné et Fomi soient opérationnels). Le débit entrant dans les cinq situations renvoie au débit moyen du Bani et du Niger en août - octobre (à partir du tableau 4-7, mais 73 m³/s ont été ajoutés pour corriger la différence de débit entre Douna (utilisé dans la formule donnée dans la Fig. 5-3) et Sofara (données fournies dans le tableau 4-7).

En conclusion, l'étendue de la crue du Delta Intérieur du Niger est déterminée par le débit du Bani et du Niger. Grâce à l'irrigation et aux réservoirs, le débit entrant à déjà été réduit de 16% au cours d'une année relativement sèche, provoquant une réduction de la crue de 28 cm et une réduction de l'étendue de la crue de 1400 km² (13%). Avec une plus grande consommation par l'Office du Niger, le débit entrant

diminuera encore de 200, voire de 400, m³/s, entraînant ainsi une réduction du niveau des crues de 15 à 33 cm et une réduction de la surface inondée (700 à 1500 km²). La construction des barrages de Fomi et Djenné serait même plus préjudiciable, puisqu'ils réduiraient l'étendue de la crue de 2000 km² encore.

5.2 Inondation et précipitations

Pour vérifier si les infrastructures existantes dans le Haut Niger ont en réalité un grand impact sur l'étendue de la crue dans le Delta Intérieur du Niger, comme indiqué dans le tableau 5-1, on peut aussi comparer directement l'étendue maximale de la crue par an aux précipitations annuelles moyennes dans le bassin supérieur du Niger. Les précipitations moyennes sont basées sur les stations météorologiques indiquées dans la Fig. 3-3 et l'étendue de la crue du Delta Intérieur du Niger, comme il peut être dérivé du débit entrant combiné du Bani et du Niger. La moyenne des précipitations dans le Haut Niger a varié depuis 1922 entre 1200 et 1800 mm, mais l'inondation maximale a montré une grande variation, entre 8000 et 25000 km² (Fig. 5-4).

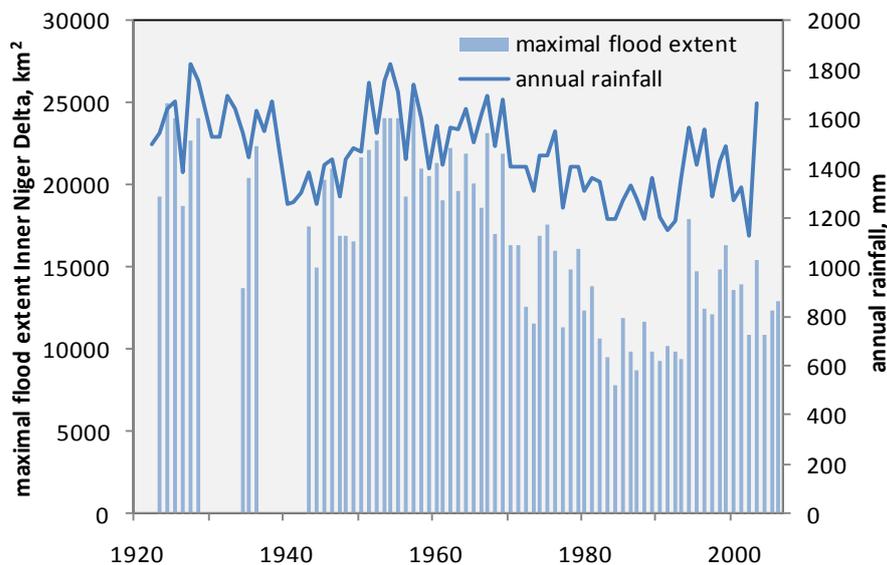


Figure 5-4- L'étendue de la crue du Delta Intérieur du Niger (colonnes; axe de gauche) et les précipitations annuelles dans le bassin supérieur du Niger. (basées sur les données fournies dans les figures 3-4 et 3-5) (ligne; axe de droite).

Lorsque l'inondation maximale est déterminée par rapport aux précipitations, il devient évident que lorsque des années avec des précipitations similaires sont comparées, l'étendue de la crue du Delta Intérieur du Niger au cours des dernières décennies est d'environ 5000 km² plus faible que dans le passé (Fig. 5-5). Cette différence est plus de trois fois plus grande que la perte d'eau calculée, due au réservoir de Sélingué et les périmètres d'irrigation dans le Haut Niger (tableau 5-1). La perte réelle est bien plus grande que celle indiquée dans les tableaux 4-6 et 4-7, puisque la consommation d'eau de Bamako et Ségou a été ignorée, ainsi que tous les petits plans d'irrigation. Ces quantités sont toutefois négligeables. Comme déjà énoncé plus haut, le débit fluvial, et donc aussi la crue du Delta Intérieur du Niger, ne dépendent pas seulement des précipitations des mois qui précèdent, mais aussi du niveau des eaux souterraines qui est déterminé par les précipitations dans les années antérieures. Cependant, une partie des déficits des eaux souterraines, peut être attribuée aux réservoirs et aux plans d'irrigation plus en amont.

La fig. 5-4 montre qu'une faible réduction des précipitations a un impact important sur l'étendue de la crue. Plusieurs études récentes ont par contre révélé la tendance inverse: unécoulement accru des fleuves du Sahel dans le cas de pareilles précipitations ou même dans le cas de précipitations en baisse (Séguis et al. 2004, Descroix et al. 2009, Mahé & Paturol 2009), avec le résultat paradoxal que dans le cas de précipitations en baisse, la nappe phréatique devient plus élevée et les lacs (temporaires) plus grands (Gardelle et al. 2010). L'explication réside dans le fait que les terres dans le Sahel sont de plus en plus défrichées et cultivées, ce qui entraîne une formation de croûtes sur la surface du sol et, par conséquent, un écoulement accru en surface. Apparemment, ce processus de déclin, d'infiltration et d'augmentation d'écoulement en surface est limité au Sahel, puisque l'augmentation de l'écoulement lié aux précipitations a été observée seulement dans le Sahel et non dans le Soudan (Descroix et al. 2009) ni dans le Haut Niger (Fig. 5-4).

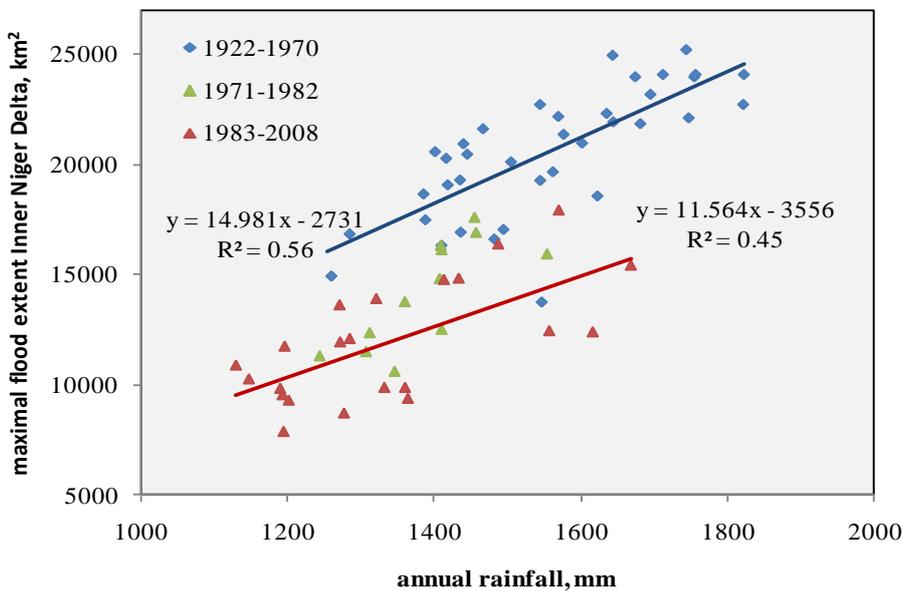


Figure 5-5 La relation entre l'étendue de la crue du Delta Intérieur du Niger et les précipitations annuelles dans le bassin supérieur du Niger; mêmes données que la Fig. 5-4. La subdivision en trois catégories temporelles (avant 1971 et après 1983 et une catégorie intermédiaire) illustre bien la façon dont l'étendue de la crue a diminué grâce à des barrages et des plans d'irrigation, mais aussi en raison de l'infiltration accrue des eaux de surface (voir le texte et les figures 3-4 et 3-5).

En conclusion, au cours du siècle passé, les précipitations dans le Sahel et la crue du Delta Intérieur du Niger ont alterné de longues périodes de sécheresse et abondance. Les précipitations annuelles et la crue fluctuent selon le cas, mais apparemment, les crues sont irrémédiablement plus faibles que dans le passé, indépendamment des précipitations dans la même année. Cela peut être attribué, en partie, au niveau plus bas de la nappe phréatique dans les dernières décennies provoquant une infiltration accrue des eaux de surface avant qu'elles n'atteignent le Delta Intérieur du Niger, mais aussi à la perte d'eau due à la construction du réservoir de Sélingué en 1982 et de l'eau tirée du fleuve pour l'irrigation.

6 Conclusions

Que signifiera le changement climatique au niveau mondial et pour le Delta Intérieur du Niger ? Pendant la Grande Sécheresse, la baisse des précipitations a été d'environ 20%, mais la baisse de l'étendue de la crue était d'environ 60% (Fig. 5-4), en raison de la baisse du débit fluvial du Niger (50%; Fig. 3-5) et du Bani (80%; Fig. 3-4). Donc, une faible réduction des précipitations entraîne une baisse importante du débit fluvial, un fait encore plus remarquable dans un fleuve de terres arides comme le Bani. Cet effet a été confirmé par De Wit & Stankiewicz (2006) qui ont comparé les précipitations au drainage des fleuves africains. Ils ont constaté qu'avec une diminution de 10% des précipitations, le drainage baissait de 17% dans les régions où les précipitations annuelles étaient de 1000 mm, mais l'impact a été beaucoup plus grand (50%) dans les régions, avec des précipitations de 500 mm seulement. Donc, si en raison du changement climatique au niveau mondial, les précipitations dans les cours supérieurs des fleuves Niger et Bani connaissent une baisse moyenne plus importante, de 10 -20 %, on peut supposer que la diminution du Delta Intérieur du Niger sera beaucoup plus grande, avec peut être un rétrécissement de 20-40%.

L'étendue de la crue du Delta Intérieur du Niger a déjà été réduite de 13% au cours d'une année de sécheresse en raison du barrage de Sélingué et de l'irrigation par l'Office du Niger. Puisque la zone irriguée de l'Office du Niger sera élargie à l'avenir, cette perte augmentera de 20% ou peut même atteindre un maximum de 27%. Si également les barrages de Djenné et de Fomi étaient construits, au total 56% de la zone inondée seraient perdus (tableau 4-8).

Les plans d'irrigation et les réservoirs sont construits de telle sorte que, même si dans les années de faible débit fluvial, la même quantité d'eau peut être prise (comme indiqué dans le tableau 4-1, 4-3 et 4-6 pour Sélingué, l'Office du Niger et Djenné). Par conséquent, plus le débit fluvial dans une année est faible, plus l'impact relatif de ces infrastructures sera grand. Donc, si le débit fluvial baisse de 20-40% en raison du changement climatique, l'effet combiné du changement climatique et de toutes les infrastructures sera qu'en moyenne plus de 70% des plaines d'inondation seront perdus.

Une perte moyenne de 70% de l'étendue de la crue serait dramatique, mais il resterait une grande variation d'une année sur l'autre et également de plus longues périodes plus ou moins pluvieuses. Ce qui importe vraiment est le risque d'années de catastrophe et à quel point ce risque augmente en raison du changement climatique et des changements dans le Haut Niger. Fig. 6-1 montre un exemple (extrait de Zwartz et al. 2005.): Le barrage de Fomi aura un impact relativement faible sur le niveau de la pointe de crue pendant les années de forte crue, mais l'impact sera important en année sèche. Par conséquent, si le barrage de Fomi existait en 1982, une faible crue comme celle de l'année de la catastrophe en 1984, aurait eu lieu huit fois, au lieu d'une, entre 1982 et 2003.

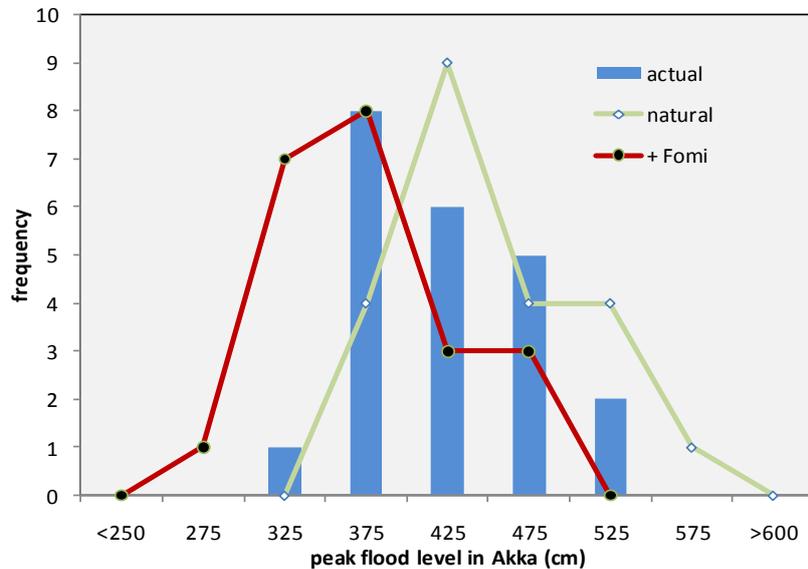


Figure 6-1- Le nombre d'années pendant lesquelles la pointe de crue à Akka a atteint un certain niveau (moins de 250 cm à l'échelle locale, 250-299 cm, 300-349, 350-399 cm, et ainsi de suite) entre 1982 et 2003. Les barres bleues indiquent la distribution de fréquence des pointes de crue réellement observées; la ligne verte les pointes de crue s'il n'y avait pas Sélingué et l'Office du Niger et la ligne rouge si le barrage de Fomi avait été construit avant 1982.

L'impact du changement climatique sur les précipitations en Afrique de l'Ouest est encore incertain, peut-être que ce sera finalement moins grave que prévu. Cependant, la plupart des scénarios climatiques indiquent qu'il y'aura moins de pluie dans le Sahel ; il serait donc sage d'en tenir compte. De même, toutes les recherches climatiques récentes indiquent une augmentation de la température dans le Sahel. Ainsi, un débit fluvial réduit est à prévoir étant donné le taux d'évaporation accru en liaison avec la montée de la température.

Les plans d'irrigation et les barrages dans le bassin supérieur du Niger sont destinés à accroître la prospérité au Mali, ou plus précisément à atteindre la sécurité alimentaire. Toutefois, pour les personnes vivant en aval, la sécurité alimentaire baissera au lieu d'augmenter. Est-il toujours nécessaire de construire le barrage de Fomi lorsque tous les impacts négatifs en aval sont sérieusement pris en considération? Que peut-on gagner si la gestion de l'eau des infrastructures existantes en amont prend en compte l'intérêt des personnes vivant en aval? Tout ceci doit être bien pensé dans un plan intégré de gestion efficace de l'eau pour l'ensemble du bassin, tout en tenant compte du changement climatique.

Le rétrécissement du Delta Intérieur du Niger va créer une plus grande compétition autour des ressources naturelles encore disponibles. Les cultivateurs de riz et les éleveurs sont déjà en concurrence et cela va s'accroître avec une réduction du niveau des crues. On peut espérer qu'un système de gestion intégrée des ressources peut aider les populations du Delta Intérieur du Niger à partager le fardeau.

7 Références

- African Development Fund** – 1997. Mali, moyen Bani plains : development programme, summary of the environmental impact assessment (EIA).
- AGRHYMET** – 2009. Modèle de gestion du Bassin du Niger; changement climatique à l'horizon 2025 ; rapport final provisoire d'AGRHYMET. Génération des scénarios hydrologiques à l'horizon 2025 dans le bassin du Niger . p. 1-22.
- Balas N, Nicholson SE, Klotter D.** – 2007. The relationship of rainfall variability in West Central Africa to sea-surface temperature fluctuations. *Int J Climatol* 27:1335-1349.
- BCEOM, COYNE et BELLIER & BETICO** – 2006a. Etude du Projet du développement rural intégré du cercle de Djenné. Rapport de Phase 1. Actualisation du schéma directeur du bassin inférieur du Bani. p. 1-146.
- BCEOM, COYNE et BELLIER & BETICO** – 2006b. Etude du Projet du développement rural intégré du cercle de Djenné. Rapport sectoriel, Phase 1. Actualisation du schéma directeur du bassin inférieur du Bani. Diagnostic environnemental et social. p 1-104.
- Biasutti M, Giannini A.** – 2006. Robust Sahel drying in response to late 20th century forcings. *Geophysical Research Letters* 33.
- Boulain N, Cappelaere B, Seguis L, Favreau G, Gignoux J.** – 2009. Water balance and vegetation change in the Sahel: A case study at the watershed scale with an eco-hydrological model. *Journal of Arid Environments* 73:1125-1135.
- Caminade C, Terray L, Maisonnave E.** – 2006. West African monsoon response to greenhouse gas and sulphate aerosol forcing under two emission scenarios. *Climate Dynamics* 26:531-547.
- Caminade C, Terray L.** – 2010. Twentieth century Sahel rainfall variability as simulated by the ARPEGE AGCM, and future changes. *Climate Dynamics* 35:75-94.
- Centre Africain pour les Applications de la Météorologie au Développement.** – 2009a. L'état de l'art en matière de projection climatiques et sélection des modèles climatiques du 4e rapport du GIEC exploitables sur le bassin du Niger. p. 1-29.
- Centre Africain pour les Applications de la Météorologie au Développement.** – 2009b. Scénarios Climatiques à l'horizon 2025 sur le Bassin du NIGER. p. 1-55.
- Charney JG.** – 1975. Dynamics of Deserts and Drought in Sahel. *Q J R Meteorol Soc* 101:193-202.
- Dai AG, Lamb PJ, Trenberth KE, Hulme M, Jones PD, Xie PP.** – 2004. The recent Sahel drought is real. *Intern J Clim* 24:1323-1331..
- Descroix L, Mahe G, Lebel T, Favreau G, Galle S, Gautier E, Olivry JC, 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. *Journal of Hydrology* 375:90-102.
- Fontaine B, Janicot S.** 1996. Sea surface temperature fields associated with West African rainfall anomaly types. *J Climate* 9:2935-2940
- Gardelle J, Hiernaux P, Kergoat L, Grippa M.** – 2010. Less rain, more water in ponds: a remote sensing study of the dynamics of surface waters from 1950 to present in pastoral Sahel (Gourma region, Mali). *Hydrol Earth Syst Sci* 14:309-324.
- Gasse, F.** – 1998. Water resources variability in tropical and subtropical Africa in the past. *Water Resources Variability in Africa during the XXth Century*. IHAS Publ. 252:97-105.
- Giannini A, Saravanan R, Chang P.** – 2005. Dynamics of the boreal summer African monsoon in the NSIPP1 atmospheric model. *Climate Dynamics* 25:517-535.
- Hastenrath S, Lamb PJ.** – 1977. Some aspects of circulation and climate over the eastern equatorial Atlantic. *Monthly Weather Review* 105:1019-1023.

- Hassane A.** – 1999. Influence des aménagements hydrauliques et hydro-agricoles du Niger supérieur sur l'inondation du delta intérieur du Niger (Mali). Mémoire de fin d'études, Ecole Nationale d'Ingénieurs, Bamako, Mali.
- Held IM, Delworth TL, Lu J, Findell KL, Knutson TR.** – 2005. Simulation of Sahel drought in the 20th and 21st centuries. *PNAS* 102:17891-17896
- Hulme M.** – 1996. Recent climatic change in the world's drylands. *Geophysical Research Letters* 23:61-64.
- Hulme M.** – 2001. Climatic perspectives on Sahelian desiccation: 1973-1998. *Global Environmental Change* 11:19-29.
- Lamagat JP.** – 2006. Etudes hydrologiques du barrage de Djenné. Etude statistiques hauteurs et débits moyens décennaux crues maximales. p 1-70.
- Mahé G, Olivry JC, Dessouassi R, Bamba F, Servat E.** – 2000. Relations eaux de surface - eaux souterraines d'une rivière tropicale au Mali. *C R Acad Sc. série Ila* 330:689-692.
- Mahé G, Paturel JE.** – 2009. 1896-2006 Sahelian annual rainfall variability and runoff increase of Sahelian Rivers. *Comptes Rendus Geoscience* 341:538-546.
- Mahé G, Paturel JE, Servat E, Conway D, Dezetter A.** – 2005. The impact of land use change on soil water holding capacity and river flow modelling in the Nakambe River, Burkina-Faso. *J Hydrol* 300:33-43.
- McCann JC.** – 1999. Climate and Causation in African History. *Intern J African Hist Studies* 32:261-279.
- Mohamed YA, Hurk van den BJJM, Savenije HHG, Bastiaanssen WGM.** – 2005. Impact of the Sudd wetland on the Nile hydroclimatology. *Water Resources Research* 41.
- Nicholson SE.** – 1981a. The historical climatology of Africa. In: Wigley TML, Ingran MJ, Farner G, editors. *Climate and history*. Cambridge: Cambridge University Press. p 249-270.
- Nicholson SE.** – 1981b. Rainfall and Atmospheric Circulation During Drought Periods and Wetter Years in West-Africa. *Monthly Weather Review* 109:2191-2208.
- Nicholson S.** – 1982. The Sahel, a climatic perspective. Paris: Club du Sahel.
- Nicholson SE.** 1986. The spatial coherence of African rainfall anomalies: interhemispheric teleconnections. *J Clim Appl Meteorol* 25:1365-1381.
- Nicholson S.** – 2000. Land surface processes and Sahel climate. *Reviews of Geophysics* 38:117-139.
- Nicholson SE.** – 2001. Climatic and environmental change in Africa during the last two centuries. *Climate Research* 17:123-144.
- Nicholson S.** – 2005. On the question of the "recovery" of the rains in the West African Sahel. *J Arid Environ* 63:615-641.
- Nicholson SE, Grist JP.** – 2001. A conceptual model for understanding rainfall variability in the West African Sahel on interannual and interdecadal timescales. *Int J Climatol* 21:1733-1757.
- Nicholson SE, Palao IM.** – 1993. A Reevaluation of Rainfall Variability in the Sahel .1. Characteristics of Rainfall Fluctuations. *Int J Climatol* 13:371-389.
- Nicholson SE, Tucker CJ, Ba MB.** – 1998. Desertification, drought, and surface vegetation: An example from the West African Sahel. *Bull Am Meteorol Soc* 79:815-829.
- Prospero JM, Ginoux P, Torres O, Nicholson SE, Gill TE.** – 2002. Environmental characterization of global sources of atmospheric soil dust identified with the NIMBUS 7 total ozone mapping spectrometer (TOMS) absorbing aerosol product. *Reviews of Geophysics* 40:2-1-2-31.
- Schüttrumpf R, Bökkers, T.** – 2008. Analyse du potentiel d'irrigation lors de la saison sèche dans la zone de l'Office du Niger. Office du Niger, Mali.
- Seguis L, Cappelaere B, Milesi G, Peugeot C, Massuel S, Favreau G.** – 2004. Simulated impacts of climate change and land-clearing on runoff from a small Sahelian catchment. *Hydrological Processes* 18:3401-3413.
- Taylor CM.** – 2010. Feedbacks on convection from an African wetland. *Geophysical Research Letters* 37:1-6.

- Tegen I, Fung I.** – 1995. Contribution to the atmospheric mineral aerosol load from surface land modification. *J Geophysical Research* 100:18707-18726.
- Wang, G, Eltahir EAB, Foley JA, Pollard D, Levis S.** – 2004. Decadal variability of rainfall in the Sahel: results from the coupled genesis-ibis atmosphere-biosphere model. *Climate Dynamics* 22: 625-637.
- Wit de M, Stankiewicz J.** – 2006. Changes in Surface Water Supply Across Africa with Predicted Climate Change. *Science* 311:1917-1921.
- Zwarts L, Grigoras I.** – 2005. Flooding of the Inner Niger Delta. In: Zwarts L, Beukering van P, Kone B, Wymenga E, editors. *The Niger, a lifeline*. Lelystad: RIZA/Wetlands International/IVM/A&W. p. 43-77.
- Zwarts L, Cissé N, Diallo M.** – 2005a. Hydrology of the Upper Niger. In: Zwarts L, Beukering van P, Kone B, Wymenga E, editors. *The Niger, a lifeline*. Lelystad: RIZA/Wetlands International/IVM/A&W. p. 15-40.
- Zwarts, L, P. van Beukering, B. Kone & Wymenga E** – 2005b. *The Niger, a lifeline*. Lelystad: Rijkswaterstaat/IVM/Wetlands International/A&W. p. 1-304.
- Zwarts, L, Bijlsma RJ, van der Kamp J, Wymenga, E** – 2009. *Living on the Edge. Wetlands and birds in a changing Sahel*. KNNV Publishing, Zeist. p. 1-564.



Adresse de visite

Suderwei 2
9269 TZ Feanwâlden

Adresse postale

Boite postale 32
9269 ZR Feanwâlden
Téléphone 0031 (0)511 47 47 64
Fax 0031 (0)511 47 27 40
info@altwym.nl

www.altwym.nl