



HAL
open science

Processus et enjeux d'eau en Afrique de l'Ouest soudano-sahélienne

Luc Descroix

► **To cite this version:**

Luc Descroix. Processus et enjeux d'eau en Afrique de l'Ouest soudano-sahélienne. EAC, 320 p., 2018. ird-02157626

HAL Id: ird-02157626

<https://ird.hal.science/ird-02157626>

Submitted on 17 Jun 2019

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

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

PROCESSUS ET ENJEUX D'EAU
EN AFRIQUE DE L'OUEST SOUDANO SAHELIENNE



Luc Descroix



Introduction : Désertification ou reverdissement ?

Le Sahel a connu comme l'ensemble de l'Afrique de l'Ouest un très fort épisode de sécheresse durant les décennies 1970 et 1980. Le déficit pluviométrique est très atténué mais persiste dans presque toute la région. Et cependant, nul exode massif, en dehors des famines liées aux terribles « pics » de sécheresse des débuts des années 1970 et 1980. Le Sahel est toujours là et ses sociétés aussi !!

Le débat sur désertification et reverdissement est nourri régulièrement de nouveaux travaux souhaitant prouver l'un ou l'autre ; les grands programmes scientifiques récents ont rassemblé de grandes quantités de références bibliographiques et en ont produit eux-mêmes beaucoup de nouvelles (cf par exemple l'abondante biblio, synthèse dans les livrables des programmes ANR ECLIS et ESCAPE et dans le livre de synthèse paru en 2015 suite à ce dernier programme, Sultan *et al.*, 2015).

En gros, la plupart des travaux montrent à l'échelle régionale un reverdissement depuis le début de l'utilisation des images satellitaires : SPOT en 1986 et Landsat en 1972 (et plus encore après 1982, Landsat TM) ; donc en comparaison avec une période sèche. C'est rassurant, la hausse de la pluviométrie a fait repartir la couverture végétale, avec des nuances régionales (Dardel 2014 : diminution de la biomasse dans le Fagara au Niger, augmentation au Gourma du Mali).

Les éléments de comparaison avec la période d'avant la sécheresse sont en moindre quantité et difficiles à régionaliser : les photos aériennes, de très bonne qualité depuis longtemps (1950) couvrent de petites zones, et leur interprétation est longue. Les images Corona (*idem*) sont très utiles et apportent en général une vision autrement plus négative de l'évolution de la végétation ; en effet, elles datent de la fin de la période « humide » 1950-1968, donc doivent probablement être considérées comme une vue « optimiste » de la situation pré-sécheresse.

Il faut donc concilier :

Une iconographie mal synchronisée avec l'histoire climatique : peu d'images satellites de grande couverture et de bonne résolution avant la sécheresse (vrai début toutefois en 1972 avec les MSS de Landsat, mais la sécheresse venait juste de commencer, et cette année 1972 est justement une année sèche..) ;

Une grande variabilité spatiale avec des contextes géologiques et humains très divers ;

Une augmentation des débits (preuve de dégradation de la couverture végétale ?) dans tous les bassins sahéliens équipés (mais ils sont en petit nombre !) ;

Une variabilité dans la réponse des écosystèmes aux épisodes secs et aux variations des activités humaines.

Sans conteste, les milieux, et plus encore, les sociétés, ont fait preuve d'une très grande résilience depuis le début des années sèches.

Il est de plus difficile, même pour une même personne, de comparer un même paysage à 30 ou 40 ans d'intervalle, aux acteurs locaux de se souvenir de « comment c'était, avant » (avant la

sécheresse). Les photographies sont un bon indicateur, à condition de pouvoir retrouver exactement où ont été prises les photographies « d'avant la sécheresse ».

Par ailleurs, on peut aussi partir d'un constat : le « paradoxe » hydrologique du Sahel, l'augmentation des débits des cours d'eau purement sahéliens depuis le début de la sécheresse. Or, les bassins équipés sont rares, et concernent peut être, (par hasard ?) justement les zones où la végétation aurait continué à se dégrader après le pic de sécheresse. On remarquera par exemple que les bassins des affluents de rive droite du fleuve Niger en aval de sa boucle proviennent de l'est du Liptako Gourma, et que cette région apparaît comme une de celles où la végétation serait en retrait suivant les cartes fournies par Prince *et al.* (1998) et par Fensholt et Rasmussen (2011), deux groupes d'auteurs tenants du reverdissement.

Si on se réfère aux années 1982 à 1986 comme point de comparaison, comme ces deux études le font, c'est peut être de plus une époque mal choisie (mais les recherches sont bien sûr tributaires de la disponibilité des scènes satellitaires) ; c'est probablement la période où la végétation était la plus « rabougrie » par la sécheresse (les années les plus sèches sont 1982 à 1984). Donc si l'on compare avec une scène satellitaire plus récente, on obtient de nombreux pixels pour lesquels la biomasse sera supérieure ensuite, quelle que soit l'année.

On a pu remarquer toutefois, depuis, dans certaines régions, que l'émigration a pu produire une évolution paradoxale : certaines régions du Sénégal oriental, tel le Boundou (située entre Tambacounda et les frontières mauritanienne et malienne) et les secteurs situés dans l'arrière pays du fleuve Sénégal et de la Falémé, côté sénégalais, ont connu une très forte émigration (en particulier vers l'Europe). Une grande partie de la main d'œuvre masculine est partie, et il s'est produit un reverdissement local en partie lié au recul de l'agriculture dû au manque de main d'œuvre : certains villages ont connu un faux développement basé sur les investissements permis par l'argent des émigrés. On a vu les ligneux repartir et re-coloniser les savanes et steppes qui avaient été déboisées par le défrichement (ouverture des champs et récolte du bois domestique) et par la sécheresse (surmortalité des ligneux due à la succession d'années déficitaires en pluies).

Nous ne chercherons pas ici à trancher dans le débat sur désertification ou reverdissement, tant il est clair que débat il n'y a pas, il y a des zones où le reverdissement est réel (majoritaires ?) d'autres où la végétation serait encore en recul malgré la croissance de la pluviométrie, d'autres où ont pu alterner périodes de croissance et de recul de la couverture végétale. Bref, cela dépend des secteurs, et des périodes ; oui, il y a des secteurs qui reverdisent, d'autres qui continuent à s'éclaircir, d'autres ont peu évolué. On peut d'entrée, juste poser quelques éléments de précision :

- L'accroissement des débits des cours d'eau sahéliens peut être attribué à l'encroûtement des sols, processus de mieux en mieux connu et pas directement lié à un déclin de la végétation, même si les deux processus sont en grande partie concomitants ou au moins simultanés ; donc point de désertification de fait, pas d'avancée du Sahara vers le sud, mais une dégradation assez généralisée des sols dans une grande partie des zones sahéliennes et nord soudaniennes, qui se traduit par une forte diminution de l'infiltrabilité des sols, et donc de l'infiltration, et par suite, de la capacité de rétention en eau des sols, tant à l'échelle de la parcelle, celle des terroirs, qu'à

celle des bassins versants. Ce transfert de l'eau, perdue pour les sols, vers les cours d'eau, est à la base de l'accroissement observé des débits et des risques de crues dans les zones sahéliennes ; plutôt que de nier la désertification, on peut donc plutôt dire que celle-ci se manifeste bien encore, en de nombreux secteurs, et qu'elle est due en grande partie à l'encroûtement des sols ;

- De nombreuses régions souffrent de cette dégradation des sols car il ne s'y est pas encore déclenché de processus d'intensification sociale, d'intensification écologique et d'intensification productive ; or ces processus se sont développés dans d'autres secteurs, montrant que cela est tout à fait envisageable dans l'ensemble du géoclimat, à partir d'un déclic social (démographique ?) ou d'une prise de conscience collective de la nécessité d'un passage d'un type d'exploitation extensif à un système intensif ;
- Enfin, *last but not least*, dégradation ne signifie pas désertification et encore moins extension du Sahara vers le Sud ; on n'a pas assez de recul pour étudier une quelconque irréversibilité du processus de dégradation des espaces sahéliens, pour évoquer une désertification, si celle-ci signifie l'arrivée d'un nouveau type de milieu bien plus pauvre en biomasse que le précédent. Comme on l'a évoqué plus haut, les espaces sahéliens ont déjà par le passé fait preuve d'une grande résilience, que l'on observe encore de nos jours. Malgré une pression humaine très forte -la population continue à augmenter de 2 à 3,5% en zone rurale (localement plus)-, la végétation semble progresser, même sans actions humaines de restauration des terroirs. On peut espérer dans ces conditions, que les plus dégradés des milieux, ceux qui ont du mal dans leur état actuel à récupérer du sol, de la matière organique, de l'humus et de la capacité à retenir les eaux de pluie, ceux qui se dégradent et perdent leur particules fines et leur reste de fertilité sous nos yeux à chaque grain qui passe, pourraient être restaurés moyennant des actions sur les terroirs comme on sait les mener d'après les savoirs locaux la plupart du temps ; des travaux qui doivent être demandés et conduits par les populations concernées pour avoir des chances d'être acceptés et menés de bout en bout.

Pour l'heure, malgré les nombreuses études montrant un « reverdissement » au Sahel, il semble y avoir de nombreux cas de poursuite de la dégradation des sols, des terroirs, des paysages. Cependant, il y a donc fort à parier qu'un processus d'intensification vertueuse, facilité par la poursuite de la croissance démographique, pourrait tout à la fois permettre d'accroître les rendements afin de conduire à l'autosuffisance ou du moins à la sécurité alimentaire et au dégagement de surplus destinés aux marchés urbains, et préserver les agrosystèmes. Ce processus conduit simultanément à la diversification de ces agrosystèmes, source de diversification des revenus pour les communautés rurales, et autorise à mener à bien la restauration des espaces les plus dégradés, qui pourraient, en quelques années ou décennies, redevenir pourvoyeurs de services écosystémiques (et puits de carbone !) en même temps que source de diversification tant écologique qu'économique.

Les ressources en eau sont suffisantes, en année « normale » et aussi tant que les déficits restent raisonnables, pour assurer la fixation d'une végétation à même de protéger les milieux, permettre des récoltes décentes et le maintien et la croissance des populations rurales, mais il faut pour cela que l'eau s'infilte et bénéficie aux agrosystèmes au lieu de courir vite grossir les *koris* (nom des oueds en *haoussa*) et provoquer des crues et inondations dévastatrices en aval. L'infiltration de l'eau dans le sol est la condition du maintien d'une biomasse suffisante pour

permettre à la population d'en vivre tout en l'entretenant, et pour permettre de résister à plusieurs années continues de déficit pluviométrique.

Toutefois, il reste à imaginer les formes de l'intensification écologique et économique indispensable à l'autosuffisance alimentaire et au dégagement de surplus de récoltes et de cultures de rente permettant à l'Afrique de l'Ouest de se développer par le moteur principal de ses activités socio-économiques, le moteur rural.

On sait le faire techniquement sur le terrain, et encore une fois, le plus souvent, en utilisant des techniques ancestrales et les archives des savoirs locaux.

Les réponses au point bloquant :

« pourquoi ne le fait on pas, puisque l'agrosystème se dégrade » ?

sont le plus souvent à chercher du côté du foncier :

« pourquoi et comment restaurer un terrain dont le paysan n'est pas propriétaire » ?

ou dans l'évolution démographique :

« comment restaurer des sols quand on doit encore étendre les cultures uniquement pour combler la demande croissante chaque année » ?

Mais certains freins peuvent aussi être culturels, religieux, etc.

Peut être aussi que l'aide des pays du Nord est mal ciblée, voire « dé-responsabilisatrice » ?

Il s'agit sans aucun doute d'une série de questionnements scientifiques à faire avancer, de manière à pouvoir disséminer à grande échelle, celles des très différentes méthodes de reverdissement qui ont pu faire leur preuve, à Keita (Niger) ou à Téssékéré (Sénégal), ou encore et plutôt à Maradi (Niger), à Kaydara (Sénégal) ou à Guié (Burkina Faso), et qui sont adaptées à tel ou tel contexte, physique, démographique, communautaire et social, culturel, religieux, politique ou socio-économique. Le sud du bassin arachidier sénégalais, le plateau dogon, la pays mossi, la savane parc de Maradi, les agro-systèmes de Korhogo en Côte d'Ivoire, les tapades du Foutab Djalou, ne sont ils pas des exemples de réussites relatives de l'intensification des activités rurales, des exemples « boserupiens » montrant que la population est un facteur de construction des paysages, de terroirs, des agrosystèmes, des territoires, avec leurs ressources et leurs terres...

Comment ne pas faire le lien entre ce qui s'est produit du 17^{ème} au 19^{ème} siècle dans les montagnes d'Europe du Sud, ce qui arrive depuis le début du 20^{ème} siècle dans les montagnes d'Afrique du Nord, et la situation au Sahel : une crise démographique ? sociale ? en tout cas une dégradation de l'espace et des terroirs le plus souvent liée à une trop forte croissance démographique (les collègues des SHS n'aiment en général pas ce raccourci, technocratique) et qui se traduit par la disparition rapide de la biomasse, l'érosion des sols même dans les zones plates, l'encroûtement de ces sols, le ruissellement généralisé qui conduit aux crues exagérées

en aval et aux inondations devenues très fréquentes dans les villes d'Afrique de l'Ouest ces toutes dernières années.

Et pourtant, les sociétés ouest africaines sont toujours là, plus dynamiques que jamais ; elles ont fait et font toujours preuve d'une résilience à peine croyable, elles que beaucoup d'observateurs (de chercheurs ?) avaient condamné il y a quelques décennies, à l'exode rural. La transition démographique est en route, les taux de croissance démographique annuels ont commencé à baisser ou vont le faire ces prochaines années dans les pays de l'intérieur qui ont abordé le plus tardivement cette « transition » (Tchad, Niger, Burkina Faso, Mali), et les communautés et leurs terroirs sont toujours là, certes parfois brinquebalants ou dégradés, mais ils sont là et ont démontré leur force et leur capacité à affronter l'avenir à travers l'une des pires crises qu'ait connu l'Afrique de l'Ouest au cours de son histoire.

Autant les villes d'Afrique de l'Ouest voient leurs arbres disparaître devant la spéculation immobilière (on construit bien sur les trottoirs à Dakar, donc pourquoi y laisser des arbres !!), autant il est clair que le paysan sahélien, que le berger peul, que le bûcheron des hauteurs de Guinée, aucun, et personne en Afrique de l'Ouest, n'est content de voir s'ajouter, aux dégradations liées à la sécheresse, la surexploitation du manteau végétal, et personne ne se réjouit de voir la biomasse s'amenuiser (encore qu'on verra que cela est loin de faire consensus) ; parce qu'il faut donner à manger aux jeunes générations toujours plus nombreuses, personne !! ni l'éleveur et le gardien de troupeau, ni le charbonnier, ni le cultivateur de mil, n'est content de voir se rétrécir l'œkoumène et se contracter l'espace productif par habitant ! Clairement, quand on entend dire qu' « *il n'y a plus de brousse* », il faut se rappeler de la contraction de la forêt durant les siècles ayant précédé la révolution industrielle en Europe, se souvenir de la tragédie du Dust Bowl dans les années 1920 et 1930, et plutôt aussi accepter de constater que nos sociétés et nos terroirs d'Afrique de l'Ouest sont là, après, et pendant, la très forte évolution climatique, environnementale et sociale qu'a connue, que connaît cette région.

La pérennisation des terroirs ne se fera pas, comme en Europe du Sud, en mettant gentiment les paysans « *massacreurs des versants avec leurs biquettes et leurs haches destructrices* » (Surell, 1841) dehors, pour qu'ils aillent opportunément grossir la main d'œuvre urbaine afin d'en faire baisser le coût en pleine révolution industrielle. L'avenir de l'Afrique de l'Ouest est dans ses campagnes, aux sols souvent sableux et pauvres et aux climats souvent rudes, et ce sont ces campagnes qui peuvent à la fois en assurer le décollage économique, la sécurité alimentaire, et cela tout en préservant et en pérennisant ce milieu parfois ingrat. Les sociétés sahélo-soudaniennes ont montré qu'elles savaient s'adapter à ces conditions, on peut parier qu'elles arriveront à prendre le tournant d'une « intensification » que l'on perçoit clairement poindre avec succès dans certaines régions (voir plus haut), et qui semble à la fois inéluctable et indispensable (Kosmovski *et al.*, 2015 ; Muller *et al.*, 2015 ; Audouin *et al.*, 2015 ; Hassane, 2015, in Sultan *et al.*, 2015).

Cette introduction fondée sur les thèmes de la désertification et du reverdissement en lien avec les processus hydrologiques donne le « *la* » de cet ouvrage qui met le sol et son couvert végétal, qu'il soit naturel ou cultivé, au cœur du cycle de l'eau, qu'il stocke et restitue au gré des conditions édaphiques, climatiques, sociétaux, etc....

L'ouvrage est ensuite divisé en quatre grandes parties contenant onze chapitres.

La première partie de ce livre ambitionne de montrer ce qui est zonal et ce qui ne l'est pas dans la répartition géographique des principaux processus hydrologiques en Afrique de l'Ouest sahélo-soudanienne. Le chapitre 1^{er} instaure la capacité de rétention en eau des sols comme élément explicatif central des processus ; les chapitres deux et trois décrivent ensuite les fonctionnements spécifiques des zones guinéennes et sud soudaniennes (chapitre 2), puis des zones sahéliennes et nord-soudaniennes (chapitre 3), respectivement.

La deuxième partie définit les principaux mécanismes du ruissellement, en s'interrogeant sur le rôle de l'Homme et de la mise en culture (chapitre 4) pour se recentrer sur le fait de base qui limite l'infiltration des eaux de pluie, à savoir l'encroûtement des sols (chapitre 5).

La troisième partie vise à comprendre pourquoi la « crise de ruissellement » qui avait produit le paradoxe hydrologique du Sahel durant la sécheresse, se poursuit et s'amplifie même avec le retour des pluies. Le chapitre 6 montre que ce dernier s'accompagne d'une forme d'intensification des pluies. Les deux autres principaux facteurs évoqués sont l'accroissement des bassins versants des cours d'eau (chapitre 7) et l'urbanisation qui accroît le ruissellement (chapitre 8).

La quatrième et dernière partie se veut plus prospective et propose, par l'analyse des changements climatiques perçus et observés en plus du reverdissement, ceux qui expliquent les menaces pesant sur les réserves d'eau douce, telles que les excès du ruissellement et l'invasion des zones littorales par les biseaux salés (chapitre 9). Le chapitre 10 explique pourquoi il est urgent d'établir ou de rétablir une bonne résilience des agrosystèmes en Afrique de l'Ouest du fait de probables futurs épisodes secs. Le chapitre 11, enfin, cherche à montrer que le reverdissement est probablement l'outil idéal pour limiter les effets des changements climatiques, en particulier le réchauffement, certain pour plusieurs décennies, et les sécheresses, parfois prédites par les modèles.

La conclusion tente de convaincre de manière positive de la forte capacité de résilience des sociétés et environnements ouest africains, en bref des agro-éco-systèmes qui ont dans un passé récent relevé des défis énormes en matière d'adaptation aux contraintes liées aux changements climatiques.

Préambule : les grands bassins versants ouest africains

L'Afrique de l'Ouest possède de grands bassins hydrologiques (Sénégal, Niger, Volta, Lac Tchad sont les plus étendus), mais comporte surtout des bassins à l'hydraulicité médiocre si l'on se réfère aux débits spécifiques de ses cours d'eau (tableau 1). Il faut prendre en compte les petits bassins exposés directement à la mousson sur le versant atlantique des hauteurs de la Guinée, de la Sierra Leone et du Liberia pour trouver des valeurs élevées comme celle du Konkouré ; ce n'est un hasard si le bassin de ce dernier, déjà équipé à Garafiri, est l'objet d'un aménagement majeur (Kaleta), un troisième étant également prévu. Mais les grands cours d'eau d'Afrique de l'Ouest ne sont pas pour autant insignifiants par rapport à ceux du reste de l'Afrique, si l'on excepte le Congo, qui est un peu le fleuve « hors norme » du continent, à l'égal de l'Amazone pour le continent américain (tableau 1 ; figures 1 et 2).

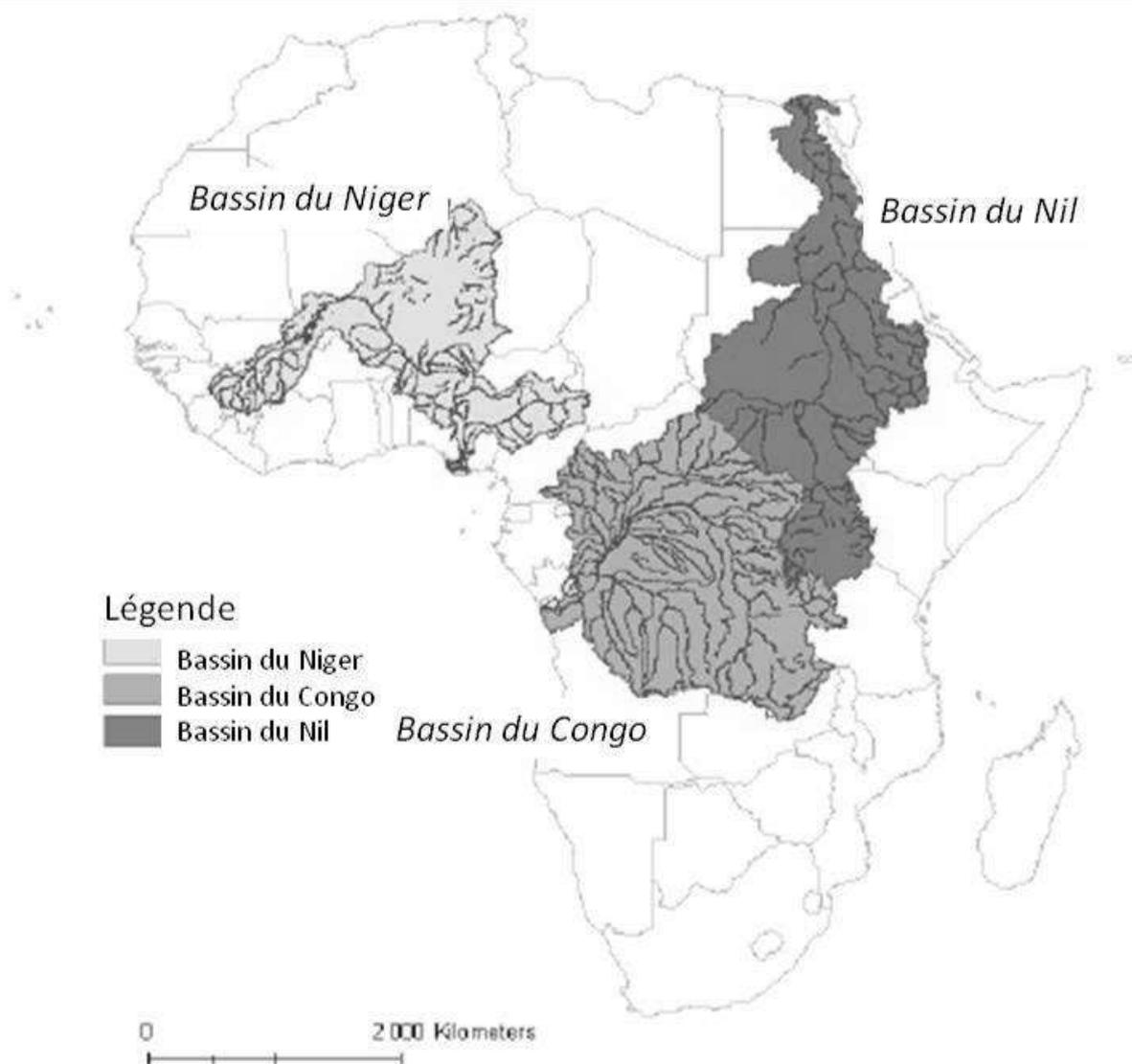


Figure 0-1. Le Niger face aux géants de l'Afrique

Tableau 0-1. Les principales caractéristiques des grands bassins d’Afrique de l’Ouest

Cours d’eau	surface bassin km ²	longueur	débit	débit spécifique
Niger	2262000	4184	6000	2,65
Volta	408000	1346	1217	2,98
Sénégal	337000	1750	640	1,9
Gambie	60000	1150	150	2,5
Konkouré	10260	300	290	28,3
Casamance	10000 ???	300	?	?
Lac Tchad	2381000			
Chari	550000	1200	1059	1,93
Logone	78000	1000	492	6,31
<i>Congo</i>	<i>3680000</i>	<i>4700</i>	<i>41800</i>	<i>11,3</i>
<i>Nil</i>	<i>3400000</i>	<i>6700</i>	<i>2830</i>	<i>0,83</i>
<i>Zambèze</i>	<i>1330000</i>	<i>2750</i>	<i>3500</i>	<i>2,63</i>

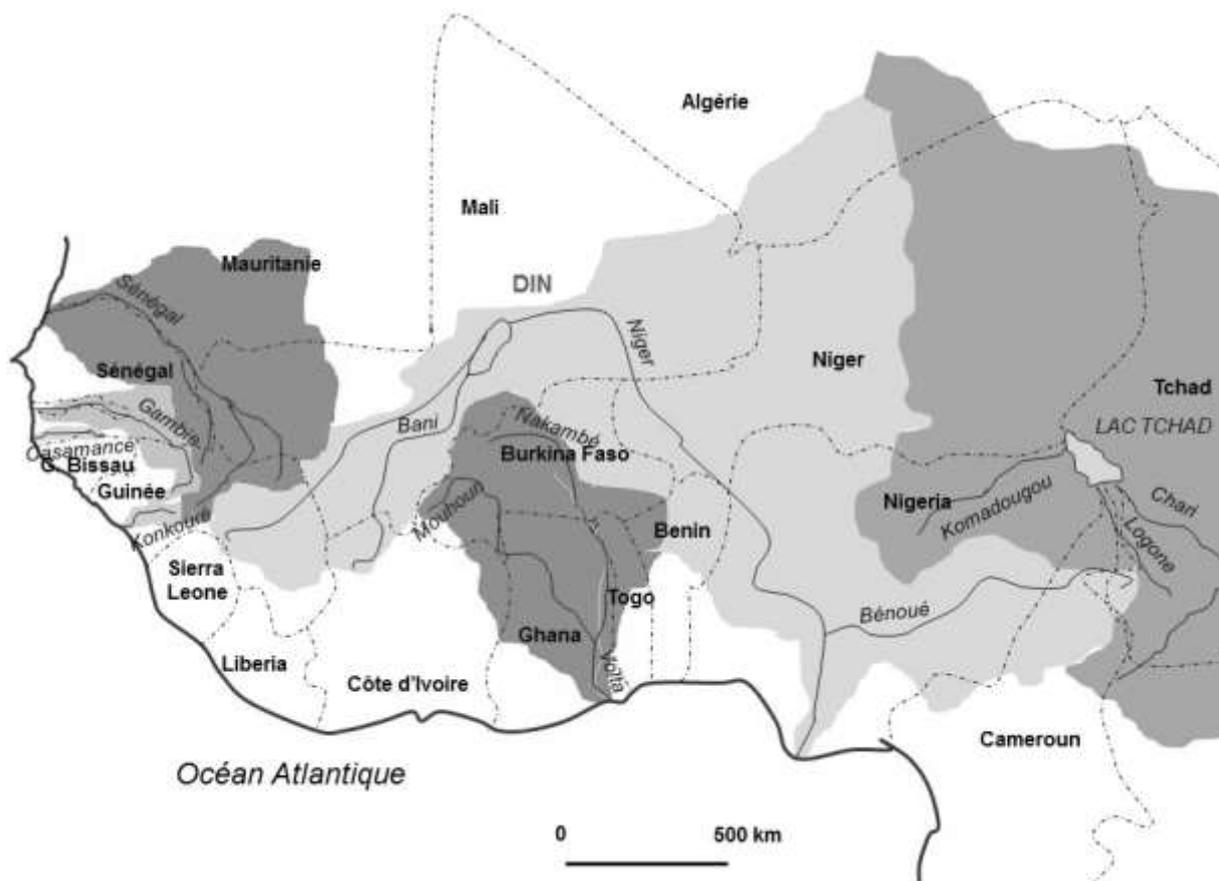


Figure 0-2. Les plus grands bassins d’Afrique de l’Ouest

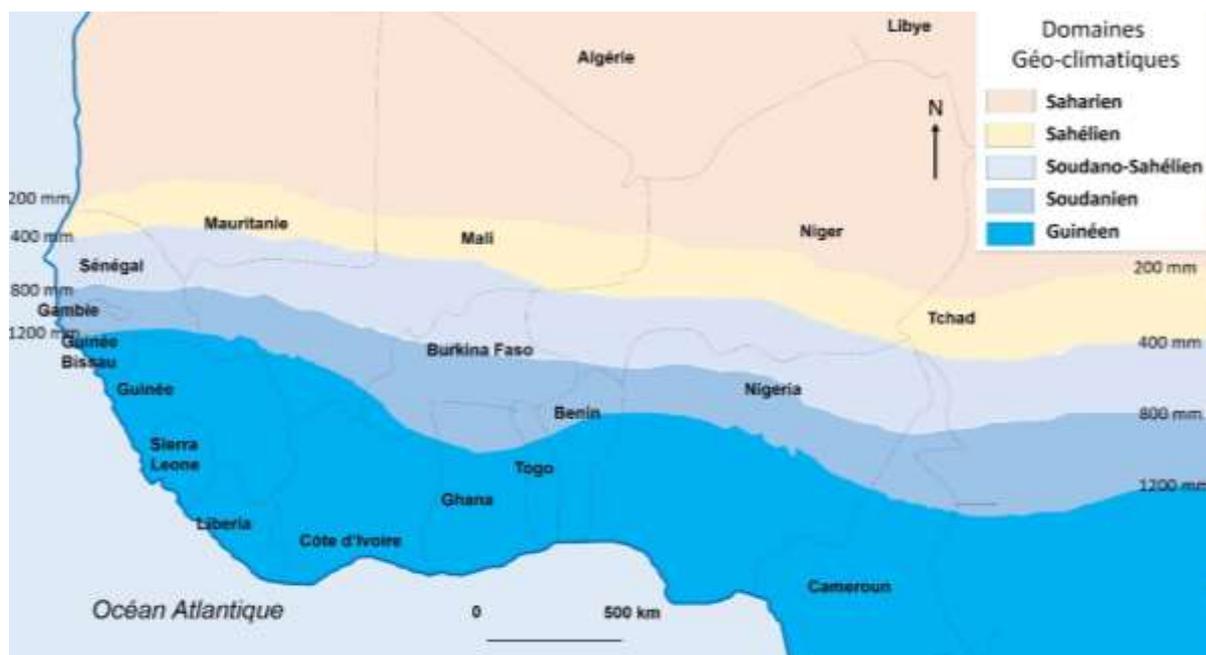


Figure 0-3 : étagement latitudinal des climats d’Afrique de l’Ouest (d’après <http://bv.alloprof.qc.ca/geographie/territoire-agricole/le-territoire-agricole-en-milieu-a-risque/l'agriculture-au-sahel.aspx>, adapté de FEWS, sources, CILSS

La sous région ouest africaine comporte un étagement des climats et des géoclimats qui vont du plus aride au nord (saharien) au plus humide au Sud (guinéen) (voir figure 3). Le climat sahélien s’étend de la zone aride (100 mm au nord) au cœur de la zone semi-aride (600 mm au sud, en incluant la variante sahélo-soudanienne) ; viennent ensuite les climats soudano-sahélien (600-800 mm), puis surtout les climats soudanien (800 à 1200 mm de pluie annuelle) puis guinéen (plus de 1200 mm par an).

Le présent ouvrage tâchera de décrire les principaux comportements hydrologiques et leur évolution spatiale et temporelle, même s’il insistera plus, au niveau des descriptions des processus et observations hydrologiques, sur le bassin du Niger, qui traverse tous les géoclimats.

En résumé,

- La plupart des études récentes sur l’occupation de l’espace en Afrique soudano-sahélienne montrent que le Sahel reverdit depuis la fin du millénaire précédent
- Toutefois les coefficients d’écoulement des cours d’eau sahéliens contrôlés s’accroissent fortement depuis le début de la sécheresse en 1968, et cette croissance s’est accélérée depuis le début du 21^{ème} siècle

1^{ère} partie :

**Ruissellement et infiltration en Afrique de l'ouest :
zonalité et azonalité**

L'étagement des climats tel que défini par les géographes se retrouve aussi partiellement en ce qui concerne les comportements hydrologiques.

- Le climat Saharien ou désertique (moins de 100 mm de pluies annuelles) ne comporte pas d'écoulement organisé, uniquement des écoulements sporadiques et de très courte durée après les rares événements pluvieux ; l'aridité concerne la majeure partie du désert du Sahara ;
- Le climat Sahélien est le climat semi-aride par excellence ; il y tombe entre 100 et 700 mm de pluie par an ; une grande partie de cette région, comme bien des régions semi-arides, est endoréique. L'écoulement des cours d'eau endogène y est temporaire ;
- Le climat Soudanien caractérise les régions recevant de 700 à 1300 mm d'eau par an ; les grands organismes y ont un écoulement permanent avec un régime tropical à une saison des pluies ; mais la plupart des cours d'eau sont temporaires et s'assèchent au fur et à mesure de l'avancée de la saison sèche, les plus importants s'asséchant les derniers ; comme pour le suivant, ce géoclimat est constitué de régions exoréiques ;
- Le climat Guinéen est le climat caractéristique des montagnes de Guinée, et du littoral du Golfe du même nom. Il est marqué par des précipitations annuelles de plus de 1300 mm par an et la plupart des cours d'eau, même le plus petits, sont permanents ; ils ont toutefois un débit très marqué par la saisonnalité.

Cette apparente bi-zonalité est en phase avec la longueur de la saison des pluies, liée à la latitude : plus on monte en latitude et plus la mousson est courte, et plus les écoulements sont indigents. Toutefois, il faut remarquer trois éléments qui perturbent cet étagement latitudinal :

- Le relief : dans une Afrique de l'Ouest globalement plate, les massifs de la Guinée (Fouta Djallon et Dorsale Guinéenne) et de manière moindre, l'Atakora, reçoivent plus de pluie que les zones de plaines les encadrant à latitude égale ;
- La lithologie, puisque très clairement, aux latitudes sahéliennes, on peut opposer les zones de socle majoritairement exoréiques aux zones de terrains sédimentaires majoritairement endoréiques ;
- La réponse à la sécheresse puisque les écoulements ont augmenté pendant l'épisode de sécheresse dans la zone sahélienne (d'où le « paradoxe hydrologique du Sahel » dont il sera question dans cette première partie) alors qu'ils ont, bien plus classiquement, baissé en zone soudanienne, car celle-ci a conservé la capacité de rétention en eau de ses sols, de ses champs, de ses bassins versants.

Cette première partie comprend les trois chapitres suivants :

Chapitre 1 : La capacité en eau des sols : une propriété à restaurer

Chapitre 2 : Le château d'eau de Guinée : mythe ou réalité ?

Chapitre 3 : Le paradoxe du Sahel

Chapitre 1. La capacité de rétention en eau des sols, une propriété à restaurer

Moctar, le paysan de Wankama, en rit encore !!! l'« anassara » (« toubab » en zarma) fait vraiment croire n'importe quoi à ses étudiants. L'autre jour, ceux-ci me disent : « as-tu remarqué, Moctar, que ton mil a mieux poussé sous le gao ? (nom local du *Faidherbia albida* ; on était début septembre, à quelques semaines de la récolte) ; notre professeur nous a dit que cela venait du fait que l'acacia est une légumineuse, et fixe l'azote de l'air dans les systèmes racinaires des plantes, rendant le sol plus fertile.*

Ah bon, s'écrie Moctar, le Anassara pense ce qu'il veut, mais moi j'ai mon explication : le gao est un arbre à phénologie décalée : il pousse ses feuilles durant la saison sèche et les perd au début de l'hivernage. Les troupeaux adorent son ombre lors des mois secs et chauds de février à Juin-juillet suivant les années. Donc les vaches y laissent leur abondante bouse, qui fume le sol et explique que le mil y pousse bien mieux ».

** vient de « Nazaréen » (=chrétien)*

Introduction : quelle régionalisation pour quels processus ?

Les ressources en eau sont intimement liées aux autres biens naturels communs que constituent les sols, la végétation et la biodiversité, éléments qui co-évoluent dans les écosystèmes. Il est bien connu que la dynamique des eaux de surface, de l'eau du sol et des eaux profondes dépendent très fortement de l'état du sol et de la végétation, ces deux éléments étant par ailleurs indissociables. Les usages et les occupations des sols sont dessinés par les sociétés rurales, leurs activités socio-économiques, leurs traditions, et leur capacité d'adaptation aux changements environnementaux et climatiques.

Dans la bande soudano-sahélienne de l'Afrique de l'Ouest, la période actuelle est caractérisée par une évolution climatique significative : la grande sécheresse de l'Afrique de l'Ouest (1968-1995), même si elle est possiblement derrière nous, reste le plus fort signal du changement climatique observé sur la Planète depuis le début des enregistrements météorologiques normalisés. Cette évolution se produit dans un contexte de forte croissance démographique (la plus forte dans le Monde depuis deux décennies), et ici, dans une région caractérisée par une agriculture avant tout extensive. Cela produit de forts changements d'usage des sols et de couverts végétaux, ce qui provoque de fortes modifications (une réduction drastique de fait, le plus souvent) de la capacité de rétention en eau des sols, des champs, des terroirs et des bassins-versants.

L'Afrique de l'Ouest comprend de grands bassins versants (voir introduction), tels celui du fleuve Niger (le troisième d'Afrique tant par sa longueur que par la taille de son bassin, mais le quatrième seulement par son débit), ceux du Sénégal et de la Gambie, issus aussi essentiellement, comme le premier, des hauteurs de Guinée, de même que les cours d'eau purement guinéens coulant vers l'ouest, tels le Corubal et le Konkouré ; les trois premiers traversent une grande partie de la bande soudano-sahélienne, dont ils constituent les principaux apports d'eaux douces. Celui de la Volta, comme la plupart des plus grands fleuves débouchant dans le vaste Golfe de Guinée, ont au contraire leur source dans la zone soudanienne, parfois dans le Sahel, et se dirigent vers les zones côtières au climat guinéen. C'est le cas bien sûr du Niger en aval du DIN (Delta Intérieur du Niger), mais aussi des fleuves ivoiriens (Sassandra,

Comoé, Bandama) qui prennent leur source au Burkina ou près de la frontière de cet état, ou encore l'Ouémé au Bénin ; par contre, des highlands de Guinée proviennent aussi un grand nombre de courts mais abondants fleuves coulant uniquement en zone humide, en Guinée forestière et côtière, au Sierra Leone, au Libéria et dans l'ouest de la Côte d'Ivoire (Mahé et Olivry, 1999).

Dans presque toute l'Afrique de l'Ouest, en l'absence de grands périmètres irrigués (à l'exception de celui de l'Office du Niger, Au Mali) ce sont bien sûr les eaux de surface et les eaux souterraines qui servent pour les usages domestiques et agricoles de l'eau. L'état des nappes souterraines est bien connu et cerné dans les grands bassins sédimentaires où elles sont de grande extension et déjà mises à profit ; au contraire, dans les zones de socle ou les zones de roches anciennes fracturées, les eaux souterraines sont contenues dans des réservoirs plus irréguliers et discontinus, en général de bien plus petite taille ; leur localisation et leur volume est alors bien plus difficile à déterminer, du fait qu'elles dépendent du degré de fracturation et d'altération des roches ainsi que de la structure et de la tectonique.

Malgré d'excellents travaux déjà réalisés au Burkina Faso, au Niger ou au Bénin et les grands progrès réalisés ces dernières années dans la prospection non intrusive (Descloîtres *et al.*, 2013 ; Vouillamoz *et al.*, 2012), on manque de connaissances sur les ressources en eau de ces zones de socle, là où précisément, l'accès à la ressource est difficile. Dans ces secteurs exoréiques (la plupart des zones de socle sont exoréiques aux latitudes sahéliennes, quand une majorité des bassins sédimentaires sont constitués de zones endoréiques), l'impact des changements d'occupation des sols et des changements climatiques sur l'hydrologie est très important et ils doivent aussi être distingués les uns (anthropiques) des autres (climatiques).

Par ailleurs, dans toutes les conditions citées ci-dessus (socle ou sédimentaire, zone endoréique ou exoréique), les ressources en eau sont sous exploitées, même si la demande va exploser dans les prochaines décennies. La demande rurale devrait s'accroître très fortement puisque l'irrigation constitue une des clés de l'accroissement des disponibilités alimentaires indispensable à l'autosuffisance, plus probablement et certainement à travers la multiplication et le développement de petits périmètres villageois. La demande urbaine, elle, devrait s'accroître au moins aussi vite que la population urbaine, c'est-à-dire aux alentours de 5%, contre 2 à 3% en zone rurale. Il est donc primordial d'améliorer la connaissance du comportement et de l'évolution de l'ensemble des ressources sol-eau-végétation dans les agro-systèmes, et de tenter de prévoir et de modéliser leur évolution.

Objectifs de ce chapitre

Les objectifs de ce chapitre sont donc les suivants :

- Proposer une synthèse des régimes hydrologiques et de leur variabilité
- Une synthèse des changements d'occupation des sols
 - A l'échelle du point ou de la parcelle
 - A l'échelle du bassin ou de la région.

L'Afrique de l'Ouest a connu un sévère déficit pluviométrique de 1968 à 1995 environ ; la région sahélienne, zone semi-aride à aride caractérisée en temps normal par une pluviométrie annuelle inférieure à 700 mm, a été la plus touchée avec une baisse des pluies de 20 à 40% pendant les décennies 70 et 80 (par rapport aux périodes antérieures), sur plusieurs millions de km². La phase de déficit n'est pas vraiment terminée, si l'on se réfère aux décennies 1950-1970 comme base de comparaison ; la pluviométrie a remonté ces dernières décennies dans tout le

Sahel, avec plus de retard à l'Est (Ali et Lebel, 2009 ; Lebel et Ali, 2009; Mahé et Paturel, 2009). Mais si l'on prend, plus justement comme période de référence la première moitié du 20^{ème} siècle, la pluviométrie semble avoir retrouvé ses caractéristiques antérieures (valeurs moyennes, variabilité inter annuelle)(voir chapitre 6). On sait en effet à présent que la période 1951-1967 a été très excédentaire en Afrique de l'Ouest (Nicholson, 2005).

Cependant, le comportement hydrologique des bassins en réponse au déficit pluviométrique n'a pas été homogène du tout. En effet, Albergel (1987) a remarqué au bout d'une décennie et demie de sécheresse que les bassins versants expérimentaux suivis par l'ORSTOM (ancien nom de l'actuel IRD) au Burkina Faso suivaient deux évolutions diamétralement opposées. Dans les régions sahéliennes du Nord, les écoulements se sont paradoxalement accrus à partir du début de la sécheresse ; c'est ce qu'on a appelé plus tard (l'expression serait due aux chercheurs du programme AMMA, Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine, et apparaît en 2005) le « paradoxe hydrologique du Sahel ». Ce comportement paradoxal est ensuite confirmé par Olivry et Mahé (1998) puis Mahé *et al.* (2003, 2005, 2009, 2011, 2013), qui ont montré l'extension spatiale de ce processus. Amogu *et al.* (2010) ont tenté une régionalisation à partir des données disponibles à cette date-là.

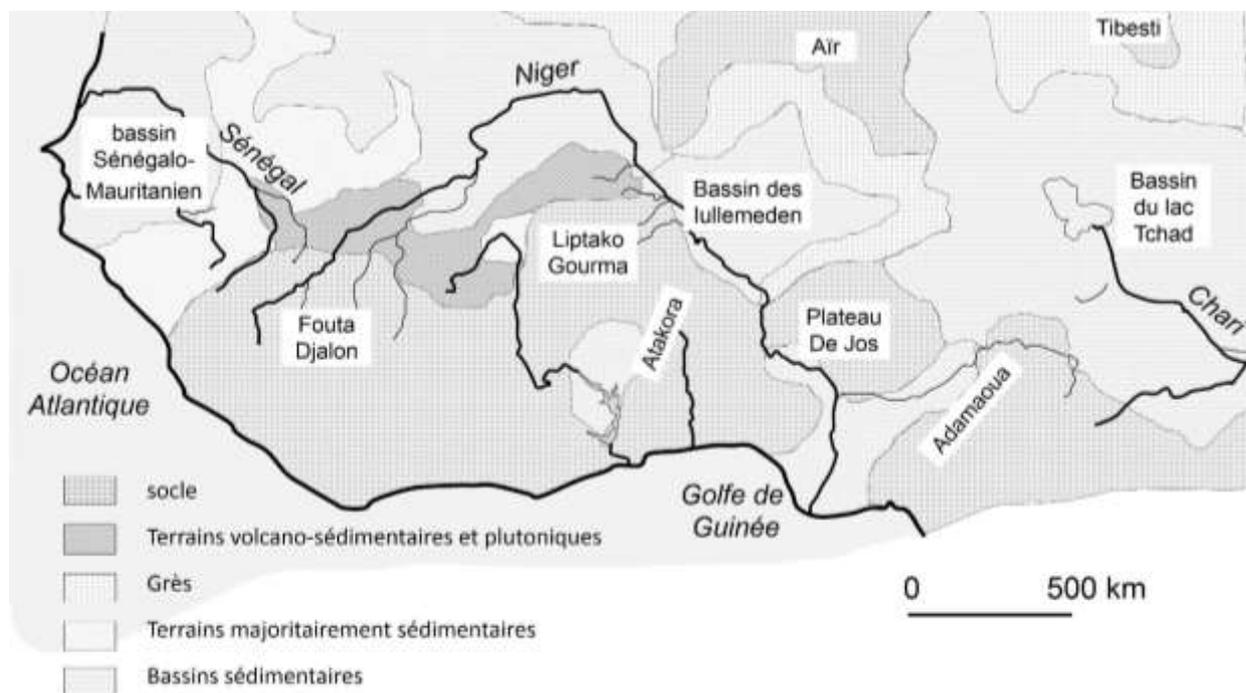


Figure 1 : schéma simplifié des formations géologiques et des principaux cours d'eau d'Afrique de l'Ouest.

Ce paradoxe est d'autant plus prononcé que plus l'on monte en latitude, et plus la pluviométrie a été affectée par le déficit, comme l'ont montré Lebel et al (2003) qui ont produit une carte du pourcentage de diminution des précipitations entre les périodes 1950-1967 et 1968-1995 ; cette carte montre clairement que le déficit pluviométrique augmente avec la latitude. (carte 2 chapitre 6).

Plus au sud, par contre, dans les régions soudaniennes et guinéennes, les débits ont logiquement diminué avec la baisse des précipitations, comme l'avait remarqué Albergel dès 1987, dans sa thèse pour laquelle il disposait des données de bassins répartis sur toutes les latitudes et les géoclimats du pays. Mahé *et al.* (2003), de même, ont montré cette opposition au niveau des affluents de rive droite du Niger en aval du DIN (delta intérieur du Niger): ceux situés aux

latitudes sahéliennes ont vu leur débit croître, à l'opposé de ceux situés en zone soudanienne dont les écoulements ont fortement diminué. Amogu *et al.* (2010) ont cartographié cette opposition.

Ce contraste de comportement est essentiellement lié à la latitude et donc à cette répartition des géo-climats, les sols des zones semi-arides étant peu recouverts surtout en début de saison des pluies, et donc étant plus enclins au ruissellement que ceux des zones plus humides, souvent recouverts d'une végétation dense et traversés de systèmes racinaires profonds. L'évolution des débits pendant la phase de sécheresse suggère donc que les sols des régions guinéennes et soudanienne (a minima, des régions sud-soudanienne) ont une capacité de rétention en eau bien supérieure à ceux des régions arides et semi-arides sahéliennes et nord soudanienne, régions qui, comme le signalaient déjà Albergel et Valentin (1988), sont en voie de « sahélistation ». Avant même l'accentuation de ce contraste, due à la sécheresse, on pouvait donc opposer un comportement de zones arides et un comportement de zones sub-humides.

Des processus et des paradoxes...

Un fonctionnement majoritairement « hortonien » des zones arides et semi-arides ?

Comme on l'a vu ci-dessus, les sols des régions sahéliennes (comme dans la plupart des régions arides et semi-arides) sont en grande partie nus au moment où commence la mousson (« hivernage »). Cela se traduit par une faible capacité d'infiltration. En effet, et là, il est important de connaître des rudiments de physique du sol (Musy et Soutter, 1991), ces sols sont peu couverts, ce qui offre peu d'obstacles au ruissellement et ne favorise pas l'infiltration. Surtout, contrairement à l'acception commune, un sol sec n'est pas forcément très perméable. D'une part, un sol est plus perméable et absorbant quand il est humide que quand il est sec ; des pores qui n'ont pas fonctionné durant 9 mois sont en grande partie bouchés, et la matrice du sol se comporte alors comme sa partie la plus reculée, celle qui comporte des pores minuscules, elle est pratiquement inaccessible aux racines et à la succion par les plantes. La conductivité hydraulique, mesurée à l'infiltromètre à disque, est très faible au début, et s'accroît assez vite avec l'imbibition du sol, pour atteindre un pic et diminuer lentement ensuite vers la conductivité à saturation K_s . A plus grande échelle, celle de la petite parcelle ou du mètre carré, on observe une espèce de glaçage du sol, un encroûtement saisonnier de saison sèche, qui ne disparaît qu'après les premières précipitations de mousson. Pour comprendre cette difficulté des sols à absorber les premières pluies, il faut le comparer à une éponge, que l'on mouille et essore aussitôt quand on veut l'utiliser pour absorber de l'eau répandue sur une table de cuisine ou une paille : ce réflexe vient du fait que l'éponge absorbe mieux elle aussi, quand ses pores ont été rendus fonctionnels par l'eau.

Un sol peu végétalisé aura donc une faible conductivité hydraulique, au moins au départ. On voit alors vite apparaître un ruissellement, lié au dépassement par l'intensité de la pluie (en mm/h) de la conductivité hydraulique du sol (en mm/h aussi) qui est la mesure physique de la perméabilité d'un sol.

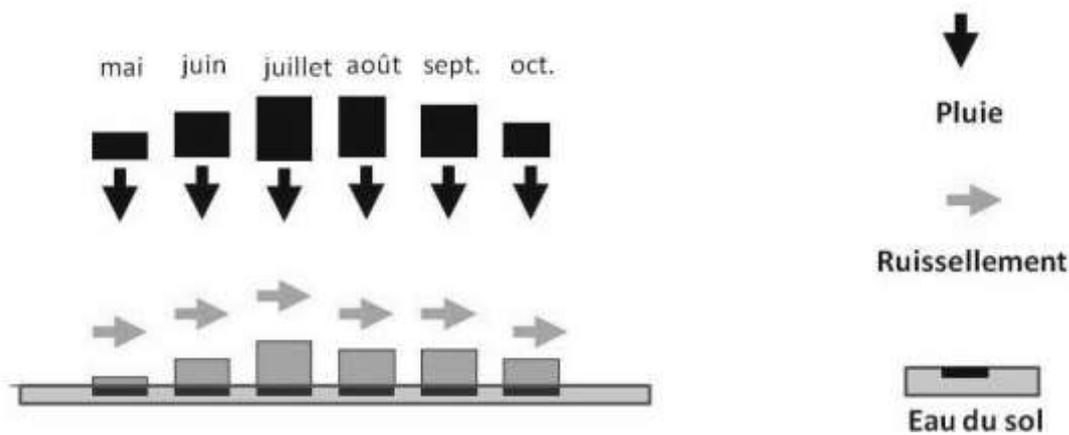


Figure 2 : schéma simplifié du fonctionnement « hortonien » d'un sol

On parle donc de ruissellement par dépassement des limites d'infiltration, ou ruissellement « hortonien » car ce type de fonctionnement a été décrit en premier par Horton (1933) au Sud-Ouest des Etats-Unis d'Amérique, une zone aride et semi-aride (figure 2). Ensuite le comportement varie suivant les conditions :

- Dans les zones non dégradées, la végétation reprend vite, le sol reprend sa conductivité normale : parfois même dès le milieu ou la fin du premier évènement pluvieux, surtout si celui-ci comporte une phase stratiforme après le passage du grain ; ces pluies fines d'après l'orage, pouvant durer des heures, sont très efficaces pour remettre en fonctionnement les pores plus profonds du sol végétal ;
- Dans les secteurs où la sécheresse (en premier lieu) et parfois les bûcherons, les charbonniers, plus rarement les paysans et les pasteurs, ont détruit la végétation, les sols restent ruisselants pendant toute la saison des pluies.

Au contraire, dans les zones plus humides, la végétation ligneuse, et une grande partie des graminées et herbacées, reste en place en fin de saison sèche, et protège le sol au moment des premières pluies. La végétation reverdit vite, et une couverture d'annuelles vient rapidement s'ajouter aux strates ligneuses supérieures. Le sol se comporte, dès le début des pluies, comme un sol de zone végétalisée, absorbant l'essentiel des eaux de pluies par la litière, même sèche et résiduelle, puis les systèmes racinaires très développés. Le ruissellement n'apparaît qu'une fois le sol saturé, en fin de saison des pluies. On parle de ruissellement par saturation du sol ou d'un comportement « cappusien » puisqu'il a été décrit pour la première fois de manière précise en Aveyron sous climat tempéré (Cappus, 1960) (figure 3).

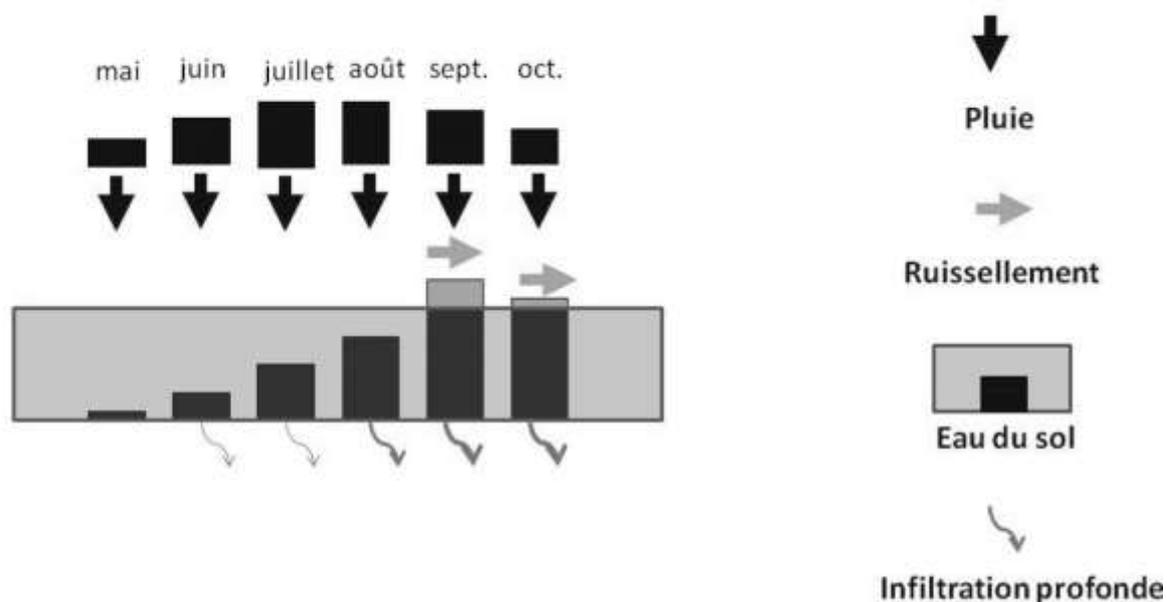


Figure 3 : schéma simplifié du fonctionnement « cappusien » d'un sol

L'évolution vers une « sahélisation » des zones soudaniennes mise en évidence dès 1988 (voir plus haut, Albergel et Valentin, 1988) est clairement confirmée par Mahé *et al.* (2003), qui montrent l'évolution, à la fin du 20^{ème} siècle, de la relation pluie débit pour les affluents de rive droite du Niger, du nord au sud, à travers la limite entre Sahel et Soudan : grosso modo, les débits des cours d'eau sahéliens augmentent après 1972, ceux du Soudan diminuent, mais déjà les cours d'eau nord soudaniens (Diamangou, Goroubi, voire Tapoa) adoptent de plus en plus un comportement « sahélien », leurs débits augmentant légèrement. Les différents et nombreux articles de Mahé et coll. montrent bien aussi l'importance relative des zones de cultures, plus touchées par une « dégradation », en fait une diminution de la capacité de rétention en eau des sols que les espaces pastoraux situés plus au Nord. Ceci rejoint et est consistant avec les nombreux travaux de télédétection montrant un reverdissement du Sahel (pour les plus récents, Fensholt et Rasmussen, 2011 ; Dardel, 2014 ; Dardel *et al.*, 2014), qui montrent souvent un reverdissement plus franc dans le Sahel pastoral au Nord que dans la zone agro-pastorale plus au sud ; et avec les travaux montrant une très forte mise en cultures dans les bassins des affluents de rive droite du Niger (Amogu, 2009 et figures 1 à 5 du chapitre 4 montrant les changements d'occupation des sols dans le Bassin du Dargol et le Degré Carré de Niamey), mise en cultures accompagnée par une très forte croissance des débits !

Voilà la manifestation première de ce qui a été appelé ensuite « le paradoxe hydrologique du Sahel » dont il sera question plus bas au chapitre 3.

On observe les mêmes processus hydrologiques dans toutes les zones semi-arides de la planète, et une régionalisation des processus a été réalisée au Nord semi-aride du Mexique (Descroix *et al.*, 2007) en s'appuyant sur un modèle simple fondé sur l'indice des précipitations antérieures, permettant de distinguer les bassins « hortonien » ou « cappusien » en fonction de leur capacité de rétention en eau des sols.

Mise en cultures et ruissellement

L'explication même de ce paradoxe, exacerbé dans la région de Niamey par un concours de processus cumulatifs (Mamadou *et al.*, 2015) tels que les ruptures d'endoréisme et les dégâts causés par l'ensablement du lit du fleuve Niger, est loin d'être simple. En effet, le processus de « sahélisation » (Albergel et Valentin, 1988) et la relation entre jachères, défaut de jachères et

encroûtement (Casenave et Valentin, 1989 ; Ambouta *et al.*, 1996) sont assez ambigus. En effet, on note à minima deux contradictions difficiles à concilier et à synthétiser.

Mise en culture et ruissellement : première contradiction

La première contradiction est soulevée régulièrement par nos étudiants attentifs lors que l'on déroule un cours de quelques heures d'hydrologie de base. On peut très bien dire au début du cours que la mise en culture d'un espace auparavant recouvert de brousse ou de forêt, se traduit par une diminution de la capacité de rétention en eau des sols et donc une augmentation du ruissellement. Et puis quelques heures, quelques jours ou quelques semaines après, durant le même cours, l'enseignant montre qu'à l'échelle de la parcelle, le sarclage se traduit par une augmentation de l'infiltration et une baisse du ruissellement : on peut même (tableau 1 chapitre 7) montrer qu'un champ sarclé ruisselle moins que toutes les formes documentées de végétation naturelle ! et quelle n'est alors pas la joie, la jubilation (ou, s'il n'y est pas préparé, la panique !) de l'enseignant quand un étudiant lève le doigt pour dire « *Mais, Madame (monsieur), vous avez dit tout à l'heure (la semaine dernière, avant-hier...) que la mise en culture entraînait une augmentation des débits ! Comment pouvez-vous maintenant expliquer le contraire ?* ». C'est entre autres une question d'échelle, et d'échelle de temps et d'espace !! En gros, oui un champ sarclé peut avoir une très forte conductivité hydraulique, comme cela a déjà été montré maintes fois, entre autre sous simulation de pluie (Ndiaye *et al.*, 2005) ; le tableau n°1 chapitre 5 montre que la conductivité hydraulique d'un sol sarclé dépasse 150 mm/h ; mais la figure 7 du même chapitre montre à quelle vitesse, après quelques dizaines de mm de pluie tombée, les pores se referment, les mottes et la rugosité créées par le sarclage disparaissent et la conductivité baisse à des valeurs bien plus faibles (par ex 20 mm/h après une cinquantaine de mm tombés), bien en dessous de l'intensité d'une grande partie du volume des précipitations tombées comme le signale Le Breton (2012), cité également au chapitre 5. Il y a donc bien une échelle temporelle du processus, liée au glaçage rapide des sols sableux sahéliens soumis à la battance de la pluie (il est vrai intense, comme le signale Le Breton 2012). Il y a aussi indubitablement un effet d'échelle spatiale, et l'extension de zones mises à nu par la mise en culture constitue un élément de dégradation des sols, en offrant au vent des fetch étendus permettant à l'érosion éolienne de s'exercer (Rajot *et al.*, 2009). Ces auteurs signalent : « *Les sols sableux sont donc particulièrement sensibles à l'érosion éolienne. Leur faible teneur en argile est cependant suffisante pour permettre la formation de croûtes superficielles au cours des pluies qui entraînent le ruissellement et l'érosion hydrique. Les lignes de grains, événements convectifs de méso-échelle, qui produisent l'essentiel de la pluie au Sahel, sont très souvent précédées de vents extrêmement violents. L'érosion hydrique et l'érosion éolienne sont ainsi étroitement associées aussi bien dans le temps que dans l'espace* ». Les figures 1 à 5 du chapitre 5 montrent bien comment progressent les zones encroûtées, en particulier les croûtes ERO (croûtes d'érosion, qui présentent un coefficient de ruissellement de 60 à 90%), à partir de surfaces mises à nu par la mise en cultures. Ces surfaces progressent en maints endroits, représentant par exemple 34% de la surface du bassin expérimental de Katchari au Sahel Burkinabé (Rajot *et al.*, 2009), et 49% des bassins de Mélé Haoussa à l'ouest du Niger (Malam Abdou, 2014), tous deux en zone cristalline, ainsi que 31% du bassin de Wankama, 37% de celui de Tondi Kiboro (deux bassins de l'ouest nigériens suivis durant le programme AMMA) (Souley Yéro, 2012), en zone de terrain sédimentaire. Tous ces auteurs, ainsi que Mamadou (2012) et Le Breton (2012) ont déterminé, sur tous ces sites, une très rapide progression des zones encroûtées (croûte ERO très majoritairement), ce qui est partiellement en contradiction avec le reverdissement (regreening) majoritairement observé en général dans la région (Gardelle *et al.*, 2010 ; Fensholt et Rasmussen, 2011 ; Dardel, 2014). En fait, il y aurait un reverdissement général du Sahel, mais l'Ouest du Niger (et en particulier une grande auréole autour de la ville de Niamey) et une

partie de l'Est du Burkina Faso continuent à se « saheliser » voire à se désertifier, en tout cas, leurs sols continuent de se dégrader.

Croûte et jachères : deuxième contradiction

La jachère est considérée comme le moyen, pour les paysans des zones aux sols pauvres et à faible densité de population, de récupérer la fertilité des sols après plusieurs années de culture ; elle se pratique après le constat d'une baisse des rendements attribuée à la fatigue du sol ; sa périodicité et sa durée sont donc fonction des savoirs locaux ; au Sahel du Niger on a considéré que les sols récupéraient 99% de leur fertilité après 8 années de jachère (Ambouta *et al.*, 1996). Toutefois, les mêmes auteurs constatent qu'au bout de 5-6 ans, la jachère se couvre de croûte algale (bioderme), ce qui aurait pour conséquence d'en accroître la capacité à ruisseler. Ceci est exagéré par le fait que ces croûtes sont hydrophobes, comme sont hydrophobes les sols encroûtés en début de saison (« l'eau aime l'eau » et, comme une éponge, le sol est plus absorbant quand ses pores ont été rendus fonctionnels par une première imbibition). Donc encore une fois, il est difficile de bien cerner le rôle des jachères, entre pratiques restaurant les caractéristiques physiques des sols et état de surface ruisselant en grande partie par hydrophobie et encroûtement.

Horton vs Capps

L'opposition entre les zones sahéliennes au comportement majoritairement hortonien et les zones soudano-guinéennes au fonctionnement hewlettien est bien visible sur la figure 4. Un seul bassin oscille entre les deux : le bassin de la Komadougou, émissaire du Lac Tchad, qui n'a pas vu ses débits ni coefficients de ruissellement évoluer sensiblement ces dernières décennies. Le tableau 1 donne le rapport entre les débits observés dans les bassins, durant les périodes sèches 1971-1990 ou 1971-1996 par rapport à ceux observés durant la période de référence 1951-70.

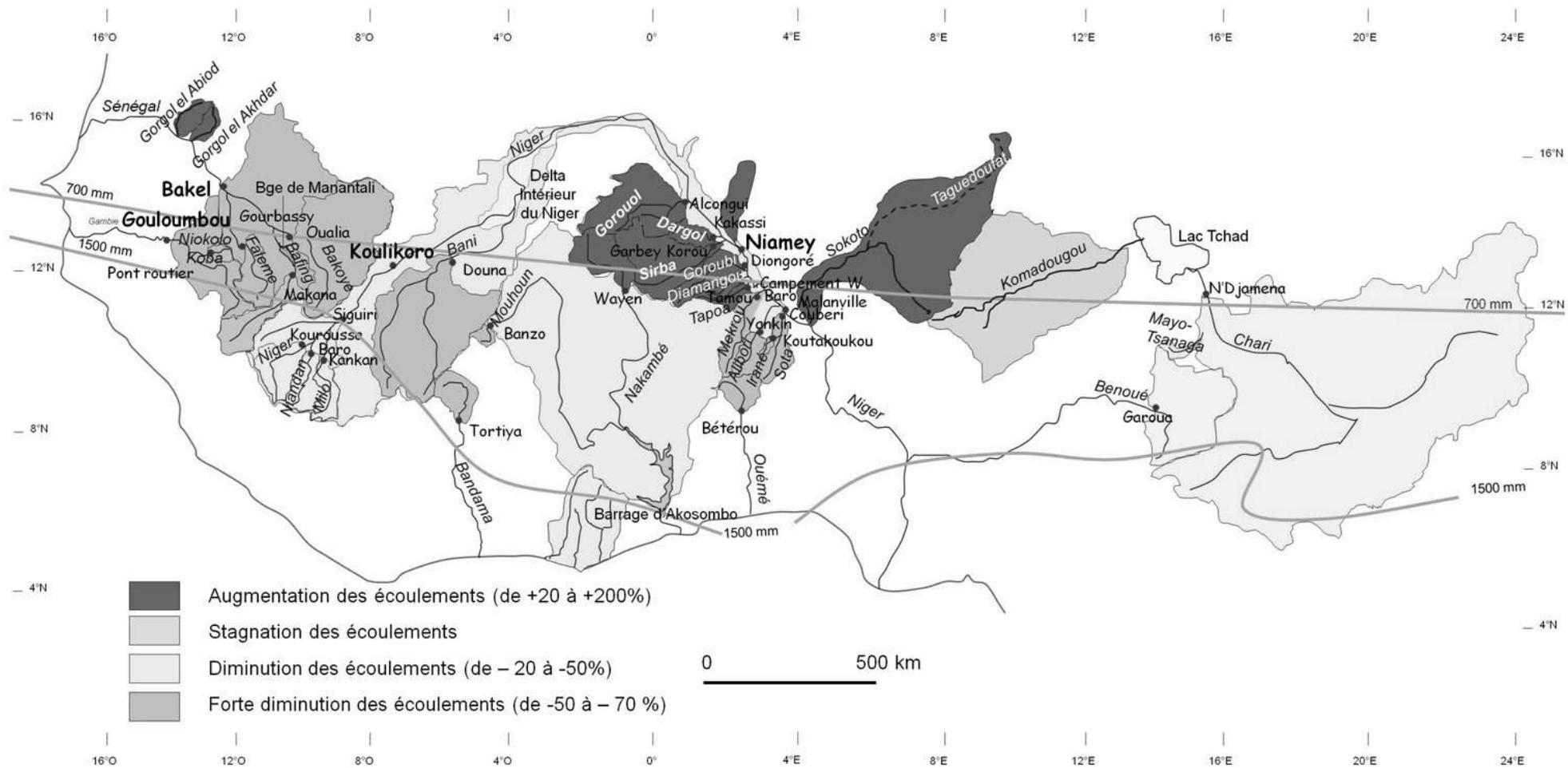


Figure 4 : Tendence dans l'évolution des débits des bassins d'Afrique de l'Ouest

Tableau 1. Comparaison (rapport) des débits des cours d'eau d'Afrique de l'Ouest entre les périodes déficitaires 1971–1990 et 1971–1996 avec la période 1951–1970. (Amogu *et al.*, 2010)

Cours d'eau	Q71_90/Q51-70	Q71_96/Q51-70
BASSINS SOUDANIENS		
BANI	0,30	0,30
NIOKOLO KOBBA	0,31	0,32
BAKOYE	0,33	0,35
IRANE	0,34	
FALEME	0,39	0,39
ALIBORI	0,39	0,39
SOTA	0,41	0,49
MEKROU	0,41	0,47
OUEME	0,42	0,49
GAMBIE	0,42	0,43
SENEGAL	0,46	0,48
MOUHOUN	0,49	0,51
BASSINS GUINEENS		
BAFING	0,54	0,55
NIG-MAL	0,57	0,59
BENOUE	0,59	0,61
NIG-SIG	0,60	0,60
NIG-KRO	0,61	0,61
NIG-NIA	0,62	0,63
NIANDAN	0,67	0,66
CHARI	0,68	0,67
NIG-KSA	0,69	0,64
MILO	0,76	0,72
BASSINS SAHÉLIENS		
BASSINS NORD SOUDANIENS		
GOROUBI	0,72	0,81
TAPOA	0,92	1,22
DIAMANGO	1,11	
BASSINS SAHÉLIENS		
SIRBA	0,97	0,91
GOROUOL	1,09	1,13
NAKAMBE	1,22	1,31
DARGOL	2,88	2,90

La figure 4 et le tableau 1, actualisés à partir de Amogu *et al.* (2010), montrent bien l'évolution régionale différentielle des déficits en fonction du géo climat (et donc du type de fonctionnement hydrologique majoritaire) de la zone d'alimentation principale de chaque cours d'eau. Le tableau montre que le bassin du Bani, principal affluent de droite du Niger, est celui dont les débits ont le plus baissé, de 70% pour les deux décennies 1970 et 1980 en comparaison aux deux décennies humides 1950 et 1960, et même une baisse de 82% en ne considérant que

la décennie 1980 (Mahé *et al.*, 2000; Mahé, 2009; Roudier et Mahé, 2010a). Paturol *et al.* (2003) ont pointé du doigt le problème que cela pose au niveau des normales hydrologiques, qui sont à ré-adapter en fonction de ces modifications profondes. Ainsi les valeurs des débits bas extrêmes ont pu devenir des débits bas fréquents.

On sait en effet depuis les travaux d'Albergel (1987) qu'en zone soudanienne, les écoulements ont diminué avec la sécheresse, et ce à l'échelle des bassins expérimentaux du Burkina. Ceci a été confirmé par Olivry (2002) puis Mahé (2009) et Amogu *et al.* (2010). Enfin la crue du Niger Moyen en 2010 nous a donné l'occasion (Descroix *et al.* 2012b) de souligner la relation entre l'encroûtement et l'accroissement du risque de crue et d'inondation en Afrique de l'Ouest

A l'inverse comme on l'a vu, en zone sahélienne, la baisse des pluies a été accompagnée par une augmentation des débits dont elle n'est évidemment pas la cause ! L'accroissement des écoulements malgré le déficit des pluies observé depuis la fin des années 1960 est un processus qui s'observe dans l'essentiel du Sahel, d'où son nom de « paradoxe hydrologique du Sahel ». D'abord observé sur de petits bassins du Burkina Faso par Albergel (1987), il est confirmé par Mahé et Olivry (1999) dans plusieurs bassins d'Afrique de l'Ouest, puis par Amani et Nguetora (2002) et Olivry (2002) sur celui du Niger. C'est ensuite sur les affluents de rive droite de celui-ci (Mahé *et al.*, 2003), puis sur le bassin du Nakambé (Mahé *et al.*, 2005 et 2010) que la même hausse est observée. Mahé et ses collaborateurs ont aussi mis en évidence ce comportement paradoxal à l'Ouest en Mauritanie (Mahé et Paturol, 2009) puis à l'Est (Mahé *et al.*, 2011) dans la zone sahélienne du Nigéria. En zone pastorale nord-sahélienne, Gardelle *et al.* (2010) ont observé une forte croissance des mares, liée à l'augmentation du ruissellement, celle-ci étant due à la non-reconstitution de la végétation après la sécheresse dans les zones où le peu de sol a été emporté. Plus récemment enfin, Mahé *et al.* (2013) ont proposé une synthèse ambitieuse de l'ensemble des comportements hydrologiques et de leur évolution sur toute la façade atlantique de l'Afrique, du Maghreb au Congo.

Dans toutes les configurations définies ci-dessus, des processus d'échelle ponctuelle ou d'échelle locale, surtout liés aux activités socio-économiques rurales, sont en train de modifier et les bilans de l'eau et les ressources en eau aux échelles méso et régionales.

Du point de vue de l'aménagement et de l'utilisation de l'espace rural, l'expérience des recherches passées comme de celles acquises durant le programme AMMA dans la bande sahélienne conduisent à émettre l'hypothèse forte que les activités humaines conduites dans un bassin ont un impact sur le cycle de l'eau et le bilan dans ce bassin. En l'occurrence le signal anthropique dépasse le signal climatique pour entraîner le paradoxe du Sahel.

Cette opposition entre comportements des zones soudano-guinéennes et sahéliennes face à l'évolution des pluies n'apparaît toutefois pas lorsque l'on compare les indices de pluie et de débits entre les stations de Koulikoro (bassin 120000 km², 100% soudano-guinéenne) et Niamey (bassin 400000 km² actifs), où les 2/3 de la superficie du bassin sont sahéliens (figure 5). En effet, les débits provenant des régions sahéliennes, même s'ils ont considérablement augmenté ces dernières années, restent très faibles en regard des volumes apportés par le Niger amont. Dans les deux cas, on constate, comme Olivry dès 2002, que la baisse des débits est deux fois plus prononcée que celle des pluies, et ce aussi bien à Niamey qu'à Koulikoro. Une petite différence apparaît entre les deux graphes, c'est que la remontée des pluies et des débits après 1995 est un peu plus marquée à Niamey qu'à Koulikoro. Cela a été signalé depuis longtemps pour les pluies, qui ont augmenté plus tôt à l'est qu'à l'ouest du Sahel (Ali et Lebel, 2009).

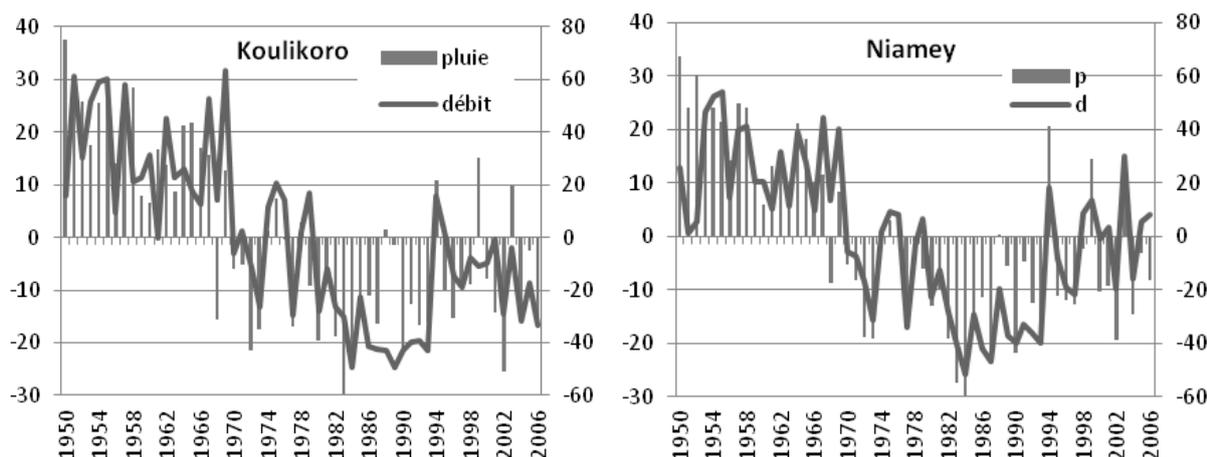


Figure 5. Evolution comparée des indices des pluies et des indices de débits à Koulikoro et à Niamey (1950-2006)

La station hydrométrique de Niamey sur le fleuve Niger comporte l'énorme intérêt de présenter des données de bonne qualité depuis 1929, et depuis 1946 sans aucune interruption.

La figure 6 montre l'évolution des hydrogrammes décennaux de cette station depuis 1950. Le régime du fleuve Niger est monomodal dans son cours amont, comme celui des cours d'eau de toutes les zones tropicales où on observe une saison sèche et une saison des pluies. Par contre, en aval du DIN (Delta Intérieur du Niger) (figure 7), du fait du temps nécessaire pour la crue annuelle à franchir le DIN, elle arrive en aval après la saison des pluies, en début de saison sèche, et même un mois et demi ou deux mois après la fin de la mousson à Niamey (figure 6). Elle y est donc précédée par la crue dite « locale » provoquée par les apports des affluents sahéliens du Niger, qui se produit dès quelques semaines après le début de la mousson, et se termine progressivement après la fin des pluies entre septembre et novembre. Traditionnellement, la crue annuelle commençait fin juillet avec le regroupement des écoulements sahéliens ; cette première partie de la crue était individualisée par la couleur de l'eau, chargée des particules arrachées aux versants par le ruissellement, donnant une coloration rouge aux flots du fait de l'abondance des « latérites », en fait des sols ferrallitiques tropicaux typiques de ces zones semi-arides ; vers mi-octobre ou début novembre sans que le niveau de l'eau ne baisse sensiblement, celle-ci devenait subitement claire et translucide, composée d'eaux provenant du haut bassin, essentiellement cristallin, bien moins chargées en sédiment et de plus filtrées par la longue traversée du Delta Intérieur du Niger (DIN), au profil extrêmement plat et aux grandes étendues envahies de végétation aquatique accélérant le dépôt des sédiments ; cette deuxième partie de la crue est appelée « crue noire ». Plusieurs points méritent d'être notés :

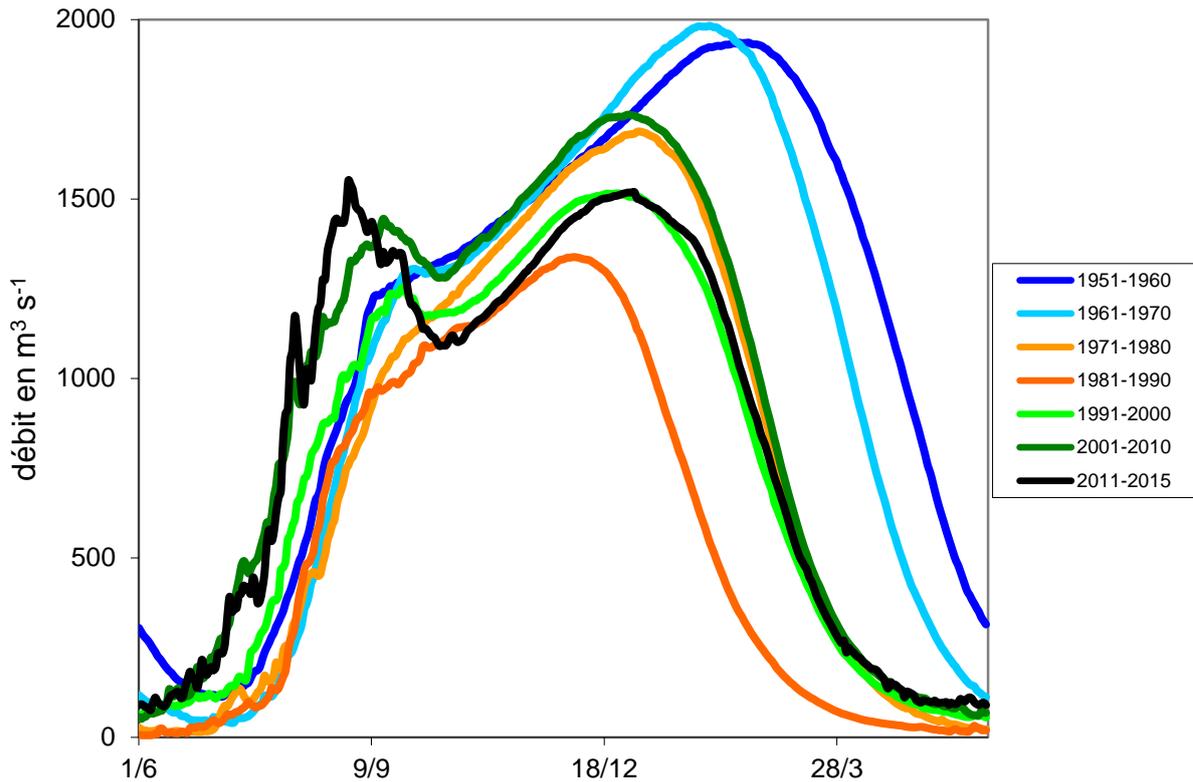


Figure 6. Hydrogrammes décennaux du fleuve Niger à Niamey

- Le raccourcissement de la crue, ou plutôt des crues, puisque les débits des mois de mars, avril et mai sont bien plus réduits que durant les décennies « humides » 1951-1970 ; or il s'agit de la fin de la saison sèche, et de la période la plus chaude de l'année, donc celle où la demande en eau est la poignante ;
- La crue noire, ou guinéenne, est bien plus faible après 1970, et est loin de récupérer, dans les décennies récentes, les volumes écoulés avant 1970 ; cela montre que les écoulements, dans le haut bassin sont loin d'avoir retrouvé leur niveau d'alors, alors que les pluies sont revenues à leur moyenne centennale ; et aussi que les multiples réservoirs qui composent l'hydrologie du Haut Niger n'ont pas fini leur remplissage post-sécheresse ;
- A partir de la remontée des précipitations durant les années 1990, on constate que l'hydrogramme sépare de plus en plus distinctement les deux crues, la rouge sahélienne et la noire, guinéenne ; la dernière arrive toujours au même moment, mais la première s'achève de manière bien plus rapide qu'avant, traduisant la diminution de la capacité de rétention en eau des sols ;
- Ce qui est confirmé par l'arrivée chaque fois plus précoce, surtout depuis 1990, de la première crue, locale (crue sahélienne) ; on constate qu'à Niamey celle-ci arrive en moyenne au début de la dernière décennie de juillet, alors qu'elle se produisait à la fin de la dernière décennie d'août jusqu'à la décennie 1981-1990 ; en une trentaine d'années, la date d'occurrence de la crue rouge à Niamey s'est avancée de 35 jours. Cela traduit une concentration plus rapide des écoulements, elle-même fruit de la diminution de la

capacité des sols et des bassins à retenir l'eau de pluie.

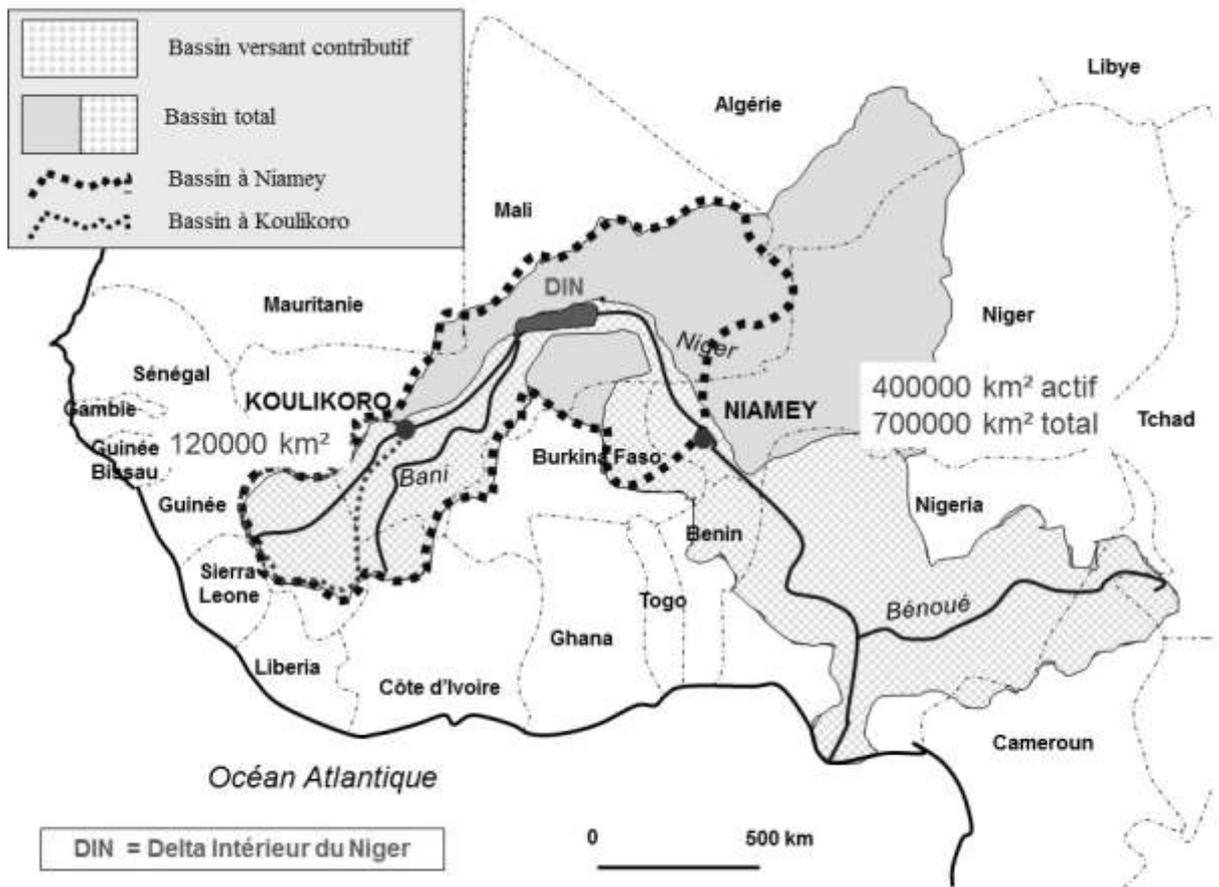


Figure 7. Localisation et disposition du bassin du Niger en Afrique de l'Ouest

Une distribution zonale des comportements hydrologiques

Dans le bassin soudanien de l'Ouémé, plus au sud (Bénin), Kamagaté *et al* (2007) ont montré que les débits de l'Ouémé et de ses affluents étaient principalement composés d'un flux rapide de type Hortonien puis d'un second flux retardé un court moment en sub-surface ; contrairement au schéma grossier décrit jusque là, il semblerait que ces bassins sud soudaniens n'ont clairement pas un comportement Cappusien (ou Hewlettien; Cappus, 1960; Hewlett, 1961), comme cela a été décrit dans des bassins soudaniens pourtant plus septentrionaux (Mahé *et al.*, 2003 ; Descroix *et al.*, 2009), sur les affluents de droite du Niger venus du Liptako Gourma aux latitudes soudaniennes et des contreforts de l'Atakora (Mékrou, Tapoa, Diamangou, Goroubi). C'est surtout sur les affluents sahéliens venus aussi du socle granitique du Liptako Gourma (Sirba, Dargol, Gorouol) que l'on pensait trouver des bassins peu influencés par le passage de l'eau en sub-surface. Il est probable que les processus (de transformation des écoulements ralentis à de écoulements rapides) sont en pleine mutation et composent donc une dynamique spatio-temporelle très complexe. D'après Kamagaté *et al.* (2007); « *La combinaison de l'information apportée par la géophysique, l'hydrodynamique, la géochimie, permet de reconstituer un schéma cohérent des processus à l'échelle du bassin (Fig.8). La nappe d'eau libre est dans tout le bassin, en position élevée par rapport au réseau hydrographique* ». (Kamagaté *et al.*, 2007). Et « *L'eau remplit le profil du versant dans une continuité hydraulique, comme l'a montré le suivi piézométrique. Le suivi géophysique a lui montré que les eaux souterraines remplissent différents réservoirs et poches, comme des lentilles de sable*

ou de limons argileux. Durant la saison des pluies, la nappe évolue dans tout le bassin, mais sans suivre une logique particulière ». (Kamagaté *et al.*, 2007).

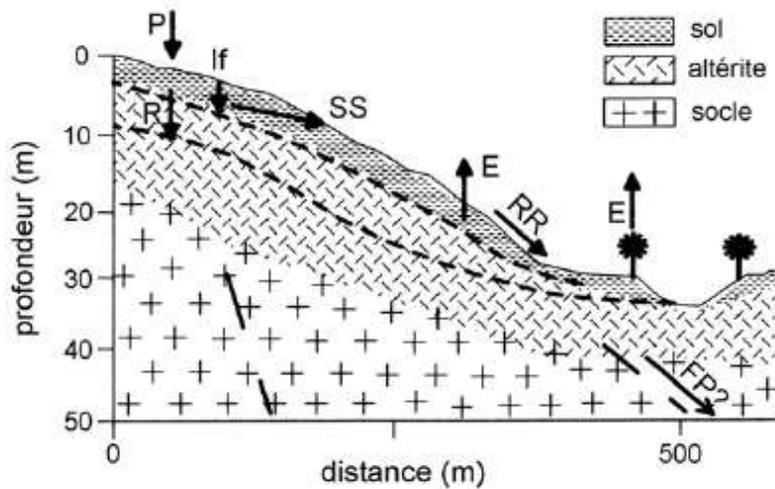


Figure 8. Schéma conceptuel des flux hydrologiques à l'échelle du versant, fondé sur des suivis hydrologiques, géophysiques et géochimiques réalisés dans le bassin de la Donga (Ouémé Supérieur). P = pluie ; E = Evapo-transpiration ; If = Infiltration ; R = recharge ; RR = écoulement rapide (de type Hortonien, et des zones saturées) ; SS = flux de subsurface ; Fp = flux profonds. Les lignes en tiretées donnent le niveau minimal et maximal de la nappe saisonnière. (Kamagaté *et al.*, 2007)

La sécheresse ne protège pas contre le risque d'inondations

On observe clairement une augmentation de l'occurrence des inondations en Afrique de l'Ouest ces dernières années (Tarhule, 2005 ; Tschakert *et al.*, 2010, Diongue-Niang *et al.*, soumis), ainsi que des dégâts qu'elles provoquent (Di Baldassare *et al.*, 2010, Aich *et al.*, 2016). Cela rend urgent de tenter de répondre à certaines questions concernant les interactions entre cycle de l'eau et les impacts des activités socio-économiques en Afrique de l'Ouest soudano-sahélienne. Il faut dire qu'il y a eu de nombreux événements marquants, surtout à partir de la deuxième moitié de la décennie 2001-2010.

Les récentes inondations à la fin du mois d'août 2013, de Bamako puis, trois jours après, à Niamey, sont très différentes dans leur origine ; la première est indéniablement une crue « urbaine », la seconde est une crue d'origine « rurale ». Ces dernières sont en grande partie liées aux changements d'occupation des sols [Descroix *et al.*, 2012 ; Descroix *et al.*, 2013 ; Mamadou *et al.*, 2015] ; ainsi elles ont touché Niamey fin août 2013, pour la troisième fois en quatre saisons (août 2010, août 2012, août-septembre 2013) ; dans le cas des crues de 2010 et 2013, la pluviométrie était excédentaire mais pas exceptionnelle. Bien plus au Nord, la ville d'Agadès avait subi, le 1^{er} septembre 2009, une inondation liée à la rupture d'une digue protégeant la ville, et l'oued Teloua a envahi la ville, reprenant son cours naturel.

Cette nouvelle série de crues « rurales » avait commencé en 2007 avec les inondations qui avaient causé de gros dégâts en zone rurale au nord Ghana et Togo et sud du Burkina Faso [Tschakert *et al.*, 2010].

C'est par contre par l'inondation, deux mois avant le début de la mousson, de quartiers entiers de Niamey (le 28 avril 2004) qu'avait été initiée la série en cours des crues « urbaines ». Ce jour-là, plus de 130 mm étaient tombés en quelques heures sur les quartiers nord de Niamey, et

les bas-fonds descendant vers le fleuve Niger avaient été littéralement balayés, comme ceux de Bamako le 30 août 2013 (voir chapitre 9). Puis, le 1^{er} septembre 2009, c'est Ouagadougou qui été littéralement submergée par un épisode de temps de retour de 10000 ans [Karambiri, 2009] ; ce jour-là certains quartiers ont reçu plus de 270 mm en une dizaine d'heures. En août 2013, la perturbation à l'origine de la crue urbaine à Bamako, a également causé des inondations sans précédent dans les zones basses du Sine et Saloum avec des cumuls de plus 300 mm en deux jours, alors que la capitale du Mali n'avait reçu que 85 mm de pluie.

Un évènement encore plus « urbain » a frappé les esprits dans la plus grande métropole du Sahel : l'inondation qu'ont subi les quartiers Nord de Dakar le 26 août 2012. L'épisode a été marqué par une très forte intensité, comme l'a noté Dacosta [2012], puisque plus de 140 mm sont tombés en une cinquantaine de minutes à l'aéroport de Yoff. La hauteur précipitée totale en deux heures et demie est de 168 mm à cette station, ce qui en fait le deuxième plus fort cumul jamais enregistré à Dakar depuis 1896 (ouverture de la station), le record étant toujours détenu par une précipitation de 214 mm en 1932. La pluie a été inégalement répartie ; en effet les départements de Pikine et Guédiawaye dans la banlieue de Dakar n'ont enregistré que 40 et 39 mm respectivement [Diallo, 2013], le site IRD de Hann 60 mm.

Les inondations récurrentes de la ville de Saint Louis relèvent plus de la gestion de bassin et de barrages et de la dynamique littorale ; elles ont pu entraîner en réaction un aménagement très controversé aux conséquences démultipliées (voir chapitre 9).

Conclusion

La simple classification du tableau 1 corrobore les conclusions de Mahé et Paturel (2009) : « *l'effet conjoint du changement climatique et des activités humaines est responsable d'un accroissement des coefficients d'écoulement des cours d'eau de l'Afrique de l'Ouest sahélienne depuis les années 1970 en dépit du long déficit pluviométrique observé : les coefficients d'écoulement ont augmenté dans tous les bassins où la pluviométrie est inférieure à 750 mm, et les plus fortes valeurs sont observées dans les bassins les plus peuplés, où l'occupation des sols est dominée par les cultures* » ; ces auteurs sont les premiers à avoir mis en évidence cet accroissement des coefficients de ruissellement sur les bassins mauritaniens affluents du Sénégal.

La comparaison avec les bassins, plus méridionaux (Tableau 1, figure 4), montre que la baisse des écoulements est plus forte dans la zone soudanienne que dans la zone guinéenne ; on avait expliqué ce fait par l'extension géographique respective des zones au comportement hortonien ou cappusien (Descroix *et al.*, 2009 ; Amogu *et al.*, 2010).

Par ailleurs, en analysant les interactions entre eaux de surface et eaux souterraines, Mahé (2009) a souligné le rôle de la diminution de l'écoulement de base liée au déficit pluviométrique cumulé sur plusieurs années. Cet auteur a comparé un bassin essentiellement soudanien (le Bani, principal affluent du Niger en amont du DIN) avec un bassin complètement sahélien (le Nakambé, tributaire de la Volta), distinguant deux comportements hydrologiques cohérents avec la régionalisation que nous avons tentée la même année (Descroix *et al.* 2009, Amogu *et al.*, 2010). Ces deux cours d'eau figurent, tableau 1 dans les secteurs les plus distants ; le Bani est celui qui a connu la plus forte baisse de débits durant les années 1980 ; le Nakambé était alors le deuxième cours d'eau ayant eu la plus forte croissance de son coefficient d'écoulement. La conclusion de Mahé (2009) opposant des bassins sahéliens hortonien d'une part, le rôle majeur (bien qu'en fort déclin au bout de 25 ans de déficit, les réservoirs s'étant quelque peu vidés..) de la capacité de rétention en eau des sols et des bassins dans les zones soudanien d'autre part, va dans le même sens que les conclusions et régionalisations de nos travaux sur le Niger Moyen (Descroix *et al.*, 2009 ; Amogu *et al.*, 2010).

En résumé,

- On peut opposer d'une part les régions guinéennes et sud soudaniennes où la capacité de rétention en eau des sols est préservée et où la vidange des réservoirs naturels, étalée sur plusieurs années, a amorti, les premières années, les effets de la sécheresse, avec d'autre part, les régions sahéliennes et nord soudaniennes, où la sécheresse s'est traduite par une diminution drastique de la capacité des sols à retenir l'eau (du fait de la disparition de la biomasse) ;

- les premières ont un comportement « cappusien » et ont vu leurs écoulements s'effondrer au bout de 5 à 10 ans de déficit pluviométrique, quand plus au nord, les bassins ont acquis un comportement de plus en plus hortonien, ce qui s'est traduit par une très forte augmentation des débits.

CHAPITRE 2 - le château d'eau de Guinée : mythe ou réalité ?

« Le Fouta Djallon possède tout de même plus de 8000 sources »

Colonel Cheikh Tidiane Ndiaye,
ex-chef du projet « Fouta Djallon »
au Ministère sénégalais de l'Environnement
et du Développement Durable

Les hauteurs de Guinée : château d'eau, éponge, ou verre d'eau pour une future tempête ?

Château d'eau ? Certes, les hauteurs de Guinée, c'est-à-dire l'ensemble constitué par les Monts Nimba, le Fouta Djallon et la « dorsale guinéenne », c'est-à-dire la ligne de hauteurs d'altitude en général inférieure à 1000 m qui joint ces deux massifs en passant par celui, plus élevé, des monts Loma (situés en Sierra Leone). Autant les hauts bassins du Bafing (branche principale du Sénégal) et de la Gambie sont en effet montagneux (les bowés de la haute Gambie dépassent parfois 1500 m d'altitude, figure 1), autant dans celui du Niger, seules les sources du Niger lui-même et du Tinkisso sont à une altitude proche de 1000 mètres (tels les inselbergs marquant la ligne de partage des eaux entre le haut Bafing et le Haut Niger, près de Dabola, figure 2), l'essentiel du haut bassin étant constitué de hauteurs et de plateaux très peu escarpés mais où le moindre bas-fond est une zone humide, zone naturelle de stockage d'eau qui se vide petit à petit durant la saison sèche ; des centaines d' « éponges » de ce type contribuent à faire du haut Niger un cours d'eau pérenne (figures 3 et 4).

Ceci avait été observé dès la fin du 19^{ème} siècle :



Figure 1 : rebord de bowal (plateau latéritique) sur la route de Gaoual à Labé (haut bassin de la Gambie)



Figure 2 : 30 km à l'ouest de Dabola, des inselbergs marquant la ligne de partage des eaux entre Tinkisso (Niger) et Bafing (Sénégal)



Figure 3. Un des innombrables bas-fonds du haut bassin du Niger (région de Faranah)



Figure 4 : bas-fonds en forêt galerie dans la forêt claire (route Faranah-Kouroussa) ; de l'eau persiste et coule dans tous les bas-fonds, un mois après la fin de la mousson

« Tel est le fait ; quelles en sont les causes ? Des trois éléments qu'il y a lieu d'étudier pour l'explication d'un régime fluvial, deux ici n'ont qu'une importance toute négative : l'élément géologique et l'élément hypsométrique. En premier lieu le sol constitué généralement par des grès et des argiles n'est pas perméable ; le fût-il que la saturation le rendrait bientôt imperméable au moment des pluies d'été. En second lieu, le Niger ne se présente jamais, même dans son cours supérieur, comme un fleuve de montagne, comme un torrent ; de sa source à Bammakou, la pente kilométrique n'est que de 98 centimètres, elle n'est plus que de 6 centimètres en aval de Bammakou. Quant aux affluents, à l'exception du Tinkisso, tous ils prennent naissance sur des plateaux d'une si faible altitude relative que leurs sources se confondent en temps de pluies avec les sources des fleuves voisins. La « ceinture du bassin » du Niger n'est qu'une vieille expression géographique ; en fait de montagnes, il n'y a que des massifs isolés, le grand massif du Fouta-Djallon et le petit massif de Sikasso ; de chaînes, point. La plus célèbre, la chaîne de Kong, s'est effondrée sous les pas de M. Binger. L'élément climatologique seul entre donc en ligne de compte. Ce qui provoque les crues d'été du Niger, ce sont ces pluies tropicales d'été qui constituent la grande caractéristique du Soudan. Ces pluies d'été, dont la durée diminue à mesure qu'on s'éloigne de l'Equateur et de la mer, qui commencent à la fin de mai à la lisière de la forêt équatoriale et au début de juillet à la lisière du désert saharien. S'il fallait un argument pour réfuter l'assertion selon laquelle les crues du Niger seraient dues aux averses tombées sur le Fouta-Djallon, il n'y aurait qu'à montrer que les crues de tous les affluents du Niger supérieur sont identiques à celles du Niger même alors que presque toutes ces rivières prennent naissance à une très faible altitude. Le régime du Niger supérieur, à Segou tout au moins, est donc simple et simple aussi son explication. C'est un

régime de crues d'été provoquées par les pluies d'été de toute la zone tropicale. Devant Bammakou le Niger supérieur est un excellent type de fleuve tropical » (Busson, 1895).

Par ailleurs, une vingtaine d'années ensuite, un autre géographe de l'armée coloniale note : « *étant donnée l'imperméabilité du sol, presque toute l'eau tombée, surtout dans la saison des fortes pluies, profite au fleuve. On perçoit très nettement à Koulikoro en mars et avril les passages de flots provoqués par des pluies des hautes régions en février et mars. En somme c'est cette région qui assure la marche générale de la crue du Niger, dite « crue occidentale » à Mopti. C'est ainsi que, l'année 1907 y ayant été particulièrement sèche, le contre-coup s'est fait sentir à Koulikoro où la crue de 1907 a été faible ; l'étiage de 1908, consécutif à la crue de 1907, a été un des plus bas constatés. Nous avons dit que les terrains étaient peu perméables ; c'est un fait général dans tout le bassin du Niger qui, dans ses grandes lignes, est composé de terrains ferrugineux ou d'argile recouverts d'une très mince couche d'humus. Or le fleuve a un débit qui ne tombe jamais au-dessous de 20 mc à la seconde dans les années exceptionnellement sèches comme 1910 et qui, en 1908 (année très sèche), a atteint un minimum de 30 mc. Les sources proprement dites sont manifestement insuffisantes pour assurer un tel débit. Celles du Niger notamment seraient complètement taries dès le mois de janvier. Mais il existe des réservoirs à ciel ouvert, lacs ou marécages, situés dans la région des sources. C'est ainsi que, le long de la ligne du chemin de fer de Konakry à Kouroussa, on peut apercevoir une partie des plateaux marécageux qui alimentent le Bafing [le haut Sénégal] en saison sèche » (Millot, 1913).*

Les dernières phrases de la description de Millot (qui se réfère là au Bafing mais sa remarque semble porter plutôt sur le Haut Niger) sont primordiales ; plutôt que de « sources » pouvant expliquer l'existence d'un débit d'étiage sur le Haut Niger, il vaut mieux compter sur deux types de réservoirs naturels : des bas-fonds humides (figures 3 et 4) et de nombreuses et importantes mares émaillant les plaines d'inondations (Gambie, Bafing, Falémé mais surtout Haut Niger et ses affluents) (Ferry *et al.*, 2012 ; Le Bars, 2012). En effet, les zones amont, dans les hauteurs de Guinée, sont caractérisées par une pluviométrie annuelle élevée (plus de 1000 mm, voire plus de 1500 mm et jusque près de 1750 mm par endroits) et une saison des pluies de plus de 5 mois. Ce socle constitue un atout important dans le rôle de château d'eau que joue ce haut bassin, bien que les capacités de stockage soient a priori bien plus faibles que celles d'un terrain sédimentaire. Comme l'a remarqué très tôt Busson (1895) « *le régime du haut Niger s'explique par deux éléments négatifs, le socle imperméable – une faible capacité de stockage rapidement saturée- et l'absence de réelles montagnes dans le haut bassin* » (ce qui l'oppose au haut Sénégal et à la Haute Gambie, qui eux, ont des reliefs très marqués ; figures 1 et 2); « *le seul fait positif est le climat, avec de forts cumuls pluviométriques durant la mousson* » (Busson, 1895) ; dans ce même haut bassin, « *les sources ne suffisent pas à expliquer les débits du cours d'eau ; ceux-ci sont appuyés par des réservoirs naturels de petits lacs et surtout d'un très grand nombre de zones humides* » (Millot, 1913) **ce sont ces zones humides qui sont à préserver à tout prix dans l'avenir, pour préserver les débits de saison sèche, si indispensables à l'ensemble du Sahel !!** ces zones humides sont très nombreuses dans les « highlands » de Guinée, où les bas-fonds sont occupés par des marais, exactement comme les tourbières des zones tempérées. Pour le colonel Cheikh Tidiane Ndiaye, chef du projet « Fouta Djallon » au Ministère sénégalais de l'Environnement, le Fouta Djallon posséderait tout de même plus de 8000 sources (communication personnelle, août 2014) ; en fait il s'agit de ces zones humides qui permettent d'alimenter des filets d'eau jusqu'au bout des 7 à 8 mois de saisons sèche. De fait, les montagnes de Guinée font illusion grâce à ces innombrables zones humides car les roches du socle sont de bien piètres et pauvres réservoirs d'eau. L'épaisseur d'altérites pouvant accueillir et stocker l'eau dépend de la fracturation de la roche, et de la présence d'eau et de végétation ; mais elle dépasse rarement plus de quelques dizaines de mètres d'épaisseur. Ce

sont les zones humides qui stockent l'eau (y compris certes dans les altérites, probablement plus épaisses sous ces bas fonds du fait de l'altération induite) et non le socle. Le château d'eau est donc relatif, mais aussi plus fragile de ce fait car, qu'advierait-il si ces zones humides sont mises en cultures les unes après les autres ? N'y a-t-il pas un risque d'assèchement progressif de ces zones humides ?

La figure 5 permet de manière brute de chiffrer ce « château d'eau ». Les montagnes de Guinée « produisent » chaque année environ 130 km^3 d'eau, soit plus que les hauteurs d'Ethiopie (qui fournissent tout de même 86% du débit total du Nil à Assouan), mais moins que le territoire entier de la France. Il va sans dire que ce volume est surtout important pour les pays du Sahel ; en effet, près des trois quarts de ce volume est entraîné par le Niger, le Sénégal et la Gambie, fleuves se dirigeant vers des régions plus sèches situées au Nord (figure 6). La ligne de partage des eaux est effectivement située nettement au sud des massifs, qui représentent un grand plan incliné vers le Nord, y déversant donc de grands volumes d'eau douce. Plus de $2000 \text{ m}^3/\text{s}$ sont écoulés en moyenne annuelle depuis le château d'eau guinéen vers les zones semi-arides du Sahel ou plutôt de l'ensemble de la zone soudano-sahélienne.

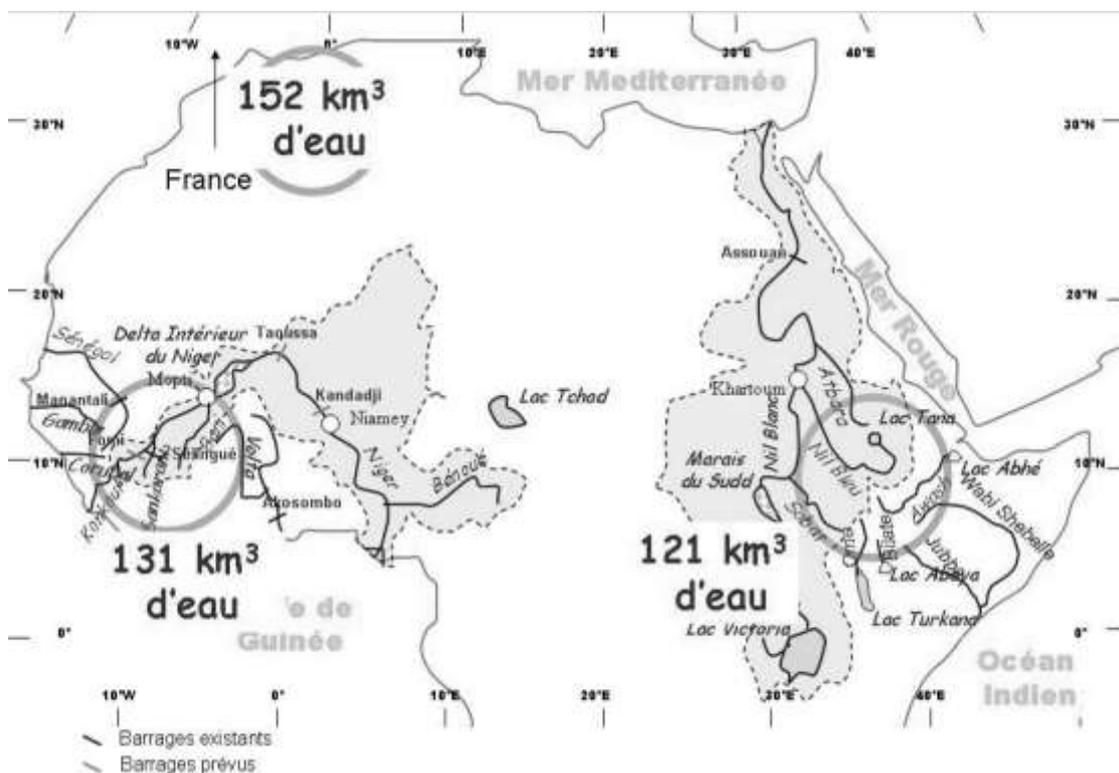


Figure 5. Le « château d'eau » guinéen au volume comparé avec son pendant est-africain d'Ethiopie et la France.

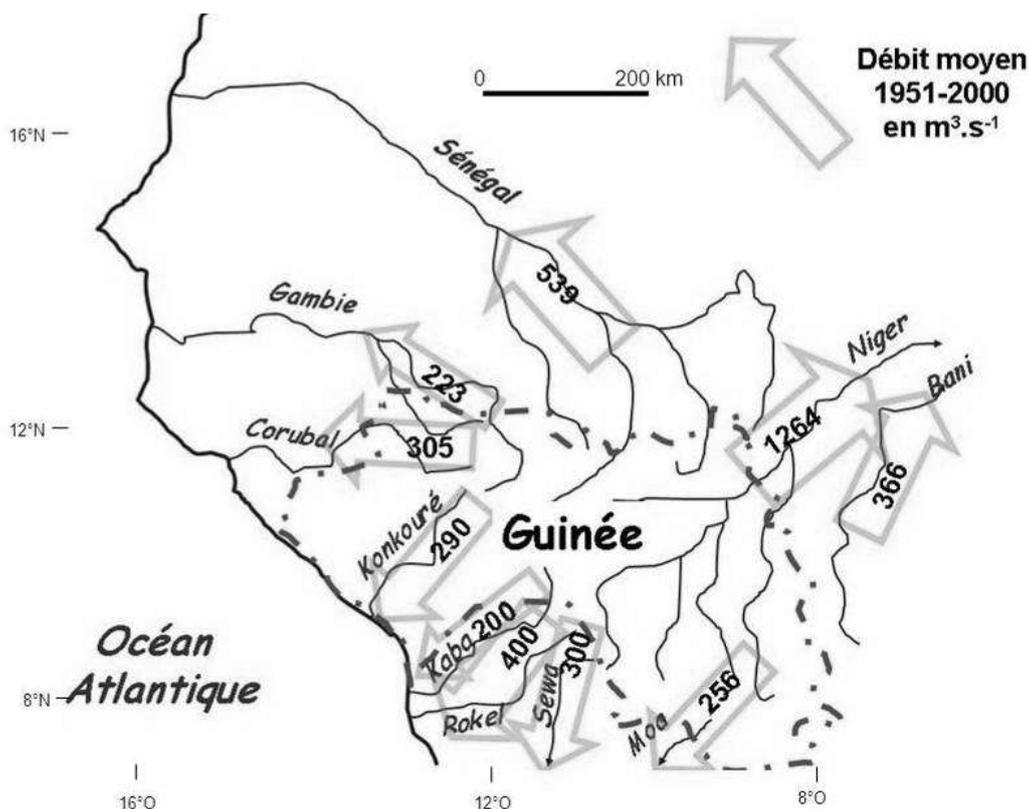


Figure 6. Le « château d'eau guinéen » et ses principaux fleuves. Débit annuel moyen des fleuves indiqué en m^3/s

Combien d'eau ?

Les valeurs figurant sur les cartes (figures 5 et 6) peuvent faire illusion et faire croire que l'on connaît bien les débits écoulés par les cours d'eau d'Afrique de l'Ouest et en l'occurrence de Guinée. En fait, il n'en est rien, ou plutôt il n'en est plus rien ; les agences de bassin centralisent et fournissent éventuellement des données hydrométriques des réseaux nationaux, mais elles sont elles-mêmes tributaires et dépendantes de ces réseaux. Or, les fameux PAS (plans d'ajustement structurels) sont passés par là et les stations hydrométriques (figure 7), avec les stations météorologiques, figurent parmi les premières victimes des coupures budgétaires drastiques que les organismes financiers de Washington (BM et FMI) ont imposé aux pays d'Afrique de l'Ouest au début des années 1990 afin qu'ils remboursent leurs dettes et qu'ils « assainissent » leurs finances publiques et privées. De fait, les réseaux de tous les pays ont été très affectés et une grande partie des stations a été fermée. Dans le cas de la Guinée, le cas est un peu plus sévère car le réseau avait déjà du mal à fonctionner correctement auparavant. Toujours est-il que les mesures sont difficiles à obtenir. Apparemment fin 2014, et depuis plusieurs années, par exemple, aucune station n'acquiert de données sur la partie guinéenne du bassin du Niger, d'où proviennent 90% des apports en eau à Koulikoro (communication personnelle de Luc Ferry de l'IRD et de Aliou Barry, de l'ABN Guinée). Cette station a été installée au début du 20^{ème} siècle, à 35 km en aval de Bamako et au début amont de la section navigable du fleuve Niger ; cette petite ville est accessoirement point d'arrivée du chemin de fer, le but des administrateurs coloniaux de l'AOF (Afrique Occidentale Française) étant alors de transporter les marchandises par train et les transborder sur les pinasses du fleuve jusqu'à Mopti, Tombouctou, Gao voire Niamey.



Figure 7 : station hydrométrique de Kounsi (haut bassin de la Gambie) ; état en avril 1986

La forte hydraulicité du massif attire les projets de barrages (figure 8). Pour le moment seul le barrage de Garafiri, sur le Konkouré, est vraiment inclus dans le massif du Fouta Djalon (voir figure 9 une photo d'un affluent du Konkouré ; les deux autres barrages des hauts bassins sont déjà en fait en position soit de piedmont comme le barrage de Sélingué sur le Sankarani, soit dans un autre massif, les Monts Mandingues (un massif ancien majoritairement gréseux) pour le grand barrage de stockage et de régulation du bassin du Sénégal, le barrage de Manantali (figure 10). Mais une multitude d'autres barrages sont en projet dans les bassins des trois principaux cours d'eau qui coulent vers le Nord et le Sahel, sans compter donc le barrage Kaleta que des entreprises chinoises ont achevé en 2015 sur le bas Konkouré. La Guinée se projette en pays exportateur de courant électrique, comme l'est déjà l'Ethiopie à l'autre bout du Sahel... Le projet le plus abouti sur le fleuve Niger, non encore équipé en Guinée, est le barrage de Fomi, planifié dans le cadre de l'ABN (Autorité du Bassin du Niger) et seul barrage vraiment nécessaire pour l'aménagement de tout le bassin jusqu'au confluent de la Bénoué au Nigeria. Toutefois, comme le fait justement remarquer Gil Mahé dans le film « *Un fleuve nommé Niger* » (Surugue, 2008), la mise en eau de ce barrage mettrait très sérieusement en péril l'existence même du Delta Intérieur du Niger, plus grande zone humide d'Afrique de l'Ouest, ainsi que toute l'économie agro-pastorale et de pêcheries qui l'anime. La Guinée a d'autres projets sur ces fleuves coulant directement vers l'Atlantique, comme deux autres barrages sur le Konkouré (Amaria et Souapiti) et un autre sur le Kogon. Les deux autres cours d'eau « sahéliens », la Gambie et le Sénégal, ne sont pas en reste ; l'OMVG a prévu de construire un barrage à Sambangalou près de Kedougou, aux confins du Sénégal et de la Guinée. L'OMVS, quant à elle, prévoit d'équiper la Falémé, principal affluent de gauche du fleuve Sénégal, longtemps frontalier du Mali et du Sénégal, aux environs de Gourbassy ; d'autres barrages sont également en projet sur le Bafing (*le fleuve noir*, en bambara), bras amont principal du fleuve, en amont de Manantali en Guinée, à Boureya et à Bindougou ; sur le Bakoye (*le fleuve blanc*), l'autre bras amont majeur, à Boudofora ; et enfin sur le Baoulé (*le fleuve rouge*), cours d'eau au débit bien moindre que les trois précédents, à Badoumbé (*le fleuve profond*).

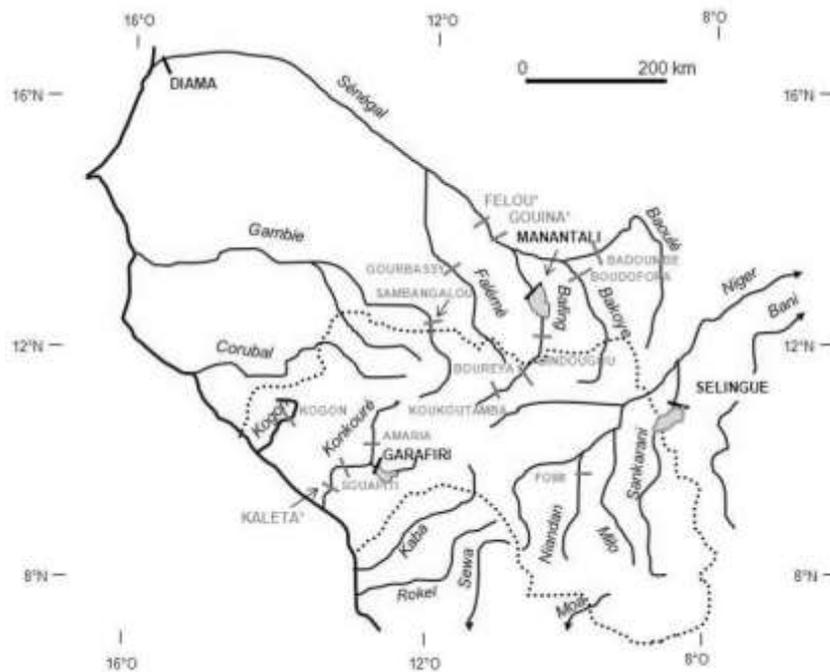


Figure 8. Le « château d'eau guinéen » et les projets de barrage (en noir : barrages existants ; en gris : projets de barrages) ; en noir : barrages existants ; en gris : en construction ou en projet

La ville de Bafoulabé, proche de Kayes, à l'est du Mali, est située au confluent du Bakoye et du Bafing, les deux émissaire amont du fleuve Sénégal ; son nom signifie « la rencontre des deux rivières » ou encore « l'endroit où habitent les peulhs ». C'est en aval de Bafoulabé que sont également prévus deux autres barrages, celui de Gouina et celui de Félou.



Figure 9. La Kakrima, affluent du Konkouré, en amont de la station hydrométrique de Kaba (photo Luc Ferry)



Figure 10. Le barrage de Manantali, sur le Bafing, bras principal du haut Sénégal, situé dans les Monts Mandingues, au Mali

Quel impact des changements climatiques ?

Comme on a eu l'occasion de l'évoquer plus haut, l'évolution des précipitations durant les dernières décennies n'a pas eu le même impact dans les hauts bassins que dans la zone soudano-sahélienne. En effet, l'évolution des débits est certes avant tout fonction de la pluviométrie. Mais on verra au chapitre 3 (le paradoxe du Sahel) que d'autres facteurs peuvent se surimposer, voire contrecarrer cette prédominance du rôle de la pluviométrie. Les sols des hauts bassins ont majoritairement un comportement de type « cappusien » (ou hewlettien, ou dunien) (Cappus 1960) c'est-à-dire que l'eau y transite par le sol avant de ruisseler. Il faut attendre en effet que le sol soit saturé pour qu'apparaisse ce ruissellement. Alors que les régions situées plus au nord, dans les zones soudano-sahéliennes, ont des sols qui ont tendance à s'encroûter, une végétation éparse, et donc l'eau a tendance à y ruisseler avant d'avoir pu s'infiltrer, par refus d'infiltration même, ou « dépassement de l'infiltrabilité », ce qu'on nomme un comportement hortonien (Horton, 1933).

Ceci explique la petite différence, signalée au chapitre 1 (voir figure 5) du comportement de l'évolution des débits aux stations contrôlant le fleuve Niger, celle de Koulikoro (à la sortie du haut bassin) et celle de Niamey qui est partiellement alimentée par des écoulements purement sahéliens, provenant des affluents du Niger essentiellement de rive droite prenant source et s'écoulant sur les terrains du socle du Liptako-Gourma. On peut remarquer que la ré-augmentation des débits du fleuve post-sécheresse (depuis la fin des années 1990), est plus marquée, surtout pour les dernières années, à Niamey qu'à Koulikoro ; cela provient de l'accélération remarquée des écoulements dans ce secteur sahélien, suite à l'encroûtement des sols.

Cet accroissement du ruissellement est bien plus marqué que dans le haut bassin, où l'infiltration doit d'abord remplir les sols avant de provoquer une saturation puis un

débordement de celui-ci. Il est probable, de plus, que dans les hauts bassins, l'augmentation observée des précipitations n'a pas encore fini de remplir les réservoirs (mares, bras morts, sol, sous-sol, nappes perchées, nappes plus profondes, autres réservoirs naturels, etc) qui ont été vidés par les deux décennies de fort déficit pluviométrique.

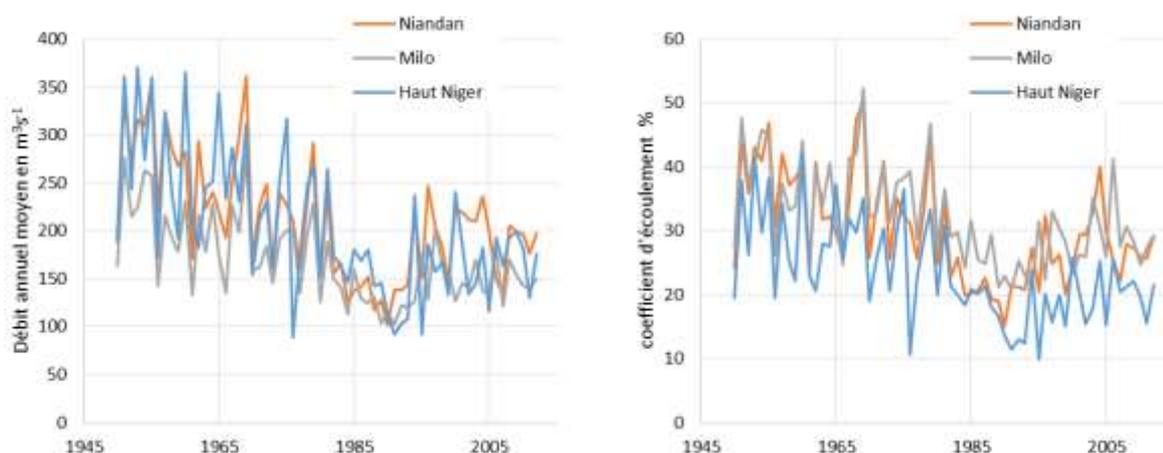


Fig. 11. Haut bassin du Niger : évolution des débits (gauche) et des coefficients d'écoulement (droite) des trois principaux cours d'eau alimentant le haut bassin : le Niger à Kouroussa, le Niandan à Baro, le Milo à Kankan

Eu égard au manque de données pluviométriques et hydrométriques, les hydrogrammes représentés (figure 5, chapitre 1) s'arrêtent en 2000. Mais ils permettent néanmoins de montrer quel a été l'impact de la sécheresse sur les débits : ainsi sur la figure 11, on peut constater que les débits de trois cours d'eau du haut bassin du Niger ont baissé de plus de moitié (plutôt de 60, voire 70%) durant la période 1981-1993, pour une baisse de la pluviométrie de 25% sur le haut bassin ; de plus, après le début du déficit en 1968, il a fallu une bonne douzaine d'années pour atteindre le creux, temps correspondant à la vidange des réservoirs naturels cités, ceux là même qui sont en train de se remplir depuis le milieu des années 1990.

La figure 12 montre les hydrogrammes des trois principaux cours d'eau coulant du Fouta Djallon vers le nord, à savoir, d'ouest en est, la Gambie (à Gouloumbou, juste à l'entrée de son bief maritime), le Sénégal (à Bakel, en aval des confluent de ses grands contributeurs) et le Niger à Koulikoro, après ses derniers « rapides ». Clairement, l'effet de la grande sécheresse a été le même sur chacun des trois cours d'eau, avec une diminution de 50 à 60% des débits pour la période la plus déficitaire, de 1981 à 1993. L'année 1994, très excédentaire, marque sur chaque bassin de manière très nette la fin de ce long étiage. Sans surprise et comme pour la pluviométrie, la reprise des débits s'accompagne aussi d'une très forte irrégularité interannuelle.

La figure 13 illustre le décalage longitudinal de la sécheresse et de ses effets : les débits de la haute Bénoué (au Cameroun) et du Chari (à N'Djaména) ont nettement moins diminué que ceux du haut Niger et plus encore que du Bani, ce dernier cours d'eau étant celui qui a vu son débit diminuer le plus fortement lors de la grande sécheresse (-82% pour la décennie 1980 comparé aux décennies 1950-1970 comme vu au chapitre précédent). De fait, le déficit pluviométrique a été plus marqué à l'ouest (les stations du littoral nord sénégalais sont celles qui ont le plus souffert) qu'à l'est, et le retour des pluies a été d'une demi douzaine d'années plus précoce à l'est (début des années 1990) qu'à l'ouest (fin des années 1990).

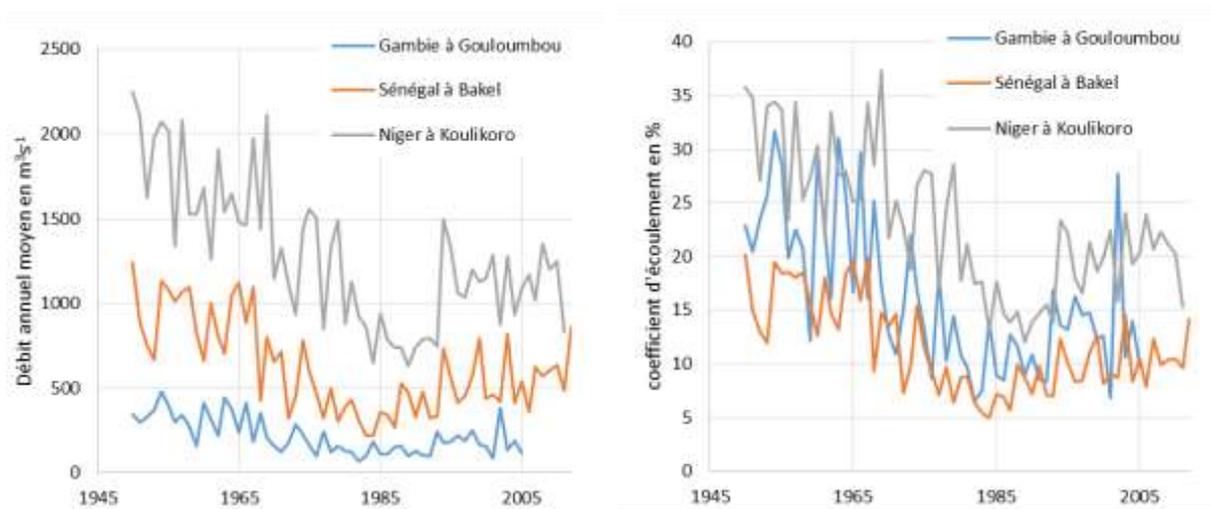


Fig. 12. Fouta Djallon : évolution des débits (gauche) et des coefficients d'écoulement (droite) des trois principaux cours d'eau coulant vers le Sahel, Gambie, Sénégal et Niger

La figure 14 compare les débits des trois principaux constituants du haut Niger (Milo, Niandan et Niger amont), dont les bassins ont entre 8000 et 16000 km², avec des bassins de surface similaire au centre-est de la bande soudanienne : Alibori, Sota et Mekrou sont des affluents soudaniens du Niger, venus du Sud Ouest de son cours frontalier nigéro-béninois ; l'Ouémé supérieur est jointif à ces trois bassins, immédiatement au sud, au centre du Bénin et en climat soudanien. Les trois cours d'eau du haut Niger ont des débits bien plus élevés, dénotant une bien meilleure hydraulicité : en effet, bien que situés à une latitude similaire ou plus élevée, et bien qu'ayant subi une plus forte et plus longue sécheresse, ils conservent une « production d'eau » et des coefficients d'écoulement bien plus élevés, du fait d'une pluviométrie sensiblement plus forte (1500 mm au lieu de 1200 mm pour le groupe « oriental ») du fait de la pente (fait montagnard) et du fait d'une lithologie uniformément granitique bien plus ruisselante que les zones de contact socle-grès-sédimentaire du versant oriental de l'Atakora, au nord du Bénin.

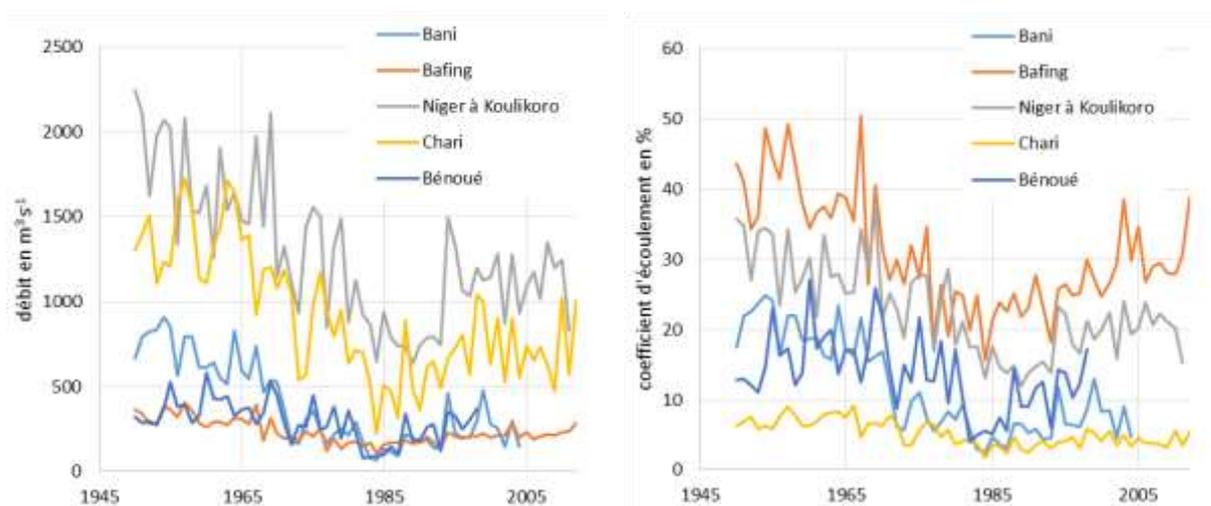


Fig. 13. Evolution des débits (gauche) et des coefficients d'écoulement (droite) du haut Niger (à Koulikoro), du Bafing (à Dakka Saidou) et du Bani (Douna) comparés avec ceux du Chari et de la haute Bénoué, à l'est du Sahel

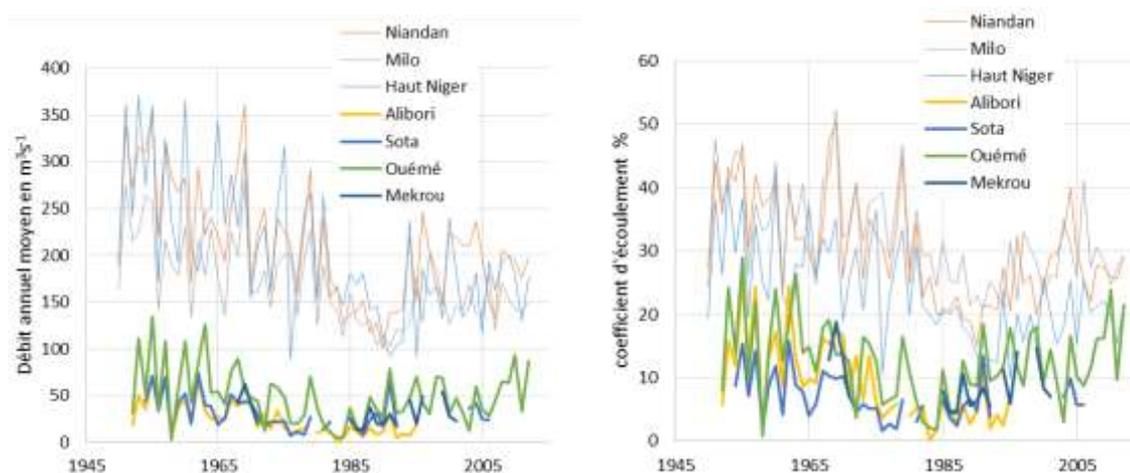


Fig. 14. Comparaison de l'évolution des débits (gauche) et des coefficients d'écoulement (droite) de cours d'eau des régions soudano-guinéennes : Est contre Ouest : creux plus précoce et remontée des débits plus rapide à l'est qu'à l'ouest ; les BV ont à peu près tous la même taille (alentour de 10000 km²) mais l'hydraulicité est bien meilleure à l'ouest (pluviométrie plus élevée, contexte géologique plus « ruisselant »

Et ailleurs, dans les zones soudano-guinéennes, que se passe t-il ?

On a fait au chapitre 1 un petit panorama rapide des travaux menés dans la zone guinéenne ces dernières années ; on rassemble ci-après les conclusions les plus importantes (souvent des résumés d'article) des travaux hydrologiques les plus récents sur la région soudanaïenne et guinéenne ; les tendances passées et futures sont variées, s'appuyant sur des observations, des prédictions, des modèles et aussi sur les prévisions (scenarios) de changement climatique, nombreux dans la région. Ces travaux, souvent issus du programme GLOWA (Global Change and the Hydrological Cycle in West Africa), financé par l'Allemagne, sont moins connus du public et des scientifiques francophones, et sont donc complémentaires des leurs, y compris dans la répartition géographique des régions étudiées.

Dans le bassin de la Volta :

« Selon plusieurs rapports, le CC (changement climatique) est responsable de la baisse de la pluviométrie et de l'accroissement des irrégularités spatio-temporelles ainsi que de l'augmentation de la fréquence des extrêmes au Sahel ces derniers années. D'autres notent qu'on observe un retour des pluies (Nicholson, 2005). Dans une étude sur la Volta (Kasei et al., 2010), sont analysées les caractéristiques temporelles des sécheresses météorologiques dans le bassin de la Volta, il s'agit de fournir un guide pour une gestion durable des eaux : « à cette fin, l'intensité de la sécheresse, son extension spatiale, sa fréquence d'occurrence, sont analysées en utilisant le SPI (Standardized Precipitation Index) sur la série de 1961 à 2005 et pour 52 stations du bassin. La sévérité des sécheresses de 1961, 1970, 1983, 1992 et 2001 dans la région est évaluée (intensité, aire d'extension, récurrence). C'est la sécheresse de 1983/84 qui est la plus aigüe avec une probabilité d'apparition inférieure à 0.1 sur 44 ans ; elle a pourtant concerné plus de 90% du bassin de la Volta » (Kasei et al., 2010).

Sur le même bassin, Oguntunde et al. (2006) décrivent leur démarche : *« On a utilisé les données de pluie et débit ainsi que d'autres facteurs climatiques, sur le long terme, pour étudier la variabilité hydrologique du bassin de la Volta de 1901 à 2002. ETP, index de variabilité des précipitations, évaporation réelle, indice d'aridité, coefficient d'évaporation, coefficient*

d'écoulement ont été estimés à partir des données hydroclimatiques observées. On a utilisé l'analyse de tendance (Mann-Kendall) ainsi que l'analyse non-paramétrique de la pente de Sen pour repérer des tendances de directions monotoniques et d'ampleur des variations sur la période. On voit ainsi que 1968 a été l'année la plus pluvieuse sur le bassin de la Volta ($d = +1.75$), 1983 la plus sèche ($d = -3.03$), mais aussi que les trois décades 1970-2000 sont les plus sèches de l'histoire de la Volta. **On observe qu'une baisse des 10% des précipitations se traduit par une baisse de 16% des débits de la Volta ; sur toute la période postérieure à 1970, on note une augmentation des coefficients d'écoulement, probablement liée aux changements d'usage des sols ou de couverture végétale** ». Dans le bassin voisin ivoirien du haut Bandama, on constate à la station de Tortiya le même comportement que pour le Haut Niger : une baisse de 16,5% des pluies a entraîné une diminution de 62% des débits du cours d'eau (Soro *et al.*, 2012).

Dans le bassin de la Volta Blanche (nord Ouest du Ghana)

Une étude établit une prédiction pour les prochaines décennies : “ *La Volta Blanche est un des principaux émissaires du bassin de la Volta. Son bassin de 106000 km² fournit suffisamment de ressources en eau pour l'ensemble des besoins actuels, malgré les défis posés par la grande variabilité spatiale et temporelle de la pluviométrie, par la longueur de la saison sèche, par la déforestation et la dégradation des sols, et la forte croissance démographique. La longue saison sèche oblige à recourir aux eaux souterraines ; ce qui rend nécessaire une bonne connaissance de la recharge. Cette étude (Obuobie, 2008) évalue le montant et la distribution spatiale de la recharge des aquifères en utilisant le bilan de masse du chlorure de sodium (sel), les observations piézométriques de 11 puits et une modélisation hydrologique par le modèle SWAT (Soil and Water Assessment Tool). Ce papier évalue aussi quel sera l'impact des futurs changements climatiques sur cette recharge. **Le bilan de la recharge est de 82 mm par an en moyenne, ce qui représente 8% de la pluviométrie annuelle moyenne (990 mm). En se basant sur le bilan simulé par SWAT pour la période 1991-2000, la simulation de la période 2030-2039 montre une augmentation importante des débits de surface, et de la recharge due au changement climatique attendu dans le bassin ; la recharge sera alors accrue de 29% par rapport à l'actuelle** ».* (Obuobie, 2008)

Sur l'ensemble du Ghana

Dans un article proposé par un chercheur de l'IWMI (International Water Management Institute, Colombo, Sri Lanka) et son équipe (Lacombe *et al.*, 2012), un assèchement du Ghana de 1960 à 2005 est démontré par le test de Mann-Kendall basé sur une technique de rééchantillonnage, aux niveaux local et régional : « *des tendances dans des chroniques de pluies sont recherchées au niveau de 16 stations pluviométriques sur la période 1960–2005. Les chroniques sont d'abord décorrélées à l'aide d'une technique préliminaire de décorrélation ajustée, puis soumises au test de Mann-Kendall basé sur une technique de rééchantillonnage. Les significativités statistiques des tendances régionales sont estimées par la statistique régionale moyenne de Kendall. Bien qu'aucune tendance significative ne soit observée pour les cumuls annuels de pluie, l'analyse révèle: (a) une réduction du nombre de jours totalisant moins de 20 mm de pluie pendant la saison des pluies, entre les latitudes 6° et 9,5°N; (b) un retard (environ 0,5 jour an-1) du début de la saison des pluies en plusieurs endroits du pays; et (c) un allongement (environ 0,1 jour an-1) des périodes sèches pendant la saison des pluies dans le sud et le centre du Ghana. Tous ces changements, qui restent non significatifs pour plus de la moitié des stations pluviométriques, sont régionalement significatifs au seuil de*

confiance de 95%. Ces résultats soulignent l'importance des tests de significativité régionale pour la recherche de tendances climatiques ». (Lacombe et al., 2012)

Dans les petits bassins du Sud ouest du Ghana, du Togo et du Bénin

Il est clair que les ressources en eau ont aussi été affectées dans la zone soudano-guinéenne ; plus peut être ou différemment que dans la zone sahélienne (qui a vu ses écoulements augmenter fortement mais se dégrader en qualité : la durée de l'écoulement est bien plus courte, les transports solides bien plus abondants). Ainsi, au Ghana, « *de nombreux plans de développement des ressources en eau, incluant des projets hydroélectriques et des projets de captage d'eau, ont concerné les cours d'eau du Sud ouest du Ghana. Toutefois, la plupart des jeux de données utilisés dans ces études hydrologiques étaient courtes ; la présente étude examine la variabilité temporelle et les changements observés dans les séries de pluies et de débits dans les bassins en question. Elle révèle que la ressource eau a été bien plus affectée que ne peut le laisser voir la seule baisse du volume écoulé total annuel ; en particulier, le volume disponible 95% de l'année est passé de 71 m³/s pour la période humide 1951-1970 à 17 m³/s pour la période sèche 1971-1990 ; les études s'étant basées sur le seul débit annuel moyen ont donc estimé des ressources disponibles très optimistes par rapport au volume réel disponible durant les étiages* » (Opoku-Ankomah, Y. et Amisigo, B.A., 1998). Par ailleurs, Amoussou et al. (2012), en comparant un bassin équipé d'un barrage (celui du Mono) et l'autre « naturel » (le bassin du Couffo), ont observé à l'inverse un excédent d'écoulement de 37% sur le Mono (Togo) après 1988 pour une très légère reprise pluviométrique de 2%, et par contre, aucune modification sur le Couffo à Lanta.

A l'échelle des grands bassins ouest –africains

A l'échelle des bassins versants entiers (Sénégal, Niger, Lac Tchad, la proportion des eaux d'écoulement qui provient des régions soudano-guinéennes est très majoritaire par rapport aux volumes d'eau provenant des zones sahéliennes semi-aride. Cependant, les changements d'occupation des sols ont un bien moindre impact dans les zones forestières que dans les zones sahéliennes, comme le montre l'étude de Li et al. (2007). « *Des simulations numériques de déforestation et de surpâturage ont été menées sur les bassins du Niger et du Lac Tchad avec un modèle d'écosystème terrestre (IBIS, integrated biosphere simulator) et un modèle de transport hydrologique (THMB, terrestrial hydrology model with biogeochemistry) ? L'étude montre comment les changements d'usage des sols affectent les régimes hydrologiques à l'échelle des bassins versants. Les résultats sont que les forêts tropicales, situées dans les zones de plus forte pluviométrie, ont une forte influence sur l'évapotranspiration ; elles ont un impact disproportionné sur le bilan de l'eau du bassin entier. Ainsi, un déboisement total fait passer le coefficient d'écoulement simulé de 0.15 à 0.44, augmentant l'écoulement annuel de 35 à 65%, en fonction de la localisation dans le bassin, même si la forêt n'occupe qu'une petite proportion du bassin total (moins de 5%) ? Un surpâturage qui enlèverait tous les pâturages et tous les arbres de la savane, formations qui occupent la très grande majorité de la surface des bassins, provoque un accroissement du volume annuel total écoulé simulé de 33 à 91%. Les simulations numériques indiquent que la réponse hydrologique au changement progressif d'usage des sols n'est pas linéaire et qu'elle présente des effets de seuil. Il n'y a pas d'impact significatif sur l'écoulement des eaux et les débits des cours d'eau quand le déboisement touche moins de 50% de l'aire du bassin-versant, ou quand le surpâturage concerne moins de 70% de la surface en savane, ou moins de 80% dans les zones de pâturages. Cependant, l'écoulement des eaux augmente dramatiquement lorsque les changements d'usage dépassent les caps cités ci-dessus. Cet effet de seuil est le résultat combiné de la non-linéarité des réponses séparées de*

la transpiration et de l'évaporation du sol et de la canopée au changement d'usage des sols imposé ». (Li et al., 2007)

Dans la basse vallée du Niger, au Nigeria

Le Niger à sa confluence avec la Bénoué a une hydraulité bien plus faible que celle-ci. Mais pour l'ensemble du bassin, incluant cette fois cet affluent qui apporte deux fois plus d'eau que le Niger amont, on a pu déterminer que très classiquement, c'est la quantité d'eau tombée qui permet le mieux d'expliquer et prédire les débits (Itiveh et al., 2008). *« On a utilisé les données de pluie des hauts bassins pour reconstituer les débits à la station de Lokoja (confluence du Niger et de la Bénoué) au Nigeria, dont la série est très discontinue ; on s'est aussi appuyé sur les données bien plus complètes de la station amont de Gaya (à la frontière du Niger) ; cela a permis de reconstituer les débits à Lokoja de 1951 à 2000. Les données reconstituées sont en cohérence avec les données observées. Malgré la construction des barrages en amont (entre Gaya et Lokoja, au Nigeria) durant la période considérée, on observe que le principal déterminant des débits à l'entrée du delta du Niger est la pluie tombée dans le bassin. Cela nous a permis de prédire les débits à partir des prévisions de pluviométrie jusqu'en 2070 à partir des prévisions des scénarios de changement climatique. Malgré les incertitudes sur l'évolution climatique (la plupart des modèles prédisent une augmentation des précipitations), les débits reconstitués permettent aussi de prévoir les modifications du chenal du lit du Niger, telles qu'elles sont observées depuis les années 1990, en lien avec l'augmentation des débits* ». (Itiveh et al., 2008).

Retour au Fouta Djallon !

Enfin, on résume ci après des travaux déjà anciens, mais pleins d'enseignements, sur le Fouta Djallon. Les deux études citées ci-dessous convergent pour indiquer que contrairement à ce qu'on lit souvent, les montagnes de Guinée ne sont pas en voie de déboisement ou de dégradation rapide. Même si la première, basée sur des travaux de terrain, est assez ancienne (André et Pestaña, 2002) elle est corroborée par ce qu'on observe sur Google Earth ® et par l'étude plus récente (Ruelland et al., 2008) réalisée par télédétection.

« Le Fouta Djallon est réputé pour ses fortes densités démographiques. En effet, sur les hauts plateaux, des chiffres de 100 habitants au km² sont régulièrement avancés. Parmi les plus élevés de Guinée, ils sont mis en relation avec un système de production agro-pastoral jugé consommateur d'espace et font craindre, depuis la période coloniale, l'existence d'une surpopulation inquiétante mais jamais clairement démontrée » (André et Pestaña, 2002). *« Le Fouta Djallon fait l'objet de discours récurrents, communs à de nombreuses régions d'Afrique, sur la dégradation du milieu. Les pratiques des pasteurs et agriculteurs sont jugées unanimement, comme responsables de la destruction des ressources. L'existence d'un cercle vicieux de dégradation de l'environnement lié à une pression démographique trop forte et incontrôlée est donc depuis longtemps admis sans réserve, et utilisé par la plupart des intervenants »* (André et Pestaña, 2002). *« C'est la fonction même de « château d'eau de l'Afrique de l'Ouest » qui serait directement en péril. Les conséquences pourraient s'avérer dramatiques, comme l'illustre une allocution du Ministre de l'Agriculture, de l'Elevage et de la Forêt, lors du séminaire sur le programme régional d'aménagement des bassins versants du Haut Niger et de la Haute Gambie, à Conakry, en 1995 : « quand un arbre brûle au Fouta-Djalo, c'est le taux de carbone qui augmente dans l'atmosphère, c'est un affluent du Niger ou de la Gambie qui verra son écoulement perturbé, c'est Tombouctou qui manquera d'eau en fin de saison sèche ». Ainsi les avis sont-ils unanimes, soutenant l'impérieuse nécessité d'intervenir pour « restaurer » ou « protéger » le massif du Fouta-Djallon. De nombreux projets poursuivant*

cette seule fin ont donc été mis en œuvre dont le plus important d'envergure régional « Restauration et protection du massif du Fouta-Djalou » initiée par l'OUA en 1979 » (André et Pestaña, 2002). « L'hypothèse d'un environnement menacé, déchu même, reposait sur un scénario associant pratiques culturelles traditionnelles prédatrices et pression démographique exagérée. Les conséquences annoncées et souvent décrites comme avérées – elles hantent les représentations courantes du Fouta, étaient et sont toutes plus catastrophistes les unes que les autres : disparition du couvert arboré, réduction des temps de jachère, érosion incontrôlée, stérilisation des terres, jusqu'au pronostic d'une désertification ». (André et Pestaña, 2002). Pourtant, « un certain nombre de principes et de mécanismes, considérés comme acquis et responsables d'une dégradation du milieu semblent loin d'être aussi effectifs que l'on veut bien le laisser croire. La campagne de Pita est sur ce point des plus représentatives. Localisée en un des points réputés les plus en danger du Fouta, elle combine un certain dépeuplement à des temps de jachère en stagnation ou même en augmentation. Quant à Ouré-Kaba, s'il y existe certes des défrichements, la disponibilité en terre autorise des rotations permettant une reconstitution correcte du couvert arboré » (André et Pestaña, 2002). Sur les hauts plateaux, le paysage agraire est un paysage construit, comme on le voit bien sur les images Google Earth ® et comme décrit par les auteurs (André et Pestaña, 2002) ; les villages sont installés dans un terroir déjà ancien, constitué des « tapades » (enclos familiaux de cultures intensives, champs des femmes) (figure 10) qui sont entourés par des champs extérieurs (ngoussa, cultivés par les hommes), jachères et pâturages. « C'est la persistance des idées reçues, des simplifications et des généralisations hâtives, et, parfois, la transcription locale de dogmes planétaires qui engendrent l'incompréhension des sociétés rurales, de leurs stratégies, de leurs capacités... et de leurs véritables problèmes. Le décalage entre ces représentations figées, ces postulats trompeurs peu ou pas remis en cause, et la réalité, est à l'origine d'une longue litanie d'échecs ou de demi-succès des opérations de développement. Si la connaissance des campagnes du Fouta-Djalou doit encore progresser afin de nuancer des schémas trompeurs, cette nouvelle vision doit être intégrée par des opérateurs dont les logiques internes et les modes opératoires s'accommodent mal de la diversité et de la nuance » (André et Pestaña, 2002).

Ces observations issues d'un gros travail de terrain sont corroborées par l'imagerie satellitaire (y compris comme mentionné ci-dessus par Google Earth ® ; voir figure 15 ci-dessous). « Les changements résultant [des changements d'usage des sols et climatique] sont caractérisés par une tendance modérée à la déforestation et un accroissement correspondant des sols nus, des zones avec végétation éclaircie et des brousses » (Ruelland *et al.* 2008). Ces auteurs ont montré que dans le bassin du Niger à Koulikoro (120000 km²), le taux de couverture forestière est passé de 48 à 44% de 1975 à 2000 ; sachant qu'une partie conséquente du reste est constituée de brousses et jachères. On note une forte exploitation de charbonnage (figure 16), et aussi un certain appauvrissement des écosystèmes lié au passage fréquent des feux de brousse (figure 17). Les débits des cours d'eau constituant le haut Niger ne paraissent pas avoir été modifiés par les changements d'occupation des sols, encore modérés pour influencer notablement le régime d'infiltration et de ruissellement des eaux, C'est aussi la conclusion d'un rapport rendu à la représentation de l'IRD en décembre 2013 comme conclusion d'une mission réalisée dans le haut bassin du Niger. (Descroix, 2013). Cette impression confirmait celle glanée en 1986 dans le cœur du Fouta (haut bassin de la Gambie) par l'auteur lors de deux missions réalisées au printemps 1986. Toutefois, une évolution se dessine et on observe, ces dernières décennies une évolution statistiquement significative des coefficients de tarissement de ces cours d'eau.

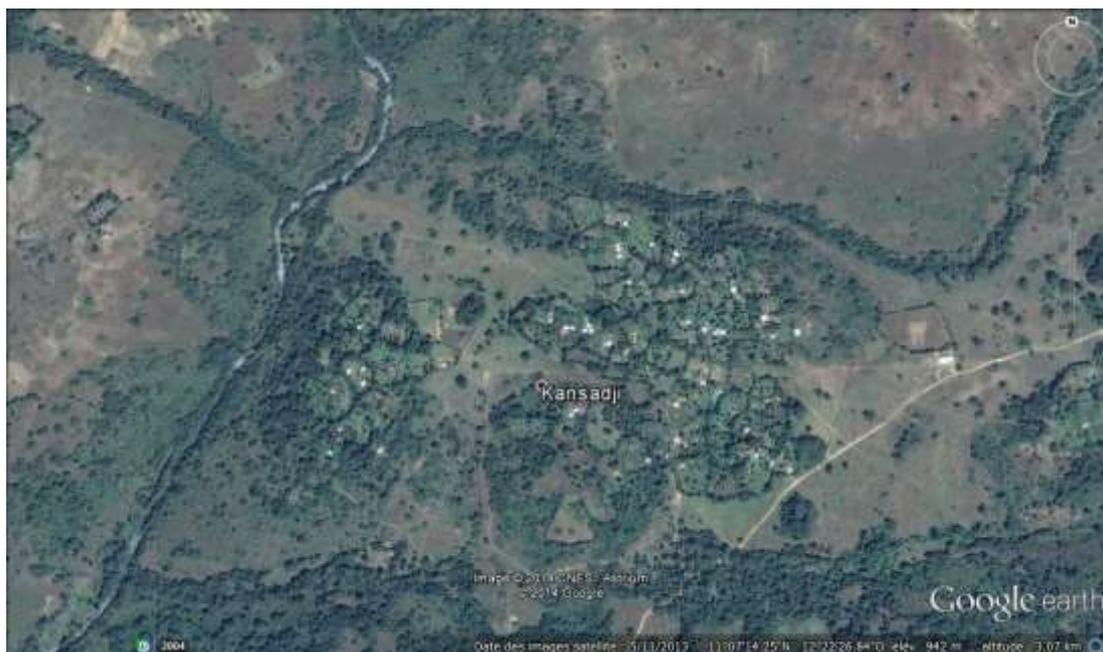


Figure 15 : image satellite (Google Earth ®) de la région de Kansadji, près de Pita, plateaux centraux du Fouta Djallon, altitude proche de 1000 m, densité rurale de plus de 100 habitants/km²



Figure 16 : fabrication de charbon de bois dans le haut bassin de la Gambie

Une baisse observée des coefficients de tarissement

Les montagnes de Guinée, c'est-à-dire le Fouta Djallon et la Dorsale Guinéenne, sont la source des plus grands cours d'eau ouest-africains : Niger, Sénégal, Gambie, Corouba, Konkouré, et bien d'autres cours d'eau s'écoulant vers le sud. 90 à 95% des débits des trois premiers, qui sont les principaux fleuves de la bande soudano-sahélienne, proviennent de ces montagnes. Les débits et les coefficients d'écoulement ont été impactés par la longue période de déficit

pluviométrique des années 1968-1995 (voir la figure 12 ci-dessus). Toutefois, les débits ont résisté quelques années après le début de la sécheresse, avant de décliner du fait de la persistance des déficits.

On a aussi constaté une augmentation significative des coefficients de tarissement des hauts bassins des affluents du Niger (figure 18), ceux qui ont mis le plus de temps à réagir à la sécheresse, donc, ceux qui avaient le plus grand volume d'eau stockée naturellement. Cela rejoint des observations déjà anciennes de Bamba *et al.* (1996). Le coefficient de tarissement s'exprime, suivant la loi de Maillet (1905) citée par Tallaksen (1995) de la façon suivante :

$Q_t = Q_0 \cdot e^{-\alpha \cdot t}$ avec Q_t = débit au moment t , Q_0 = débit initial au début de la décrue, α = indice de récession. Cet indice est adimensionnel et il se définit comme : $\alpha = - \ln(Q_t/Q_0)/t$



Figure 17 : clairière dans la forêt claire (route Kourémalé-Bamako) ; feux de brousse fréquents au début de la saison sèche

Comme le montre la figure 1 du chapitre 1, le « château d'eau » guinéen porte mal son nom, et n'a jamais été un véritable « château d'eau », encore moins si on se réfère au Fouta Djallon : celui-ci est un horst granitique. La capacité de rétention en eau du massif de socle n'est clairement pas le fait du granit. Elle est surtout liée à la présence des quelques 8000 zones humides, en général de petite taille, dont les écoulements et la vidange partielle annuelle soutiennent les étiages annuels et ont soutenu les étiages des grands fleuves durant cinq à dix ans au début de la sécheresse, avant que ceux-ci ne déclinent sévèrement. Ces mêmes zones humides tardent à se remplir, depuis le retour observé des pluies à la fin du 20^{ème} siècle. De ce fait, les hauts bassins n'ont pas encore retrouvé, au début des années 2010 (dernières années

connues d'observation dans ces bassins de moins en moins équipés) leurs débits d'avant les années excédentaires 1950-1967 (Descroix *et al.*, 2018a).

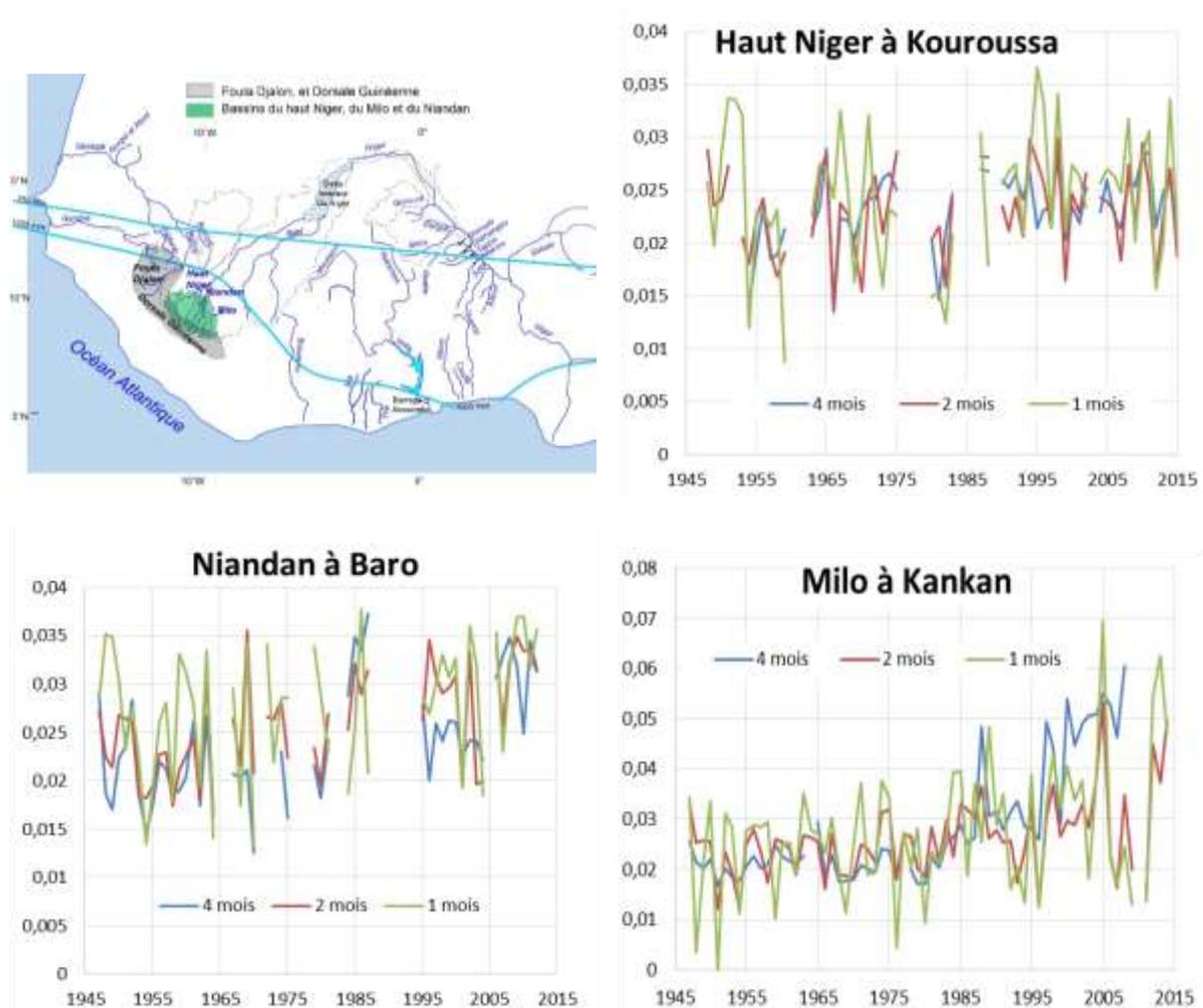


Figure 18. Evolution des coefficients de tarissement dans les bassins des trois sous-affluents principaux du Haut Niger

Une différence apparaît entre deux types de comportements hydrologiques des hauts bassins (Descroix *et al.*, 2018b). Les hauts bassins de la Gambie et du Niger ont des coefficients d'écoulement légèrement supérieurs à ceux du Haut Niger ; à l'inverse, ces derniers ont mis 10 à 12 ans avant de montrer un déclin des débits après la rupture pluviométrique de 1967. Le Bafing a connu son break hydrologique six ans seulement après la forte baisse des pluies après 1967, la Gambie cinq ans après. De fait, le haut bassin du Niger, adossée au versant nord de la dorsale guinéenne, est caractérisé par des pentes plus faibles et des sols plus profonds ; alors que le Bafing et la haute Gambie sont plus escarpés et les sols y sont plus souvent des lithosols, les affleurements de granit et les inselbergs y étant bien plus nombreux et étendus qu'à l'est, dans le haut bassin du Niger.

Conclusion

En résumé d'un article sur le haut bassin du Niger, Ferry *et al.* (2012), annoncent : « Plus sûrement encore qu'au changement climatique, la gestion de la ressource en eau sur le fleuve

Niger va devoir faire face à des défis majeurs dans un avenir très proche, en lien avec une croissance de la population en Afrique noire, la plus importante qui soit au niveau mondial, multipliant les besoins en eau d'irrigation, en eau potable, en énergie hydroélectrique. Si les grands aménagements hydrauliques (barrages) ont des effets assez bien connus, d'ailleurs ambivalents (écrêtement des crues, soutien des étiages), l'impact des petits aménagements, beaucoup plus nombreux, notamment sur le sous-bassin du Bani, n'a pas été jusqu'à ce jour étudié. L'heure devrait donc être à la mise en place d'observatoires scientifiques permettant de hiérarchiser les facteurs conditionnels d'une évolution des écoulements dans les prochaines années ».

Dans une étude plus récente (Ferry *et al.*, 2015) où ils décrivent un mode de gestion des eaux original des cours d'eau issus des montagnes de Guinée, ces mêmes auteurs, en se fondant sur l'exemple de la grande mare de Baro sur le Haut Niger en Guinée (mais le haut Sénégal et la Haute Gambie pourraient aussi être concernés), concluent qu'Homme et Climat pourraient se conjuguer dans les prochaines années pour modifier profondément les conditions permettant un mode de gestion typique de zones peu densément peuplées, des conditions donc en grande partie caduques ; ils entrevoient en effet des facteurs d'incertitude :

« • *d'origine climatique d'une part : lié au gradient pluviométrique, qui se traduit en direction du Nord et du Mali par une moindre alimentation en eau des mares par les précipitations et le ruissellement, et aussi au changement climatique en cours ; la taille des bassins versants contributeurs interfère aussi avec le facteur pluviométrique.*

• *d'origine anthropique d'autre part : de ce point de vue, la relation nature-sociétés autour des mares du Niger supérieur est encore marquée à l'évidence par la faible densité de population et d'occupation du sol, qui préserve leur maintien. Mais la croissance inéluctable des activités agricoles sur les versants comme au plus près des cours d'eau contribueront probablement à leur comblement partiel par sédimentation. »*

Cet avis est pertinent même s'il néglige le fait que ce sont souvent les zones les plus densément peuplées qui montrent les agrosystèmes les plus résilients (Boserup, 1965 ; Tiffen *et al.*, 1994 ; Demont et Jouve, 1999 ; André et Pestaña, 2002).

En résumé,

- Le granite et autres roches du socle sont de piètres réservoirs naturels pour l'eau, celle-ci ne pouvant se stocker que dans les altérites ; les montagnes de Guinée ne devraient donc pas être le « château d'eau » que l'on cite dans les manuels scolaires

- Pourtant, les débits des cours d'eau se maintiennent de longs mois après la fin des pluies, permettant même à un grand nombre de rivières d'être pérennes dans les hauteurs de Guinée : à défaut d'aquifères véritables, elles sont alimentées par un très grand nombre de « zones humides » qui se vidangent peu à peu durant la saison sèche

- Ces « sources », en fait des bas fonds humides, sont à préserver à tout prix si l'on souhaite maintenir la capacité des montagnes de Guinée à alimenter en permanence le Sahel aride et semi-aride, à travers en particulier les trois grands cours d'eau que sont la Gambie, le Sénégal et le Niger

Chapitre 3 – Le paradoxe du Sahel ou les paradoxes du Sahel ?

*« Ces bassins de surfaces intermédiaires remplacent finalement sous l'influence de la sécheresse les excédents d'écoulement de leurs parties amont par des baisses significatives et continues de l'hydraulicité de leurs exutoires qui constituent les grands bassins fluviaux. A cette échelle de superficie de bassin versant correspond donc la discontinuité structurelle ou conceptuelle majeure de la liaison entre la précipitation et l'écoulement »
(Pouyaud, 1987)*

L'expression « paradoxe du Sahel » ou « paradoxe hydrologique du Sahel » est bien plus récente que sa première observation au milieu des années 1980 ; a priori c'est Jean Albergel, hydrologue à l'IRD, qui, en procédant aux observations hydrologiques pour sa thèse sur les bassins expérimentaux du Burkina Faso, s'est rendu compte que les bassins situés dans la zone sahélienne du pays avaient vu leurs débits augmenter sensiblement après le début de la sécheresse en 1968. Il a de suite relié cela à la forte rétraction de la couverture végétale observée durant ces années-là. Cette rétraction est, elle, liée à deux facteurs : la sécheresse elle-même, qui a entraîné la mort de nombreux ligneux, et l'accélération des prélèvements végétaux du fait de l'augmentation restée élevée de la population (augmentation de la consommation de bois domestique, pour la cuisine et la construction, défrichement et déboisement pour accroître le domaine cultivé, en particulier). *« Toutefois au Laboratoire d'Hydrologie de Montpellier, les discussions sur le sujet avaient conclu que cette augmentation du coefficient de ruissellement restait localisée à de petites surfaces en tête de bassin, et que dès que la surface des bassins atteignait une taille supérieure, cette augmentation de ruissellement s'effaçait devant un phénomène plus important qui était la diminution des écoulements liés à la baisse des pluies depuis la sécheresse. Il n'était donc pas envisagé que ce phénomène dépasse l'échelle très locale et personne n'avait cherché si ce signal était visible sur de plus grands bassins »* (comptes rendus de Gil Mahé).

Bien plus tard, les hydrogéologues de l'IRD ont mis le doigt sur une des conséquences de cet accroissement des écoulements, observée dans les secteurs endoréiques du degré carré de Niamey (DCN), à savoir la hausse du niveau de la nappe souterraine du Continental Terminal 3 (CT3). Leur explication d'alors (Leduc *et al.*, 1997), a été confirmée depuis par de nombreux travaux et ce de différentes manières (voir bibliographie dans Leblanc *et al.*, 2008 en particulier). En effet, l'augmentation forte des écoulements s'est traduite, dans les secteurs endoréiques, par un accroissement important du volume des mares, de leur surface et de leur durée en eau. Or ce sont ces mares qui sont les principales zones de recharge des eaux souterraines. Donc mécaniquement leur accroissement a accru très sensiblement le volume de la recharge annuelle, entraînant une remontée du toit de la nappe. Au cœur de la dépression piézométrique de Dantiandou, dans la zone endoréique de l'ouest du bassin sédimentaire des Iullemeden, la nappe est remontée de 4 mètres depuis 1980, avec une vitesse de remontée croissante avec le temps. Ce sont ces auteurs (Leduc *et al.*, 1997) qui ont les premiers utilisé le terme de « paradoxe », la hausse de la nappe intervenant au moment le plus aigu de la sécheresse qu'a connue l'Afrique de l'Ouest après 1968. Ils ont parlé du « paradoxe de Niamey », leurs observations se portant

seulement sur cette région. Nous avons pu, mais bien trop brièvement durant le programme AMMA, suivre cette évolution sur une plus grande partie du bassin sédimentaire des Iullemeden et on a pu montrer que cette hausse concernait peut être une grande partie de cet ensemble géologique, essentiellement constitué de bassins endoréiques (voir encart à la fin du chapitre 6). Ceci a été confirmé plus récemment (Favreau *et al.*, 2012).

Ce n'est que durant ce programme AMMA que l'expression « **paradoxe hydrologique du Sahel** » a été utilisée par les hydrologues qui constatèrent que la hausse des débits concernait l'ensemble de la zone sahélienne et aussi, de plus en plus, le nord de la zone soudanienne. (voir figure 4 chapitre 1).

Il faut du reste, à ce sujet, faire preuve d'une grande prudence. En effet, tous les bassins équipés de la zone sahélienne, absolument tous sans exception, ont connu une hausse (souvent très forte) des débits dès les premières années de sécheresse. Mais comme le montre très bien la figure 4 chapitre 1, l'ensemble de ces bassins instrumentés est loin de couvrir l'ensemble de la zone sahélienne ; en effet, de nombreux secteurs sont endoréiques, comme on l'a vu, en particulier les bassins sédimentaires, et par ailleurs, de nombreux cours d'eau ne sont pas observés, ou ne sont plus observés depuis la réduction drastique des observations, constatée suite aux plans d'ajustement structurels imposés aux pays du Sud par les institutions « libérales » de Washington.

Donc, il faut garder grande prudence et humilité concernant l'extension de ce paradoxe à l'ensemble du Sahel ; il faudrait par prudence à chaque fois évoquer le Sahel « observé », ce qui représente néanmoins un nombre assez important de cours d'eau répartis tout le long de la bande sahélienne, en Mauritanie, au Burkina-Faso, au Niger, et dans une moindre mesure aussi dans le Nord du Cameroun et du Nigeria (Mahé et Paturel, 2009 ; Mahé *et al.*, 2013).

Le contexte

Les plus grands cours d'eau d'Afrique de l'Ouest (Sénégal, Gambie, Niger, Volta, Chari entre autres) ont connu une diminution attendue de leur débit après le début de la sécheresse (1968) et en lien avec celle-ci ; pour la période 1970-2000, la baisse des débits moyens des plus grands cours d'eau, à savoir le Sénégal et le Niger, est deux fois plus forte que la baisse des précipitations (Figure 1 ci-dessous et figure 5 chapitre 1) (Olivry, 2002). Une tendance similaire est observée pour de plus petits bassins, alors que, au contraire, d'autres études, comme on l'a vu en introduction, mettent en évidence un accroissement des écoulements dans les bassins sahéliens (Albergel, 1987) (figure 2). A la suite des observations d'Albergel, Amani et Nguetora (2002) ont remarqué que dans le bassin du Niger à Niamey, dans les années récentes depuis 1980, la contribution des sous bassins sahéliens à l'écoulement et à la crue annuelle était en forte croissance. Mahé *et al.* (2003) ont observé une hausse des écoulements de quelques affluents de rive droite du Niger, au Mali, au Burkina Faso et au Niger ; ils ont aussi déterminé que cette crue commençait un mois plus tôt dans les années 1980 que dans les années 1960. Mahé *et al.* (2005) ont également mis en évidence un accroissement des débits du Nakambé, le plus grand affluent sahélien de la Volta. Mahé et Paturel (2009) ont montré aussi une hausse des débits et des coefficients d'écoulement dans les bassins du Gorgol Noir et du Gorgol Blanc dans l'ouest du Sahel (Mauritanie). Ceci a aussi été observé au sud du Sahel, dans le bassin du Sokoto à cheval sur le Niger et le Nigeria (Mahé *et al.*, 2011). Il semble que l'essentiel du Sahel soit concerné par ce « paradoxe sahélien ». Amogu *et al.* (2010) ont proposé une régionalisation des processus hydrologiques, mettant en exergue une vaste opposition entre les régions soudanienne dans lesquelles les écoulements ont fortement diminué, et les zones sahéliennes (et pour les années les plus récentes, les zones nord-soudanienne) où les débits ont très nettement augmenté.

Le fleuve Niger moyen (en aval du delta intérieur, figures 6 et 7 du chapitre 1) a toujours eu deux crues. La première, dite « crue locale » (ou crue rouge, elle doit sa couleur à sa forte charge solide venant de sols latéritiques), intervient en général pendant les mois d'août à septembre. Elle résulte des apports de plusieurs affluents dans cette partie du fleuve, dont principalement les affluents de la rive droite en amont de Niamey (Gorouol, Dargol et Sirba), qui prennent leur source au Burkina Faso. La superposition des eaux de crue de ces cours d'eau aux régimes torrentiels à celles du cours principal du Niger conduit à une évolution de l'hydrogramme en dents de scie, au gré des précipitations locales. Mais les hydrogrammes décennaux montrent une montée progressive vers les plus hautes eaux de la seconde crue. La seconde crue, beaucoup plus importante en volume et à pointe unique, est appelée « crue guinéenne » (ou crue noire). Elle résulte de l'arrivée des eaux provenant de la partie amont du bassin du fleuve (Guinée et Mali) et se produit au cours de la période allant de novembre à mars (Sighomnou *et al.*, 2013). Au moment de la crue d'août 2012, venait de paraître un article sur la crue de 2010, qui était déjà la plus forte « crue rouge » jamais observée depuis 1929 et le début des enregistrements à la station de Niamey (Descroix *et al.*, 2012b). Elle appartient à un nouveau type de crues lié aux changements de régime des cours d'eau et se produisant lors d'années pluviométriques moyennes. On a pu montrer que les changements d'occupation des sols en étaient en grande partie responsables (Amogu *et al.*, 2015) Le risque de crue a de plus fait l'objet de publications récentes, que ce soit sur le Sahel (Tarhule, 2005 ; Di Baldassarre *et al.*, 2010) ou dans les zones soudaniennes (Tschakert *et al.*, 2010) ou l'ensemble de la sous-région (Aich *et al.*, 2016) Les scientifiques ont été alertés par l'étendue et la durée des inondations de la mousson 2007, qui ont touché la zone soudanienne, le nord du Togo et du Ghana et le sud du Burkina Faso (Tschakert *et al.*, 2010). On a observé ensuite, le 1^{er} septembre 2009, deux épisodes indépendants mais tout aussi dramatiques. Le matin, la ville de Ouagadougou a été inondée par une pluie de plus de 250 mm en quelques heures, ce qui représenterait un épisode d'un temps de retour de 10 000 ans environ (Karambiri, 2009). Ce même jour, mais l'après-midi, un grain totalement indépendant du premier a provoqué une crue importante de l'oued Teloua, qui a rompu sa digue en amont de la ville d'Agadès et repris un ancien lit, au cœur de la ville. Là aussi, les dégâts humains et matériels ont été énormes (Sighomnou *et al.*, 2013). Dakar a également été touchée fin août 2012 par un épisode qui y a provoqué des inondations dues à la seule pluie (pas de cours d'eau en cause), comme à Ouagadougou en 2009. Les 157 mm tombés le 26 août 2012 ont provoqué des inondations dans les quartiers nord récemment lotis et visiblement mal drainés.

La mousson de 2012 est du reste remarquable par le nombre d'inondations relevées en Afrique de l'Ouest, du Sénégal au lac Tchad. Partout le risque de crue est en augmentation. La crue du Niger moyen cette année-là (Sighomnou *et al.*, 2013) a provoqué des dégâts considérables).

On remarque que la crue du Niger est de plus en plus précoce et de plus en plus prononcée. Nous ne parlerons ici que de la crue locale qui présente un caractère exceptionnel en 2012. Il faut rappeler que l'influence de l'amont sur la crue locale est généralement très limitée, le débit du Niger en amont du confluent du Gorouol étant très faible durant la mousson. Les hydrogrammes moyens des deux décennies sèches (les années 1970 et 1980) montrent que la seconde crue (guinéenne) était alors bien moins importante que durant la période antérieure ; les deux crues (locale et guinéenne) étaient alors reliées sans rupture (figure 6 chapitre 1) sur l'hydrogramme décennal. Le pic de la crue guinéenne se produisait alors plutôt mi-décembre, et la décrue arrivait au moins deux mois plus tôt que durant les décennies humides (1950 à 1968). Durant les deux dernières décennies (1991 à 2010), la crue principale a eu à peu près le même comportement, confirmant la persistance d'un sévère déficit pluviométrique dans l'ouest des zones sahéliennes et soudaniennes, où se forme l'essentiel des débits. La décrue reste bien plus rapide que durant les décennies humides. En revanche, la première crue (crue locale ou crue rouge) est, durant cette dernière période, bien plus marquée que durant les périodes

antérieures. Elle est en train de devenir une crue distincte et indépendante, plus brutale et plus précoce (voir figure 14, ci-dessous), surtout dans la dernière décennie (2001 à 2010). Les hydrogrammes annuels pour les crues les plus marquantes montrent une avancée de la crue, plus précoce de 40 jours de nos jours qu'il y a 40 ans, et donnent une idée de la grande variabilité interannuelle, gommée dans les courbes par décennie de la [figure 6, chapitre 1](#).

Du fait du contexte géologique (Figure 2), on observe deux types de comportements hydrologiques différents, entre zones de socle et bassins sédimentaires en Afrique de l'Ouest ; ces derniers sont souvent caractérisés par l'endoréisme.

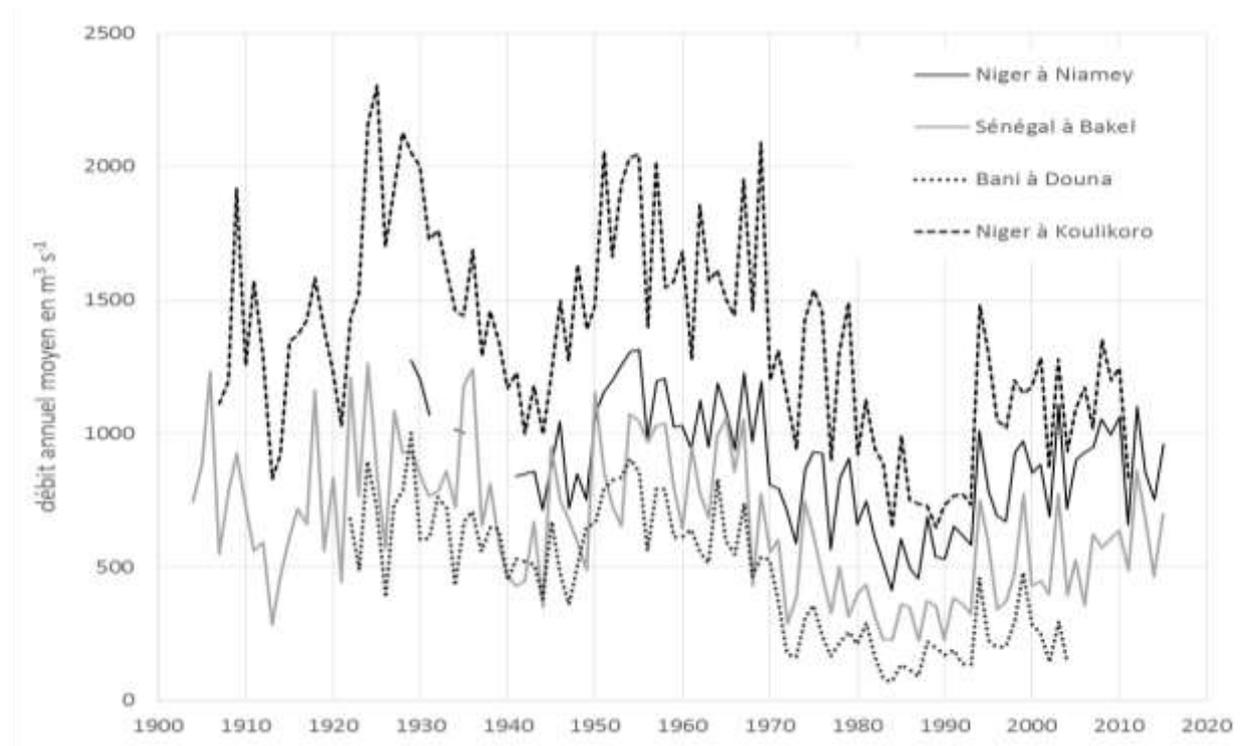


Fig. 1. L'effet de la grande sécheresse sur le débit des principaux cours d'eau Ouest Africains : un déclin général, mais plus prononcé que celui des précipitations, après 1968 ; on remarque que la baisse a été moindre à Niamey, en aval du (et grâce au ?) delta intérieur du Niger ; mais peut être aussi un effet du « paradoxe du Sahel » ?

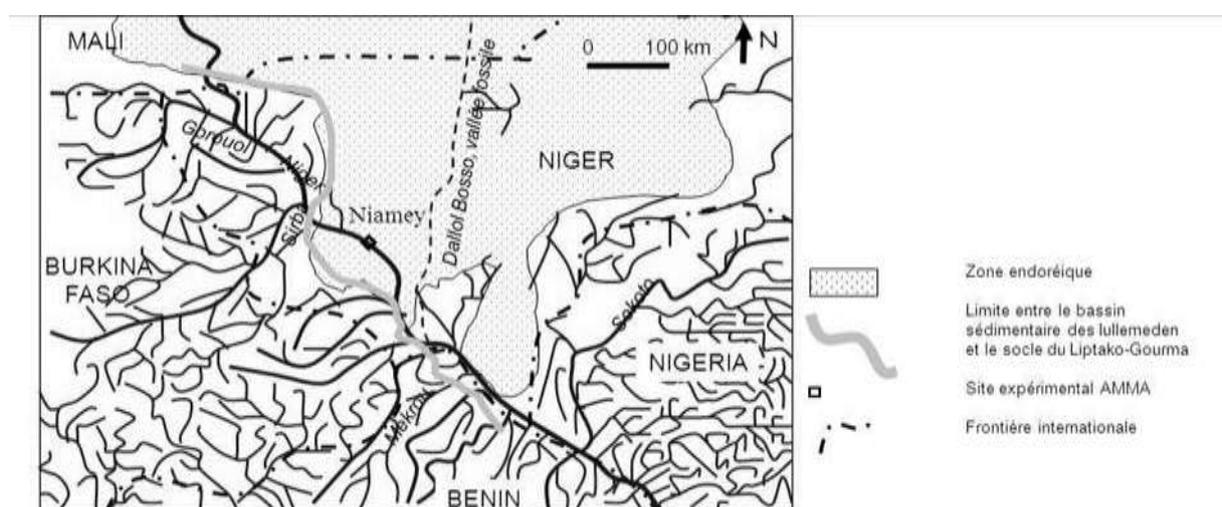


Figure 2 : Différence de comportement hydrologique entre les zones de socle du Liptako Gourma, à l'ouest, et le bassin sédimentaire des Iullemeden, à l'est

Le paradoxe hydrologique du Sahel

Jusqu'à la fin des années 1990, l'essentiel des apports d'eau au fleuve Niger entre Gao et le confluent du Sokoto (Nigeria) provenaient des affluents de rive droite. La rive gauche est en effet essentiellement endoréique, où l'accroissement des écoulements a également des conséquences hydrologiques : on observe une augmentation du nombre, du volume et de la durée en eau des mares, typiques et nombreuses des secteurs endoréiques (Bouzou Moussa *et al.*, 2009). Par ailleurs, comme on l'a vu ci-dessus, ces mares sont les principales zones de recharge de la nappe ; l'accroissement du ruissellement et du nombre de mares se traduit donc par une hausse du niveau des nappes dans la partie ouest du bassin des Iullemeden depuis le début de la sécheresse (Leduc *et al.*, 1997). Or, dans ce cas aussi, l'exhaussement du niveau de la nappe, dû à l'accroissement des écoulements, est lié aux changements d'usage des sols (Leblanc *et al.*, 2008) ; le « paradoxe de Niamey » est donc une conséquence du « paradoxe du Sahel ».

Comme le signalent très justement Tschakert *et al.* (2010), si la sécheresse est bien sûr le phénomène le plus cité quand on évoque le Sahel, « des inondations en zone aride » ne doivent pas (plus ?) être considérées comme un oxymore, et elles sont malheureusement mal connues, en dépit de leur multiplication ces dernières années.

La plupart des changements observés ces dernières décennies dans les caractéristiques du cycle de l'eau en Afrique de l'Ouest prennent leur source dans le long et fort épisode de sécheresse observé depuis 1968. Rappelons avec Hulme (2001) que cet événement est le plus fort signal du changement climatique jamais enregistré à la surface du globe depuis la normalisation des mesures météorologiques au milieu du 19^{ème} siècle. Pendant 25 à 30 ans, parfois plus, sur 4 à 5 millions de km², la pluviométrie a connu un déficit de 15 à 35%. On peut considérer à présent que cet épisode sec est clos, car depuis 1995 (1999 à l'ouest du Sahel), la pluviométrie annuelle a retrouvé son niveau et son irrégularité interannuelle de la période 1900-1950, les décennies 1951-1970 devant être considérées comme humides (voir chapitre 6). Cette sécheresse a fortement influencé la capacité de rétention en eau des sols sur des bassins versants entiers. Cependant, à l'instar de ce que pressentait Olivry dès les années 1990 (Olivry, synthèse, 2002), les travaux récents montrent que la variabilité spatio-temporelle des processus hydrologiques est bien mieux corrélée statistiquement avec les facteurs anthropiques qu'avec les facteurs climatiques (Mahé et Paturel, 2009, Descroix *et al.*, 2009). Aich *et al.*, (2015) estiment que les facteurs climatiques ont autant de responsabilité que les changements d'occupation des sols dans le développement du paradoxe du Sahel. Mais Panthou *et al* (2014) et Cassé (2015), Cassé *et al.* (2015a) ainsi que Cassé *et al* (2015b) insistent sur le rôle des changements dans le régime pluviométrique.

Ceci étant, comme dans tous les milieux, il vaut mieux évoquer une combinaison de facteurs naturels (changements climatiques) et humains (changements d'occupation des sols) pour expliquer ces processus qui impactent les ressources et surtout, qui pourraient avoir un effet rétro-actif, ce qui reste à démontrer ; la question scientifique en suspens serait : les changements d'occupation des sols peuvent-ils avoir un effet sur le climat local, régional, global ? Cette question fait l'objet de nombreuses recherches ces dernières années (Taylor *et al.*, 2011 ; Pellarin *et al.*, 2013, etc).

Comme on le verra au chapitre 6, les changements climatiques et anthropiques influencent et conditionnent deux comportements hydrologiques opposés suivant la région géo-climatique considérée :

- Dans les régions sahéliennes, l'amenuisement du couvert végétal, dont la réalité est remise en cause par le « regreening » (reverdissement), plus généralement observé ces dernières années et l'encroûtement des sols sur des étendues croissantes, causent une réduction drastique de la capacité de rétention en eau des sols, et provoquent une généralisation des ruissellements de type hortonien (Horton, 1933), ce qui explique la hausse généralisée des écoulements et des débits des cours d'eau en zone sahélienne (figure 2).
- Dans les régions soudano-guinéennes, le fonctionnement des versants restent de type « cappusien » (Cappus, 1960) ou « hewlettien » (Hewlett, 1961), la baisse des pluies se traduit donc avant tout par une baisse des écoulements, car on n'observe pas de changement dans la capacité de rétention en eau des sols et des bassins. C'est ce qui explique la forte baisse des débits des grands cours d'eau, dont l'essentiel des flux viennent de cette zone géo-climatique (figure 1).

On verra ci-dessous que le reverdissement observé dans une grande partie du Sahel ne se traduit pas encore, ces dernières années, par une diminution des écoulements que devrait provoquer l'accroissement de la capacité de rétention en eau de sols plus végétalisés. Mais on observe bien, sur la plupart des cours d'eau sahéliens (Mahé *et al.*, 2013 ; Descroix *et al.*, 2018b), des débits qui augmentent depuis le début de la sécheresse et continuent à croître avec le retour des pluies à leur moyenne long terme 1900-2015. Comme les pluies extrêmes n'ont pas encore dépassé en nombre et en volumes celles des années humides 1950-1967 (voir chapitre 6 et Descroix *et al.*, 2015), le facteur pluie ne peut pas être responsable de cette hausse des débits (multipliés par 4 au moins sur les affluents de rive droite du Niger) ; ou alors très partiellement, si, comme le montrent les derniers travaux de Panthou *et al.* (2018), une augmentation de l'intensité instantanée est effectivement observée ces dernières années.

L'occupation du sol est considérée comme une description de l'espace ; autrement dit c'est la couverture biophysique du sol (Lecerf, 2008 ; FAO, 2009 ; Fall, 2014) Les catégories biophysiques peuvent représenter la végétation, le bâti, les zones humides, les sols nus etc. en effet, elle est distincte de l'utilisation du sol ou *land use* qui correspond aux différentes activités menées par l'homme sur la couverture physique de la surface terrestre (Buard, 2013). (Mbagnick Faye, 2018 thèse, à citer)

Cependant, en terme hydrologique, le changement d'usage des sols et le changement d'occupation des sols jouent le même rôle : que la végétation disparaisse du fait de la sécheresse, du fait de la surexploitation ou du fait de la mise en culture, le résultat est le même : la diminution de la biomasse entraîne celle de la capacité de rétention en eau des sols et une augmentation des coefficients d'écoulement.

Le deuxième paradoxe du Sahel

Le reverdissement constaté dans l'ensemble de l'Afrique de l'Ouest dans les analyses fondées sur la télédétection aurait dû se traduire ou pourrait à terme se traduire par une augmentation de la capacité de rétention en eau des sols et des bassins. Or les débits continuent à augmenter, dans tout le Sahel, pastoral et cultivé. De nombreuses études (Prince *et al.*, 1998 ; Hountondji *et al.*, 2004, Hein et De Ridder, 2006, Prince *et al.*, 2007, Fensholt et Rasmussen, 2011 entre autres), et surtout une très bonne synthèse plus récente (Dardel *et al.*, 2014) ont fait avancer les connaissances sur le rôle de la Productivité Primaire Nette (PPN) et de l'efficacité de l'utilisation de l'eau de pluie (RUE, Rain Use Efficiency) dans le bilan hydrique et la vitesse de reconstitution des manteaux végétaux, herbacés et arborés ; les plus récentes études (Brandt

et al., 2016 et Brandt *et al.*, 2017) démontrent que les ligneux seraient en phase de croissance et de développement de la couverture au sol. Par contre, une toute dernière étude des mêmes auteurs (Brandt *et al.*, 2018) montre que pour les mêmes régions, cela ne se traduit pas par une fixation du carbone, et qu'on assisterait plutôt, malgré le reverdissement, à un destockage du carbone. Quoiqu'il en soit, l'accroissement continu des coefficients d'écoulement, témoin, d'une poursuite de la dégradation des terres, est en porte-à-faux avec le maintien des valeurs du RUE (Dardel *et al.*, 2014). C'est cette divergence entre deux indicateurs de résilience de l'écosystème (RUE stable) et de dégradation des sols (croissance du coefficient d'écoulement) qui a été défini comme le Deuxième Paradoxe du Sahel (Dardel *et al.*, 2014).

Dans les zones majoritairement cultivées du Sud Sahel, le retour, dans les années 1990, des pluies annuelles moyennes aux alentours de leur moyenne de long terme 1900-2015, et l'accroissement du nombre d'évènements pluvieux de fort montant journalier relevé ces toutes dernières décennies (surtout depuis le milieu de la décennie 2000-2010, voir Descroix *et al.*, 2015), n'a fait qu'accroître la surface des sols touchés par des coefficients de ruissellement très élevés du fait de l'encroûtement des sols ; ce dernier est lié à la destruction de la végétation par la sécheresse, à la mise en culture, à la diminution très rapide des jachères, parfois au défaut ou à l'insuffisance des sarclages. Dans l'ouest du bassin des Iullemeden au Niger (région à l'est de Niamey), les plateaux latéritiques occupent 20 à 25% du paysage (Descroix *et al.*, 2012). Les dépressions aux longs versants concaves ou rectilignes, de plus en plus encroûtés, occupent le reste. Quand la brousse tigrée disparaît, c'est donc tout l'espace qui devient ruisselant.

Dans les zones majoritairement pastorales (l'agriculture sèche est épisodique en dessous de 300 mm par an) du Nord Sahel, dans le Gourma Malien, Hiernaux *et al.* (2009), Gardelle *et al.* (2010), Dardel *et al.* (2014), Gal *et al.* (2016) ont montré que la hausse continue des débits et écoulements était due au comportement d'une fraction seulement du paysage : les zones plus escarpées en général, qui étaient couvertes de sols squelettiques, ont vite perdu leur végétation lors des deux phases de sécheresse prononcée des années 1972-73 et 1982-84 ; les sols ont alors été emportés par l'érosion hydrique et éolienne ; ces surfaces sont donc devenues très ruisselantes, et la disparition du sol y rend extrêmement lent le retour d'une quelconque végétation. Ce sont ces seules zones qui expliquent la très forte croissance des écoulements, qui entraîne une forte augmentation de la surface des mares. Dans le reste du paysage, en particulier les larges dépressions, dominantes en surface, on trouve des sols sableux profonds dont la végétation a fait preuve d'une bien meilleure résilience : le reverdissement y est très net, la productivité des écosystèmes en plein croissance. C'est le voisinage de zones majoritairement reverdiées et de zones moins étendues mais devenues très ruisselantes qui explique le second paramètre hydrologique du Sahel. Par ailleurs, on peut donc confirmer avec Gardelle *et al.* (2010) que la mise en culture de la savane ou de la steppe n'est pas le seul changement d'occupation des sols qui provoque une baisse de la capacité de rétention en eau des sols et un accroissement des écoulements.

Le socle : un château d'eau disparu ?

Les inondations sont de plus en plus fréquentes ces dernières années dans les régions sahéliennes du bassin Moyen du Niger (caractérisé par la présence des deux crues successives, « locale » et « guinéenne »). Ces inondations, contrairement à celles de 1968 et 1970 qui étaient jusque-là les références à Niamey, interviennent à présent durant l'hivernage, et elles ne concernent pas le haut bassin du Niger, suggérant qu'il s'agit bien d'inondations provenant des zones sahéliennes.

Du fait de l'absence d'écoulement provenant des zones endoréiques du bassin sédimentaire des Iullemeden, il est clair que les flux supplémentaires à l'origine de ces inondations sont

occasionnés par l'accroissement des coefficients d'écoulement des bassins exoréiques de la rive droite du Niger, qui reposent sur le massif granitique du Liptako-Gourma (figure 2).

L'analyse des séries de pluies et de débits décennaux sur les trois bassins affluents de rive droite du Niger sahélien (figure 3), durant la période de sécheresse et durant la phase postérieure de « récupération partielle » des pluies montre que (Figures 4, 5, 6, et 7) :

- les écoulements sont de plus en plus abondants ;
- les temps de réponse de plus en plus réduits sur les trois principaux affluents ;
- la crue est donc de plus en plus précoce et de plus en plus « pointue ».

Les causes de cette « accélération » de l'écoulement sont clairement à chercher du côté des changements d'occupation des sols, qui ont surtout conduit à une disparition des brousses naturelles et, dans les zones cultivées, à l'encroûtement des sols, menant à l'apparition de plages de sols nus de plus en plus étendues. D'autres facteurs, plus récents, comme l'accroissement du nombre d'évènements pluvieux à fort cumul pluviométrique en 24 h, sont à retenir également (voir chapitre 6).

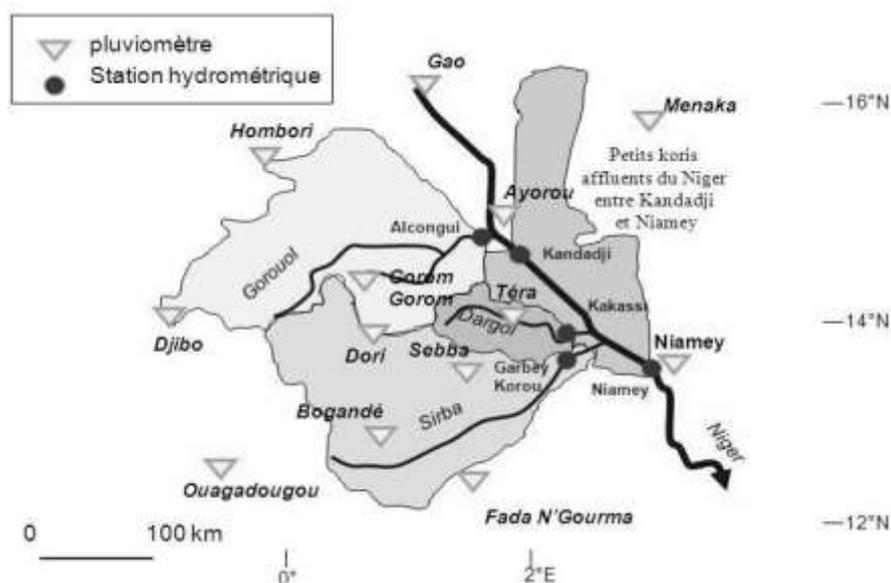


Figure 3. Les trois bassins affluents de rive droite du Niger Sahélien ; on a représenté aussi tel un quatrième bassin, l'ensemble du bassin compris entre les stations de Kandadji et Niamey et non inclus dans ces trois principaux bassins.

Toujours est-il que le massif granitique du Liptako Gourma semble avoir perdu une grande partie de sa capacité de rétention en eau et de ses services écosystémiques de régulation des eaux. Ceci est la cause première des inondations qui ont affecté la ville de Niamey en 2010, 2012 et 2013, 2016 et 2017, même si des causes locales comme l'ensablement du lit du fleuve, lié à la même perte de capacité de rétention en eau des sols, des terroirs et des bassins, a joué un rôle également, facilitant le débordement du fleuve dans sa plaine d'inondation. On verra plus bas que les cônes de déjection qui envahissent le lit du Niger dans son tronçon sahélien sont souvent liés à des ruptures d'endoréisme, elles mêmes occasionnées par la hausse des coefficients d'écoulement due à l'encroûtement des sols. Ensuite, l'importance des dégâts est bien sûr liée au fait que la plaine d'inondation, pourtant connue comme telle, avait été non pas « urbanisée » officiellement, mais notoirement construite et occupée.

Il faut à présent veiller à ce que cette dégradation de la capacité de rétention en eau des sols et des bassins ne s'accroisse pas dans le Fouta Djallon qui est le « château d'eau » de l'Afrique de l'Ouest (chapitre 2) et qui doit le rester, afin de préserver l'approvisionnement en eau des pays sahéliens durant la longue saison sèche. La diminution de cette capacité de rétention accroîtrait

fortement le risque d'étiage absolu comme celui d'inondation dans le cours sahélien du Niger, ainsi que dans les bassins du Sénégal et de la Gambie. Les régions de socle du Sahel central ont été déterminées comme étant exoréiques très majoritairement, au contraire des bassins sédimentaires très largement endoréiques (figure 2, et figure 1 du chapitre 1 (Cappelaere *et al.*, 2009).

On a vu au chapitre 2 le rôle de réservoir naturel joué par les hauteurs de Guinée (Fouta Djallon et Dorsale Guinéenne) qui sont un grand massif de socle. Le petit massif du Liptako Gourma se comporte au niveau hydrologique comme un château d'eau secondaire dans le bassin du moyen Niger ainsi que pour tout le haut bassin des Volta (Mouhoun et Nakambé en particulier), mais en zone sahélienne, avec une pluviométrie en dessous de 700 mm par an et une saison des pluies qui dure à peine plus de 3 mois. Contrairement au haut bassin où cette tendance est récente, (Descroix *et al.*, 2009 ; Descroix et al., 2018a), la capacité de rétention en eau de ce château d'eau a déjà très fortement diminué ces dernières décennies, expliquant des étiages et des crues bien plus marqués et surtout des débits bien plus importants qu'auparavant, malgré le déficit pluviométrique ; comme on a pu le supposer à l'avance, ce changement de comportement et de capacité de rétention est bien dû aux changements d'occupation des sols (Descroix *et al.*, 2012).

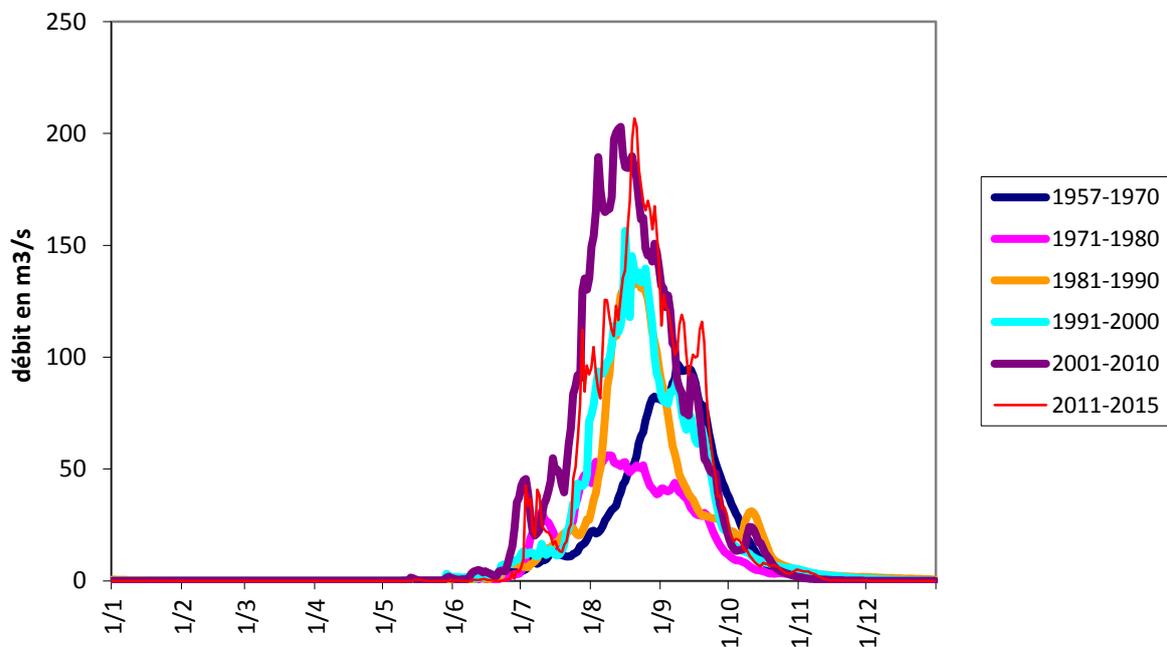


Figure 4. Hydrogrammes décennaux du Gorouol depuis le début des enregistrements (1957)

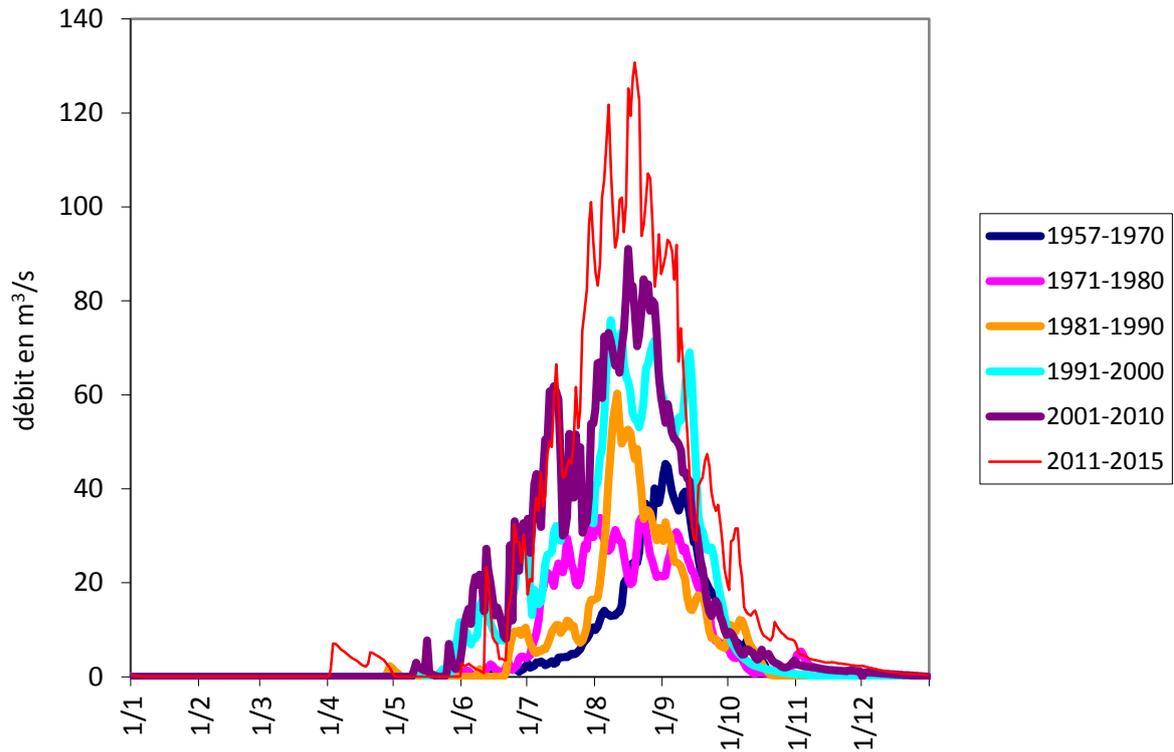


Figure 5. Hydrogrammes décennaux du Dargol depuis le début des enregistrements (1957)

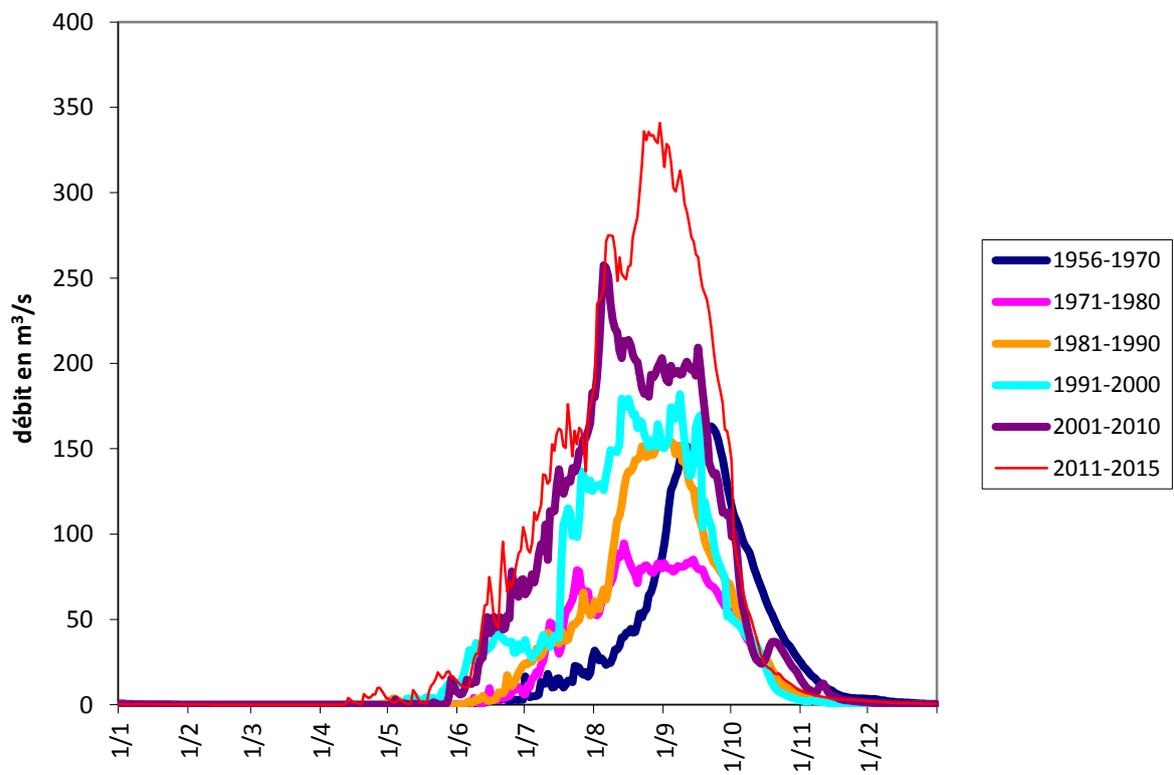


Figure 6. Hydrogrammes décennaux de la Sirba depuis le début des enregistrements (1956)

Comme on l'a vu plus haut (chapitre 2), les zones soudano-guinéennes ont un tout autre comportement hydrologique, de type « hewlettien » (Hewlett, 1961) ; c'est-à-dire que le ruissellement ne s'y observe que quand le sol est saturé ; comme les sols sont assez épais si on y inclut les zones d'altérites sous-jacentes, la diminution des précipitations après 1968 a principalement affecté la part de l'eau qui aurait dû ruisseler, ce qui explique que les écoulements ont diminué bien plus fortement que les précipitations (figure 1). Mahé (2009) a très bien décrit cette opposition en comparant le comportement du Nakambé, cours d'eau sahélien, avec celui du Bani, cours d'eau soudanien.

Toutefois il faut insister sur quatre processus importants :

- dans le nord des zones soudaniennes, l'évolution des débits suit un comportement proche de celui des zones sahéliennes ; cela est lié à l'apparition de plus en plus fréquente de zones de sols nus ou encroûtés, avec un défrichement rapide (Mahé *et al.*, 2003) suivant le même processus que dans les zones sahéliennes ;

- entre les zones sahélo-nord-soudaniennes et le château d'eau guinéen, on observe une zone dans laquelle les débits ont connu une très forte diminution à partir du début de la sécheresse, plus marquée encore que la baisse observée dans le Fouta Djallon. Cela peut s'expliquer par un maintien jusqu'aux périodes récentes de couverts végétaux denses dans cette zone où se concentrent les parcs nationaux, du Niokolo Koba jusqu'au W ; par ailleurs, cette zone a depuis longtemps été moins peuplée que les zones sahéliennes pourtant plus défavorisées, d'une part parce qu'elles étaient infestées par la trypanosomiase (partout) et l'onchocercose (dans les vallées), d'autre part parce qu'il est possible qu'elles aient constitué des zones de départ de populations enlevées par les traites négrières successives. Gazel (2018) évoque plus justement « *la mise en place du peuplement (sans doute à partir du néolithique) qui aurait produit deux cultures-civilisations : une pastorale au nord, une forestière au sud. Mais aussi une faiblesse séculaire du peuplement au centre, qui favorise les infections mentionnées et est concomitante de sociétés locales moins hiérarchisées politiquement (les anciens royaumes africains étaient plutôt au nord ou au sud de la zone) et moins aptes à se défendre ou à conquérir donc potentiellement victimes séculaires des multiples traites (transahariennes, transatlantiques et intra) (exploitation des mines d'or).* »

- dans ce contexte de processus hydrologiques ambivalents et très différents, la diminution des débits des grands cours d'eau régionaux, la Gambie, le Sénégal, le Niger, la Volta, le Chari (voir la figure 1 pour certains d'entre eux), s'explique comme suit : leurs sources principales sont dans le Fouta Djallon (pour la Gambie, le Sénégal et le Niger) ; la part de leur débit qui se forme dans la zone sahélienne demeurant très faible, même si elle est en forte croissance et même si cette zone sahélienne constitue la plus grande partie de leur bassin versant. L'accroissement des débits en zone sahélienne ne compense donc pas du tout la réduction très forte des débits (de plus de 50%) originaires des zones soudano-guinéennes. Comme on l'a vu le débit du Niger a été divisé par deux durant la seconde moitié du 20^{ème} siècle (Bricquet *et al.*, 1997; Olivry, 2002). Dans les montagnes de Guinée, ce sont les 8000 « zones humides » (voir chapitre 2) qui se sont vidées pour soutenir les étiages, dans toute cette zone (la zone guinéenne, de montagne comme de plaine, une grande partie de la zone soudanienne), c'est tout un ensemble de réservoirs « naturels », mares, sols, mais surtout nappes et nappes perchées, qui ont été vidées durant les premières années de la sécheresse, ce qui explique la longue baisse des débits, qui ont résisté quelques années grâce à ces apports, pour ensuite s'effondrer et ne se reconstituer que bien après la reprise des précipitations ; ce processus, et en particulier la baisse des nappes, est bien décrit pour le Bani (Mahé, 2009).

- La hausse du niveau de la nappe phréatique observée dans certaines zones endoréiques telles que le degré carré de Niamey (Leduc *et al.*, 1997) a été récemment accélérée par l'infiltration de l'eau dans de nouvelles formations liées à la phase d'érosion active en cours : ravines, cônes de déjection et zones d'épandage constituent de nouvelles zones d'infiltration de l'eau, contribuant à l'infiltration profonde et à la recharge des nappes (Esteves et Lapetite, 2003, Descroix *et al.*, 2009; Descroix *et al.*, 2012b.). Cette infiltration préférentielle avait été observée par des méthodes de la géophysique et décrite par Massuel *et al.* (2006).

Eu égard à la baisse des précipitations après 1968, les coefficients d'écoulement ont progressé plus vite que les débits, sur les affluents de rive droite du Niger ; la figure 8 permet, comme la figure 2, de voir cette forte progression.

Celle-ci, peut être estimée d'après la figure 7, entre les années 1950 et la période actuelle ; les coefficients d'écoulement passent d'environ 1.5% à plus de 6% pour la Sirba, de 3 à 15% pour le Dargol, de 1,2 à 5% pour le Gorouol.

On observe donc un quadruplement des débits, un quintuplement des coefficients d'écoulement pour ces trois affluents là, entre les années 1950 et les années 2010. Or, comme on le verra plus bas, les pluies annuelles moyennes restent nettement inférieures à celles de la période humide 1950-1967 ; et par ailleurs, les pluies extrêmes atteignent tout juste ces dernières années, nombre et cumul précipité observés durant cette période humide. Les changements d'occupation des sols semblent rester le facteur principal expliquant la hausse des écoulements.

Dans les régions soudaniennes et comme on l'a observé au chapitre 2, on note donc une forte baisse des écoulements, qu'on a attribuée au caractère resté « hewlettien » des bassins versants. Toujours est-il que la figure 8 indique bien une tendance à la baisse des débits des affluents soudaniens du fleuve Niger dans son cours moyen, ainsi que de ceux de l'Ouémé.

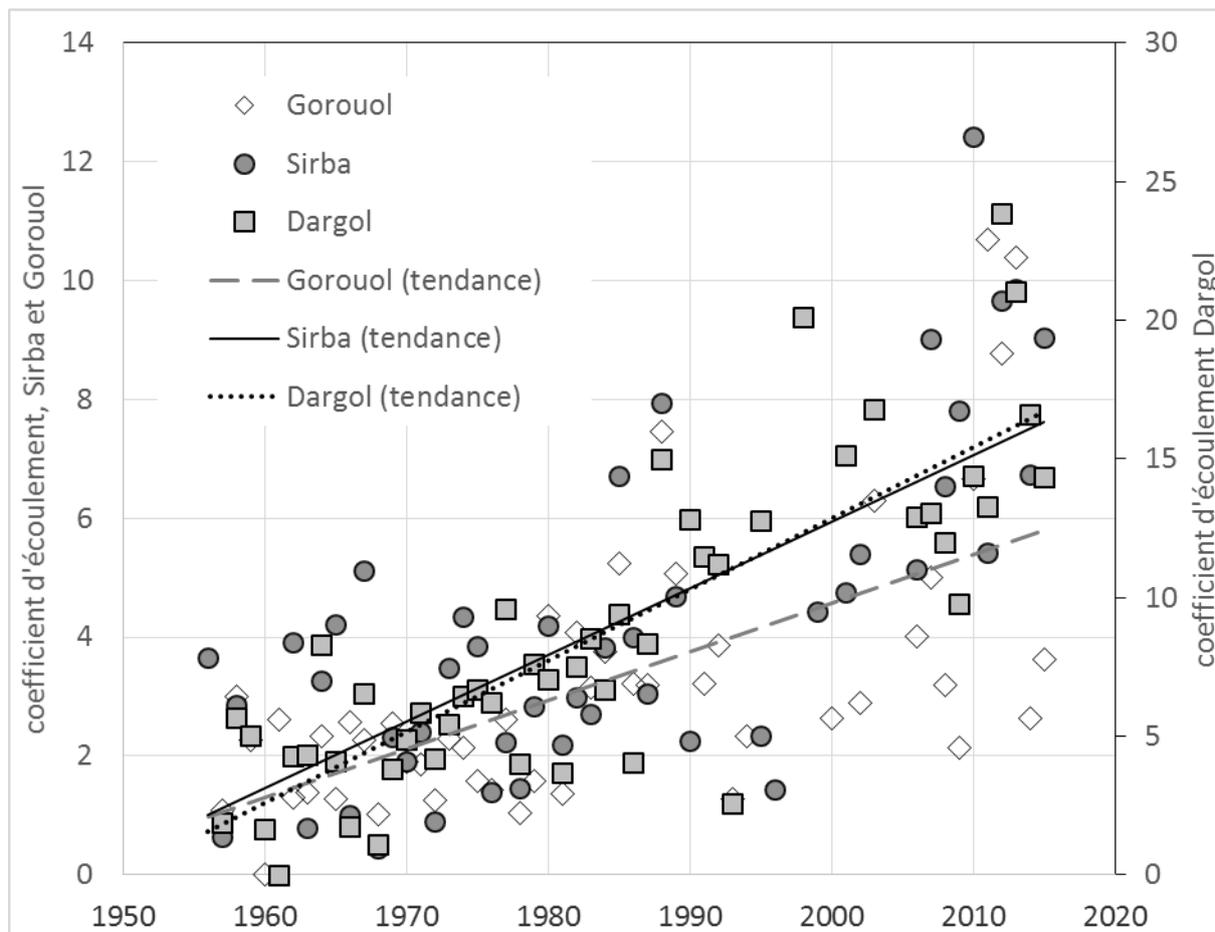


Figure 7. Coefficients d'écoulement des bassins affluents de rive droite du Niger sahélien ; évolution de 1956 à 2015

Cependant on note une ré-augmentation de ces débits à partir de la reprise des pluies plus abondantes dès le début des années 1990. Cette figure s'oppose donc partiellement à l'allure de l'évolution des débits (figure 2) et des coefficients d'écoulement (figure 8) des régions sahéliennes où l'écoulement a littéralement explosé depuis le début de la sécheresse. La tendance à la baisse est, enfin, plus faible pour les cours d'eau qui sont situés le plus au nord, c'est-à-dire près des zones sahéliennes : Goroubi, Tapoa et Mekrou ont une tendance plus ambiguë, avec une baisse bien plus modérée, faisant probablement transition entre un style « sahélien pur » au nord (Gorouol, Dargol, Sirba) et un style « soudanien » pur au sud (Ouémé, Sota, Alibori), ce qu'avaient déjà noté Mahé *et al.* (2003).

Réduction de la capacité de rétention en eau d'où temps de concentration réduit

Durant l'expérience HAPEX SAHEL (Goutorbe *et al.*, 1997) des bassins versants expérimentaux avaient été installés à Banizoumbou, à une soixantaine de km à l'est de Niamey, dans le but d'étudier la formation des écoulements et les autres paramètres du cycle de l'eau et l'influence de la végétation et des états de surface ; les conclusions ont montré que l'encroûtement des sols favorisait un ruissellement rapide (Esteves et Lapetite, 2003). Ces auteurs ont aussi montré qu'une grande quantité de l'eau d'écoulement se perdait dans le chenal

qui apparaissait comme une zone d'infiltration prioritaire pour alimenter la nappe phréatique ; cela a ensuite été corroboré sur ces mêmes bassins, ainsi que celui de Wankama situé à une quinzaine de km au nord de Banizoumbou, lors de l'expérience AMMA (Descroix *et al.*, 2012a). Le rôle des jachères est aussi mis en exergue en zone soudanienne soumise à la sahéliisation des comportements hydrologiques, par Fournier *et al.* (2000) : « *Le rôle des distributions spatiales cultures-jachères sur les écoulements de surface et l'érosion des versants agricoles soudaniens a été étudié sur le site de Bondoukuy (Burkina Faso, pluviosité 900 mm, sols sableux, 0,5 à 5% de pente). Ruissellement et érosion ont été suivis sur 9 parcelles en cultures ou jachères sous différents traitements soit uniformes soit composites ; le ruissellement de deux petits bassins versants emboîtés a été suivi pendant 3 ans. Une averse de forte intensité relative ruisselle sur un sol nu encroûté à partir d'une pluie limite PL de 7 mm, à un taux de 99,9%. Pour une jachère arbustive PL = 35 mm, a = 95 %. Les champs cultivés présentent un ruissellement annuel de 20%, intermédiaire entre sol nu (50%) et jachère [13%]. La capacité des jachères arbustives à infiltrer un ruissellement entrant (run on) dépend cependant de la présence d'une litière et de la densité de la végétation. Les écoulements observés au niveau du bassin versant sont faibles, les jachères constituant l'essentiel de la couverture, et les écotones des jachères absorbant les ruissellements provenant des champs. Un aménagement alternant 1/5 de cultures et 1/5 de jachères denses permettrait d'annuler les ruissellements et l'érosion concentrée et valoriser sur place les pertes de fertilité* »

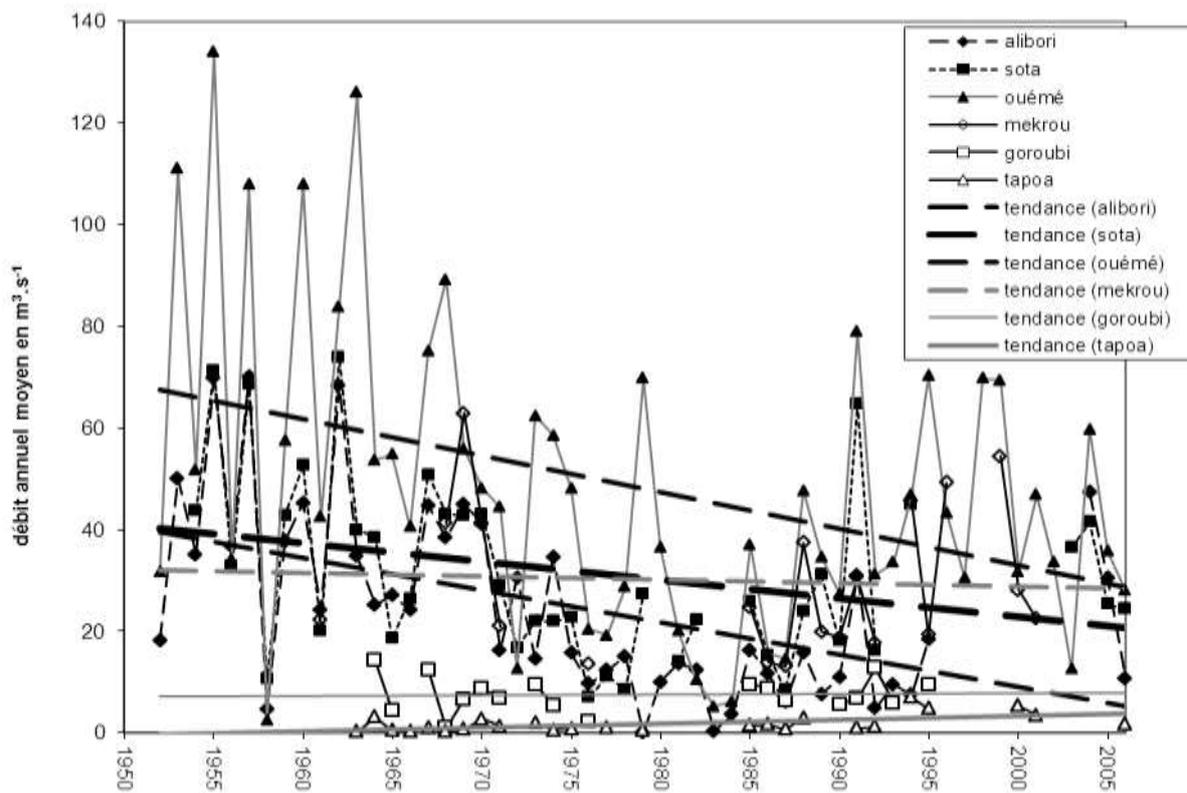


Figure 8. Diminution des débits des cours d'eau soudaniens

Et dans les petits bassins ?

Sur les bassins de Tondi Kiboro, en dehors de l'augmentation des coefficients de ruissellement (Tableau 1, colonne KR), un écart sensible se produit entre les deux périodes de mesure (1991-

1994 et 2004-2008) dans la durée annuelle totale d'écoulement observée sur chaque bassin. Le temps est réduit de 10% sur le bassin amont, de 33% sur le bassin aval, de 46% sur le bassin Bodo. Hausse des débits et diminution du temps de la crue sont deux éléments tangibles montrant une concentration plus rapide des écoulements liée à la baisse de la capacité des sols à retenir l'eau de pluie.

Tableau 1. Evolution de l'écoulement et de la durée d'écoulement sur les bassins de Tondi-Kiboro (Banizoumbou) entre les périodes 1991-1994 et 2004-2008.

TK amont	Pluie	Lame ruisselée en mm	KR	Pluie/débit	Durée d'écoulement en heures
Moyenne					
1991-1994	512,8	180,33	0,35	R = 0,56 P - 2,61	39,6
Moyenne					
2004-2008	525,6	239,62	0,46	R = 0,76 P - 4,8	36,3
TK aval	Pluie	Lame ruisselée	KR	Pluie/débit	Durée d'écoulement en heures
Moyenne					
1991-1994	512,5	132,65	0,26	R = 0,43 P - 2,3	28,1
Moyenne					
2004-2008	525,6	137,68	0,26	R = 0,5 P - 3,59	19,1
TK Bodo	Pluie	Lame ruisselée en mm	KR	Pluie/débit	Durée d'écoulement en heures
Moyenne					
1991-1994	485	185,25	0,38	R = 0,53 P - 2,14	44,2
Moyenne					
2007-2008	567	265	0,47	R = 0,85 P - 7,2	24,8

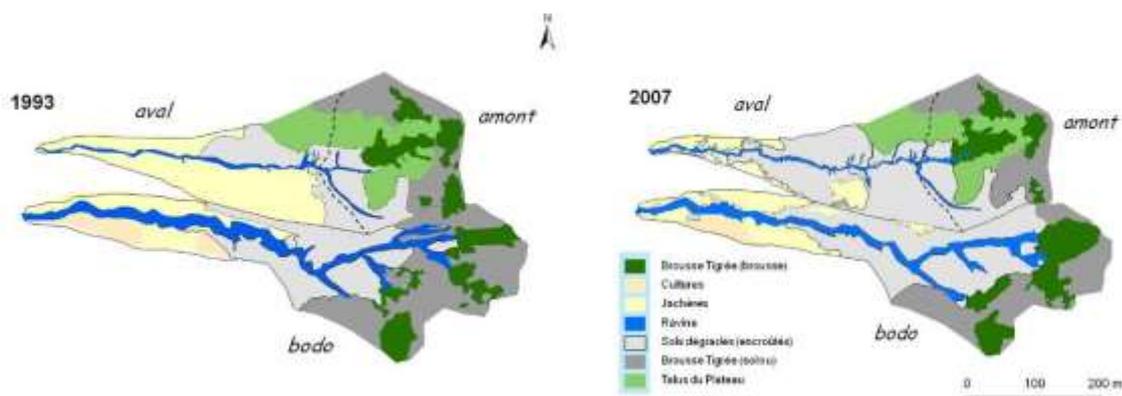


Figure 9. Evolution des occupations des sols sur les BV de Tondi Kiboro entre 1993 et 2007

La principale évolution connue par les BV de Tondi Kiboro (figure 9) est le fort accroissement des surfaces encroûtées, en particulier des croûtes ERO, connues pour le fort coefficient d'écoulement (tableau 1 du chapitre 5). Cette évolution est à même d'expliquer les deux tendances importantes notées dans le tableau 1 : augmentation des écoulements et diminution de la durée totale de la crue.

Cela rejoint une observation faite dès 2002 par Amani et Nguetora. Ceux-ci ont analysé les hydrogrammes de la Sirba, l'un des principaux affluents sahéliens de rive droite du Niger (voir figure 3 chapitre 11).

Ils ont ainsi remarqué qu'à la fin des années 1980, la crue annuelle de la Sirba se produisait 25 jours en moyenne plus tôt qu'au milieu des années 1960, du fait de la disparition progressive de la végétation naturelle ligneuse en particulier.

Il en est de même sur le fleuve Niger lui-même. Comme on l'a vu au chapitre 1, pour la station de Niamey, les hydrogrammes décennaux montrent une plus grande précocité de la crue et de l'étiage suivant, surtout depuis 1991 et le retour de pluies sensiblement plus abondantes que durant les décennies 1971-1990 (figure 6 chapitre 1). Là encore, l'arrivée précoce de la crue traduit la diminution de la capacité des sols et des versants à retenir l'eau. De même la fin avancée de la décrue, qui se produit deux mois et demi plus tôt qu'avant la sécheresse, est le résultat et de la baisse des pluies et donc des débits en zone guinéenne, mais aussi de la vidange des nombreux réservoirs naturels qui en font le véritable « château d'eau » de la région.

Conclusion : Une nouvelle crue ?

On ne peut pas parler vraiment d'une nouvelle crue, mais c'est bien une nouvelle dynamique régionale des eaux que Okechukwu Amogu a mis en évidence dans son travail de thèse (Amogu, 2009). Et surtout, il a montré que, depuis la reprise de la pluviométrie, le « paradoxe du Sahel » semble s'exacerber, en même temps qu'il devient moins paradoxal, puisqu'à une augmentation de la pluie succède bien une augmentation des débits...

En effet, Amogu a remarqué une différence notable dans les hydrogrammes des stations Niamey et Kandadji (voir leur localisation, ainsi que celle des affluents du Niger). En effet, l'hydrogramme de la période après 1998 montre une crue de mousson bien plus marquée qu'avant 1996 (Figure 10 ; localisation des stations figure 3).

Amogu (2009) constate que cette crue précoce n'est pas observée en amont, à Kandadji ; elle provient donc bien uniquement des bassins de la région, et non pas du bassin amont ; c'est donc une crue purement sahélienne. Afin de déterminer la part des affluents et du bassin direct (les petits affluents se jetant directement dans le fleuve Niger), Amogu (2009) a calculé année après année la différence entre d'une part le débit annuel écoulé à Niamey, d'autre part, le débit à Kandadji sommé des débits des deux principaux affluents intermédiaires situés entre ces deux stations. Cela a été démontré plus récemment entre Ansongo et Niamey par Cassé (2015), Cassé *et al* (2015b) et Cassé *et al.*, (2016). Comme le montre la figure 11, jusqu'en 1996, la différence est toujours négative, c'est-à-dire que le débit du Niger continuait jusqu'à cette date à diminuer au moins jusqu'à Niamey. Par contre, après 1998, on n'observe pratiquement que des valeurs positives, c'est-à-dire que le débit à Niamey est plus important que celui de Kandadji sommé de deux affluents. Ceci est dû à l'augmentation des coefficients d'écoulement en zone sahélienne, mais c'est aussi très probablement une conséquence de l'accroissement du bassin versant dont il sera question plus bas, au chapitre 7 ; cet accroissement entraîne des débits supplémentaires vers le fleuve, qui auparavant étaient stockés dans des mares, et donc destinés à être évaporés ou infiltrés. La figure 12 illustre bien le décalage entre crue d'hivernage (ici en juillet 2013) aux mois de mars-juillet, la crue de la Sirba, à peine arrivée ; les eaux du fleuve Niger sont propres.

On observe donc bien une dynamique récente et porteuse de modifications paysagères et hydrologiques notoires dans le bassin moyen du Niger.

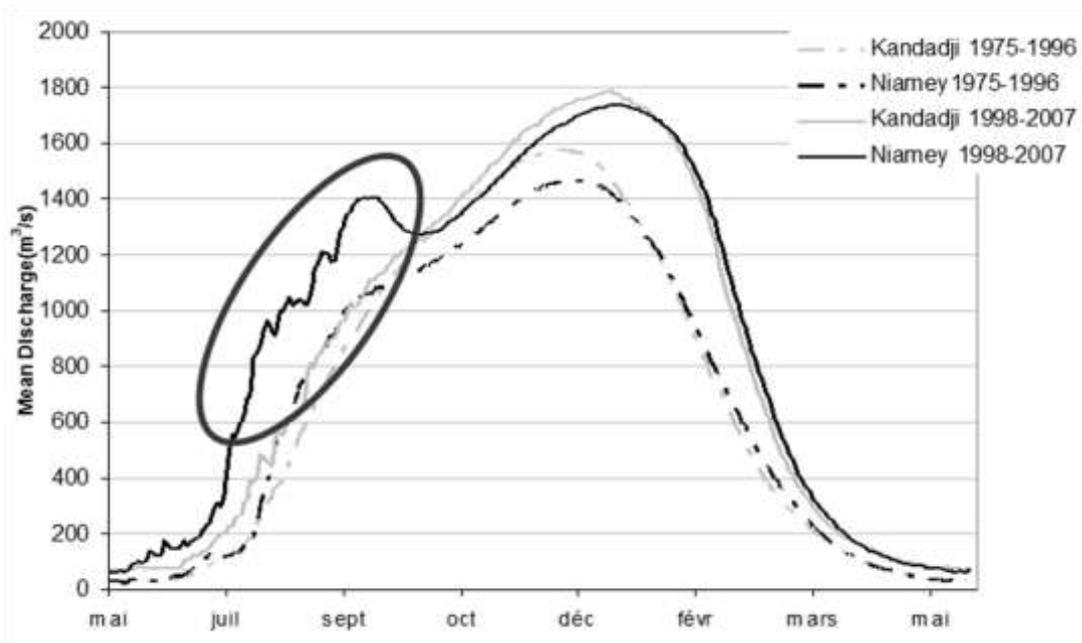


Figure 10. Comparaison des hydrogrammes moyens des stations de Kandadji et Niamey pour les périodes 1975-1996 et 1998-2007 (Amogu, 2009).

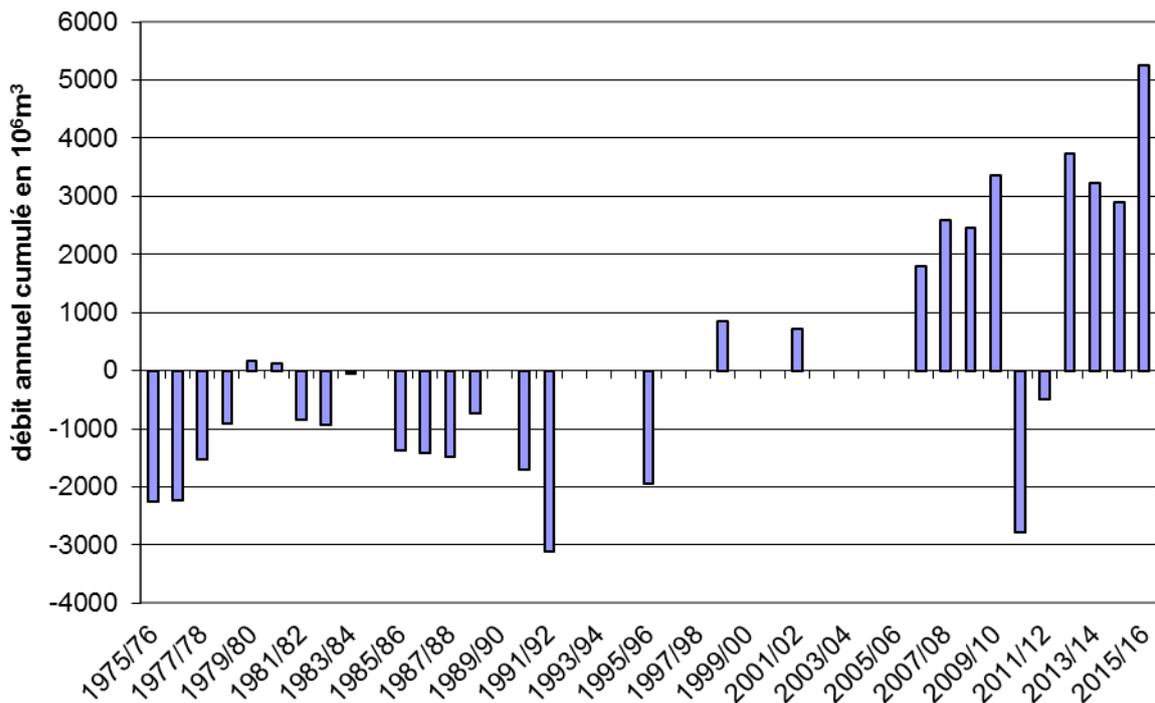


Figure 11. Résultat de la soustraction au débit de la station de Niamey des débits des affluents Sirba et Dargol et du débit à la station de Kandadji, traduisant l'apport du bassin versant direct au fleuve (d'après Amogu, 2009, actualisé)



Figure 12. Le décalage des crues dans le cours moyen, sahélien, du fleuve Niger. Les eaux de la Sirba, affluent de rive droite arrivent chargée de sédiments quand le fleuve Niger, pas encore grossi des eaux de l'hivernage, reste clair du fait de son origine guinéenne (image Google Earth).

En résumé,

- Depuis le début de la grande sécheresse des années 1968-1995, on observe un accroissement des coefficients d'écoulements des cours d'eau sahéliens, et, de plus en plus, des cours d'eau nord-soudaniens
- Le reverdissement récent observé par la plupart des études réalisées sur le couvert végétal n'a pas ralenti cette tendance, et les débits semblent augmenter encore plus vite depuis le retour des pluies
- Dans le même temps, la durée des crues se réduit, le tarissement des cours d'eau s'accélère, témoignant d'une diminution de la capacité des sols, des terroirs et des bassins à retenir l'eau de pluie

2^{ème} partie :

Comment expliquer la dégradation hydrologique ?

Le paradoxe du Sahel a dès sa mise en évidence (même sans être défini ainsi) été attribué aux changements de la couverture végétale (naturelle, liée à la sécheresse, anthropique par la hausse des prélèvements de biomasse et la mise en culture) et la dégradation hydrologique qui s'en est suivie. La sécheresse et l'extension des zones de cultures ont fortement dégradé la capacité de rétention en eau des sols et accru le ruissellement.

Cette deuxième partie ambitionne de montrer comment la diminution de la biomasse et de la teneur en eau du sol, concomitantes, ont modifié le débit et le régime des cours d'eau.

Cette deuxième partie comporte deux chapitres :

Chapitre 4 : L'homme, facteur de ruissellement ?

Chapitre 5 : L'encroûtement des sols, ou comment désertification rime avec inondation et désertification

Chapitre 4 – l’homme facteur de ruissellement ?

« Prof, vous vous contredisez !! la semaine dernière vous avez dit que la mise en culture des terres entraînait un accroissement du ruissellement ; or, là aujourd’hui vous nous dites que le mil bien sarclé infiltre toute l’eau de la pluie, même aux plus fortes intensités connues !! » Une étudiante en Master de l’Université de Ziguinchor.

C’est étrangement par les eaux profondes que la situation paradoxale des bilans de l’eau (moins de pluie, plus de ruissellement) est réapparue dans les années 1990, dix ans après les observations d’Albergel au Burkina Faso (Albergel, 1987). En effet, lors de l’expérience HAPEX Sahel (Goutorbe *et al.*, 1997), les hydrogéologues (Desconnets *et al.*, 1997 ; Leduc *et al.*, 1997) ont noté que la nappe phréatique de l’Ouest du bassin des Iullemeden (voir localisation figure 1, chapitre 3) contenue dans les grès et les silts argileux dits du CT3 (Continental Terminal 3), voyait son niveau monter, probablement depuis le début des années 1970 (figure 1). Ces auteurs, en particulier Leduc *et al.* (1997) ont vite montré que c’est l’extension des mares, elles mêmes alimentées par l’accroissement du ruissellement, qui expliquait la hausse de la nappe : en effet, les mares constituent la principale voie de recharge des nappes dans le bassin des Iullemeden caractérisé par son endoréisme.

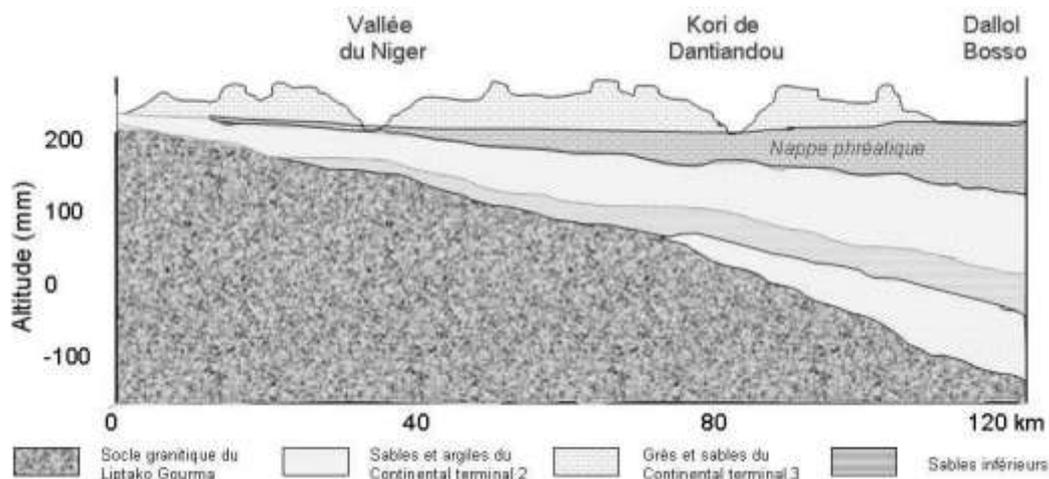


Figure 1 : configuration de la nappe du CT3, affleurante ou proche de l’affleurement dans les bas-fonds et les vallées les plus profondes à l’ouest du bassin sédimentaire des Iullemeden (d’après Montfort 1996, in Favreau, 2000)

1- L’homme : facteur de désertification ou de reverdissement ?

Comme on l’a vu au chapitre 1, même si un champ bien sarclé constitue une surface pouvant infiltrer les pluies tombant sous les intensités les plus fortes connues au Sahel, la mise en culture des brousses pré-existantes et le raccourcissement des jachères sont probablement parmi les causes de l’encroûtement des sols.

L’origine des problèmes d’encroûtement des sols (voir chapitre 5) vient essentiellement des changements d’occupation des sols, de couverture du sol, observés depuis plusieurs décennies. La forte croissance démographique demande l’obtention de récoltes plus abondantes chaque année, dans un milieu où les sols sont pauvres, les pluies irrégulières et la saison des pluies courte. Autant d’éléments qui compliquent l’objectif de l’autosuffisance alimentaire. La

faiblesse des rendements agricoles et le faible recours aux engrais fait que l'accroissement de la production agro-alimentaire s'est fait en augmentant la surface cultivée.

Le tableau 1 donne l'évolution des surfaces consacrées aux cultures annuelles dans les pays de la sous région ; mais les valeurs de la FAO sont parfois bien difficiles à comprendre, et, pour le Niger, très éloignées de celles fournies par Guengant et Banoin (2003).

Tableau 1 : surface consacrée aux cultures annuelles par pays et en % de la surface totale (source FAOSTAT)

pays/année	1961	1971	1981	1991	2001	2011
Bénin	8,32	11,2	13,32	14,2	21,75	22,5
Burkina Faso	7,8	8,1	10,24	12,95	16,77	20,64
Cameroun	10,6	11,56	12,54	12,61	12,61	13,1
Cap vert	9,4	9,4	9,4	10,14	11,4	11,7
Côte d'Ivoire*	5,39	5,1	6,05	7,8	8,68	8,96
Gambie	11,96	13,25	17,36	19,14	31,35	44,53
Ghana	7,65	7,65	8,48	12,32	17,92	21
Guinée**	14,16	13,57	12,76	11,4	8,8	11,6
Guinée Bissau	8,16	8,82	8,82	8,67	10,44	10,44
Liberia	3,9	3,79	3,8	3,64	3,95	4,67
Mali	1,3	1,404	1,638	1,664	3,744	5,61
Mauritanie	0,266	0,228	0,228	0,38	0,418	0,418
Niger***	9,125	8,64	7,68	9,45	11,1	11,73
Nigeria	29	30,1	30,6	32,7	32,9	39,5
Sénégal****	15,3	16,56	16,1	15,3	16,238	19,6
Sierra Leone	4,96	5,67	6,36	6,78	9,4	15,36
Tchad	2,28	2,28	2,47	2,66	3,12	4
Togo*****	33,04	33,125	35,84	38,94	42,88	45,56

*Valeurs faibles dues à la prééminence des cultures permanentes (cacao, café, palmistes..) ;

** et *** valeurs en baisse (Guinée) ou en croissance faible (Niger) de manière inexplicable ; concernant le Niger, cela ne correspond pas du tout aux valeurs de Guengant et Banoin, 2003.

****idem mais plus de la moitié est consacrée à l'arachide depuis la période coloniale ;

*****idem mais cas proche de la Côte d'Ivoire (palmistes).

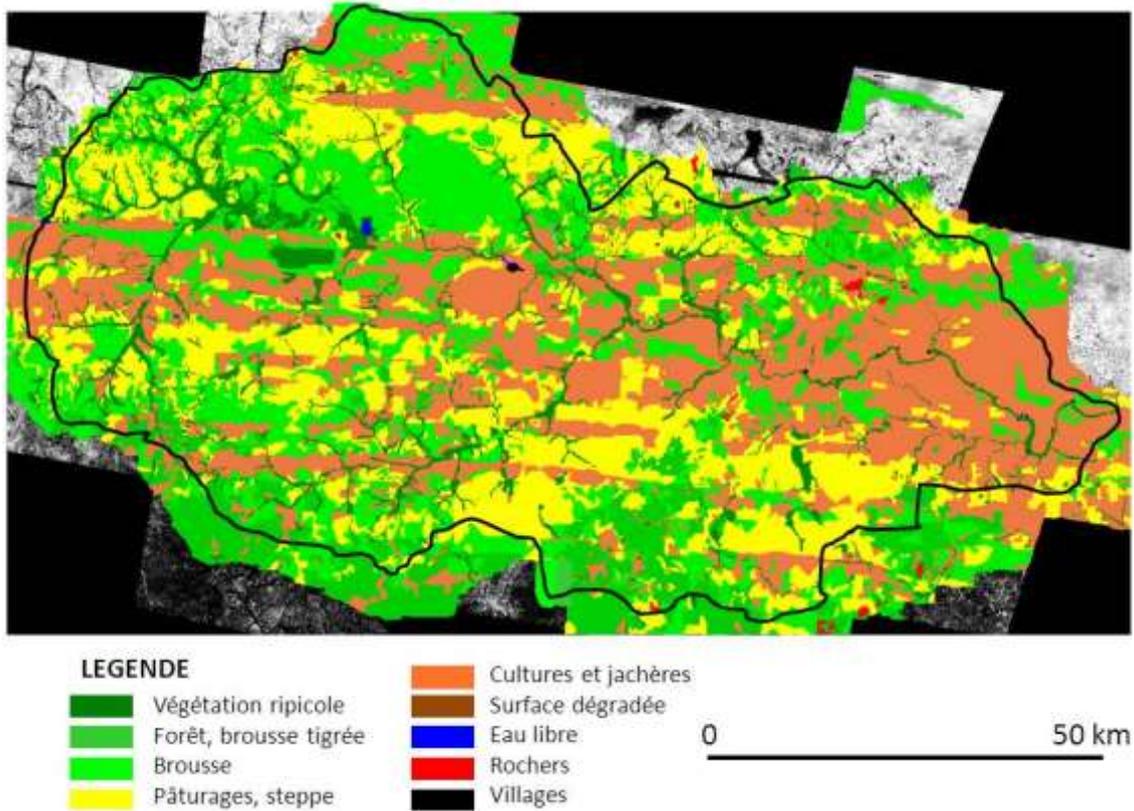


Fig. 2. Carte de l'occupation des sols du bassin du Dargol en 1965 ; les alignements Ouest-Est sur cette carte et la suivante sont liés à la présence de dunes fossiles qui occupent une grande surface dans tout le Nord du Liptako Gourma

La mise en culture se traduit par la mise à nu du sol une grande partie de l'année ; de plus la poursuite d'une croissance démographique forte (la population double tous les 20 ans) et la survenue de la sécheresse dès 1968 ont exacerbé le problème en accélérant les mises en cultures pour compenser des rendements diminués par la sécheresse. La comparaison des figures 2 et 3 montre la grande extension des terrains cultivés dans le bassin du Dargol entre 1965, avant la sécheresse, et 2010 ; on note aussi la quasi-disparition des végétations de brousse et forêt naturelles. Ces cartes ont été réalisées par photo-interprétation d'images Corona® (1965) et de scènes Google Earth ® (2010). La localisation de ce bassin est signalée sur la figure 4.

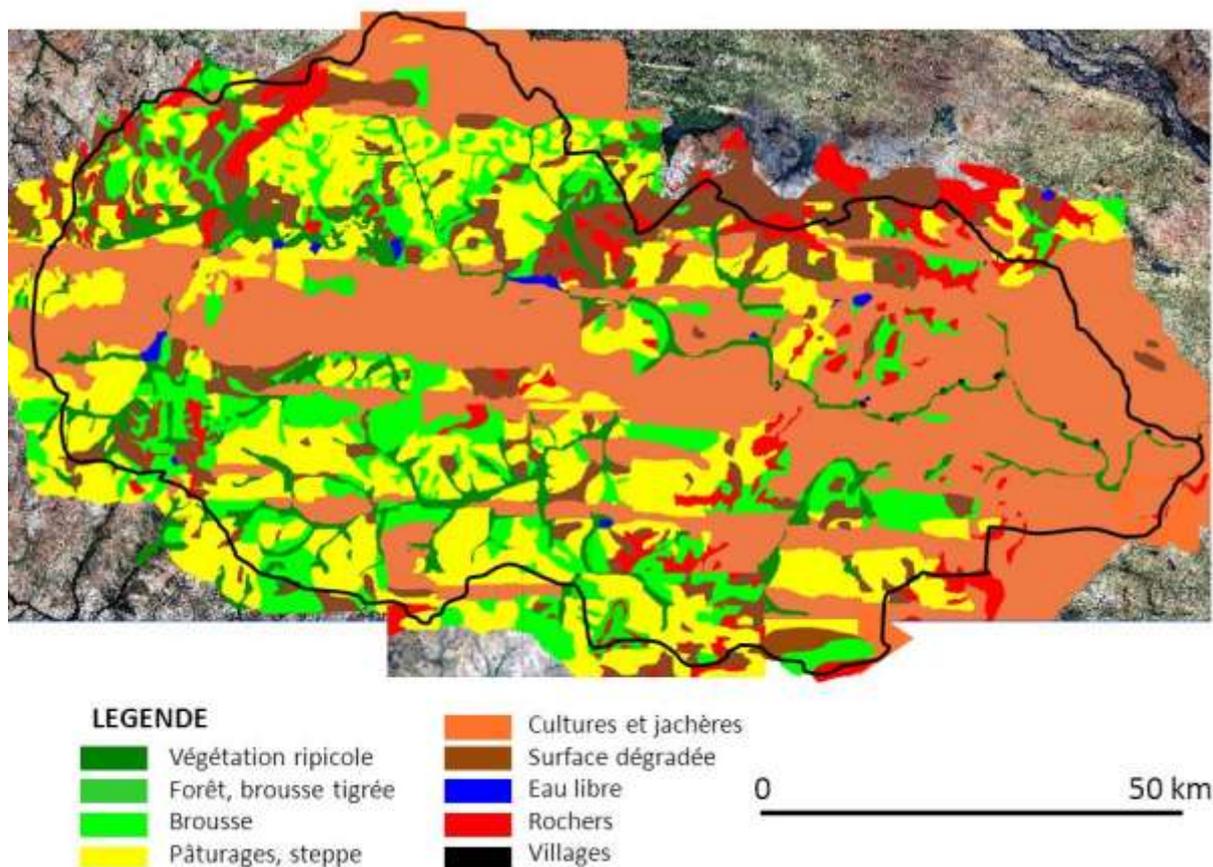


Figure 3. Carte de l'occupation des sols du bassin du Dargol en 2010

Le tableau 2 donne l'évolution des surfaces de chacune des catégories retenues dans les figures 2 et 3. Si la croissance des zones de « cultures et jachères » est bien plus faible que celle de la population, qui a quadruplé dans le même laps de temps pour le Niger et le Burkina Faso, concernés par le bassin du Dargol, c'est qu'entretiens, la jachère, qui occupait 80% à 90% de la catégorie en 1965, avec des jachères de 15 ans en moyenne après 3 ou 4 ans de cultures, a pratiquement disparu, et avec elle le seul moyen de fertilisation des sols connu jusque-là dans les systèmes traditionnels. La jachère permet de retrouver, après quelques années de repos, les rendements que l'on obtient au défrichage des brousses pour la mise en culture. Les forêts et brousses épaisses ont complètement disparu, au profit de zones de sol nu très ruisselantes sur lesquelles se forment les futures inondations de Niamey et de la vallée du Niger Moyen. La mise en culture est bien l'un des éléments explicatifs clés du paradoxe du Sahel ; c'est l'élément de départ mais il ne suffit pas à lui tout seul ; la mise en culture aurait très bien pu ne pas produire une telle dégradation des sols. On touche là aux problèmes d'intensification écologique des systèmes de culture.

Tableau 2. Principales classes d'occupation des sols dans le bassin du Dargol en 1965 et en 2010

Bassin versant du Dargol	1965		2010	
	km ²	%	km ²	%
Cultures et jachères	2109	29,9	2729	38,7
Pâturages	1755	24,9	1540	21,8
Végétation ripisylve	514	7,3	506	7,2

Forêts et brousse tigrée	1739	24,6	0	0
Brousse	755	10,7	1034	14,7
Eau	3,6	0,05	23,2	0,3
Rochers et plateaux latéritiques nus	169	2,4	472	6,7
Sols nus et dégradés (encroûtés)	13,2	0,2	751	10,6
Village	1,9	0,03	4,1	0,06
Total	7060,4	100	7060,4	100

Afin d'éviter les polémiques sur les évolutions des NDVI, nous avons effectué les études diachroniques de la couverture végétale par photo-interprétation. On profite ainsi d'une iconographie abondante et ancienne à haute définition ; on s'est contenté ici de l'image Corona® et de scènes Google Earth®, mais on aurait pu aussi utiliser les photos aériennes des vols IGN et IGNN de 1950, 1975 et 1992 ; ceci étant, le travail de recalage de dizaines de photos aériennes est un travail long et fastidieux.

- nous avons opté pour les images Corona, du nom d'une série de satellites espions américains qui durant la deuxième moitié des années 1960, ont photographié l'ensemble de la planète plusieurs fois à haute résolution (photo argentique avec possibilités de distinguer des objets de taille métrique). Ces documents ont été déclassifiés il y a quelques années et sont une source iconographique remarquable car relativement homogène sur l'ensemble des continents ; les photos disponibles pour le Niger sont de 1965. Cinq bandes de photos (80 km X 20 km) ont été recalées et géo-référencées, ce qui représente un travail important mais beaucoup moins long et délicat que pour une même couverture en photos aériennes IGNN.
- l'autre source d'information est constituée par les scènes satellites récentes proposées par le site Google Earth, qui donne accès à une information de qualité à haute définition (proche du métrique) ; c'est une couverture constituée de scènes de 2009 et 2010 qui a été utilisée ici. Aucun recalage géométrique n'a été nécessaire, ces images sont fournies gratuitement en mode géo-référencé.

L'intérêt de cette étude diachronique de l'occupation des sols est de montrer l'évolution que celle-ci a connu depuis le début de la sécheresse, la couverture ancienne datant d'avant le début de celle-ci. Par contre, sans étape intermédiaire ni étude locale détaillée (à prévoir postérieurement) on ne peut que faire une interprétation globale, sans pouvoir distinguer quelle part de l'évolution est liée au changement climatique (arbres tués directement par la sécheresse) et quelle part est liée aux activités humaines.

La même cartographie a été réalisée pour la partie centrale des plateaux du DCN (Degré Carré de Niamey). La zone couverte par cette étude a une forme de losange (liée à la trace au sol et à la forme des photos argentiques Corona) ; la localisation de celui-ci est indiquée dans la figure 4. Les figures 5 et 6 montrent l'évolution de l'occupation des sols aux deux dates choisies.

Le tableau 3 montre les taux de couverture de chaque grande catégorie aux deux dates. Les classes sont à dessein très larges et peu nombreuses afin d'éviter les erreurs de classement de zones difficiles à distinguer. Seules ont été distinguées : la brousse (voir plus bas), par opposition à l'ensemble cultures + jachères et aux plateaux latéritiques ; dans cette dernière catégorie, on distingue la brousse tigrée, la brousse tigrée dégradée et les placages sableux de plateau cultivés. Dans l'ensemble cultures + jachères, on distingue une classe « sols dégradés », constituée essentiellement de zones érodées de haut de versant (jupe sableuse), parfois de mi ou bas de versant, où les sols ont subi une érosion hydrique et éolienne les rendant pratiquement impropres à la culture. Il s'agit le plus souvent de croûte « ERO » (Casenave et Valentin, 1992 ; Esteves et Lapetite, 2004) c'est-à-dire une croûte d'érosion, constituée d'une fine couche riche

en argile (résultant de l'effet splash) recouvrant une couche épaisse de 20 à 50 cm de sables dégradés, lessivés par le ruissellement, la dessiccation et le travail du sol, et ne contenant plus de matière organique ni de nutriments.

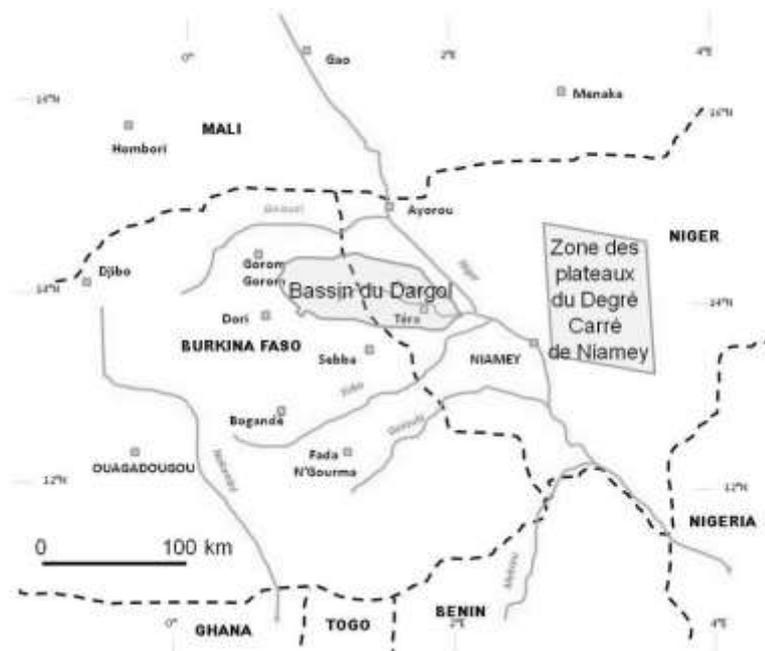


Figure. 4. Carte de localisation du bassin du Dargol (figures 2 et 3) et de la zone des plateaux centraux du degré carré de Niamey (figure 5 et 6)

Clairement on constate de profondes évolutions entre ces deux dates (figures 5 et 6)

- la brousse : celle-ci n'existant plus, on utilise peut être ici une dénomination inappropriée ; il s'agit d'une formation qui couvre l'ensemble de la surface (zones sombres continues sur les photos), sans que l'on sache vraiment si la couverture est surtout herbacée et graminéenne (possible vu le « grain » très fin de ces surfaces) ou arbustive voire arborée ; ce n'est pas l'objet du débat ici, car ce qui nous intéresse ici est le fait qu'il s'agit d'une couverture continue du sol sans espace nu ou ouvert. Cela signifie que l'ensemble de la surface est recouvert de végétation, ce qui implique une infiltration et une évapotranspiration importantes, et en conséquence, un ruissellement faible ou inexistant. En tout cas, cette formation qu'il faudrait définir dans sa forme à partir de photos obliques, a disparu en 2010, remplacée essentiellement par la catégorie suivante ;

Tableau 3. Evolution de l'occupation du sol entre 1965 et 2010 dans la zone centrale des plateaux du degré carré de Niamey (photo interprétation de photos Corona de 1965 et de scènes SPOT fournies par Google Earth pour 2010)

	surface 1965 km ²	surface 2010 km ²	% 1965	% 2010
Brousse	2932	0	44,2	0
Cultures + Jachères	1311	3541	19,8	53,4
Sols dégradés	0	1209	0	18,2
Plateaux latéritiques sans BT	960	589	14,5	8,9
Brousse Tigrée	697	424	10,5	6,4

Brousse Tigrée Dégradée	0	155	0	2,3
Fleuve	51	50	0,8	0,8
Terrasses alluviales	51	33	0,8	0,5
Villages	9	20	0,13	0,31
Dallol Bosso	623	611	9,4	9,2
TOTAL	6633	6633	100	100

- les cultures et jachères, que l'on a regroupées ici à dessein, du fait que cet ensemble est la zone de cultures, la jachère faisant complètement partie d'un système cultural dont elle représente la phase de repos et de re-fertilisation ; cette classe a presque triplé entre 1965 et 2010, comme cela a été constaté pour l'ensemble du Niger (Guengant et Banoïn, 2002) (voir Figure 6) et du reste dans l'ensemble du Sahel. Les rendements restent très faibles – ils sont même en baisse sur le long terme au Niger-, la hausse indispensable de la production ne peut se faire que par l'extension des zones cultivées, celle-ci progresse donc sur les secteurs réputés les moins fertiles dans la topographie et dans les zones septentrionales, où la pluviométrie de plus en plus faible et erratique rend l'agriculture pluviale extrêmement aléatoire.
- les sols dégradés ; l'accélération du rythme des mises en jachère (raccourcissement des périodes de repos cultural) et l'extension des zones de culture vers les secteurs de sols plus pauvres et plus pentus a conduit à l'apparition de dépressions hydro-éoliennes, formées par le vent durant la saison sèche, élargies et rattachées par les filets du ruissellement, celui-ci étant facilité sur des surfaces devenues glacées et peu perméables (voir la description faite de cette évolution par Rajot *et al.*, 2009). Sans atteindre des surfaces très importantes, ces zones dégradées n'en représentent pas moins 18 % de la surface totale de la zone de plateaux du degré carré de Niamey ; on verra plus loin que cela a une importance primordiale en terme de bilan hydrologique, car ces surfaces dégradées, subissant un coefficient de ruissellement de plus de 60%, remplacent des zones de brousse ou de cultures où celui-ci est bien plus faible (0 à 5% en général suivant la qualité et la fréquence du sarclage pour les zones cultivées).

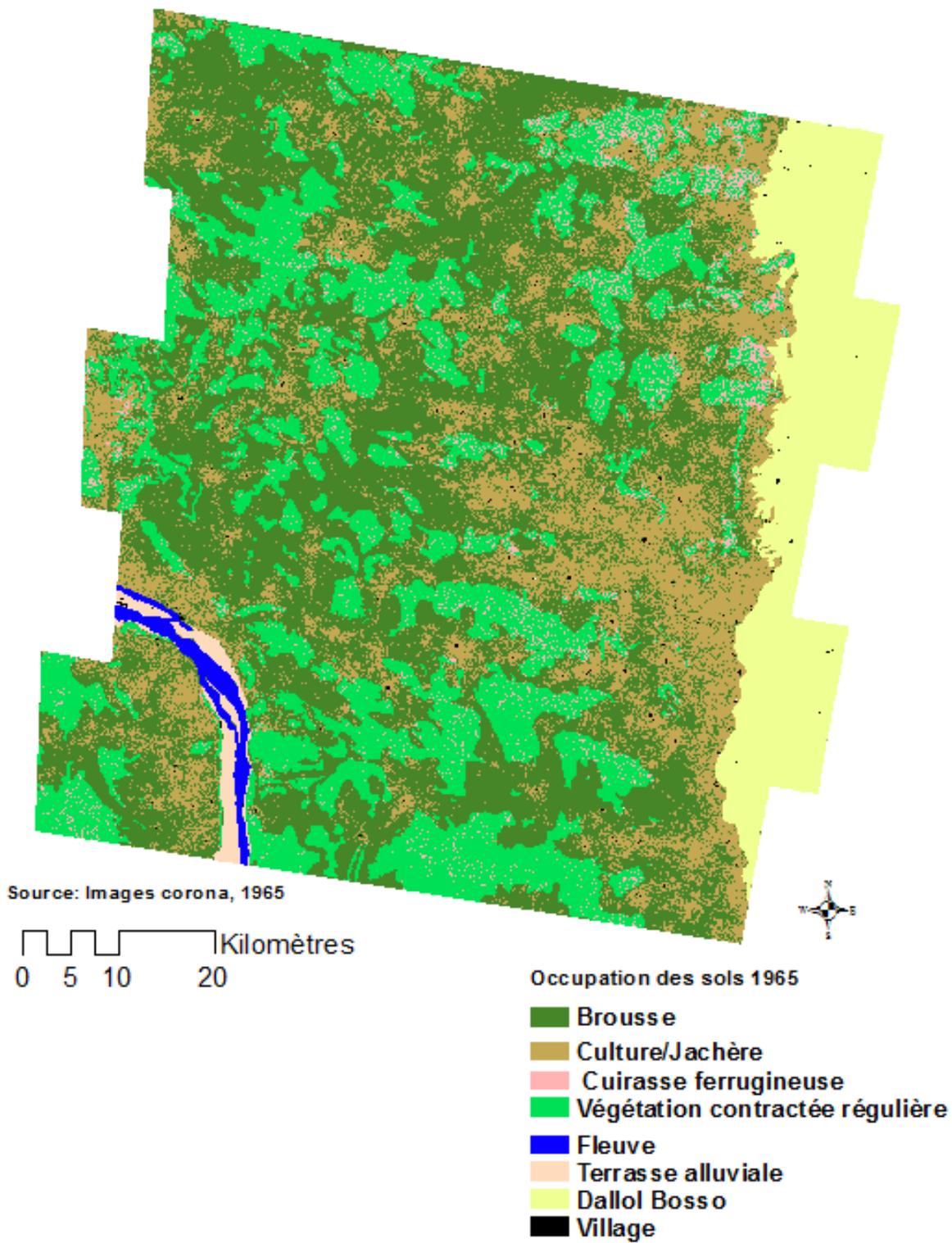


Figure 5. Cartographie de l'occupation des sols par photo-interprétation d'images CORONA prises en 1965 de la zone de plateaux du degré carré de Niamey (voir figure 4)

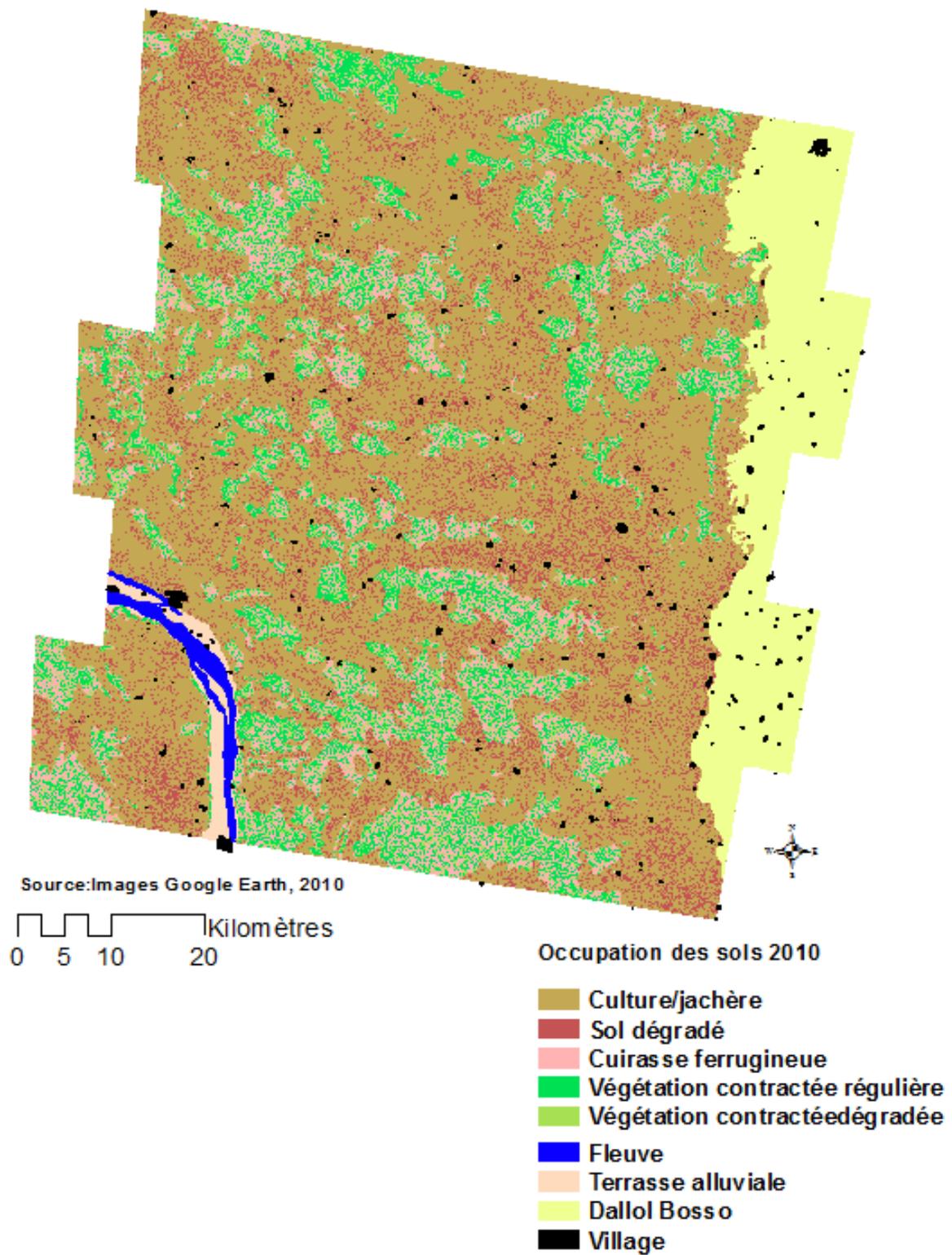


Figure 6. Cartographie de l'occupation des sols par photo-interprétation d'images satellitaires Google Earth de 2010 de la zone de plateaux du degré carré de Niamey (fig.4)

- Les plateaux latéritiques constituent, contrairement aux catégories précédentes, un ensemble géomorphologique ; ils ne varient donc pas d'une période à l'autre. Par contre, les formes végétales qui le caractérisent ont, elles, beaucoup évolué ces dernières décennies :
 - La brousse tigrée est, comme on l'a vu, la formation contractée caractéristique des plateaux cuirassés sahéliens ; elle est en forte régression, d'une part du fait d'une mortalité élevée lors des épisodes de sécheresse, sur les plateaux latéritiques aux sols squelettiques disposant de très faibles réserves hydriques ; d'autre part, ici dans la région proche de Niamey, du fait de la consommation de bois et de charbon de bois de la ville (98% des ménages de Niamey font encore leur cuisine au bois) ;
 - Brousse tigrée dégradée : localement, la brousse tigrée a survécu à la sécheresse et/ou la surexploitation, et il reste des lambeaux de végétation conservant la forme en plan de la brousse tigrée (en forme de lanières) ; elle représente une extension comparable à celle du reliquat de brousse tigrée résiduelle ;
 - Placages sableux de plateau cultivés ; localement, les plateaux latéritiques sont recouverts de dépôts sableux ; de plus en plus, la pression sur les ressources augmentant, ces dépôts sableux sont mis à profit pour les cultures.

On verra plus loin (chapitre 5) comment cela s'est traduit en terme d'encroûtement des sols ; et plus loin encore comment cela a conduit à un processus d'accroissement de l'exorisme (chapitre 7), qui lui-même est générateur des inondations dans cette même vallée. La figure 7, tirée des travaux de Guengant et Banoin (2003), montre l'évolution de la population, de la surface cultivée et des rendements en mil pour le Niger.

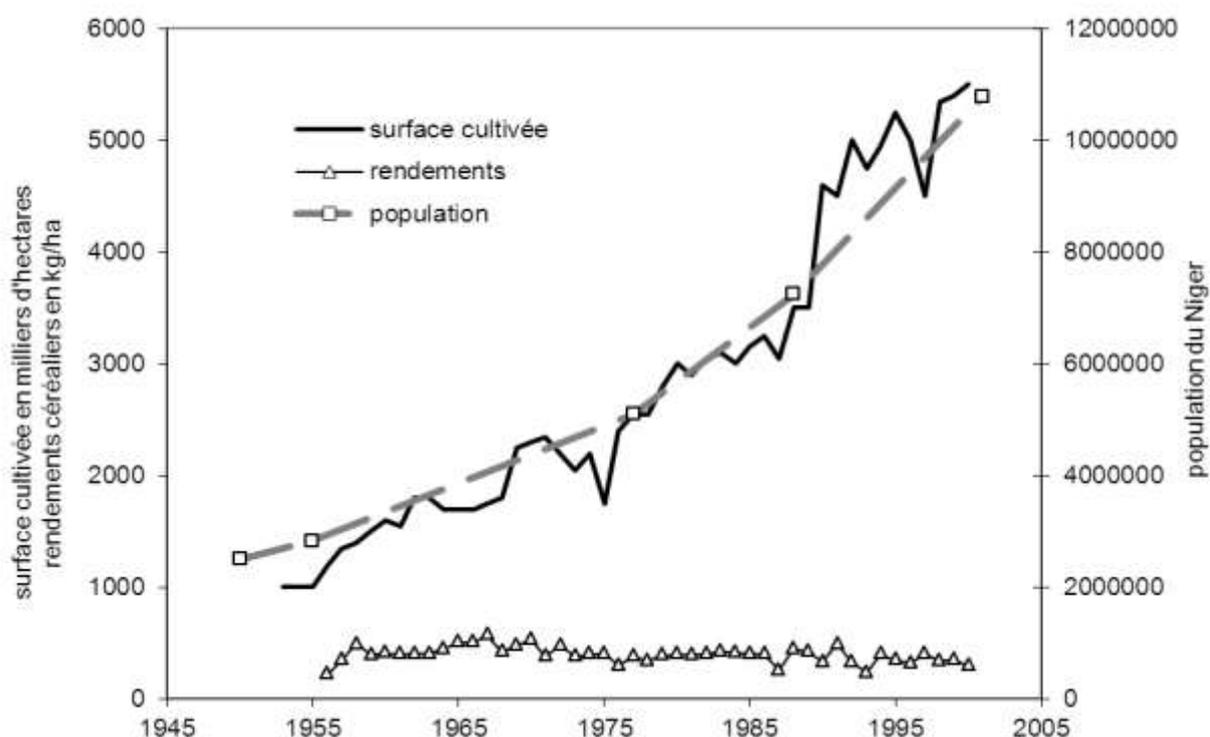


Fig. 7. Evolution de la population, des surfaces cultivées et des rendements en mil au Niger (d'après Guengant et Banoin, 2003)

Cependant le Niger n'est pas représentatif de la sous région, puisque d'après Amogu (2009), la surface cultivée n'a fait que doubler au Mali et au Burkina entre 1950 et 2000, passant dans chacun de ces pays d'environ 2 à 4 millions d'hectares. On peut supposer que ces pays sont parvenus à accroître sensiblement leurs rendements céréaliers, contrairement au Niger.

Par ailleurs, comme Luxereau et Roussel (1997) l'ont montré dans différents terroirs africains, il est plus que probable que l'augmentation de la densité de population finisse par entraîner une intensification vertueuse de ces terroirs et des activités rurales (agro-sylvo-pastorales, et leurs activités de transformation associées), une baisse de l'érosion et de la dégradation des sols, une amélioration de la fertilité des sols et par suite, des rendements agricoles ; le titre de l'ouvrage de Tiffen *et al.* (1994) « *More people, less erosion* », est à lui seul la confirmation de l'existence d'un tel ensemble de processus dans les montagnes du Kenya. Une telle configuration est également décrite au nord de la côte d'Ivoire par Demont et Jouve (1999). Certaines montagnes d'Ethiopie ont des densités localement supérieures à 400 hab/km² sans que cela ne se traduise par une dégradation des sols (Planel, 2008).

Il est probable que l'apparition, à la fin de la décennie 2001-2010, de tiges de *Faidherbia Albida* dans les champs des paysans zarma des alentours de Niamey, où la densité de population franchit juste les 50 hab/km² ces dernières années, 20 ou 30 ans après leur généralisation en pays haoussa (région de Maradi), où les densités actuelles sont supérieures à 100 hab/km², sont le début de l'intensification écologique souhaitée. De même, la « **construction** » d'un sol **cultivable** sur les dunes du Gandiolais, au sud de St Louis (Nord du Sénégal côtier) donne du travail à plusieurs travailleurs à l'hectare (voir les champs de carottes et d'oignons, photo 17 chapitre 9) quand les 11000 hectares coupés à blanc à Ndiel dans l'arrière pays (20000 ha prévus), en bordure d'une réserve naturelle, pour produire des agrocarburants (alors que le Sénégal est après la Mauritanie le pays le plus dépendant des importations agricoles dans toute l'Afrique sub saharienne) **constituent exactement la meilleure méthode pour détruire un sol et accélérer la désertification.**

2- Ruissellement, infiltration et... stockage naturel

Dans les secteurs endoréiques, que ce soit dans le Gourma Malien ou dans le bassin des Iullemeden, on a vu que l'accroissement du ruissellement entraînait une augmentation notoire du nombre de mares, de leur volume et de leur durée en eau.

On peut, comme Desconnets (1994) distinguer plusieurs formes d'endoréismes, ou plutôt plusieurs types de mares : celles de plateaux, celles de versants et celles de bas fonds ; les premières, eu égard à la platitude globale des plateaux latéritiques, sont très peu profondes (quelques dizaines de centimètres, rarement plus de 50) et peu étendues. Les mares de versants sont en général aussi réduites et à peine plus profondes (un mètre, rarement plus) ; les mares de bas fonds sont les plus étendues, les plus profondes et les plus durables ; ce sont aussi celles qui connaissent la dynamique la plus active, et qui sont en forte croissance, comme cela a été observé dans le Fakara, à l'est de Niamey (Le Breton, 2012 ; Souley Yéro, 2012), dans le centre du Niger (Bouzou *et al.*, 2009) ou dans le Gourma Malien (Gardelle *et al.*, 2010). Bouzou *et al.*, (2009) insistent sur « *le rôle de l'occupation du sol et de l'amélioration de la pluviométrie [voir chapitre 6], et des extrêmes pluvieux sur la dynamique hydro-érosive intense observée ces dernières années sur un bassin-versant endoréique. Entre 1986 et 2000, l'augmentation des superficies cultivées s'est accompagnée de celle des processus de ruissellement diffus, fort et concentré. Cet accroissement des processus de ruissellement explique l'importance des écoulements saisonniers sur 70 km dans le kori de Mountséka et la reprise de l'érosion verticale particulièrement dans les petits koris affluents* ». « *Cette reprise de la fonctionnalité du kori Mountséka traduit-elle le début du processus de fin de l'endoréisme des bas-fonds sahéliens, ou est-ce une simple coalescence de mares ?* » toujours est-il que « *vers la fin du mois d'août, il se forme désormais un long plan d'eau continu large et profond. À la fin de l'hivernage, il*

s'interrompt par endroits par quelques seuils. L'eau y persiste dans de grandes mares jusqu'à la prochaine saison des pluies » (Bouzou *et al.*, 2009).

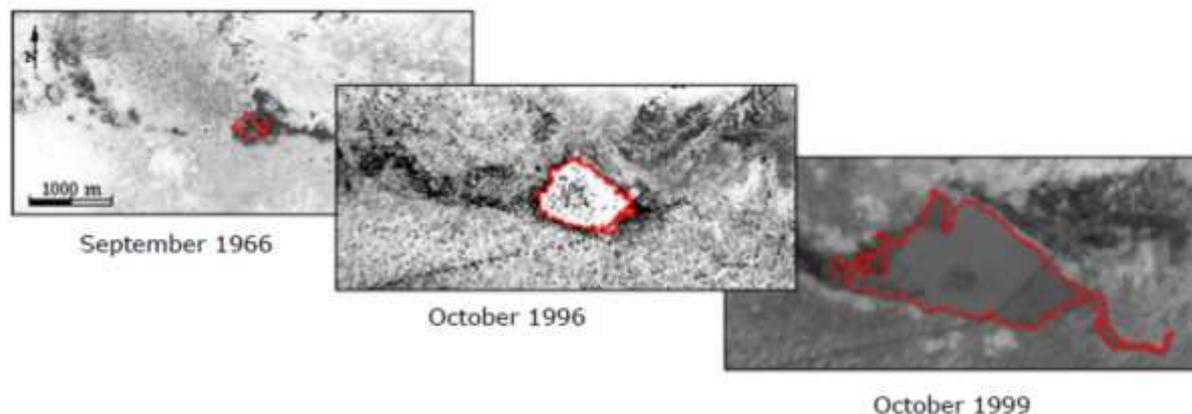


Figure 8. Evolution de la mare d'Agoufou (est du Mali, région de Gao) (Gardelle *et al.*, 2010)

Dans le Gourma Malien (Gardelle *et al.*, 2010), la dégradation des sols qui a conduit à l'augmentation du ruissellement n'est pas d'origine anthropique ; elle est liée à la disparition des ligneux sur des secteurs de lithosols lors de la phase aiguë de la sécheresse (1968-1985) ; les sols peu profonds ont été emportés, et ne se reconstitueront pas sans un gros travail de restauration ; ils ont laissé la place à la roche, peu perméable, et de fait, très ruisselante, ce qui a entraîné une très forte extension des mares (Figures 8 et 9). Dans le Fakara du Niger, c'est surtout la dynamique des mares de bas-fonds qui a été remarquée, leur forte croissance en nombre, taille et volumes (Descroix *et al.*, 2012a).

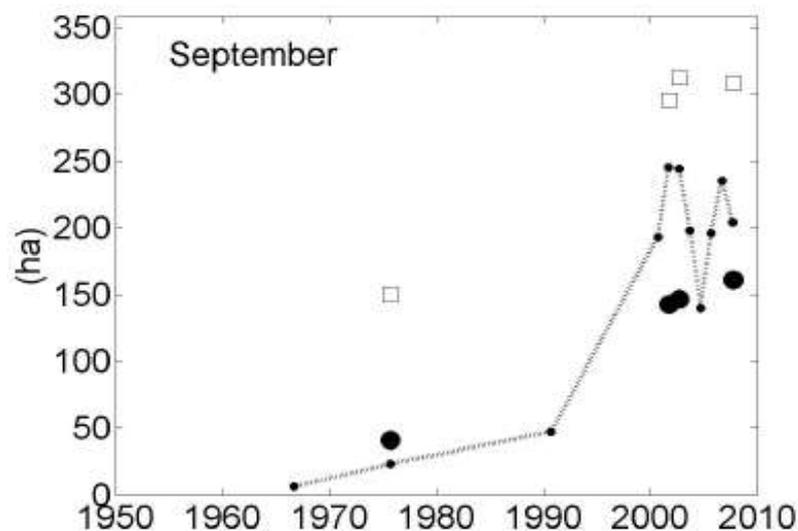


Figure 9. Evolution de la surface totale cumulée des 91 mares du Gourma Malien (carrés vides), des eaux troubles (cercles pleins) et de la mare d'Agoufou (ligne pointillée) (mois de septembre) (in Gardelle *et al.*, 2010)

Ce que n'évoque pas Desconnets dans son étude des endoréismes et des formes de mares, ce sont les éléments suivants, en grande partie postérieurs :



Figure 10. Mare de Bangou Bi (10 km à l'est de Niamey, près de l'aéroport). Etat en novembre 2006 ; affleurement de la nappe

- Les ruptures d'endoréisme, qui ne concernent pas sa région d'étude mais plutôt la vallée du Niger au sens large (voir chapitre 7) ;
- Les mares d'affleurement de nappe, de plus en plus nombreuses et étendues (figures 10 et 12), et désignées en pays zarma comme « bangou bi » (mares noires) par opposition aux « bangou kirey » (mares rouges) formées par l'accroissement du ruissellement sur les versants érodés et dégradés.

Cette expansion des mares, qu'elles soient rouges ou noires, peut constituer une gêne pour les paysans, en coupant des pistes et en inondant les champs et les cultures des bas-fonds, c'est-à-dire des zones connues comme les plus fertiles ; ce sont en effet celles qui ont le plus de végétation naturelle, et donc où les sols sont les plus profonds et contiennent le plus de matière organique. Cependant, ces mares, comme l'élévation de la nappe phréatique qui en est la conséquence, constituent une nouvelle ressource en eau ; même si elle provient d'un facteur négatif (l'érosion et l'encroûtement des sols, la très forte augmentation du ruissellement en découlant), elle peut être utile dans les années qui viennent. Favreau *et al* (2009) suggèrent justement d'utiliser ce surplus d'eau, fût-il provisoire, pour « reverdir » le Sahel. Elles peuvent apporter aussi l'opportunité de créer de petits jardins et périmètres irrigués, même si les expériences notées dans la région de Wankama au Niger ont tourné court. Ailleurs au Niger la culture de décrue en bord de mares se développe dans d'autres régions du Niger (comme pers de Pierre Genthon). Par exemple dans la région de Zinder (Waziri Mato, 2000) ainsi que dans la région du Lac Tchad (voir Luxereau et Genthon, 2012). Pourtant, à Wankama l'artésianisme des niveaux aquifères plus profonds que le CT3 fournit une ressource en eau beaucoup plus facile à utiliser.

Du fait de cette expansion des mares, en effet, on a remarqué dans la région de Niamey (le « degré carré » de Niamey plus exactement), une hausse sensible du niveau de la nappe du CT3 (Continental Terminal 3) ; cette hausse a déjà dépassé 4 m par endroits en une trentaine d'années (figure 11) ; la tendance à la hausse s'est accélérée durant les années 1990 et 2000 (Favreau *et al.*, 2009). Comme cela a été suggéré dès la fin des années 1990, cette hausse (qui avait débuté plus de 20 ans auparavant), est une conséquence indirecte du changement d'occupation des sols.

Elle n'a été formellement observée que dans le degré carré de Niamey (Leblanc *et al.*, 2008). On verra plus bas qu'il est possible d'en étendre l'information au-delà de cette région.

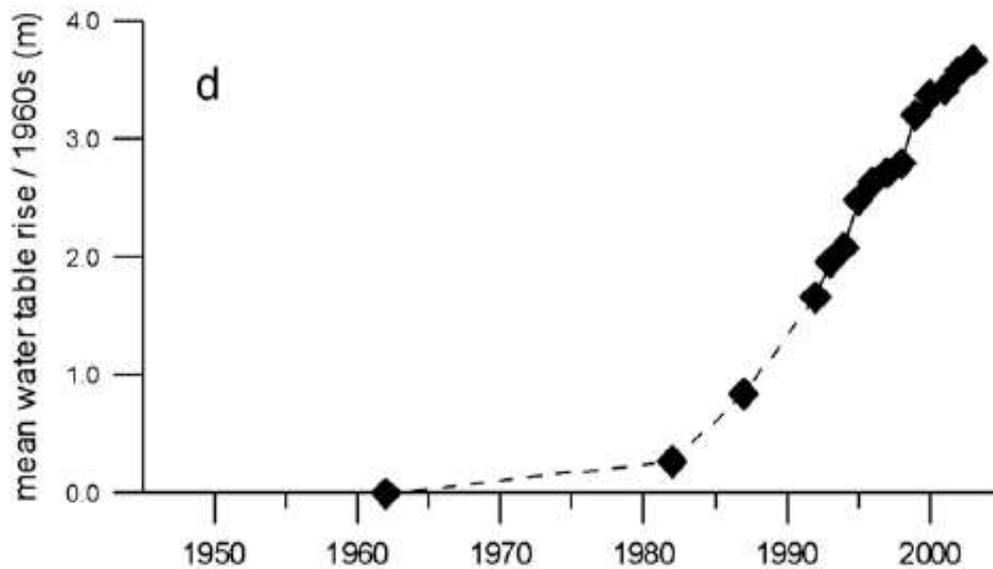


Figure. 11. Le paradoxe de Niamey (Leduc *et al.*, 1997) et sa principale manifestation : la remontée de la nappe phréatique du CT3 depuis 1950 (Massuel *et al.*, 2006).



Fig. 12. Affleurement de la nappe du CT3 au fond du Dallol Bosso (près de Harikanassou) ; janvier 2004

Cependant, on peut tout à fait conclure que le « paradoxe de Niamey » (la hausse de la nappe depuis le début de la sécheresse dans le degré carré de Niamey) est une conséquence du « paradoxe du Sahel » (la hausse des écoulements depuis le début de la sécheresse dans tous les bassins sahéliens contrôlés).

Au contraire, dans le bassin du lac Tchad (figure 12), pourtant situé exactement à la même latitude que la partie ouest du bassin des Iullemeden (figure 13) (dans laquelle se trouve le degré carré de Niamey), la baisse des précipitations après 1968 s'est traduite par une baisse du niveau des nappes souterraines sous une grande partie de l'ancien « grand » lac (figure 14) (Zaïri,

2008). Tout comme la nappe du CT3 des Iullemeden est alimentée principalement par l'infiltration sous les mares, celle du Lac Tchad est principalement fournie par l'infiltration sous le lac. Mais, alors que l'eau de surface en surplus dans la région de Niamey est « autochtone », les eaux qui alimentent le Lac Tchad (par ailleurs l'objet d'une expertise collégiale de l'IRD ; Lemoalle *et al* 2014) sont allogènes ; elles proviennent de zones soudaniennes plus méridionales par l'intermédiaire du Chari et du Logone (Lemoalle *et al.*, 2012). Or, tout comme les cours d'eau soudaniens de l'Ouest (Sénégal Gambie, Niger), ces deux cours d'eau ont vu leurs débits baisser fortement avec la sécheresse (voir Chari, figure 13, chapitre 2). Ceci n'a pas manqué de provoquer une forte réduction de la surface du lac, dont la surface s'est réduite de plus de 90% en 4 décennies (Zaïri, 2008). Toutefois, il est possible que la tendance se soit inversée depuis les observations de Zaïri (2008) ; en tout cas, il semblerait que dans la basse vallée de la Komadougou-Yobé au moins, le niveau de la nappe quaternaire soit plutôt en train de remonter depuis la fin de la décennie 2000-2010 (Genthon *et al.*, 2015). Ce pourrait être en lien avec la rapide progression de la petite irrigation, la culture du poivron connaissant un essor certain dans cette région (Luxereau *et al.*, 2012 ; Lemoalle *et al.* 2014).

Le lac Tchad est par ailleurs l'objet de projets de transfert d'eau depuis le bassin du Congo, soit par l'Oubangui, soit par l'Uélé supérieur (Lemoalle *et al.*, 2014 ; Prodi, 2014) afin de tenter de lui faire reprendre sa taille d'avant la sécheresse ; ces projets sont très controversés car d'une part le passé a déjà vu de longues périodes durant lesquelles on a eu un « petit Lac Tchad » proche de l'actuel, d'autre part, ce « petit lac » ne semble nullement menacé à l'heure actuelle (Lemoalle *et al.*, 2014). On n'observe pas de processus tels ceux connus par la Mer d'Aral, mais une stabilisation à un niveau de « petit lac » (figure 15). Enfin plusieurs millions d'habitants, au Tchad, au Nigeria, au Cameroun et au Niger, occupent désormais l'ancien emplacement du lac, avec des activités à forte intensité de main d'œuvre (jardinage, élevage intensif, pêche, etc..) : que faire de ces populations en cas d'expansion du lac ?



Figure 13 : Localisation du lac Tchad et de la région de Niamey, à une latitude similaire

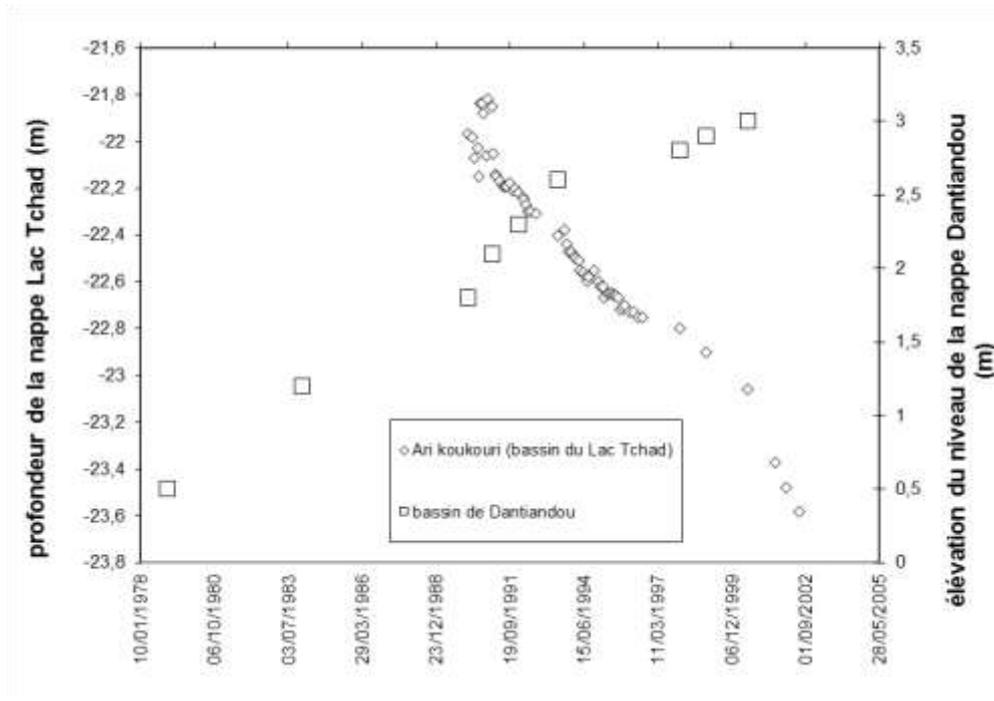


Fig. 14. Opposition entre deux comportements des eaux souterraines à la même latitude (12-13°N) : baisse de la nappe sous le bassin du lac Tchad (Zairi, 2008), hausse de la nappe dans le bassin du kori de Dantiandou, degré carré de Niamey (Massuel, 2005) (attention cette dernière n'est pas en altitude mais indique juste l'ampleur de la montée de la nappe !)

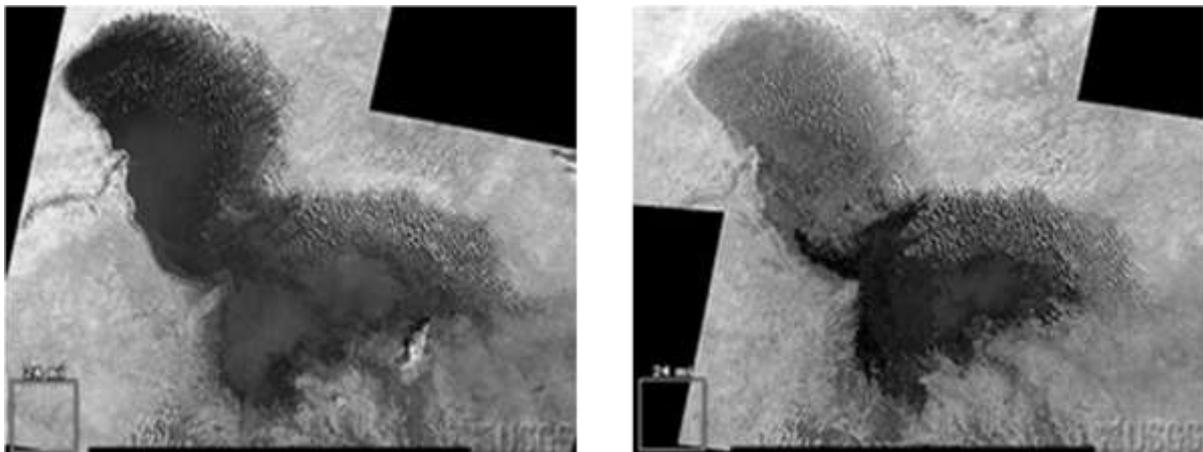


Figure 15 : Etendue du lac Tchad à la fin des années 1970 (à gauche) et en 2007 (à droite) sur images fournies par la NASA, d'après Zairi, 2008.

Localement, dans certaines vallées de la partie occidentale du bassin des Iullemeden, la nappe phréatique du CT3 affleure à la surface là où elle n'apparaissait pas auparavant, du fait de cette hausse de la nappe. La figure 1, en début de chapitre, montre comment la nappe est très proche de la surface quand on s'approche du contact imperméable du socle du Liptako Gourma à l'ouest ; ainsi, près de Niamey, des « mares noires » apparaissent de plus en plus dans les bas-fonds ; ainsi à Bangou Bi (« mare noire » en zarma) à 1 km au nord de la piste de l'aéroport de Niamey (figure 10), mais aussi à Gardama Kouara (25 km NE de Niamey). Plus loin, à Boula

Kouara Tegui, près de Dantiandou (80 km SE de Niamey), grandit d'année en année une mare qui figure sur une photo, toute petite, dans la thèse de Favreau (2000). La nappe affleure surtout, de manière de plus en plus étendue, dans le Dallol Bosso (figure 1 ; et figures 5 et 6), à une centaine de km à l'est de Niamey, cette vallée fossile, aussi profonde que celle du Niger, et qui drainait au Boréal les eaux de l'Aïr, collectant les oueds affluents de l'Azawagh ; cette vallée profonde est localement en train de se spécialiser dans la riziculture, car les sols sont hydromorphes, les zones recouvertes par la remontée de la nappe, de plus en plus étendues (figure 12).

Ces mares sont dites noires car l'eau y est claire, donc on voit bien le fond qui est noir de matières en décomposition ; de plus en plus permanentes (même si elles sont le plus souvent soumises à la fluctuation saisonnière de la nappe), elles se distinguent très bien des mares temporaires qui sont rouges, étant remplies d'eaux ayant ruisselé sur les sols latéritiques (figure 16).

On manque de documentation sur l'extension spatiale de ce « paradoxe de Niamey » en dehors du degré carré (Favreau *et al.*, 2012). Par contre on sait de manière fortuite qu'en d'autres sites sahéliens, on observe aussi une hausse de la nappe phréatique :

- Là où des travaux de restauration des sols et de la végétation ont été entrepris avec succès, comme sur le plateau de Keita (Ader, Niger Central) ou dans certains sites au nord du plateau mossi du centre du Burkina Faso ; dans ces cas, la lutte anti-érosive a entraîné une diminution du ruissellement et un accroissement de l'infiltration (CRESA, 2006; Reij *et al.*, 2009).
- Dans les Niayes (région de bas-fonds de la presqu'île du Cap-Vert) au Sénégal, où l'urbanisation bloque le drainage naturel des zones humides (= niayes en wolof) comprises entre les lignes de dunes ; ces zones humides se remplissent d'eau bien plus qu'auparavant, le ruissellement augmentant très rapidement dans leur impluvium de plus en plus construit et urbanisé ; cela cause l'élévation du niveau de la nappe, contribuant aux inondations, de plus en plus fréquentes dans la ville de Dakar et ses environs immédiats (Maugis *et al.*, 2009, ont expliqué un peu plus au nord le fonctionnement hydrogéologique des Niayes).

A l'inverse, dans le secteur exoréique du massif du Liptako Gourma, à l'ouest du fleuve Niger, le peu d'information disponible évoque une sévère baisse du niveau des eaux souterraines ; celles-ci sont constituées de petits aquifères remplissant les zones d'altérites du socle granitique. Il y a un manque notoire d'informations concernant ces réserves qui seraient en forte baisse ; ceci est facile à corréliser avec le très fort accroissement des ruissellements sur cette même zone, mais demande à être vérifié. On observerait aussi, dans la même zone, un engorgement des nappes et vallées alluviales, qui auraient du mal à absorber l'eau qui ruisselle de plus en plus en provenance des interfluves ; ces informations ont été rassemblées auprès d'éleveurs et paysans de la région, mais ne reposent sur aucune mesure ni observation.

Quoiqu'il en soit, dans les aquifères de socle, la ressource reste très localisée du fait de la faible perméabilité des altérites (entre 10 et 100 fois plus faible que dans le CT3 par ex ; *comm. pers. de Pierre Genthon*) ; l'essentiel de l'eau disponible est donc celle qui s'est infiltrée localement ; comme on peut le voir sur la figure 17, à Ouagadougou, le niveau piézométrique répond très vite à la variation des précipitations. Dans ce contexte, le déboisement entraîne de toutes façons un accroissement du ruissellement, donc la nappe n'en profite que si l'eau se stocke dans les bas-fonds et peut alors s'infiltrer ; sinon, on doit assister à une diminution de la recharge par diminution de l'infiltration.



Figure 16 : une mare « noire » (bleue, à gauche), Bangou Bi (voir figure 10 ci-dessus), à 3 km au nord du bout de la piste de l'aéroport de Niamey, un affleurement de la nappe ; les deux grandes mares à droite sont plus basses, donc aussi essentiellement dues à l'affleurement de la nappe, mais étant situées dans une vallée plus grande, elles ont déjà collecté, ce 12 juin 2005, des eaux de ruissellement, faisant croire à une « bangou kirey » mare rouge temporaire d'hivernage.

L'IRD a longtemps été renommé pour son équipe d'hydro pédologues ; ceux-ci ont été parmi les pionniers de l'hydrologie et de la pédologie africaine, et il revient en grande partie à des chercheurs et techniciens de l'IRD et des chercheurs africains qui leur étaient associés (au Niger, au Mali, au Burkina Faso en particulier) d'avoir mis le doigt sur ce qui reste probablement la cause première du paradoxe du Sahel : il s'agit de l'encroûtement des sols, et on y reviendra au chapitre 5. En particulier, le catalogue des états de surface de la Région Sahélienne (Casenave et Valentin, 1989) a permis de définir ces types d'encroûtement et les valeurs de conductivité hydraulique associées aux croûtes définies

Comme on le verra au chapitre 7 cela mène jusqu'à l'extension des bassins versants par rupture d'endoréisme, des secteurs endoréiques devenant exoréiques du jour au lendemain.

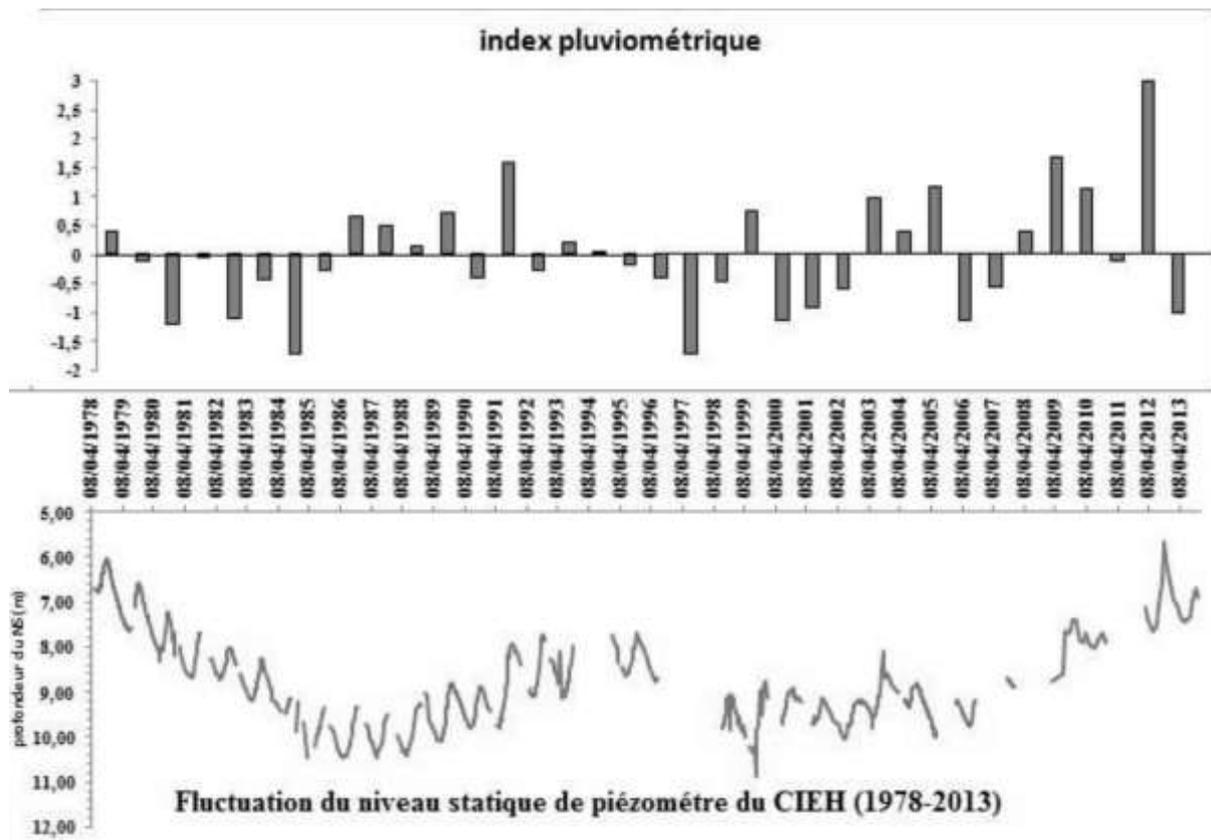


Figure 17 : évolution d'une nappe de socle : la piézométrie à la station CIEH (Ouagadougou) montre une remontée de la nappe calquée ces dernières années sur celle de la pluviométrie (source Yameogo, 2008, actualisée).

Conclusion

Le paradoxe hydrologique du Sahel continue à faire parler de lui ; le débat, les observations, sur le reverdissement, indéniable, de grands espaces nord sahéliens en particulier, sur la poursuite de l'encroûtement des sols en d'autres sites (le bassin du Niger Moyen), montrent l'enjeu que cette dégradation représente pour l'avenir de cette région. Le Sahel est plutôt défavorisé par des sols pauvres et fragiles, par un climat rude et ses neuf mois de saison sèche, l'irrégularité interannuelle des pluies ; cette région a été la plus touchée d'Afrique de l'Ouest par le fort épisode de déficit pluviométrique (le plus important signal du changement climatique jamais observé) qui est à présent terminé mais pourrait se reproduire. Les causes principales de ce paradoxe sont connues depuis plus de deux décennies, à savoir l'encroûtement consécutif au changement trop rapide d'utilisation des sols qui n'a pas permis de modifier la traditionnelle rotation culture jachère, qui assurait le maintien de la faible fertilité naturelle des sols sableux de cet espace semi-aride. S'y ajoutent localement, en particulier à l'ouest du Niger, l'expansion de l'exorérisme, une surexploitation drastique du milieu près des villes en lien avec une croissance démographique restée très élevée. Et plus généralement, un retour des événements pluvieux à fort cumul journalier (qui ne dépassent toutefois pas encore leurs niveaux des décennies « humides » 1950 et 1960), et dans le moyen Niger, un ensablement qui empêche le bon écoulement des eaux. Cet élément rend dramatique dans le cas de Niamey un phénomène observé dans toute l'Afrique de l'Ouest, à savoir une urbanisation très rapide et parfois anarchique qui n'a pas empêché l'installation d'habitation et d'activités dans des zones réputées

(et oubliées ??) comme inondables, telle une grande partie de la rive droite du Niger dans la ville de Niamey. Mais les inondations de Bamako en 2013, de Dakar en 2012, d'Agadès et Ouagadougou en 2009, de tout le nord Togo et nord Ghana, du sud du Burkina Faso en 2007 (Tschakert *et al.*, 2010) sont là pour montrer que le ruissellement est au rendez-vous, et que les preneurs de décisions doivent revenir à un fondamental : **tout faire pour faire infiltrer l'eau là où elle tombe, afin d'en tirer un profit maximum pour les cultures et végétations naturelles et limiter ainsi risques d'étiage et d'inondations en aval.**

Comme le résumant Favreau *et al.* (2012) : « *L'évolution à long terme du bilan de l'eau est le résultat d'une baisse de l'efficacité dans l'usage de l'eau par la végétation naturelle pendant les épisodes de pluie intense de la mousson. Durant les dernières décennies, cette perte d'efficacité a provoqué de l'écoulement hortonien, de la perte en sol, du ravinement et l'accroissement des mares dans les bas fonds* » (Favreau *et al.*, 2012).

Il est intéressant de noter que de nombreux terroirs sahéliens connaissent depuis une, deux ou trois décennies, une évolution vertueuse vers une intensification écologique, et que cela est sans doute lié à l'augmentation, rapide, de la densité de population (passée de 5 à 10 hab/km² en zone rurale sahélienne au moment des indépendances, à 40-50 parfois plus, aujourd'hui). Et cette évolution, parfois encouragée par des ONG, s'est la plupart du temps réalisée spontanément, et en s'appuyant sur des savoirs locaux, ou par la diffusion de ses savoirs, locaux, à l'échelle régionale. Ester Boserup (1965), Tiffen *et al.* (1994) font des émules, et force est de constater que malgré les discours catastrophistes, et malgré une sécheresse qui a été le plus fort signal de changement climatique enregistré depuis la normalisation des mesures en 1850, malgré une température moyenne accrue de près de 1.5°C en 40 ans, **le Sahel est toujours là, les Sahéliens aussi**, et que ces derniers sont, suivant les secteurs, entre 3 et 4 fois plus nombreux en zone rurale qu'au début de la sécheresse de 1968-1995. Et c'est exactement le type de processus que décrivent Luxereau *et al.* (2012) au bord du Lac Tchad !

ENCART : les limites du paradoxe de Niamey ?

Dans le cadre du programme AMMA, il était important de connaître l'évolution des ressources en eau en Afrique de l'Ouest. Aussi, une des interrogations majeures qui s'est posée d'emblée concernait l'extension spatiale des paradoxes du Sahel et de son corollaire en zone endoréique, le paradoxe de Niamey. On a vu plus haut que, concernant le paradoxe du Sahel, il convenait d'être prudent, car si toutes les stations hydrométriques sahéliennes montrent un accroissement des écoulements, cela ne concerne que les bassins équipés, qui sont loin de représenter la majorité de l'espace.

Concernant le paradoxe de Niamey, il paraissait important de comprendre si tout le bassin des Iullemeden était concerné ; nous avons donc assuré le suivi, durant la saison sèche 2006-2007 d'une série de puits sur la route de Niamey à Maradi ; il s'agissait de profiter de tournées bisannuelles qui avaient alors lieu dans le cadre de l'observatoire AMMA CATCH de Niamey à Zinder afin d'y relever une série de stations pluviométriques.

Huit points de mesure furent suivis à la sonde piézométrique durant trois années complètes. Ces puits et forages sont représentés sur la figure 1 ci-dessous. Le puits de Mountseka fut abandonné assez vite du fait de sa difficulté d'accès.

Les mesures sont représentées sur la figure 2, et permettent de constater que sur les 7 points de mesure restant, seuls deux ont enregistré des baisses du niveau de leur nappe. Les 5 autres ont enregistré une hausse de la nappe. On remarquera que ce sont les deux puits ayant les eaux les moins profondes (quelques mètres) qui ont connu une baisse du plafond de la nappe.

La prudence est toutefois de mise dans la mesure où seules trois années ont été documentées (celles-ci ont été interrompues par les experts hydrogéologues de AMMA fin 2009) et que le nombre de points de mesure est petit, que deux des puits ont connu une baisse de niveau.

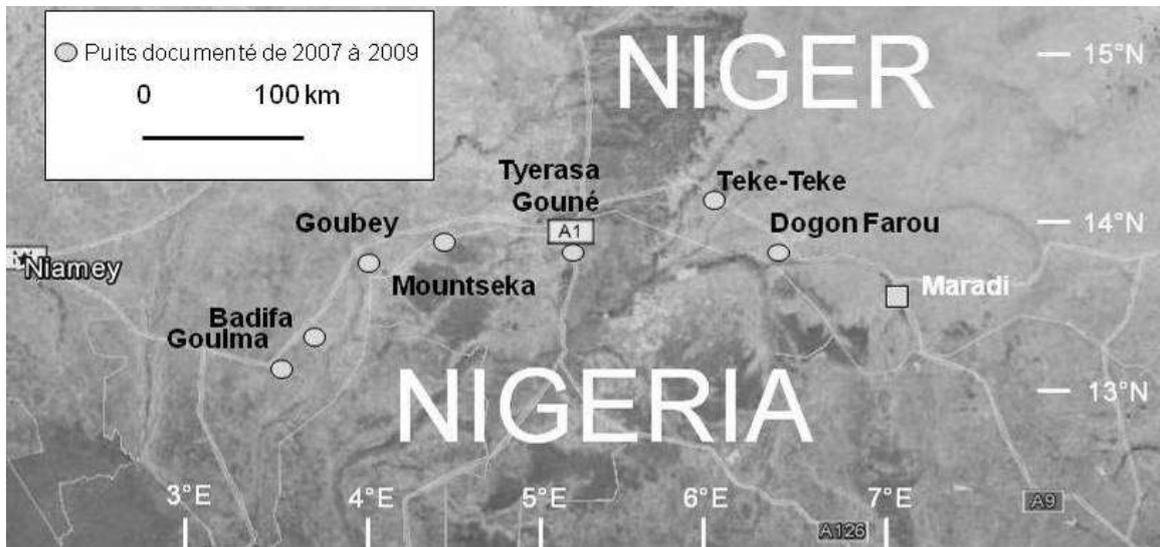


Figure 1 : localisation des points de mesure sur la route Niamey-Maradi

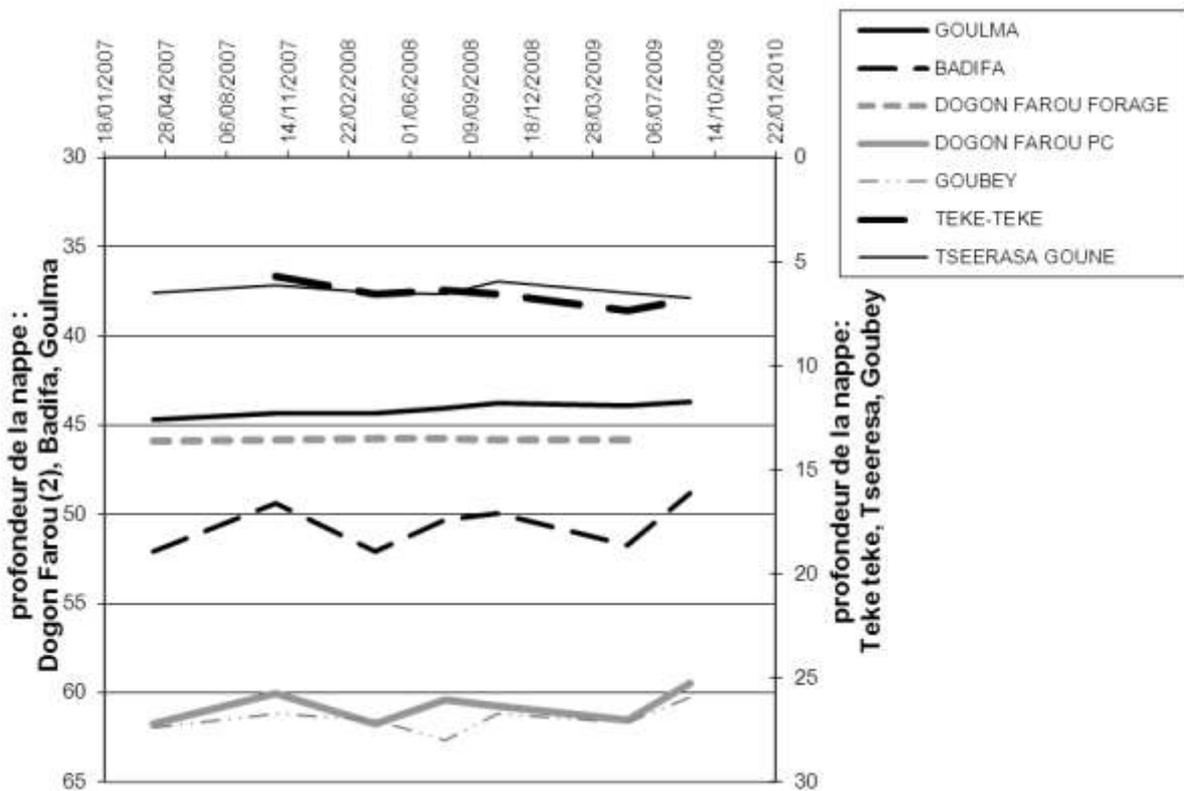


Figure 2 : relevés des suivis piézométriques faits de début 2007 à fin 2009 sur la route de Niamey à Maradi

Des travaux récents (Favreau *et al.*, 2012) ont permis d'estimer à au moins 100000 km² la superficie des régions du Niger central, dans le bassin des Iullemeden, où s'applique le « paradoxe de Niamey » et cette remontée de la nappe phréatique depuis le début des années de sécheresse, et en lien avec un accroissement des mares, lui-même lié au « paradoxe du Sahel ».

En résumé,

- **L'occupation de l'espace par les sociétés rurales s'est significativement étendue ces dernières décennies ; elle s'est accompagnée d'une diminution des jachères ; ce pourrait être l'élément déterminant dans l'augmentation de la part de l'eau de pluie qui ruisselle en arrivant à la surface du continent**
- **Cette extension des cultures est générale en Afrique de l'Ouest soudano-sahélienne et elle s'est traduite par une extension des mares ; ces dernières constituant les principales zones de recharge dans les secteurs endoréiques, ceux-ci ont connu une augmentation du niveau des eaux souterraines pendant que les zones exoréiques voyaient augmenter leurs écoulements**

CHAPITRE 5

L'encroûtement des sols, ou comment sécheresse se met à rimer avec inondation... et désertification....

« La diminution de la pluviosité a pour première expression dans le paysage l'appauvrissement de la végétation et l'accroissement des zones dénudées. Les sols nus et appauvris en matières organiques deviennent instables et sujets à l'érosion et/ou aux phénomènes d'encroûtement. Cette modification des états de surface due aux actions conjuguées d'une longue période sèche et de pratiques culturales extensives font descendre bien au sud les paysages types du Sahel » (Albergel et Valentin, 1988).

En guise d'introduction, laissons parler de grands connaisseurs des jachères sahéliennes :

« En zone semi-aride de l'Ouest africain, la croûte d'érosion, caractérisée par une fine pellicule plasmique (mélange de particules fines d'argile et de limon) colmatant un horizon sous-jacent tassé, serait un des états de surface qui influencerait de façon extrême l'ensemble de ces propriétés (Casenave et Valentin, 1992). Au Sahel, le système traditionnel d'utilisation des sols consiste, généralement, en une phase de culture de courte durée suivie d'un abandon cultural plus ou moins long (ou phase de jachère) après la baisse des rendements. Dans la majeure partie de la zone sahélienne, ce système a aujourd'hui conduit à la saturation des agrosystèmes dont la principale caractéristique est l'augmentation de surfaces cultivées (Haywood, 1981) aux dépens, d'une part, des terres marginales et, d'autre part, des jachères dont la durée a été de plus en plus raccourcie ». « La forte corrélation observée entre ce phénomène et l'accroissement des surfaces érodées (Albergel et Valentin, 1988) pourrait, assez rapidement, conduire à l'installation d'un système écologique dégradé à niveau de productivité très bas (Floret et al. 1993) ». « Des résultats de l'étude de l'encroûtement pelliculaire des sols dans le paysage agraire de Banizoumbou, il ressort que la mise en culture, en favorisant l'allègement de la texture par érosion surtout hydrique et éolienne et en remaniant la couche de surface par les façons culturales répétitives, contrarie fortement la formation et l'extension de la croûte d'érosion. Lorsque, en revanche, le niveau d'anthropisation est demeuré faible (précédent cultural « récent ») et que la parcelle est en jachère, les sols ont tendance à subir un encroûtement très sévère ; cette forte susceptibilité à l'encroûtement des sols dès qu'ils sont mis en jachère serait probablement favorisée par l'enrichissement superficiel des sols en éléments fins éoliens piégés par la végétation qui se réinstalle après l'arrêt de la culture et par la baisse de l'activité des termites liée à l'absence des résidus de récolte. Aussi, l'efficacité de la jachère comme technique de restauration de propriétés de l'hydrodynamique de surface des sols sableux fins au Sahel ne serait optimale que pour une fourchette d'âge de jachère comprise entre 4 et 7 ans et en dehors de laquelle son influence tendrait plutôt à être négative » (Ambouta et al. 1996).

Si les chercheurs de l'Orstom-IRD et leurs partenaires sahéliens (du Niger en particulier) ont bien montré comment l'encroûtement réduisait fortement la capacité de rétention en eau des sols, conduisant à une forme de « sahélistation » ou de désertification, il reste à vérifier si l'accroissement des coefficients de ruissellement est à l'origine du « paradoxe du Sahel ». Plus récemment Moussa Malam Abdou (2014) dans sa thèse a démontré le rôle des pratiques culturales sur l'infiltrabilité des sols, en particulier en zone de socle.

1 - l'encroûtement, malédiction du Sahel

Le grand mérite d'Ambouta *et al.* (1996), dans la foulée des travaux de Albergel et Valentin (1988), est d'avoir cherché à déterminer les facteurs de formation des croûtes au Sahel. Dans le cadre du programme AMMA, de nombreuses mesures ont été effectuées afin de connaître les propriétés hydrodynamiques des sols (Le Breton, 2012 ; Mamadou, 2012, Descroix *et al.*, 2012a) ; on a pu ainsi déterminer avec précision quelles étaient les valeurs de ruissellement et de conductivité hydraulique à attendre des sols et des états de surface et de diverses occupations des sols caractéristiques de la région. Le tableau 1 ci-dessous résume ces données pour les quatre types de couverture les plus fréquents (déterminés ici comme des états de surface).

Tableau 1. Valeurs de coefficient de ruissellement et conductivité hydraulique à saturation sur les principaux états de surface répertoriés dans le degré carré de Niamey (Descroix *et al.*, 2012)

Etats de surface	coefficient de ruissellement %	Conductivité hydraulique à saturation mm.h ⁻¹
Surface culturale cultivée en mil	4 +/- 1.4	172 +/- 79 (20)*
Sols structurés sous jachère	10 +/- 4	79 +/- 41 (20)
Croûte biologique sur jachère ancienne	25 +/- 7	18 +/- 12 (30)
Croûte d'érosion sous culture et jachère	60 +/- 8	10 +/- 5 (30)

* (nombre de répétitions)

On peut constater que par rapport à un champ cultivé non dégradé, l'encroûtement produit un accroissement très fort du coefficient de ruissellement, ce qui s'explique par la très forte baisse de la conductivité hydraulique à saturation (mesurée ici par infiltromètre à disque et à succion contrôlée).

Ces valeurs de ruissellement et de conductivité sont les moyennes de toutes les mesures réalisées de 2003 à 2012 dans le cadre du programme AMMA par une équipe d'une bonne demi-douzaine de chercheurs et étudiants. Elles sont donc relativement robustes et, ayant été mesurées sur 4 sites différents, plutôt représentatives de cette région, malgré des écarts-types très forts qui sont comme partout le reflet de l'extrême variabilité spatiale des caractéristiques des sols. Elles diffèrent de celles fournies par Malam Abdou (voir plus loin) qui ont-elles l'avantage d'avoir été réalisées dans seulement deux sites (un en sédimentaire l'autre en

cristallin) mais par la même personne. Si les valeurs absolues de Ks sont assez éloignées (un écart de 1 à 3), l'ordre des types d'états de surface du plus filtrant au plus encroûté reste le même. Les données présentées dans le tableau 1 suffisent à expliquer le rôle hydrologique primordial que sont appelées à jouer les zones de sols encroûtés. Elles sont en amont des processus, l'explication de l'essentiel des modifications morphologiques observées ces dernières décennies dans la région de Niamey et du Fakara.

Albergel et Valentin (1988), Casenave et Valentin (1989) puis Valentin et Bresson (1996) ont montré comment l'accélération des rotations cultures/jachères dans un système dont la période de repos (jachère) est la seule méthode de fertilisation (ou plutôt de récupération de la fertilité) conduisait à une fatigue des sols ; même les sols très sableux du Sahel (plus de 90% de sable mesurés au granulomètre laser) ont tendance à s'encroûter très facilement dès qu'ils sont mis à nu du fait entre autres de la forte intensité moyenne des précipitations. Ambouta *et al* (1996) ont mis en évidence le lien entre jachère et encroûtement.

Par ailleurs, Le Breton (2012) a montré que sur les bassins expérimentaux de Wankama, 43% de la précipitation annuelle tombait avec une intensité supérieure à 60 mm/h, 75% tombant avec une intensité supérieure à 30 mm/h. Les sols nus sont donc soumis à un splash intense ; c'est le cas de toutes les zones cultivées en début de saison tant que le sol n'est pas couvert par les cultures sortantes.



Figure 1 : dépression hydro-éolienne (DHE) récente sur le plateau de Komakoukou, près de Banizoumbou (65 km à l'est de Niamey)

Les croûtes se forment en principe en priorité sur des zones peu pentues ; elles apparaissent le plus souvent au départ sous forme de « dépressions hydro-éoliennes » formées en saison sèche par le vent tourbillonnant qui exagère la moindre dépression pré-existante. Ces dépressions ont

ensuite tendance à devenir coalescentes, ce qui favorise grandement l'écoulement de l'une à l'autre, les processus hydrologiques prenant dès lors le relais des processus éoliens du début.

La figure 1 montre une dépression hydro-éolienne isolée sur un plateau latéritique, celui de Komakoukou, largement recouvert de placages sableux. La figure 2 est une photo prise du drone PIXY de l'IRD Niamey, piloté par Jean-Louis Rajot, chercheur à l'IRD en pédologie, sur la partie aval du bassin de recherche de Wankama. Toutes les tâches claires et rosées sont des zones encroûtées (croûte ERO) ; elles sont en grande partie coalescentes et représentent plus de la moitié de la surface totale de cette zone, reflétant une très forte dégradation du terroir ici tout proche du village de Wankama (500 à droite –Est- de la photo).

Sur la figure 3 on distingue une zone sévèrement encroûtée coupée par une ravine franche (récente) et très marquée, les bords escarpés reflétant la résistance du sol encroûté ; la formation de la ravine a été facilitée par le fort ruissellement sur la zone encroûtée, qui a concentré les flux d'écoulement dans le bas-fond. Le décapage, par le vent et l'eau, du sol en voie d'encroûtement déchausse les racines des arbres et arbustes (Figure 4).

Sur les sols structurés caractéristiques des jachères anciennes se forme, au bout de 5-6 ans une croûte biologique (des algues en général ; figure 5). Celle-ci, bien qu'hydrophobe et peu perméable (elle facilite bien le ruissellement), n'est pas du tout un signe de dégradation des sols mais au contraire le témoin du rétablissement d'une certaine fertilité du sol recouvert.

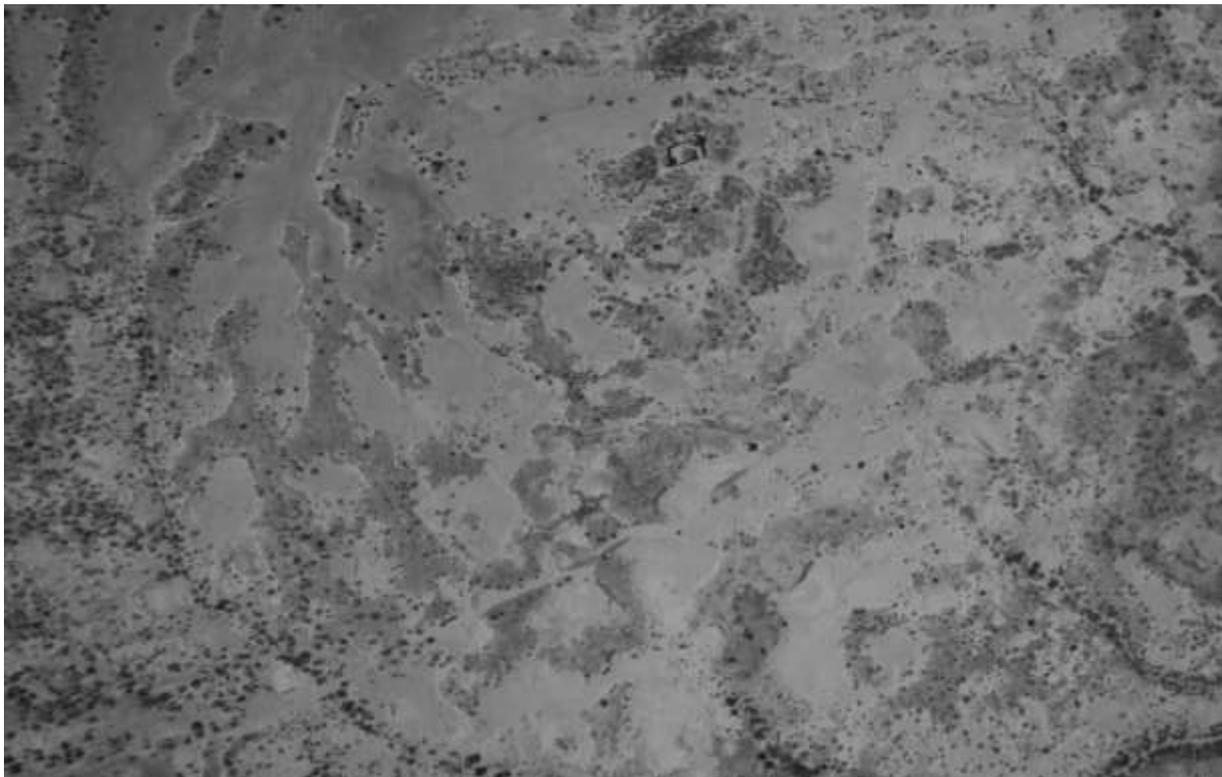


Figure 2 : vue aérienne de la partie aval du bassin de Wankama, où les DHE sont devenues coalescentes, et constituent un secteur en dégradation totale rapide (courtoisie J-L Rajot, IRD)



Figure 3

Figure 3 : encroûtement sous un rebord de plateau, entraînant un fort ruissellement ayant causé la formation d'une grosse ravine guidée par la piste de KomaKoukou à Banizoumbou

Figure 4 : dégradation rapide d'un glacis sous replat latéritique sur la piste de Banizoumbou à Sabara Bangou, juste avant le gué du kori de Sama Dey vers le nord ; déchaussement des gueira senegalensis

Figure 5 : même secteur : croûte algale sous un gueira, formant corniche, témoignant de la dégradation d'une iachère ancienne

Figure 4



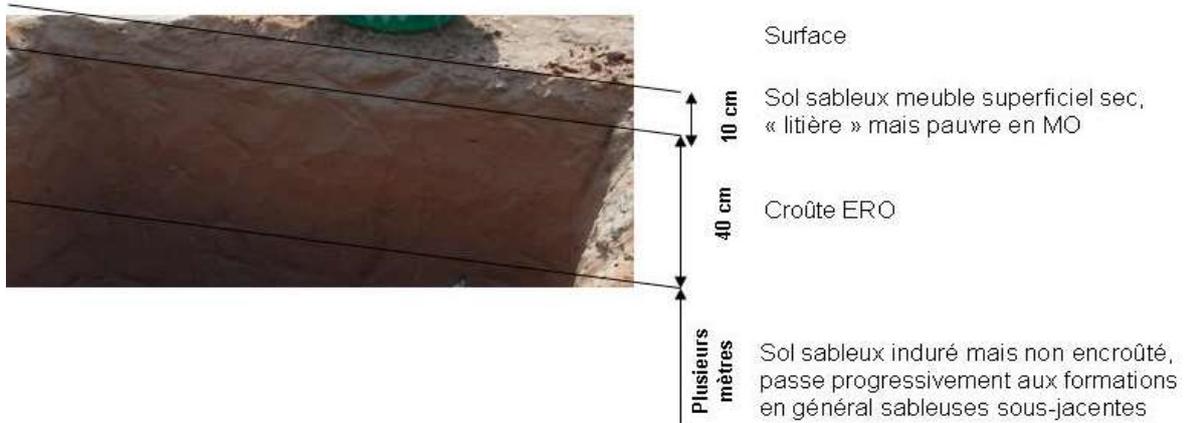
Figure 5



Figure 6 : La croûte ERO (Casenave et Valentin, 1989) ; ici dans une fosse creusée pour réaliser des tests d'infiltromètre à suction contrôlée en profondeur au milieu du bassin de Wankama (Niger) ; le rectangle noir est agrandi dans la figure 7.



Figure 7 : croûte ERO d'une quarantaine de centimètres d'épaisseur



2 - Encroûtement, jachère et travail du sol

Le travail de Malam Abdou (2014) a permis de caractériser et de suivre l'évolution de la conductivité hydraulique de la surface du sol sur un petit bassin sur socle de l'ouest du Niger. Ces zones se caractérisent par une mosaïque des surfaces cultivées et des surfaces en jachère. Partout, la conductivité est minimale sur les trois premiers centimètres par rapport à la couche sous-jacente. Le suivi saisonnier montre une quasi-stationnarité de la conductivité des surfaces en jachère (âgée de cinq à sept ans) autour de 20 mm.h^{-1} qui s'explique par la faible influence de la végétation herbacée sur la structure superficielle du sol. Sur les surfaces cultivées en revanche, le suivi (réalisé en suivant le protocole décrit figure 8) montre que ces propriétés évoluent sous l'effet du sarclage qui opère une redistribution superficielle de la structure et de la macroporosité qui se colmate au fur et à mesure que la surface reçoit la pluie. L'effet du sarclage sur l'infiltration qui va jusqu'à augmenter la conductivité à 120 mm.h^{-1} , s'estompe dès

que la surface sarclée enregistre un cumul de pluie de l'ordre de 70 mm (figure 9). Après un cumul de pluie de l'ordre de 200 à 250 mm, la surface sarclée présente la même valeur de conductivité que les surfaces de type ERO, ce qui traduit l'encroûtement progressif des surfaces cultivées. L'encroûtement est d'ailleurs plus rapide lorsque le sarclage est effectué sur un sol sec du fait de la faible agrégation qu'entraîne le travail du sol dans ces conditions (Figure 10). Cette étude permet ainsi d'établir le lien direct entre la mise en culture, l'encroûtement et l'augmentation du ruissellement dans les zones cultivées. Ceci a pu être mis en évidence à l'échelle saisonnière. Il reste, à l'avenir, à concevoir et mettre en place des protocoles permettant de saisir l'effet de la mise en culture à l'échelle pluriannuelle (Malam Abdou *et al.*, 2015).

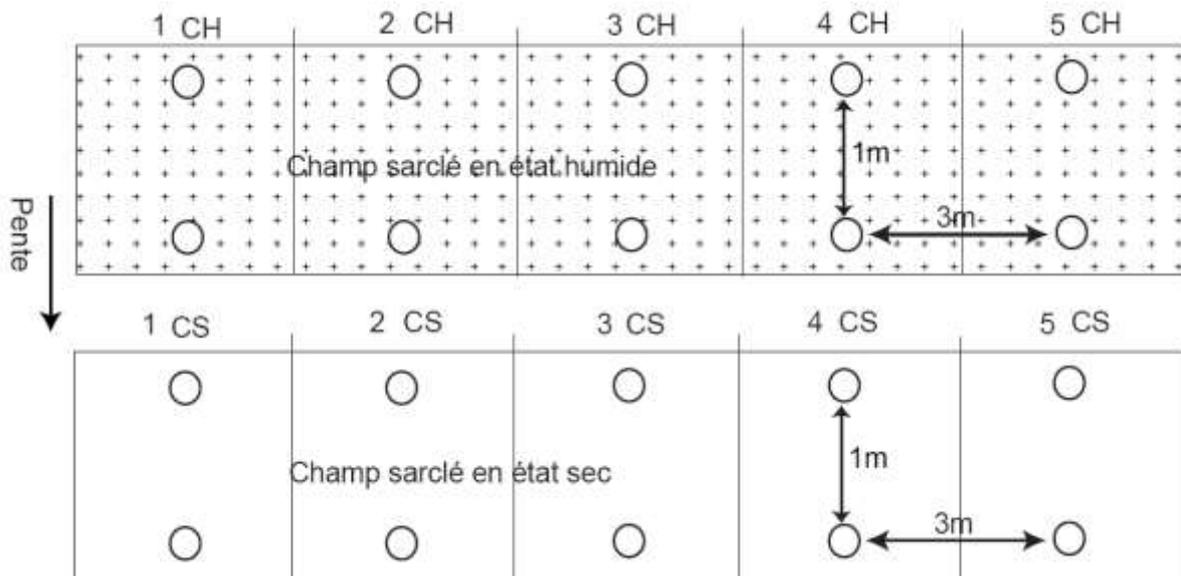


Figure 8. Protocole de suivi temporel de la conductivité sur les champs sarclés en état humide et en état sec pour la saison 2013 (pas à l'échelle). CH = champ cultivé en état humide ; CS = champ cultivé en état sec (Malam Abdou *et al.*, 2015).

L'analyse comparée de la conductivité en zones cristalline et sédimentaire (fig. 11) suggère les remarques suivantes :

- ✓ sur l'état de surface ERO la valeur de conductivité hydraulique est du même ordre de grandeur en zones cristalline et sédimentaire ;
- ✓ la conductivité de la croûte biologique mesurée sur le site cristallin vaut près du triple de celle mesurée en zone sédimentaire ; inversement, la conductivité de ST (jachère) du site sédimentaire est double de celle du site cristallin.

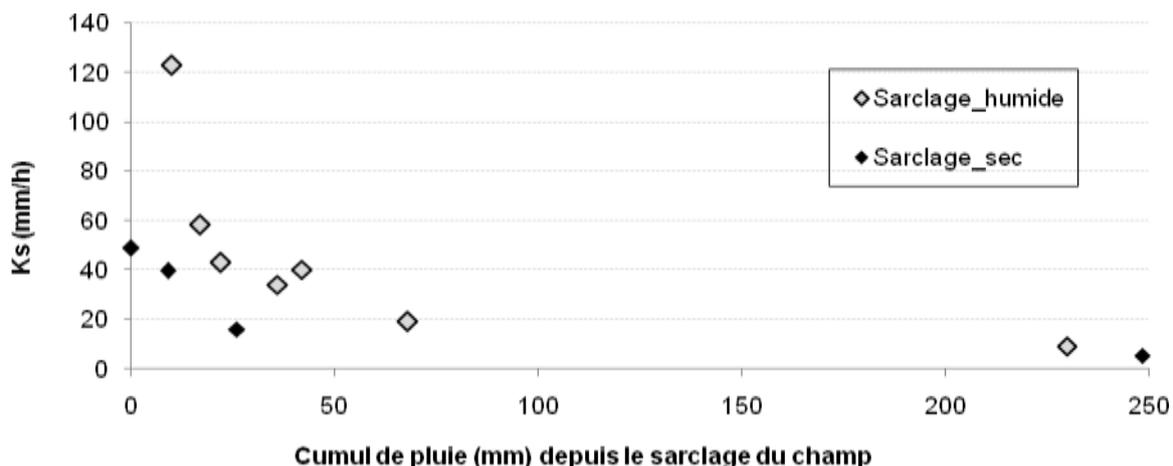


Figure 9. Effet de la teneur en eau lors du sarclage sur l'évolution de la conductivité hydraulique en fonction du cumul de pluie reçu depuis le sarclage. Chaque point correspond à la valeur moyenne des deux mesures (Malam Abdou *et al.*, 2015)..

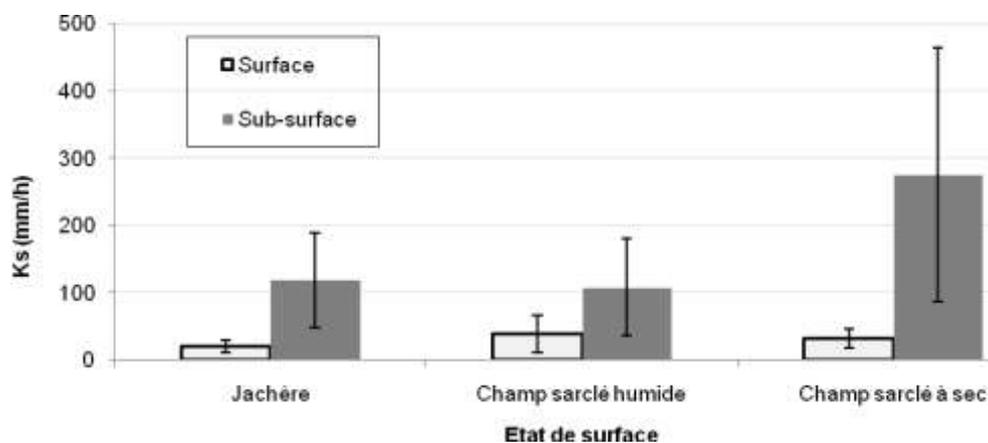


Figure 10. Valeurs moyennes des conductivités mesurées en surface (0-3 cm) et en sub-surface (3-6 cm). Le nombre de répétitions des essais par état de surface est fourni dans le tableau 1. La barre d'erreur correspond à un écart type. (Malam Abdou *et al.*, 2015).

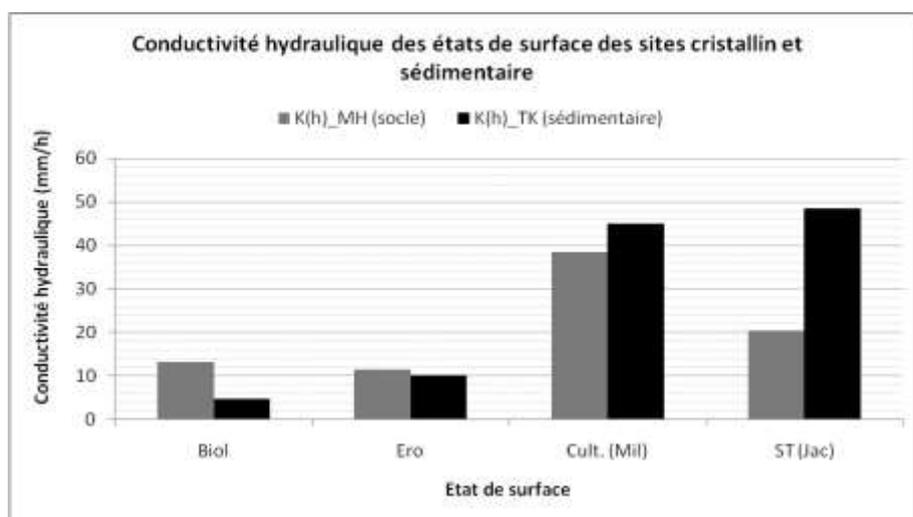


Figure 11. Comparaison de la conductivité hydraulique des états de surface des sites cristallin et sédimentaire (Malam Abdou *et al.*, 2015).

Les conductivités hydrauliques représentées dans ce graphique sont déterminées en surface pour une succion imposée à 10 mm, $K(h = -10 \text{ mm})$ tant pour le site cristallin que sédimentaire.

Elles diffèrent de celles citées au début de ce chapitre, n'ayant pas été faites suivant le même protocole ; mais l'ensemble des mesures utilisées là ont été faites par Moussa Malam Abdou et suivant un même protocole.

3- de l'encroûtement aux inondations

Le Sahel est la région semi-aride emblématique par excellence, la plus médiatisée ces dernières décennies en lien avec les processus de « désertification » et la sévère sécheresse qu'a connue cette région, comme une grande partie de l'Afrique de l'Ouest, de la fin des années 1960 aux années 1990. Les deux pics de sécheresse des années 1973-74 et 1984-85 ont été dramatiques pour les sociétés mais également pour le milieu.

Et pourtant, le modelé et la topographie sont entièrement dessinés par le cycle de l'eau et s'il est un élément qui est vraiment typique des paysages, des usages et de la structuration de l'espace au Sahel, c'est bien les mares ; du fait de la péjoration climatique ayant suivi la phase humide Atlantico-Boréale (Faure, 1986), de nombreuses vallées ont été fermées par des cordons dunaires, ou bien souvent les cours d'eau n'ont plus eu le débit suffisant pour s'extraire des accumulations sableuses ; des vallées se sont fermées et l'endoréisme s'est généralisé dans les secteurs sédimentaires. Les zones de socle comme le Liptako Gourma ont, elles, continué à « produire » suffisamment d'eaux de ruissellement pour assurer une pérennisation des cours d'eau, la plupart étant d'ailleurs intermittents (écoulement saisonnier durant la mousson et les semaines ou les mois suivants, en fonction de la taille du bassin).

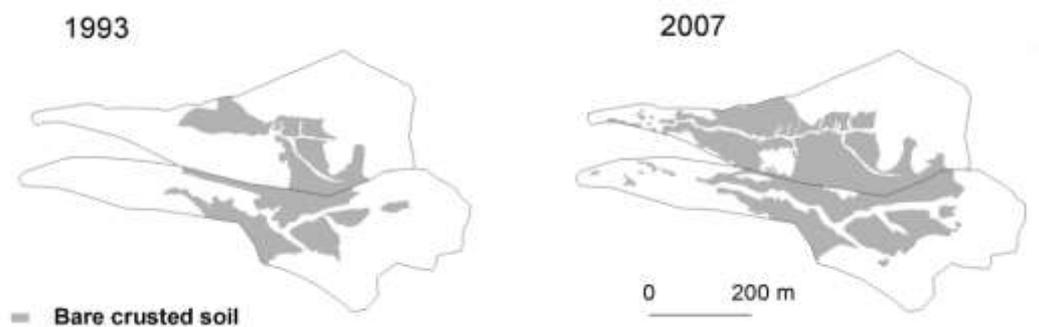


Figure 12. Cartographie diachronique montrant l'extension des zones de sols encroûtés des bassins de Tondi Kiboro (à partir de Souley Yéro, 2008)

On a repris ci-après en grande partie le chapitre 7 de la thèse de Kadidiatou Souley Yéro « Evolution de l'occupation des sols dans l'Ouest du Niger : Influence sur le cycle de l'eau », soutenue fin 2012 ; ainsi que deux cartes de l'introduction d'un document produit pour le programme ANR ESCAPE (Environmental and Social Changes in Africa : Past, present and future ; son livrable 1.3b) mais sur celles-ci on n'a représenté que les surfaces encroûtées, de type ERO (Casenave et Valentin, 1992). Ces deux cartes résument l'élément clé de la problématique hydrologique sahéenne ; malgré un probable reverdissement, à confirmer et

surtout à caler chronologiquement, on observe une augmentation des surfaces de sols encroûtés ; or celles-ci sont réputées être très ruisselantes (Tableau 1).

La figure 12 montre l'extension des surfaces de sols encroûtés (croûte ERO) des bassins de Tondi Kiboro (deux bassins de 12 hectares environ) entre 1993 et 2007 (Souley Yéro, 2008). Ces dates correspondent à celles pour lesquelles des mesures hydrologiques ont été réalisées dans ces bassins (1991-1994, expérience HAPEX SAHEL, 2004-2011, expérience AMMA). Les surfaces correspondant à la croûte ERO passent de 20% à 40% de la surface totale entre ces deux dates. C'est surtout sous le talus de cuirasse latéritique, dans la partie amont de la jupe sableuse, que cet encroûtement s'est le plus développé, entraînant une forte propension au ruissellement de ce bassin, dès la tête de celui-ci. Cette partie du versant a été mise en culture relativement tôt dans l'historique du terroir de Tondi Kiboro, ce début de versant étant toujours réputé plutôt plus fertile que le reste du glacis.

Dans le bassin du kori de Boubon, qui s'étend sur 160 km² (figure 13), la proportion de sols encroûtés reste pour l'heure bien plus faible (5% en 2005) (Souley Yéro, 2007). Mais comme l'a bien montré Mamadou (2012), ce bassin est devenu très actif en termes de ruissellement et d'érosion ces dernières décennies, ayant lui-même connu une rupture d'endoréisme (voir chapitre 1) avant 1975. Par ailleurs, les zones encroûtées sont proches du talweg, favorisant l'érosion des bas de versants et une rapide fourniture de ruissellement au kori principal.

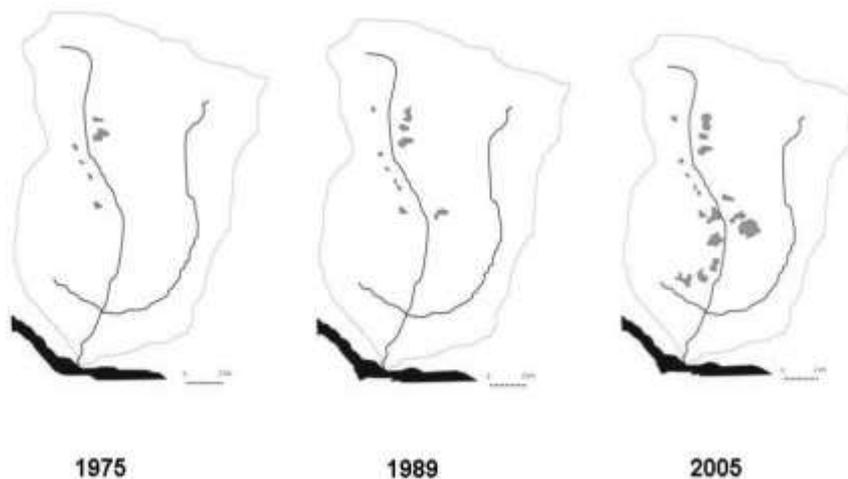


Figure 13. Cartographie diachronique de l'extension des zones de sols encroûtés dans le bassin de Boubon (à partir de Souley Yéro, 2007)

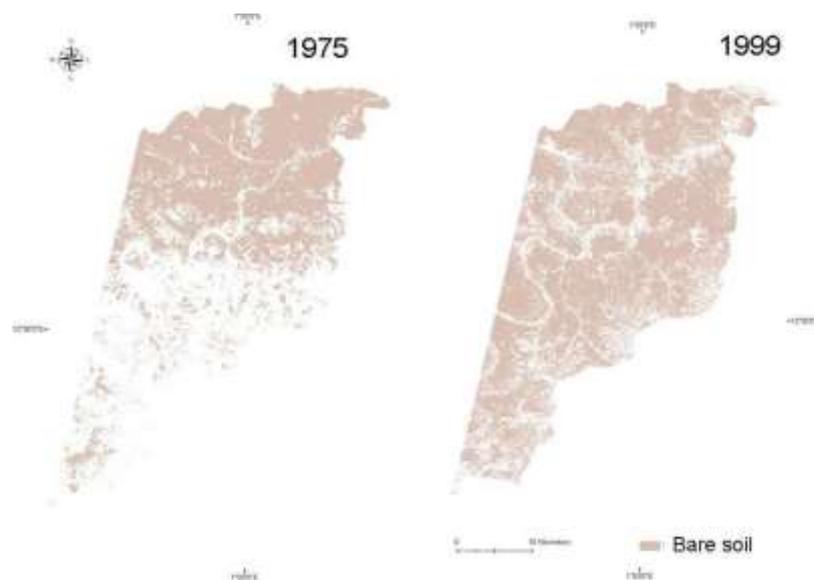


Figure 14. Cartographie diachronique de l'extension des zones de sols nus du bas bassin de la Sirba (Amogu, 2009)

Ces deux travaux précédents ont été réalisés par photo-interprétation, concernant des surfaces peu importantes. Pour des superficies plus étendues, il est difficile de prétendre faire une carte d'occupation des sols à partir de photo aériennes (ce qui a toutefois été fait pour le bassin du Dargol et la partie centrale du DCN, voir chapitre 4). C'est donc par télédétection, et à partir d'images LANDSAT TM que Amogu (2009) a réalisé les cartes d'occupation des sols de parties étendues (plusieurs milliers de km² à chaque fois) de trois bassins versants affluents de rive droite du fleuve Niger : le Gorouol (sahélien), la Sirba (sud sahélien) et la Mékrou (soudanien). La figure 14 représente la partie aval du bassin de la Sirba, et on n'a retenu ici que l'extension de sols nus, sans qu'il soit possible à ce stade, de distinguer par télédétection les sols nus encroûtés de ceux qui ne le sont pas.

Cette augmentation des surfaces de sol nu semble appartenir à une tendance lourde liée à la mise en culture, qui même sans dégradation des sols, laisse le sol à nu une grande partie de l'année. L'accroissement des surfaces mises en culture a été mis en évidence au Niger par Guengant et Banoin (2003) (voir figure 7, chapitre 4), ainsi que la tendance lourde à la baisse continue des rendements, obligeant, pour maintenir une disponibilité alimentaire par habitant constante, à augmenter les surfaces cultivées à un rythme plus rapide que celui de la croissance démographique.

Une des grandes préoccupations des programmes AMMA (Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine) et de l'ANR ESCAPE (Changements environnementaux et sociaux en Afrique : passé, présent et futur), ainsi que d'autres projets en gestation, est la détermination des conséquences des changements d'occupation des sols sur le cycle de l'eau. Il semble évident qu'une extension notable des surfaces sur lesquelles on enregistre par ailleurs, et une faible conductivité hydraulique, et, en conséquence, de forts coefficients de ruissellement, ne peut mener qu'à une augmentation généralisée des écoulements. Celle-ci n'aura pas les mêmes conséquences en zone endoréique, où elle a pu dans la région de Niamey, conduire à une hausse de la nappe phréatique par l'intermédiaire d'une multiplication des mares et de l'augmentation

de leur durée en eau, ce qui entraîne la hausse observée du niveau de la nappe du CT3 depuis le début de la sécheresse, processus connu sous le nom de « paradoxe de Niamey » - Leduc *et al.*, 1997 et en zone exoréique où elle a pu produire une augmentation du risque de crue.

La synthèse des conséquences hydrologiques des changements environnementaux observés qui vient ci-dessous a été alimentée par les nombreux travaux de terrain menés dans le cadre de AMMA, à savoir les cinq thèses de Oke Amogu (2009), Eric Le Breton (2012), Ibrahim Mamadou (2012), Kadidiatou Souley Yéro (2012) et Moussa Malam Abdou (2014) ainsi qu'une bonne quinzaine de mémoires de Master ou de mémoire de fin d'étude d'école d'ingénieur, pour la plupart d'étudiants nigériens, réalisés durant le programme AMMA. Cette synthèse a aussi été l'objet du livrable n°3 du programme ANR ECLIS (Environnement, Climat et Société) sur l'évolution de l'occupation des sols produit par l'équipe LTHE-ESPACE DEV en juin 2010.

Par ailleurs, cet accroissement des écoulements est à l'origine de dynamiques sédimentaires locales notoires, en particulier dans la formation de zones d'épandage et de cônes de déjection. Comme on vient de le voir, les conditions sont réunies pour que le ruissellement et l'érosion s'accroissent dans le haut des versants. La croissance continue des zones de sol nu encroûté se traduit par une diminution de la capacité de rétention en eau des sols, et par suite, par une augmentation du ruissellement et de l'érosion. Les matériaux arrachés aux versants sont transportés par un flux écoulé en augmentation. Qui dit érosion dit sédimentation et dépôt ; dans le secteur endoréique qui nous intéresse, le dépôt se fait forcément dans une dépression fermée, sans dommage donc dans ce cas-là pour le lit du fleuve Niger, qui souffre aussi, ces dernières décennies d'un fort problème d'ensablement, ou d'un de ses affluents.

Dans la zone sédimentaire du bassin des Iullemeden, et en particulier, pour la région qui nous intéresse entre la vallée du fleuve Niger et la vallée fossile du Dallol Bosso (figures 4 et 5 chapitre 4), on trouve aussi assez souvent des replats à mi-pente. Ces replats constituent parfois des coupures complètes pour l'écoulement des eaux, qui s'arrête dans des mares situées sur ces replats ; toutefois le processus d'accroissement des écoulements, observé depuis quelques décennies, pourrait bien conduire à des débordements de ces mares, comme ceux qui ont permis les ruptures d'endoréisme observées près de Niamey (Mamadou, 2012 ; Descroix *et al.*, 2012b).

Dans les bassins d'études du programme AMMA, Tondi Kiboro et Wankama, tous deux situés dans la commune de Dantiandou dans l'ouest du Niger, on observe deux configurations différentes, qui ont été décrites par Le Breton (2012).

- Tondi Kiboro : dans les bassins de Tondi Kiboro, le replat héberge une mare temporaire qui recueille les eaux arrivant des deux koris équipés (voir Descroix *et al.*, 2012a et Le Breton, 2012) ; les observations ont été menées de 1991 à 1994 (Esteves et Lapetite, 2003) puis de 2004 à 2011 (Descroix *et al.*, 2012a) ; on sait donc que cette mare ne débordait traditionnellement pas, arrivant à retenir l'intégralité des eaux d'écoulement (figure 15).

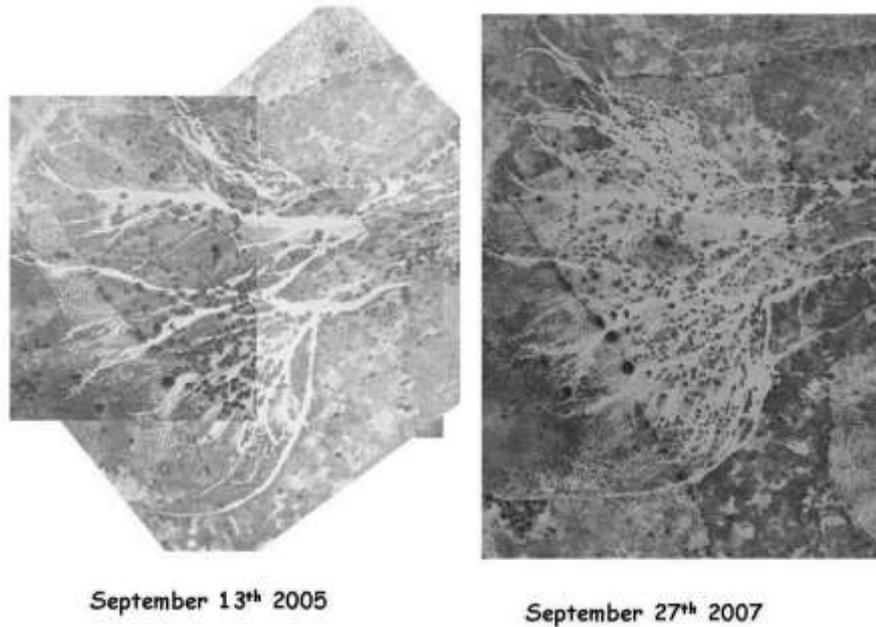


Figure 15 : évolution du cône de déjection double des deux ravines nord et sud de TondiKiboro entre septembre 2005 et septembre 2007 : progression des dépôts sableux

Toutefois en 2006, il est apparu pour la première fois un écoulement déversant de cette mare perchée vers l'aval, raccordant ce réseau hydrographique à celui du kori de Dantiandou (lui-même étant très parcellaire et intermittent, occupant une vallée fossile) ;

- Wankama : dans le bassin de Wankama (0,9 km²), malgré la défluviation évoquée au chapitre 1, l'écoulement est continu du haut en bas de la toposéquence ; la zone d'épandage qui occupe le replat (et qui est à l'origine de la défluviation) est parcourue de ravines dont la tête remonte annuellement à un rythme décamétrique (Le Breton, 2012, voir plus bas). Mais arrivée au fond de la vallée fossile, celui-ci est tellement plan que l'eau hésite entre deux mares et peut suivant les années « remonter » quelques centaines de mètres vers l'amont et vers le creux formé par la mare ouest (voir chapitre 7).

4. Un réseau hydrographique rajeuni

Les travaux d'Eric Le Breton (Le Breton, 2005 ; Le Breton, 2012) ont bien illustré le lien entre augmentation du ruissellement et des écoulements, d'une part, densité de drainage de l'autre ; on observe bien une forte augmentation du linéaire du réseau hydrographique en corollaire de l'augmentation des volumes d'eau à écouler. Cette comparaison a par ailleurs fait l'objet d'un chapitre bien illustré de la thèse de Sylvain Massuel (2005) et constitue un des points forts de l'article de Leblanc *et al.* (2008).

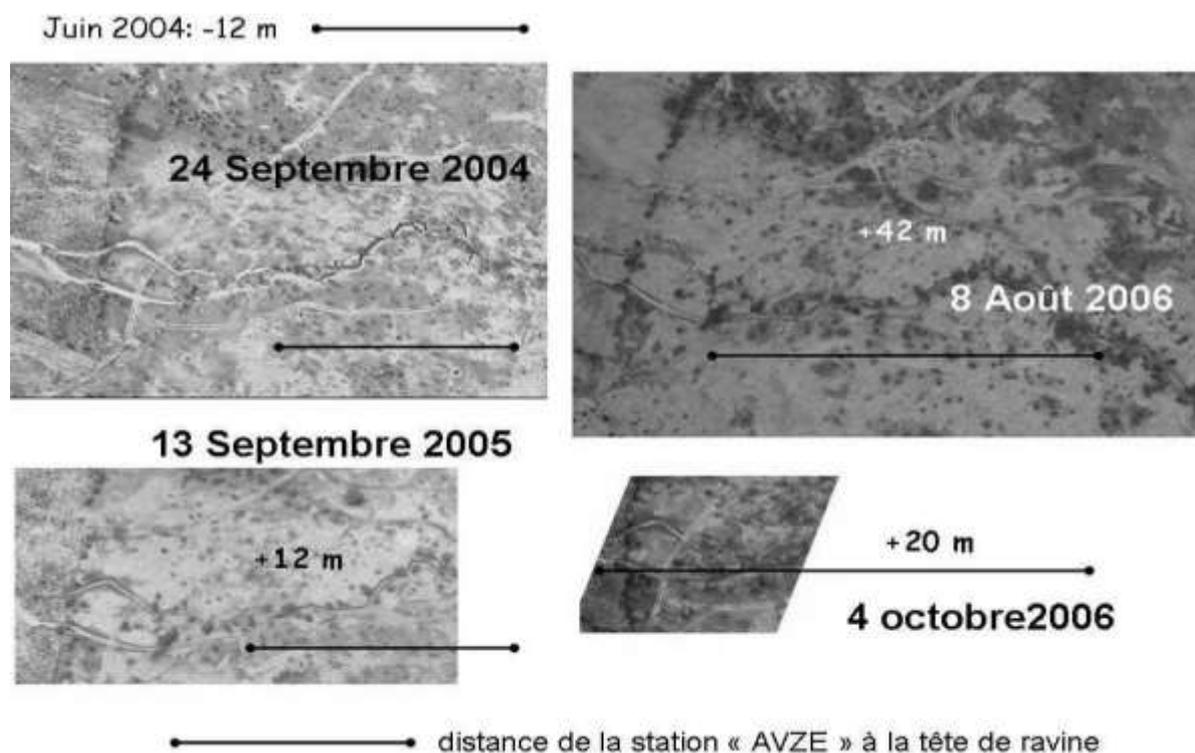


Figure 16 : Evolution de la ravine du drain central du bassin de Wankama de 2004 à 2006 (Le Breton, 2012)

Le Breton (2005 et 2012) s'est en particulier intéressé à la zone d'épandage qui se trouve comme on l'a dit au centre du bassin de Wankama, position héritée du léger replat structural qui caractérise ce site. Il a assuré pendant 4 ans (2004-2008) le suivi de l'évolution de la ravine qui s'est creusée sur le drain principal, par recul de tête, avant et après la défluviation de 2006 (figures 16 et 17).

Cette ravine a été caractérisée par un recul de tête rapide les deux premières années, avant que la défluviation ne lui ôte l'essentiel de son agent érosif, l'essentiel du courant s'écoulant ensuite dans un autre kori situé plus au sud et parallèle au kori équipé. Le replat et la présence de cette zone d'épandage, dans laquelle s'infiltre une grande partie de l'eau provenant du haut du bassin, expliquent la baisse des débits observée (Descroix *et al.*, 2011 ; Le Breton, 2012) entre l'amont et l'aval de la zone d'épandage ; ce processus, mis en évidence par Esteves et Lapetite (2003) sur le bassin de Tondi Kiboro, est à la base de l'alimentation secondaire des nappes que constituent ravines et dépôts de versants. Il est clair que l'alimentation principale de la nappe du CT 3 provient des mares, mais de plus en plus, elles sont secondées par un grand nombre de zones d'infiltration apparues avec la dégradation des milieux (Descroix *et al.*, 2012a) : ravines aux dépôts sableux parfois épais (figures 16 et 19), zones d'épandage, cônes de déjection, sont autant de secteurs dans lesquels l'eau peut à présent être stockée temporairement en attendant une infiltration profonde dans les sols et terrains sableux sous-jacents.

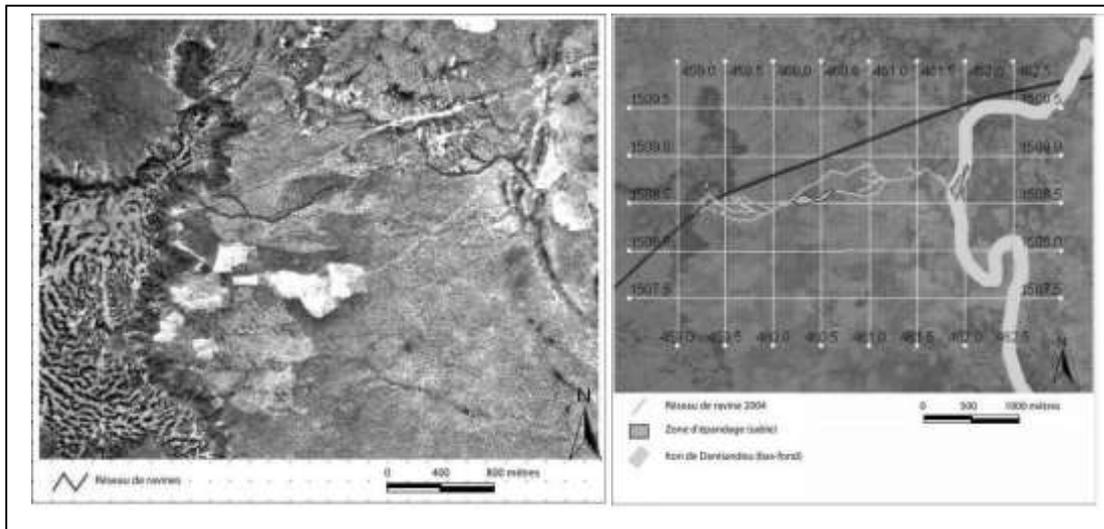


Figure 17: Evolution du réseau de ravines à Wankama 1950-2004 (Le-Breton, 2005)

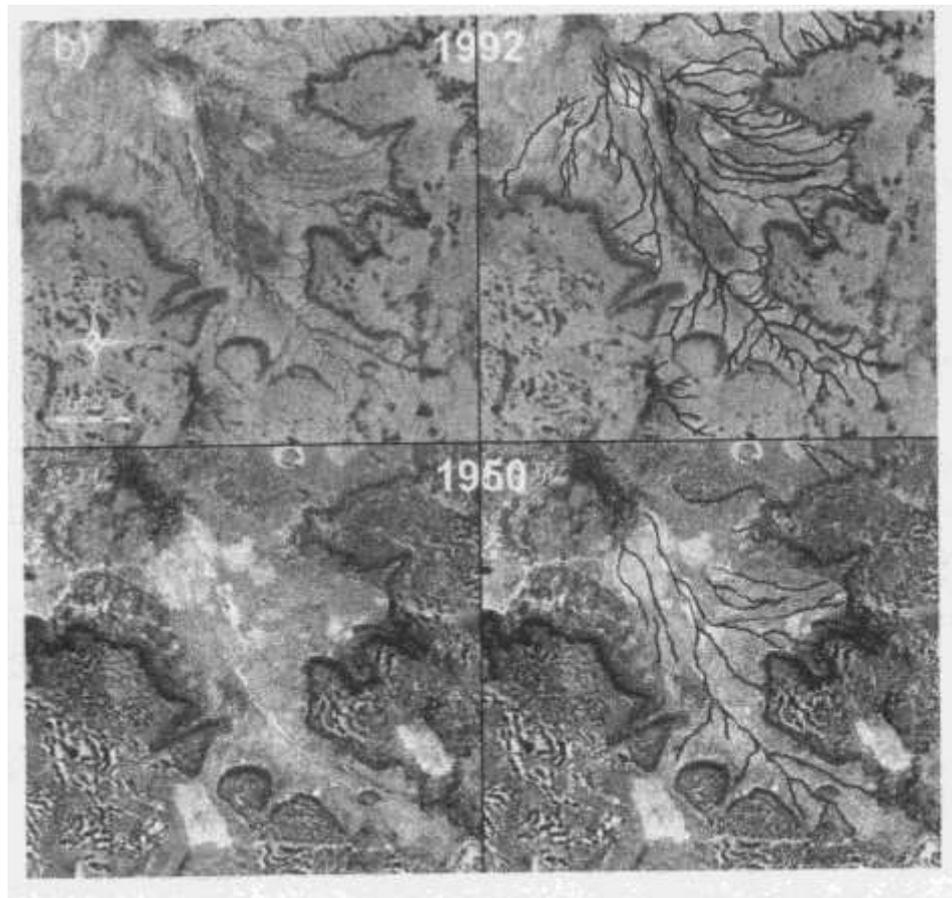


Figure 18 : Evolution du réseau de ravines dans un secteur du degré carré de Niamey (Massuel, 2005)

La zone d'épandage de mi-versant de Wankama fait l'objet de mesures hydrologiques puisqu'on s'est vite aperçu qu'elle représentait une zone d'infiltration importante (Le Breton 2012) ; dès 2003, des mesures géophysiques ont permis de confirmer par des méthodes

géophysiques l'importance de l'infiltration profonde sous cette zone (Massuel *et al.*, 2006). Le Breton (2005) avait montré que la longueur totale du réseau de drainage avait été multipliée par 5 entre 1950 et 1992 (figure 18).

Le recul de tête est le processus principal de formation et d'entretien/évolution des ravines dans les milieux sahéliens aux sols sableux. On en voit le stade en 2004 sur la photo de la figure 19. Le bras gauche de cette ravine a les années suivantes reculé de plusieurs centaines de mètres au gré de ce recul de tête, avant de voir l'essentiel de son alimentation changer de bassin et stopper pratiquement ce processus de recul de tête.



Figure 19 : ravine formée par le drain central (à gauche) du bassin de Wankama en juillet 2004



Figure 20. Ruissellement de type hortonien sur un plateau latéritique à la pente imperceptible lors du passage d'un grain (pluviographe de Sabara Bangou, plateau du Fakara)

Que ce soit sur les bassins expérimentaux (Wankama, Tondi Kiboro, Dyabou, Boubon, Mélé Haoussa) ou ailleurs (voir encart JEAJ en fin de ce chapitre), on voit bien que le ravinement est extrêmement rapide dans les sols sahéliens sableux, et ce, malgré des pentes généralement très faibles. On a pu montrer qu'une pente de 0,5% jouait le même rôle dans la collecte du ruissellement qu'une pente bien plus prononcée, du moment que la surface concernée est très ruisselante, comme sur les plateaux cuirassés (figure 20, sur le plateau du Fakara à Sabara Bangou) ou les zones de sols encroûtés par les pratiques culturales. La photo de la figure 21 a été prise le 30 avril 2004 lors d'un événement pluvieux très précoce où 34 mm étaient tombés à Wankama (mais plus de 130 mm localement à Niamey et environs où de gros dégâts et des pertes humaines avaient été enregistrées). Le ruissellement se produit ici sur des zones encroûtées qui se sont formées à proximité du talweg, et qui mettent de plus en plus en communication les zones de cultures avec les drains, contribuant à accroître sensiblement les coefficients d'écoulement des bassins (Descroix *et al.*, 2011).

Il s'agit bien sûr d'un ruissellement de type hortonien, lié au dépassement par l'intensité de la pluie de l'infiltrabilité des sols.



Figure 21. Crue du 30 avril 2004, bien avant le début de la mousson, sur la station Wankama AVZE alors en chantier ; le débit spécifique est fort du fait de l'absence totale d'activité végétale, comme pour les pluies de début de mousson ; ce jour là, 130 mm sont tombés dans la moitié nord de la ville de Niamey, causant d'énormes dégâts et des pertes humaines.

Mamadou (2012) a parfaitement analysé le rôle des sapements de berge dans l'alimentation en sédiments des cours d'eau et dans leur dépôt. Ces matériaux prélevés sur les bords, formant des

talus sub verticaux du fait de la proportion de sable dans les sols et les terrains encaissants, constituent l'essentiel des matériaux transportés et déposés (figure 22).

Ceci explique l'extrême facilité et rapidité de la dégradation des terroirs dans la commune de Dantiandou comme dans l'ensemble de la région (figure 23)

5. Résumé des observations faites sur les sites expérimentaux AMMA

Toujours est-il que, sur les sites expérimentaux du degré carré de Niamey, on observe, aussi bien à court terme (d'une année sur l'autre) qu'à long terme (sur les 15-20 dernières années, a fortiori des périodes plus longues), une évolution très nette des terroirs, caractérisée par :

- une très forte diminution de la végétation naturelle, remplacée par cultures et jachères
- une très forte dégradation des sols, qui se traduit par une très forte érosion (par ravine et par dépressions hydro éoliennes) et de très importants dépôts sableux en bas de versants ;
- une dégradation des propriétés physiques des sols, due à un fort encroûtement (croûte de type ERO suivant classification de Cazenave et Valentin, 1989).



Figure 22 : sapements de berge observés par Mamadou (2012) en bordure du kori de Boubon ; ces sapements pourvoient l'essentiel du volume de matériaux érodés dans le bassin



Figure 23 : sapements de berge et berges sub-verticales dans le bassin du kori de Dantiandou (piste Wankama- Maourey Kouara Zéno)

Ceci se traduit par une très forte baisse de la perméabilité des sols et donc de l'infiltration de l'eau, une forte augmentation des ruissellements, des écoulements et des débits ; comme on est dans une zone endoréique, ces eaux se concentrent dans les bas-fonds, formant des mares qui sont les principaux points de recharge de la nappe phréatique. Le niveau de celle-ci, dans le DCN (Degré Carré de Niamey), a donc monté de plus de 4 m dans les 20 dernières années (voir chapitre 4). Cependant, autant la forte augmentation de l'encroûtement et du ruissellement est un processus qu'on observe presque partout en Afrique de l'Ouest soudano-sahélienne, autant la hausse de la nappe ne concerne que certains secteurs endoréiques.

Sur les bassins de Wankama et Banizoumbou, mais aussi dans toute la région du degré carré de Niamey, on observe une dégradation actuelle, active et constante des sols et de la végétation. Ceci n'est pas forcément représentatif de l'ensemble de l'Ouest du Niger ni du Niger ni du Sahel ni de l'Afrique de l'Ouest (mais les cartes produites par Fensholt et Rasmussen, 2011, permettent de se faire une idée de la possible extension spatiale de cette dégradation), mais n'en constitue pas moins un élément à prendre en considération dans l'étude de la vulnérabilité des sociétés et le rôle de l'élevage face à celle-ci. Cependant, comme on l'a vu plus haut, la tendance majoritaire en Afrique de l'Ouest sahélienne, semble être au reverdissement.

On observe, entre autres :

- une progression des ravines (voir Le Breton, 2005 pour le BV de Wankama), qui coupent les pistes et menacent les ballasts des routes. La ravine creusée par le drain principal du bassin de Wankama a ainsi vu sa tête reculer de 240 m entre 2004 et 2009 (figure 14 ci dessus), repoussant d'autant vers l'amont le chemin permettant de la franchir. Cela a bien été décrit par Le Breton (2005 et 2012). Une étude régionale a été réalisée par Massuel (2005) (voir figure 16 ci dessus) et par Leblanc *et al* (2008).

- une augmentation de la surface encroûtée et des dépressions hydro-éoliennes ; la surexploitation des sols commence par une diminution des temps de jachère et un allongement des temps consacrés à la culture. Les sols sableux fragiles et peu fertiles du Sahel se détériorent très vite si un repos de quelques années (jachère) n'est pas planifié pour restaurer leur structure. Cette fragilité et la pratique consistant à défricher complètement les parcelles au moment de la mise en culture ont deux conséquences :
 - la première est un encroûtement des sols du fait de leur fatigue : la structure se dégrade et les pores se referment peu à peu, entraînant une baisse de la perméabilité et très rapidement, une croûte de type ERO se forme sur les premiers centimètres (figure 24) ; sur des jachères anciennes se forment aussi des croûtes algales, peu perméables du fait de leur hydrophobie) (figure 5 ci dessus) ;
 - la deuxième est que le vent peut agir facilement en saison sèche en emportant les particules fines en surface, le moindre creux pré-existant pouvant vite devenir une « dépression hydro-éolienne » (DHE) (figures 1 et 2 ci dessus) qui s'auto-entretient et s'accroît par aéro-dynamisme (figure 25) ; celles-ci peuvent apparaître aussi bien sur les glacis (le plus souvent) que sur les placages sableux des plateaux et parfois même dans les bas-fonds, et sont constituées d'une croûte de même type ; les paysans, pour le moment, ne cherchent pas, dans le degré carré de Niamey, à pallier ce fait, alors que mettre en culture ces zones et en multiplier les sarclages suffit, au début, à en récupérer en quelques années la fertilité d'origine. Peu à peu les DHE deviennent coalescentes, comme on peut l'observer dans la moitié aval du bassin de Wankama (près de la station de flux « dégradé ») (figure 2).
- en aval, on note des dépôts plus abondants et la formation de zones d'accumulation sableuses à mi versant comme ci-dessous en aval des bassins expérimentaux de TondiKiboro, où l'on note l'évolution rapide de ces dépôts en deux ans (figures 15, 16 et 17) ;
- l'accumulation de sédiments à mi versants peut conduire à des captures par déversement, le sable accumulé gênant la progression de l'eau dans son cours naturel, le flux peut aller se déverser dans le kori voisin, car les versants ont très plans ; cela s'est produit à la fin de l'hivernage 2005 au milieu du bassin versant de Wankama (voir chapitre 1) ;
- si rien n'arrête l'écoulement et ses transports solides, ces éléments sableux sont transportés jusque dans les bas-fonds, pouvant contribuer localement au colmatage de mares comme celle de Wankama Sud-Ouest (figure 17).



Figure 24 : parcelle de mesure constituée de croûte ERO sur le site expérimental du bassin de Boubon (Mamadou, 2012)



Figure 25 : dépression créée par la surpression du vent gêné par l'obstacle d'un *Balanites aegyptiaca*, très touffu même en saison sèche (Luxereau et Roussel, 2009)

Conclusion. Des débits en forte augmentation

Pour conclure, laissons à nouveau la plume aux collègues qui ont le mieux étudié ces processus :

« L'augmentation démographique très rapide (2,6 % par an) conjuguée à une pluviométrie déficitaire pousse les agriculteurs à modifier leurs pratiques culturales : une des réponses adoptées face à la faiblesse des rendements est l'extension des cultures. Les nouvelles zones érodées apparaissent surtout lors des mises en culture de l'unité n°2 -surfaces à sables grossiers et termitières- (elle devient alors l'unité n°3 –surfaces à sables grossiers et à termitières très érodées) et de la (sur) exploitation des unités n°7 -bas-fonds- et 6-zone d'écoulement- (qui tendent à devenir l'unité n°5 –surfaces érodées à sables grossiers sans termitières-). Les sols de l'unité n°4, - surfaces pelliculaires sans sables grossiers ni gravillons- la plus cultivée, sont assez résistants à l'érosion hydrique. Nous avons vu néanmoins qu'ils étaient sensibles au processus de réorganisations superficielles et à la dénudation. Or le développement des pellicules et la raréfaction de la végétation favorisent considérablement le ruissellement. Ainsi, bien que cette unité présente peu de marques d'érosion, elle n'en contribue pas moins à favoriser, par le ruissellement qu'elle produit, la dégradation des unités situées à l'aval (Albergel et Valentin, 1988).

Il est nécessaire enfin de souligner que ce qui est indiqué comme jachère, correspond parfois à des zones qui ont été cultivées naguère, puis abandonnées, sur lesquelles la végétation de savane arbustive ne se reconstitue pas. Ces anciens champs présentent en effet, de vastes zones nues pelliculaires semblables aux surfaces sahéennes, où le recrû ne semble constitué que d'épineux (*Balanites Aegyptiaca*) l'érosion en nappes y est marquée, formant des micro-

dénivelés en forme de marches. Si l'on se réfère à différentes observations concernant l'extension des zones érodées et dénudées sur le bassin, et aux résultats des expérimentations sur le ruissellement au mini-simulateur de pluie, il est possible d'expliquer qualitativement l'augmentation du coefficient de ruissellement malgré une nette diminution de la pluviométrie ». (Albergel et Valentin, 1988).

« Les caractéristiques de la végétation et des organisations pédologiques superficielles sont prépondérantes parmi les facteurs intervenant sur la dynamique de l'eau à l'interface sol-atmosphère. Leurs modifications dans le temps peuvent largement expliquer les variations des régimes hydrologiques observées pour les petits bassins versants.

La diminution de la pluviosité a pour première expression dans le paysage l'appauvrissement de la végétation et l'accroissement des zones dénudées. Les sols nus et appauvris en matières organiques deviennent instables et sujets à l'érosion et ou aux phénomènes d'encroûtement. Cette modification des états de surface due aux actions conjuguées d'une longue période sèche et de pratiques culturales extensives font descendre bien au sud les paysages types du SAHEL. Conjointement à la réduction du couvert végétal, on assiste à une adaptation à la sécheresse de types d'espèces. Les graminées annuelles se développent au détriment des espèces pérennes. Les jeunes arbres sont en majorité des épineux à surface foliaire réduite et remplacent les combrétacées de la savane arborée. Dans l'hypothèse d'un retour à un régime pluviométrique plus abondant, les questions suivantes se posent :

- Le milieu pourra-t-il se régénérer ou un seuil de non retour a-t-il été franchi ?

- Quel sera la durée de l'effet mémoire, de cette période sèche sur les états de surface ? » (Albergel et Valentin, 1988).

Cette étude, comme bien d'autres observations montre que souvent « la sécheresse, en favorisant les conditions du ruissellement ne met pas à l'abri des crues les plus catastrophiques qu'elle peut accroître de façon indifférenciée » (Albergel et Valentin, 1988). Ces conclusions de 1988 sont, plus que jamais, d'actualité à l'heure où, après l'augmentation des moyennes annuelles, on constate une intensification des pluies avec une proportion accrue de pluie tombée lors d'évènements de fort cumul (Panthou *et al.*, 2014).

La JEAI Savane Parc à Long Terme : les relations entre la végétation et le cycle de l'eau au Sahel ; impacts sur l'aménagement

La JEAI (Jeune Equipe Associée à l'IRD) Savane parc à Long Terme (SAPALOTE ; 2011-2015) s'est consacrée à étudier les conséquences de la dégradation des sols et de la végétation sur le cycle de l'eau, ainsi qu'à chercher des moyens d'encourager l'eau à s'infiltrer afin d'améliorer la capacité de rétention en eau des sols, ce qui améliore la productivité des agro-systèmes et de la végétation naturelle, et ce qui réduit les risques hydriques. Cinq sites ont servi aux observations, mesures et expérimentations ; ils sont représentés figure 29.

La JEAI est animée par Ibrahim Bouzou Moussa et Oumarou Faran Maiga, professeurs de géographie à l'Université Abdou Moumouni de Niamey.

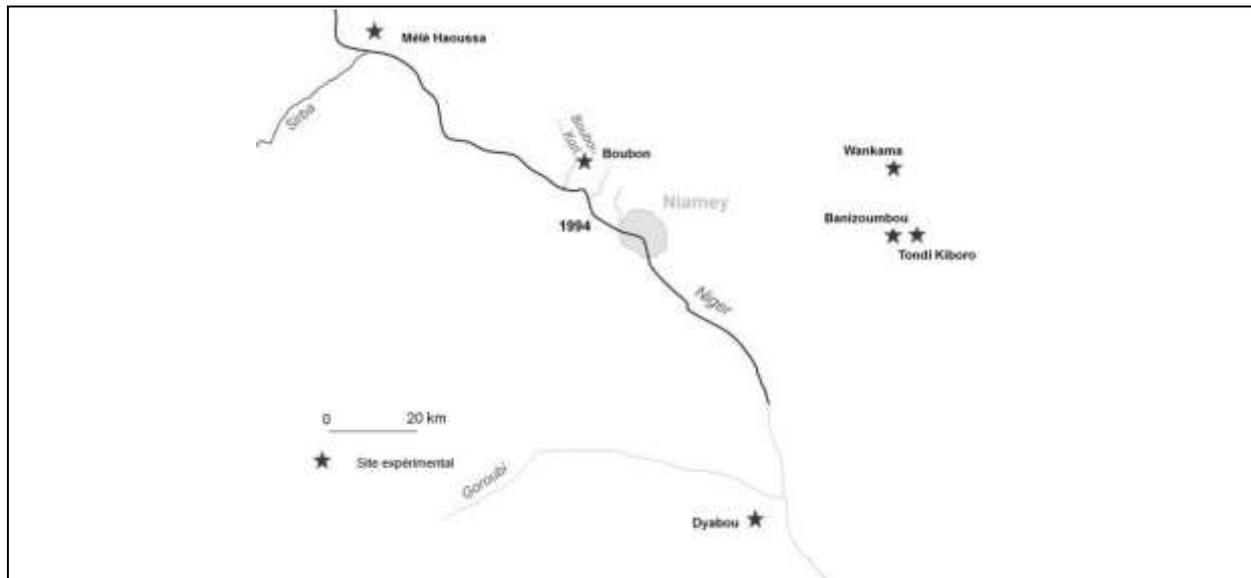


Figure 29 : localisation des sites expérimentaux de la JEAI SAPALOTE

Dans un contexte de changement climatique et de changements drastiques d'usages des sols dont la désertification constitue la conséquence majeure, on observe des modifications importantes du cycle de l'eau : accroissement de l'érosion, des dépôts et de l'ensablement, crues plus brutales et plus courtes, étiages plus prononcés, diminution des débits de base et augmentation des débits de crue. On a aussi observé une hausse des écoulements, attribuée aux changements d'occupation des sols (brousse naturelle remplacée par des cultures, tassement des sols qui limite fortement l'infiltration des eaux). On observe aussi que le temps de réponse des bassins et des sols aux précipitations s'est raccourci ; en contrepartie, les écoulements de base, c'est-à-dire ceux qui se produisent après les événements pluvieux, et après la saison des pluies, sont très amoindris. Or ce sont les plus utiles pour agriculteurs, éleveurs, pêcheurs et autres usagers de l'eau.

Cette jeune équipe avait plusieurs volets :

Tâche 1- Suivi de la Dynamique hydro érosive et mesures hydrodynamiques des sols

Tâche 2- Décrire et cartographier l'évolution des surfaces de sols encroûtés, susceptibles d'être les zones de formation des crues

Tâche 3- Suivi de la limite entre les zones endoréique et exoréique au long de la vallée du Niger

Tâche 4- Végétation et rétroaction sur l'hydrologie : Lutte antiérosive et impacts d'aménagements forestiers à court, moyen et long terme sur les sites de Banizoumbou-Sama Dey-Tondi Kiboro (bassin sédimentaire) et Mélé Haoussa (zone de socle).

Dans le cadre de la JEAI, des essais ont été réalisés (banquettes, reboisement, etc) afin d'en mesurer l'efficacité ; les figures 30 et 31 ci-dessous montrent comment on peut de manière expérimentale illustrer l'intérêt du sarclage.



A sec



Sous pluie

Figure 30 et 31 : efficacité du sarclage pour l'infiltration de l'eau (in Boubacar *et al.*, 2017)

Sols et états de surface : quelle classification pour connaître le comportement hydrologique des surfaces ?

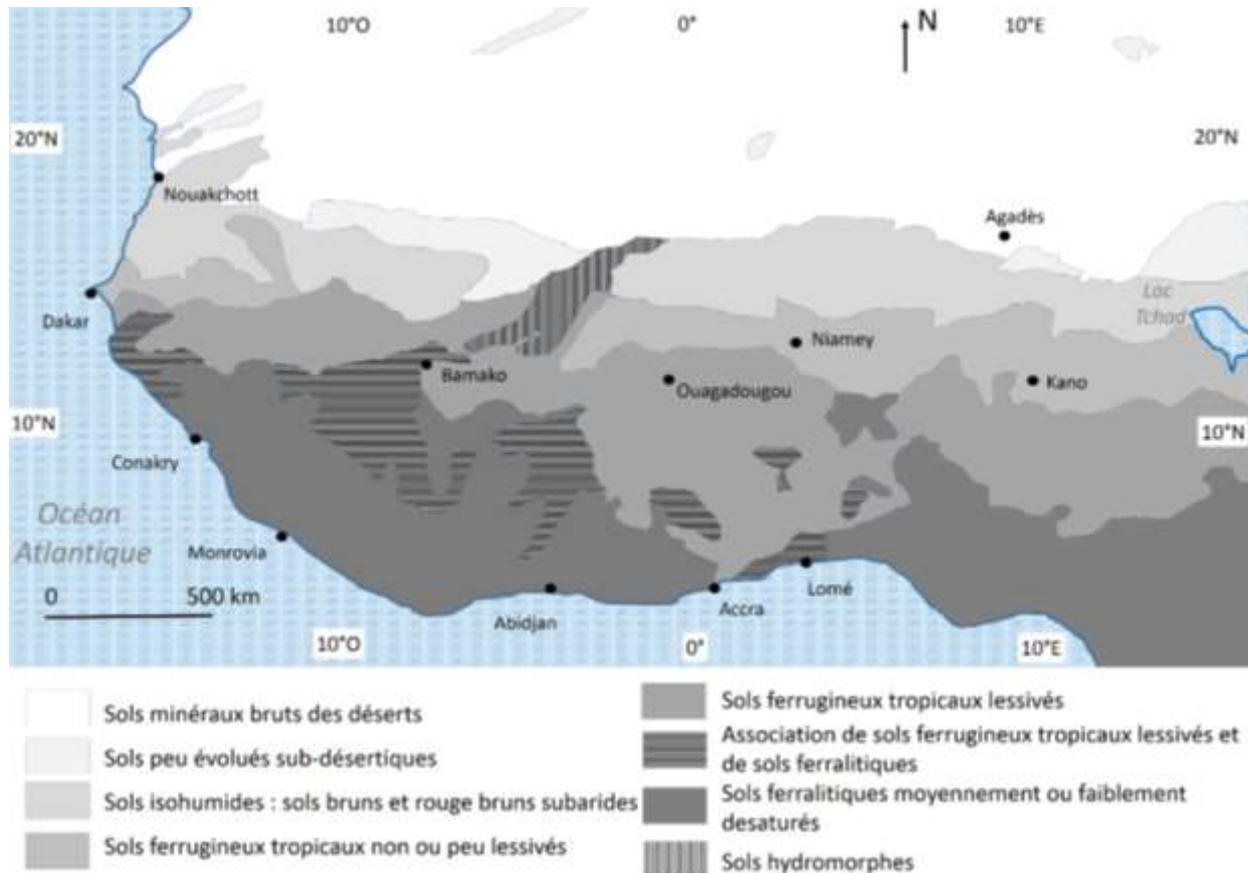


Figure 32 : carte des sols de l'Afrique de l'Ouest (d'après Boulet *et al.*, 1971, in Casenave et Valentin, 1989).

Les principaux types de sols de la bande soudano-sahélienne sont (d'après la classification française) les sols ferrugineux tropicaux, lessivés ou non ; en allant vers le nord et les zones arides, les sols sont de plus en plus minéraux et bruts, on trouve plus fréquemment les sols bruns subarides, puis des régosols et des lithosols (d'après Casenave et Valentin, 1989). Les sols ferralitiques sont fort peu représentés et sont plutôt caractéristiques des zones guinéennes ou soudano-guinéennes (figure 32) ; ce sont « *les sols des régions humides, et ils possèdent en commun une très grande épaisseur et une faible différenciation des profils* » (Dabin et Maignien, 1979) ; les sols les plus fréquents sont donc les sols ferrugineux tropicaux, qui ont « *un profil différencié, sont peu à moyennement épais, de teinte claire, à horizons tranchés avec redistribution de l'argile et des oxydes de fer* » (Dabin et Maignien, 1979).

Des sols plus particuliers et localisés sont assez fréquents en Afrique de l'Ouest, mais ne figurent sur la carte car ils représentent néanmoins d'assez faibles surfaces. Ils 'agit d'une part des sols à argiles gonflantes comme des vertisols ou des sols bruns eutrophes, en particulier dans les dépressions du socle, y compris les vallées ; ces sols peu épais possèdent d'après Dabin et Maignien (1979), une grande réserve d'éléments utiles aux plantes. D'autre part des sols hydromorphes, caractérisés par l'action prolongée d'un excès d'eau, et par la présence de gley ou pseudogley ; en bordure de mer, ils sont dominants dans les dépôts vaseux, plus ou moins sulfatés acides, de la mangrove et de ses franges (Dabin et Maignien, 1979).

Concernant la fertilité des sols en Afrique de l'Ouest, le constat fait par la FAO est sévère : « *La plupart des sols de la zone semi-aride de l'Afrique de l'Ouest se caractérisent par leur faible teneur en éléments nutritifs et la fertilité de ces sols s'avère souvent un facteur plus limitatif à la production agricole que la pluviométrie. La réponse des cultures à l'azote dans cette zone dépend de la quantité totale de pluie et aussi de sa distribution. Le recyclage des résidus organiques est une condition préalable nécessaire pour une production agricole durable. La culture continue sans recyclage des résidus de récolte se traduit par une baisse rapide du niveau de matière organique dans les sols, un lessivage des bases suivi d'une apparition de toxicité de l'aluminium. Bien que beaucoup de technologies en matière de gestion intégrée de la fertilité des sols aient été développées dans la région, très peu de paysans les utilisent. Il est suggéré que, pour les recherches futures, l'accent soit mis sur la recherche en milieu réel, avec la participation des paysans afin de pouvoir tenir compte de leurs contraintes socio-économiques dans l'élaboration des technologies nouvelles ou le raffinement des technologies existantes. Les sols sont en général très sableux avec des teneurs en sable de l'horizon de surface (0-20 cm) variant entre 71 et 99%. A cause de cette nature sableuse, la capacité de rétention en eau est très faible. Les sables dunaires du Sahel ont une conductivité hydraulique très élevée (150 à 200 cm/jour) et donc un drainage interne très rapide. Mais dans la zone soudanienne et nord guinéenne, avec l'augmentation de la teneur en argile, la formation de croûte peut réduire très significativement le drainage interne. De façon générale, ces sols ont une très faible fertilité naturelle qui s'exprime par les faibles teneurs en matières organiques et azote total et la capacité d'échange cationique effective. Les coefficients de corrélation entre différents paramètres de fertilité des sols indiquent d'une part que le taux de matières organiques augmente de façon très significative avec l'augmentation de la pluviométrie moyenne et, d'autre part, que la capacité d'échange cationique effective est plus corrélée avec le niveau de matière organique qu'avec le niveau d'argile » (FAO, 2004).*

<http://www.fao.org/docrep/w7304f/w7304f0b.htm> (auteur : *André Bationo, Chercheur principal (Chimie des sols), IFDC/Centre sahélien de l'ICRISAT, BP 12404, Niamey, Niger; et Zana Somda, Post-Doctorat, Centre sahélien de l'ICRISAT/ILRI, BP 12404, Niamey, Niger*).

Plusieurs constats faits directement sur le terrain confirment ce bref état de l'art.

La faible teneur en argile : les échantillons de sol qui ont été analysés dans le Sud Ouest du Niger, tant en zone de socle qu'en sédimentaire, ont montré une teneur en argiles et limons inférieure à 20%, 80% des échantillons ayant une part comprise entre 6 et 11%.

Cette forte teneur en sable explique certes la faible capacité de rétention en eau des sols ; mais elle n'empêche par l'encroûtement, par formation de pellicules superficielles imperméables ou de croûtes épaisses et étanches (Casenave et Valentin, 1989) ; c'est ce type de dégradation superficielle qui explique le « paradoxe du Sahel » tant elle s'est étendue ces dernières années. Au niveau hydrologique, que l'on s'intéresse au devenir de l'eau de pluie ou à la gestion des ressources en eau et des risques hydrologiques, il est donc plus utile de classer les surfaces en fonction des « états de surface » que de leur type de sol.

Casenave et Valentin (1989) ont fourni les clés de détermination des différents types d'organisation pelliculaires de surface qu'ils ont déterminés. Le type de croûte le plus fréquent rencontré à l'Ouest du Niger, encore une fois que ce soit sur socle ou sur terrain sédimentaire, est la croûte d'érosion ; d'un point de vue hydrologique, nous y avons mesuré de conductivité hydraulique de l'ordre de 8 à 20 mm/h, la moyenne d'une bonne centaine de tests à l'infiltromètre étant proche de 12 mm/h. Un sol bien sarclé peut absorber plus de 200 mm/h ; on mesure bien l'impact hydrologique de ce type de dégradation.

En résumé,

- L'encroûtement des sols semble être la cause première de l'augmentation des coefficients d'écoulement et de débits en zone sahélienne**
- Cet encroûtement est en grande partie lié à la mise à nu du sol nécessaire à la mise en culture. Les rendements des cultures baissant plutôt sur le long terme, l'extension de la surface consacrée aux cultures est rapide**
- Le rôle des jachères est plus ambigu car d'une part les jachères anciennes se couvrent d'une croûte biologique (ou algale) qui est hydrophobe et ruisselante ; mais d'autre part les jachères sont le principal moyen de récupération de la fertilité dans les sols sableux, très peu fertiles naturellement, du Sahel.**
- Le sarclage est la meilleure méthode pour faire infiltrer l'eau et éviter ruissellement et érosion ; mais son influence diminue très vite avec les précipitations ; il conviendrait donc d'augmenter le nombre de sarclages durant la saison, mais les agriculteurs disent manquer de main d'œuvre pour le faire et de plus, certains agronomes remettent en question l'intérêt d'augmenter le nombre de sarclages**

3^{ème} partie :

Comment expliquer la poursuite de la dégradation hydrologique ?

On note, partout en Afrique de l'Ouest, un retour aux conditions pluviométriques moyennes de la période 1900-2015, depuis 1993 au Sahel central et oriental, depuis 1999 au Sahel occidental.

Au niveau hydrologique, ce retour à des conditions « normales » de pluviométrie est loin de se traduire par un retour à une situation antérieure, encore moins à une situation « normale ».

On note, en effet, deux comportements opposés :

- les débits continuent à être déficitaires en zone soudano-guinéenne,
- et au contraire, ils continuent de croître en zone sahélienne.

Par delà le « paradoxe du Sahel », qui n'est plus vraiment un paradoxe depuis le retour des pluies à leur niveau « normal » ou du moins, moyen, et ses explications, fondées sur les changements de couverture et d'occupation des sols, en particulier sur la baisse de la biomasse avec la mise en culture, il faut chercher à expliquer aussi pourquoi le retour des pluies, n'a pas mené à un retour au comportement hydrologique antérieur, mais plutôt à une exacerbation du ruissellement. Cette troisième partie a pour ambition d'exposer trois de ces éléments, à savoir une augmentation de l'occurrence des pluies de fort montant journalier, un accroissement de la taille des bassins versants contributeurs, et l'impact de l'urbanisation.

En conséquence, cette troisième partie comporte trois chapitres :

Chapitre 6 : Le changement climatique : un retour des pluies

Chapitre 7 : l'expansion de l'endoréisme

Chapitre 8 : L'eau des villes et l'eau des champs

CHAPITRE 6. Le changement climatique : un retour des pluies

« Eh, les jeunes, vous savez, la pluie, ça tombe pas du tout comme ça ! »
(un paysan de Thyssé Kaymor devant un simulateur de pluie, 1998)

La pluviométrie n'est certes pas aussi diverse que peuvent l'être les chemins de l'eau et les voies empruntées par celle-ci pour, un jour, rejoindre la mer.... Cependant, si la répartition géographique des hauteurs de pluie en Afrique de l'Ouest est assez simple à décrire et à expliquer, pour peu que l'on en reste à l'échelle pluri-décennale (voir figure 1 plus bas), la pluviométrie fait tout de même l'objet d'une très grande variabilité spatiale et temporelle dès que l'on descend à l'échelle de l'évènement, de la saison (ici la mousson ouest-africaine), donc de l'année. La pluviométrie en Afrique de l'Ouest est dictée par le déplacement de la Zone de Convergence Inter-Tropicale (ZCIT) qui permet l'arrivée sur les côtes nord du Golfe de Guinée de masses d'air ayant traversé tout l'Atlantique Sud et arrivant chargées d'humidité sur le continent. Après avoir croisé l'Equateur, ces masses d'air sont déviées vers leur droite (vers le Nord Est) par la force de Coriolis, ce qui leur donne droit au nom de mousson (Leroux, 1983 ; livre blanc AMMA, 2002).

Le plus grand signal de changement climatique jamais enregistré ?

Comme on l'a évoqué ci-dessus, la figure 1 (L'Hôte et Mahé, 1996) montre bien la zonalité de la distribution des pluies annuelles moyennes sur la partie ouest de l'Afrique sub-saharienne. L'arrivée des masses d'air se fait par le sud et la quantité d'eau tombée va en diminuant vers le Nord ; aux latitudes sahéliennes, on dit souvent qu'on perd un mm de pluie annuelle moyenne chaque fois que l'on franchit un km vers le Nord. Le dessin des isohyètes montre sans ambiguïté comment un vent humide de secteur Sud Ouest arrose bien plus abondamment les littoraux exposés au Sud Ouest (côte de la Guinée Bissau, de la Guinée, de la Sierra Leone et du Liberia, Est de la Côte d'Ivoire et région de Cape Coast au Ghana, delta du Niger et surtout le « cul de sac » du coin formé par le Golfe de Guinée au Cameroun, où les masses d'air sont piégées, en plus de la forme du continent, par les reliefs importants du Mont Cameroun (plus de 4000 m) et des hauts plateaux camerounais (mais plus de 10000 mm de pluie annuelle tombent sur le piedmont du mont Cameroun, à Debundscha).

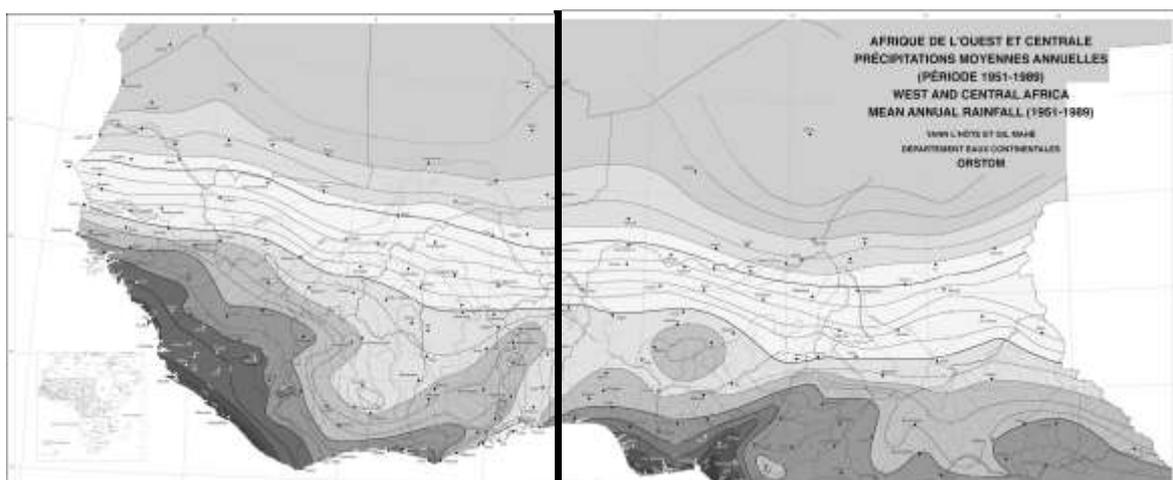


Figure 1 : Carte de la pluviométrie de l'Afrique de l'Ouest (1951-1989) ; la période considérée s'étend sur une égale longueur sur la période humide 1950-1970 et sur la période sèche qui lui a succédé. (L'Hôte et Mahé, 1996).

Or, l'Afrique de l'Ouest (et non pas seulement le Sahel, comme on le pense souvent) a connu un très fort, très long et très étendu épisode de déficit pluviométrique après 1968. Un déficit de 20 à 30% pendant plus de 25 ans et sur plus de 5 millions de km², cela constitue comme on l'a vu d'après Hulme (2001) et Hulme *et al.* (2001), le plus fort signal du changement climatique jamais enregistré.

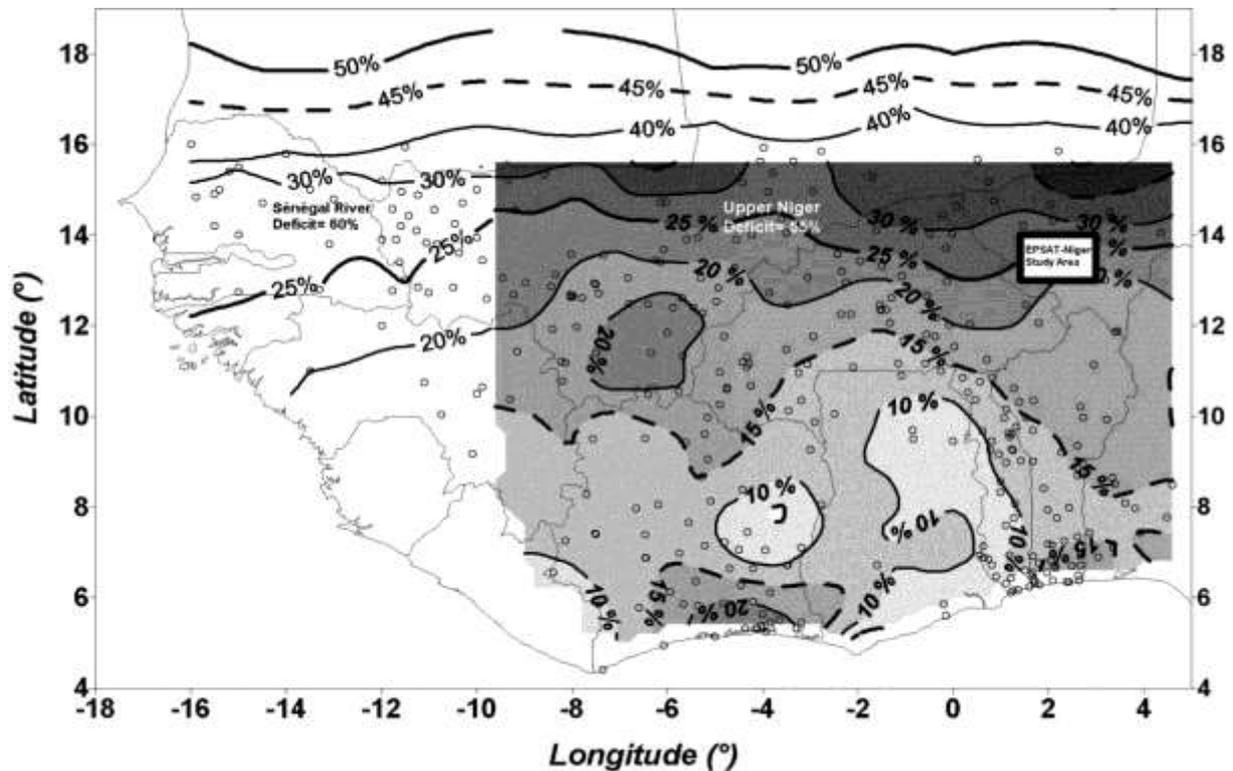


Figure 2 : Pourcentage de diminution de la pluviométrie entre la période 1950-1967 et la période 1968-1995. (In Lebel *et al.*, 2003)

Si la baisse de la pluie est générale dans toute l'Afrique de l'Ouest entre la période postérieure à 1968 et les années précédentes, elle est bien plus prononcée au Sahel (nord de la carte et de l'Afrique sub-saharienne) ; c'est effectivement le Sahel et le domaine nord-sahélien en particulier, qui a le plus souffert de ce déficit. Comme le montre la figure 2, la diminution est de l'ordre de 10-15% dans les zones proches du littoral du golfe de Guinée, et on atteint des déficits de l'ordre de 30 à 40% aux franges du Sahara. Ce qui n'apparaît pas sur cette figure, c'est l'accentuation de l'aridité relative du littoral nord sénégalais, les stations synoptiques de la région ayant enregistré les plus forts déficits étant Saint Louis (-48%), Louga (-46%) et Dakar (-44%).

L'évolution temporelle depuis le début du 20^{ème} siècle est ponctuée de sécheresses et de phases humides. On peut voir cette évolution sur la figure 3, qui montre l'évolution de la pluviométrie moyenne sur le bassin du Niger à Niamey, qui occupe une grosse moitié centrale de la bande soudano-sahélienne, depuis le début du 20^{ème} siècle.

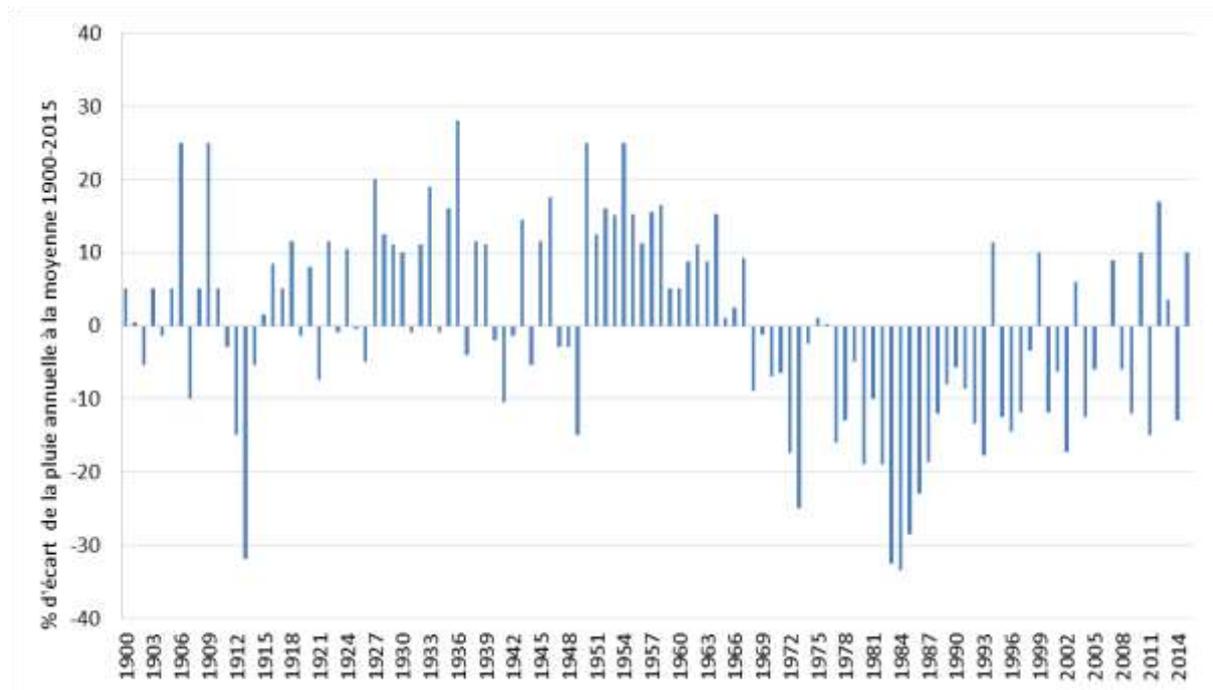


Figure 3 : Variation de la pluie annuelle en % autour de la moyenne sur le bassin du Niger à Niamey de 1900 à 2015.

Cependant, dans tout le Sahel et la zone soudanienne, on entend encore des acteurs locaux ne percevant pas de retour à des niveaux de cumuls pluviométriques meilleurs. On entend ainsi très souvent des agriculteurs, des techniciens agricoles, des agronomes, des responsables politiques, des chefs de village, évoquer la sécheresse ou le déficit pluviométrique persistant pour expliquer les mauvais rendements ou la mauvaise situation économique, la déforestation ou la dégradation environnementale. Ce discours est même parfois repris par les chercheurs, alors que cela fait pratiquement vingt ans que l'ensemble de la sous-région connaît un retour des totaux pluviométriques annuels à des valeurs moyennes : celui-ci est avéré dès 1993 dans le bassin du Niger Moyen (Descroix *et al.*, 2013) et dès 1998 au Sénégal (Bodian, 2014) où cette reprise est plus franche dans les zones soudanienues, les postes sahéliens ne connaissant de reprise que durant la décennie 2001-2010 (Descroix *et al.* 2015a). De fait, bien plus souvent, on entend les agriculteurs sahéliens répéter que les pluies sont certes un peu meilleures qu'auparavant, mais qu'on est encore loin des conditions d'avant la sécheresse. Il est probable que les personnes susceptibles de se souvenir des conditions prévalant avant 1968 sont encore nombreuses, qui considèrent comme « normales » ces conditions-là ; par contre, les personnes se souvenant de la situation d'avant les années humides 1951-1968 sont celles qui ont aujourd'hui plus de 75, voire 80 ans ; des personnes de cet âge-là sont en très petit nombre dans les villages de la bande soudano-sahélienne. Or c'est probablement plutôt ce niveau-là de pluviométrie qu'il faut attendre comme moyenne sur le long terme, et intégrer le fait que les deux décennies d'avant la sécheresse (en fait, les années 1951-1967) ont été très excédentaires, et ne reflétaient pas une tendance durable ; il est même probable que des activités et cultures de type soudanien se sont étendues dans le sud des espaces sahéliens durant ces années-là, se trouvant alors très fragilisées dès que la pluviométrie s'est effondrée après 1967.

La variabilité inter annuelle des précipitations au Sahel est relativement forte (de coefficient de variation CV compris entre 0,25 et 0,4) ; mais il est modéré par rapport à celui d'autres zones tropicales sèches de la Planète : CV compris entre 0,35 à 0,5 au Nord Mexique ou en Australie, 0,5 à 0,6 au Nordeste brésilien, voire plus dans les zones arides de la façade pacifique de l'Amérique du Sud touchées une année sur 5 ou 7 par El Niño (Nouvelot et Descroix, 1996).

L'extension vers le nord du bassin arachidier sénégalais à la fin des années 1990 (Fall, 2014), lorsque les isohyètes sont remontés vers le nord, tendrait à montrer que l'agriculteur sahélien s'adapte vite et sait profiter des opportunités climatiques, même si dans ce cas, cette extension s'est faite au détriment des pâturages des populations nomades du Ferlo et alors que la filière arachidière était en démantèlement pour cause de coupes dans les subventions après l'adoption, au début des années 1990, des Plans d'Ajustement Structurels (PAS).

D'un point de vue hydrologique, en dehors de la diminution de la capacité de rétention en eau des sols, qu'on ne traitera pas ici, c'est le total pluviométrique de l'année et le nombre d'évènements de fort cumul, susceptibles d'entraîner de forts coefficients de ruissellement, qui sont les variables explicatives les plus déterminantes (Olivry, 2002 ; Mahé *et al.*, 2011 et 2013 ; Descroix *et al.*, 2012 ; Panthou *et al.*, 2013 et 2014 ; Vischel *et al.*, 2015).

Tant pour l'agriculture que pour l'hydrologie, la structure de la saison des pluies en terme d'évènements pluvieux est souvent plus critique que le simple cumul annuel (Balme *et al.*, 2006). Au niveau agronomique et agro-climatique, les variables les plus importantes sont les dates de début et fin de la saison des pluies (Balme *et al.*, 2005 ; Balme *et al.*, 2006) ainsi que la durée de celle-ci. « *La connaissance de la date de démarrage de la saison des pluies ne renseigne en rien sur le cumul pluviométrique à venir ; en revanche, elle permet de prévoir la longueur de la saison des pluies, la fin de celle-ci étant moins variable* » (Balme *et al.*, 2005). La saison des pluies est de plus en plus courte et tardive en allant vers le Nord et vers l'Atlantique (Marteau *et al.*, 2009) ; si l'on se réfère aux critères déterminés par Sivakumar (1988), il est ainsi assez aisé de déterminer les saisons dont la répartition et les valeurs de pluie conduisent à de bonnes ou mauvaises conditions agronomiques ; l'apparition de *dry spells* est aussi mise en exergue (Janicot et Sultan, 2001, Marteau *et al.*, 2011). La date de début « agronomique » de la mousson est, quant à elle, très liée au « saut de mousson », rapide déplacement vers le nord de la Zone de Convergence Inter-Tropicale qu'on observe fin juin en général (Sultan et Janicot, 2000) ; au niveau agronomique, la date idéale de semis pour le mil est très proche de celle de ce « saut de mousson » (Sultan *et al.*, 2005). « *Concernant le lien entre démarrage agronomique et « saut » de mousson, on pourrait imaginer une stratégie simple de semis lors du « saut » de mousson* » (Balme *et al.*, 2005). On ne s'étendra pas, dans cette étude, sur le rôle des températures et du réchauffement global dans l'évolution des rendements et de la production agricoles mais il est certain que ce rôle est majeur (Sultan, 2012). De fait, les projections issues de modèles climatiques prévoient toutes des diminutions de rendements culturaux (de l'ordre de 11 à 18 %) en Afrique de l'Ouest principalement du fait du réchauffement (Roudier *et al.*, 2011), de l'accroissement de la transpiration et la baisse de la teneur en eau des sols (Léauthaud *et al.*, 2015) ; ces derniers auteurs concluent sur l'intérêt de mieux prendre en compte les évènements pluvieux extrêmes.

Quoiqu'il en soit, le lien entre la date et la durée de la mousson et les rendements agricoles est très fort, et permet à Balme *et al.* (2005) de conclure : « *En termes d'applications agronomiques, la possibilité de prévoir la longueur de la saison des pluies peut aider les agriculteurs dans le choix des variétés à semer pour minimiser les risques, par exemple en choisissant un mil à cycle plus court si la saison a démarré tardivement* ».

Afin de mieux comprendre les caractéristiques de cette diminution des pluies, on se propose de se pencher sur deux fenêtres de dimensions similaires : la Sénégambie et le bassin du Niger Moyen, soit deux ensembles d'environ 200000 km² situés, l'un sur le littoral ouest africain, l'autre à l'intérieur du Sahel (figure 4). Les deux fenêtres sont situées grosso modo à la même latitude, celle du littoral légèrement plus au nord (12°-16°30'N, 11°30'-17°O) que celle du bassin moyen du fleuve Niger (11°-15°30'N, 2°30'E-3°O). Cependant, du fait du dessin régional des isohyètes, la fenêtre sénégalaise reçoit plus d'eau que la fenêtre intérieure ; elle a aussi une plus grande variabilité nord-sud du fait d'un net rapprochement des isohyètes à l'approche de l'océan Atlantique.

Dans chacune de ces « fenêtres », les données d'une douzaine de stations pluviométriques ont été utilisées ; elles ont été fournies ou achetées auprès des Directions Nationales de la Météorologie (DMN) du Sénégal, du Burkina Faso, du Mali et du Niger. Le nombre de stations (une douzaine par région) est le nombre qui nous a paru le minimum pour avoir une bonne représentativité de chacune de ces régions ; il s'agit de stations ayant les séries ininterrompues depuis 1950 en pluviométrie journalière. Les stations ne comportent donc aucune lacune indiquée pour la période 1951-2017. Cette étude se concentre sur ces deux seules fenêtres pour une raison de coût. Le coût parfois élevé de ces données est une conséquence des PAS (Plans d'Ajustement Structurels) imposés aux pays du Sud par le FMI et les pays du Nord au début des années 1990. Depuis ces PAS, les services météorologiques vendent leurs données, et ce, pour un prix relativement élevé (Mahé et Gioda, 2009). Par ailleurs, la fenêtre Niger Moyen est la mieux connue en terme de risques hydrologiques (Descroix *et al.*, 2012) ; et les deux régions (Sénégambie et Niger Moyen) sont les mieux documentées en matière de conséquences agronomiques des changements climatiques (Sultan *et al.*, 2015).

L'indice standardisé des précipitations est défini par Balme *et al.* (2006). Celui-ci s'exprime ainsi (sous forme d'indice adimensionnel) :

$$ISP = (P_i - P_{moy})/\sigma,$$

où P_i = Pluie de l'année i ; P_{moy} = pluie moyenne de la série ; σ = écart-type de la série.

Cet ISP est utilisé ci dessous afin de pouvoir comparer des séries différentes ; il permet aussi de synthétiser l'information et de visualiser l'évolution des séries sur une longue période. Utilisé pour chacune des deux sous-régions étudiées, il est fondé sur les données spatialisées,

comme les cumuls de pluie et le nombre de jours de pluie, par la méthode des polygones de Thiessen.

Les séries chronologiques sont traitées à l'aide du logiciel Khronostat ® (Boyer, 2002) ; ce dernier rassemble des méthodes basées sur l'utilisation de tests statistiques d'homogénéité afin de détecter ruptures et tendances. En particulier, il permet d'appliquer la procédure de segmentation de Hubert (Hubert *et al.*, 1989), ainsi que les tests de Buishand et Pettitt (version modifiée du test de Mann-Whitney) ; ceux-ci ont été décrits par Lubès-Niel *et al.* (1998) ; le test de Buishand est un test d'homogénéité pour lequel l'hypothèse nulle est qu'une série temporelle est homogène entre deux temps donnés ; le test de Pettitt permet de vérifier la stationnarité de la série pluviométrique.

Les dates de début et de fin de mousson sont déterminées d'après les critères agronomiques de Sivakumar (1988). Leur spatialisation par région s'est également faite par la méthode des polygones de Thiessen.

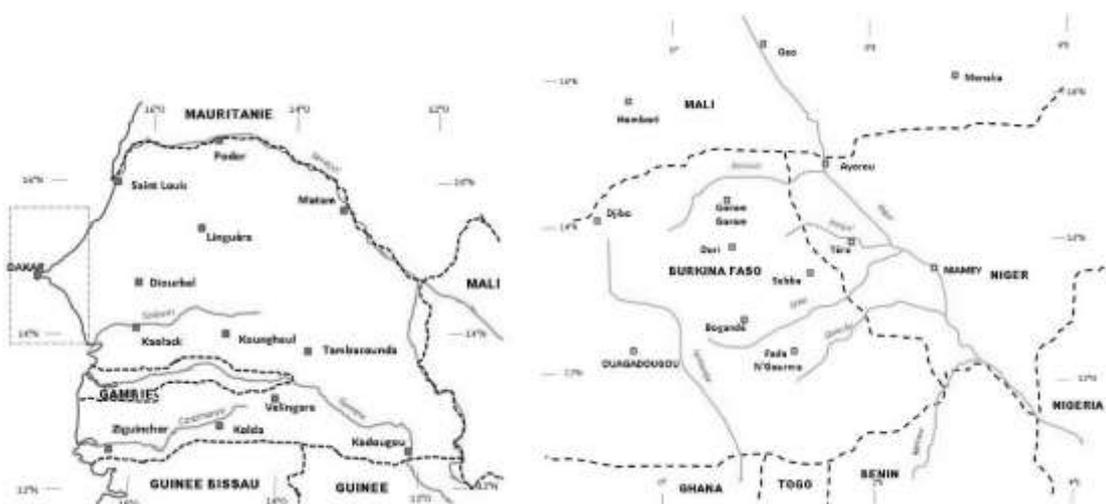
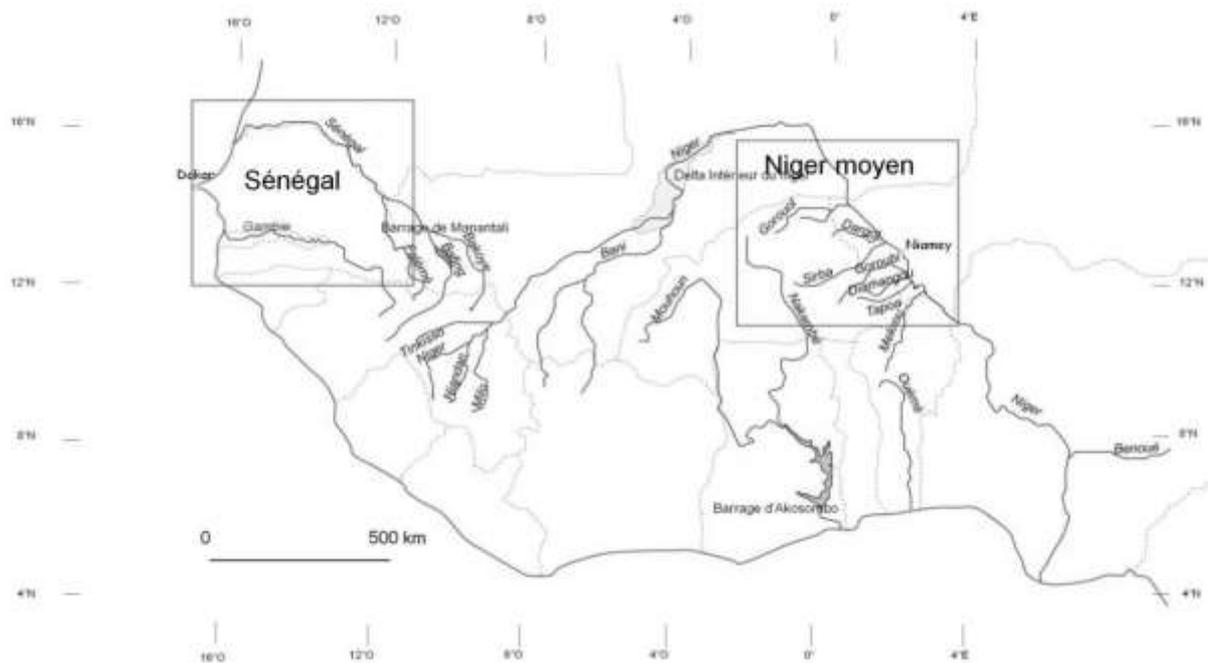


Figure 4 : localisation (en haut) des deux fenêtres (Sénégal et Bassin du Niger Moyen) où la pluviométrie est analysée ; et localisation des postes pluviométriques utilisés dans cette étude pour la Sénégal (en bas à gauche) et pour le bassin du Niger Moyen (en bas à droite)

Evolution des pluies annuelles moyennes

Les indices standardisés des précipitations (Balme *et al.*, 2006) permettent de comparer les deux régions concernées (figures 5 et 6).

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. Toutefois, les deux régions se distinguent par plusieurs différences : la décennie 1960 est plus sèche que la précédente au Sénégal, ce qui n'est pas le cas du Sahel intérieur. De plus, et cela est remarqué par Ali et Lebel (2009), la remontée se manifeste plus tôt au Sahel Intérieur (après 1993, figure 6) que sur le littoral (après 1999, figure 5). 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 ; cela est probablement en lien avec le fait que la diminution des pluies avait été d'autant plus forte en se dirigeant vers le Nord (Dacosta *et al.*, 2002).

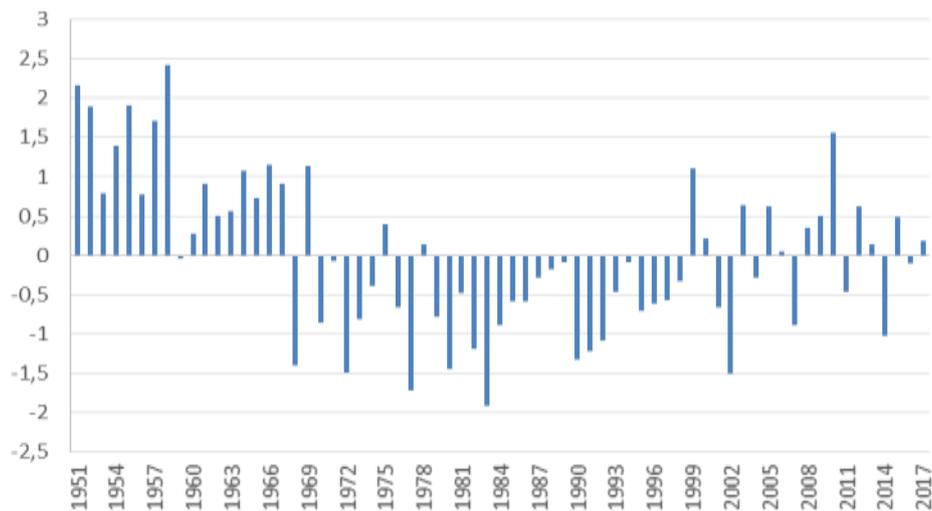


Figure 5 : évolution de l'indice pluviométrique (SPI Standard Precipitation Index) pour la Sénégal de 1951 à 2017

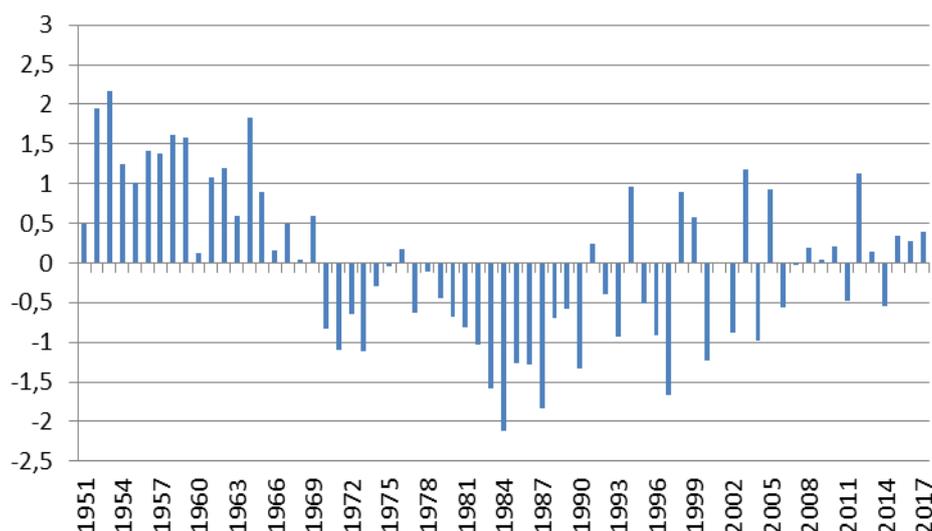


Figure 6 : évolution de l'indice pluviométrique (SPI Standard Precipitation Index) pour le Bassin du Niger Moyen de 1951 à 2017

L'analyse montre 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 (figures 5 et 6). Toutefois, ces toutes dernières années, la reprise des pluies semble « s'essouffler » dans le Niger Moyen, alors qu'elle se poursuit en Sénégambie (figures 7 et 8) où une baisse est notable toutefois depuis le début des années 2010. Dans les deux régions, l'évolution est globalement la même quelle que soit la position, comme le montrent les figures 7 et 8 où les données des deux sous-régions ont été découpées en sous-espaces (Ouest et Est pour la Sénégambie, Nord, Centre et Sud pour le Niger Moyen) pour mettre en valeur l'importance de la proximité de l'océan Atlantique ou pour illustrer le gradient pluviométrique latitudinal.

La diminution (1970-1990) (Dacosta *et al.*, 2002) puis la remontée (après 1995) des précipitations apparaissent plus marquées sur la zone littorale que sur la zone interne du Sahel. Dans le cas de la station de Dakar (aéroport de Yoff), la baisse de la pluviométrie après 1968 est bien plus marquée qu'ailleurs (figure 9), la remontée étant par contre moins prononcée ; comme on observe les mêmes tendances à Saint-Louis (Dacosta *et al.*, 2002) (et de manière moindre, à Louga), on peut émettre l'hypothèse d'une aridification du climat plus marquée aux abords de l'Océan Atlantique, ce qui est également souligné par Fall *et al.*, (2006). Cette tendance est peut être liée à l'augmentation de la fréquence des vents de Nord-Ouest de plus de 10 m/s, telle que mise en évidence par Ruë (2004) (voir chapitre 10). Elle est aussi peut être une des causes du décrochage de la station de Dakar où la température n'augmente pas, et aurait même baissé depuis 2010 (tendance non statistiquement significative toutefois). Une analyse des pluies, des vents et des températures sur le littoral de la Grande Côte sénégalaise mérite d'être effectuée pour y voir plus clair.

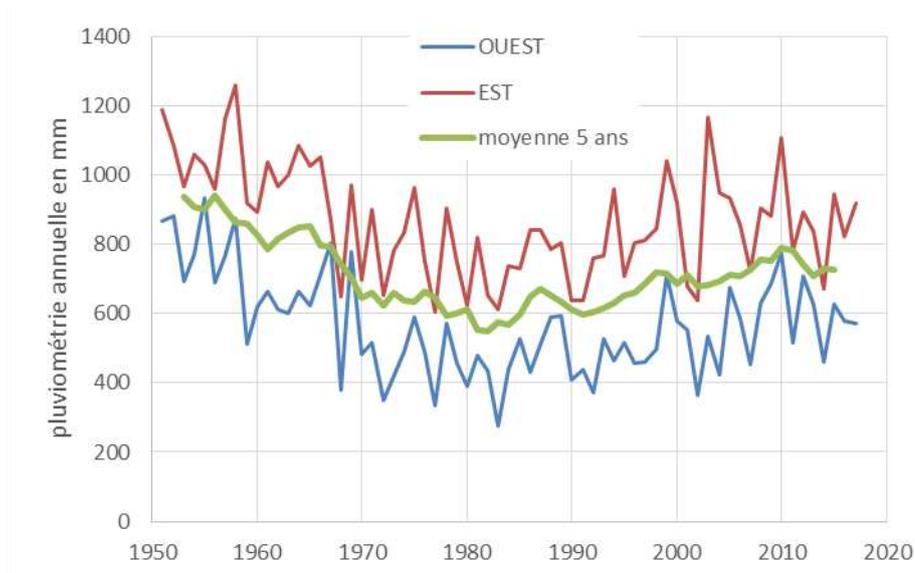


Figure 7 : évolution de la pluviométrie moyenne en Sénégambie de 1951 à 2017

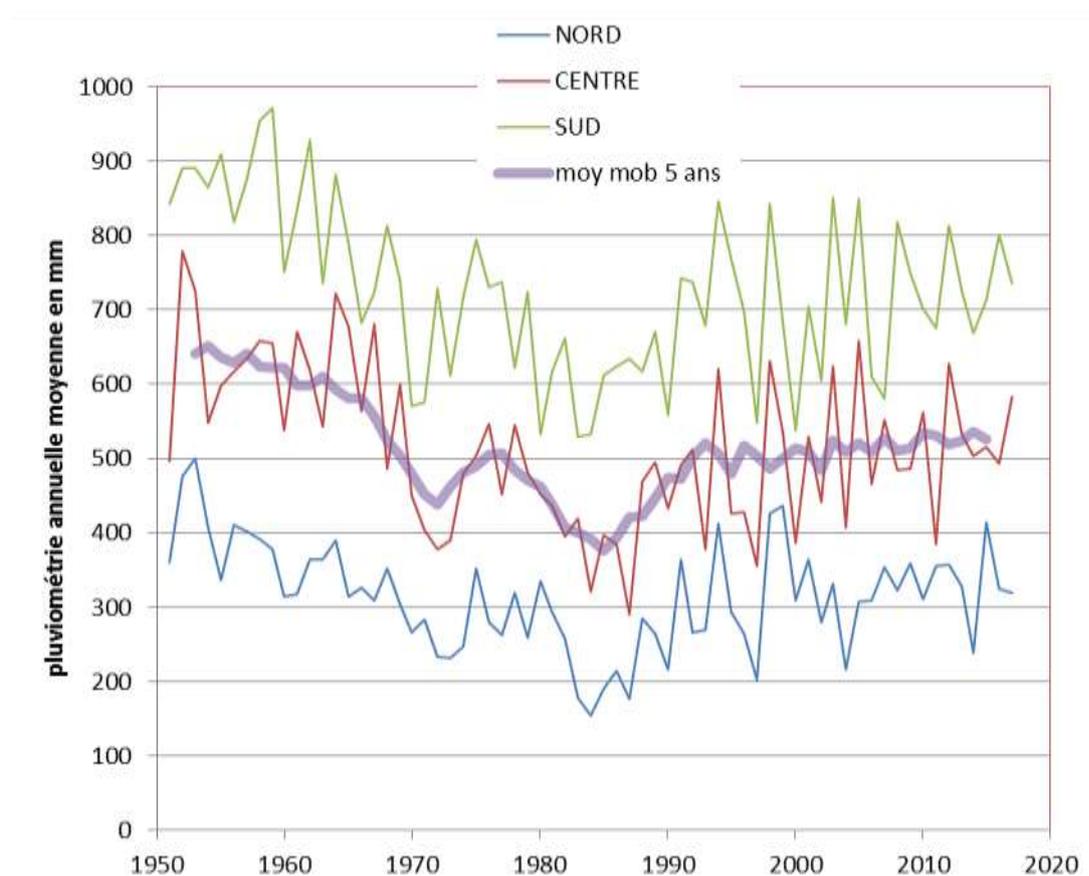


Figure 8 : évolution de la pluviométrie moyenne dans le bassin Moyen du Niger de 1951 à 2017

La diminution des précipitations a été observée dans toute l’Afrique de l’Ouest (Camberlin *et al.*, 2002), y compris dans les zones côtières du Golfe de Guinée (Moron, 1994), où les deux

saisons des pluies ont pu être concernées (Janicot et Fontaine, 1997) ; au Sahel, c'est surtout le nombre d'évènements pluvieux qui a diminué, plus que le volume précipité par évènement (Le Barbé et Lebel, 1997). On a cru pendant quelques années que la remontée récente des précipitations ne concernait pas la partie ouest du Sahel (Lebel et Ali, 2009), mais celle-ci y est bien arrivée, avec 5 ou 6 ans de retard sur le Sahel intérieur (voir plus bas).

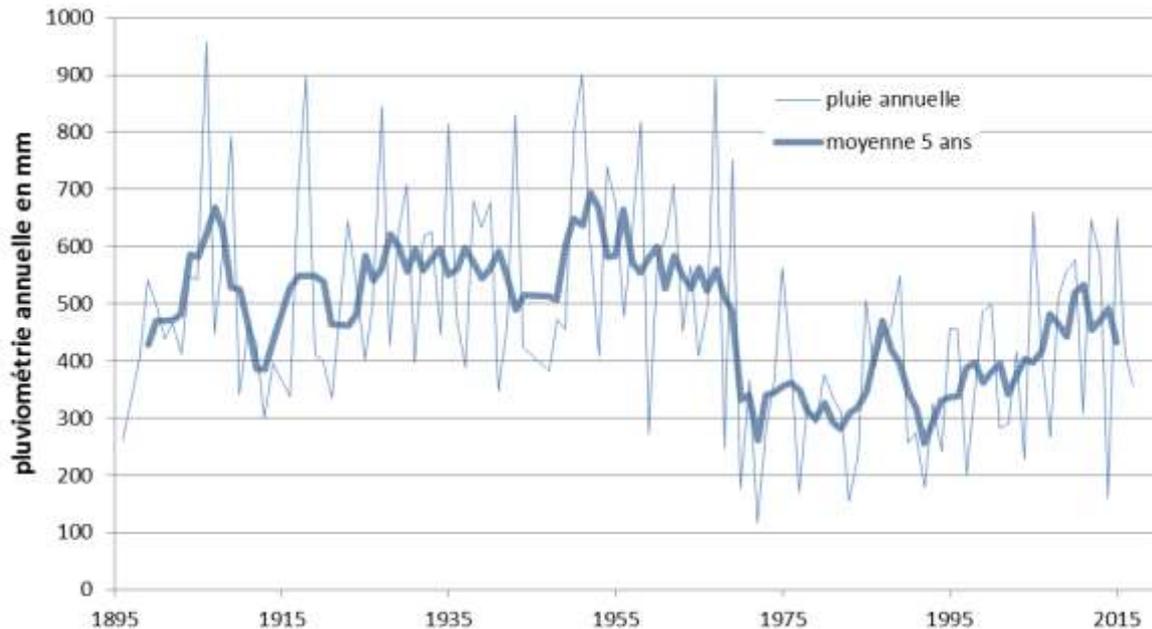


Figure 9 : évolution de la pluviométrie à Dakar 1895 à 2017 : une rupture bien plus nette

Deux éléments sont souvent cités ces dernières années pour expliquer respectivement l'augmentation de la fréquence des inondations et la baisse des rendements agricoles en Afrique de l'Ouest soudano-sahélienne : une augmentation de l'intensité des précipitations (Descroix *et al.*, 2013 ; Panthou *et al.*, 2014, Descroix *et al.*, 2015) et une diminution de la durée de la saison des pluies, ce qui a été observé depuis quelques années durant les sécheresses (Diop *et al.*, 1996; Balme *et al.*, 2005).

Avant une analyse plus précise des jours pluvieux à fort cumul, nous analysons déjà la hauteur moyenne tombée par jour de pluie, en divisant la précipitation annuelle moyenne par décennie par le nombre de jours pluvieux de l'année. Dans les deux fenêtres régionales, on observe une évolution similaire de la pluviométrie, qui diminue fortement pendant les décennies 1970 et 80 pour remonter lentement ensuite ; le nombre d'évènements pluvieux (supérieurs à 0,5 mm par jour) suit à peu près la même évolution, de manière un peu plus marquée dans le Moyen Niger qu'en Sénégambie (figures 10 et 11).

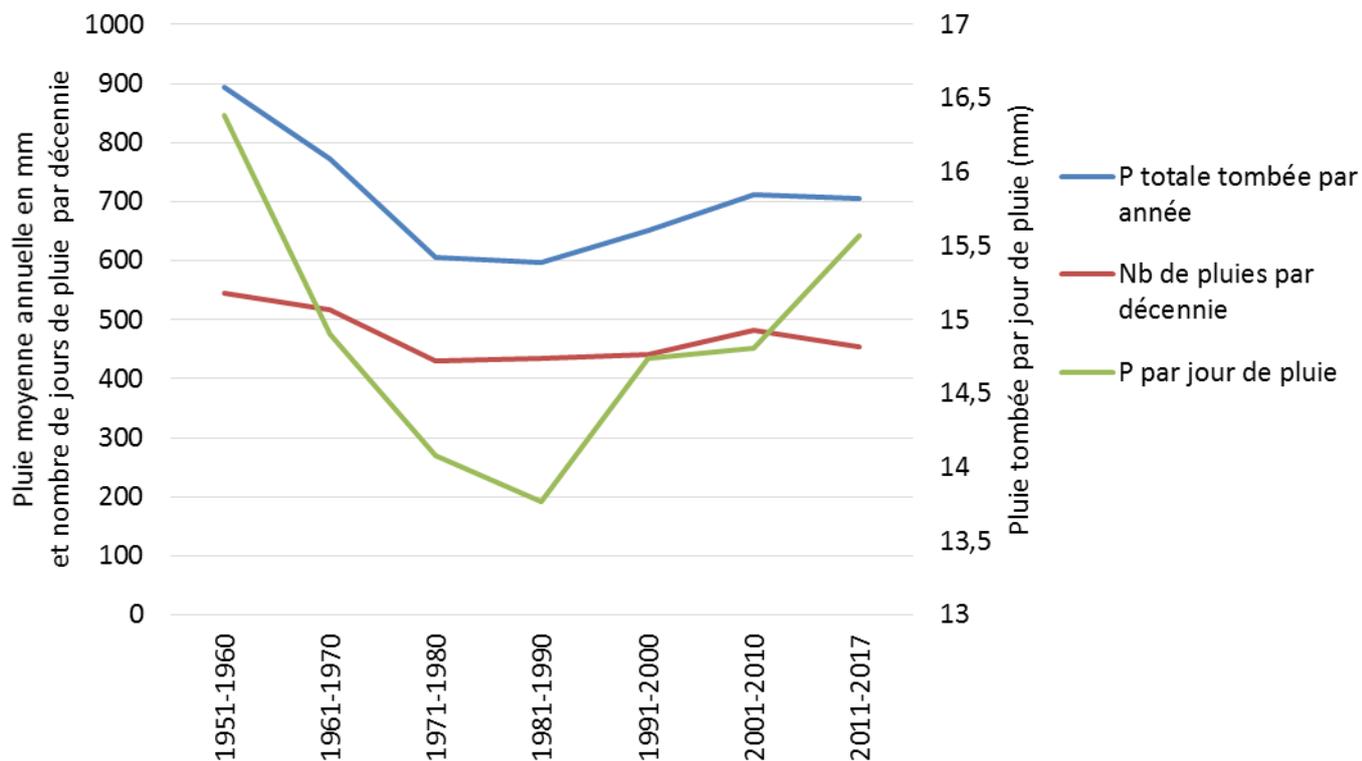


Figure 10 : évolution de la pluie annuelle (moyenne par décennie), du nombre de jours de pluie (par décennie) et de la moyenne de la pluie tombée par jour de pluie, en Sénégambie, 1951-2017

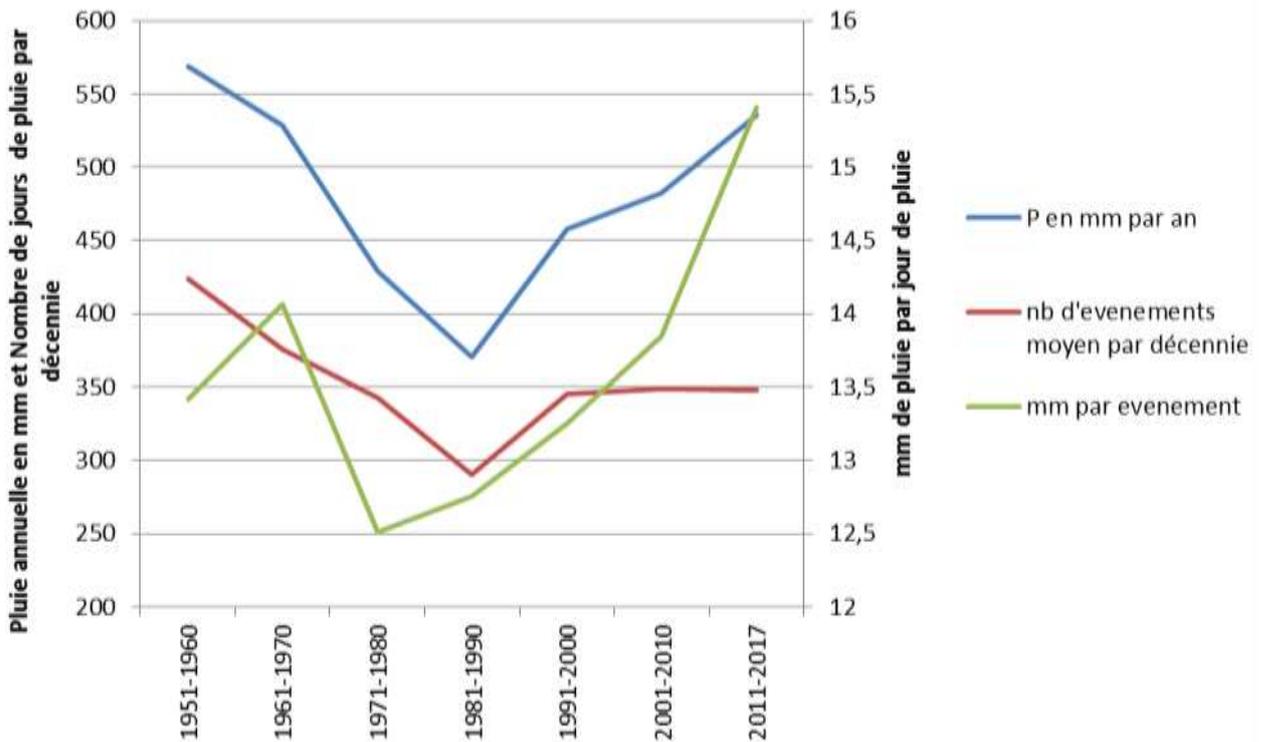


Figure 11 : évolution de la pluie annuelle (moyenne par décennie), du nombre de jours de pluie (par décennie) et de la moyenne de la pluie tombée par jour de pluie, dans le Bassin du Niger Moyen, 1951-2017

Evolution des pluies de fort cumul journalier

Les séries statistiques constituées par la valeur maximale de la pluie en 24 h (partie droite du tableau 1) sont analysées par décennies de 1951-1960 à 2001-2011 (on a adjoint la demi-décennie 2009-2013 pour cerner d'éventuelles tendances récentes). Elles sont à la fois bien plus souvent aléatoires que celles constituées par le total de la pluviométrie annuelle, et elles comportent bien moins de ruptures temporelles. Par ailleurs, les segmentations opérées par la procédure de Hubert (Hubert *et al.*, 1989 ; Paturel *et al.*, 1996 ; Boyer, 2002) correspondent, pour une grande proportion des stations, au début, assez brutal, de la grande période sèche 1968-1995 (21 cas sur 28 signalés en gras dans le tableau 1) ; inversement, dans les séries des valeurs maximales annuelles de pluie en 24 h, elles ne correspondent que dans 3 cas sur 28 au début de cette sécheresse ; pour cette variable, les ruptures chronologiques identifiées correspondent aux événements vraiment extrêmes (*i.e.* 230 mm en 1932 à Dakar, ou 261 mm en 2009 à Ouagadougou). On entrevoit probablement là une limite de la méthode de segmentation. La série des maxima journaliers par année pour la station de Dakar ne montre en effet pas d'autre rupture que celle-là ; une diminution relative de la valeur des maxima annuels est perceptible entre 1968 et 1995 mais elle n'est pas significative (figure 12). Cela provient d'un effet d'échantillonnage, très fort dans ce type de série (Panthou *et al.*, 2013). Le seul événement notoire est celui de 1932 (215 mm en 24 h) ; le deuxième plus fort cumul en 24 h est celui observé le 26 août 2012 (Descroix *et al.*, 2015), soit près de 161 mm ; sept autres événements de valeur semblable (plus de 144 mm) sont observés entre 1927 et 1996.

Par contre, si l'on s'intéresse à l'ensemble des événements pluvieux de plus d'un certain seuil en 24 heures, et au cumul de précipitations qu'ils ont occasionné, on observe une évolution calquée sur la phase de sécheresse. Le tableau 2 ci-dessous montre, pour le Sénégal, à travers les tests de Student et WRS, quelles sont les évolutions inter décennales des précipitations de

plus 20, 40, 60, 80 et 100 mm en 24 h qui sont significatives ou assez significatives au vu de ces deux tests ; le tableau met en évidence les éléments suivants :

- l'évolution la plus significative au niveau statistique est celle qui a lieu entre, d'une part les décennies 1951-1960 et 1961-70 et d'autre part les décennies 1971-1980 et 1981-1990 ;
- de manière moins prononcée, on constate que la remontée des précipitations après la phase aigue de la sécheresse est également un changement significatif suivant ces deux tests (décennies 1971-1980 et 1981-1990 vis-à-vis des décennies 1991-2000 et 2001-2010) ; mais ce n'est pas toujours le cas, sauf avec la « demi-décennie partielle » 2009-2013 qui semble elle, se démarquer plus nettement.

On s'intéresse à présent uniquement aux jours de pluie caractérisés par des montants de plus de 60, 80 et 100 mm en 24 h. Nous avons classé ces jours par décennie afin d'avoir un nombre significatif d'éléments dans la population des jours de pluie. Pour arriver aux années récentes, nous avons ici pu rajouter la période de 7 ans 2011-2017 ; l'évolution de ces 6 décennies et fraction est assez similaire dans les deux régions (Sénégal et Bassin du Niger Moyen), que ce soit en terme de nombre de jours de pluie ou de cumul précipité (figures 13 à 16). La seule différence notable est qu'en Sénégal, le nombre de jours de pluie de fort cumul ainsi que les pluies observées ces jours-là ont augmenté durant la décennie 1991-2000 pour diminuer ensuite durant la décennie suivante, mais réaugmenter nettement lors de la période 2011-2017.

STATION	PERIODE	TENDANCES ET RUPTURES DE LA PLUVIOMETRIE						TENDANCES ET RUPTURES DES MONTANTS PLUVIO MAX EN 24 H						
		aléatoire	ruptures	segment 1	segment 2	segment 3	segment 4	aléatoire	rupture	segment 1	segment 2	segment 3	segment 4	segment 5
SENEGAL														
ST LOUIS	1856-2013	N	O	1856-1927	1929-1950	1951-1958	1959-2013	O	N	1856-2013				
DAKAR	1896-2013	N	O	1896-1969	1970-2013			O	N	1896-1931	1932-1932	1933-2013		
ST LOUIS	1951-2013	N	O	1951-1955	1956-1969	1970-2013		O	O	1951-1958	1959-2013			
DAKAR	1951-2013	N	O	1951-1969	1970-2013			O	N	1951-1961	1962-1964	1965-2013		
DIORBEL	1951-2013	N	O	1951-1958	1959-1972	1973-2013		N	O	1951-2013				
KAOLACK	1951-2013	N	O	1951-1958	1959-1971	1972-1998	1999-2013	O	N	1951-2013				
KEDOUGOU	1951-2013	N	O	1951-1953	1954	1955-2013		O	N	1951-2013				
KOLDA	1951-2013	N	O	1951-1964	1965-2005	2006	2007-2013	N	O	1951-1971	1972-2013			
KOUNGHEUL	1951-2013	N	O	1951-1966	1967-2002	2003-2013		O	N	1951-1959	1960-2013			
LINGUERE	1951-2013	O	O	1951-1961	1962-2008	2009-2013		O	N	1951-2013				
MATAM	1951-2013	N	O	1951-1966	1967-1998	1999-2013		O	N	1951-2013				
PODOR	1951-2013	O	O	1951-1954	1955	1956-2013		O	O	1951-1964	1965	1966-2013		
TAMBACOUNDA	1951-2013	N	O	1951-1966	1967-2013			O	N	1951-2013				
VELINGARA C	1951-2013	N	O	1951-1967	1968-2013			O	N	1951-2013				
ZIGUINCHOR	1951-2013	O	O	1951-1967	1968-2007	2008-2013		O	N	1951-1998	1999	2000-2009	2010-2013	
SENEGAL	1951-2013	N	O	1951-1958	1959-1969	1970-1998	1999-2013							
NIGER MOYEN														
BOGANDE	1951-2013	O	O	1951-1968	1969-1993	1994-2013		O	N	1951-2013				
GOROM GOROM	1951-2013	O	O	1951-1969	1970-2000	2001-2013		N	N	1951-2004	2005-2006	2007-2013		
DORI	1951-2013	N	O	1951-1966	1967-2013			O	N	1951-2013				
FADA N GOURMA	1951-2013	N	O	1951-1964	1965-2013			O	N	1951-1959	1960-2013			
OUAGA AEROPORT	1951-2013	N	O	1951-1976	1977-2013			O	N	1951-2008	2009	2010-2013		
NIAMEY	1951-2013	N	O	1951-1969	1970-2013			O	N	1951	1952	1953-2013		
GAO	1951-2013	N	O	1951-1959	1960-2013			N	O	1951-1952	1953-1954	1955-1974	1975	1976-2013
MENAKA	1951-2013	N	O	1951-1967	1968-1997	1998-2013		O	N	1951-2013				
SEBBA	1951-2013	N	O	1951-1967	1968-2013			N	O	1951-1979	1980	1981-2013		
DJIBO	1951-2013	N	O	1951-1965	1966-1981	1982-1993	1994-2013	N	O	1951-1981	1982-2005	2006	2007-2013	
HOMBORI	1951-2013	N	O	1951-1958	1959-1981	1982-1990	1991-2013	N	N	1951-2013				
AYOROU	1951-2013	O	O	1951-1966	1967-1997	1998-2013		O	N	1951-2013				
MOY NIGER MOYEN	1951-2013	N	O	1951-1965	1966-1980	1981-1990	1991-2013							

Tableau 1. Tendances et ruptures repérées dans les séries pluviométriques 1951-2013 (et St Louis et Dakar depuis l'origine des stations, respectivement 1856 et 1896). Tendances et ruptures repérées dans les séries pluviométriques, pluviométrie annuelle et maximum en 24 h, sur la période 1951-2013 (et aussi respectivement depuis 1856 et 1896 pour Saint-Louis et Dakar). Le test de corrélation sur le rang détermine si une série est aléatoire ou non ; les tests de Buishand et de Pettitt déterminent l'existence de ruptures dans une série. La procédure de Hubert (Hubert *et al.*, 1989) permet de segmenter une série statistique en sous-séries plus homogènes ; les périodes signalées en gras (doublons) indiquent les ruptures concordant avec le début de la période sèche (1968-1995). O = Oui, N = Non signifie que la série est aléatoire ou non ; qu'elle comporte une rupture ou non ; les stations Saint-Louis et Dakar, qui ont les deux plus longues séries d'observations en Afrique de l'Ouest, sont traitées sur la période 1951-2013 afin qu'elles soient comparables aux autres séries, et aussi sur la série entière pour montrer les différences éventuelles sur le long terme.

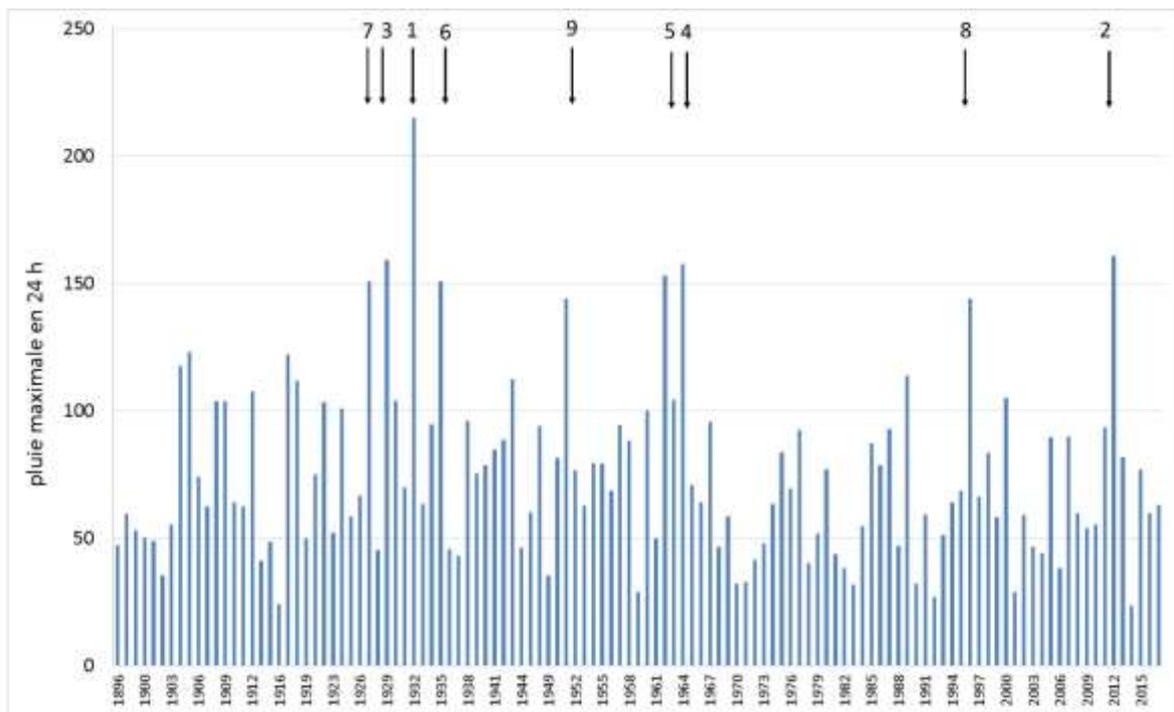


Figure 12: série du maximum annuel de précipitation tombée en 24 h pour la station de Dakar ; on remarque un seul évènement notoire, celui de 1932. Le deuxième évènement, celui du 26 août 2012, a eu 7 autres valeurs proches dans les années antérieures.

Tableau 2. Différences significatives (*) et assez significatives (*) entre décennies sur les séries de précipitations en 24 H au Sénégal, selon les tests de Student (moyenne) et wrs (médiane) (student/wrs) pour le nombre de jour de pluies journalières supérieures à certains seuils (N) et pour le cumul de précipitations tombé lors de ces évènements (sum).**

student/wrs	+20 - N	+20 - sum	+40 - N	+40 - sum	+60 - N	+60 - sum	+80 - N	+80 - sum	+100 - N	+100 - sum
1951-1960 vs 1961-1970										
1951-1960 vs 1971-1980	*/*	*/*	*/*	*/***	***/*	***/*	*/*	*/*		
1951-1960 vs 1981-1990	*/*	*/*	*/*	*/*	***/*	***/*	***/*	***/*	*/***	*/***
1951-1960 vs 1991-2000			*		*/*	*/*				
1951-1960 vs 2001-2010					*/*	/*				
1951-1960 vs 2009-2013										
1961-1970 vs 1971-1980				*/*	*/*	*/*	*/*	*/*		
1961-1970 vs 1981-1990					*/*	*/*	***/*	***/*	*/*	*/*
1961-1970 vs 1991-2000										
1961-1970 vs 2001-2010										
1961-1970 vs 2009-2013										
1971-1980 vs 1981-1990										
1971-1980 vs 1991-2000										
1971-1980 vs 2001-2010										
1971-1980 vs 2009-2013				*/*	*/*	*/*	*/*	*/*		
1981-1990 vs 1991-2000							*/*	*/***	*/*	*/***
1981-1990 vs 2001-2010							*/	*/*	*/*	*/*
1981-1990 vs 2009-2013			*/	*/	*/*	*/*	*/*	***/*	*/*	*/*
1991-2000 vs 2001-2010										
1991-2000 vs 2009-2013										
2001-2010 vs 2009-2013										

On observe aussi une différence dans la répartition des cumuls des évènements journaliers concernés. En Sénégal, le nombre de jours de pluie de plus de 80 et 100 mm/24 h, ainsi que les cumuls pluviométriques correspondants (figures 13 à 16) ont atteint voire dépassé, uniquement pour la dernière période disponible (2011-2017), les valeurs maximales observées

avant la sécheresse. Alors que dans le Moyen Bassin du Niger, ce sont les pluies de plus de 60 mm/jour qui ont dépassé en nombre comme en cumul, les valeurs observées durant cette dernière décennie. Panthou *et al.* (2014) observent de même une augmentation à la fois du nombre de jours de précipitations élevées (qu'ils nomment "extrêmes") et du total de précipitation observée pour ces jours-là. Ils rejoignent en cela les observations faites sur les causes climatiques des nombreuses inondations urbaines ces dernières années en Afrique de l'Ouest (recensées dans Descroix *et al.*, 2015a) mais qui ont aussi touché les zones rurales (Paeth *et al.*, 2010) ; ces auteurs démontrent l'existence d'une cause "édaphique" (les sols de plus en plus encroûtés et imperméabilisés) à ce surcroît d'inondations, mais aussi d'une "intensification" des pluies, révélée par un accroissement du nombre des événements les plus abondants. Ceci était déjà observé à une échelle plus continentale par New *et al.* (2006).

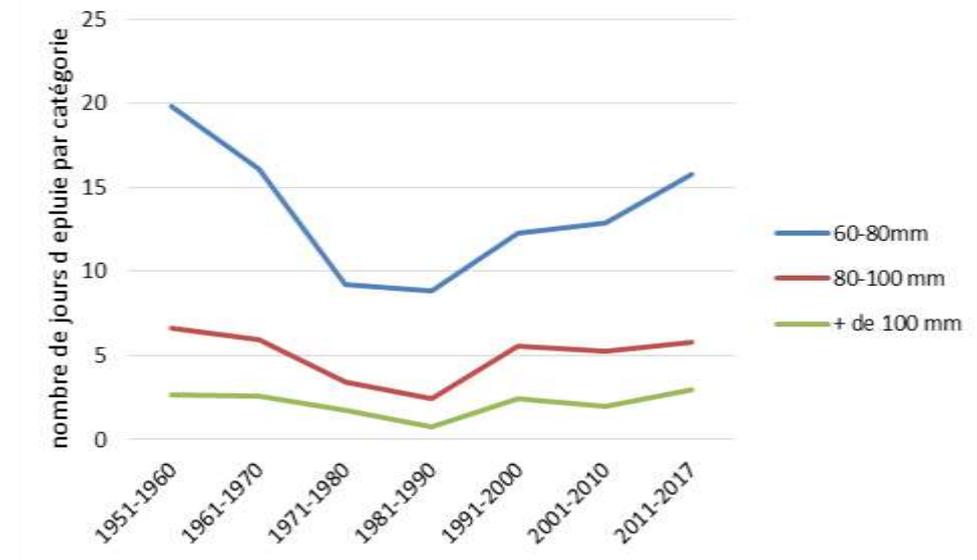


Figure 13 : évolution par décennie du nombre de jours de pluie de plus de 60, 80 et 100 mm en 24h, Sénégal, par décennie, de 1951 à 2017

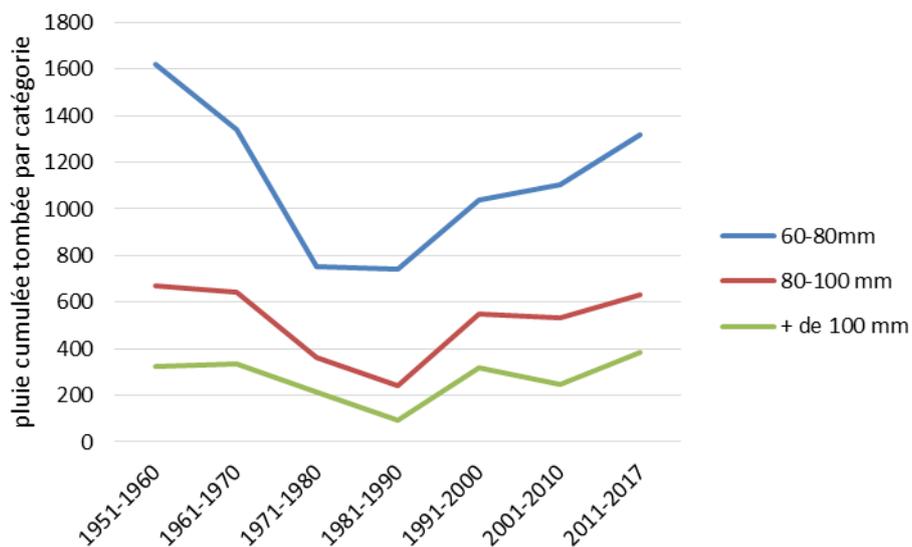


Figure 14 : évolution par décennie du cumul des précipitations tombées lors de jours de pluie de plus de 60, 80 et 100 mm en Sénégal, par décennie, de 1951 à 2017

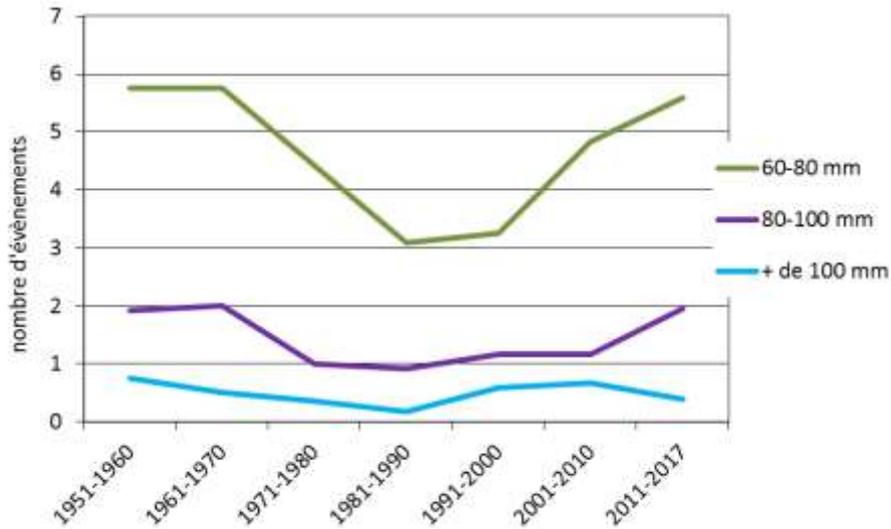


Figure 15 : évolution du nombre de jours de pluie de plus de 60, 80 et 100 mm en 24h, Niger Moyen, par décennie de 1951 à 2017

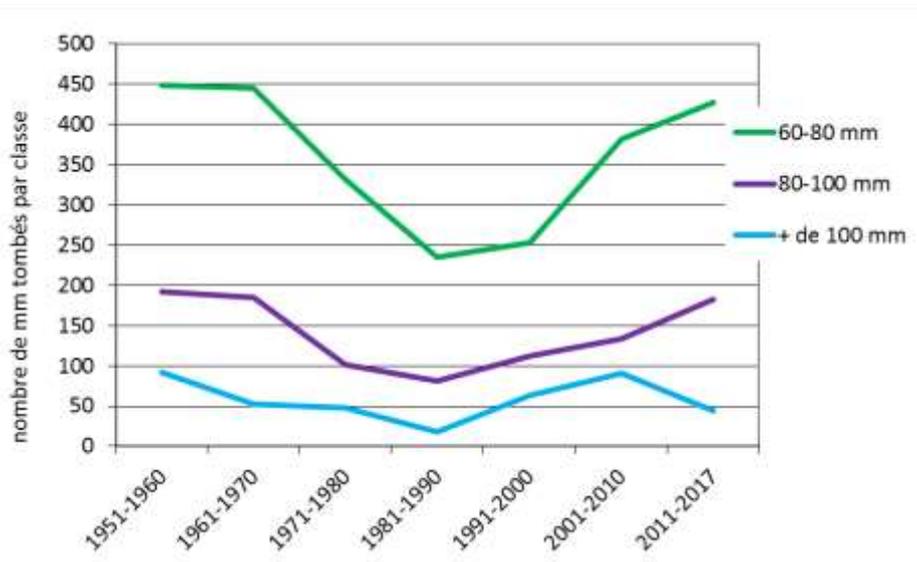


Figure 16 : évolution du cumul des précipitations tombées lors de jours de pluie de plus de 60, 80 et 100 mm au Niger Moyen, par décennie de 1951 à 2017

Evolution de la durée des moussons

Quand on a la chance de pouvoir être souvent « sur le terrain » on recueille souvent les témoignages de paysans sahéliens se plaignant souvent d'une plus grande irrégularité intra-saisonnière des précipitations. Cette irrégularité a été confirmée par les travaux de Balme *et al.* (2005 et 2006), Sultan *et al.* (2000 et 2005), et Marteau *et al.* (2009 et 2011).

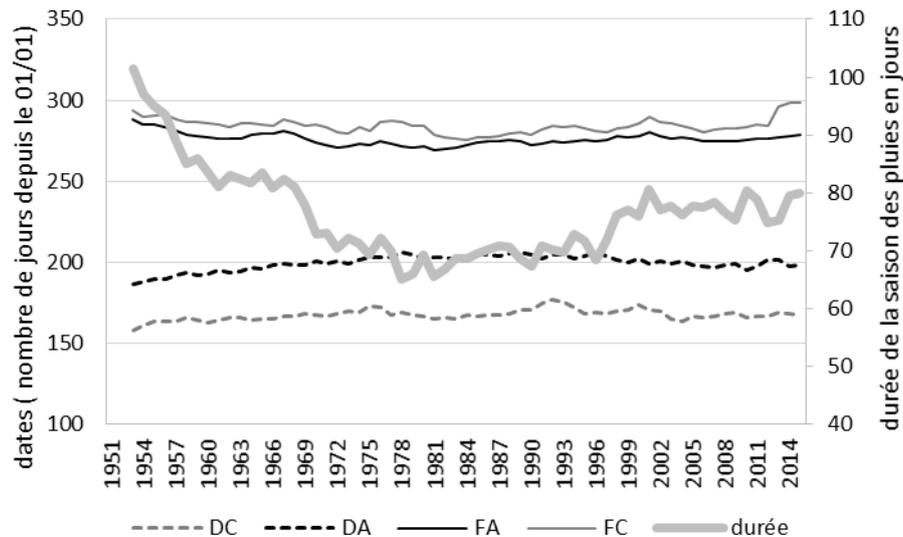


Figure 17 : date de début et de fin climatique et agronomique, et durée de la saison des pluies au Sénégal entre 1951 et 2017 (DC= début climatique ; DA = début agronomique ; FA = fin agronomique ; FC = fin climatique) ; moyenne glissante sur 5 ans (d'où fin en 2015)

Dans cette sous-partie, les analyses portent sur les démarrages et fins de saison des pluies d'un point de vue climatique (*i.e.* le premier évènement notoire, ici arbitrairement la première pluie de plus de 10 mm - et pour la fin, le dernier épisode de 10 mm). D'un point de vue agronomique, nous avons adopté ici le mode de détermination proposé par Sivakumar (1988), tel que repris par Balme *et al.* (2005). Le début de l'hivernage est donc considéré comme la première précipitation ou ensemble d'évènements produisant plus de 20 mm en moins de trois jours et non suivi par une phase sèche de plus de 7 jours pendant le mois suivant. C'est cette configuration qui manque souvent pour une "bonne" mousson au niveau agronomique, et on observe fréquemment des séquences sèches de 15-20 jours dans le premier mois ; de même, la fin agronomique est le dernier évènement de plus de 10 mm non précédé par un épisode sec de plus de 20 jours (Sivakumar, 1988).

Il est clair, depuis longtemps, que les années 1950-1967 ont été particulièrement humides en Afrique de l'Ouest, ce qui a été rappelé plus récemment (Nicholson, 2005 et 2013). Cela s'est clairement traduit aussi par des hivernages plus longs tant en Ségambie (figure 16) qu'au Sahel central (figure 17 pour le Niger Moyen). Pendant la sécheresse, l'hivernage « agronomique » a été bien plus court qu'auparavant, avec une durée moyenne de 70 jours en Ségambie (figure 16), ce qui semble dû essentiellement à un démarrage tardif des pluies, après le 200^{ème} jour (soit fin juillet) au lieu de début juillet auparavant. Depuis, le début de l'hivernage redevient un peu plus précoce.

Pour la fenêtre du Sahel intérieur (figure 17), on observe la même diminution de la durée de la mousson agronomique. Il y a une remontée après la première phase de sécheresse du début des années 1970, et une seconde diminution brutale au début des années 1980, la durée s'abaissant à moins de 60 jours contre 70 jours lors de la période humide précédente. Là aussi, c'est le démarrage tardif des pluies qui explique l'essentiel de ce raccourcissement, car se produisant alors mi-juillet (jour 195) au lieu de début juillet (jour 185). Par contre, la remontée, très rapide aussi, de la durée de l'hivernage après les phases sèches, semble interrompue au début des années 2000, la durée se stabilisant vers une durée inférieure à 65 jours ; on observe une nette remontée de la durée de la saison des pluies depuis le début des années 2010.

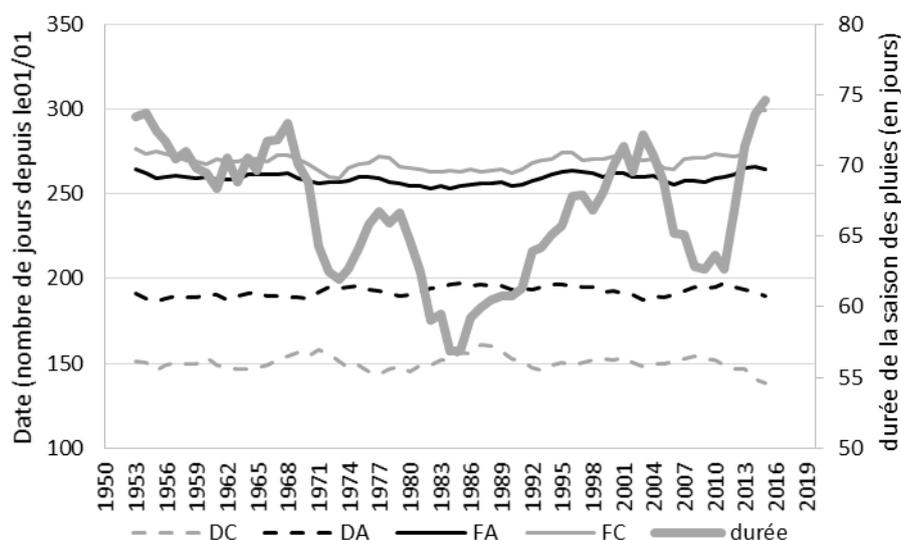


Figure 18: date de début et de fin climatique et agronomique, et durée de la saison des pluies pour la fenêtre intérieure du Sahel (bassin du Niger Moyen) entre 1951 et 2013 (DC= début climatique ; DA = début agronomique ; FA = fin agronomique ; FC = fin climatique)

Un ouvrage paru en novembre 2015 est consacré à l'impact des changements climatiques et environnementaux sur les sociétés rurales en Afrique de l'Ouest (Sultan *et al.*, 2015). Dans cet ouvrage, on retiendra ici principalement que Sultan *et al.* (2015) rejoignent Roudier *et al.* (2011) pour montrer l'impact des changements climatiques sur les rendements céréaliers présents et futurs ; ces derniers auteurs prévoient un impact plus fort du réchauffement et d'un démarrage tardif des pluies, attendus dans quelques décennies, dans l'Ouest du Sahel (le Sénégal en particulier) qu'au centre de celui-ci (Niger et Burkina Faso). A l'inverse, de manière plus positive (car ne faisant pas de projections sur le futur ?), Muller *et al.* (2015) constatent un regain récent et spectaculaire de la culture du mil sanio dans les paysages du Sine (Ouest du Sénégal) ; il s'agit d'une espèce à cycle long, qui se révèle un excellent marqueur de la remontée pluviométrique observée depuis une quinzaine d'années au Sénégal (contre vingt ans au Sahel central). Ce surplus de pluie, observé surtout en fin d'hivernage, permet le retour d'une céréale qui avait presque disparu après les grandes sécheresses des années 1970 et 1980.

Au moment de ces grandes sécheresses (le déficit a perduré, comme on l'a vu, de 1968 à 1995), on a donc bien assisté, en plus d'une baisse de la pluviométrie, à une diminution de la durée de la saison pluvieuse « agronomique », dans les deux régions et dans les deux cas, principalement liée à un démarrage tardif de la saison (Sultan *et al.*, 2013).

Reste à déterminer si ces hivernages, devenus plus longs ces toutes dernières années, ont connu une bonne répartition des pluies durant la saison, tant il est vrai que même le mil, qui est la céréale la mieux adaptée au contexte sahélien semi-aride, a besoin d'une bonne pluie au minimum chaque semaine. Le tableau 3 est instructif à ce sujet puisqu'il répertorie les années durant lesquelles la saison agroclimatique ne s'est jamais déclarée suivant les critères de Sivakumar (1988) cités ci-dessus. On constate logiquement que ces critères sahéliens deviennent peu restrictifs pour les stations les plus méridionales, au climat soudanien, puisque des stations comme Kolda et Kedougou au Sénégal, ou bien Fada et Ouagadougou au Burkina Faso, n'ont connu aucune saison « ratée » depuis 1951.

Par ailleurs, on constate que :

- dans les deux “fenêtres”, le nombre de saisons ratées diminue logiquement vers le sud ;
- dans les deux cas également, on distingue bien l'épisode sec de 1968-1995, avec des années particulièrement sèches partout comme 1972, 1977 ou 1983-1984 ;
- par contre, pour la fenêtre interne du Sahel, après une phase de répit durant les années 1990, on observe une augmentation très sensible des années sans mousson agronomique organisée durant les années 2000, sans que celles-ci aient connu de baisse des précipitations ; cet élément indique donc bien que la répartition temporelle des pluies durant la saison a été modifiée, et confirme que la pluviométrie annuelle totale n'est pas suffisante pour obtenir une bonne récolte.

Ceci peut être une explication à l'exacerbation en cours du « paradoxe hydrologique du Sahel » avec l'augmentation sensible des coefficients d'écoulement des bassins (Descroix *et al.*, 2012 ; Descroix *et al.*, 2015b). Par ailleurs, le récent ouvrage de synthèse, cité plus haut (Sultan *et al.*, 2015), offre un panorama des changements climatiques tels qu'ils ont été observés depuis un siècle en Afrique de l'Ouest, ainsi que des prévisions issues de plusieurs modèles. Il permet de comprendre les impacts que la longueur de la mousson ou son simple retard, ou encore l'évolution des précipitations extrêmes, peuvent avoir sur les rendements agricoles, donc sur le bien-être des sociétés rurales et la sécurité alimentaire.

Enfin, le fait que le retour des pluies, globalement très positif pour les sociétés rurales, ne soit pas toujours perçu ou reconnu, pourrait être lié aux dégradations subies par les sols et la végétation durant la phase de sécheresse, tant au Niger ou au Burkina (Descroix *et al.*, 2012), qu'au Mali (Kergoat *et al.*, 2015). En effet, la végétation a parfois été irrémédiablement détruite, les sols très indurés ou encroûtés. Cela s'est traduit par une très forte réduction de la capacité de rétention en eau des sols, ce qui provoque, depuis quelques années, un accroissement notoire des inondations. Ces sols qui n'absorbent plus d'eau, ayant perdu structure et nutriments pour ce faire, sont peut-être à l'origine du défaut de perception fréquemment observé de l'amélioration pluviométrique. L'eau ruisselle au lieu de profiter aux sols et à la végétation ; on peut résumer la situation en disant qu'**à une sécheresse climatique a souvent succédé une sécheresse édaphique.**

Les paysans ont pourtant souvent été les premiers à se rendre compte de ce qu'ils perçoivent comme une amélioration ; cependant, les rendements ont certes augmenté, mais moins que ce que l'augmentation des pluies laisserait prévoir, du fait de l'augmentation déjà sensible des températures (Roudier *et al.*, 2011 ; Sultan *et al.*, 2015) ; cela a été assez rapide dans le Sahel où les sols sont très pauvres et où le quasi seul « intrant » est l'eau de pluie. Parfois, vers 2005, les paysans ont aussi pu percevoir que leurs pratiques agricoles mêmes « produisaient » du ruissellement, et spontanément se remirent à pratiquer les méthodes ancestrales, issues des savoirs locaux, de l'agro-foresterie. Il s'agit en particulier de ce qu'on appelle la RNA (Régénération Naturelle Assistée), c'est-à-dire le fait de laisser des arbres (en particulier des légumineuses) pousser dans les champs, afin de limiter l'érosion éolienne et hydrique, et de faciliter la fixation de l'azote qui manque cruellement aux sols sableux du Sahel (Larwanou *et al.*, 2006 ; Reij *et al.*, 2009) mais aussi plus simplement, d'un grand nombre d'initiatives surgies d'un village ou d'une association pour reverdir le Sahel (Luxereau et Roussel, 1997).

La recrudescence des inondations (Sighomnou *et al.*, 2013 ; Descroix *et al.*, 2015) est presque “normale” du fait que les sols sont dégradés par les années de déficit et parfois, par la surexploitation, et aussi parce que les pluies ont augmenté. Elles ont repris des valeurs plus proches de celles qu'on observait au début du 20^{ème} siècle, mais cela n'est pas toujours gage d'une bonne répartition durant la saison. Et si les pluies augmentent plus tôt au Sahel intérieur qu'en Sénégal, il semble que le nombre de “moussons ratées” soient à nouveau en

augmentation ces dernières années, sans qu'on ne note pour autant de réduction des cumuls annuels précipités.

Conclusion

La pluviométrie des deux sous-espaces ouest-africains étudiés ici a recommencé à augmenter au milieu ou à la fin de la décennie 1991-2000, suivant les stations analysées. Mais elle n'a nulle part atteint les valeurs annuelles des décennies 1950-70, qui étaient elles-mêmes excédentaires par rapport à la moyenne à long terme (1900-2015, voir figure 1). Cette augmentation s'est accompagnée de celle de la hauteur précipitée moyenne par jour de pluie, mais surtout, d'une augmentation plus prononcée de l'occurrence des jours de pluie de fort cumul (pluies "extrêmes"), et cela dans les deux sous-régions étudiées ici (la Sénégambie et le bassin du fleuve Niger Moyen).

Une analyse des séries chronologiques révèle l'importance de la grande période sèche (1968 à 1993 au Sahel central, 1968 à 1999 en Sénégambie), dont le début est dans toutes les stations ou presque, une date de rupture stationnelle dans la série des pluies annuelles. La fin de la sécheresse est moins nette et moins marquée, et de ce fait moins souvent marquée par une rupture. C'est beaucoup plus rarement le cas pour les séries du maximum de pluie en 24 h. Enfin, les dates de début de la saison des pluies sont redevenues bien plus précoces avec le retour des pluies, dès la fin des années 1990 ; les dates de fin de mousson ont moins évolué. Cependant, on note une nette augmentation de la durée de la mousson. Mais alors que l'augmentation des pluies s'est plus fait attendre à l'Ouest (Sénégambie) qu'au Sahel central (Niger Moyen), elle y semble plus prononcée, plus franche et plus durable alors qu'elle semble marquer le pas à l'intérieur du Sahel. C'est peut-être une des explications au fait que les "mauvaises" moussons en termes agronomiques ont recommencé à devenir plus nombreuses ces dernières années dans le bassin du Niger Moyen.

Quoiqu'il en soit, le retour des pluies n'est peut-être pas aussi bénéfique en termes de ressources en eau et en termes de rendements cultureux. En effet, il a exacerbé le "paradoxe hydrologique du Sahel", à savoir l'augmentation des écoulements observée depuis le début de la sécheresse en 1968, et n'a pas entraîné pour l'heure de très forte hausse de rendements agricoles. Une explication commune à ces deux processus tient à la dégradation des sols et de la végétation qui s'est opérée durant ces années de sécheresse, limitant considérablement la capacité de rétention en eau des sols, des champs, des terroirs et des bassins versants. La majeure partie de l'espace sahélien connaissant un ruissellement majoritairement hortonien, une hausse des intensités de pluie infra-journalières accentue encore les écoulements et le risque d'inondation.

Ceci explique peut être pourquoi tant d'acteurs (agriculteurs, éleveurs, bûcherons, autres acteurs du monde rural), n'ont toujours pas réellement perçu le retour du Sahel à une pluviométrie plus élevée.

En résumé,

- Les séries statistiques des pluies ont connu une rupture généralisée aux alentours de 1968 (forte baisse des pluies annuelles moyennes) ; un grand nombre de stations a connu une deuxième rupture entre 1988 et 2000 (augmentation des pluies) ; moyennes et écart types semblent avoir retrouvé, à partir de 1993-1997, leurs valeurs de la première moitié du 20^{ème} siècle, avant l'épisode humide (1951-1967) qui a précédé la longue période de déficit pluviométrique (1968-1995)

- Les pluies de fort cumul en 24 h ont augmenté plus vite que la pluie annuelle, en nombre comme en cumul pluviométrique, mais elles rejoignent juste leur maxima des décennies humides (pour un total pluviométrique annuel certes inférieur, leur poids relatif est donc en croissance)

- La longueur des moussons a ré augmenté et permet en général de meilleures récoltes que durant la période de déficit ; toutefois on note, depuis le début des années 2000, et dans le bassin du Niger Moyen (pas au Sénégal), un retour en force des « moussons ratées » c'est-à-dire des hivernages où des périodes sèches ou un déclenchement trop tardif, une fin précoce, sont la cause de très mauvaises récoltes

CHAPITRE 7 : Des bassins versants en pleine croissance ? L'expansion de l'exoréisme

« Le phénomène (la capture du Logone par la Bénoué) est apparu bien moins exceptionnel et étrange dès qu'il a été relié aux observations qui ont été effectuées depuis quelques années dans la zone aride tant en Afrique que sur d'autres continents et, en particulier, dans cette partie du Tchad et dans les plaines du Logone moyen. Nous voulons parler du mécanisme de formation de deltas intérieurs qui se produisent à des échelles variables dès que la puissance de transport des rivières devient insuffisante ». Rodier, 1967.

L'Afrique de l'Ouest a connu durant l'Holocène quelques modifications hydrographiques majeures, des réajustements de tracé de cours d'eau, des captures, liées à la fois à la grande platitude de la topographie et à la dureté de certains seuils. Les eaux divaguent dans de grandes zones humides continentales, et à la merci de la tectonique ou de la sédimentation, finissent par déborder par des passages qu'elles n'empruntaient pas avant. Ainsi le Haut fleuve Niger aurait été capturé par le bas fleuve Niger actuel, en fait un affluent de l'Azawagh qui drainait encore, au Boréal, une grande partie du versant ouest du massif de l'Aïr. Le Mouhoun a été capturé par les affluents de la Volta alors qu'il coulait auparavant vers le Nord Ouest pour peut-être aller alimenter le Gorouol, affluent de droite sahélien du fleuve Niger. Et la Bénoué a peut être été formée par le passé par des eaux du Logone/ En effet, le Logone se déverse parfois partiellement dans le Toubouri qui est une espèce de canal sans pente bien définie communiquant avec le Mayo Kebbi, affluent de droite de la Haute Bénoué. En fait, topographiquement comme hydrologiquement, la capture existe pratiquement ; il existe une double communication entre l'amont du Logone et le Toubouri.

Des processus bien contemporains : défluviations et ruptures d'endoréismes

Mais sous nos yeux, captures et ruptures d'endoréisme, liées à la forte augmentation du ruissellement et de l'érosion hydrique causée par la disparition de la biomasse et la baisse de la capacité naturelle de rétention en eau des sols, modèlent en continu les bassins versants. Dans le bassin Moyen du Niger, elles expliquent l'accroissement sensible de la superficie du bassin contributif, c'est-à-dire celui qui est « exoréique » au détriment de la zone endoréique voisine. C'est un élément d'explication à l'accroissement des écoulements dans ce Moyen Bassin du fleuve Niger. On assiste en temps réel à des processus hydrographiques accélérés au Sahel, en lien avec le relief peu prononcé.

La planéité globale des versants, leur faible pente, conduit l'eau à hésiter fréquemment dans son chemin ; on peut le comprendre tant que les lits, faute d'écoulement concentré, ne sont pas

incisés. Mais cela se produit encore avec des lits enfoncés de un ou deux mètres dans le versant, dans deux configurations :

1 -à l'occasion de l'arrivée de l'eau dans un secteur où s'accumulent les sédiments du fait d'une diminution de la pente, ce qui est fréquent par exemple dans la vallée fossile du kori de Dantiandou à l'est de Niamey, où un replat armé par des ferralitisations (latérites) s'observe fréquemment à mi pente des longs versants reliant la corniche des plateaux cuirassés aux bas-fonds de plus en plus occupés par des mares, en lien avec l'accroissement des écoulements noté depuis quelques décennies ; l'eau parvenant dans ces dépôts peut finalement se déverser dans le bassin contigu du fait même de l'obstacle constitué par ces dépôts, comme cela s'est produit au milieu du bassin versant de Wankama (Ouest du Niger) en août 2006 (Figure 7).

La grande mobilisation des sédiments et leur dépôt dans des secteurs plats d'une topographie par ailleurs très peu marquée est à l'origine des processus fréquents de défluviations ainsi que des ruptures d'endoréisme.

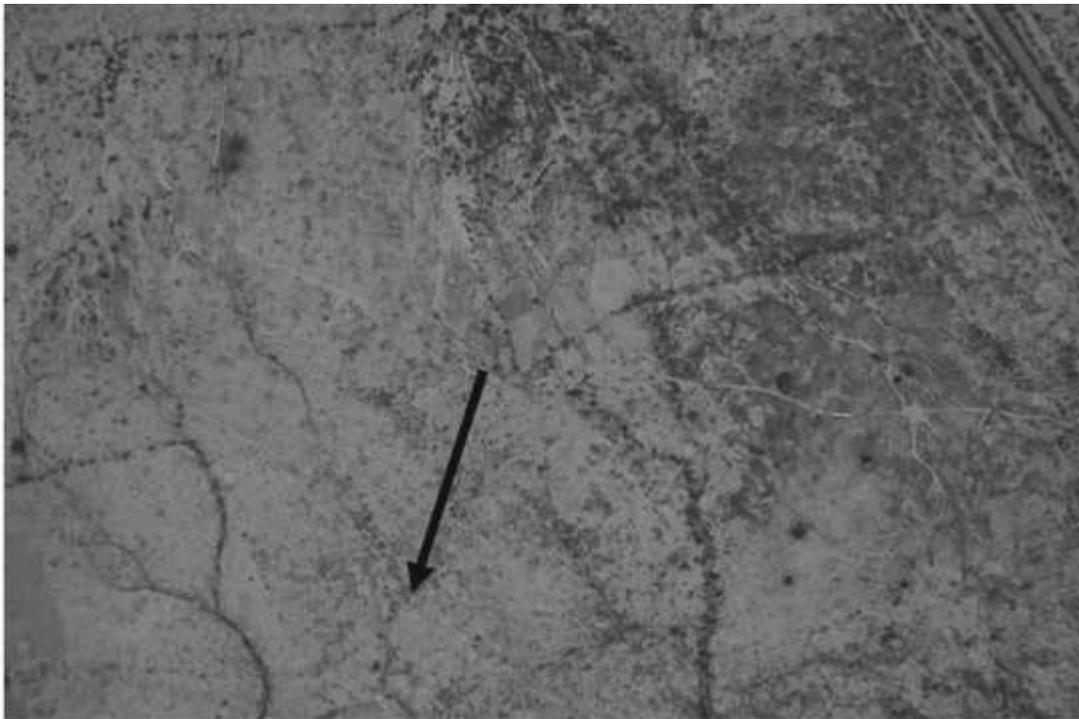


Figure 1 : capture du kori de Wankama amont par le kori parallèle coulant au sud, au cours de la mousson 2006

La défluviation produite en août 2006 sur la zone d'épandage de Wankama n'est qu'un exemple de l'extrême activité de la dynamique morphologique liée à l'explosion du ruissellement sur des sols très sableux du fait de l'extension de l'encroûtement. C'est l'accumulation des dépôts à mi versant qui a modifié le système de pentes (très faible) et causé le déversement du kori de Wankama amont dans son voisin du sud (figure 1).

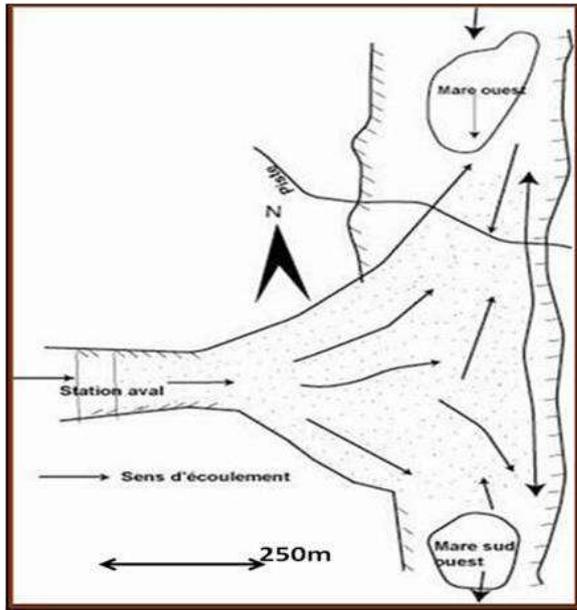


Figure 2. Les mares de Wankama :

Arrivée du kori de Wankama dans le kori principal de Dantiandou ; l'eau peut, au gré des atterrissements et du remplissage des mares, aller vers l'amont ou l'aval de la vallée fossile ; mais les deux mares finissent par communiquer si le remplissage de la dépression est complet (Mamadou (2012))

Dans le bassin de Wankama (0,9 km²), malgré la défluviation que l'on vient d'évoquer plus haut, l'écoulement est continu du haut en bas de la toposéquence ; la zone d'épandage qui occupe le replat (et qui est à l'origine de la défluviation) est parcourue d'un bras principal et de plusieurs diverticules qui se rejoignent à l'endroit où la pente redevient appréciable, même s'ils se déversent à présent dans un autre kori aval (figure 2).

2- le rapide recul des ravines dont la tête remonte annuellement à un rythme décimétrique (Le Breton, 2012, voir plus bas) est l'autre occasion de défluviation, celui-ci pouvant être assimilé à une mini-capture.

Toutefois, dans ce même bassin de Wankama, arrivée au fond de la vallée fossile, l'eau montre encore un signe d'hésitation lui aussi fréquent dans les vallées fossiles nombreuses au Sahel ; elle hésite entre deux mares et peut suivant les années « remonter » quelques centaines de mètres vers l'amont et vers le creux formé par la mare ouest (figures 2 et 3 ; Mamadou, 2012).

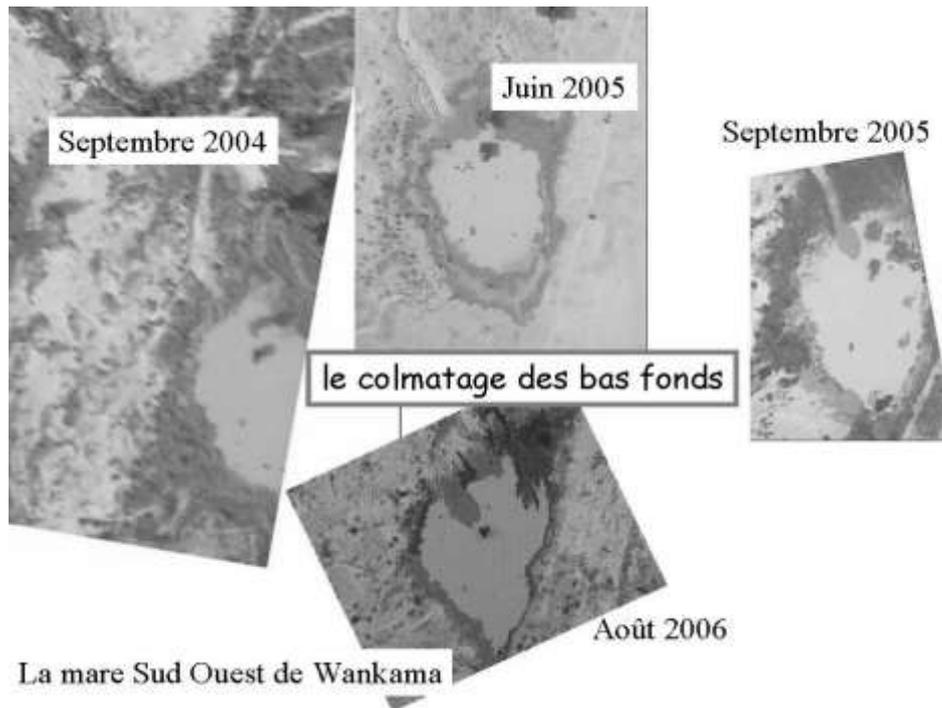


Figure 3: cône de déjection formé par le kori de Wankama dans la mare Sud Ouest dans laquelle il se jette par épisodes

Comme on l'a évoqué plus haut, l'érosion hydrique a été renforcée par les années de sécheresse. En effet, d'une part la végétation se clairseme du fait de la sécheresse et de la surexploitation des brousses et des pâturages ; d'autre part, les sols s'indurent et s'encroûtent du fait de l'accélération des rotations dans un système agraire par définition extensif. Cet accroissement du ruissellement et de l'écoulement immédiat de type hortonien en lien avec la baisse de la capacité de rétention en eau provoque un ravinement accéléré ; on assiste fréquemment à la chute d'arbres dans les koris, comme s'apprête à le faire un *Balanites aegyptiaca* dans le Sud-Ouest du Niger (Figure 4).



Figure 4. Ravinement au bord d'une piste, probablement en lien avec celle-ci (impluvium accru, drain devenant ravine) ; on aperçoit l'encroûtement du sol au premier plan à gauche (route de Torodi à Kantchari)

Dans la région de Maradi, bien plus peuplée (densités rurales proches de 100 hab/km²), Mamadou (2001) lie l'ensablement du lac Madarounfa situé dans le centre sud du Niger à une occupation agricole des terres à 100%, laissant à nu les sols sableux éoliens. Une importante modification de l'écoulement du Goulbi de Maradi en est résulté, qui a été décrite par Mamadou (2012) (figure 5).

Ces défluviations peuvent aussi provenir, ces dernières décennies, de captures par recul de tête ; en effet, l'érosion linéaire s'est emparée de ces versants pourtant peu pentus à la faveur de la très forte augmentation des écoulements observée suite à la sécheresse et à la rapide dégradation de la végétation ; les têtes de ravines « remontent » de plusieurs dizaines de mètres par an sur les versants, encaissées de plusieurs dizaines de centimètres (jusqu'à deux mètres, localement plus), et parviennent alors à recouper d'autres koris et ainsi les capturer, modifiant encore lignes de partage des eaux et impluviums.

Mais une partie des eaux d'écoulement peut provenir des plateaux latéritiques. Ceux-ci, originellement recouverts par la brousse tigrée, ont été l'objet d'un fort recul de celle-ci. En effet, par définition, ces plateaux sont armés par des cuirasses ferrugineuses de plusieurs dizaines de cm, très résistantes à l'érosion. Les sols y sont squelettiques, et dépassent rarement 20 cm d'épaisseur ; ils sont très argileux et leur surface est souvent coiffée d'une croûte d'érosion favorisant le ruissellement.

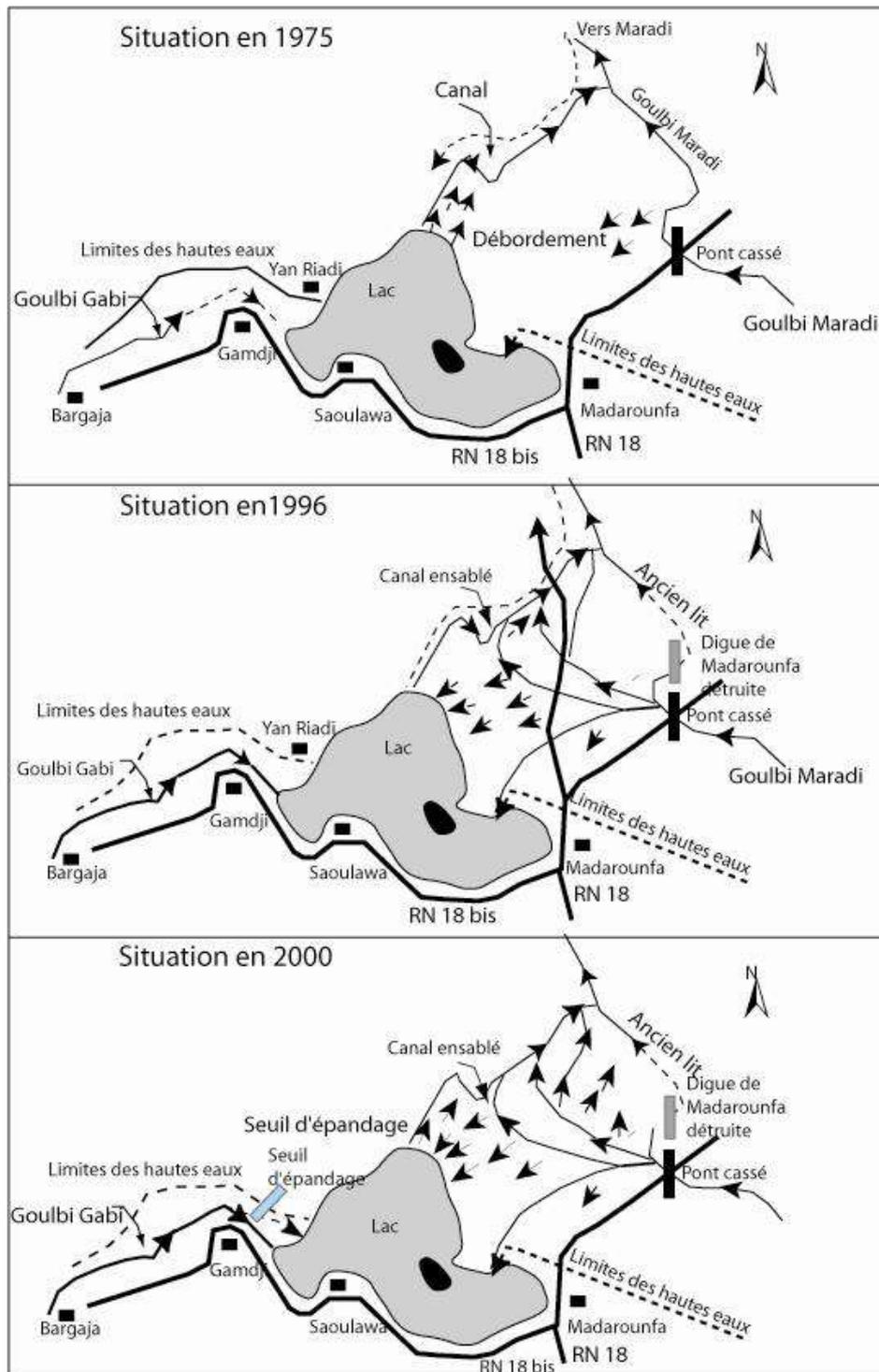


Figure 5: Ensablement et changements du réseau hydrographique sur les 30 dernières années dans la région du lac de Madarounfa, liés à l'accélération de l'érosion hydrique. (Mamadou 2001 in Mamadou, 2012)

La formation végétale « brousse tigrée » est surprenante pour qui connaît les caractéristiques climatiques sahéniennes et la rigueur édaphique de ces plateaux latéritiques. Elle est constituée d'une alternance de bandes nues et boisées, dont la disposition rappelle la fourrure d'un grand fauve :

- La bande de végétation est très touffue et dense (une densité que l'on ne retrouve que bien plus au sud, au contact des zones soudaniennes et guinéennes, où la pluviométrie est d'environ 1500 mm par an). Elle est composée principalement de combrétacées (*Combretum micrantum*, *Combretum glutinosum*) et de *Boscia sp.* Cette bande végétalisée peut avoir 20 ou 30 mètres de large et semble se déplacer vers l'amont (les plateaux sont très plans et plats, mais ont néanmoins une pente), où la végétation est significativement plus verte et dynamique que sur le flanc aval où elle semble dépérir. Mais cette migration est difficile à prouver tant les caractéristiques des sols sous la bande boisée et sous la bande nue sont différentes ;
- Une bande nue de 80 à 120 m de large où il est fréquent qu'il n'y ait pas du tout de végétation herbacée ou graminée. La surface en est glacée et si elle est recouverte de graviers, ceux-ci sont enchâssés dans la matrice de la croûte superficielle, la consolidant et n'y autorisant pas l'infiltration de l'eau ; celle-ci ruisselle donc très majoritairement.

Le fonctionnement habituel de la brousse tigrée (Galle *et al.*, 1999) est effectivement lié à la topographie. La bande végétalisée est alimentée en eau, non seulement par la pluie qu'elle reçoit directement (entre 300 et 700 mm dans sa zone d'extension), mais aussi par l'essentiel de l'eau tombée sur la bande de sol nu, qui ruisselle en nappe jusqu'à la bande végétalisée qui l'absorbe complètement. Cette végétation touffue permet l'installation d'un système racinaire qui traverse la cuirasse, de même que les réseaux de conduits creusés par les termites, qui vont chercher eau et nutriments dans et sous la cuirasse. Ainsi, malgré la faible épaisseur du sol, toute l'eau ruisselée sur la bande nue est absorbée par la bande végétalisée, qui constitue une des zones traditionnelles d'infiltration profonde, avec les bas-fonds, des espaces sahéliens. Ceci a pu être démontré sur les plateaux dominants Banizoumbou au Niger Occidental (Descroix *et al.*, 2012a). Les profils de teneur en eau (figure 6) réalisés à travers la brousse tigrée montrent que les zones de sol nu amont et aval sont pratiquement imperméables (aucune variation de la teneur en eau durant la saison des pluies), alors que la teneur en eau augmente très sensiblement pendant l'hivernage sous la bande végétalisée, montrant l'importance de l'infiltration (jusqu'à plus de 6 m de profondeur, donc sous la carapace latéritique puisque celle-ci est traversée de - 0,4 à 4,5 mètres de profondeur. Cette observation a été confirmée sept années de suite (2004 à 2010 inclus sur 5 profils sous brousse, et 5 profils sous sol nu). Une observation avait par ailleurs été faite au moment du creusement des puits (12 m de profondeur) destinés à recevoir les mesures de sondes à neutrons : les trous sous la bande de brousse ont été bien plus difficiles à forer, nécessitant 4 à 5 fois plus de temps, que ceux situés sous sol nu, sans qu'aucune explication n'ait été trouvée à ce phénomène. Par ailleurs, aucun ruissellement n'a jamais été observé durant la période active du programme AMMA (2004-2008) sur aucune zone de brousse tigrée encore intègre et en bon état de conservation : il est connu que ces zones infiltrent toute l'eau qui y parvient, ne laissant aucun écoulement vers l'aval d'une bande de brousse tigrée (Galle *et al.*, 1999).

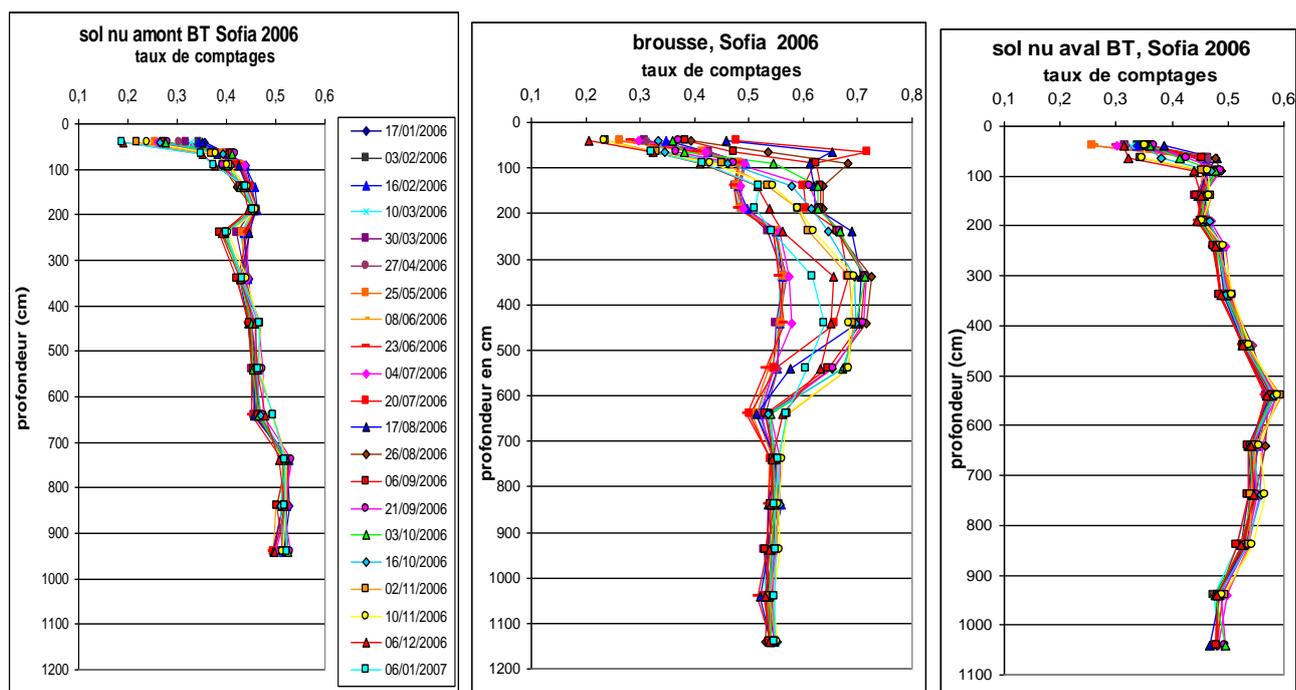


Figure 6. Profils de teneur en eau du sol (en fait comptages neutroniques utilisés comme proxy) à travers une bande de brousse tigrée

La brousse tigrée fait transition, au sud comme au nord, vers d'autres formes de végétation contractée, plus touffue au sud (brousse tachetée) et bien plus clairsemée au nord où les bandes végétalisées deviennent de simples massifs allongés constitués de formations de plus en plus réduites et adaptées au cumul des sécheresses climatique et édaphique.

Or, depuis quelques décennies, la brousse tigrée est en effet menacée ; du fait des sols maigres qui la recouvrent, elle renferme peu de réserves hydriques. La succession d'années sèches observées à partir de 1968 a causé la disparition directe d'un grand nombre de bandes végétalisées, surtout au nord de sa zone de prédilection (Souley Yéro, 2012 ; Descroix *et al.*, 2012b). La hausse de la demande en bois domestique, parallèle à celle de la population, a considérablement accentué ce recul de la brousse tigrée, en particulier autour des grandes villes.

Ceci a déstabilisé l'écosystème « brousse tigrée » (figures 7 et 8) et son « autonomie hydrologique ». Les bandes végétalisées absorbaient traditionnellement (par infiltration temporaire puis évapotranspiration, plus une part d'infiltration profonde) toute l'eau précipitée sur les plateaux. Dès lors que ces bandes boisées reculent sensiblement, l'eau n'est plus intégralement absorbée, l'écoulement en nappe arrive à contourner les bandes de végétation réduites, voire à les traverser, et finissent par arriver en bordure des plateaux, où l'essentiel de cette eau ruisselle sur l'affleurement ferrugineux imperméable. De ce fait, depuis quelques décennies, de l'eau est fournie aux versants et aux jupes sableuses par apport venu des plateaux. Ceci contribue à l'augmentation des écoulements observée sur les versants eux-mêmes, liée là aussi aux changements d'occupation des sols, principalement l'encroûtement des sols cultivés induit par le raccourcissement des jachères et l'accélération des rotations qui diminue la fertilité

des sols, obligeant encore les paysans à déboiser, à raccourcir encore les jachères, pour produire les grains dont ils ont besoin pour nourrir des familles de plus en plus grandes et de plus en plus nombreuses (Le Breton, 2012 ; Mamadou, 2012 ; Descroix *et al.*, 2013), .



Figure 7 ; bande de sol nu et au fond bande végétalisée de la brousse tigrée ; Sofia Bangou, près de Banizoumbou, ouest du Niger



Figure 8 ; brousse tigrée dégradée sur la rive droite du Niger en face de Niamey

Plus au nord, un même type d'évolution est observée ; dans le Gourma malien, où la pluviométrie n'est que de 250 à 300 mm par an, les zones de socle et de plateaux, couvrant 25

à 35% de la superficie totale, montraient des sols très minces et fragiles, recouverts d'une végétation ligneuse basse de type steppique et de graminées et herbacées ; cette végétation a beaucoup souffert de la sécheresse, bien plus que celle des zones basses ou de sols profonds, qui, elles, possédaient des réserves hydriques. Sa disparition a entraîné l'érosion des sols pauvres. De ce fait, le retour d'une pluviométrie un peu plus favorable depuis le milieu des années 1990 ne permet pas la réinstallation d'une végétation ligneuse, empêchée de pousser par le départ des particules fines du sol. Cela se traduit par un fort ruissellement et on observe un fort gonflement des mares (Gardelle *et al.*, 2010). Par contre, les bas-fonds font l'objet d'une reconquête ligneuse rapide, seulement gênée par l'extension envahissante de ces mares.

Les ruptures d'endoréisme et l'expansion de l'exoréisme

Ce qui a le plus modifié la topographie ces dernières décennies au Sahel relève du même type de dynamique fluviale que les changements de cours du Niger depuis le début du Quaternaire mais à une toute autre échelle spatio-temporelle. On constate, dans le bassin du Niger Moyen et surtout dans les environs de Niamey, une dynamique accélérée de la limite entre endoréisme et exoréisme. Celle-ci est en effet, traditionnellement dans cette région, assez proche du contact socle/bassin sédimentaire, qu'emprunte régionalement grosso modo, la vallée du Niger (voir figure 3, chapitre 3 et figure 1, chapitre 4).

Or, sans que cela ait été encore décrit et recensé, de nombreuses mares proches du fleuve, sur ses deux rives, ont disparu ces dernières décennies, pour laisser la place à des « néo-koris » souvent très encaissés dans des gorges sableuses à l'évidence creusées dans des cordons dunaires ou placages sableux recouvrant les formations géologiques de base (granite sur la rive occidentale, terrains sédimentaires du Continental Terminal sur la rive orientale du fleuve Niger) (Mamadou, 2012 ; Mamadou *et al.*, 2015). La figure 9 montre les « ruptures d'endoréisme observées ou supposées dans la région proche de Niamey. La figure 10 montre l'extension de la superficie du bassin-versant du Niger Moyen ces dernières décennies du fait des « ruptures d'endoréisme », uniquement pour la région étudiée, celle de Niamey, probablement la plus touchée par ce type de processus, car celle où la biomasse est la plus surexploitée, pour les besoins en bois et en fourrage de la ville.

La diminution drastique de la biomasse observée depuis le début de la sécheresse, et attribuée au cumul des effets de celle-ci et de la pression démographique (Descroix *et al.*, 2012 ; Souley Yéro, 2012, etc) a entraîné une forte augmentation des écoulements en dépit de la baisse des précipitations observée après 1968 (voir chapitre 3, le « paradoxe du Sahel »). Ceci a été exacerbé aux approches de la ville de Niamey par la surexploitation des ressources végétales liée à la demande urbaine en bois domestique et en fourrage pour les animaux urbains et péri-urbains. La concurrence pour l'espace entre cultivateurs et éleveurs est exagérée aux abords de la capitale du fait de la présence de troupeaux en attente de commercialisation sur le marché en l'absence de magasins et de transports frigorifiques.

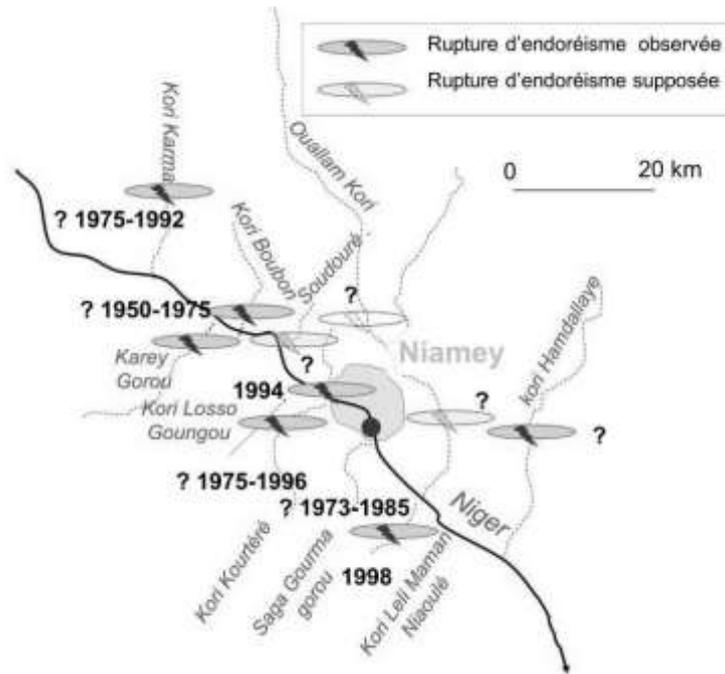


Figure 9. Localisation des principales ruptures d'endoréisme observées ou supposées

La disparition des mares situées aux abords de la vallée du Niger est directement liée à cet accroissement des ruissellements ; ces mares ont débordé du fait des surplus d'eau accumulés, et ont rompu les cordons dunaires ou les massifs sableux qui les séparaient du fleuve. Cela a créé de nouvelles vallées très encaissées et aux bords francs, profondes de quelques mètres à localement 10 ou 20 mètres en pente assez raides et permettant un transit rapide des eaux d'écoulement vers le fleuve. Au niveau sédimentaire, cette dynamique a eu un effet drastique, créant de grands lits sableux larges et encaissés eux-mêmes dans le sable, qui se prolongent par des cônes de déjection énormes dans le lit du fleuve, accélérant sa sédimentation, la remontée de son fond et l'apparition de nombreux bancs de sable dans le lit du fleuve, ce qui entrave la circulation et accroît le risque d'inondation, le chenal ayant vu sa section mouillée diminuer sensiblement par endroits (voir à la fin de ce chapitre le rôle de l'ensablement). Les figures 11 et 12 montrent les conséquences de la rupture du cordon dunaire à Leli Maman Niaoulé début septembre 1998, avec l'apparition d'un nouveau kori affluent du Niger : vu de haut en 1998 et en 2007 (figure 11) et vu du fond du nouveau kori, bien élargi en 2007 mais dont les bords restent vifs (figure 12).

La faible profondeur de la nappe phréatique (voir figure 1, chapitre 4) a pu accélérer le processus en provoquant une saturation des bas-fonds et des processus hewlettiens associés, entraînant une forte augmentation des coefficients d'écoulement. De fait, on note en plus une augmentation croissante du niveau du toit de cette nappe depuis 4 ou 5 décennies (Desconnets, 1994, Desconnets *et al.*, 1997; Leduc *et al.*, 1997 ; Favreau *et al.*, 2005, Leblanc *et al.*, 2008), hausse liée elle-même à l'accroissement des écoulements ; comme on l'a observé, l'augmentation des flux de surface conduit, dans le bassin sédimentaire des Iullemeden, où la plupart des bassins sont endoréiques, à un accroissement du nombre, de la taille et de la durée

des mares ; comme les mares sont les principaux points de recharge de la nappe (Leblanc *et al.* 2008), on observe une remontée du niveau de cette nappe (de 4 m environ en une quarantaine d'années, mais sur un rythme croissant, la tendance depuis les années 2000 étant un accroissement de 20 ou 30 cm par an. Ceci a causé l'apparition des zones complètement saturées, particulièrement dans les bas-fonds.

A proximité du fleuve Niger, la nappe est donc sub-affleurante ; ceci est mis en évidence par :

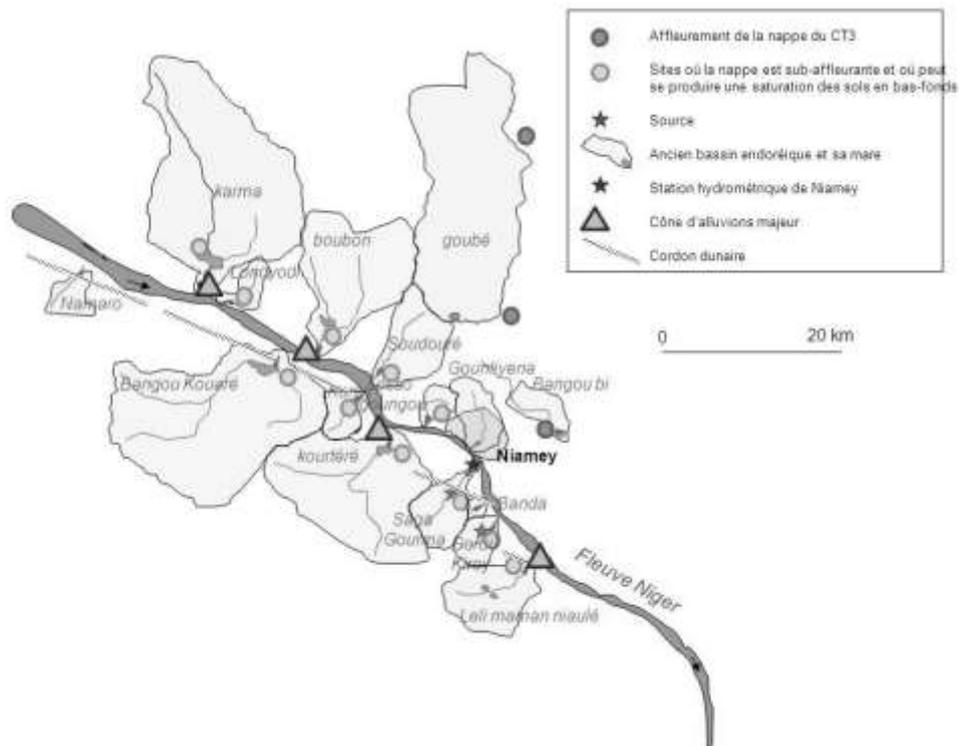


Figure 10. Superficie gagnée ces dernières décennies par l'impluvium du bassin du Niger dans la région de Niamey

- L'apparition récente des mares liées à l'affleurement de la nappe (bangou bi = mares noires, par opposition aux bangou kirey = mares rouges liées à l'écoulement);
- La présence de sources dans au moins deux vallées en rive droite du fleuve Niger proches de Niamey.

On peut donc supposer que dans des secteurs croissants autour de la vallée du Niger Moyen, la nappe est devenue si proche de la surface que le sable en fond de vallée est fréquemment ou en permanence saturé, acquérant une dynamique de type hewlettien, formant des zones saturées contributives à l'écoulement (voir chapitre 2).

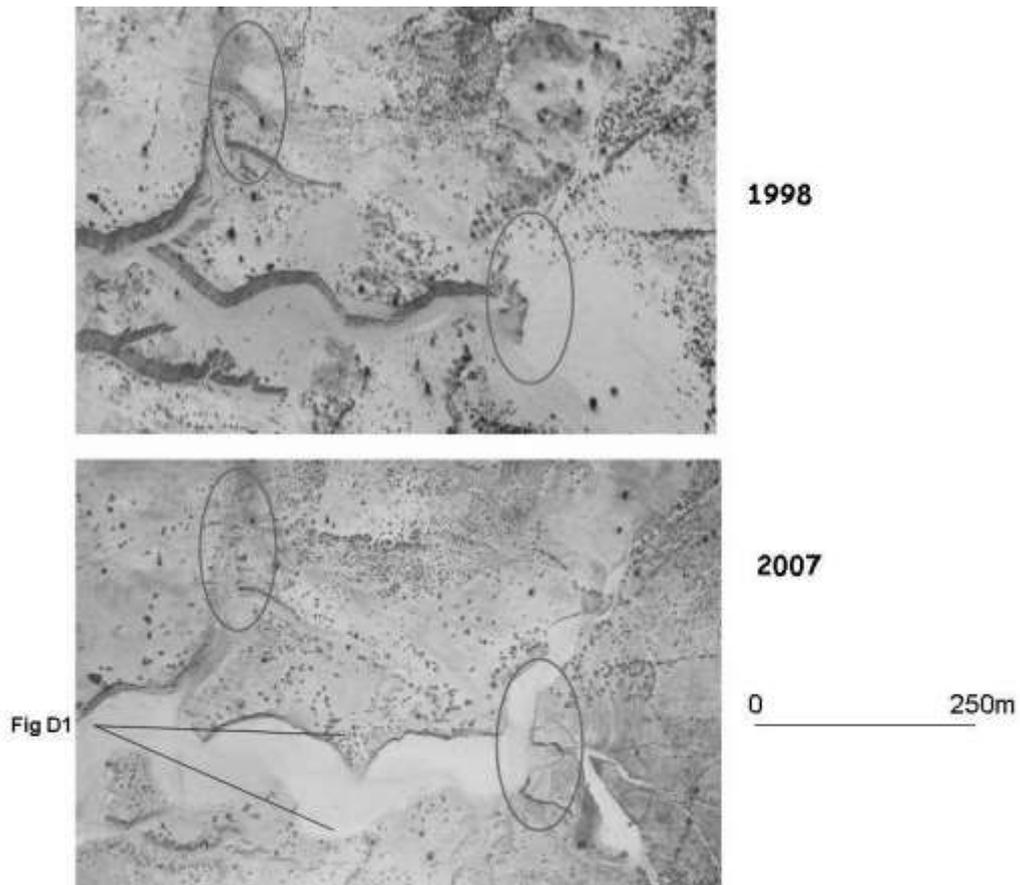


Figure 11 Evolution du nouveau kori Léli Maman Niaoulé entre son apparition en 1998 (haut) et 2007. Les deux élypses simulent l'emplacement des mares qui ont débordé en 1998



Figure 12. Nouvelle vallée du kori de Léli Maman Niaoulé, vue de l'aval (lieu de prise de vue indiqué sur la figure antérieure)

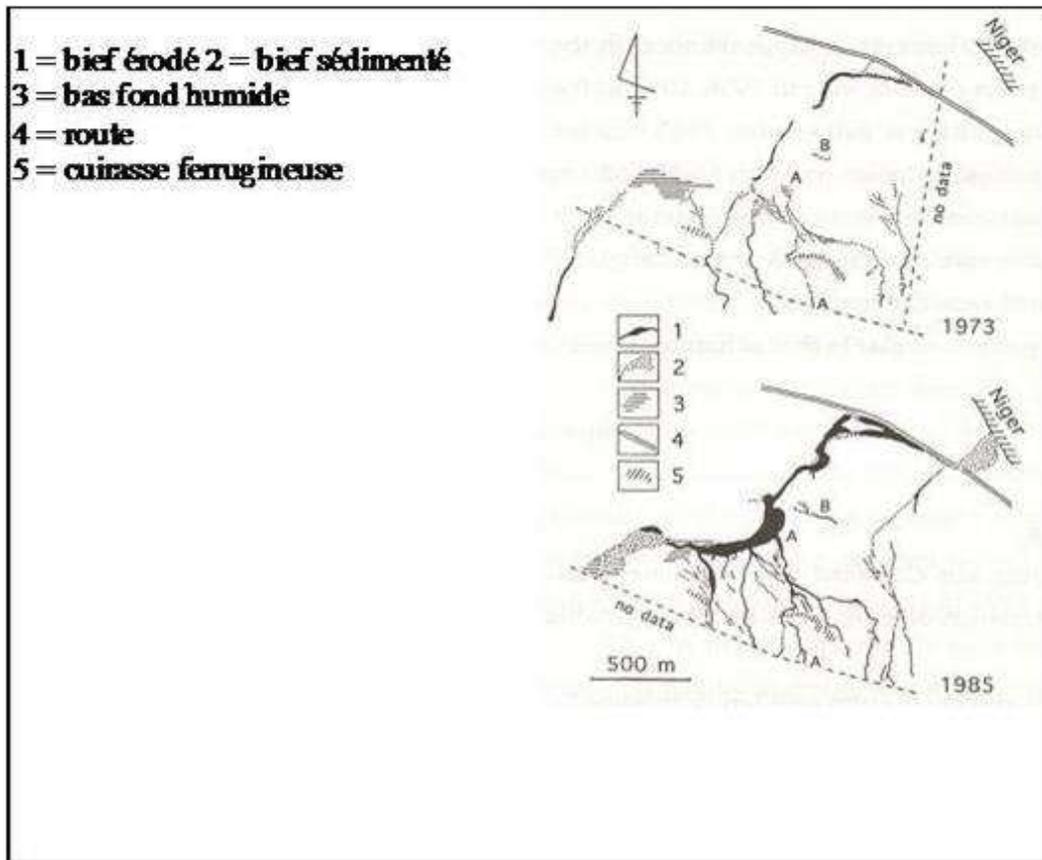


Figure 13: Accélération du ravinement des versants et de l'ensablement des bas fonds entre 1973 et 1985 sur la rive droite du fleuve Niger dans la région de Niamey (d'après Chinen, 1999)

Chinen (1999) a démontré l'importance des effets anthropiques dans la dynamique érosive et alluvionnaire sévère que connaissent les petits koris exoréiques de la région de Niamey, en particulier les bassins périurbains de Kourtéré (Figure 13) et de Saga Gourma 10 km sur la route de Say au sud de Niamey. Chinen (1999) montre que l'anthropisation poussée dans quelques petits bassins versants périurbains dans le secteur de Niamey, entre 1975 et 1985 a conduit au développement des ravines sur les versants sableux et à l'ensablement du fleuve Niger. D'après Chinen, en 1973, le kori Kourtéré était endoréique (figure 13). Actuellement il constitue un des plus grands koris exoréiques charriant eau et sédiment dans la région de Niamey. Il forme un grand cône d'épandage à sa confluence avec le fleuve Niger (voir ci-dessous).

L'ensablement du lit du Niger

En effet, ce même genre d'apports sableux contribue, dans la zone exoréique proche du fleuve Niger, à l'ensablement du lit de celui-ci ; ainsi le kori de Kourtéré a construit un immense cône de déjection de plusieurs centaines d'hectares au cours du seul évènement très intense du 1^{er} septembre 1998 au cours duquel des précipitations supérieures à 100 mm ont été enregistrées sur les bassins entourant Niamey (rive droite essentiellement) (figures 14, 15 et 16). De l'autre côté du fleuve, en rive gauche, le kori de Boubon a connu une forte dégradation de ses sols et

de sa couverture végétale ce qui a contribué à lui donner un caractère torrentiel, comme à plusieurs de ses voisins, et à construire un cône de plusieurs dizaines d'hectares en quelques années (Mamadou, 2012).

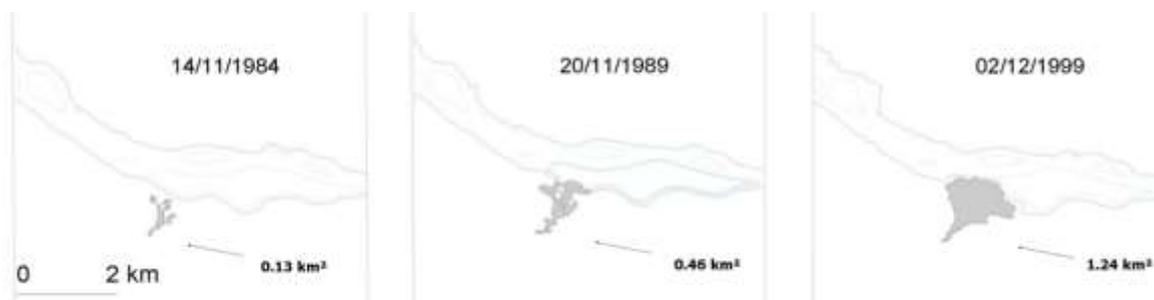


Figure 14 : évolution du cône de déjection du kori de Kourtéré en amont immédiat de Niamey, rive droite du fleuve Niger, apparu à partir de la crue de 1998 (Amogu, 2009)

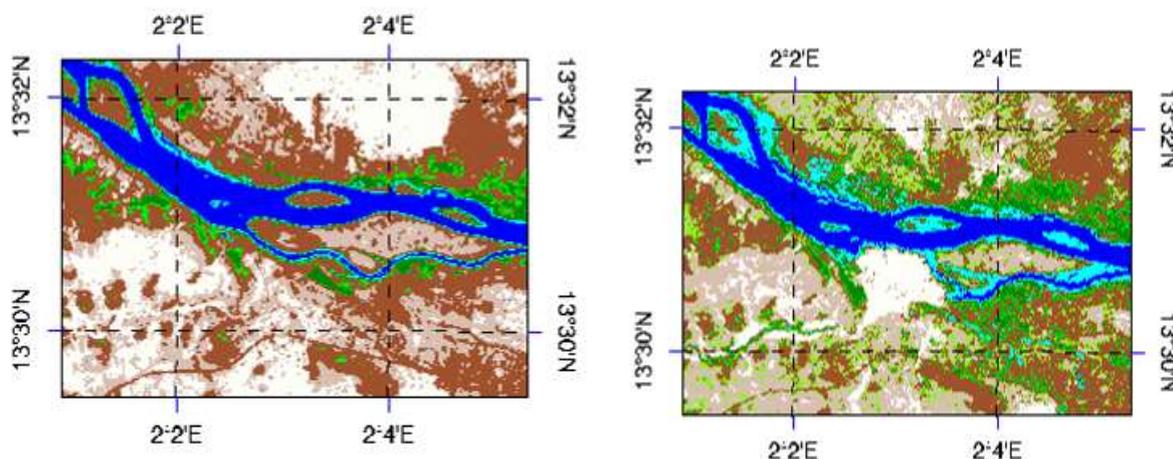


Figure 15. Confluent du Kourtéré en 1984 (à gauche) et en 1999 (à droite) juste après l'apparition du cône de déjection (Amogu, 2009)

La figure 14 réalisée à partir d'images satellitaires (figure 15), montre bien comment le cône a envahi le lit principal du fleuve Niger. Celui-ci est déporté sur sa gauche, mais surtout, son lit est réduit, ce qui facilite le débordement des eaux en cas de crue ; c'est ce qu'il s'est produit à deux reprises durant la mousson 2010, où le fleuve a dépassé par deux fois son plus haut niveau jamais atteint durant l'hivernage (Descroix *et al.*, 2012b).



Figure 16 : cône de déjection du kori de Kourtéré en amont immédiat de Niamey, rive droite du fleuve Niger, apparu à partir de la crue de 1998 (photo Emmanuèle Gautier, 2007)

ENCART SUR LE CLIMAT A L'HOLOCENE (extrait de Dardel, 2014)

Durant l'Holocène (les 10 000 dernières années) les conditions ont été beaucoup plus favorables et le Sahara a connu une "période verte" où le climat était bien plus humide qu'aujourd'hui. Cela s'explique principalement par le renforcement de la saisonnalité du forçage radiatif solaire dû à l'augmentation de l'angle d'inclinaison de la Terre autour de son axe. Ce renforcement a connu un maximum aux environs de 11 000 ans avant notre ère. En réponse à ces changements de saisonnalité, l'amplitude thermique entre océan et continent augmente alors significativement (l'océan ayant une plus grande inertie thermique que le continent, et une redistribution par la circulation océanique) ce qui crée un fort gradient de température et donc un renforcement du système de mousson (Braconnot *et al.* 1999, Joussaume *et al.* 1999, Zhao *et al.* 2005b, Braconnot *et al.* 2007). Entre -10 000 et -5 000 ans (la première moitié de l'Holocène), la mousson Africaine était donc beaucoup plus forte qu'aujourd'hui et le climat au Sahel et au Sahara beaucoup plus humide (Jolly *et al.* 1998). De nombreuses preuves de cette période existent, comme par exemple des oasis fossiles. Après -5 000 ans, le système de mousson s'est affaibli et a mené vers une aridification du Sahel et du Sahara (Jolly *et al.* 1998, Brooks 2004). La nature de ce changement n'est pas bien connue aujourd'hui. Certains auteurs penchent pour un affaiblissement abrupt du système de mousson, d'autres pour un changement beaucoup plus progressif (Kropelin *et al.* 2008a, Kropelin *et al.* 2008b). Durant les 2-3 derniers millénaires,

par manque de données, les fluctuations des précipitations en Afrique subsaharienne n'ont pas pu être reconstruites. A l'échelle de l'Holocène il apparaît donc que les précipitations dans la région saharienne et Subsaharienne ont connu des fluctuations importantes à l'échelle de plusieurs millénaires, tout en tendant vers une aridification progressive sur le long-terme (Vernet 2002).

Conclusion

Le Sahel et tout particulièrement dans la région de Niamey (au sens large voir les cartes du chapitre 4) a connu une forte dynamique paysagère en un demi-siècle ; celle-ci ne s'est pas partout traduite par une dégradation des sols. Et parfois, un début de dégradation a donné lieu à une réaction des sociétés rurales, qui ont de suite œuvré pour limiter cette dégradation en modifiant (dans le sens d'une intensification à base d'utilisation de la main d'œuvre), aménageant un paysage dense et construit, avec beaucoup d'arbres et d'arbustes, des ressources diversifiées, un soin plus grand apporté à des parcelles plus petites et non intégralement défrichées, de manière à limiter érosion éolienne et hydrique et contrecarrer ainsi la désertification menaçante ; ce type de processus vertueux a été très bien décrit au Niger (Luxereau et Roussel, 1997).

Mais de nombreux espaces ont vu leurs sols s'encroûter (chapitre 3, 4 et 5), provoquant un accroissement notoire des écoulements, des transports solides, de la sédimentation dans les bas-fonds. Cet encroûtement est probablement la cause première et surtout la principale manifestation de la « désertification » (et aussi du paradoxe du Sahel, voir chapitre 3). C'est la perte de la capacité de rétention en eau des sols qui réduit la productivité des éco-systèmes, donc la biomasse et en retour, accélère l'imperméabilisation des surfaces. Ce cercle « vicieux » est relativement facile à rompre, avec des pratiques et techniques le plus souvent issues des savoirs locaux, mais demandant de la main d'œuvre.

C'est le recours à ces pratiques, leur généralisation dans les secteurs connaissant une forte croissance démographique, qui permet de rompre le cycle de dégradation tel que celui qu'on peut observer dans les alentours de Niamey où la hausse du ruissellement ces dernières années est à l'origine d'un quadruplement des débits des affluents de rive droite du fleuve Niger. L'infiltration de l'eau au moment de l'épisode pluvieux permet d'accroître la capacité de rétention en eau des sols, donc de limiter les risques hydriques, en réduisant les pics de crue et en soutenant les étiages : c'est la condition pour limiter les excès auxquels se livre l'eau sur des surfaces devenues trop ruisselantes du fait du recul de la végétation, et du maintien de pratiques de l'agriculture extensive dans un contexte d'intensification des activités rurales (agro-sylvopastorales).

Le Delta Intérieur du Niger (DIN)

Une zone humide unique

Le DIN ou cuvette intérieure du Niger est une des plus grandes zones humides continentales d'Afrique, la principale d'Afrique de l'Ouest. Plus qu'à la cuvette endoréique du Lac Tchad,

qui comporte un vrai lac pérenne (qui a ses fluctuations inter décennales, et vit en ce moment une phase de « petit Lac Tchad »), il faut le comparer à deux autres grandes cuvettes d’Afrique de l’Est, le marais du Sudd, et d’Afrique Australe, celle de l’Okavango.

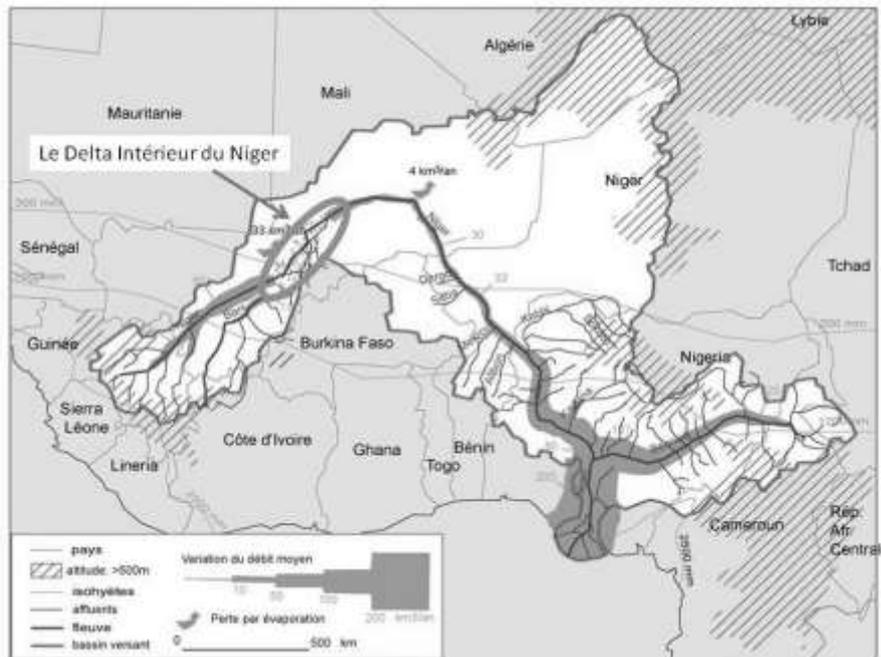


Figure 1 : localisation du DIN (débits et pertes par évaporation du fleuve) d’après Olivry, 2002

Les eaux du fleuve Niger, comme ailleurs celles du Nil Blanc ou de l’Okavango, se perdent en grande partie dans cette cuvette qu’elles s’épuisent à franchir, en plusieurs mois. « le survol, fin décembre, de la partie centrale de la cuvette entre Ségou et Diré, permet d’embrasser l’immense volume d’eau emmagasiné dont une bonne partie se perdra. Suivant l’abondance hydrologique de l’année, 15 à 35 milliards de m³ s’étalent irrégulièrement sur une vaste étendue de plus de 80000 km² » (Brunet Moret *et al.*, 1986). « Bras principaux, émissaires, chapelets de mares, grands lacs, s’étendent à perte de vue. Seuls apparaissent émergés des lambeaux clairs ou gravillonneux, de basses collines dunaires fixées, les étroits bourrelets riverains, les « toguérés » habités, et les immenses bourgoutières (plaines inondées profondément, couvertes de graminées aquatiques bien caractéristiques de la région lacustre). Cette vaste étendue miroitante, ridée seulement par l’Harmattan parfois violent, paraît calme et tranquille ». De Mopti à Niafouké, sur 230 km, la pente moyenne est inférieure à 2 cm/km. De Niafouké à Diré elle est inférieure à 1 cm/km.

Une évaporation de 15 mm par jour s’exerçant sur ce vaste plan d’eau explique l’essentiel des pertes globales annuelles sur l’ensemble de la cuvette, qui sont comprises entre 25 et 55 milliards de m³/an suivant l’abondance de l’année (voir carte). « La Cuvette Intérieure est donc une des machines évaporatoires continentales les plus puissantes du monde ». (Brunet Moret *et al.*, 1986).(petite incohérence dans les propos de cet auteur car son estimation d’ETR est supérieure au débit estimé juste au dessus....)

« Les villages situés sur les toguérés, buttes sans doute artificielles formées par l'empilement successif de ruines des villages, émergent faiblement des hautes eaux. Ils se concentrent le long des bras importants ». En amont du lac Debo, qui est situé à peu près au centre du Delta, « il n'existe plus en fait un seul bras privilégié plus important que les autres. Le fleuve se partage en plusieurs cours sinueux, tantôt bien calibrés, tantôt se perdant dans les bourgoutières, débouchant en fouillis dans le lac Debo, de part et d'autre du Airé Kadied (baptisé rocher Marie-Thérèse par René Caillé lors de son voyage à Tombouctou). Cette arrivée dans le Debo, et surtout les méandres invraisemblables qui la précèdent, laissent un curieux souvenir. Le bateau évolue en rasant les bourgous dans un chenal étroit, semblant tourner autour du mont Airé Soroba (mont St Charles) émergeant violemment de 70 m au dessus de l'immense plaine verte. L'amas rocailleux du rocher Marie Thérèse attire tous les regards, lorsque soudain c'est le débouché dans le Débo, puis la grande étendue d'eau libre, verte à l'ouest en direction des bourgoutières de Ouallado, et jaune claire à l'est vers la bordure dunaire du mont Gourao dominant le lac ». « Les dunes apparaissent pour la première fois et le paysage du Debo marque un net changement dans l'allure et la couleur du paysage. La végétation aquatique reste la même mais avec plus d'ampleur dans l'étendue ; enfin sur les dunes apparaissent, en plus des épineux rabougris, quelques peuplements de palmiers fourchus » (Brunet Moret *et al.*, 1986).

...fragilisée par la sécheresse

« Il apparaît que le fonctionnement hydrologique du delta intérieur du Niger n'a pas changé malgré ces vingt dernières années de sécheresse. Pendant les années de crue basse, la crue inonde très peu et l'eau reste dans le lit mineur, les lacs périphériques ne sont pas alimentés : on est en phase de seuil minimum (tel 1984). Pour les années de crue moyenne (comme 1992), la crue contribue à l'inondation des plaines par phénomène de débordements successifs de seuils après sortie du lit mineur. Pour les années humides (à partir de 1994), les seuils maximums sont à nouveau dépassés, les lacs périphériques se trouvent largement alimentés en eau par la crue et forment des zones évaporatoires supplémentaires (de grande étendue du fait de leur déclivité extrêmement faible). On note aussi que les pertes en eau par infiltration ne sont alors plus négligeables » (Orange *et al.*, 2002).

« La superficie inondée chaque année est environ de 20 000 km², se répartissant entre 14000 km² pour la cuvette sud, 3000 km² pour la cuvette nord et 3000 km² pour les lacs périphériques. La superficie inondée dans la cuvette nord ne s'est réduite que de moitié lors de l'année la plus sèche en 1984, elle fut réduite des 5/6 dans la cuvette sud cette année-là, soit seulement 3600 km². Quand on sait que la productivité de ce milieu inondable est directement proportionnelle à la superficie inondée, ces chiffres montrent d'eux-mêmes toute la précarité des systèmes d'exploitation du delta intérieur du Niger. Une augmentation de 60 cm du niveau du pic de crue lu à Mopti entraîne une augmentation d'environ un tiers de la superficie inondée, soit en moyenne 5000 km² de plus. Aussi les surfaces inondées annuellement ont varié dans un rapport de 1 à 5 depuis 1950. Cette étude confirme donc que la gestion de la ressource en eau à l'échelle de la région naturelle du delta intérieur du Niger passe obligatoirement par une connaissance de la dynamique spatio-temporelle de l'inondation de cet écosystème sahélien en fonction d'une prévision à partir des apports amont » (Orange *et al.*, 2002)..

En résumé,

- **Malgré le reverdissement général décrit du Sahel, on note de grandes étendues de sol encroûté ou dégradé, sur lesquelles ruissellement et érosion hydrique sont très forts, entraînant une dynamique du réseau hydrographique, des captures et des ruptures...**
- **Depuis quelques décennies, on note plusieurs types de processus et de dynamiques hydrographiques assez soudains et d'échelle locale ; ils contribuent à l'accroissement des écoulements observé depuis le début de la sécheresse (1968-1995) en zone sahélienne**

Chapitre 8. L'eau des villes et l'eau des champs

*Le Sahel en proie à la sécheresse,
les sociétés impérialistes précipitées vers l'abîme par leurs propres systèmes,
l'avaient soutenu pour mieux s'ancrer en y déversant tous leurs excédents,
par des voies humanitaires,
alors que des milliers d'enfants s'intoxiquaient malgré cela.
Nous voulons de l'eau, rien que de l'eau.
Cherchons l'eau.
Trouvons l'eau.
L'eau est là.*

Ken Bugul «Cendres et braises »

On a vu au chapitre 6 qu'on observait une « intensification » des précipitations, depuis le milieu de la décennie 2001-2010 en Afrique de l'Ouest ; elle ne s'est pas encore traduite, sauf très localement, par un dépassement des valeurs de précipitations maximales en 24 h qu'on observait durant les décennies humides 1950-1970. Et on manquait d'observations pour affirmer que les intensités horaires ont évolué dans le même sens. Ce n'est que tout récemment que Panthou *et al.*, (2018) ont mis en évidence une augmentation sensible des intensités horaires. Par contre, on a observé une forte augmentation des inondations en zone urbaine. Certaines, comme les inondations, devenues récurrentes, de la rive droite de la ville de Niamey (quartier Haro Banda) sont liées à la crue d'un cours d'eau (le Niger dans ce cas). Mais les épisodes récents à Niamey (30 avril 2004), à Ouagadougou (1^{er} septembre 2009), à Dakar (26 août 2012) ou à Bamako (30 août 2013) ne doivent rien à la présence d'un fleuve ; elles sont liées à la conjonction d'une forte pluie tombée sur un secteur rendu peu perméable par l'urbanisation. En plus de diminuer l'infiltrabilité des sols et des terroirs, l'urbanisation est aussi en cause, en aval, car elle se fait souvent dans des secteurs réputés inondables, ce que souvent, la mémoire populaire et collective avait oublié.....

Les récentes inondations à la fin du mois d'août 2013, de Bamako puis, trois jours après, à Niamey, sont très différentes dans leur origine ; la première est indéniablement une crue « urbaine », donc pluviale (due aux apports d'eau de pluie), la seconde une crue d'origine « rurale » et de fait, fluviale (débordement d'un fleuve). Ces dernières sont en grande partie liées aux changements d'occupation des sols (Descroix *et al.*, 2012 ; Descroix *et al.*, 2013) ; ainsi elles ont touché Niamey fin août 2013, pour la troisième fois en quatre saisons (août 2010, août 2012, Août-septembre 2013) ; dans le cas des crues de 2010 et 2013, la pluviométrie était excédentaire mais pas exceptionnelle. Cette nouvelle série de crues « rurales » avait commencé en 2007 avec les inondations qui avaient causé de gros dégâts en zone rurale au nord Ghana et Togo et sud du Burkina Faso (Tschakert *et al.*, 2010). Bien plus au Nord, la ville d'Agadès était

victime, le 1^{er} septembre 2009, d'une inondation liée à la rupture d'une digue protégeant la ville, et l'oued Teloua a envahi la ville, reprenant son cours naturel.

Comme on l'a évoqué à la fin du chapitre 6, c'est par contre par l'inondation, deux mois avant le début de la mousson, de quartiers entiers de Niamey (le 28 avril 2004) qu'avait été initiée la série en cours des crues « urbaines ». Ce jour-là, plus de 130 mm étaient tombés en quelques heures sur les quartiers nord de Niamey, et les bas-fonds descendant vers le fleuve Niger avaient été littéralement balayés, comme ceux de Bamako le 30 août 2013. Puis, le 1^{er} septembre 2009, c'est Ouagadougou qui a été littéralement submergée par un épisode exceptionnel, de période de retour probablement bien au dessus de 100 ans (Karambiri, 2009) ; ce jour-là certains quartiers ont reçu plus de 270 mm en une dizaine d'heures. En août 2013, la ligne de grains qui était à l'origine de la crue urbaine de Bamako, a ensuite causé des inondations sans précédent dans les zones basses du Sine et Saloum avec des cumuls de plus 300 mm en deux jours (alors que la capitale du Mali n'avait reçu que 85 mm de pluie).

On s'intéressera dans la première partie de ce chapitre à l'inondation qu'ont subi les quartiers Nord de Dakar le 26 août 2012 ; l'épisode a été marqué par une très forte intensité, comme l'a noté Dacosta (2012), puisque plus de 140 mm sont tombés en une cinquantaine de minutes à l'aéroport de Yoff. La hauteur précipitée totale en deux heures et demi est de 161 ou 168 mm suivant le capteur, ce qui en fait le deuxième plus fort cumul journalier jamais enregistré à Dakar depuis 1896 (ouverture de la station), le record étant toujours détenu par une précipitation de 214 mm en 1932. La pluie a été inégalement répartie ; en effet les départements de Pikine et Guédiawaye dans la banlieue de Dakar n'ont enregistré que 40 et 39 mm respectivement (Diallo, 2013), le site IRD de Hann 60 mm. C'est vraiment le cap formé par la pointe des Almadies et le nord du Cap Vert qui ont été le plus intensément touchés.

Ensuite on verra que cet événement, s'il constitue un record pour la station de Yoff, n'est pas isolé et semble simplement témoigner d'une augmentation de l'occurrence des événements pluvieux de fort cumul journalier, qui a occasionné d'autres inondations urbanines ces toutes dernières années.

Une urbanisation pas toujours contrôlée, un drainage imparfait

Il faut un épisode d'une telle intensité pour expliquer qu'un site tel que la ville de Dakar, surplombant la mer de ses corniches de basalte ait été à ce point inondé.

Le Cap Vert, site occupé par la ville de Dakar, est assez particulier ; il est situé à l'extrémité ouest du continent africain, sur une presqu'île en partie basaltique (figures 1 et 2). Il s'agit en fait d'une sorte d'immense tombolo double reliant une ancienne île basaltique (du quartier du Plateau à la pointe des Almadies). Il est dominé par deux ensembles de hauteurs d'origine volcanique : au sud le Plateau qui aboutit au Cap Manuel, est un ensemble de terrains volcaniques oligo-miocène, essentiellement basaltique, qui se prolonge sur l'île de Gorée et les Iles de la Madeleine. La pointe occidentale et la Corniche Ouest sont constituées d'autres terrains volcaniques plus récents (Pléistocène) constituant un littoral rocheux d'où dépassent les deux Mamelles. Ces hauteurs dominent une dépression intermédiaire et tous les espaces plus proches du continent, constitués en grande partie de matériaux sableux posés sur les roches

sédimentaires tertiaires sur lesquelles se sont constituées ces flèches de sable rattachant les hauteurs volcaniques au continent africain.

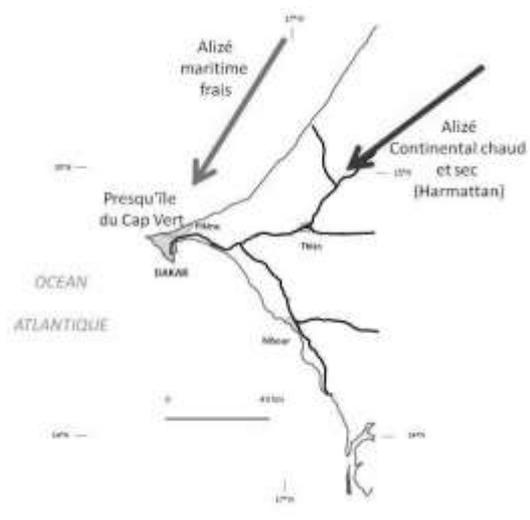
Cette situation avancée dans l'océan confère à Dakar un climat jugé agréable car bien plus frais que le Sahel intérieur, du fait du passage presque permanent d'un alizé du nord-est le plus souvent océanique (frais), plus rarement provenant du Sahel (sec et chaud) (Figure 1).

Le nord du « tombolo » est constitué d'une rangée de dunes assez élevées sur lesquelles s'est construite dans les années 1975-1985 la ville nouvelle de Pikine, destinée à désengorger le bout de la presqu'île (Figure 2).

Ceci étant, la ville de Dakar et celle de Pikine, bien individualisées dans les années 1980, ont fait leur jonction depuis. Si l'on ne tient pas compte des zones inconstructibles, c'est-à-dire l'aéroport de Yoff et les « Niayes » ces zones humides et lacs liés à l'affleurement des nappes dans les espaces inter-dunaires de la presqu'île, tout l'espace du Cap Vert est à présent entièrement urbanisé. Même si la trame viaire a été adaptée dès le début à la croissance attendue de la ville, avec l'emplacement réservé de grands axes de communication, en particulier pour entrer et sortir de la presqu'île, il est possible que les canaux de drainage n'aient pas été prévus en nombre suffisant. La partie ouest de la ville a pourtant connu au début des années 1980 le creusement de canaux de drainage longs et profonds qui entaillent le plateau basaltique pour déboucher sur la corniche ouest par des entailles morcelant la partie ouest de l'agglomération : le canal 4 (quartier de Fann) et le canal Gueule Tapée sont creusés localement de près de 10 m ; étant sur de grandes sections à ciel ouvert, ils peuvent aussi poser des problèmes sanitaires (figure 3). La partie « nouvelle » de l'agglomération a par ailleurs été construite autour de ces « Niayes » (Pikine, Guediawaye, Parcelles Assainies, Cambérène, Golf, Malika), et encerclent ces dépressions. De ce fait, l'habitat spontané s'installe dans les interstices inondables, le nombre d'habitations évoluant rapidement au détriment des dunes et végétations naturelles (Mbow *et al* , 2008 pour le cas d'étude de Yeumbeul). Cependant le 26 août 2012, ce secteur habituellement très sensible aux inondations a reçu beaucoup moins d'eau que le secteur de l'aéroport, et a de ce fait été bien moins touché.



1a



1b

Figure 1. Localisation du Cap Vert ; 1a- à gauche carte du Sénégal indiquant les postes pluviométriques cités et la localisation de l'encart ; 1b-à droite, zoom sur la presqu'île du Cap Vert.

Même si c'est dans sa partie ouest qu'il est le plus impressionnant (car taillé dans le basalte) tout le réseau de drainage (figure 3) a été dimensionné pour des pluies telles que celles du 26 août 2012 (120 mm en une heure –comm pers de M Ousmane Dione, de l'ONAS, Office National de l'Assainissement, Dakar), mais nous avons pu constater que parfois les canaux sont bouchés ou encombrés, réduisant leur débit potentiel. De fait, comme on le constate chaque année quelques semaines avant l'hivernage, les canaux à ciel ouvert servent fréquemment de dépotoirs, obligeant les autorités de la ville à faire procéder à un curage annuel de ces canaux, de manière à ce qu'ils puissent jouer leur rôle durant la saison des pluies.

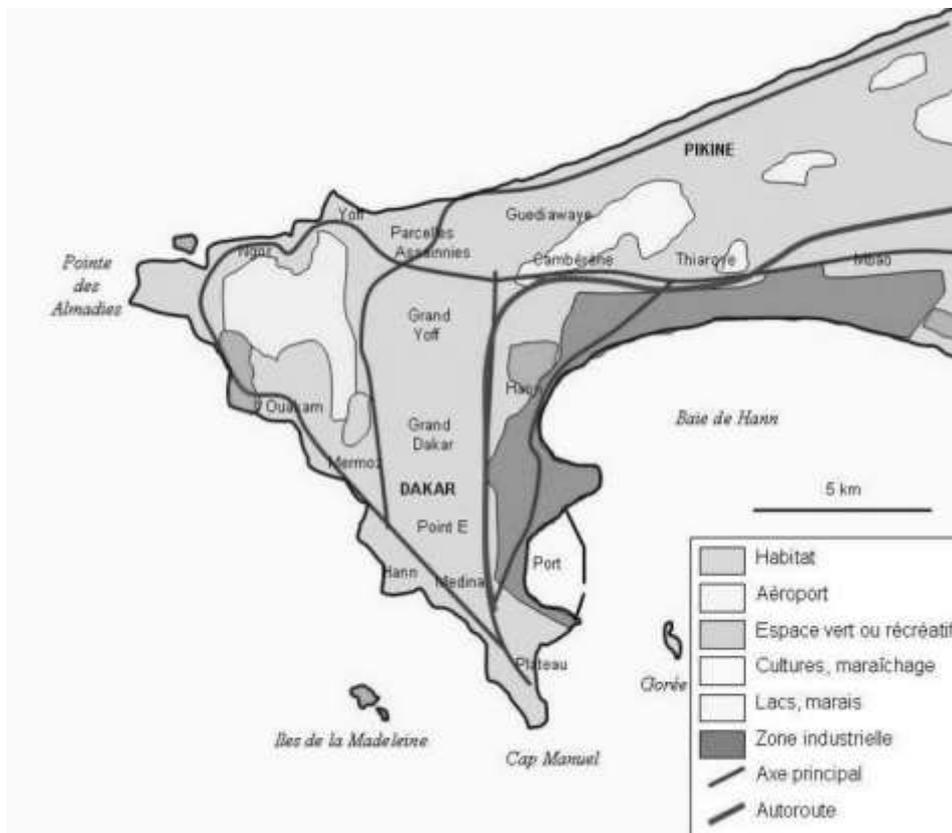


Figure 2 : schéma de l'occupation des sols du Cap Vert

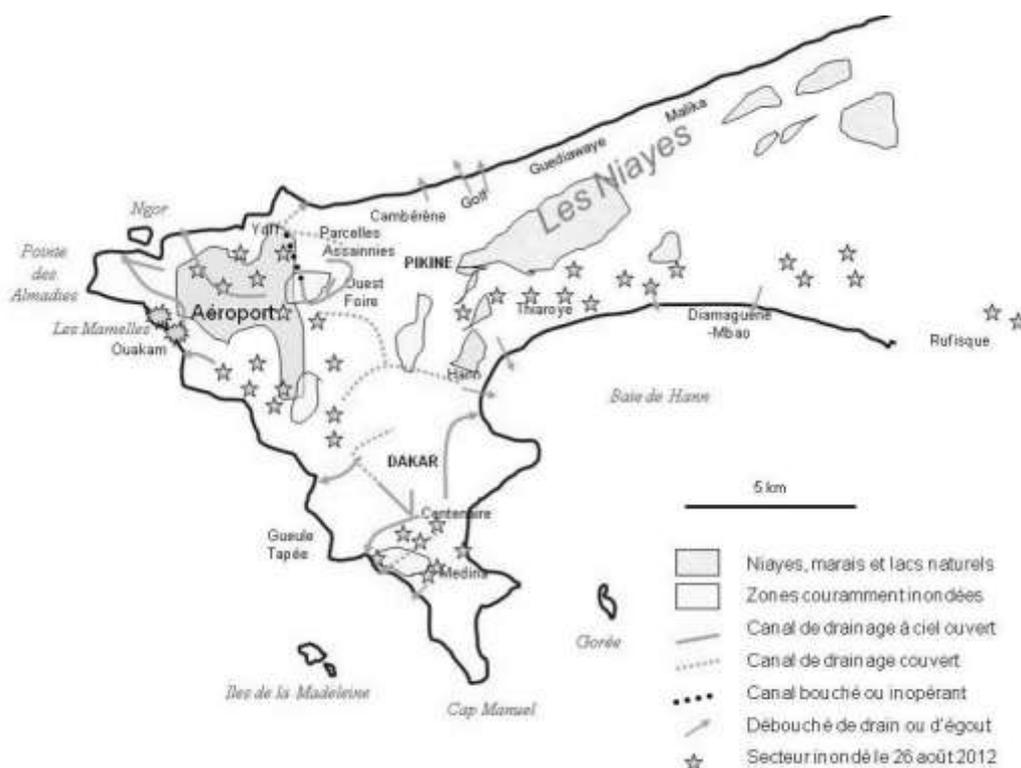


Figure 3 : zones humides, zones inondables et réseau de drainage du Cap Vert

Dans la partie nord de la ville de Dakar, le terrain de la Foire de Dakar a été loti en 2010 et 2011 et des constructions se sont très vite établies sur ces terrains de bas-fonds. Or le canal à ciel ouvert qui, après avoir ceint la foire, drainait le quartier vers le nord en longeant à l’est l’enceinte aéroportuaire, a été délaissé, ou pire, comblé, lors de la construction du quartier Ouest Foire (après 1997) ; de ce fait la foire et ses abords devenaient une immense zone inondée lors des pluies de forte intensité (figure 4) : un nouveau drain y a toutefois été creusé après coup, et avant l’hivernage 2014. Cependant, en août 2012, l’intensité de la précipitation avait provoqué stagnation de l’eau et inondation y compris dans des quartiers mieux drainés comme, plus près du centre-ville, auprès de la Grande Mosquée de Dakar. Les rez-de-chaussée des bâtis ainsi que les chaussées ont particulièrement souffert de cet épisode exceptionnel.

Un évènement particulièrement intense à Dakar

La pluie survenue le 26 Août 2012 dans la matinée à Dakar a été à l’origine de la plus grande inondation survenue à Dakar durant ces vingt dernières années. La presse écrite et télévisuelle a largement relaté les dégâts qu’elle a provoqués à Dakar et dans d’autres régions du Sénégal. Cet évènement n’est pas le plus fort cumul en 24 h enregistré à Dakar. En effet 214 mm étaient tombés le soir du 21 août 1932 (enregistré le 22 au matin, tableau 1). Et c’est ce dernier évènement qui occasionne la seule rupture suivant la segmentation de Hubert (voir figure 12 chapitre 6) dans la série des 115 années de données de la station de Dakar (cependant celle-ci n’a pas toujours été localisée à Yoff ; cette série n’est donc pas homogène ni statistiquement exploitable sur la longue durée ; le poste a été situé à l’hôpital principal en centre ville jusqu’aux lendemains de la 2^{ème} guerre mondiale puis à Ouakam (l’ancien aéroport) dès 1941, jusqu’à l’installation de la station de Yoff en 1946.



Figure 4 : les immeubles construits au début des années 2010 sur les terrains de la Foire de Dakar : une nouvelle Venise ?

Les caractéristiques de cette pluie sont résumées dans le tableau 2 sur la base des données de la station de Dakar-Yoff. Le grain était constitué en système convectif de méso-échelle depuis plus de 24 heures. Il a abordé le Sénégal le 25 au matin et a arrosé l'essentiel du pays durant la journée tout en se séparant en plusieurs cellules dans la journée ; la figure 5 montre les amas constitués le 25 au soir et le 26 au matin, celui qui a intéressé le Cap Vert juste avant de quitter définitivement le continent. La figure 6 (carte des isohyètes de l'évènement) montre que les cumuls ont été plutôt faibles pour cette ligne de grains dans l'ensemble du Sénégal, sauf en arrivant dans le Sine Saloum (43 mm tombés à Kaolack) et surtout sur le bout du Cap Vert.

Le trait marquant de cet épisode, au-delà du cumul important enregistré ce jour (le deuxième plus fort jamais observé à Dakar, voir tableau 1) est sa très forte intensité, puisque la pluie n'a duré que deux heures et demie. Le tableau 2 montre que 54 mm sont tombés en un quart d'heure (soit une intensité de 216 mm/h) et surtout que 144 mm sont tombés en 51 minutes à l'aéroport, soit une intensité supérieure à 160 mm/h durant ce long laps de temps. Malheureusement, les données pluviographiques manquent à ce stade pour analyser le temps de retour d'un tel évènement. Toutefois, les intensités de cette pluie sont très fortes et dépassent toutes celles enregistrées dans la base de données pluviographiques de la station de Dakar-Yoff.

Tableau 1 : Hauteurs des 5 plus fortes pluies journalières enregistrées à Dakar entre 1896 et 2013 et leur récurrence (période de retour en années) (source : Dacosta, 2013):

Date	Récurrence (années)	P (mm)
17/08/1927	21	150
26/08/1962	25	153,1
25/08/1964	33	157,7
25/08/1929	46	159

26/08/2012	76	160,8
22/08/1932	228	214

Sans avoir passé en revue les données de tous les postes d’Afrique de l’Ouest on peut affirmer que cet évènement est exceptionnel ; ainsi on n’a jamais atteint de telles intensités durant plus de 10 minutes depuis le début des années 1990 dans le degré carré de Niamey, où le réseau comprend 30 pluviographes installés lors du programme HAPEX Sahel.

Le tableau 3 indique les intensités maximales relevées par ce programme dans le degré carré de Niamey durant des pas de temps courts pour quelques évènements extrêmes de l’année 2005 qui avait été riche en épisodes intenses. Aucune n’atteint les intensités observées à Dakar ce 26/8/2012 où une intensité de 420 mm/h a été observée pendant une minute.

Tableau 2 : Déroulement précis de l’épisode du 26 août tel qu’observé au pluviographe de l’aéroport de Dakar Yoff. (source : Dacosta, 2013)

Début de la pluie :	9h 16 min
Fin de la pluie :	11h 46 min
Hauteur de la pluie au pluviomètre :	160.8 mm
Hauteur de la pluie au pluviographe :	168 mm
Hauteur de pluie tombée entre 09h46 et 10h36 (51 min) :	144 mm
Hauteur de pluie tombée entre 09h56 et 10h11 (15 min) :	54 mm (près de 1/3 du total précipité)

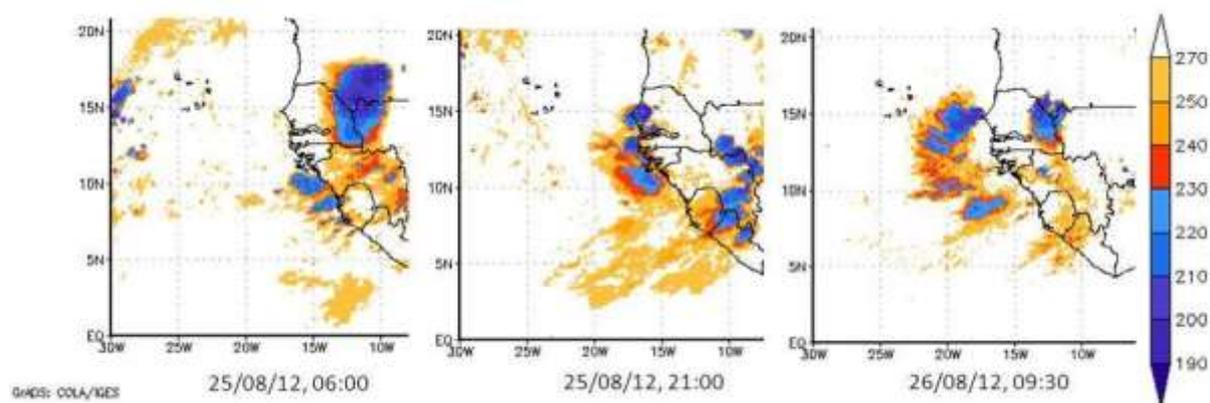


Figure 5. Avancée de la ligne de grains du 25- 26 août 2012 et les amas nuageux qu'elle a produit; l'échelle donne la température du sommet des nuages en K°. (source GrADS: COLA/IGES).

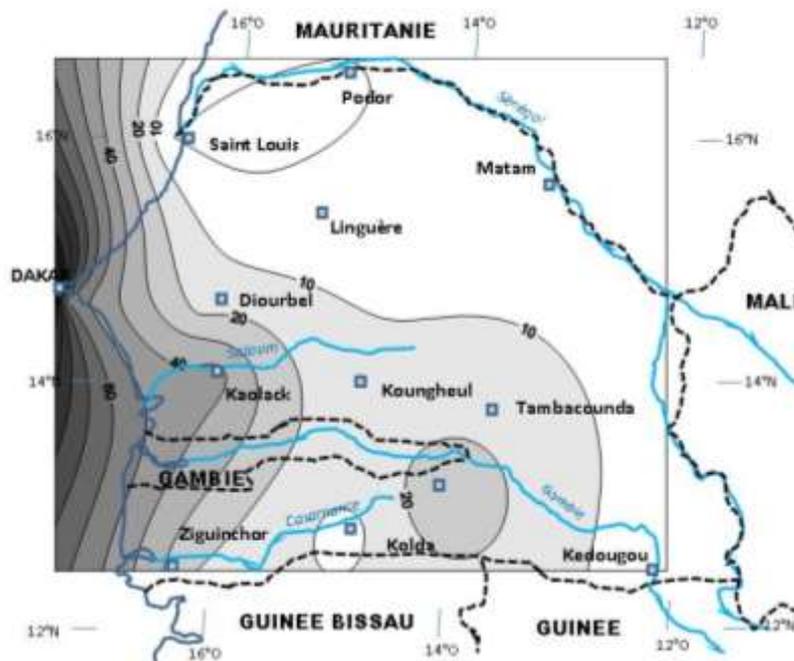


Figure 6. Isohyètes de la pluie du 25-26 août 2012 à travers le Sénégal : une activité renouvelée en arrivant sur le bout du cap Vert

Tableau 3 : Intensités de la pluie du 26 Août 2012 à Dakar comparées à celles du mois d’Août 2005 mesurées par l’Observatoire AMMA CATCH au Niger (pas de temps de 1, 2, 5, 10 et 15 minutes) (source : Dacosta, 2013)

Date	P(mm)	I. 1min (mm/h)	I. 5min (mm/h)	I. 10 min (mm/h)	I. 15 min (mm/h)
16/08/2005	84.5	163	108	100	24
20/08/2005	77	196	78	57	20
22/08/2005	106.5	275	140	114	96
26/08/2012	160.8	420	276	237	216

On comprend que des espaces urbanisés en grande partie imperméabilisés, aient eu du mal à absorber de tels volumes en si peu de temps, malgré une urbanisation relativement lâche et la présence de nombreux jardins et espaces sableux (dunes plus ou moins construites, mais au sable souvent induré ou encroûté).

Indéniablement, l'épisode pluvieux du 26 août 2012 est un événement extrême, et en termes de cumul et, surtout en termes d'intensité de la précipitation, et ce sur une superficie assez importante.

La figure 7 représente le hyétogramme de l'averse à Yoff et permet de constater la durée spécialement longue durant laquelle ont été observées des intensités élevées.

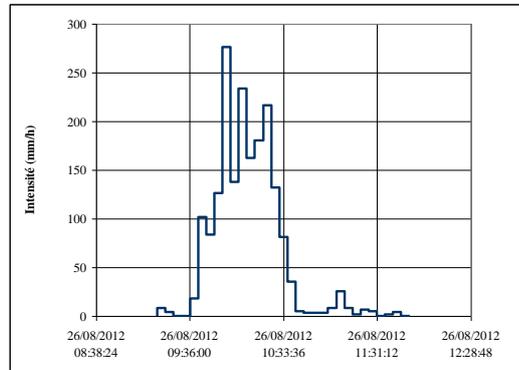


Figure 7 : Dakar-Yoff - Hyétogramme de la pluie du 26 Août 2012 (pas de temps 5 minutes). (source : Dacosta , 2013)

Crues et inondations urbaines dans la sous-région



Figure 8. Photo prise fin novembre 2013 montrant l'état du lit d'un des cours d'eau de Banconi à Bamako, quelques semaines après la crue du 30 août 2013

Comme on l'a suggéré plus haut, les inondations urbaines se sont multipliées ces dernières années. Après Dakar en 2012, c'est Bamako qui a été particulièrement touchée en 2013 (le 28 août cette fois). Les figures 8, 9, et 10 montrent l'état des lits des cours d'eau trois mois après la crue. Les figures 11 et 12 montrent la localisation du quartier (figure 11) et des bassins versants sur lesquels se sont déclenchées la crue et l'inondation du 28 août, ainsi que la zone

s'étendant sur les versants et qui connaît depuis quelques années une urbanisation très rapide (figure 12).



Figure 9. Photo prise fin novembre 2013 montrant l'état du lit du cours d'eau ouest



Figure 10. Photo prise fin novembre 2013 montrant l'état du lit du cours d'eau est



Figure 11. Localisation de la zone concernée par l'inondation du 28 août dans l'agglomération de Bamako

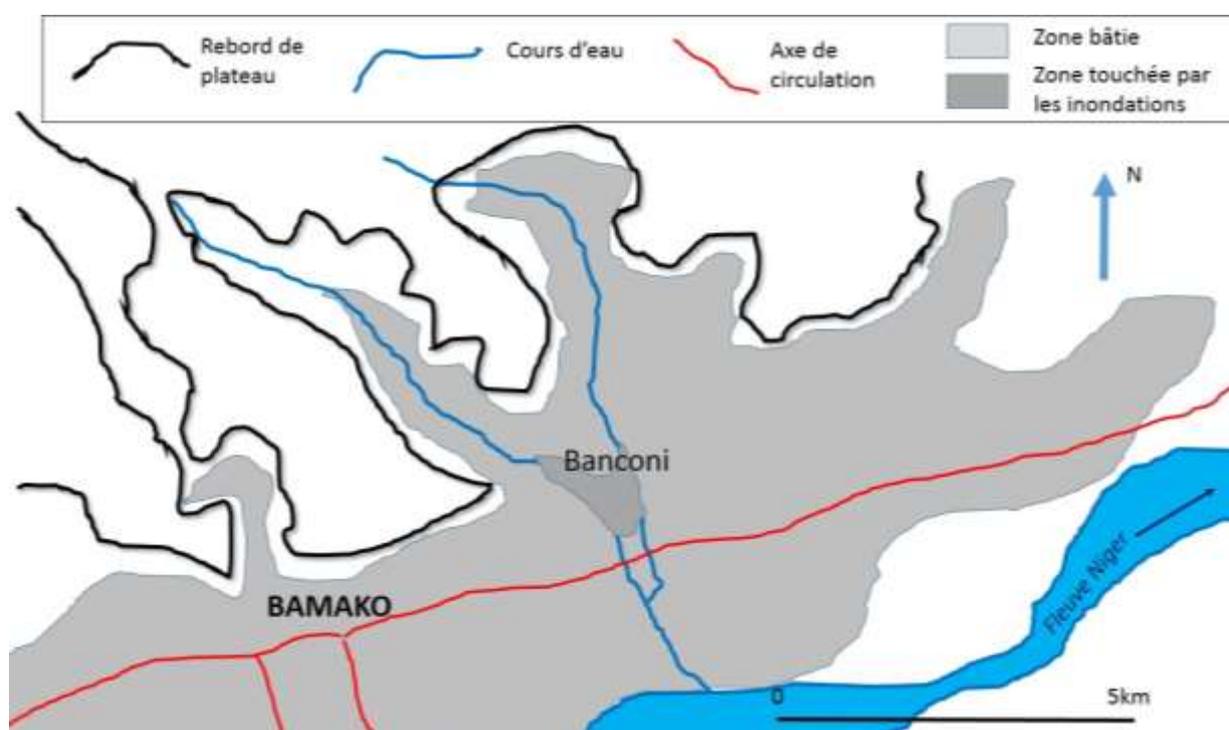


Figure 12. Le quartier de Banconi et les bassins des deux cours d'eau dont le débordement a provoqué l'inondation du 28 août 2013



Figure 13. Photo prise fin novembre 2013 montrant un caniveau bouché, comme ils l'étaient pour la plupart d'après les témoignages des riverains

Le jour où ont été prises les photos (figures 13 et 14), la plupart des caniveaux étaient bouchés ; d'autres avaient visiblement été débouchés récemment ; quelques autres (peu nombreux) semblaient avoir pu être fonctionnels le 28 août 2013.



Figure 14. Photo prise fin novembre 2013 montrant un caniveau bouché (Banconi, Bamako)

C'est aussi l'urbanisation qui est à l'origine des inondations à répétitions qui touchent certains quartiers de la ville de Ziguinchor (en Casamance, au sud du Sénégal). En effet, avec une pluviométrie annuelle moyenne proche de 1500 mm, cette ville moyenne est habituée aux grands abats d'eau : la saison des pluies n'y dure que 4 mois, soit seulement un mois de plus qu'au Sahel pour une pluviométrie trois fois plus élevée ; les averses de 50 à 80 mm en 24 h y sont très fréquentes. Mais la ville grandit, le sol s'imperméabilise, on coupe les arbres et on réduit les espaces de végétation et de sol nu où la pluie pouvait d'infiltrer ; les caniveaux ne sont pas toujours bien curés (figure 15) ; tous ces éléments se conjuguent pour provoquer un fort ruissellement, les eaux cherchant à s'écouler vers le fleuve, en fait un vaste estuaire, situé donc au niveau de la mer, transformant les rues en cours d'eau (figure 16).



Figure 15. Caniveau fonctionnel (mais en fait en grande partie comblé de sédiments et débris), Ziguinchor, quartier Kandé, août 2014



Figure 16. Une rue du quartier Diéfaye à Ziguinchor, en août 2014, s'écoulant vers le fleuve Casamance.....

Le paradoxe du Sahel, un processus dû avant tout à l'eau des champs

Les inondations liées au débordement des grands fleuves, comme celles qui concernent de plus en plus souvent la ville de Niamey, sont clairement liées au « paradoxe du Sahel » (chapitre 3), c'est-à-dire qu'elles sont dues à l'augmentation du ruissellement observé depuis le début de la sécheresse.

Le refus d'infiltration, qui entraîne une forte diminution de la capacité de rétention en eau des sols, est lié à l'encroûtement des sols (chapitre 5) en grande partie lié au changement d'occupation des sols et à l'abandon des jachères (chapitre 4), ce qu'on observe dans toute la bande sahéenne (chapitre 1) ; l'augmentation récente du nombre d'évènements pluvieux de fort cumul (chapitre 6) explique partiellement l'accroissement de la fréquence des crues du Niger et des autres cours d'eau sahéens ; en effet, pour être réelle, cette augmentation ne permet au mieux, à ces évènements dits « extrêmes », que de rattraper leur nombre et leur cumul précipité des décennies humides (années 1950-1970). Comme les crues « rouges » (d'hivernage) récentes sont bien plus abondantes et fréquentes qu'alors, il faut faire intervenir des facteurs « anthropiques » tel que l'encroûtement de sols pour expliquer cet excès d'écoulement. C'est sans doute ces changements d'occupation des sols et en particulier la disparition de la végétation naturelle, qui expliquent par exemple que le kori de Teloua ait rompu la digue qui le bordait et protégeait la ville d'Agadès (figure 17), inondant toute la partie basse de la grande ville du nord Niger, le 1^{er} septembre 2009 (jour où Ouagadougou fut inondée, suite à une autre ligne de grains, par un évènement d'une fréquence très rare pour provoquer une inondation purement « urbaine », Ouaga étant dépourvue de fleuve).

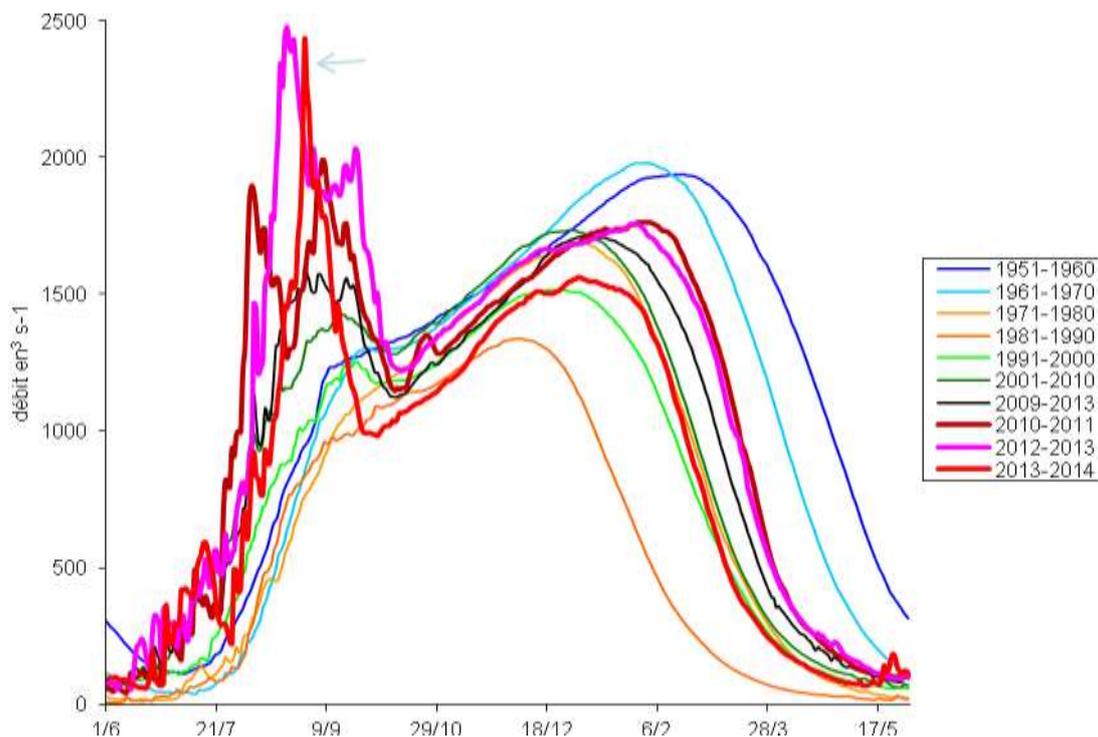


Figure 17. Inondation de la ville d'Agadès (centre Nord du Niger) le 1^{er} septembre 2009 (courtoisie Eve Janodet et Akly)

Toutefois, dans le cas des crues récurrentes que connaît Niamey ces dernières années, il faut faire intervenir d'autres éléments qui ne sont pas tous observés dans toute la bande sahéenne soumise au dit « paradoxe ». En effet, la configuration de la ville de Niamey apporte quelques éléments explicatifs supplémentaires :

- La région est particulièrement dévégétalisée du fait de la très forte demande en bois et en fourrages de la ville (plus d'un million d'habitants, dont plus de 98% de ménages cuisinant au bois) (voir les cartes du DCN et du bassin du Dargol, figures 2 à 6, chapitre 4);
- En lien avec le facteur précédent, la zone amont de Niamey a connu un grand nombre de « ruptures d'endoréisme » ces dernières années, provoquant un accroissement de la surface de bassin versant (figures 9 à 12, chapitre 7) ;
- Egalement en lien avec l'augmentation de l'encroûtement, on observe un fort ensablement du lit du Niger en amont de la ville, ce qui provoque une diminution des débits de plain-bord et un débordement plus fréquent (figures 14 à 16, chapitre 7) ;
- Enfin, conséquence en zone endoréique du « paradoxe du Sahel », le « paradoxe de Niamey » (Leduc *et al.*, 1997) se caractérise par une remontée du niveau de la nappe du CT3 (figure 11, chapitre 4), nappe qui est très proche de l'affleurement à l'approche de la vallée du Niger (figure 1, chapitre 4), provoquant une saturation très rapide des bas fonds et leur « mise en ruissellement » accélérée.

Ces éléments s'ajoutent donc aux précédents, que l'on observe dans tout le Sahel, pour expliquer la recrudescence des inondations à Niamey, avec le dépassement par deux fois en 2010 du niveau jamais atteint pour une crue rouge, puis les deux plus hauts niveaux jamais atteints toutes saisons confondues en 2012 puis en 2013 (figure 18).



2010: la crue locale (la première, celle due aux pluies de mousson tombées en zone sahélienne) atteint deux fois son plus haut niveau jamais observé depuis 1929
2012: records battus, la plus forte crue jamais observée depuis 1929
2013: le pic de crue est à 2 cm sous le record de 2012

Figure 18. Hydrogrammes de la station de Niamey (fleuve Niger) des dernières années, surimposés aux hydrogrammes décennaux (et celui de la pentade 2009-2013)



Figure 19. Berges du fleuve Niger inondées en fin août 2012 (photo Ibrahim Mamadou)

Ces deux années là, fin août, comme par deux fois en 2010 (fin juillet puis fin août) des quartiers entiers de la rive droite du Niger (quartiers de Haro Banda) ont été inondés (figure 19). Ce sont pourtant des quartiers connus comme zones inondables, depuis toujours ; mais ils n’avaient plus été inondés depuis les dernières grandes crues de 1968 et 1970, donc les gens avaient perdu l’habitude de les voir recouverts d’eau. Par contre ces quartiers avaient bien été en grande partie signalés comme inondables dans la carte de la zone d’inondation du Niger produite par Agrhymet pour l’ABN en 2007 (figure 20).

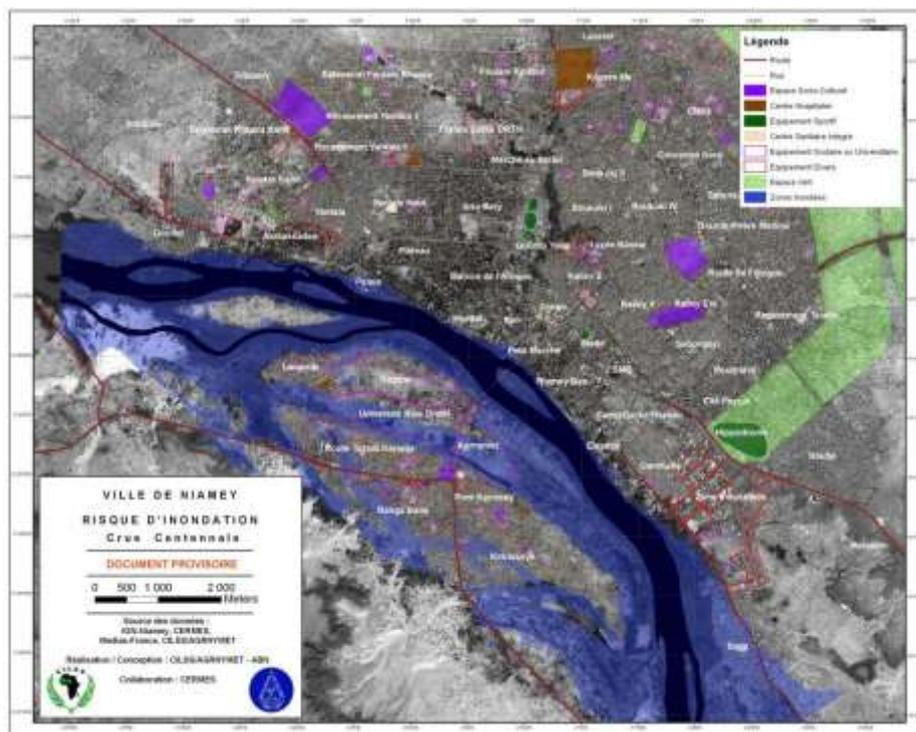


Figure 20. Carte du risque d’inondation de la ville de Niamey (pour une crue centennale), produite par Agrhymet pour l’ABN (2007)

En rive gauche, à Niamey, le kori Gounti Yena, venu des quartiers nord, a construit un cône de déjection susceptible de perturber le débit et d'entraîner un débordement sur la rive droite (sud est) du fleuve Niger (figure 21).

Conclusion : l'eau des villes, en plus de l'eau des champs ?

Clairement la pluie du 26 août 2012 sur Dakar a été un événement extrême, probablement le plus intense survenu depuis l'ouverture de la station, le deuxième en cumul précipité en 24 heures. Il est difficile de supporter le coût de drains capables d'évacuer de tels débits horaires. Mais, comme dans le cas d'autres inondations causées uniquement par les précipitations tombées sur place (sans débordement d'un fleuve apportant des débits venus d'amont), les conséquences de l'inondation sont aggravées par une urbanisation plus ou moins contrôlée et par le manque d'entretien des canaux de drainage ; la voirie a également été endommagée (figure 22). On pense bien sûr à l'évènement de Ouagadougou le 1^{er} septembre 2009 ou celui de Bamako le 28 août 2013.



Figure 21 : cône de déjection du kori Gounti Yena (au centre) encombrant la moitié du lit du Niger à Niamey, ayant apporté les sédiments de son bassin essentiellement urbain, au ruissellement accéléré (voir aussi figure 26 chapitre 7)



Figure 22 : malgré la relative faiblesse des pentes dans la ville de Dakar, les ravinements ont été nombreux lors de l'épisode pluvieux du 26 août 2012

Il est important que les preneurs de décision et les responsables des agences de distribution d'eau et d'assainissement prennent en considération la récente augmentation sinon de l'intensité du moins de la fréquence d'occurrence du nombre des événements « extrêmes » (en tout cas des événements de fort cumul pluviométriques journalier) observée sur l'ensemble de l'Afrique de l'Ouest.

Et ce d'autant que ces événements purement « urbains » se surimposent à la tendance, plus générale et régionale, de l'accroissement fort des écoulements en zone sahélienne, provoquant un fort écoulement d'eaux d'origine rurale.

En résumé,

- L'augmentation du risque de crue est en grande partie liée à un élément avant tout rural, l'encroûtement des sols qui a exacerbé l'écoulement des eaux**
- L'urbanisation a deux conséquences hydrologiques qu'il convient de prendre en compte de plus en plus : d'une part les zones urbanisées sont plus ruisselantes que les zones rurales alentour (imperméabilisation par activités et bâtis urbains, chaussées, etc) ; d'autre part, l'urbanisation souvent mal contrôlée s'est faite parfois sans prévoir de drainage, et surtout, elle a souvent été tolérée dans les zones inondables, provoquant des catastrophes comme dans l'ancien lit secondaire du Niger à Niamey ou dans les Niayes de Dakar**

4^{ème} partie :

Et demain ?

Le changement climatique a produit l'un de ses plus forts effets en Afrique de l'Ouest lors de la « grande sécheresse » des années 1968-1995. Ce fut le plus fort signal du changement climatique jamais enregistré alors. Depuis, on se rend compte, d'année en année, de l'importance de la hausse des températures moyennes. Cette tendance est plus rapide au Sahel qu'en moyenne mondiale ; et elle l'est encore plus en ville.

Cette quatrième partie montre que le changement climatique est là, que ses conséquences sont tangibles, sur les littoraux, mais aussi sur le continent, et qu'il faut tenter d'améliorer la résilience des agrosystèmes des grandes plaines et vasières littorales, comme des grands espaces en voie de « sahélisation » à l'intérieur des terres.

Chapitre 9 : Eau douce contre eau salée : David contre Goliath ?

Chapitre 10 : Changement climatique et prévisions : Pourquoi il est urgent d'améliorer la résilience des agro-systèmes d'Afrique de l'Ouest

Chapitre 11 : Le reverdissement, arme de résilience ?

Chapitre 9 : Eau douce contre eau salée : David contre Goliath ?

*« Mais l'Afrique ?
Ses habitants des Grandes Eaux Noires, les Garamantes farouches ?
Qui peut évoquer avec concision le passé d'un peuple sans écriture confirmée ?
J'ai essayé ; ai-je réussi ? » ..
« Nous donnerons un nouveau nom à Djoliba,
à Gao la Memphis du désert,
à Agadès première capitale de l'Air et laissons courir l'imagination ».*

Ibrahim Issa, Grandes Eaux Noires

Introduction

L'élévation du niveau de la mer est un fait incontestable ; les marégraphes l'enregistrent depuis plusieurs décennies et depuis les années 1990, les satellites altimétriques permettent de s'en assurer en temps réel et avec une excellente précision.

Par ailleurs, les rapports du GIEC mettent en évidence le réchauffement climatique de manière indubitable, et la plupart des experts le corrélient aux activités humaines, en particulier à l'augmentation des gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère, ceux émis par l'homme se sommant aux quantités présentes naturellement dans l'atmosphère.

Le lien entre réchauffement climatique et augmentation du niveau de la mer est également clair, par la combinaison de deux facteurs : la dilatation de l'eau du fait du réchauffement, qui expliquerait les deux tiers de cette élévation, et la fonte des glaces polaires, inlandsis, calottes, glaciers et permafrost, augmentant la part de l'eau liquide dans le bilan global, qui expliquerait le tiers restant de cette élévation (Paskoff, 2001).

Le lien entre réchauffement dû aux activités humaines et l'élévation du niveau des océans ne fait donc aucun doute.

Les conséquences en sont partout les mêmes : érosion côtière, destruction des zones de marais littoraux (avec rizières, mangroves, pâturages etc), pénétration plus importante de l'eau salée dans les estuaires, deltas et marais maritime, d'où salinisation des sols, et risque accru de submersion lors des fortes marées.

Les zones les plus exposées sont les zones basses de deltas telles que le Bangladesh (delta du Gange et du Brahmapoutre), les autres grands deltas d'Asie du SE (Mékong, Irrawadi, Salouen, Yang tze Jiang, Fleuve Rouge, Chao Praya, etc), les Pays Bas et les Flandres (deltas du Rhin, de l'Escaut et de la Meuse), le delta du Mississippi et de l'Amazone, mais aussi les nombreux deltas de la façade atlantique de l'Afrique, du fleuve Sénégal à l'Ogoué.

Toutes ces zones sont peuplées de manière très dense et si deux à trois milliards d'habitants vivent en zones littorales ou proches du littoral, plusieurs centaines de millions d'habitants vivent à moins de un mètre d'altitude !! Les activités humaines sont en effet très concentrées dans ces zones de contact, riches en biodiversité et permettent les activités d'échanges.

Les deltas d'Afrique de l'Ouest ne font pas exception et hormis celui du Sénégal, très peuplé depuis quelques décennies, tous ont développé une activité rizicole ancestrale dans les marais maritimes, naturellement recouverts par la mangrove, une formation végétale adaptée au battement des marées comme aux variations de la salinité de l'eau de mer. Ce sont donc des zones particulièrement peuplées (bien plus densément que l'intérieur des terres) et aux activités économiques diverses, variées, et demandant une grande intensité de main d'œuvre, en particulier mais non exclusivement, les rizières et l'entretien des digues, diguettes et parcelles permettant la pratique de la riziculture inondée de bas-fonds, connue depuis au moins le 14^{ème}

siècle dans les « rivières du sud », c'est à dire les deltas depuis le Saloum jusqu'à la Sierra Leone.

Ces zones littorales sont éprouvées depuis plusieurs décennies par le changement climatique (la sécheresse, qui affecte l'ensemble de l'Afrique de l'Ouest depuis 1968, même si la pluviométrie y a partiellement ré-augmenté après l'an 2000. Cette sécheresse a aussi fortement touché ces zones par la très forte diminution des apports d'eau douce venus du continent qu'elle a provoqué ; avec les apports liquides, les apports sédimentaires ont également fortement baissé. Cela a provoqué une hyper-salinisation des deltas et estuaires, provoquant la mort de la mangrove et la stérilisation des rizières. La diminution des sédiments a pu amorcer un déficit sédimentaire sur le littoral, en même temps qu'une baisse des apports en nutriments naturels venus des bassins versants, en poissons et en faune aquatique.

Mais depuis les années 1980, on observe une nouvelle contrainte, venue de la mer, avec l'accélération de l'élévation du niveau océanique, qui apporte avec elle l'érosion côtière, la salinisation des eaux souterraines et des sols, ici comme à l'échelle globale comme on l'a évoqué plus haut.

Un fait incontournable

Au cours du dernier maximum glaciaire, il y a environ 20 000 ans, le niveau de la mer était plus bas qu'aujourd'hui d'environ 130 mètres en moyenne. Avec la fonte des grandes calottes de glace qui recouvraient alors le nord de l'Amérique et de l'Europe, la mer est remontée puis s'est stabilisée il y a environ 3 000 ans. Depuis 3000 ans avant aujourd'hui, et ce, jusqu'au début du XIX^e siècle, le niveau de la mer n'a pratiquement pas bougé, n'augmentant que de 0,1 à 0,2 millimètre par an. Mais les observations marégraphiques disponibles depuis 150 ans indiquent que la mer a recommencé à monter au cours du XX^e siècle, à une vitesse moyenne de 1,8 mm par an. Ces deux dernières décennies, cette hausse a presque doublé par rapport aux décennies précédentes ; c'est ce que montrent les observations des satellites altimétriques franco-américains *Topex/Poseidon*, *Jason-1* et *Jason-2*, développés par le CNES (Centre national d'études spatiales) et la NASA (National Aeronautics and Space Administration des Etats-Unis d'Amérique) depuis 1992. Elle atteint aujourd'hui 3,5 millimètres par an en moyenne globale depuis l'an 2000. Tout suggère que la hausse actuelle du niveau de la mer est liée au réchauffement climatique affectant la planète depuis quelques décennies. Au cours de la deuxième moitié du XX^e siècle l'océan s'est beaucoup réchauffé. Il stocke actuellement près de 90 % de l'excès de chaleur accumulée dans le système climatique au cours des 50 dernières années. La dilatation thermique des océans causée par l'augmentation de la température de la mer explique une partie de la hausse observée du niveau de la mer. Depuis quelques années, on assiste à un déclin important des glaces continentales. Les glaciers de montagnes fondent et les glaciers périphériques du Groenland et de l'Antarctique de l'ouest s'écoulent dans l'océan à une vitesse accélérée. C'est l'autre grande cause de l'élévation actuelle du niveau de la mer. Pour les deux dernières décennies, la dilatation thermique de l'océan explique 60% de la hausse et la fonte des glaciers environ 30 % à la hausse observée du niveau de la mer. La perte de masse des calottes polaires explique quant à elle environ le reste (Wikipedia by Cazenave et Cazenave et Llovel, 2010)

Depuis 1900, le niveau marin augmente de 1 à 3 mm par an. Depuis 1992, l'altimétrie satellite à partir de TOPEX/Poseidon indique un taux d'élévation d'environ 3 mm par an (Cazenave in Wikipedia). L'élévation du niveau marin est une des conséquences du réchauffement climatique, via deux processus principaux : la dilatation de l'eau, de la mer (puisque les océans se réchauffent), et la fonte des glaces terrestres. Au XX^e siècle, la mer a monté de 17 cm (Stroeve

et al. 2007). Le rapport du GIEC de 2007 (Velicogna, 2009) estimait que la mer pourrait s'élever de 18 à 42 cm d'ici 2100 (Stroeve *et al.* 2007). Cette prévision a été révisée et portée à 0,50 à 1 m d'ici 2100 par une étude (publiée 28 novembre 2012 pour la 18^e conférence de l'ONU sur le climat à Doha) sur le changement climatique. En 20 ans, de 1990 à 2011, la mer a monté en moyenne de 3,2 mm/an selon (données satellitales); c'est 60 % de plus que les 2 mm par an anticipés par le GIEC pour son scénario moyen (Wikipedia ; Anny Cazenave).

En 2011, un rapport (AMAP, 2011) sur la neige, l'eau, la glace et le permafrost dans l'arctique publiée par l'Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP, programme consacré à la surveillance de l'Arctique par le Canada, le Danemark, les États-Unis, la Finlande, l'Islande, la Norvège, la Russie et la Suède) sur la base de données de terrain récoltées en arctique (quadruplement de la régression des glaciers groenlandais entre 2004 et 2009 par rapport à 1995-2000 ; diminution de l'inlandsis groenlandais passée de 50 gigatonnes/an entre 1995 et 2000 à plus de 200 gigatonnes entre 2004 et 2008) conclut que le GIEC a sous-estimé la gravité de la fonte de l'Arctique. Selon l'AMAP au rythme des années 1995-2000 l'augmentation des mers à cause de la fonte de l'Arctique atteindrait plutôt de 60 cm à 1,60 mètres d'ici 2100. A noter que ces résultats sont en bon accord avec ceux déduits des données marégraphiques sur la même fenêtre temporelle.

L'enjeu est de taille : plus de trois milliards de personnes, soit la moitié de la population mondiale, habitent sur une côte ou à moins de 200 km d'un littoral et un dixième de la population vit aujourd'hui à moins de 10 m au-dessus du niveau de la mer (Deschamps et Courcoux, 2014).

Selon le rapport du GIEC (IPCC 2007), deux sources majeures expliquent l'élévation récente du niveau moyen global de la mer :

- L'expansion thermique des océans due à leur réchauffement causé par la hausse des températures moyenne des basses couches de l'atmosphère. Cet effet, dit stérique, est estimé à partir de données hydrographiques mesurant la température et la salinité de l'océan (relevés bateaux, sondes, bouées dérivantes, flotteurs profilants du projet ARGO).
- L'augmentation du contenu en eau des océans, par l'apport d'eau douce consécutif à la fonte des glaciers de montagne et des calottes polaires (appelées aussi inlandsis) du Groenland et de l'Antarctique. La contribution des calottes polaires est estimée à partir de mesures spatiales (altimétrie, gravimétrie spatiale) alors que pour les glaciers de montagne, on utilise principalement des mesures in-situ.

D'autres facteurs, telle la diminution des apports sédimentaires à la mer par les fleuves, causée par la construction de barrages, l'urbanisation intensive du littoral, la modification des courants côtiers, etc. contribuent aussi à modifier la morphologie de la côte. Pour de nombreuses régions du monde (y compris la France et ses départements et territoires d'outre mer), la contribution respective de ces différents facteurs à l'érosion du littoral est encore incertaine. Des « modèles » d'évolution et de vulnérabilité des zones côtières en réponse aux forçages anthropique et climatique sont des outils d'aide à la décision devenus indispensables pour les responsables politiques en charge de l'aménagement du territoire.

Une accélération de la remontée du niveau marin depuis un siècle

La couverture spatiale des marégraphes est loin d'être idéale, mais elle a été améliorée considérablement ces dernières décennies. Différentes compilations régionales et globales confirment une accélération récente de la hausse du niveau des mers avec un taux moyen inférieur à 1,5 mm/an avant les années 1950 jusqu'à atteindre plus de 3 mm/an durant les dernières décennies (**Figure 1**). Les données altimétriques ont permis de confirmer la hausse du niveau marin observée par les marégraphes et de préciser un taux d'évolution qui est

actuellement de 3,2 mm/an, avec de petites fluctuations interannuelles et décennales principalement liées à l'Oscillation australe (hausses pendant les événements El-Niño et baisses pendant les phases La Niña).

Les conséquences à en attendre sont d'après Paskoff (1998a) :

- un risque accru de submersion ;
- une érosion côtière accélérée ;
- la salinisation rapide des espaces littoraux et plaines côtières.



Figure 1 : élévation du niveau des mers depuis 1950

Les Principales conséquences potentielles de l'élévation du niveau de la mer

Les submersions

Dans la perspective d'une élévation du niveau de la mer, les submersions sont le plus à craindre sur les plaines deltaïques, à la topographie à fleur d'eau, parsemées d'étangs et de lagunes, où la limite entre la terre et la mer est souvent indécise. C'est le cas de la Camargue sur sa marge littorale (Paskoff, 1998a et Paskoff, 1998b).

En raison de leur position dans l'espace intertidal, les marais maritimes paraissent particulièrement menacés d'inondation permanente par une élévation du niveau de la mer. Dans une conjoncture d'élévation du niveau de la mer, comme pour les marais maritimes des latitudes tempérées, les vasières à mangrove peuvent connaître trois types différents d'évolution qui dépendent du rapport de forces entre la vitesse de cette élévation et l'importance de la sédimentation : submersion et donc disparition de la forêt ; migration latérale vers la terre ; maintien, voire extension aux dépens de la mer. On peut compenser ainsi, d'une part le déficit en sédiments (en France) qui est la cause fondamentale de l'érosion, d'autre part l'élévation du niveau de la mer qui l'aggrave. La moins bonne solution est le recours traditionnel aux enrochements qui, s'ils sont capables de protéger efficacement les biens, présentent souvent l'inconvénient de renforcer l'érosion en augmentant la réflexion des vagues, donc de contribuer à la disparition de la plage et par là même de dénaturer profondément l'environnement (Paskoff, 1998a et Paskoff, 1998b).

A mesure que les zones côtières sont de plus en plus attractives et aménagées, leur vulnérabilité aux risques côtiers s'aggrave considérablement.

L'élévation du niveau marin pourra induire ou aggraver deux types de submersions : des submersions permanentes de zones basses (notamment de marais côtiers) et des submersions de tempêtes marines temporaires.

Ceci étant, la mangrove est surtout un bon bouclier face à l'érosion côtière, pour les côtes ouest-africaines ; les zones de marais maritimes côtiers en forte accrétion depuis 30 ans sont fréquentes malgré l'élévation du niveau de la mer. Il faut distinguer les marais maritimes deltaïques en voie de disparition et les marais estuariens en voie d'expansion. Paskoff (2001) rassemble des exemples d'expansion ou la translation de nombreux marais maritimes corrélatifs de l'élévation du niveau marin. Il décrit les processus de sédimentation pélagique verticale liés à l'augmentation de l'énergie cinétique des courants ; « *les côtes des régions tropicales pluvieuses sont actuellement abondamment alimentées en sédiments fins, limons et argiles, qui nourrissent les vasières ; cela, à la fois pour des raisons naturelles – régimes pluviométriques, en particulier ceux à contrastes saisonniers, prédominance de l'altération chimique des roches- et humaines – aggravation de l'érosion des sols* » ; plus loin, le même auteur ajoute : « *l'élévation attendue du niveau de la mer ne devrait pas menacer véritablement les vasières à mangrove du monde en dépit de certaines prédictions pessimistes qui ont fait depuis l'objet de discussions* » (Paskoff, 2001). Enfin, relativisant la question de l'élévation du niveau océanique dans la perspective du changement climatique planétaire, Paskoff (2001) montre que ce changement climatique « *devrait aussi avoir d'autres implications, comme les modifications dans le régime des pluies, donc des apports en eau douce, ou dans celui des températures et, par voie de conséquence, sur la cyclogénèse, autant de facteurs qui pourraient avoir des impacts sur les forêts de palétuviers* ». Paskoff précise que le plus grand danger pour les mangroves n'est pas cette élévation du niveau océanique mais leur démantèlement par l'homme ; or, Andrieu (2008) a montré depuis que, si la mangrove mondiale est globalement menacée, celle d'Afrique de l'Ouest se porte plutôt bien ; elle est en nette progression ces dernières années, ce qu'il a confirmé récemment (Andrieu, 2018). La mangrove d'Afrique de l'Ouest a à peu près retrouvé son extension d'avant la grande sécheresse.

L'érosion côtière



Figure 2 : déchaussement de filaos sur une plage de l'île Maurice, signe d'érosion côtière

L'érosion du trait de côte est l'un des aléas qui s'exerce sur les zones littorales. Elle induit trois types de risques : (1) la perte de terrain, (2) la fragilisation par érosion de défenses côtières naturelles (ex. dunes) ou artificielles (ex. digues en terre) pouvant parfois entraîner une rupture,

(3) la sape d'ouvrages de protection par affouillement. Ces risques seront potentiellement aggravés par l'élévation du niveau marin.

Cette érosion est la conséquence la plus visible et la plus généralisée de l'élévation du niveau de la mer ; c'est elle qui inquiète le plus les habitants des zones littorales. En Afrique, on l'observe aussi bien sur les côtes de l'océan Indien (figures 2 et 3) que celle du Golfe de Guinée (figure 4). On verra ci-dessous ce qu'il en est en Afrique de l'Ouest.



Figure 3 : campement touristique menacé par l'érosion côtière à Kipini (Kenya)
(courtoisie de Olivier Hamerlynck et Stéphanie Duvail)

La figure 4 montre l'érosion littorale au Togo où elle est plus ancienne et en grande partie liée à un déficit sédimentaire dû au stockage de sédiments par le barrage d'Akosombo sur la Volta, le plus grand lac artificiel du Monde (162 km^3 d'eau, soit un tout petit peu plus que celui d'Assouan en Egypte).



Figure 4 : équipements touristiques en passe d'être détruits à Lomé (Togo)

Les phénomènes de salinisation

Les phénomènes de salinisation sont susceptibles d'affecter les estuaires qui correspondent à des embouchures de fleuves dans lesquelles la marée pénètre amplement (Paskoff, 1998a et Paskoff, 1998b). (voir les encarts sur les estuaires inverses et sur la salinisation des nappes littorales, en fin de chapitre)

Les aquifères côtiers constituent une ressource en eau importante pour des usages domestiques, agricoles et industriels dans de nombreuses régions du monde (Ledoux et al. 1990). Des modifications de l'hydrologie et de l'hydrogéologie sur le littoral résultent des déplacements de l'interface eau douce eau salée (Kim *et al.*, 2009). Les aquifères côtiers sont plus ou moins sensibles aux intrusions salines sous conditions naturelles et/ou sous influence anthropique (exploitation par pompage), en fonction de leur structure, de leur hétérogénéité et de leur relation avec les eaux de surface (au niveau des estuaires). Ils sont caractérisés par une interface entre des eaux souterraines de deux types (Planton *et al.*, 2012). L'eau douce des aquifères provenant de l'infiltration des précipitations, des cours d'eau (ruissellement) au niveau de la surface continentale. L'eau salée qui imprègne les terrains au voisinage des côtes ou qui pénètre les cours d'eau au niveau des estuaires et peut ainsi donner lieu à la salinisation des eaux souterraines en relation hydraulique avec les eaux de surface (Planton *et al.*, 2012).

Une intrusion saline menace la quantité d'eau douce disponible. Une augmentation du niveau marin induite par un changement climatique aura comme conséquence la migration de l'interface eau douce/eau salée vers le continent, i.e. de l'intrusion saline (Werner et Simmons, 2009). Ainsi, une bonne compréhension d'une intrusion saline induite par une augmentation du niveau marin est essentielle pour la gestion des ressources des aquifères côtiers (Watson *et al.* 2010). L'intrusion d'eau salée a la forme d'un biseau plongeant vers l'intérieur des terres, appelé communément « biseau salé ». Le contact des eaux de densités différentes est régi par les lois d'équilibre hydrodynamique et par les phénomènes de diffusion qui s'inscrivent obligatoirement dans un contexte géomorphologique, lithologique et hydrogéologique propre à chaque région. (Planton *et al.*, 2012).

L'intrusion d'eau salée due aux inondations côtières est un des impacts les plus inquiétants. En effet, la salinisation des sols sera gênante pour de nombreuses cultures de base car elle perturbera les ressources agricoles de nombreux pays. Mais se trouvent menacés également les espèces d'eau douce qui sont une ressource pour l'alimentation des populations ; ainsi que l'eau d'irrigation, notamment dans des zones pauvres en ressources en eau comme les petites îles du pacifique (Planton *et al.*, 2012).

La réduction de volume des eaux douces souterraines

Deux masses d'eau souterraine entrent en contact dans l'espace littoral où l'eau douce de l'aquifère continental s'écoule sur l'eau salée immobile. Si le niveau de la mer s'élève, l'interface abrupt qui les sépare va se déplacer latéralement vers la terre et le niveau piézométrique sera rehaussé. Dans ce cas, la surface d'alimentation de la nappe phréatique d'eau douce par l'infiltration des pluies sera d'autant plus réduite que la pente de la topographie côtière est faible (Paskoff 1998b) (voir aussi figure 5 ci-dessous).

Sur les côtes alluviales basses, comme en Camargue, l'inondation permanente par la mer de dépressions jusqu'alors seulement occupées par des eaux de pluie ou de ruissellement, va aussi avoir pour conséquence un morcellement des aquifères d'eau douce, donc une diminution de volume de la ressource qu'ils représentent. De telles manifestations s'ajouteront aux dommages que causent déjà à ces aquifères des prélèvements inconsidérés compte tenu de leur débit. En effet, des extractions abusives, en abaissant le niveau piézométrique, conduisent à une ascension de l'eau salée sous les puits, voire, lorsque cet abaissement descend au-dessous du

niveau de la mer, à une intrusion latérale massive d'eau salée qui conduit inéluctablement à une salinisation des sols (Paskoff 1998b). Quant à l'élévation du toit des nappes phréatiques, il augmentera les contraintes liées au drainage des terres littorales basses et planes.

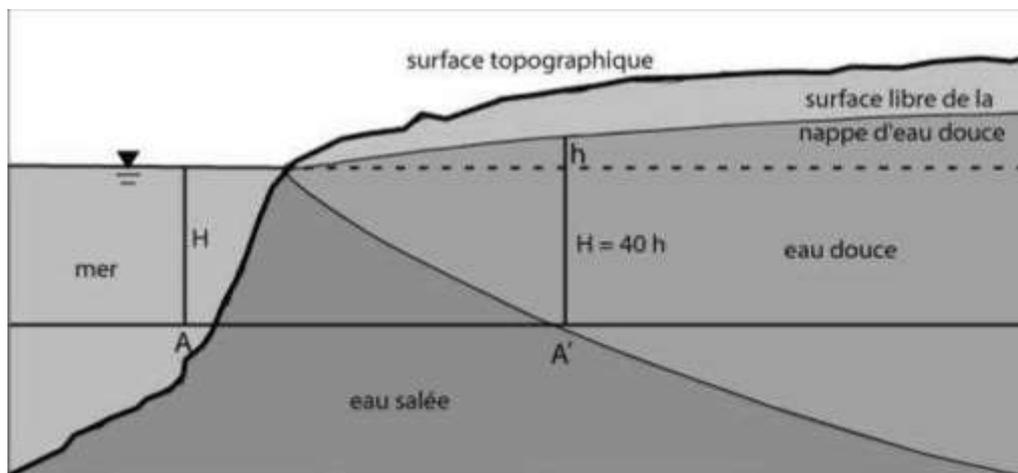


Figure 5 : Coupe schématique perpendiculaire au littoral selon Ghyben-Herzberg (extrait de Frissant *et al.*, 2005 .in Planton *et al.* 2012)

Un accroissement de la fréquence des surcotes

Les submersions temporaires, à la suite de la rupture de bourrelets dunaires ou de digues, d'espaces côtiers bas, occupés par de l'habitat ou exploités à des fins agricoles, risquent d'être plus nombreuses qu'aujourd'hui dans une conjoncture de réchauffement du climat et d'élévation concomitante du niveau de la mer. On a déjà dit que, sur les littoraux des régions tropicales frappées habituellement par des cyclones, ceux-ci se manifesteront probablement plus souvent et avec plus de force. Pour les latitudes tempérées, des modélisations font aussi apparaître des surcotes plus fréquentes liées aux ondes de tempêtes, événements dus à la conjonction d'une diminution notable de la pression atmosphérique et de vents violents accumulant de l'eau à la côte. L'élévation temporaire du niveau de la mer peut être encore accentuée par une situation de marée de vive eau et un effet de résonance lié à la configuration du lit marin (Paskoff 1998b).

Conclusion sur l'élévation du niveau océanique : une conséquence du réchauffement lié aux activités humaines

Il apparaît aujourd'hui que l'on a parfois eu tendance à exagérer ou à sous-estimer au contraire l'ampleur de l'élévation du niveau marin à venir et la magnitude de ses effets à attendre sur les littoraux. La dégradation des marais maritimes, la mort de récifs coralliens, l'érosion des plages, la salinisation des nappes phréatiques constituent des dégradations, le plus souvent irréversibles, de milieux côtiers dans lesquelles l'homme a presque toujours la plus grande part de responsabilité. Cela étant dit, elles pourront être encore aggravées si le niveau marin continue à s'élever et surtout si cette élévation s'accélère. Il faut s'attendre ici, dans les décennies à venir, non seulement à un recul significatif du trait de côte dans beaucoup de secteurs, mais aussi à une extension appréciable des terrains submergés de façon permanente et à un élargissement des phénomènes de salinisation des nappes d'eau souterraines et des sols (Paskoff 1998b).

Indispensable à la vie sur Terre, l'**effet de serre** est dû à la présence naturelle de certains gaz dans l'atmosphère terrestre. Depuis le XX^e siècle, il est accentué par des **émissions de gaz** supplémentaires, liées aux activités humaines telles que l'agriculture, l'usage de

combustibles fossiles et les rejets industriels. Selon une grande majorité de scientifiques, le surplus d'effet de serre dû aux activités humaines a joué un rôle déterminant dans le changement climatique des dernières décennies.

Le réchauffement observé depuis 1950 est "sans équivoque", précise le résumé à l'attention des décideurs, et le GIEC estime aujourd'hui qu'"il est **extrêmement probable** [c'est à dire avec une probabilité d'au moins 9,5 chances sur 10 pour que l'affirmation soit correcte] que l'influence humaine sur le climat a été la cause dominante du réchauffement observé depuis le milieu du vingtième siècle". Ce réchauffement est constaté à la lecture des données atmosphériques et océanographiques ainsi que dans les modifications du cycle global de l'eau, dans la réduction des couvertures neigeuses et glaciaires ou encore dans l'observation de certains événements climatiques extrêmes (5^{ème}, rapport du GIEC, septembre 2013).

Un point sur la situation du littoral ouest africain

Quelle est réellement l'évolution du littoral en Afrique de l'Ouest ? On peut, pour en avoir une idée, se référer à la thèse Ibrahima BN Faye soutenue à l'UBO en février 2010 « *Dynamique du trait de côte sur les littoraux sableux de la Mauritanie à la Guinée-Bissau (Afrique de l'Ouest) : Approches régionale et locale par photointerprétation, traitement d'images et analyse de cartes anciennes* ». Ci-dessous quelques passages notoires de cet important travail.

« S'appuyant sur les travaux de la Commission sur l'Environnement Côtier de l'Union Géographique Internationale, Bird (1985) estimait que le processus de recul du trait de côte affectait à l'époque plus de 70 % des plages de la planète. Plus récemment, Beer (1997) soulignait aussi que l'évolution des littoraux sableux est dominée généralement par une tendance régressive. Les études menées ces dernières années dans les différentes régions du monde montrent que la régression des côtes sableuses est un phénomène planétaire.

Les littoraux ouest-africains constitués en grande partie d'estuaires et de plages n'échappent pas à cette évolution régressive. L'érosion côtière est l'un des principaux problèmes environnementaux auxquels est confronté le littoral de la zone de l'Afrique de l'Ouest et du Centre (Faye, 2010). « Or en Afrique de l'Ouest comme sur la plupart des façades maritimes, les dernières décennies sont marquées par une croissance démographique et corrélativement d'une augmentation des activités économiques sur les zones côtières. En effet, toutes les grandes agglomérations ouest-africaines (Nouakchott, Saint-Louis, Dakar, Banjul, Bissau, Conakry, Freetown, Monrovia, etc.) sont localisées sur la côte, foyer privilégié d'immigration et de développement de l'économie maritime notamment dans les secteurs portuaires, industriels, touristiques, etc. » (Quensière *et al.*, 2006). Le littoral ouest-africain abrite également des sites d'intérêt patrimonial, des aires protégées reconnues mondialement telles que le banc d'Arguin, le parc national des oiseaux de Djoudj, le delta du Saloum, l'archipel des Bijagos, etc. que les changements littoraux pourraient affecter ». (Faye, 2010)

« L'avancée de la mer se traduit parfois par des phénomènes brutaux ayant un certain retentissement dans la presse sénégalaise par exemple comme ce fut le cas lors de la submersion du cimetière de Rufisque en juillet 2007 (Dia, 2007 ; Faye B.B., 2007). Ce fut le cas aussi des destructions d'infrastructures et d'habitats nécessitant la relocalisation des populations de Djiffère à la suite de la rupture de la flèche de Sangomar en 1987 (Lô, 1996).

« *L'importance socio-économique et écologique de la zone côtière d'Afrique occidentale en général et des littoraux sableux en particulier dans un contexte de crise environnementale justifie de mener une réflexion sur le fonctionnement, l'évolution ainsi que la gestion de l'utilisation des ressources de l'espace littoral. C'est dans cette optique qu'a été initié en 2001, le Programme Régional de Conservation des Zones Côtières et Marines en Afrique de l'Ouest (PRCM, www.prcmarine.org) dont la première phase concernant tous les pays côtiers situés*

de la Mauritanie à la Sierra Léone se déclinait en sept composantes : appui à la création et à la co-gestion des Aires Marines Protégées, espèces et habitats, gestion des pêches, tourisme durable, hydrocarbures et qualité des eaux, recherche, communication ». (Faye, 2010)

« Les taux d'érosion les plus fiables mis en évidence par ces études sont inférieurs ou égaux à -2,5 m/an. Les plus fortes vitesses de recul sont localisées aux environs de la Presqu'île du Cap Vert. Ainsi dans les secteurs de Yoff – Cambérène, elles varient de -1 à -1,8 m/an. L'autre secteur en forte érosion est la zone de Mbaou – Rufisque où les taux de régression oscillent entre -0,9 et -1,6 m/an. Par ailleurs, en dépit de la construction d'épis et de l'aménagement d'un cordon d'enrochement pour protéger Rufisque de l'avancée de la mer, certains quartiers riverains sont submergés lors de fortes houles et des grandes marées » (Faye, 2010).

« L'érosion côtière touche aussi sévèrement les plages très touristiques de la Somone à Saly qui perdent presque 1 m/an (C.S.E., 2004). Ces sites sont localisés à l'extrémité d'une petite baie dans laquelle se trouve Mbour où la ligne de rivage recule moins rapidement (-0,45 m/an). Le recul est également très faible pour les falaises et les plages adossées de Fann et du Cap de Naze. L'évolution du pied et du haut de falaise dans les secteurs de plages adossées résulte principalement des actions alternées ou simultanées de la mer qui attaque la base de la falaise et déblaie les éboulis ainsi que des pluies qui ravinent les horizons meubles des falaises et provoquent des mouvements de masses boueuses principalement sur les versants des falaises marneuses et argileuses (Elouard, 1980 ; Sall, 1971 ; 1982) ». (Faye, 2010)

« Sur la base de notre inventaire, les données satellitaires et cartographiques les plus pertinentes pour répondre à notre problématique à l'échelle régionale ont été sélectionnées et traitées. Néanmoins la résolution spatiale des images satellitaires Landsat disponibles (30 m pour les images TM, ETM+ et 79 m pour les données MSS) limite l'analyse régionale de la cinématique littorale aux formes très mobiles comme les flèches, l'extrémité libre des cordons sableux et les îles sableuses associées aux systèmes estuariens du Sénégal à la Guinée-Bissau qui enregistrent des évolutions de plusieurs dizaines de mètres par an. Pour le suivi de ces formes, deux lignes de référence ont été sélectionnées selon les secteurs étudiés et la qualité des images : la ligne instantanée de rivage sur la Langue de Barbarie et la limite de végétation sur le haut de plage dans les zones estuariennes de Joal au Rio Cacine. L'extraction de ces indicateurs a été effectuée par équidensitométrie pour la ligne instantanée de rivage et par classification non dirigée avec la méthode ISODATA pour la limite de végétation. L'analyse des variations historiques de la position de ces deux lignes de référence durant les deux décennies couvertes par les images Landsat nous a permis de retracer l'évolution historique du trait de côte sur 142 km de plage, soit 7,5 % des 1892 km constituant le linéaire côtier sableux régional. Sur ces 142 km, 73,4 % sont en progradation et 26,6 % sont en érosion. Les segments de côte en érosion sont situés sur le front des cordons littoraux isolant des mangroves dans les estuaires sénégalais (Saloum, Casamance), bissauguinéens (Rio Cumbija et l'ouest de l'île d'Adonga), les racines des flèches de Varéla (Guinée-Bissau), du Cap Saint-Mary et la pointe de la flèche de Bald Cape (Gambie). Les vitesses moyennes d'érosion estimées dans ces régions sont de l'ordre de -16 à -24 m/an pour les flèches, -13 à -24 m/an pour les cordons littoraux et -47 m/an pour la façade occidentale de l'île d'Adonga. Les zones en progradation sont situées à la pointe des flèches, des cordons littoraux et autres îles sableuses sur les marges maritimes des estuaires du Sénégal (Langue de Barbarie, Joal, Saloum, Casamance), de la Gambie (Toll Point, Saniang Point, Kartung Point) et de la Guinée-Bissau (Cap Roxo, Rio Cacheu, ouest de l'île de Pexice, nord du Rio Cacine, flèche d'Acapa, la façade orientale de l'île d'Adonga) ».

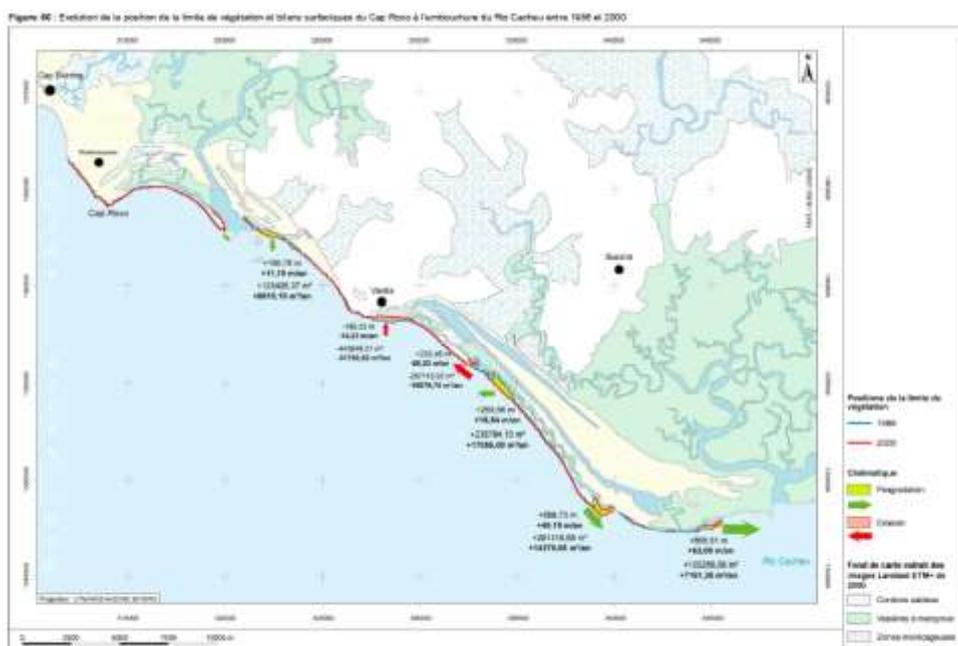


Figure 6. Evolution du trait de côte entre 1986 et 2000 entre rio Cacheu et Varela (Guinée Bissau) (Faye, 2010)

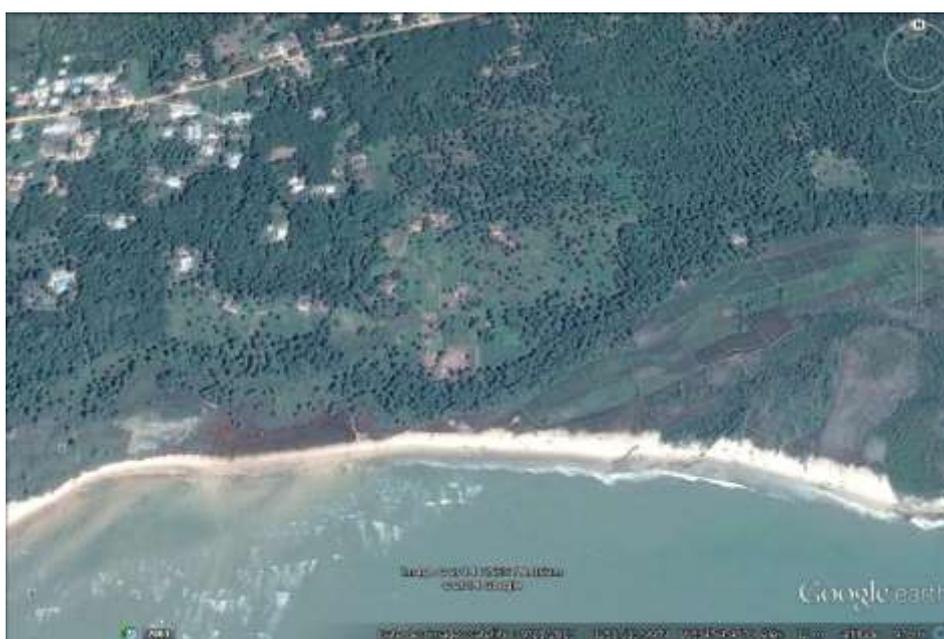


Figure 7. Rizières en bordure de l'océan à Varela Iale ; on note en noir les casiers abandonnés du fait de la salinisation des sols

« Les taux moyens de progression oscillent généralement entre +15 et +140 m/an et atteignent +551 m/an sur la Langue de Barbarie. ». (Faye, 2010). La figure 6 est extraite de la thèse de Faye (2010) et montre l'évolution du trait de côte de 1986 à 2000 sur un secteur de Guinée Bissau.

La figure 7 est un extrait de Google Earth de novembre 2013 montrant, dans la même région de Varela (Guinée Bissau) une grande proportion des rizières abandonnées, du fait de la salinisation des sols, due à la remontée du niveau océanique, mais aussi au défaut d'entretien des digues.

Les figures 8a à 8d montrent comment les équipements touristiques sont menacés sur tout le littoral sénégalais. Mais les situations humaines et sociales sont bien plus dramatiques quand ce sont les villages ou les établissements humains qui sont touchés, comme cela se voit de plus en plus sur le même littoral du Sénégal. Les figures 9a à 9d montrent des villages sénégalais partiellement ou totalement emportés ou endommagés par l'érosion littorale.



a



b



c



d

Figure 8. hébergements touristiques détruits ou menacés sur le littoral sénégalais ; a : Joal ; b : Palmarin ; c : Toubab Dialao ; d : Niafrang



a



b



c

d

Figure 9. villages touchés par l'érosion côtière : a : Doun Baba Dièye près de Saint Louis ; b : Yène sur Mer dans la rade de Dakar ; c : Djogué en Casamance ; d : un village touché par l'élévation du niveau de la mer : Etama en Casamance, à 50 km du littoral

Dans le Gandiolais, à quelques encablures de Saint Louis (embouchure du Sénégal), après le village de Keur Bernard, c'est le village de Doun Baba Dièye (figure 9a) qui a été complètement emporté en décembre 2012, quelques années après avoir été exposé directement à la houle suite à l'ouverture artificielle d'une brèche dans la Langue de Barbarie. A l'Est de la rade de Dakar, la petite ville de Yène sur Mer (figure 9b) est touchée par l'érosion de sa falaise constituée de conglomérats trop peu consolidés pour résister à la puissance croissante des vagues. Le village de Djogué (figure 9c) situé à l'embouchure du fleuve Casamance a été partiellement détruit par la même onde de tempête que celle qui a touché Gorée les 1^{er} et 2 juin 2014. Même à l'intérieur des terres, l'élévation du niveau de la mer rend le maintien de certains villages de mangrove problématique, obligeant les habitants à rehausser les terre-pleins sur lesquels on bâtit les habitations (figure 9d).

Des sites historiques sont touchés comme Gorée, qui est a priori bien accroché à son rocher, mais qui a subi quelques dégâts en début juin 2014 (chute d'un mur de l'école Mariama Ba), ou encore Carabane, où le front de fleuve est menacé, conduisant habitants et professionnels du tourisme à construire des murs de protection (figure 10). Au Nord de la Guinée Bissau, c'est un des lieux vénérés comme étant point de passage d'El Hadj Omar qui est à présent en encorbellement sur les flots (figure 11).

Les interventions humaines sont souvent incriminées comme la construction des barrages qui bloquent le transit sédimentaire alimentant en temps normal les dérives littorales ; l'érosion importante des littoraux du Togo et du Bénin depuis les années 1980 est comme on l'a vu plus haut partiellement imputé à la construction du barrage d'Akosombo. Mais parfois il s'agit d'actions répétitives ou de travaux de faible ampleur qui arrivent à perturber l'équilibre hydro-sédimentaire des zones côtières.

Au nord de la Casamance, c'est un vaste ensemble de mangroves et de rizières qui pourrait être menacé si une exploitation de zircon en projet (capitiaux australiens et chinois) se réalisait ; la dune de Niafrang (c'est le dernier village côtier au Nord avant la frontière gambienne) est convoitée pour son riche gisement de zircon (un métal rare et lourd utilisé en électronique, céramique et armement). Or, elle est déjà menacée par l'érosion côtière (un campement est en

partie emporté, en septembre 2015) ; mais surtout, elle protège une vaste étendue de rizières situées sur les vasières (donc à l'altitude de battement des marées) ainsi que des mangroves. Par ailleurs, si l'ensemble du projet est mené à exécution, cela fragilisera une vingtaine de kilomètres de dunes côtières, mettant sous la menace directe de l'érosion côtière, au bas mot, 25000 hectares de mangroves et de rizières.



Figure 10. En Casamance ; mur protégeant les maisons contre l'érosion côtière, Carabane, juillet 2014 (embouchure du fleuve Casamance, rive gauche)



Figure 11. Guinée Bissau : Varela : malgré un soubassement rocheux, le lieu saint consacré à El Hadj Omar est menacé par l'érosion côtière (mai 2014)

Ainsi, le prélèvement de sable sur l'estran, rigoureusement interdit mais régulièrement pratiqué, contribue à aggraver l'action des éléments naturels (figure 12).



Figure 12 : en Casamance août 2012 Cap Skirring : si en plus, on aide l'érosion à emporter le sable.....

Dans la mangrove du Mof Evi, à une quarantaine de kilomètres du littoral casamançais, c'est la construction d'une série de ponts mal calibrés qui est en train de faire périr mangroves et rizières par sur salure de l'eau de mer, piégée en amont des ponts (figures 13 et 14).



Figure 13 : à gauche un des trois ponts construits sur la piste entre Etama et Bandial (Basse Casamance) ; le bolon a cinq ou six mètres de profondeur ; or la semelle du pont émerge la plupart du temps, laissant passer de très faibles volumes de marée ; à droite : la mangrove morte en « amont » des ponts



Figure 14 : extrait d'une image de Google Earth montrant les secteurs où mangrove et rizières sont en train de dépérir, la marée ne pouvant plus circuler en volume suffisant sous les ponts sous lesquels le volume transitant aux marées hautes est extrêmement réduit, la profondeur de l'eau passant de 5 à 6 mètres de part et d'autres à moins de 20 cm sous le pont (voir figure 13 gauche).

Un cas d'école : la brèche de la Langue de Barbarie...

Mais l'exemple le plus cité en Afrique de l'ouest littorale d'une action anthropique ayant eu des conséquences incalculables est la brèche de la Langue de Barbarie. La langue de Barbarie est une bande de sable de 400 m de large, sur 35 km de long au Sud de la ville de Saint-Louis : elle constitue un parc national et est classée au patrimoine mondial de l'Unesco.

Son existence est aujourd'hui menacée. La ville de Saint Louis a été inondée durant l'hivernage 2003 par des lâchers « normaux » du barrage de Diama, mais organisés lors d'une marée de fort coefficient. L'OMVS (Organisation pour la Mise en Valeur du bassin du Sénégal) a prévenu les autorités que le niveau de la crue annuelle attendue pour fin octobre serait bien plus élevé. Aussi, les plus hautes autorités de l'Etat sénégalais ont décidé d'ouvrir un « canal de délestage » pour faciliter l'écoulement du fleuve vers la mer, à 7 km au sud de la ville. De 4 mètres de large au moment de l'ouverture, le canal a atteint 250 mètres de large, 3 à 4 jours après le creusement, puis 800 mètres au mois d'avril 2004 et 5 km en mars 2015 (figure 15) et 6 km en 2018. L'érosion est aujourd'hui très importante dans la partie sud de la partie nouvellement exposée à la houle, entraînant la disparition des filaos et des dunes.

La langue de Barbarie est elle-même bien sûr très menacée ; au sud de la brèche, la situation est sévère : des points de faiblesse risquent à tout moment de craquer devant une onde de tempête ou une forte houle, entraînant rapidement une communication avec la brèche existante. Elle est probablement condamnée à terme. Au nord, par contre, on assiste peut être à une stabilisation de la situation, avec une flèche en progradation du fait qu'elle est alimentée par la dérive littorale venant du nord

Autrefois simple rive gauche du fleuve Sénégal, Le Gandiolais est à présent exposé directement aux houles et courants de l'Atlantique. On y observe deux évolutions inquiétantes :

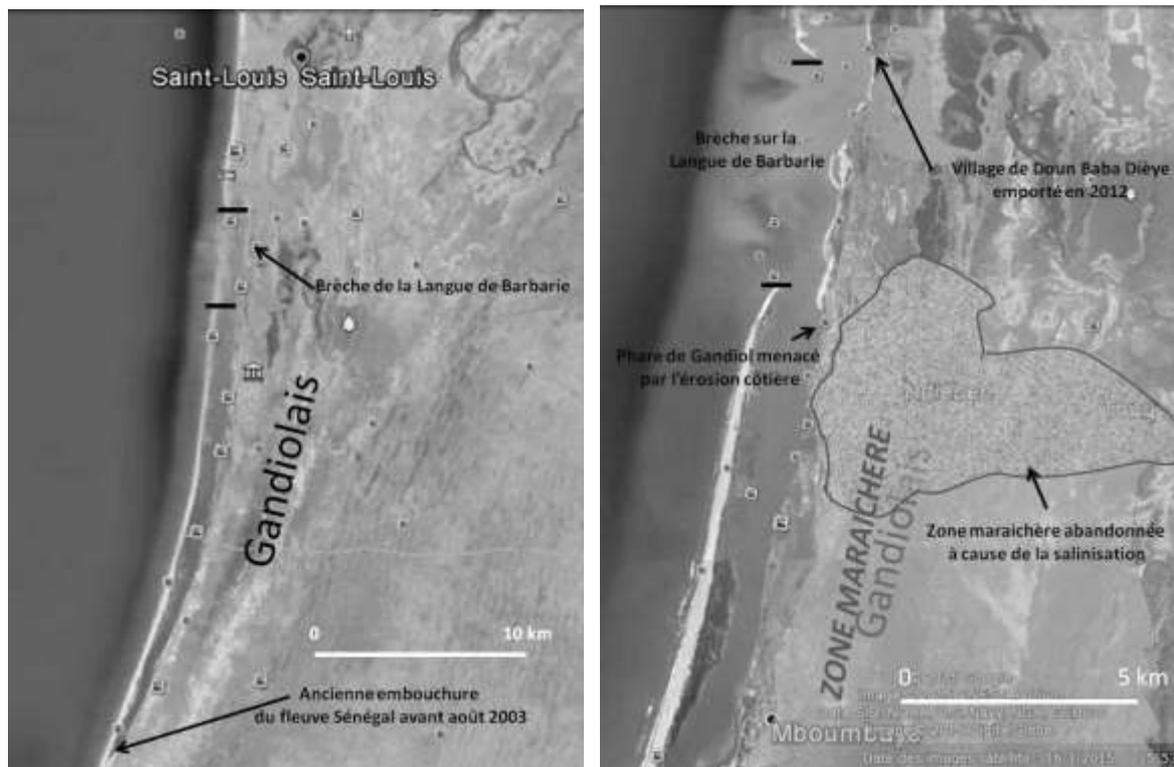


Figure 15 : situation de la brèche de la Langue de Barbarie en mars 2015. A gauche, plan d'ensemble montrant l'ancien cours du fleuve entre Saint Louis et son embouchure 35 km en aval. A droite, zoom sur le Gandiolais, dont la partie nord est en face de la brèche, et dont le littoral est désormais exposé à la pleine mer (cartes réalisées sur images Google Earth).

- une érosion côtière très forte ces dernières années. Le littoral est très attaqué. A présent que la brèche s'ouvre chaque fois plus vers le sud, et en plus des villages emportés (voir figure 9a et localisation figure 15), c'est aujourd'hui la région de Gandiol qui est menacée ; ainsi le phare et le village de Pilote Barre étaient fortement menacés en fin 2015 (figure 16, photo du haut) ; une opération de recharge en sable menée début 2016 semble avoir sauvé le site (photo du bas, figure 16).
- Il s'y ajoute la salinisation inquiétante de la nappe phréatique, à présent exposée depuis 2003, au biseau salé du fait de son contact direct avec l'océan. Cela a entraîné le déclin de bon nombre de cultures. En effet, le Gandiolais s'est spécialisé dans l'horticulture depuis quelques décennies, une activité extrêmement intense et demandeuse en main d'œuvre, qui permet d'utiliser au mieux des terroirs fragiles et autrefois bien pauvres. Cette activité a donné un coup de fouet à cette région. Mais l'ouverture de la brèche a peu à peu stérilisé la zone nord de ce périmètre maraîcher (figure 15) (Niang, 2017).

Cette situation est d'autant plus regrettable que le périmètre, situé au nord des Niayes, est un exemple réussi de l'intensification souhaitée des activités rurales en zone sahélienne ; il répond de plus à une très forte demande du marché sénégalais en légumes, en particulier l'oignon qui est importé par dizaines de milliers de tonnes chaque année.



Figure 16 : mur de protection du phare de Gandiol, au village de Pilote Barre, attaqué par la houle (mars 2015) : les filaos en arrière du mur sont déjà en grande partie déchaussés ; des travaux de remblaiement effectués par la Direction de l'Environnement du Sénégal ont heureusement, début 2016, permis de protéger ce site et le village ; photo du bas prise en mai 2016

Ce périmètre utilise des sols sableux (on est sur des dunes) très pauvres, et deux « intrants » parfaitement naturels : l'eau de la nappe, peu profonde (2-5 m), dont la salinité est suffisamment faible pour permettre ces cultures, et le fumier de mouton, collecté à l'échelle régionale et jusque Touba à plus de 80 km à l'intérieur des terres, et qui fait l'objet d'un commerce lucratif. Là où l'eau était traditionnellement la plus salée, près du fleuve (estuaire salé l'essentiel de l'année), on pratiquait exclusivement la culture de l'oignon. Là où la salinité est la plus basse

(vers le sud), d'autres spéculations sont possibles telles la carotte, le navet et la tomate, entre autres.



Figure 17. L'effet de la langue salée : à gauche, anciens champs abandonnés du fait de la salinisation à Keur Dièye au nord du Gandiolais ; à droite : Champ de carottes entre Gabar et Potou, dans le sud du Gandiolais, zone non touchée par salinisation

Le grand nombre de puits (figure 17) permet une culture qui relève d'un système de type oasien avec l'eau collectée dans le puits directement portée par arrosoir dans la micro parcelle (moins de 1m²) ; le fumier également est disposé dans les planches, enrichissant un sol squelettique. L'avantage du sol sableux est ici évident : aucun risque d'accumulation du sel du fait d'un très bon drainage. Par contre, ces dernières années, la multiplication des moto-pompes menace directement les nappes, en quantité et aussi en qualité car l'appel au vide pourrait faire pénétrer le coin salé ; de plus l'usage de pesticides de plus en plus intensif et incontrôlé menace fortement la qualité de l'eau, très utilisée pour les besoins domestiques.

Une activité cyclonique nouvelle

Des cyclones se produisent à présent de plus en plus près des côtes africaines. Pour la première fois les 29 et 30 août 2015, un cyclone, le cyclone Fred s'est développé dès l'arrivée de la ligne de grains sur l'Atlantique (figure 18) ; cela a provoqué de fortes tempêtes au large du Sénégal et de la Guinée Bissau ; la nuit du 29 au 30 août, une onde d'eau de mer s'est engouffrée dans un bolong et a submergé la partie la plus basse de sa vallée dans les rizières de Cabrousse, à la frontière de la Guinée Bissau (figures 19 et 20).



Figure 18 : cyclone des 29-30 août 2015 ; situation le 30/8 à 8:00 TU : on voit bien le vortex remontant Sud-Nord le long du littoral bissau-guinéen (source : EUMETSAT)

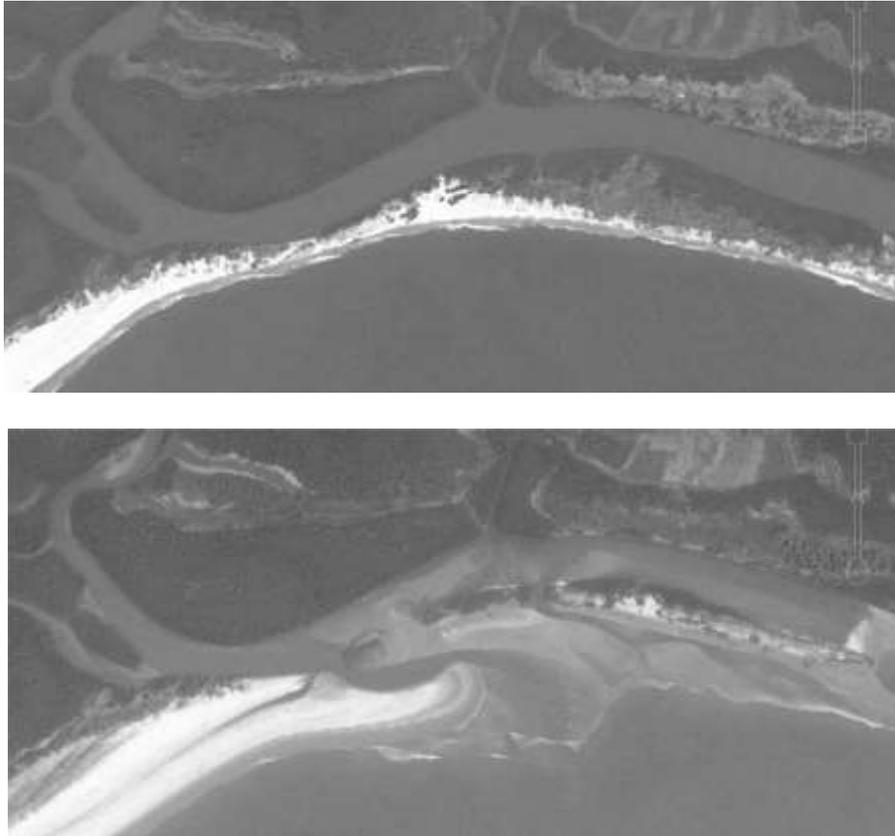


Figure 19 : Village et rizières de Cabrouse : zone submergée le 30 août 2015 (taille de l'image : 5 km d'ouest en est, 2.5 km du nord au sud)



Figures 20a et 20 b : les rizières de Cabrousse submergées, brûlées par le sel, 15 jours après la tempête.

Cette tempête a déplacé de plusieurs centaines de mètres l'embouchure du bolong débauchant dans la baie située au sud de Cabrousse en territoire bissau-guinéen. Les images fournies par Google Earth permettent de mesurer l'impact de cette tempête sur le littoral (figure 21).



Figures 21a et 21 b : le littoral au sud de Cabrousse, avant (janvier 2015) et après (janvier 2016) la tempête de fin août 2015 (Google Earth). (Taille de l'image : 1.5 km d'est en ouest, 600 m du nord au sud)

Conclusion

Ce sont des images d'équipements touristiques emportés par les flots que l'on médiatise le plus, mais ce sont bien sûr les populations locales, bien plus que les vacanciers, qui sont touchées au premier chef et constituent les premières victimes des dérèglements climatiques ; les Maldives et certains atolls du pacifique sont menacés dès aujourd'hui, ainsi que l'essentiel du Bangladesh ou certains littoraux d'Europe (Pays Bas, Camargue..)

L'Afrique de l'Ouest est caractérisée par l'intrusion du fait littoral jusque très loin à l'intérieur des terres (plusieurs centaines de kilomètres en Casamance ou en Gambie par ex). Outre l'érosion côtière, on observe de plus en plus une salinisation des sols et des eaux des zones littorales, qui compromet l'avenir d'activités économiques intensives (riziculture, pêcheries, aquaculture, activités de transformation de produits de la pêche, tourisme). Si la cyclogénèse se

développe plus vite sur l'Atlantique Est dès l'arrivée des lignes de grains sur l'océan, il faut prévoir un risque accru de submersions des zones littorales ouest-africaines.

La recherche doit se pencher sur les moyens d'améliorer la résilience des milieux et des sociétés des régions littorales, souvent les plus peuplées de la planète.

ENCART ESTUAIRES INVERSES

Les grands fleuves ouest-africains ont de grands estuaires et deltas donnant au littoral son aspect festonné et l'alimentant d'appréciables apports en eaux douces et en sédiments. Leurs écoulements, issus en grande partie des montagnes de la zone géoclimatique dite « guinéenne », ont été très influencés dans les cent dernières années par les périodes de pluviométrie excédentaires (1950-1967) ou déficitaires (1968-1998). Mais ils constituent des organismes pérennes qui ont un rôle hydrographique comme socio-économique primordial dans la sous-région. Les cours d'eau purement soudaniens ont un comportement très différent. Ils sont indigents et apportent l'essentiel du temps des volumes d'eau douce très faibles à leur estuaire respectif. Parmi eux, le Saloum et la Casamance ont été anciennement distingués comme des estuaires « inverses » car la salinité y augmente, l'essentiel de l'année, de l'aval vers l'amont, contrairement aux cours d'eau principaux ou littoraux. Par ailleurs, ces cours d'eau ont été très affectés par la grande sécheresse ; ils sont marqués par une réduction des réserves en eau de leur bassin et des apports d'eau continentaux. Le fonctionnement « inverse » de ces estuaires a été exacerbé durant cette période, puisqu'on a observé, plusieurs années de suite, le tarissement des rivières, la sévérité et la précocité des étiages ce qui est propice à l'intrusion profonde des eaux marines. Pagès et Citeau (1990) montrent dans leur étude sur le Saloum que cet estuaire a toujours eu un fonctionnement inverse ; c'est le cas aussi de la Casamance, même si les apports d'eau douce permanents hors période de sécheresse prononcée, font que le point de salinité maximale est à 10-20 km en aval du fond de l'estuaire en fin de saison sèche, et se déplace de 25 à 50 km en aval en fin de saison des pluies (ainsi que sur son principal affluent le Soungrougrou).

La salinité est mesurée depuis juin 2016 sur une dizaine de points de ces estuaires, deux fois par an, à la fin de la saison sèche et à la fin de la saison des pluies, afin d'en comprendre le fonctionnement et l'évolution (figure 22). Les mesures sont effectuées au réfractomètre, et quand c'est possible, confirmées par des mesures au conductimètre électrique.

Les mesures effectuées sur deux années complètes permettent de suivre les causes de dilution, avec une différence entre la Casamance, où un écoulement d'eau douce perdure presque toute l'année, et le Saloum où les écoulements sont plus que sporadiques, le fleuve ne coulant que quelques jours par an. Il est confirmé ce que décrivent les sédimentologues et spécialistes de la mangrove depuis des décennies : l'élévation du niveau de la mer et tout ce qui facilite l'entrée de l'eau de mer dans les estuaires et les « bolons » entraîne une diminution relative de la salinité dans leurs eaux, entraînant comme conséquence une reconquête très rapide de la mangrove sur les secteurs hypersalins où elle avait été détruite au cœur de la sécheresse des années 1968-1998. Le caractère inverse perdure toute l'année, même si durant quelques jours dans le Saloum, durant deux ou trois mois en Casamance, l'eau douce repousse de quelques kilomètres ou dizaines de kilomètres le point de salure maximale des estuaires.

Le fonctionnement des estuaires inverses est connu depuis les mesures réalisées par l'Orstom dans les années 1960 (Marius, 1985 ; Barousseau et al., 1986 ; Pagès et Citeau, 1990, Diop, 1990). Les mesures récentes permettent de constater que le fonctionnement est le même pour les années récentes que avant la période de déficit pluviométrique. La phase de sécheresse avait exacerbé ce processus du fait de la disparition totale (Saloum) ou presque totale (Casamance) des écoulements d'eau douce. Depuis 1999 et le retour aux valeurs pluviométriques moyennes, l'augmentation progressive des apports d'eau douce ne suffit pas à compenser le caractère inverse de ces deux grands estuaires soudaniens. Elle se traduit par un déplacement, en fin de saison des pluies, de quelques dizaines de kilomètres vers l'aval du point de salinité maximale, par rapport à la fin de saison sèche où il se situe complètement à l'amont ; cela corrobore les mesures et observations antérieures.

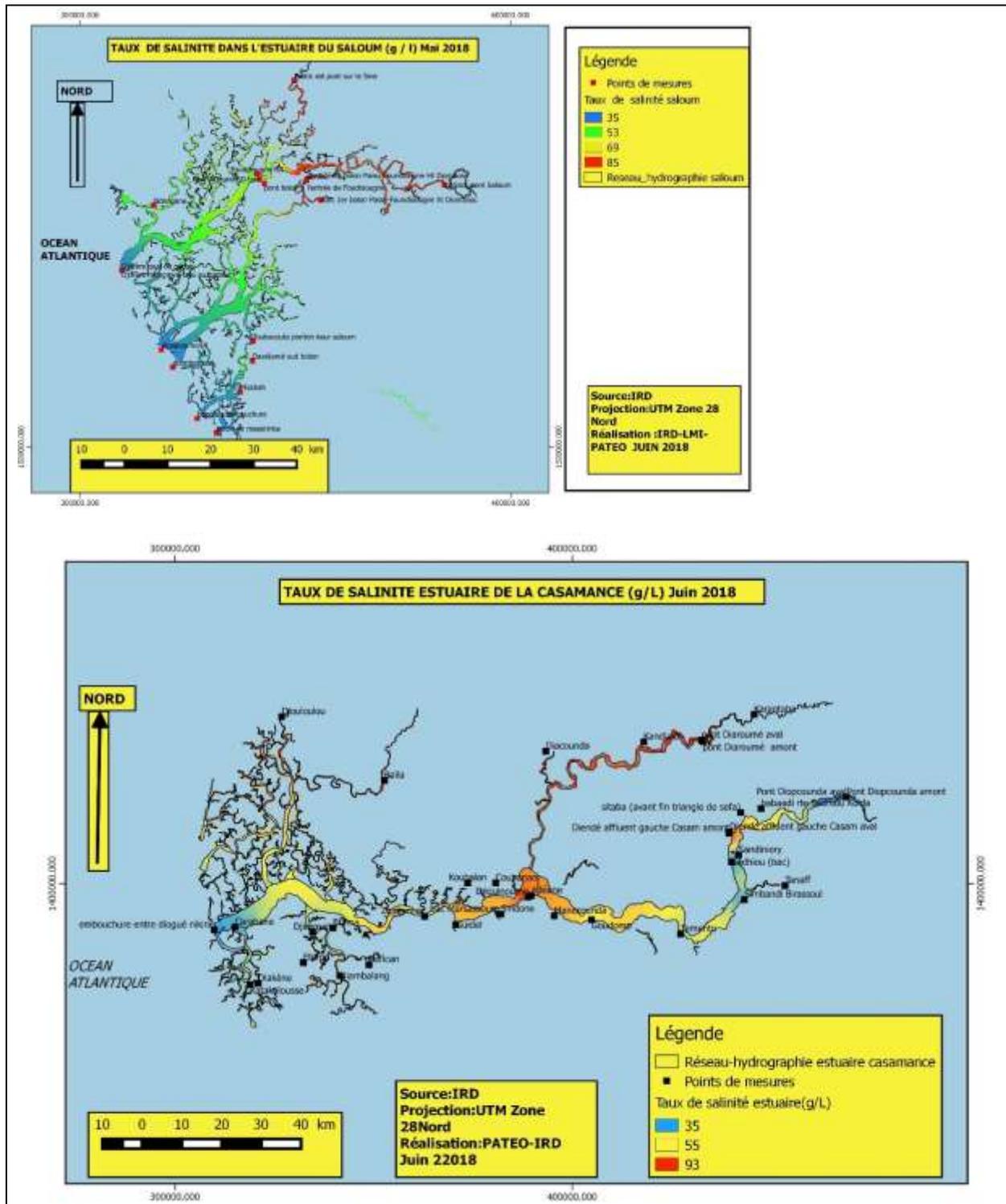


Figure 22 : 22a : salinité mesurée dans les estuaires du Saloum (en haut) et 22b salinité mesurée de la Casamance (en bas) mai et juin 2018

Tableau 1 : Salinité mesurée dans les estuaires du Saloum et de la Casamance en juin (fin de saison sèche) et en décembre (fin de saison des pluies) 2017 (*en italique ; nom des cours d'eau et affluents*)

SALOUM 2017	Distance de l'océan km	salinité juin ‰	Salinité dec ‰	CASAMANCE 2017	Distance de l'océan km	Salinité juin ‰	salinité dec ‰
Djifère Mer	0	37	36	Niikine	0	37	35
Djifère Saloum	2	42	42	Karabane	5	41	36
Foundiougne	47	60	48	Ziguinchor	71	51	30
Kaolack	120	99	85	Adeane (conf)	102	52	32
<i>Bolon de Djilor</i>				<i>Soungrougrou</i>			
Ndangane	25	51	52	Marsassoum	122	65	44
<i>Sine</i>				Kandialo	159	75	58
Fatick	82	+100	+100	Diaroumé	190	56	27
<i>Bandiala</i>				<i>Casamance</i>			
Missirah	15	44	35	Goudomp	120	55	30
Toubacouta	28	45	35	Temento	147	43	19
<i>Diomboss</i>				Sedhiou	178	35	10
Sokone	48	62	40	Karantaba	197	30	10
Ht Diomboss	70	+100	90	Diopcounda	225	21	5

ENCART SALINISATION DES NAPPES LITTORALES

Les «Rivières du Sud» sont des deltas et estuaires profonds, occupés majoritairement par des mangroves, des rizières et des terrains nus souvent acides ou salés appelés localement des «tannes». Les populations des îles et de ces zones côtières très plates y trouvent en général de l'eau douce à faible profondeur ; mais ces ressources sont mal connues et fragiles, facilement soumises à la salinisation, du fait de la faible altitude. Il est donc important de connaître le fonctionnement de ces nappes, afin de pouvoir déterminer l'impact du changement climatique et des activités anthropiques sur leur qualité et leur disponibilité. Il est primordial de veiller à ce que l'élévation du niveau océanique, les prélèvements des activités touristiques, les périmètres irrigués, même de petite taille, ne menacent pas leur pérennité. On retrouve la même problématique dans le Gandiolais (partie du delta du Sénégal), qui souffre d'une salinisation liée aux politiques publiques (Niang, 2017 ; Senghor *et al.*, 2017).

Les trois grandes embouchures du Sénégal, plus celle de la Gambie, constituent un ensemble important de zones amphibies qui fait de la Sénégalie un pays sahélien dans lequel la terre et l'eau sont intimement liées ; il s'agit essentiellement d'eaux salées, mais même les îles les plus petites, les cordons de sables les plus étroits, disposent de lentilles d'eau douce ; leur inventaire est un travail de longue haleine tant le tracé du littoral est festonné et mouvant. Les deux estuaires complètement sénégalais (Saloum et Casamance) sont, de plus, des estuaires inverses : la salinité y augmente vers l'amont et l'intérieur du continent, contrairement aux estuaires «communs», signe d'une grande indigence des apports d'eau douce continentale.

Un inventaire de la qualité des eaux a été établi (Senghor, 2017) qui pourra dans de nombreux cas servir de point de départ dans les nombreux sites où celle-ci n'avait jamais été échantillonnée.

La salinité des eaux souterraines est fréquente et naturelle dans les zones littorales. Mais la présence d'habitats permanents témoigne de l'existence de lentilles d'eau douce même dans les îles de petite taille. On a assisté durant les années de sécheresse (1968-1998) à une raréfaction des eaux douces des zones littorales, du fait de l'entrée du coin salé dans les terres, facilité du fait du déficit d'eaux douces d'origine continentale. Depuis que la pluviométrie est revenue à son niveau moyen, la salinisation (figures) des nappes peut avoir deux causes principales :

1- une cause «naturelle», l'élévation du niveau océanique, qui accroît la pression de l'eau salée sur les nappes, permettant l'entrée du coin salé ;

2-les politiques publiques, qui encouragent l'installation d'équipements touristiques, miniers ou industriels hydro-voraces ; dans le delta du Sénégal, plus au Nord, la rupture de la Langue de Barbarie (delta du Sénégal, 2003) donne un exemple de conséquence néfaste d'une politique publique. Mais dans ce dernier cas, il est important de mettre en parallèle les dégâts causés par la salinisation de la nappe au maraîchage, avec les dégâts épargnés à la ville de Saint Louis lors de la crue de fin octobre 2003, le canal creusé ayant rapproché l'embouchure du fleuve d'une trentaine de kilomètres de la ville, abaissant ainsi la ligne d'eau de plusieurs dizaines de centimètres.

Le seul secteur côtier où la salinité pose un gros problème aux populations est celui du Nord Saloum, entre Joal et Ndangane (figures 23 et 24) ; c'est ce secteur qui est en cours de desserte en eau douce par le programme Notto-Diosmone-Palmarin visant à apporter l'eau potable des nappes du Cap Vert et des Niayes (à terme, celle du fleuve Sénégal) vers le bas Saloum et les îles du Saloum. Ailleurs, les villages ont conservé leurs lentilles d'eau douce, qui ne sont pas menacées tant qu'un facteur de surconsommation (hôtel, motopompe, etc) n'est pas installé (figure 25).

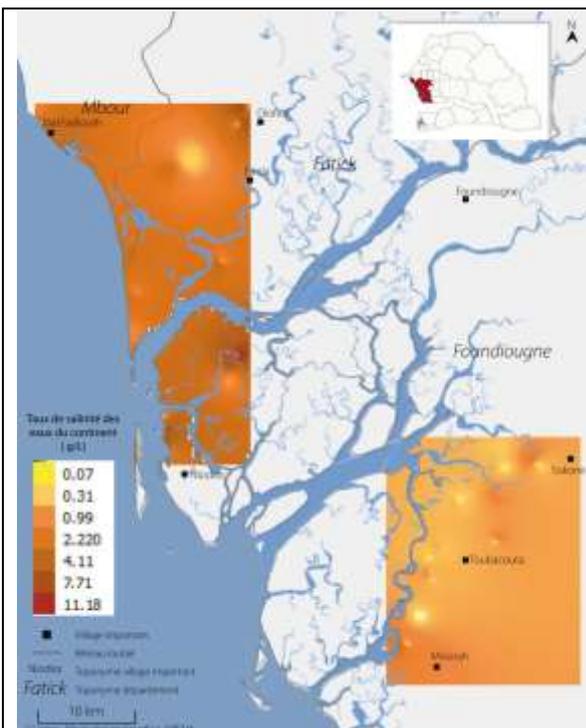


Figure 23 : salinité de la nappe dans le Saloum **Figure 24 : mesure de la profondeur d'un puits à Palmarin (Saloum)**

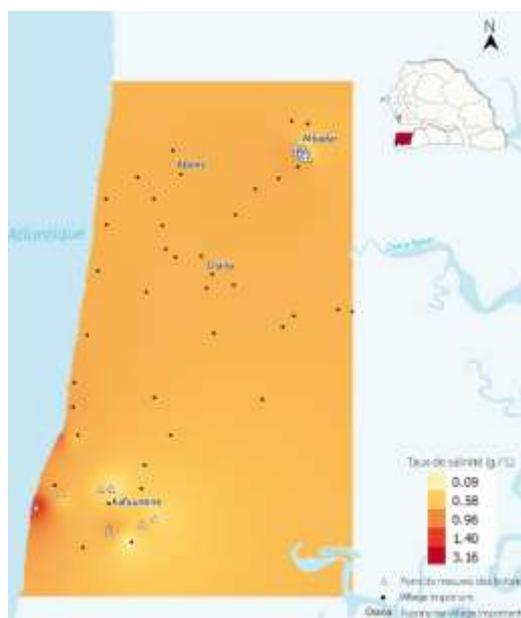


Figure 25 : salinité de la nappe phréatique en basse Casamance ; à gauche, au Nord, le secteur de Kafountine-Kataba 1 ; à droite, au Sud, la commune de Diembering

Par contre, plus à l'intérieur des terres, le sud de l'ex bassin arachidier sénégalais connaît un grave problème de salinité des eaux de la nappe du Continental Terminal. Sans que l'on sache pour l'heure s'il y a salinisation, ou simplement accroissement de la demande dans un secteur

d'eau salée, des recherches sont en cours pour étudier les origines de ce phénomène : salinité fossile, salinisation par le lessivage et infiltration sous les mares, de plus en plus nombreuses depuis le retour des pluies, ou pénétration du coin salé ? (figure 26).

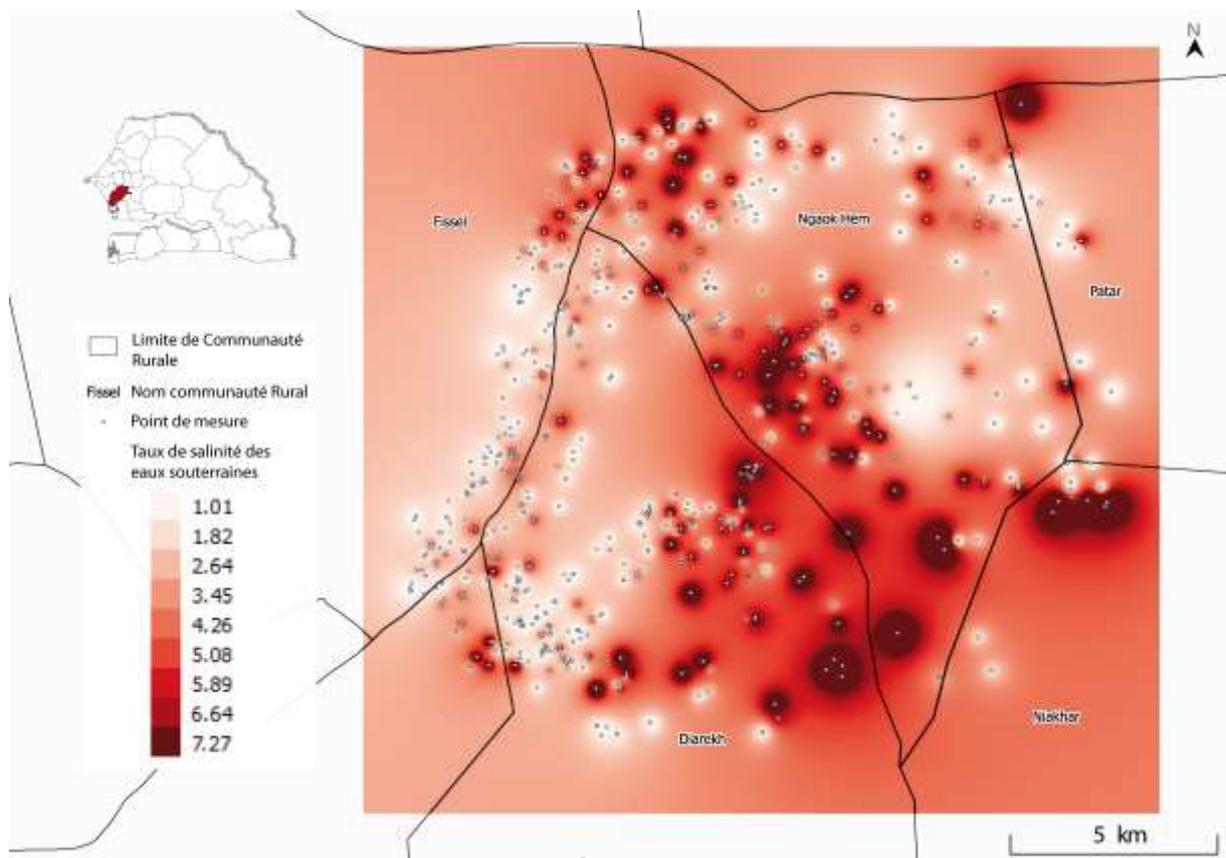


Figure 26 : salinité de la nappe du Continental Terminal dans le secteur de Niakhar

En résumé,

- Les littoraux ouest africains sont très riches au niveau écosystémique, et ont donné lieu en particulier dans les zones de mangrove à de dynamiques agrosystèmes, souvent en crise ces dernières décennies ; mais une grande partie de leur faiblesse provient du départ des jeunes et du manque de main d'œuvre conséquent.
- Les zones littorales sont par ailleurs touchées doublement par un effet du changement climatique : la remontée du niveau océanique provoque salinisation des basses terres (mangrove, rizières inondées) et érosion côtière
- Villages de pêcheurs et équipements touristiques, voire périmètres irrigés sont touchés par ce processus, qui parfois est exacerbé par des actions humaines imprudentes

Chapitre 10 : Changement climatique et prévisions :

Pourquoi il est urgent d'améliorer la résilience des agro-systèmes d'Afrique de l'Ouest

Madame Bâ (Erik Orsenna) raconte que les habitants de Kayes écoutent RFI chaque jour pour connaître la température à Djibouti qui a parfois le culot d'être plus chaude que Kayes...

Après avoir subi le plus fort signal de changement climatique jamais mesuré à la surface du globe, la sécheresse des années 1968-1995, l'Afrique de l'Ouest connaît un mieux pluviométrique qui a permis aux productions agricoles de retrouver des niveaux moyens. Mais les agro-systèmes ont beaucoup souffert et comme on l'a vu aux chapitres 4 et 5, les sols et les formations végétales ont été fortement dégradés. Ce qui s'est traduit par une forte diminution de la capacité des sols et des terroirs à retenir l'eau des pluies. La qualité des sols et des terroirs doit être rétablie de manière à rétablir une résilience des milieux face aux prochains chocs climatiques. En effet, d'ores et déjà, on sait que la hausse des températures est plus forte en Afrique de l'Ouest qu'ailleurs, et sa hausse continue devrait entraîner des conséquences sévères sur les rendements agricoles. Et il faudra aussi s'assurer que les agro-systèmes deviennent résilients à de nouveaux épisodes de sécheresse, toujours possibles.

1- Des effets ou des causes du changement climatiques ??

En plus de la pluviométrie traitée au chapitre 6, d'autres éléments caractérisent ce qu'on peut appeler globalement le changement climatique.

a- les vents

Il n'y a pas d'évolution remarquable des vents continentaux, en particulier de l'harmattan. Par contre, le programme AMMA avait montré une forte hausse des transports d'aérosols et cela a eu des conséquences sur l'insolation (voir ci-dessous).

Surtout, Ruë (2004) a mis en évidence une très nette augmentation, depuis le milieu du 20^{ème} siècle, de la fréquence des vents de Nord-Ouest de plus de 10 m/s, c'est-à-dire les vents qui sont à l'origine de la houle (utilisés ici comme proxy car il n'y a pas de « houlographe » au Sénégal, bien que certains soient en phase de test ou prévus). Cela ne manquera pas d'avoir des incidences sur la dynamique et la morphologie des littoraux et leur évolution.

Les figures 1 et 2 montrent la dynamique temporelle (figure 1) et spatiale (figure 2) de cette évolution dans l'Atlantique au large de l'Afrique de l'Ouest.

b- les aérosols et l'insolation

La figure 3 montre qu'en conséquence, on enregistre une très forte diminution de la puissance de l'insolation en Afrique de l'Ouest (ici la station de Kaolack). Celle-ci est 15% plus faible en ce début de 3^{ème} millénaire par rapport aux valeurs mesurées au début des années 1960. A son tour, cet élément pourrait être un moteur de changement climatique, en limitant le

réchauffement de la surface terrestre, au même titre que, au niveau planétaire, les grosses éruptions volcanique (Pinatubo, el Chinchon, etc) arrivent à « refroidir » le globe pendant quelques mois, voire quelques années. la figure 3 montre comment l'accroissement des aérosols a réduit la puissance du rayonnement solaire depuis le début de la sécheresse.

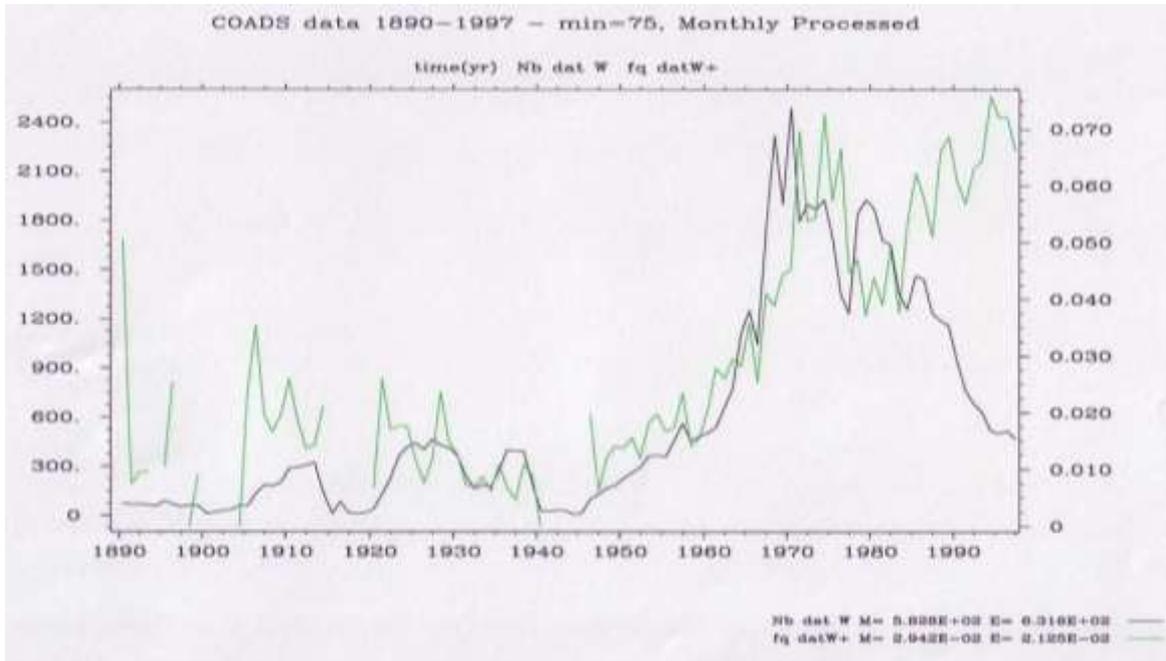


Figure 1. Evolution de la fréquence des vents de NO de plus de 10 m/s : la courbe verte montre cette fréquence, la courbe noire renseignant sur le nombre de stations documentées (Ruë 2004)

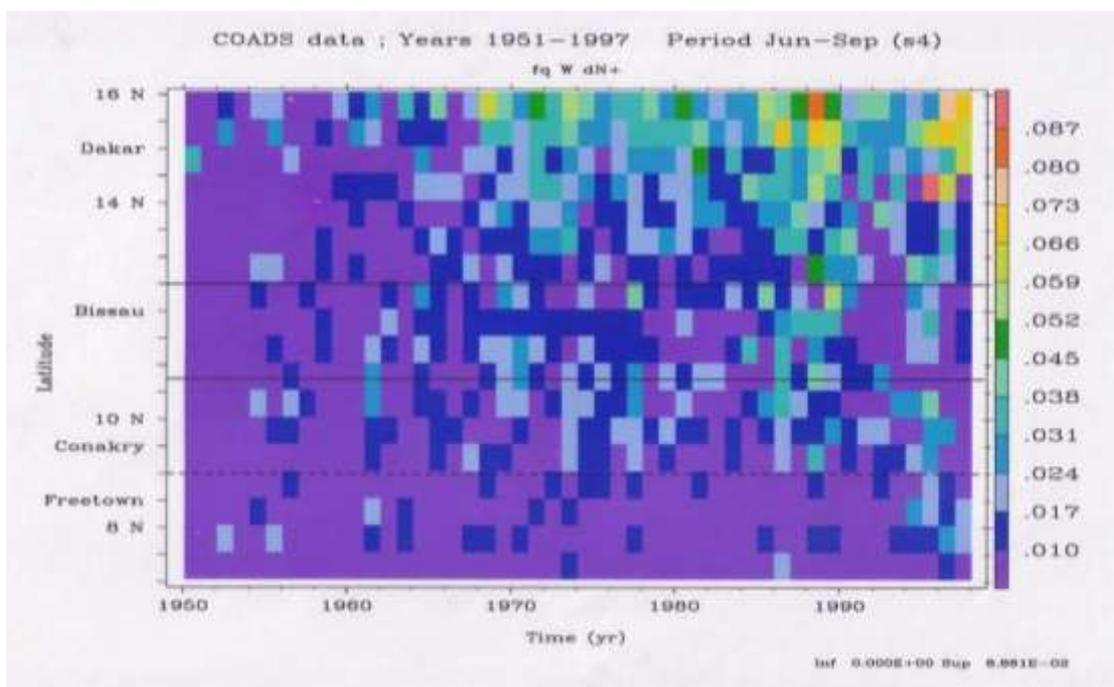


Figure 2. Evolution spatiale des vents de plus de 10 m/s pour la période 1951-1997 au large de l'Afrique de l'Ouest (latitude et grandes villes en ordonnée, le temps en abscisse).

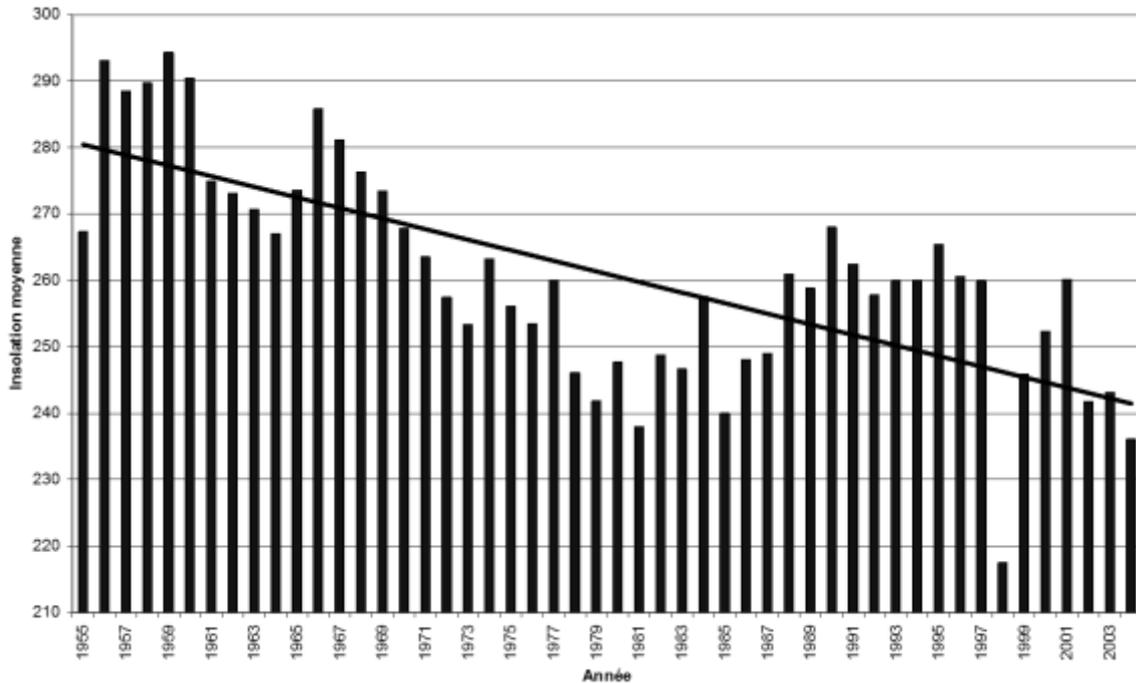


Figure 3 : Evolution de la tendance générale de l'insolation moyenne (en watts/h/m²) annuelle (Météo Kaolack, 2008 d'après Dacosta).

Dans le livre blanc AMMA, on trouve ces phrases écrites par Marticorena et Rajot (2003 ; livre blanc AMMA) : « Des variations à long terme ont pu également être mises en évidence : ainsi, une augmentation continue du contenu en poussières en zone sahélienne a été observée au cours des périodes de sécheresse qui se sont succédées des années 70 à 80. Alors que le taux de précipitations annuelles mesuré à la station de Gao (16°N, Niger) est passé d'environ 300-400 mm/an au début des années 50 à 100-200 mm/an dans les années 80, le nombre de jours de brume sèche comptabilisés sur la même période est passé de quelques jours par an à environ 300 jours/an (N'Tchayi et al., 1994). De la même façon, les concentrations en aérosols désertiques transportés sur l'Océan Atlantique et observées à La Barbade entre les années 60 et 80 ont augmenté d'environ un facteur 4 (Prospero and Nees, 1986) » ; « La coïncidence de ces deux augmentations (nombre de jours de brumes sèches au Sahel et concentrations en aérosol minéral transporté à grande distance) ont conduit à la conclusion que les émissions locales d'aérosols minéraux avaient considérablement augmenté durant cette période. Cette augmentation serait induite par la diminution du couvert végétal causée par la baisse des précipitations ». Ceci étant, des travaux plus récents, y compris de Prospero (2014), montrent que la corrélation inverse entre transports éoliens sur l'Atlantique et pluviométrie au Sahel n'existe plus depuis le début des années 2000.

Toutefois, comme le montre Dumay *et al* (2002) pour la ville de Nouakchott, même si les épisodes de forte érosion éolienne ont sensiblement baissé avec le retour des pluies, ils restent bien au-dessus de ce qui était observé avant la sécheresse, évoquant, comme pour la capacité de rétention en eau du sol, une dégradation durable des milieux (figure 4).

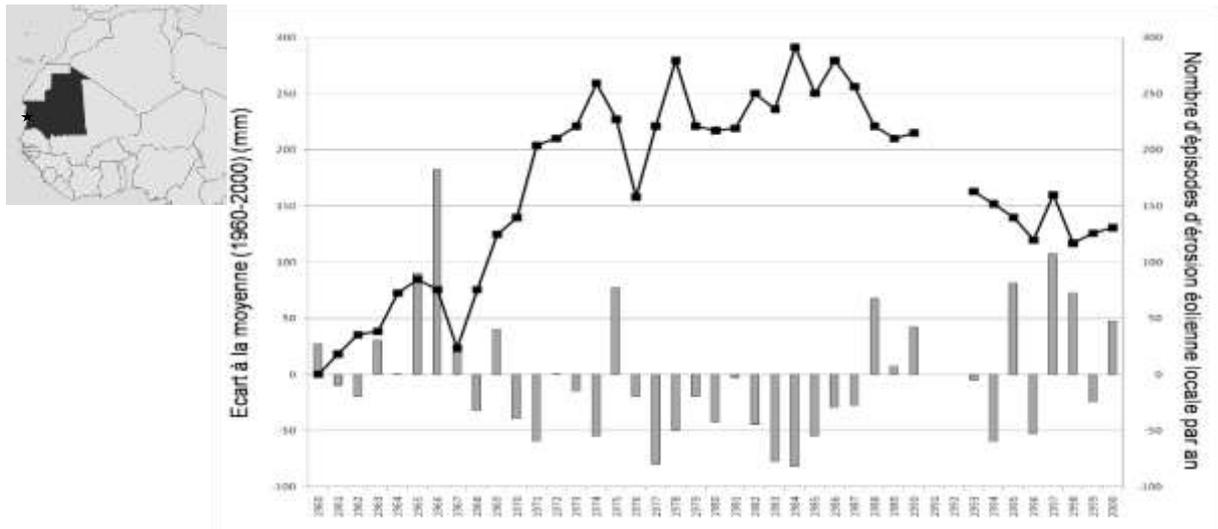


Figure 4 : Evolution des écarts à la moyenne des pluies (histogrammes) et des épisodes d'érosion éolienne à Nouakchott (Dumay et al., 2002)

c- les températures

Le réchauffement climatique est emblématique du changement climatique lui-même. C'est le changement le plus clair et le plus « global », puisqu'il est lié à un autre processus, global et néanmoins d'origine anthropique, à savoir la hausse des émissions de gaz à effet de serre (GES). L'effet de serre a toujours existé et c'est lui qui rend la planète vivable pour l'Humanité. Mais depuis le début de l'ère industrielle, la teneur en CO₂ et autres GES, a presque doublé, ce qui s'est traduit par une augmentation de 0,6°C de la température moyenne de la planète depuis 1950. Cette augmentation est de 1,2 °C, soit le double, pour l'Afrique de l'Ouest (Sultan *et al.*, 2014, Guichard *et al.*, 2015). Mais surtout, comme le font remarquer Guichard *et al.* (2013, 2015), cette augmentation est extrêmement marquée si l'on s'en tient aux températures minimales (+1,8°C), et encore plus forte si l'on retient l'augmentation des minima pour les mois de printemps (mars à juin). Ceux-ci ont augmenté de 3°C (figure 5), ce qui constitue encore un signal record du changement climatique à mettre sur le compte de l'Afrique de l'Ouest.

Cette augmentation des températures se ressent en zone rurale, comme cela a été observé durant l'hiver 2015-2016 où les températures ont été exceptionnellement élevées ; on a incriminé, dans cette absence d'hiver perçu (les températures de décembre à février sont normalement sensiblement plus basses que le reste de l'année) l'avènement d'une année « à El Niño », celles-ci se traduisant par une activité cyclonique particulièrement forte dans l'Atlantique Nord, qui semble s'être traduite par un retard de l'hiver de 2 ou 3 mois. En ville, la hausse de la chaleur perçue, en particulier à Dakar, est d'autant plus élevée que la ville s'urbanise de manière purement minérale, sans laisser aucun espace vert à disposition des habitants. Ceci étant, Dakar (et la grande côte ?) semble être une des rares stations d'Afrique de l'Ouest où la température n'augmente pas. Peut être une conséquence de la fréquence accrue des vents forts du Nord Ouest évoquée plus haut ?

Par contre c'est l'augmentation globale qui est à l'origine de la fonte des glaciers et de ce fait, responsable de l'élévation du niveau océanique (voir chapitre 9) qui occasionne bien des problèmes dans les zones littorales si plates d'Afrique de l'Ouest.

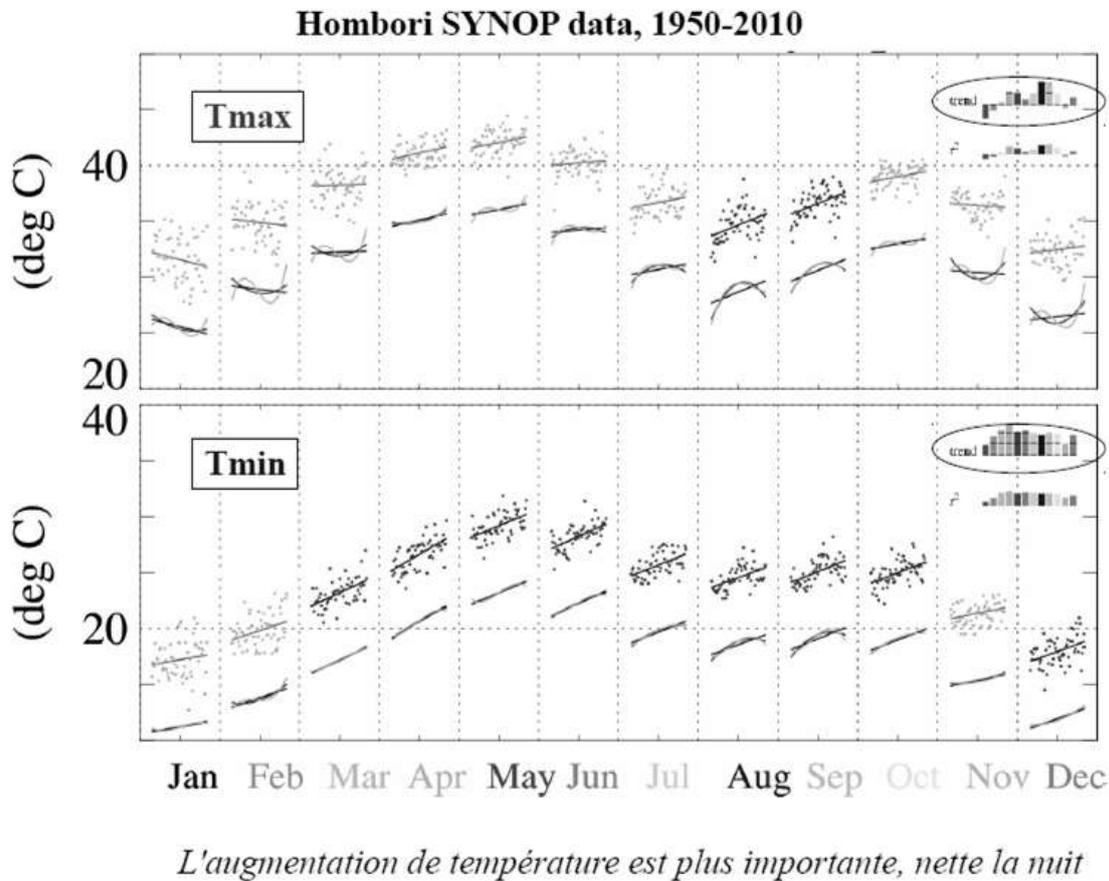


Figure 5 : Evolution des moyennes de températures mensuelles maximales et minimales à Hombori depuis 1950 (Guichard et al., 2015)

d- conséquences sur les rendements

La tempête du 29 août 2015 au large du Sénégal est le premier cyclone à être observé dès les côtes africaines depuis la fin du 19^{ème} siècle. Venant après les ondes de tempêtes particulièrement d'avril 2013 et de fin mai-début juin 2014, elle donne une impression de répétition des événements extrêmes. Quoiqu'il en soit, les cyclones se produisent plus près de l'Afrique désormais (communication personnelle de Moctar Camara et Patrice Brehmer).

Le réchauffement climatique est la tendance inéluctable, celle que les conférences sur le climat essaient avec plus ou moins de succès, de limiter afin d'en freiner les effets, sanitaires, agropastoraux, économiques, écologiques, humains (migrations climatiques ?). L'avènement d'épisodes de tempête, de coups de chaud (dry spells), de pluies extrêmes, de vents violents, de vents de poussière, s'ajoute à un retour des pluies certain mais accompagné aussi d'une irrégularité interannuelle et intra-saisonnière très forte, et à cette tendance au réchauffement global et pour laquelle les sociétés rurales d'Afrique de l'Ouest n'ont pas de prise.

Les travaux de Sultan *et al.* (2013, 2014 et 2015) montrent deux éléments essentiels (figure 6) :

- même en cas d'augmentation des pluies, la hausse de la température attendue peut annuler les gains qu'on pourrait espérer de cette hausse des pluies ;
- la hausse inéluctable de la température conduit à des prévisions de baisse de rendements céréaliers aussi sévères.

Le réchauffement aura donc un effet bien plus certain et fort que l'évolution des pluies sur les rendements céréaliers (ici mil et sorgho) au Sahel dans les prochaines décennies.

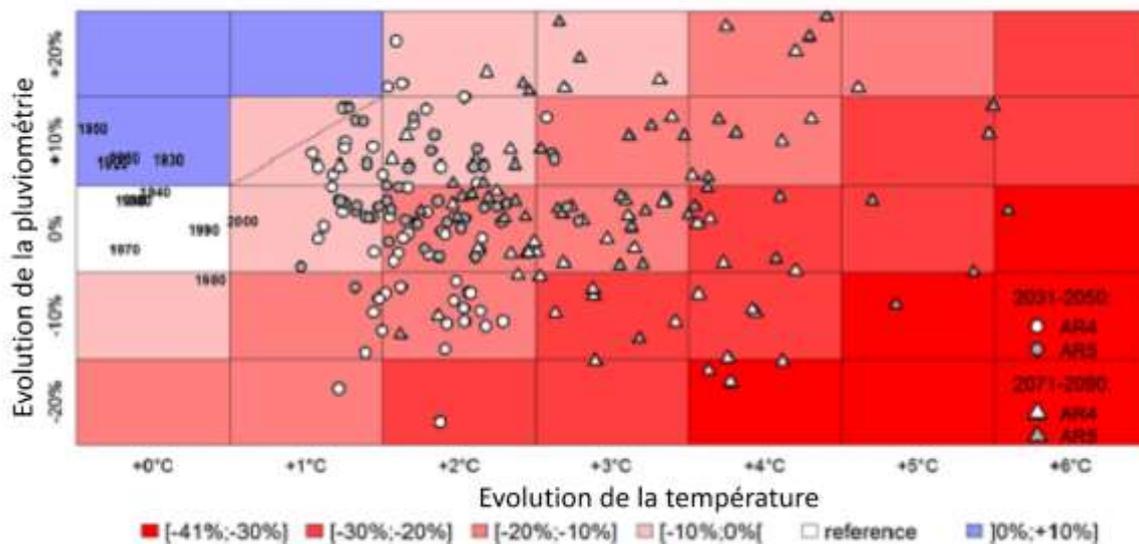


Figure 6. (Sultan *et al.*, 2014). *Changement relatif (%) en rendement de plusieurs variétés de mil et sorgho sous l'effet des variations de t° et des pluies sur l'ensemble de l'Afrique de l'Ouest. Les résultats sont la moyenne de 35 stations dans toute l'Afrique de l'Ouest et 6 cultivars de mil et sorgho. Les triangles blancs et les cercles sont les anomalies projetées à partir des scénarios de MCG CMIP3 et des RCP 4.5, 6.0 et 8.5, respectivement.*

2- Pourquoi accroître la capacité des sols à retenir l'eau et pourquoi maintenant ? une nouvelle sécheresse est prévue après 2030

L'épisode de sécheresse très marqué qu'a connu l'Afrique de l'Ouest, de 1968 à 1993 (1998 à l'ouest du Sahel) s'est traduit, en termes de paysage, par une terrible accélération du déboisement : à la consommation de bois et de charbon de bois croissante des populations, s'est ajoutée une très forte surmortalité des arbres et arbustes, dont les racines n'ont plus pu trouver l'humidité nécessaire à leur simple survie. Ce sont surtout les zones de sols minces (cuirasses latéritiques, lithosols et regosols) qui ont assez vite perdu la teneur en eau permettant la survie de la végétation ligneuse. Les plateaux de brousse tigrée du Sahel central (Mali, Burkina Faso, Niger), les dunes du Ferlo, les grandes zones de sols minces du Gourma (affleurements rocheux, zones érodées durant la sécheresse du fait de la disparition de la végétation ; c stations dans toute l'af Kergoat *et al.*, 2015) ont perdu leur capacité de

rétenion en eau. C'est ce qui explique que le « paradoxe du Sahel », dont il a été question plus haut, s'observe aussi au nord des zones cultivées, dans des espaces essentiellement pastoraux.

Des travaux ont montré a posteriori qu'on pouvait très bien expliquer cet épisode sec de la fin du 20^{ème} siècle par des forçages atmosphériques ou océaniques ; « *des comparaisons entre des sorties de modèles du 20^{ème} siècle et des sorties forcées par les seules émissions de GES révèlent le rôle clé des aérosols et leur réflectivité : ils forcent un gradient de SST (température de surface de la mer) qui provoque un assèchement robuste à la marge nord de la zone de convergence Inter Tropicale Atlantique et au Sahel* » (Biasutti et Giannini, 2006). El Niño semble aussi jouer un rôle dans la sécheresse de la fin du 20^{ème} siècle au Sahel : les forçages de modèles par les pluies induites par l'ENSO (l'oscillation sud El Niño) montrent toujours des conditions sèches sur le Sahel et l'Afrique du Sud (Dai, 2012). En gros, une hausse des températures SST de l'Atlantique Nord entraîne une hausse des précipitations sur le Sahel, et vice versa (Hawkins, 2011).

Globalement, la hausse de la teneur en CO₂ devrait permettre une poursuite voire une amplification de la hausse actuellement observée des précipitations au Sahel (Dong et Sutton, 2015).

Toutefois, cette tendance à une augmentation des pluies à venir sur le Sahel est une tendance générale qui cache un élément important. En effet, la plupart des modèles montrent que l'Ouest de l'Afrique de l'Ouest devrait au contraire connaître un épisode sec très marqué. D'autres épisodes secs pourraient bien se reproduire dans les prochaines décennies. C'est du moins ce que prédisent pour l'Ouest du Sahel certains des modèles participant aux synthèses produites par le GIEC. Ainsi pour Biasutti (2013) : « *Autant la moyenne inter-modèles, que la majorité de modèles, montrent un Sahel plus humide partout, sauf sur la côte atlantique* ». De même Sultan *et al.* (2014) montrent que l'ouest du Sahel connaîtra dans les prochaines décennies un fort épisode sec, contrairement au reste du Sahel qui devrait voir sa pluviométrie continuer à augmenter comme c'est le cas actuellement depuis la fin du 20^{ème} siècle.

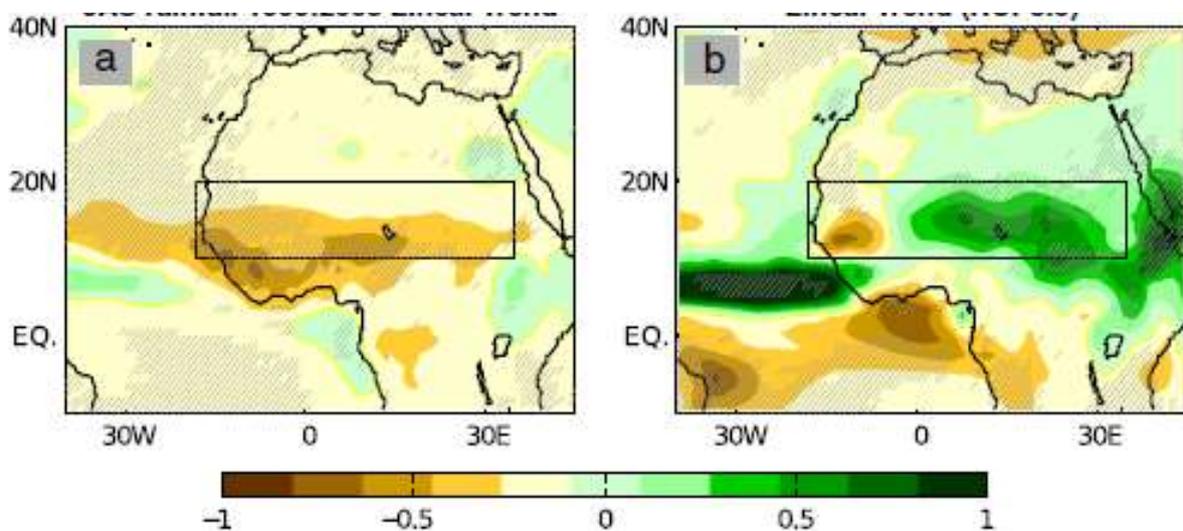


Figure 7. Tendance historique (à gauche 1900-2005) et projection du scénario RCP8.5 en mm/jour pour la période (2006-2099) pour les pluies d'hivernage en Afrique, moyenne des simulations des modèles CMIP5 (in Biasutti, 2013)

Dème *et al.* (2015) résument bien les prévisions du 4^{ème} rapport du GIEC, fondées sur les simulations CMIP5 :

- dans le cas d'un scénario « réaliste » (rcp4.5), la plupart des modèles montrent pour la période 2011-2040 des projections de pluie à la hausse sur le Sahel à l'Est de 10°W, mais à la baisse sur le Sahel à l'Ouest de 10°W et au Maghreb ; la tendance reste la même pour ces modèles pour la période 2041-2070 et sur la deuxième moitié du 21^{ème} siècle ;
- dans le cas d'un scénario « pessimiste » (rcp8.5), la majorité des modèles fait des projections de pluie pour 2011-2040 à la hausse au Sahel centre et est, à la baisse au Sahel ouest ; pour la période 2041-2070, 11 modèles sur 13 montrent des projections de pluie à la baisse sur le Sahel ouest et à la hausse sur le Sahel centre et est. Il en est de même pour la période 2071-2100.

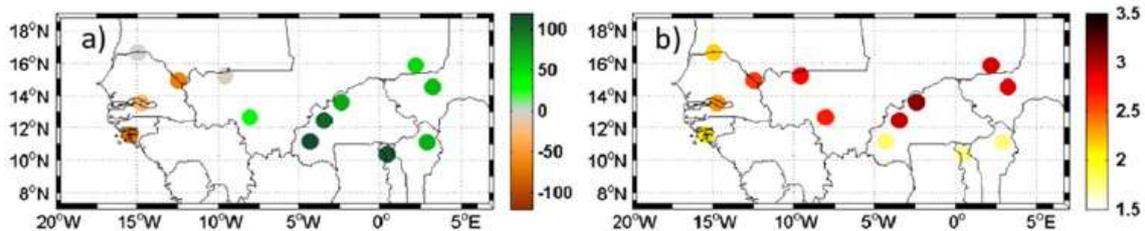


Figure 8. Evolution de la pluie annuelle moyenne et des températures de surface sous le scénario RCP8.5 ; à gauche évolution de la pluie en %, à droite de la température, entre 1961-1990 et 2031-2060 (Sultan et al., 2014)

Conclusion : promouvoir vite un reverdissement du Sahel ?

Les tendances et prévisions climatiques sont fondées sur des sorties de modèles. On dit parfois que les modèles sont souvent montés pour donner les résultats que l'on leur apprend à produire. Mais en l'occurrence, les experts du panel international du GIEC prennent en compte un grand nombre de modèles climatiques (souvent plus de 20) ; cela re-crédibilise leurs conclusions. Très clairement, le réchauffement climatique produit des changements autres que ceux observés depuis près de 50 ans dans le régime des pluies. Toutefois, les conclusions dans ce domaine sont assez claires en distinguant :

- l'ensemble de la bande soudano-sahélienne qui devrait connaître une pluviométrie croissante dans les prochaines décennies ;
- l'ouest de cette bande, dans laquelle au contraire la pluie devrait baisser sensiblement.

Ce retour à des conditions plus sèches à l'extrême Ouest de l'Afrique pourrait faire revivre les très grandes difficultés sanitaires et alimentaires qui ont caractérisé le Sahel durant les années 1968-1995, surtout au début des années 70, puis au début des années 1980.

Cela laisse aujourd'hui, en 2018, quelques années, au maximum une décennie « humide » ou a minima, « moyenne », pour mettre en œuvre une politique d'amélioration de la résilience des sociétés et des milieux, afin que ceux-ci résistent mieux aux effets d'une sécheresse prolongée, accompagnée de l'inéluctable réchauffement de la planète.

Comment rendre les sociétés et les milieux mieux à même de supporter un tel choc climatique ? un moyen simple et qui est à la portée de tout paysan, acteur des zones rurales, mais aussi citadin d'Afrique de l'Ouest, c'est de reverdir les campagnes et les villes, d'utiliser l'arbre et la végétation en général comme outil de résilience, d'aménagement du territoire. Il faut toutefois que ces reverdissements soient réalisés par les populations elles-mêmes, avec le moins d'aide extérieure pour éviter les distorsions et effets d'aubaine inhérents aux milliers de « projets » qui sont montés annuellement sur la planète. Les acteurs du monde rural sont les mieux à même de savoir quelles espèces planter, de quel type d'aménagement et d'arbres ils ont besoin.

Mais un reverdissement n'aura dans tous les cas que des effets positifs :

- protection des sols contre l'érosion éolienne en saison sèche, contre l'érosion hydrique durant la saison des pluies ; limitation des transports d'aérosols et de matières solides dans les cours d'eau ;
- restructuration des sols par apport de matière organique, développement racinaire et attraction des termites et autres micro-faunes améliorant notablement la structure des sols ;
- amélioration de la capacité des sols à retenir l'eau, et donc des capacités d'infiltration des sols et de stockage de l'eau dans les sols et le sous-sol ;
- limitation des risques d'inondation et d'étiage en aval grâce à ce stockage d'eau et sa restitution progressive au réseau hydrographique ;
- accroissement de l'évapotranspiration (chaleur latente) et donc diminution des températures par la production de vapeur d'eau (principe de la détente des gaz) ;
- ombrages en zone rurale et en zone urbaine ; impact paysager et d'agrément ;
- apport de ressources supplémentaires ou de matériaux en autonomie pour les ménages par diversification des revenus : paille, bois de clôture, de construction et de cuisine, fourrages, fruits, médicaments traditionnels, tisanes et boissons, légumes, fruits, baies, etc

On verra au chapitre suivant le bénéfice à en tirer au niveau du respect des diminutions d'émissions de GES telles que prévues par les CPDN pour la COP21.

en résumé :

- le réchauffement climatique est inéluctable et déjà parfaitement avéré avec une hausse acquise de 0.6°C au niveau global, 1.2°C en Afrique de l'Ouest ;

- une période sèche est prévue par la plupart des modèles pour l'Ouest de l'Afrique de l'Ouest au-delà des années 2030.

Chapitre 11 : Le reverdissement, arme de résilience ?

*Ne faites jamais la sieste sous un noyer,
l'ombre du noyer est mortelle...*

La perspective d'une nouvelle sécheresse qui pourrait toucher l'Ouest de l'Afrique de l'Ouest après 2030 (voir chapitre 10) incite à faire des propositions afin de tenter d'améliorer la résilience des milieux comme des sociétés (de fait, des agro-systèmes) face à la forte variabilité climatique inhérente aux zones arides et semi-arides, et surtout face à l'éventualité d'un nouvel épisode long et marqué tel que prédit par des modèles, réunis en ensembles de modèles dans les prévisions émises régulièrement par le GIEC. La restauration des sols et de la végétation, qu'on appellera ici par raccourci le « reverdissement », peut-il être une solution pour atténuer les chocs thermiques et les sécheresses dans les prochaines décennies ?

En tout état de cause, cette pratique est connue pour restaurer les fonctions hydrologiques de base des sols et des bassins : l'infiltration, le stockage temporaire et la restitution progressive de l'eau. Cela permet à la fois d'écrêter les crues en limitant, voire en stoppant l'écoulement immédiat (de type hortonien, voir chapitre 1), et d'allonger la durée de la crue annuelle en permettant une restitution sur une longue durée des eaux stockées dans le sol. Quittons un court moment l'Afrique de l'Ouest pour mesurer, sur de tout petits bassins des Alpes Françaises du Sud, l'effet respectif du couvert végétal et de son absence. Les deux bassins de Laval et Brusquet font partie du site expérimental de Draix, piloté par un GIS mené par IRSTEA ; la région a été touchée aux 18^{ème} et 19^{ème} siècles par une crise érosive qui a entraîné le décapage des sols et la mise à nu des fameuses « marnes noires » de l'oxfordo-callovien-bathonien supérieur, parfois épaisses de plus de 2000 m et susceptibles de perdre chaque année une tranche d'un cm par érosion hydrique.

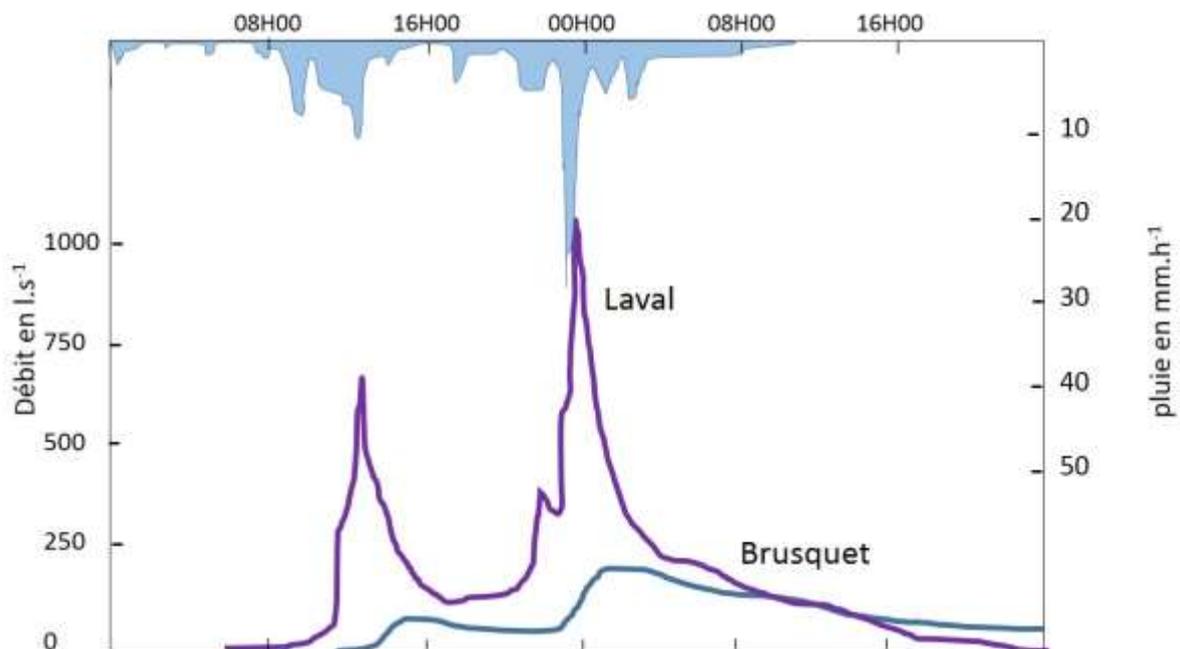


Figure 1 : effet du reboisement sur le débit et l'écoulement dans de petits bassins montagnards d'un km² environ (Alpes du Sud ; Lavabre et Andreassian, 2000). L'hydrogramme du Brusquet est celui du bassin boisé ; l'hydrogramme du Laval, celui du bassin déboisé, les deux ont la même superficie et reçoivent la même pluie (ici les 8 et 9 mars 1991)

Le bassin de Laval a été laissé tel quel, sans végétation ; celui du Brusquet avait fait l'objet d'un reboisement très dense dès la fin du 19^{ème} siècle. Le contraste est aujourd'hui saisissant en termes de paysage, mais le contraste des comportements hydrologiques est également très fort. La figure 1 montre pour une pluie donnée (la même sur les deux bassins, qui sont voisins et contigus), l'hydrogramme sur le bassin du Laval au sol laissé nu (pic de crue rapide et bref) et sur celui du Brusquet intégralement reboisé (crue retardée et amoindrie).

1^{ère} partie hydrologique : rôle de la végétation sur l'hydrologie

Cet exemple d'un petit bassin versant préalpin aurait pu être pris dans à peu près toutes les régions géoclimatiques du globe, exceptées les régions polaires, les régions hyper arides ou peut être les régions de forêt équatoriale sans saison sèche. On a affaire ici, lorsque la végétation a disparu, à une sécheresse édaphique, qui est liée à la non-infiltration de l'eau, puisque presque toute l'eau ruisselle. En effet les Alpes du Sud (dites « Alpes sèches ») ne sont pas si sèches que cela, elles possèdent un climat de montagne à tendance méditerranéenne (l'été est assez sec). Dans une autre région de montagnes plutôt sèches, la Sierra Madre Occidentale du Mexique, on a pu montrer a contrario l'effet de la déforestation et du surpâturage (ici lié à la spéculation, la région étant en fait très peu peuplée et en voie de dépeuplement rapide. La figure 2 montre ces effets : réduction de la capacité de rétention en eau des sols, donc la crue est plus rapide, plus courte, plus prononcée, et les cours d'eau se retrouvent à sec bien plus vite, faute de stockage de l'eau dans les sols et les bassins.

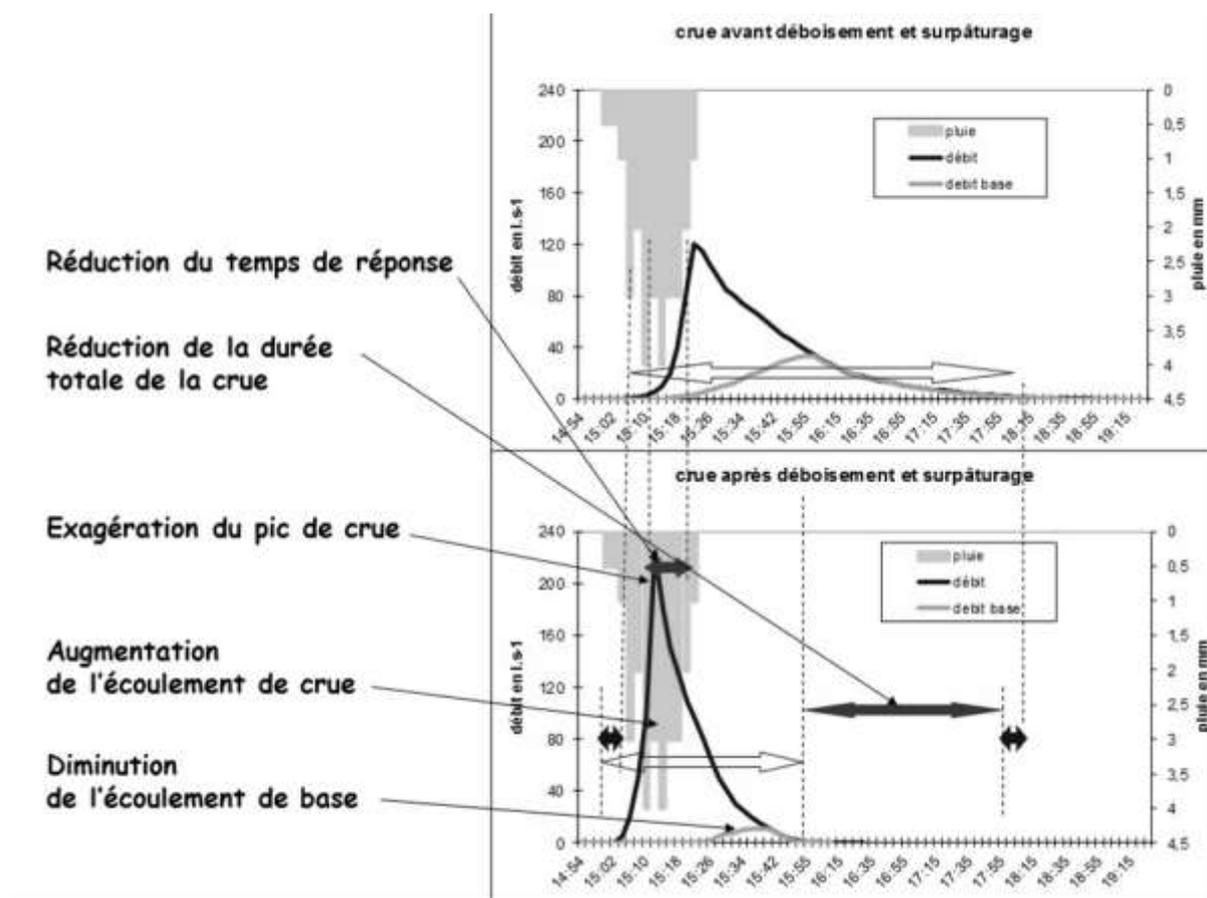


figure 2 : Effets théoriques du déboisement sur le débit et l'écoulement dans de petits bassins montagnards du Nord Mexique (Sierra Madre Occidentale, d'après Descroix et al., 2001 ; Viramontes, 2000 ; Viramontes et Descroix, 2002 ; Solis, 2007).

C'est le même processus qu'ont constaté Amani et Nguetora (2001) sur les affluents de rive droite du Niger : ils ont remarqué qu'à débit égal, la crue de la Sirba, le principal d'entre eux, se produisait un mois plus tôt, dans les années 1980, que ce qui s'observait dans les années 1960 (figure 3). Même si ces travaux ont été publiés quinze ans après la mise en évidence du « Paradoxe du Sahel » par Albergel (1987) et par Pouyaud (1987), ils analysent des données de la même période.

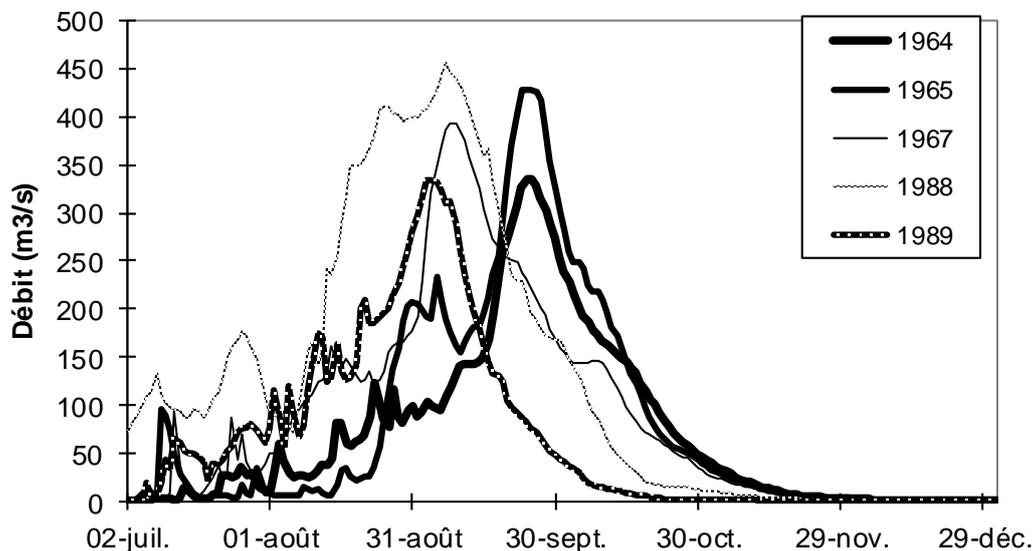


Figure 3 : modification des hydrogrammes de crue de la Sirba à Garbey Korou (affluent de droite du fleuve Niger) entre les années 1960 et les années 1980, du fait de la dé-végétalisation : crue plus précoce et plus courte, signes d'une diminution de la capacité de rétention en eau des sols (in Amani et Nguetora, 2001)

De fait, c'est la disparition progressive de la couverture végétale qui est à l'origine et du « paradoxe du Sahel » et d'un de ses processus connexes, l'avancée de la crue dans l'année.

Amogu (2009) et Amogu *et al.* (2010) ont mis en évidence le même processus sur le fleuve Niger puisque celui-ci draine le massif du Liptako-Gourma. La figure 6 du chapitre 1 permet de comparer les hydrogrammes décennaux du fleuve Niger à Niamey). Les figures 5, 6 et 7 du chapitre 3 montrent l'évolution des hydrogrammes par décennies sur les trois affluents sahéliens de droite du Niger, issus du Liptako-Gourma. Comme on l'a vu au chapitre 3, la crue du fleuve Niger se produit de plus en plus tôt dans le temps, depuis une cinquantaine d'années, et plus encore depuis la reprise des précipitations au Sahel à la fin du 20^{ème} siècle. De ce fait la crue se termine aussi bien plus tôt qu'auparavant, plus de deux mois plus tôt à Niamey, ces dernières années, par rapport à ce qu'on observait avant la sécheresse ; encore faut-il être prudent du fait que la pluviométrie était, durant les années 50, début de la série représentée dans cette figure, sensiblement plus élevée, du fait d'une période humide reconnue. Bodian *et al.* 2016 remarquent la même avancée de la crue moyenne sur le Haut Sénégal, et la précocité encore plus marquée de la décrue, dans une région où ne s'applique pourtant pas le « paradoxe du Sahel » ; il faut voir dans ce dernier cas le seul effet de la diminution de l'hydraulicité, les réservoirs d'eau naturels des montagnes de Guinée n'étant pas encore revenus à leur niveau d'avant l'épisode sec des années 1968-1995. Ce comportement est proche de celui des crues d'eau du haut bassin du Niger dont on a vu (figure 18, chapitre 3) que leur tarissement était de plus en plus rapide avec le temps.

Un reverdissement du Sahel permettrait de rétablir une certaine infiltration et d'accroître la capacité de rétention en eau des sols ; cela aurait pour effet d'améliorer la productivité primaire nette des agro-systèmes, d'amoindrir les risques hydrologiques en écrétant les crues et en soutenant les étiages.

2^{ème} partie, climat et végétation

Le rôle de la végétation dans le climat

La rétro-action de la surface sur l'atmosphère a de longue date été l'objet de nombreuses publications. On sait depuis les travaux de Folland *et al.* (1986) que la température de surface de l'Atlantique et même El Niño influencent plus fortement la pluviométrie sahélienne que l'humidité du sol, l'albédo et donc la rétro-action de la surface sur l'atmosphère. Ces auteurs ont montré qu'il pleut plus au Sahel quand la température de surface de l'Atlantique Nord est plus élevée.

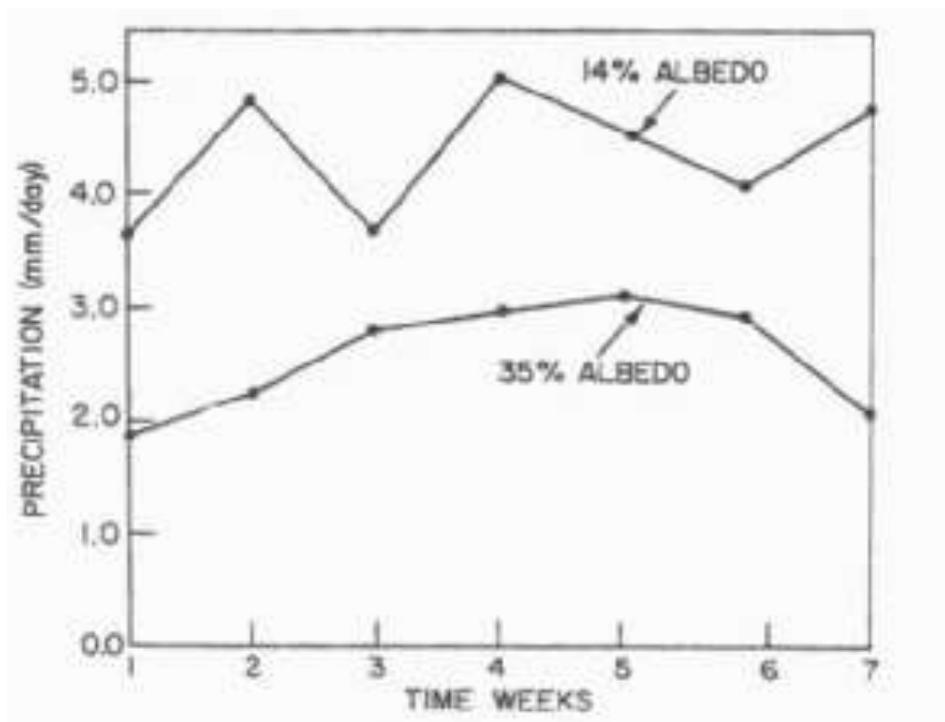


Figure 4. Effet théorique de l'augmentation de l'albédo sur la pluviométrie en Afrique Occidentale selon Charney (1975)

En introduction, et en théorie, influence de la surface (de la végétation ?) sur la pluviométrie

Au début de la longue période sèche qu'a connue l'Afrique de l'Ouest, Charney (1975) a le premier modélisé l'Afrique de l'Ouest et simulé une disparition totale de la végétation (on est juste après la première sécheresse très sévère, celle de 1972-1973, qui a détruit une partie de la végétation naturelle en plus de décimer le bétail). Il a fait tourner son modèle surface atmosphère en simulant la végétation telle qu'elle existait alors et la même étendue sans aucune végétation. L'auteur attribue une très forte influence à l'albédo (comme les travaux bien plus récents de Biasutti, de Giannini, de Davin et De Noblet, etc, cités au chapitre 10). Pour Charney, la disparition de la végétation fait passer l'albédo moyen de la sous-région ouest africaine de 14 à 35% et cela diminue les précipitations de 2 mm par jour, soit de 30% de 50% (figure 4). Escourrou (1981) cite plusieurs exemples d'impact de la forêt sur la pluviométrie : en comparant spatialement des régions voisines boisées et non boisées, en Lorraine, ces dernières recevant sensiblement moins de pluie que les premières ; par ailleurs en comparant la pluviométrie de deux régions européennes auparavant déboisées et ayant fait l'objet de vastes opérations de reboisement : au début du 18^{ème} siècle, les Landes de Gascogne (dans le Sud-Ouest de la France) et les landes du Jutland à l'ouest du Danemark étaient deux régions pauvres aux sols sableux pratiquement incultivables. Dans les deux cas, l'Etat a décidé de reboiser ces régions pour au moins en tirer le profit

du bois et y créer une activité économique. Sans qu'on puisse certifier les résultats obtenus, faute de disposer d'un siècle à l'autre du même instrument de mesure (un pluviomètre standardisé), Escourrou (1981) montre que dans les deux régions, la pluviométrie annuelle aurait augmenté de 25 à 30% après leur reboisement. Cette auteure en attribue la cause à l'accroissement de la rugosité de surface, qui provoquerait une ascension des masses d'air, facilitant la convection, et à l'évapotranspiration accrue de la surface. Sans pouvoir non plus l'étayer au niveau statistique, nous avons montré en 1994 (Descroix, 1994) que la « méditerranéisation » du régime pluviométrique dans les Alpes Françaises (la part des pluies d'été diminue depuis la fin du 19^{ème} siècle) était bien plus lente, voire inexistante, dans les massifs qui avaient connu le plus fort reboisement depuis cette période, à savoir, les Préalpes de Digne et les massifs pré-alpins du Diois et des Baronnies, que dans les autres régions (grandes vallées, hauts massifs où la repousse végétale est limitée par l'altitude) ; il est possible que l'étagement altitudinal et la répartition géographique des massifs créent des biais statistiques que l'on n'aurait pas si la région était plate comme le Sahel.

Les travaux de Taylor et Lebel (1998), à l'issue de l'expérience HAPEX Sahel, ont longtemps renforcé auprès de la communauté scientifique l'idée que l'humidité de la surface était une stimulation à de nouvelles pluies, la théorie de la persistance des précipitations (il pleut plus là où il a déjà plu à l'évènement précédent, car l'humidité des sols y est plus forte, l'albédo plus faible). Ce gros travail a été « victime » de la faiblesse des capacités de calcul autorisée alors par les ordinateurs. Les auteurs ont été limités en capacité de calcul et s'en sont tenus à un mois, sur les 8 années de données dont ils disposaient en pluie au sol et en données satellites de l'humidité des sols (par albédo interposé). Pour cette période, en effet, ils ont mis en évidence que la pluie tombait de préférence là où elle était déjà tombée auparavant. Or, les travaux d'Ibrahim (2008) basé sur 17 années de données (1991-2007) de l'expérience Hapex puis de l'expérience AMMA sur le même degré carré de Niamey que Taylor et Lebel, ont montré le contraire : la pluie tombe plutôt là où elle n'est pas tombée à l'épisode précédent (donc là où le sol est le plus sec). Ceci est plus ou moins corroboré par les travaux en cours de Taylor et de Pellarin ; pour ce dernier (nombreuses publications, travaux en cours), qui rejoint en ce point Taylor (idem, travaux en cours), jusqu'à fin juillet, la pluie tombe surtout sur les zones sèches (celles où le sol est sec car il n'y a pas eu de pluies auparavant), pour des raisons de physique de l'atmosphère (plus fort échauffement du sol, donc meilleure convection ?). Ces hypothèses sont encore en cours de validation.

La question de la rétro-action entre la surface continentale et les processus convectifs fait encore débat. Peu d'études encore ont utilisé la télédétection pour suivre les systèmes convectifs de méso-échelle (MCS ou « lignes de grain ») et pour explorer leurs couplages possibles avec les processus de surfaces. Taylor *et al.* (2011 et 2012) ont montré que les hétérogénéités de l'humidité du sol d'échelle décakilométrique ont un impact très net sur le tracé des MCS dans tout le Sahel. Cela a pu se vérifier grâce à la taille et au long parcours de ces lignes de grains. Ils ont démontré que la trace au sol laissée par un grain (zone d'humidité, repérée grâce aux capteurs températures tels que ceux du satellite SMOS), accroît la probabilité qu'un autre MCS se produise sur la discontinuité dans les jours suivants. Pellarin (2016) a relevé les mêmes conclusions, et précisé que non seulement le déclenchement mais aussi le tracé et le comportement du système convectif, sont influencés par l'humidité du sol pendant la journée : en effet, leur déplacement évolue préférentiellement sur la marge d'une zone préalablement humidifiée. Sy (2016) et Sy *et al.* (2017) ont confirmé que, bien que les réponses du climat aux changements d'occupation des sols sont faibles, certains processus atmosphériques sont influencés par ces changements. Taylor *et al.* (2017) ont identifié, en utilisant des températures fournies par le signal infrarouge des satellites (IRT), une nette et robuste tendance dans l'augmentation de la fréquence des MCS depuis 1982. L'IRT moyenne d'un MCS est utilisée comme mesure de son intensité. Cette tendance confirme des observations antérieures de Sanogo *et al.* (2015) and Zhang *et al.* (2017).

Et en général ?

Pour Alkama et Cescatti (2016), c'est dans les régions arides que la disparition des forêts accroît le plus l'amplitude thermique journalière ; ils estiment que la déforestation est à l'origine de 18% du réchauffement de la planète. De manière à démêler l'effet du changement de couvert végétal de celui du changement global, ces auteurs ont utilisé une nouvelle méthode ; il s'agit d'exprimer la différence de température entre deux années (ΔT) en un endroit donné par l'effet du changement de couvert forestier (ΔT_{cf}) sommé du signal résiduel (ΔT_{res}) lié au changement climatique, suivant l'équation

$$\Delta T = \Delta T_{cf} + \Delta T_{res} \quad , \quad \text{ce qui donne} \quad \Delta T_{cf} = \Delta T - \Delta T_{res}$$

Sous tous les climats, la coupe forestière produit une augmentation sensible des températures maximales annuelles de l'air et de plus faibles augmentations des minima ; cette augmentation est supérieure à 2°C dans les zones arides, de 1°C dans les zones tropicales. Alkama et Cescatti (2016) ajoutent que les plus fortes hausses de température s'observent au moment le plus chaud de l'année, pendant le solstice d'été, alors que l'augmentation est négligeable durant la nuit. Ils expliquent cette augmentation du réchauffement local lors du rayonnement le plus fort par une diminution sensible de l'évapotranspiration et de la rugosité de surface liée à la déforestation.

Alkama et Cescatti (2016) montrent que les forêts jouent un rôle important d'atténuation biophysique des maxima de température sous tous les climats. En effet, les forêts réduisent les températures locales diurnes d'été et abaissent les amplitudes thermiques annuelles et journalières. Le rôle majeur de l'évapotranspiration dans l'impact biophysique de la déforestation apparaît clairement par le tri des zones climatiques, les zones arides, comme on l'a vu, montrant un signal bien plus fort, suivi du climat tropical et tempéré, puis enfin des zones boréales.

Le reboisement et une gestion forestière destinée à optimiser la séquestration du carbone ont été reconnus comme des stratégies clés pour l'atténuation du changement climatique lors de la Conférence de Paris (COP 21, décembre 2015), car les forêts sont supposées ralentir le réchauffement global en retirant une partie du CO₂ de l'atmosphère.

Or, le rôle de la forêt dans l'atténuation du réchauffement climatique et la fixation du carbone n'est pas toujours aussi facile à mettre en valeur. Ainsi, Naudts *et al.* (2016) montrent que la très forte progression de la forêt européenne depuis deux siècles du fait de la déprise rurale s'est traduite par une très forte dette (=émission) de carbone ; en effet « le type d'exploitation forestière pratiqué en Europe libère énormément de carbone détenu dans la biomasse, les litières, bois morts et les puits de carbone du sol. De plus, la conversion de forêts d'arbres à feuilles caduques en forêts de conifères modifie l'albédo, la rugosité de la canopée et l'évapotranspiration et contribuent au réchauffement global plutôt qu'à son atténuation.

En prenant en compte autant les processus radiatifs que les processus non-radiatifs, Davin et De Noblet (2010) démontrent que dans les zones tropicales, l'impact net de la déforestation est un réchauffement à cause de l'efficacité de l'évapotranspiration et la rugosité moindre de la surface terrestre ; alors que dans les régions tempérées et boréales, l'effet de l'albédo est bien plus fort et la déforestation se traduit donc par un rafraîchissement de l'air.

Quoiqu'il en soit, démontrer que la déforestation des forêts tropicales a un impact sur le climat est loin d'être anodin : Achard *et al.* (2014) ont montré que les zones tropicales ont perdu 8 millions d'hectares de forêts par an dans les années 1990 et encore 7,6 millions d'hectares par an dans les années 2000-2010. Dans les deux cas, cela représente une perte de près de 900 millions de tonnes de carbone par an, soit 10% du total des émissions produites par les combustibles fossiles pendant cette période.

Enfin, Brandt *et al.* (2018) ont montré que l'Afrique globalement émettait beaucoup plus de carbone qu'elle n'en fixait, surtout depuis la décennie 2010, en particulier l'Afrique du Sud, mais aussi la cuvette du Congo, le Nigeria et certaines régions d'Afrique de l'Ouest. Parmi celles-ci, le Sénégal, qui est pourtant aussi une des régions où le reverdissement, en particulier celui des ligneux, a été le plus rapide de 2000 à 2015 (Brandt *et al.*, 2017). Le dernier papier de ces auteurs (Brandt *et al.*, 2018) montre que la végétation d'une grande partie du Sénégal central et oriental soudanien et sud sahélien a en fait beaucoup souffert d'années sèches en 2013-2015, ce qui en a fait une des régions ayant perdu le plus de carbone sur la période 2011-2016 analysée dans ce papier plus récent.

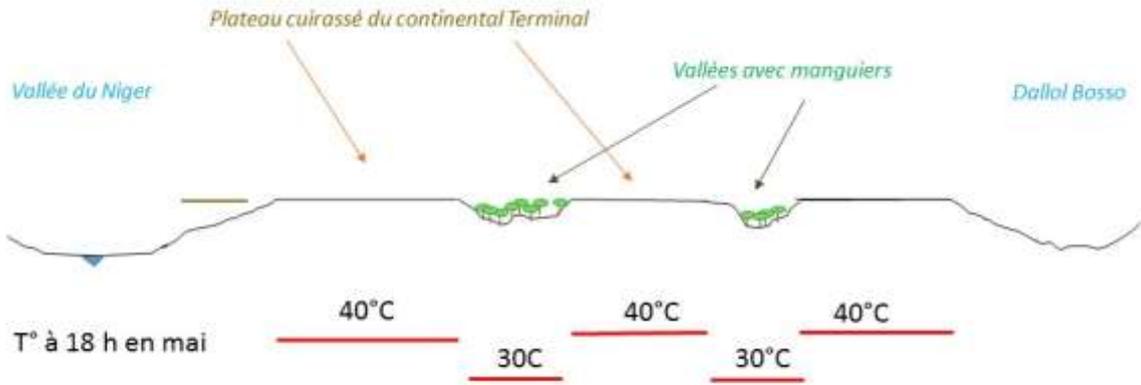
3^{ème} partie, micro-climat et végétation

Dans les zones arides et semi-arides, qui couvrent 40% de la surface terrestre, l'évapotranspiration (flux de chaleur latente) représente 90% de la précipitation annuelle (Garcia *et al.*, 2013). Si, comme on vient de le voir, la déforestation a été massive dans les zones tropicales, elle a pu faire place, dans les régions tropicales humides, à des formations végétales secondaires ou des plantations ou des cultures produisant des valeurs similaires d'évapotranspiration. Dans les zones arides ou semi arides, on peut assister à des modifications drastiques de la surface conduisant à une forte augmentation de cette évapotranspiration ; c'est le cas lorsque des périmètres irrigués étendus sont installés dans ces zones aux températures élevées et aux faibles valeurs hygrométriques. Dès 1963, Bouchet suggérait, en comparant ETR et ETP, que changer la couverture végétale du sol ou irriguer sur de grandes surfaces pourrait conduire à modifier le climat. C'est ce que montrent Ozdogan *et al.* (2004) avec l'expansion rapide de l'irrigation dans le Sud Est de la Turquie (projet GAP Great Anatoly Project dans les hauts bassins du Tigre et surtout de l'Euphrate) qui a fortement modifié les flux de la basse atmosphère : ils ont mesuré une forte baisse de l'ETP liée à la forte hausse de l'ETR, à la diminution de la vitesse des vents, elle-même probablement due à l'augmentation de la rugosité du fait des nouvelles cultures, et l'augmentation de l'humidité de surface.

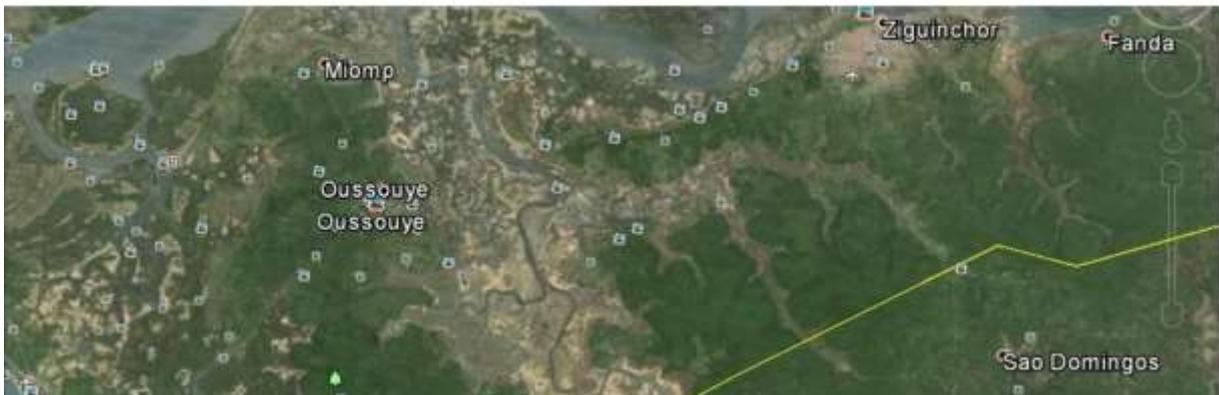
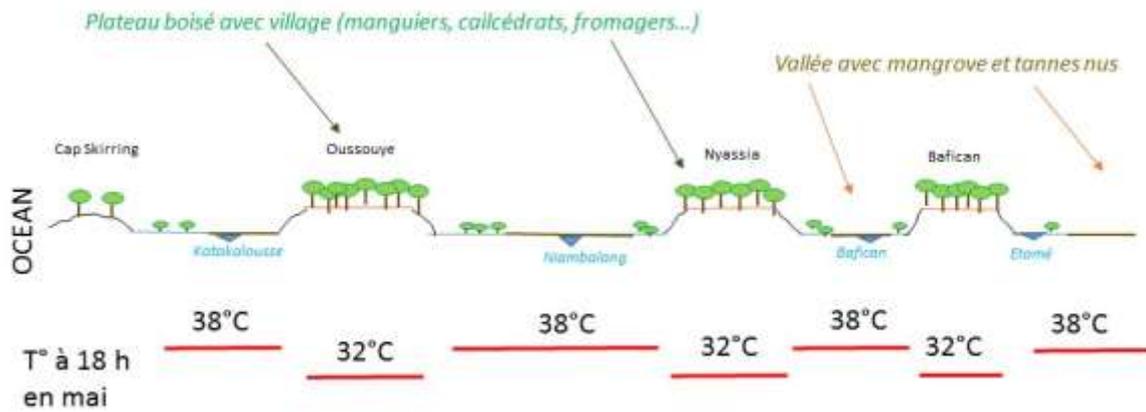
Au Sahel comme dans les tannes des zones de mangrove

Le rôle de l'évapotranspiration dans la modération des températures élevées est attesté, au quotidien, durant la saison sèche chaude au Sahel (février-juin) lorsque l'on circule en fin d'après-midi par des températures élevées (plus de 40°C au Sahel du Niger ou du Mali) ; les vallées dans lesquelles ont été conservées des sortes de « forêts galeries », le plus souvent des vergers de manguiers à l'approche des villes, produisent un effet de fraîcheur intense, lié à une chute de température pouvant atteindre 12°C, l'air frais produit par l'évapotranspiration intense d'arbres puisant leur ressource en eau dans la nappe peu profonde, étant piégé dans les bas-fonds (figure 5a).

Dans les zones littorales des Rivières du Sud, un processus similaire se produit dans une configuration topographique inversée ; au même moment de l'année et de la journée (saison sèche chaude, fin d'après-midi), la température dépasse largement 35°C dans les « tannes » ces grandes zones plates de sol nu où la mangrove ou les rizières ont disparu, ou n'ont jamais pu se développer ; lorsque l'on monte, de quelques mètres à peine, sur le « plateau » du continental terminal, couvert d'une forêt tropicale dense (malgré les 8 mois de saison sèche totale), on sent encore une nette impression de fraîcheur, la température diminuant de fait de plus de 6°C (jusque 10°C) sous ces massifs forestiers, pourtant situés plus haut (l'air chaud monte donc on pourrait attendre le contraire) (Figure 5b).



5a



5b

Figures 5a et 5b : effets de la forêt sur la température dans un transect sahélien (Niger ouest 5a) et dans un transect pré-littoral (Casamance 5b)

Il est plus facile de déterminer le rôle micro-climatique de la surface, en particulier à travers la végétation. Les figures 6a et 6b, inspirées de Dupriez et De Leener (1990), montrent tous les effets des arbres sur la surface d'un agro-système : diminution de l'insolation et donc de la température et l'évaporation, donc du dessèchement du sol, protection contre le vent, maintien d'une humidité du sol, fixation de l'azote et du carbone.



6a



6b

Figure 6a et 6b : effets micro-climatiques de la végétation, d'après Dupriez et De Leener, 1990)

L'influence de la végétation sur la température

L'évaporation produit-elle du froid ?

Que ce soit sur la peau, dans les canaris, ces jarres en terre poreuse, dans les gourdes recouvertes de peau ou de tissu qu'on mouille, dans un frigo ou une clim, ou sur Terre....on semble assister à la production de froid relatif.

Parce qu'en devenant vapeur l'eau emporte une partie de la chaleur autrement dit de l'énergie du corps qui s'évapore. En effet les molécules des gaz sont plus agitées que les molécules des liquides ou des solides. L'eau liquide utilise donc l'énergie calorifique du corps pour s'évaporer. Quand une substance passe de l'état liquide à l'état gazeux, elle absorbe de l'énergie thermique. La détente (passage de l'état liquide à l'état gazeux) produit du froid, C'est d'ailleurs la raison essentielle pour laquelle on transpire, et pourquoi on supporte plus mal 35° dans la jungle que 40° dans le désert : dans la jungle, l'air est saturé en vapeur d'eau, ce qui bloque l'évaporation, du coup la sueur ne s'évapore pas et ne nous refroidit pas

À titre d'exemples :

- un chêne adulte hisse quotidiennement près de 200 litres d'eau à une hauteur d'une trentaine de mètres ;
- un hectare de hêtraie, qui consomme de 2.000 à 5.000 tonnes d'eau par an, en restitue 2.000 par évaporation ;
- un cade (*Faidherbia albida*) ou un caïlcédrat (*khaya senegalensis*) consomme plus de 600 litres d'eau par jour, plus de 1000 durant les mois secs et chauds ;
- un fromager (*ceiba pentandra*) plus de 1000 l par jour tant qu'il est en feuille.

Et en ville ?

« Les villes sont bien connues pour être plus chaudes que les zones rurales qui les entourent ; ce phénomène est appelé l'îlot de chaleur urbaine » (Li et Bou-Zeid, 2013). Plus elles sont « minérales », moins elles comportent de végétation, et plus elles accumulent la chaleur, ce qui, a minima, entraîne deux effets :

- une accumulation des effets lors des vagues de chaleur : leur effet en ville est supérieur à la somme de l'effet « îlot de chaleur » et de l'effet « vague de chaleur » ; (Li et Bou-Zeid, 2013) ;
- l'urbanisation modifie les champs de pluie et la spatialisation régionale des précipitations (Li *et al.*, 2013).

L'imperméabilisation des surfaces urbaines (goudronnage, bâtiments en ciment, parkings, toits, etc) provoquent un effet hydrologique important et des écoulements plus rapides qu'en zone rurale où l'eau s'infiltrerait pratiquement partout. Toutefois, certaines surfaces imperméables peuvent avoir des taux d'évaporation parfois plus élevés que les surfaces végétalisées, du fait de leur forte capacité de stockage de chaleur (Ramamurthy et Bou-Zeid, 2013).

Globalement, l'effet principal de l'urbanisation est la transformation de surfaces de terre végétale, cultivée ou non, et de végétation, en bâtiments et surfaces imperméables, d'où ce rôle à la fois climatique et hydrologique des villes. Parfois on coupe les arbres préventivement à une chute, mais le plus souvent il s'agit d'aider la spéculation immobilière comme cela s'observe à Ziguinchor ou Bignona (figures 7a et 7b), deux villes de Basse Casamance (Sénégal).



7a



7b

Figures 7a et 7b : la cause de l'unanime impression de réchauffement des villes au Sénégal ; 7a : coupe de deux fromagers pluri-centenaires dans une rue du centre de Ziguinchor ; seul l'un d'eux était mort, mais on abat les deux ; 7b : coupe de trois gros manguiers dans une concession de Bignona ; le manguiier, en feuille durant la saison sèche, est un « climatiseur naturel » bien plus efficace que le fromager, qui perd ses feuilles en saison sèche

Conclusion : de la nécessité d'un vrai reverdissement généralisé

Malgré le reverdissement général que l'on perçoit depuis une vingtaine d'années à travers le Sahel, le régime des cours d'eau semble traduire une poursuite de la diminution de la capacité de rétention en eau des sols. Le paradoxe n'est qu'apparent ; il y a très probablement un reverdissement, l'évolution des indices de végétation le montre ; mais par ailleurs, on n'a pas une progression nette de la RUE (Efficacité des précipitations) et ce reverdissement s'accompagne de la poursuite de la dégradation de certains espaces devenus très encroûtés et imperméables, et donc contributifs du ruissellement. C'est sur ces espaces dégradés qu'il faut intervenir désormais en priorité, à la fois pour limiter le ruissellement et la formation des inondations, et pour fixer eau et carbone dans le sol, afin d'améliorer la résilience des agro-systèmes aux sécheresses, probables et au réchauffement, inéluctable et plus rapide en Afrique de l'Ouest que sur la moyenne du globe.

Ce reverdissement doit aussi s'appliquer en ville ; les villes d'Afrique de l'Ouest, traditionnellement très arborées et aérées, sont en train de subir les effets de la spéculation immobilière, et jardins privés et publics, parcs et arbres au bord des routes, disparaissent très vite, comme ont disparu à peu près tous les milliers de flamboyants que la mairie de Dakar avait planté au début du millénaire sur la VDN (voie de dégagement Nord) devenue entretemps un axe majeur de la circulation dans la capitale du Sénégal. Dakar (la deuxième capitale la plus polluée de la planète d'après un rapport OMS 2018 : <http://www.who.int/fr/news-room/detail/02-05-2018>) et avec elle la plupart des villes du Sénégal

(Ziguinchor constituant ces dernières années un record de « dé-verdissement) et à un moindre degré plusieurs villes d’Afrique de l’Ouest, accélèrent en leur sein le réchauffement planétaire en détruisant la seule arme efficace à l’échelle micro-climatique, l’arbre.

En résumé :

- les arbres créent un micro-climat et produisent de la fraîcheur, en dehors de leur seule ombre ;
- ils freinent le développement de l’îlot de chaleur urbaine ;
- ils constituent un outil de résilience face au réchauffement et face aux sécheresses à venir.

Conclusion

Résilience des sociétés, des terroirs et des ressources en eau

« Avant on coupait du bois à cinq kilomètres de Niamey. Aujourd'hui, il faut aller à 200 kilomètres, à l'intérieur du Burkina Faso voisin », explique Hama Maïgari, un vendeur de bois. Faute d'arbres, le désert s'étend inéluctablement et *« engloutit doucement les terres fertiles »,* au moment où *« la population de plus en plus nombreuse en a besoin pour l'agriculture »,* un expert onusien. (*« Le gaz pour enrayer la désertification »,* Le Monde/AFP du 24/7/2015)

Le Sahel a connu une crise climatique, environnementale et sociale forte dans les 30 dernières années du 20^{ème} siècle. Les pluies ont baissé de 20 à 30%, pendant 25 ans, sur plusieurs millions de km². Mais comme on l'a vu au, le Sahel et les 40 millions de ruraux sahéliens sont toujours là, chaque année plus nombreux ; le milieu comme les sociétés semblent avoir fait preuve d'une grande résilience, face à ce qui a été le plus fort signal de changement climatique jamais perçu sur la planète, le déficit pluviométrique des années 1968-1995. Par ailleurs, le Sahel est aussi une des régions de la planète où la température a le plus augmenté depuis le milieu du 20^{ème} siècle : +1,2 °C contre +0,7°C en moyenne ; et les températures minimales de mars-avril-mai ont localement augmenté de plus de 3°C (Guichard, 2010).

De la sécheresse au réchauffement climatique....

Il est bien connu que le sort de l'eau de pluie arrivant sur la surface terrestre dépend de l'état des sols et de leur couverture végétale. De ces deux éléments principaux dépendant la capacité de rétention en eau de ces sols et donc une énorme partie du devenir de l'eau (chapitre 1).

Ces conditions sont évidemment très différentes dans des zones naturellement boisées ou très végétalisées comme les zones guinéennes et sud soudaniennes (chapitre 2), où l'infiltration de l'eau sera favorisée, par rapport à des régions arides ou semi-arides au couvert végétal bien plus épars. En effet, dans ces dernières, et ce dès le début de la sécheresse évoquée ci-dessus, au début des années 1970, on a observé que la baisse des pluies était accompagnée d'une augmentation paradoxale des débits des cours d'eau (chapitre 3) ; par la suite l'augmentation des pluies a exacerbé un processus, l'accroissement rapide des écoulements, qui semble causé par la conjonction de plusieurs éléments :

- Tout d'abord, la mise en culture de grandes zones du Sahel (chapitre 4) a mis à nu des sols souvent sableux et fragiles, ce qui a globalement accru ruissellement et érosion ; mais aussi modifié la structure de ces sols ;
- la dégradation de la structure des sols sahéliens, déjà naturellement pauvres, et en particulier l'extension rapide des sols encroûtés, en croûte de type ERO surtout, mais aussi des croûtes biologiques ou algales ; ceci semble être l'élément explicatif fédérateur à travers l'ensemble du Sahel ; cette dégradation provoque ruissellement et érosion, donc ensablement en aval, des lits des cours d'eau, ce qui réduit leur hydraulité et accroît le risque d'inondation par débordement (chapitre 5) ;
- La reprise des précipitations est un élément explicatif seulement relatif ; en effet, pour le moment sur la dernière période connue (période 2011-2017), on n'observe pas **en absolu**, d'augmentation significative ni du nombre de jours de pluie, ni du cumul de

précipitation tombées lors de pluies de fort cumul journalier, ni au Sénégal, ni dans le bassin du Niger Moyen, par rapport aux décennies humides 1950-1970 ; cela ne s'oppose pas aux travaux de Panthou (2013) qui a noté une augmentation **relative** de cette « intensité » des pluies : la proportion de la pluie totale annuelle tombée lors d'évènement de fort cumul journalier a très sensiblement augmenté, et elle est plus élevée que durant les décennies humides. Par ailleurs, on manquait jusque récemment (Panthou et al., 2018) d'éléments pour déterminer si les intensités de pluie horaires ou instantanées ont augmenté sensiblement ou non (chapitre 6) ; maintenant et grâce à ces travaux, cette tendance est avérée ;

- la hausse des ruissellements et de l'érosion a elle-même entraîné une dynamique de ruptures d'endoréisme, de nombreuses mares, en débordant, mettant en communication des bassins autrefois fermés, avec les vallées des grands cours d'eau. Cet accroissement de l'exoréisme se traduit donc par l'extension des bassins versants contributifs à l'écoulement (chapitre 7) ;
- enfin l'urbanisation a entraîné deux séries de problèmes (chapitre 8):
 - o D'une part elle se traduit par une imperméabilisation des sols et des terrains, provoquant un accroissement des écoulements ;
 - o D'autre part, cette urbanisation, souvent spontanée, englobe des espaces réputés inondables et non constructibles, du fait du manque de place, du retard des politiques publiques et du manque d'autorité compétente à empêcher l'urbanisation spontanée ; c'est le cas sur la rive droite à Niamey (Haro Banda = outre fleuve) et dans les Niayes à Dakar, clairement.

Ces dernières années, alors que la pluviométrie s'est rétablie à son niveau séculaire, c'est sur le front des températures que les changements semblent les plus rapides ; la première conséquence observée en Afrique de l'Ouest en est indirecte : ces plaines littorales et ses nombreux estuaires, très profonds pour la plupart, font que le fait littoral se ressent à des dizaines, voire des centaines de kilomètres à l'intérieur des terres. De ce fait, l'élévation du niveau océanique revêt un impact fort sur la côte de l'Afrique de l'Ouest soudano-sahélienne (chapitre 9). L'eau douce est de plus en plus remplacée par l'eau salée, les traits de côte sont souvent menacés, alors même qu'ils protègent des mangroves très étendues et une riziculture ancestrale.

Par ailleurs, les travaux et synthèses du GIEC prévoient un scénario probable d'une nouvelle phase sèche pour l'ouest du Sahel après 2030 ou 2035. Il est important de profiter de la période actuelle, probablement plus favorable que celle à venir, pour restaurer les agrosystèmes et en améliorer les capacités d'adaptation et de résilience en vue d'éventuelles sécheresses à venir (chapitre 10) ; par ailleurs, le réchauffement planétaire est malheureusement inéluctable et on sait que toute l'Humanité doit s'y préparer.

C'est pourquoi il est important de proposer dès maintenant de renforcer tous les efforts en cours afin de reverdir le Sahel et l'Afrique de l'Ouest en général, afin d'y atténuer les effets attendus du réchauffement et d'éventuelles sécheresses. Le reverdissement (et là où cela se justifie et est réalisable sans accaparement, le reboisement) est un outil de progression de la résilience, et les arbres, les arbustes et tout type de végétation doivent être considérés comme des atténuateurs d'extrêmes climatiques (chapitre 11). Cet effort doit porter aussi bien sur les zones rurales que sur les villes, en très rapide croissance en Afrique de l'Ouest.

La végétation, arme de résilience face au réchauffement climatique et aux sécheresses

Les expériences réussies (nombreuses) de récupération des sols et des terroirs montrent que le but premier du paysan, de l'hydrologue, de l'aménageur, du responsable politique, doit être

d'œuvrer à faire infiltrer toute l'eau des pluies au moment où elle arrive à la surface du sol ; c'est ainsi que l'eau est la plus utile et la plus bénéfique, la plus productive pour tout le monde aussi bien sur place qu'en aval : le stockage naturel du maximum d'eau possible est gage de débits de base de longue durée et de pics de crue amoindris. Rétablir l'infiltration et la capacité des sols à retenir l'eau c'est lutter contre la désertification et rétablir des terroirs productifs. Cela permet, avec l'eau, de stocker aussi :

- Les intrants (déchets végétaux, fumier, compost, etc) que les agriculteurs peuvent incorporer aux sols ;
- Le carbone, de par l'amélioration de la productivité végétale, autant celle de la végétation naturelle que de celle des cultures ; les puits de carbone sont ainsi plus nombreux et plus efficaces ;

Cela conforte en même temps :

- Des services écosystémiques en plus grand nombre, l'accès aux ressources étant amélioré, les risques hydrologiques (inondations, étiages) étant atténués ;
- Et de ce fait, la population ; celle-ci peut pratiquer une gamme d'activités agro-sylvo-pastorales plus étendue, exploiter une gamme de semences plus large, espérer des revenus plus élevés et surtout une meilleure sécurité alimentaire, le meilleur accès aux ressources et aux services écosystémiques permettant de consacrer plus de temps à la formation (scolaire pour les enfants).

La fixation d'une végétation ligneuse et herbacée plus abondante produit plus de matière organique et permet d'enclencher un processus vertueux de récupération des sols, de leur fertilité, des services éco-systémiques associés, tels que fournitures de petit bois et de fourrage pour les usages ménagers.

Faire infiltrer l'eau passe, en cas de dégradation déjà réelle et observée, par la destruction de l'encroûtement des sols, ce qui est réalisable par des techniques le plus souvent issues des savoirs locaux, comme le zaï originaire du plateau mossi du Burkina Faso. Longtemps, l'abondance de terrains pouvant encore être défrichés, et la possibilité de réduire la durée des jachères ont rendu peu attractifs les travaux de récupération de sols encroûtés. Mais à présent, avec des densités de population de 30 à plus de 100 hab/km² dans tout le Sahel, le moindre espace cultivable doit être mis à profit, que ce soit là où la pratique de la jachère est encore possible, ou bien là où elle a été abandonnée. Si l'encroûtement (dont les causes ont été abordées en particulier au chapitre 5) est la cause de la désertification, il en est aussi l'indicateur le plus efficace ; ce que Albergel et Valentin (1988) ont nommé « sahélistation » est une manifestation de la désertification, c'est la marque de cette désertification dans des espaces qui ne devraient pas en être victimes, les espaces soudaniens, où la pluviométrie suffit en temps normal à maintenir une biomasse adaptée aux sols et enrichissant régulièrement le sol par fixation de l'eau, du carbone, de l'azote, etc.... Et en conséquence, briser l'encroûtement, rétablir la possibilité d'infiltrer l'eau, reconstituer la capacité des sols à retenir cette eau (et les nutriments, le carbone, etc), c'est donc lutter contre la désertification.

Cela demande de la main d'œuvre, or le paysan sahélien n'a de travail intense que durant les trois ou quatre mois d'hivernage, sauf à pratiquer, comme le font souvent les femmes, des activités de contre-saison : petit maraîchage en général. Cela lui laisse le temps d'œuvrer à la restauration des sols, en particulier, à l'approche de l'hivernage, en plantant et arrosant quelques arbres, en assurant leur protection (barrière d'épineux) ou en préparant des zaï, des cordons pierreux ou des banquettes. La lutte contre la dégradation des sols est le plus souvent spontanée, il s'agit d'un processus boserupien, les communautés rurales prenant en compte la densification des populations et des activités, s'attachent d'elles mêmes à consacrer du temps à modifier systèmes de cultures et mode de gestion de l'espace.

Les chemins de l'eau sont nombreux et différents d'une échelle à l'autre ; l'infiltration doit être encouragée de l'échelle ponctuelle à celle de la parcelle, c'est cela qui peut modifier durablement le bilan de l'eau. Malgré les nombreux travaux réalisés ces dernières années (entre autres, les expériences HAPEX Sahel et AMMA), on n'a pas acquis de certitude concernant la **rétro-action**, c'est-à-dire le rôle que jouerait la surface terrestre en retour sur la proche atmosphère et donc sur le climat ; les physiciens de l'atmosphère affirment que 90% de la vigueur de la Mousson provient des propriétés et variabilités océaniques, seuls 10% de cette dynamique provenant de la surface continentale et de ses variations. Les travaux récents de Pellarin *et al.*, (2013) et de Taylor *et al.*, (2012) laissent pourtant supposer que la température de surface terrestre (très influencée par les précipitations antérieures) jouerait un grand rôle dans le déroulement des grains (SCM, systèmes convectifs de méso-échelle), qui véhiculent et provoquent 80 à 90% des précipitations en zone sahélienne. Point n'est besoin pour l'heure de chercher à prouver qu'un continent plus sombre (car plus végétalisé) aurait un albedo inférieur donc conserverait une plus grande quantité de chaleur et d'énergie, donc de convection potentielle ? A l'échelle du terroir, il est clair que la végétation apporte de la fraîcheur par l'ombre et par l'évapotranspiration.

Pour encourager l'infiltration de l'eau il faut « *rugosifier* » le terroir à petite et à grande échelle. A l'échelle ponctuelle et celle du travail paysan, le sarclage est l'action de base, celle qui conduit, comme on l'a vu, à un accroissement très fort de l'infiltration, permettant, les premiers jours du moins, au sol d'absorber jusqu'aux valeurs les plus fortes d'intensité des pluies.

Mais le travail doit aussi s'exercer sur la simple taille des parcelles, qu'il faut conserver petites afin de ne pas laisser l'érosion hydrique et l'érosion éolienne avoir prise sur de grandes surfaces dégarnies. La *rugosification* est aussi une intensification écologique à base d'utilisation de main d'œuvre pour compenser la faible fertilité des sols sableux sahéliens. Donc les parcelles, petites, permettent plus facilement d'appliquer les pratiques simples et bien connues du savoir paysan : apport de fumier et compost, paillage (le « *mulching* » des anglo-saxons), associations de cultures et assolements, association cultures/arbustes, association cultures arbres légumineuses (le *faidherbia albida*, et d'autres...), haies d'arbres utiles (fruitiers, légumineuses, brise vent, épineux protégeant du bétail, etc... bien des espèces jouant plusieurs rôles en même temps). La petite taille des parcelles permet surtout, à l'échelle d'un terroir ou d'un finage villageois, puis à l'échelle de la région, de composer un paysage morcelé où l'eau trouve de nombreux chemins pour s'infiltrer. Ce morcellement est gage de protection contre les érosions hydrique et éolienne, en piégeant les particules et en cassant la vitesse du vent. En plus de protéger contre la violence des flux, haies, arbres isolés, massifs de broussailles et/ou reboisement dans les fourrières, les talus routiers, les zones les plus difficiles à cultiver, constituent, en même temps que des zones d'infiltration prioritaires, des puits de carbone.

Outre les techniques d'agro-foresterie et de restauration des sols déjà évoquées (régénération naturelle assistée –RNA-, zaï, banquettes, cordons pierreux, etc), des pratiques telles que le petite et la micro-irrigation, le jardinage, le maraîchage, les formes d'agro-écologie, de permaculture, toutes les techniques connues et perpétuées dans les oasis, sont autant d'approches complémentaires et souvent utilisables ensemble ou combinées. Elles permettent à la fois d'augmenter la productivité des terroirs et les rendements agricoles, de diversifier les cultures, de restaurer sol et manteau végétal dégradés, d'accroître les revenus des ménages ceci tout en diversifiant les sources de revenus, d'améliorer la résilience des sociétés et des agro-systèmes et les services éco-systémiques. Tous ces éléments contribuent à améliorer la qualité de vie des ménages ruraux, en réduisant leur vulnérabilité face aux risques climatiques, en réduisant le temps consacré à la collecte de l'eau, du bois et des fourrages, leur permettant, surtout aux femmes et aux enfants, de consacrer plus de temps aux activités de leur choix : activités productives ou de transformation, éducation, loisirs, etc...

A l'échelle du terroir ou de la communauté, cela permet d'obtenir un meilleur cadre de vie, plus ombragé, moins sujet aux vents de poussières, moins soumis au ruissellement et à l'érosion ; cela crée des puits de carbone et des micro-climats moins extrêmes (moins de chaleur, moins de sécheresse, moins de poussière).

A l'échelle du bassin versant, le meilleur stockage naturel de l'eau améliore la capacité de rétention en eau des sols, des terroirs et donc des bassins, ce qui limite **les risques hydriques**, qu'ils soient liés aux excès (écrêtement des pics de crue donc réduction du risque d'inondations) ou aux déficits pluviométriques et hydrologiques associés (soutien d'étiage par accroissement du stockage naturel des bassins). Ceci est particulièrement important dans une Afrique de l'Ouest en voie d'urbanisation très rapide du fait du retard relatif par rapport aux autres sous régions de la planète. Les villes sont touchées de manière récurrente, depuis une décennie (chapitre 8), par des pluies apparemment relativement plus « intenses » (chapitre 6) par rapport aux périodes sèches, de manière moins claire par rapport aux décennies humides passées ; par contre, le changement climatique provoque indirectement depuis plusieurs décennies un processus apparemment inéluctable pour les 3-4 prochaines décennies : l'élévation du niveau océanique (chapitre 9) et ses conséquences déjà importantes dans cette sous région aux zones littorales très profondément ancrées dans le continent par l'intermédiaire d'estuaires profonds et de plaines côtières très plates et étendues, très souvent composées de vasières : érosion littorale et salinisation des secteurs bas sont à l'œuvre, menaçant l'agriculture et localement les mangroves. Cependant, globalement, l'élévation du niveau océanique semble plutôt favorable au développement de la mangrove, permettant l'entrée de volumes accrus d'eau à salinité relativement plus faible dans des bras de mer soumis à une évaporation intense et à une sursalure saisonnière ou permanente suivant les sites. La mangrove d'Afrique de l'Ouest est en pleine croissance (Andrieu, 2018).

Enfin, l'irrigation peut être une des pratiques d'intensification vertueuse, si elle est bien gérée et ne dégrade pas les sols comme cela s'est vu trop souvent au 20^{ème} siècle.

Comme on l'a vu, la communauté scientifique cherche de manière de plus en plus accentuée à démontrer l'ampleur de la rétro-action surface/atmosphère. Si le climat régional n'est peut être pas modifié par la surface continentale (couverts végétaux ou sols nu ?), la somme des micro-climats rendus moins extrêmes par l'accroissement de la densité végétale est un élément clé dans l'amélioration du bien être des communautés rurales.

Ces propositions nous paraissent à même de freiner (voire de stopper et inverser) la dégradation hydrologique, qui semble persister au Sahel et en Afrique de l'Ouest en général (comme en témoigne, chapitre 2, l'augmentation des coefficients de tarissement dans le Fouta Djallon) malgré le reverdissement unanimement observé, et qui a été décrite dans cet ouvrage. L'opposition entre les milieux sahéliens hydrologiquement « dégradés » et ceux du « château d'eau » guinéen, voire de l'ensemble de la bande soudano-guinéenne, qui ne semblaient pas avoir subi de modifications profondes de leur comportement hydrologique, est en effet en train de s'atténuer. Si certains des milieux guinéens et soudaniens demeurent globalement « cappusiens » grâce à une bonne capacité de rétention en eau des sols, on observe des indices de dégradation de cette propriété dans de nombreux secteurs, y compris les plus humides.

Il s'agit donc, ni plus ni moins de transformer le Sahel en oasis, c'est-à-dire en un immense jardin où l'utilisation d'une main d'œuvre en nombre croissant permet de compenser la faible fertilité des sols par une optimisation de l'usage des ressources en commençant par la ressource en eau. Les milliards de m³ d'eau annuels qui se perdent en écoulement rapide (hortonien) sans aucun profit pour la végétation, les sols et les cultures, doivent être mobilisés pour et par ces derniers, de manière à accroître la productivité primaire des terroirs tout en limitant les risques hydriques.

Le projet de Grande Muraille Verte, cher aux anciens présidents Abdoulaye Wade du Sénégal et Olusegun Obasanjo du Nigeria aurait pu être un élément précurseur, aux trois conditions suivantes :

- Que ce soient les sahéliens qui plantent les arbres **volontairement** et en suivant les conseils des agro-forestiers et des anciens (souvent les mêmes savoirs !!), qu'ils se les approprient et les soignent, puissent les exploiter quand ils seront productifs ;
- Qu'il s'agisse d'un **reverdissement** et non d'un reboisement : il n'y a pas, en dehors de certains terrains très dégradés (et là, oui un reboisement est à encourager, pour reconstituer un sol et une litière), d'espaces superflus qu'on puisse se permettre de soustraire aux paysans pour y faire un reboisement ; par contre, il faut remettre des milliards d'arbres et d'arbustes en bordure de champs, dans les villages, dans les fourrières là où elles existent, sur les talus routiers, les pentes fortes, les espaces déjà très érodés ; et d'autres milliards d'arbres et arbustes au milieu des champs (légumineuses en priorité) ; il faut que les habitants choisissent des **arbres et arbustes utiles** (fruitiers, épineux de protection, légumineuses, médicinaux, tiges de constructions, petit bois de cuisine, etc) et qu'ils en aient la jouissance le moment venu, avec, à nouveau, les conseils des agro-forestiers pour éviter une quelconque surexploitation ; on peut même dans les cas extrêmes ou particuliers utiliser des espèces considérées parfois comme néfastes : le neem (*Azadirachta indica*) est très utile pour son ombre quand rien d'autre ne peut pousser, et ses graines sont insecticides ; il est donc très utile dans les villages ; même l'eucalyptus (*Eucalyptus sp*) qui lui aussi acidifie les sols et pompe littéralement la moindre goutte d'eau qu'ils contiennent, peut être utilisé pour fixer les terrains érodés surtout en pente ; il produit très vite du bois apprécié pour la construction ; il faut donc aussi affiner les questions foncières (sans toutefois remettre en cause les domaines nationaux) de manière à ce que celui qui plante un arbre puisse en tirer profit ;
- La troisième condition est bien sûr que le projet ne s'arrête pas à ce qu'il a pu être au tout début, un barrage technocratique de 15 kilomètres de large (pourquoi 15 ?) ; c'est bien sûr sur les **500 à 1000 km du nord au sud** que constituent le Sahel et la zone nord soudanienne en voie de sahélistation, qu'il faut reverdir l'espace.

A contrario, les grandes cultures telles que celles qui vont avec l'accaparement des terres dans presque tous les pays du Sahel (en tout cas au Sénégal, au Mali, au Niger et même au « pays des hommes intègres », le Burkina Faso), et qui consistent à couper à blanc pour installer des grandes cultures, ont toutes conduit à la désertification (par l'encroûtement des sols) ; quand de plus, il s'agit de faire des agro-carburants pour que les automobilistes du nord puissent continuer à ruiner la planète de leur civilisation « automobile », ou des cultures industrielles dans des pays extrêmement dépendants d'importation agro-alimentaires, ces grandes cultures sont évidemment à proscrire, et encore plus si ces cultures industrielles donnent lieu à des exportations de produits bruts non transformés, avec ré importation de produits finis. La coupe à blanc entraîne très vite érosion hydrique et éolienne et la monoproduction épuise les sols ; le modèle colonial extraverti de l'arachide au Sénégal, instauré il y a 150 ans pour soumettre l'ancienne colonie à l'ancienne métropole est exactement un modèle désertificateur, appauvrissant le pays et le rendant chaque jour plus dépendant des importations (y compris d'huile d'arachide !), laissant ses sols nus pendant des mois à la merci de l'érosion éolienne décuplée par la taille des parcelles sans obstacle pour les flux. Cependant quand l'arachide entre dans un assolement, et est cultivée, comme en pays sérére, dans des parcelles entourées et clairsemées d'arbres, elle peut devenir vertueuse, et elle n'a plus alors comme inconvénient que d'être exportée brute, la « modernisation » du Sénégal s'étant traduite par la fermeture d'un grand nombre d'huileries.

Les habitants du Sahel, comme on l'a vu au début de cette conclusion, ont fait montre, à l'égal des agro-systèmes, d'une grande résilience et de grandes capacités d'adaptation face à la sécheresse. Ils sont nombreux à dire qu'ils sont nettement plus vulnérables aux effets des politiques publiques qu'à ceux du changement climatique. On peut supposer qu'ils sauront d'eux-mêmes (avec si nécessaire l'appui des agro-forestiers, des chercheurs, des agronomes, des sociologues, etc.), là où cela n'est pas encore amorcé, prendre le chemin de l'intensification vertueuse qui est autorisée au départ par l'infiltration de l'eau pour l'optimisation de ses usages, dès l'arrivée de la goutte de pluie sur la surface terrestre. Si l'infiltration et l'accroissement de la capacité de rétention en eau des sols et des terroirs sont les plus efficaces des armes anti-désertification, elles sont aussi les éléments conditionnant l'intensification vertueuse et spontanée qui devrait permettre aux communautés sahéliennes, plus exactement sahélo-soudaniennes, d'assurer la sécurité alimentaire à des pays dont la population va encore tripler ou quadrupler d'ici la fin du 21^{ème} siècle.

De nombreux secteurs du Sahel portent déjà plus de 100 hab/km², prouvant que Ester Boserup avait raison en s'opposant aux théories malthusiennes en vogue après les indépendances ; on peut en général faire confiance aux communautés rurales et aux sociétés pour s'adapter et adapter les agro-systèmes à une densité de population plus élevée, même si cela dépend aussi de la mobilité sociale, de migrations en général choisies pour compenser certaines lacunes ou pour affronter des situations de crise comme celles qui ont secoué le Sahel et le secouent encore. On peut même entrevoir que l'Afrique de l'Ouest est un laboratoire spontané d'expériences « boserupiennes » : le sud du bassin arachidier sénégalais, le pays dogon (Mali), le plateau mossi (Burkina Faso), le bassin de Maradi (Niger) sont des exemples vivants du fait que les paysages et les agrosystèmes sont bien plus résilients et boisés sous une densité de 100 à 300 habitants au km² que avec des densités de 10 à 30 hab/km².

Cependant, malgré la vision optimiste développée dans cet ouvrage, la crise couve, comme en témoignent d'une part le succès des djihadistes auprès de populations essentiellement musulmanes mais soufies, d'autre part l'augmentation significative des migrants lors des années de sécheresse, avec l'horrible indicateur que représente le nombre de morts noyés en Méditerranée au printemps 2015, suivant une année 2014 déficitaire en pluies et en récoltes dans une grande partie de l'Afrique sub-saharienne... cependant, l'année 2016 voit l'afflux s'accroître alors que l'année 2015 a été bonne pour les récoltes au Sahel... même si 2017 a par ailleurs été une année record en terme de traversées de la Mer Méditerranée entre Maroc et Espagne, le nombre de migrants risquant leur vie dans la traversée de la Méditerranée après celle du désert, semble diminuer, sans que l'on sache bien sûr ce qu'il en sera demain.....

Milieus et sociétés semblent faire preuve d'une certaine résilience, certes, mais néanmoins, malgré le reverdissement signalé presque unanimement par les télédéTECTEURS, on assiste au Sahel à une diminution continue de la capacité de rétention en eau des sols, et donc à un accroissement des écoulements et des débits, qui serait plutôt un indicateur de dégradation généralisée des milieux et des agro-systèmes. Il est donc plus qu'urgent que les sociétés (bien plus que les décideurs, ou les bailleurs de fonds, car un reverdissement participatif, voulu et choisi par la populations est incomparablement plus efficace et général que les saupoudrages médiatisés et technocratiques, en outre extrêmement coûteux !) se mobilisent pour reverdir vraiment le Sahel (et la bande soudanienne, qui se « sahélicise » encore trop souvent) et adoptent une intensification écologique de ces agro-systèmes, afin d'améliorer leur productivité primaire, de capturer eau, nutriments et carbone, et ce faisant, de limiter les risques hydriques en améliorant la capacité des sols à retenir l'eau.

Et l'eau dans tout ça ? elle est la condition, certes, mais surtout un outil à maîtriser pour en optimiser tous les usages, et le meilleur moyen est de la stocker là où elle est le plus utile, dans le sol, où elle fixe avec elle azote, carbone et nutriments, sol qui est le meilleur et le plus naturel des réservoirs, assurant une redistribution qui facilite grandement la gestion des ressources à l'échelle des bassins, rendant bien plus aisée la gestion des barrages quand ceux-ci apparaissent comme indispensables, en particulier pour alimenter des périmètres irrigués en zone aride ou semi-aride, et parfois pour le simple approvisionnement en eau potable. Les moyens de stocker l'eau dans les sols et les bassins sont connus, ils sont issus des savoirs locaux et sont à la portée de tous les acteurs des zones rurales, à commencer par ceux qui pratiquent une activité agro-sylvo-pastorale.

En résumé,

- **Les milieux et sociétés ouest africaines sont toujours là après le choc de la sécheresse ; la population des zones rurales du Sahel est passée de 15 à 45 millions d'habitants depuis les années 1970 et il faut veiller à la fois à nourrir les populations et préserver les agrosystèmes et écosystèmes ; en effet, à la sécheresse climatique a souvent succédé une sécheresse édaphique, l'eau ayant du mal à s'infiltrer dans des sols dégradés ;**
- **Les ressources en eau sont suffisantes pour accompagner la nécessaire intensification écologique des activités agro-sylvo-pastorales ainsi que celle de la pêche ; mais cette intensification nécessite plus que jamais que la gestion de la ressource eau se fasse en lien avec celle de l'espace, c'est-à-dire avec celle des terres, des sols et des ressources végétales ;**
- **Les sociétés et les milieux ont fait preuve d'une grande résilience face au changement climatique ; il leur reste à renforcer cette résilience et leur adaptation car le chemin vers la sécurité en termes de ressources en eau et ressources vivrières est encore parsemé d'obstacles naturels, humains, parfois culturels.**
- **Par ailleurs, les sociétés ont montré comment les savoirs locaux et l'adaptation menaient à renforcer sérieusement leur résilience, et aussi celle des agro-écosystèmes.**
- **Cependant, les experts du GIEC montrent que la température de la planète va continuer à s'accroître et plus encore en Afrique de l'Ouest ; et par ailleurs, ils prédisent une nouvelle phase de sécheresse dans l'Ouest de l'Afrique de l'Ouest après 2030.**
- **Il faut donc tout faire dès à présent pour accroître la résilience des agro-écosystèmes ouest africains qui connaissent par ailleurs un fort dynamisme démographique. Faire infiltrer l'eau pour favoriser le reverdissement est l'action de base, à l'échelle ponctuelle, qui permettra d'améliorer cette résilience et à perpétuer en intensifiant les activités agro pastorales des sociétés ouest-africaines.**

Références

- Abernethy, C. L., Bunting, A. H., Kassama, H. (1985). *Development of irrigation agriculture in Africa: needs and justification*, Rome, Italy, FAO Land, Population and Food Study, FAO.
- ABN – Autorité du bassin du Niger (2007). *Elaboration du Plan d'Action de Développement Durable (PADD) du bassin du Niger ; phase 2 : schéma directeur d'aménagement et de gestion*, Niamey, ABN.
- Achard, F., Beuchle, R., Mayaux, P., Stibig, H-J., Bodart, C., Brink, A., Carboni, S., Desclée, B., Donnay, F., Eva, H., Lupi, A., Rasi, R., Seliger, R. et Simonetti, D. (2014). Determination of tropical deforestation rates and related carbon losses from 1990 to 2010. *Global Change Biology* 20, 2540–2554, doi: 10.1111/gcb.12605
- Adams, Adrian (1999). A grassroots view of Senegal River development agencies : OMVS, SAED. P.2. World Commission of Dams Regional Consultation, Le Caire, 8-9/12/1999, 5 p.
- Adams, Adrian et So, Jaabe (1996). *A claim to land by the river: a household in Senegal*. Ed. Oxford University Press.
- Afrique Agriculture (2001). Riz : mais où va le Sénégal ?. *Afrique Agriculture*, n°294, juillet-août 2001.
- 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., Koné, B., Hattermann, F.F., Paton, E.N. (2016). Time series analysis of floods across the Niger River Basin. *Water*, 8, 165; doi: 10.3390/w8040165.
- Albergel, J. et Valentin, C. (1988). « Sahélisation » d'un petit bassin versant soudanien : Kognéré-Boulsa au Burkina Faso. In : Bret, B., Ed. *Les hommes face aux sécheresses, Nordeste brésilien-Sahel Africain*. Paris : EST/IHEAL, coll. Travaux et Mémoires, 42 : 179-191.
- 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*; IAHS publication N° 168, Wallingford, UK,; pp. 355-365.
- Ali, A., Lebel, T. (2009). The Sahelian standardized rainfall index revisited. *Int.J. Climatol.* 29, 1705-1714. doi: 10.1002/joc.1832.
- Alkama, R., et Cescatti, A. (2016). Biophysical climate impacts of recent changes in global forest cover, *Science*, 351(6273), 600-604. doi:10.1126/science.aac8083
- Amani, A.; Nguetora, M. (2002) Evidence d'une modification du régime hydrologique du fleuve Niger à Niamey. In *FRIEND 2002 Regional Hydrology: Bridging the Gap between Research and Practice*, Proceedings of the Friend Conference, Cape Town, South Africa, 18-22 March, 2002; Van Lannen, H., Demuth, S., Eds.; IAHS publication N°274, Wallingford, UK, 2002; pp. 449-456.
- AMAP, (*Snow, Water, Ice and Permafrost in the Arctic (SWIPA)* (2011) - **Executive Summary** [archive]. <https://www.amap.no/documents/doc/swipa-2011-executive-summary-snow-water-ice-and-permafrost-in-the-arctic/744>

- Ambouta, J.M.K., Valentin, C. et Laverdière, M.R. (1996). Jachères et croûtes d'érosion au Sahel ; *Sécheresse*, 7 : 269-275.
- AMMA (2001). Livre Blanc AMMA, IRD/Météo France, 82 pages
- Amogu, O. (2009). *La dégradation des espaces sahéliens et ses conséquences sur l'alluvionnement du fleuve Niger : méthodes expérimentales et modélisation*; Ph.D. Thesis ; Université Joseph Fourier: Grenoble, 360 p. France,
- Amogu O., Descroix L., Yéro K.S., Le Breton E., Mamadou I., Ali A., Vischel T., Bader J.-C., Bouzou Moussa I.B., Gautier E., Boubkraoui S., Belleudy P. (2010). Increasing River Flows in the Sahel ?. *Water*, 2(2):170-199.
- Amogu, O., Esteves, M., Descroix, L., Souley Yéro, K., Rajot, J-L., Malam Abdou, M., Boubkraoui, S., Lapetite, JM., Dessay, N., Zin, I., Vandervaere, J-P., Bachir A., Bouzou Moussa, I., Gautier, E., Le Breton, E., Mamadou, I. (2015). Runoff evolution according to land use change in a small Sahelian catchment. *Hydrol Science Journal*, 60:1, 78-95, DOI: 10.1080/02626667.2014.885654.
- Amoussou, E., Camberlin, P. et Mahé, G. (2012). Impact de la variabilité climatique et du barrage Nangbéto sur l'hydrologie du système Mono-Couffo (Afrique de l'Ouest), *Hydrological Sciences Journal*, 57 :4, 805-817. DOI:10.1080/02626667.2011.643799.
- André, V. et Pestaña, G. (2002). Les visages du Fouta Djallon. Les Cahiers d'Outre Mer (en ligne), 217, janvier-février 2002.
- Andrieu, J. (2008). Dynamique des paysages dans les régions septentrionales des Rivières du Sud (Sénégal, Gambie, Guinée-Bissau). Thèse de géographie, Université Paris 7, 532 p.
- Andrieu, J. (2018). Land cover changes on the West-African coastline from the Saloum Delta (Senegal) to Rio Geba (Guinea-Bissau) between 1979 and 2015. *European Journal of Remote Sensing*, 51:1, 314-325, DOI: 10.1080/22797254.2018.1432295.
- Auclair, A., Lasserre, F. (2013). Aménagements, politiques et conflits sur l'eau en Afrique de l'Ouest, *Vertigo - la revue électronique en sciences de l'environnement* [En ligne], Volume 13 Numéro 2 | septembre 2013, mis en ligne le 04 octobre 2013, consulté le 15 octobre 2013. URL : <http://vertigo.revues.org/13994> ; DOI : 10.4000/vertigo.13994.
- Audouin, E., Vayssières, J., Odru, M., Masse, D., Dorégo, S., Delaunay, V., Lecomte, P. (2015). Réintroduire l'élevage pour accroître la durabilité des terroirs villageois d'Afrique de l'Ouest. Le cas du bassin arachidier au Sénégal. In Sultan, B., Lalou, R., Sanni, M.A., Oumarou, A. et Soumaré, M.A. (Eds) « *Les sociétés rurales face aux changements climatiques et environnementaux en Afrique de l'Ouest* ». Ed IRD, pp 403-427.
- Bader, J-C. et Lamagat, J-P. (2006). « Une ressource bien répartie », in *Sciences au Sud*, journal de l'Institut de recherche pour le développement (IRD), n° 34, p. 8-9.
- 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.
- Balme, M., Lebel, T., Amani, A. (2006). Années sèches et années humides au Sahel : *quo vadimus ? Hydrological Sciences – Journal–des Sciences Hydrologiques*, 51 (2),254-271.

- Bamba F., Mahe G., Bricquet J.P. et Olivry J.C. (1996). Changements climatiques et variabilité des ressources en eau des bassins du haut Niger et de la cuvette lacustre. In : *Fritsch J.M., Paturel J.E. & Servat E. (Eds) : Réseaux hydrométriques, réseaux télématiques, réseaux scientifiques : nouveaux visages de l'Hydrologie Régionale en Afrique*, XIIèmes Journées Hydrologiques de l'ORSTOM, Montpellier, CD-Rom ORSTOM, 26 p.
- Barbier, B., Yacouba, H., Hama Maïga, A., Mahé, G. et Paturel, J-E. (2009). Le retour des grands investissements hydrauliques en Afrique de l'Ouest : les perspectives et les enjeux Les grands projets hydrauliques et leurs dérives - *Varia Géocarrefour* vol. 84/1-2.
- Barbier, B., Ouedraogo, H., Dembélé, Y., Yacouba, H., Barry, B., Jamin, J-Y. (2011). L'agriculture irriguée dans le Sahel ouest-africain. *Cah. Agric.* Volume 20, numéro 1-2.
- Barbiero L, Mohamedou AO, Roger L, Furian S, Aventurier A, Rémy JC, *et al.* (2005). The origin of vertisols and their relationship to acid sulfate soils in the Senegal valley. *Catena* 59 : 93-116.
- Barusseau, J-P., Diop, E.H.S., Giresse, P. et Saos, J-L. (1) (1986). Conséquences sédimentologiques de l'évolution climatique fini-Holocène (102-103 ans) dans le delta du Saloum (Sénégal). *Océanogr. Trop.* 21 (1): 69-98.
- Bayart, J.F. (1998). Un conflit tectonique. La Croix, 6 septembre 1989.
- Beaudet, G., Coque, R., Michel, P. et Rognon, P. (1977). Y-a-t-il eu capture du Niger ?. *Bull. Assoc. Géogr. Franç.*, 445-446 : 215-222.
- Beer, T. (1997). *Environmental oceanography*. CRC Marine Science Series ? CRC Press, Boca Raton, New York, London, Tokyo, 367 p.
- Bélières, J-F., Jamin, J-Y., Seck, S-M., Tonneau, J-P., Adamczewski, A., Le Gal, P-Y. (2013). Dynamiques foncières, investissements et modèles de production pour l'irrigation en Afrique de l'Ouest : logiques financières contre cohérences sociales ? *Cah. Agric.* Volume 22, numéro 1.
- Bernus, E., Cressier, P., Durand, A., Paris, F., Saliège, J-F. (1999). Vallée de l'Azawagh (Sahara du Niger). Ed. SEPIA (études nigériennes n°57), 422 p.
- Besnier, A-L, Descroix, L, Nazoumou, Y. (2006). La gestion de l'eau dans le bassin du Niger : sur la voie d'une gestion plus concertée ; « Politique de l'eau ; grands principes et réalités locales » ed. F. Lasserre et A. Brun. Ch.11, Québec, pp 275-301.
- Béthemont, J. (2000). *Les grands fleuves*. Armand Colin, U géographie, Paris, 250p.

- Béthemont, Jacques (2001). Ressources en eau et logiques de conflits, une analyse géographique. Actes de l'école thématique « Les conflits d'usage en environnement : le cas de l'eau », p.125. Publications de la MSH-Alpes, CNRS, Grenoble p. 87-127.
- Béthemont, J., Faggi, P. et Zounagrana, T. P. (2003). La vallée du Sourou (Burkina Faso). Génèse d'un territoire hydraulique dans l'Afrique soudano-sahélienne. L'Harmattan, ISBN 2-7475-5672-7.
- Biasutti, M. (2013). Forced Sahel rainfall trends in the CMIP5 archive. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, 118: 1613–1623. doi:10.1002/jgrd.50206, 2013
- Biasutti, M. et Giannini, A. (2006). Robust Sahel drying in response to late 20th century forcings. *Geophysical Research Letters*, vol. 33, L11706, doi:10.1029/2006GL026067, 2006
- Bird, E.C.F. (1985). *Coastline changes. A global review*. John Wiley & Sons, Chichester, New York, Brisbane, Toronto, Singapore, 219 p.
- 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 | 2014, DOI : 10.4000/physio-geo.4243.
- Bodian, A., Dezetter, A., Deme, A. et Diop, L. (2016). Hydrological Evaluation of TRMM Rainfall over the Upper Senegal River Basin. *Hydrology*. *Hydrology* 2016, 3, 15; doi:10.3390/hydrology3020015.
- Boserup, E. (1965). *The Conditions of Agricultural Growth: The Economics of Agrarian Change under Population Pressure*, Allen and Unwin, London (Republished 1993: Earthscan Publications, London).
- Bosshard, Peter (1999). An act of economic and environmental nonsense. A case study on the Manantali dam project (Mali, Mauritania, Senegal). Communiqué de presse de la Déclaration de Berne, mars 1999.
- Bouaita' Y., Descroix, Luc, Lambert, Laurent, Senghor, Mamadou Sow, Souleymane Niang, Honoré Dacosta, Anastasie Mendy, Tidiane Sané (2018). A particularity of West African Sudanian coast: the “inverse estuaries” 3rd International Conference on African Large River Basin hydrology. Alger, 6-9 mai 2018.
- Boubacar Na'Allah, A., Malam Abdou, M., Ingatan Warzagan, A., Mamadou, I., Faran Maiga, O., Bouzou Moussa, I. et Descroix, L. (2017). Efficacité du sous-solage dans la restauration des sols sahéliens dégradés. Étude expérimentale sur le site de Tondi Kiboro, Niger. *Afr. Sci.* 13(6): 189–201.
- Bouchet, R. J. (1963). Evapotranspiration réelle et potentielle, signification climatique, in General Assembly Berkeley, vol. 62, pp. 134– 142, Int. Assoc. of Sci. Hydrol., Gentbrugge, Belgium.
- Bouguerra, L. (2007). L'irrigation peut être source de maladies *Sciences au sud*, n° 11.
- Bouzou Moussa, I, FaranMaiga, O, Karimou Ambouta, J-M, Sarr, B., Descroix, L, Moustapha Adamou, M. (2009). Les conséquences géomorphologiques de l'occupation des sols et des changements climatiques dans un bassin versant rural sahélien. *Sécheresse* 20(1) : 1-8.
- Boyer, J-F. (2002). Khronostat, logiciel d'analyse statistique de séries chronologiques. Orstom, 1998, IRD 2002, HSM, Montpellier.

- Braconnot P., Joussaume S., Marti O. & de Noblet N. (1999). "Synergistic feedbacks from ocean and vegetation on the African monsoon response to mid-Holocene insolation", *Geophysical Research Letters*, 26(16), p.2481-2484.
- Braconnot P., Otto-Bliesner B., Harrison S., Joussaume S., Peterchmitt J. Y., Abe-Ouchi A., Crucifix M., Driesschaert E., Fichet T., Hewitt C. D., Kageyama M., Kitoh A., Loutre M. F., Marti O., Merkel U., Ramstein G., Valdes P., Weber L., Yu Y. & Zhao Y. (2007). "Results of PMIP2 coupled simulations of the Mid-Holocene and Last Glacial Maximum - Part 2: feedbacks with emphasis on the location of the ITCZ and mid- and high latitudes heat budget", *Climate of the Past*, 3(2), p.279-296.
- Brandt, M., Hiernaux, P., Rasmussen, K., Mbow, C., Kergoat, L., Tagesson, T., Ibrahim, Y.Z., Wélé, A., Tucker, C.J., Fensholt, R. (2016). Assessing woody vegetation trends in Sahelian drylands using MODIS. based seasonal metrics. *Remote Sensing of Environment*, 183 215–225. doi: 10.1016/j.rse.2016.05.027.
- Brandt, M., Tappan, G., Diouf, A.A., Bèye, G., Mbow, C. et Fensholt, R. (2017). Woody Vegetation Die off and Regeneration in Response to Rainfall Variability in the West African Sahel. *Remote Sens.* 2017, 9, 39; doi:10.3390/rs9010039.
- Brandt, M., Wigneron, J-P., Chave, J., Tagesson, T., Penuelas, J., Ciais, P., Rasmussen, K., Tian, F., Mbow, C., Al-Yaari, A., Rodriguez-Fernandez, N., Schurgers, G., Zhang, W., Chang, J., Kerr, Y., Verger, A., Tucker, S. C., Mialon, A., Vang Rasmussen, L., Fan, L., Fensholt, R. (2018). Satellite passive microwaves reveal recent climate-induced carbon losses in African drylands. *Nature Ecology and Evolution*. <https://doi.org/10.1038/s41559-018-0530-6>.
- 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*, 3, 321-337.
- Brondeau F. (2011). L’agrobusiness à l’assaut des terres irriguées de l’Office du Niger (Mali). *Cah Agric* 20 : 136-43. doi : 10.1684/agr.2011.0472.
- Brooks N. (2004). "Drought in the African Sahel: long term perspectives and future prospects", *Tyndall Centre Working Papers*, U. o. E. Anglia.
- Brunet Moret, Y., Chaperon, P., Lamagat, J-P., Molinier, M. (1986). Monographie hydrologique du Fleuve Niger. Ed Orstom, Paris, coll. Monographies hydrologiques, n°8. 2 tomes, 800 p.
- Buard E. (2013). Dynamiques des interactions espèces-espace : mise en relation des pratiques de déplacement des populations d'herbivores et de l'évolution de l'occupation du sol dans le parc de Hwange (Zimbabwe). Paris: Thèse de Doctorat, Univ Paris-Panthéon-Sorbonne, 393p.
- Busson, H. (1895). Le régime du Niger. In: *Annales de Géographie*. T. 4, n°15. pp. 202-209. doi : 10.3406/geo.1895.5691 : http://www.persee.fr/web/revues/home/prescript/article/geo_0003-4010_1895_num_4_15_5691.
- Camberlin, P., Beltrando, G., Fontaine, B., Richard, Y. (2002). Pluviométrie et crises climatiques en Afrique tropicale : changements durables ou fluctuations interannuelles ? *Historiens et Géographes*, 379, 263-273.
- Capo, S., Sottolichio, A., Brenon, I., Castaing, P., Ferry, L. (2006). Morphology, hydrography and sediment dynamics in a mangrove estuary: the Konkouré estuary, Guinea. *Marine Ecology*, 230: 3-4, 199-215.

- Cappelaere, B., Descroix, L., Lebel, T., Boulain, N., Ramier, D., Laurent, J-P., Favreau, G., Boubkraoui, S., Boucher, M., Bouzou Moussa, I., Chaffard, V., Hiernaux, P., Issoufou, H.B.A., Le Breton, E., Mamadou, I., Nazoumou, I., Oï, M., Otlé, C., Quantin, G. (2009). The AMMA-CATCH observing system in the SW Niger-site: Strategy, Implementation and Site Description. *Journal of Hydrology, AMMA special issue*. 375: 34-51. doi:10.1016/j.jhydrol.2009.06.021.
- Cappus, P. (1960). Etude des lois de l'écoulement. Application au calcul et à la prévision des débits. Bassin expérimental d'Alrance. *La Houille Blanche*, No. A. Grenoble, France, pp. 521-529.
- Casenave, A.; Valentin. C. (1989). *Les états de surface de la zone sahélienne; influence sur l'infiltration*; Orstom, Ed.; Orstom Pub.: Paris, France, 224 p.
- Casenave A, Valentin C. (1992). A runoff capability classification system based on surface feature criteria in semiarid areas of West Africa. *J. Hydrol*, 130 : 231 -49.
- 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. et Gosset, M. (2015a). 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. (2015b). Potential of satellite rainfall products to predict Niger River flood events in Niamey *Atmospheric Research* 163, 162-176.
- Cassé, C., Gosset, M., Vischel, T., Quantin, G., Tanimoun, B.A. (2016). Model-based study of the role of rainfall and land use-land cover in the changes in the occurrence and intensity of Niger red floods in Niamey between 1953 and 2012. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 20, 2841-2859 ; doi:10.5194/hess-20-2841-2016
- Cazenave, A., and Llovel, W. (2010). Contemporary sea level rise, *Annual Review of Marine Science*, pp. 145-173, *Annual Reviews*, Palo Alto, Calif. doi:[10.1146/annurev-marine-120308-081105](https://doi.org/10.1146/annurev-marine-120308-081105).
- Cazenave, A., and Le Cozannet, G. (2014). Sea level rise and its coastal impacts. *Earth's Future*. Volume 2, Issue 2, pages 15-34, February 2014.
- Charney, J. (1975). Dynamics of the deserts and drought in the Sahel. *Quart. J. R. Met. Soc.*, 101 : 193-202.
- Chéneau-Loquay, Annie (1994). Demain, encore le riz ? Fin d'une civilisation ? in Comprendre la Casamance; chronique d'une intégration contrastée., p.351. Sous la direction de François George Barbier Wiesser, pp. 351-384 . Karthala, Paris, 500 p.
- Chinen T. (1999). *Recent accelerated gully erosion and its effects in dry savanna, southwest of Niger*. In *Human Response to Drastic Change of Environments in Africa*, Faculty of Economics, RYUTSU Keizai University 120, Hirahata, Ryugasaki 301-8555, Japan, 67-91pp..
- Chudeau, R. (1909). Le Sahara Soudanais. Librairie A. Colin, 1909 - 326 pages
- Chudeau, R. (1919). La capture du Niger par le Taffassasset. *Annales de Géographie*, t.28, 151 : 52-60.
- CNRST (2000). Séminaire International, Bamako, Mali. 2000/06/20-23. ISBN 2-7099-1480-8.

- Coe, M.T.; Ramankutty, N.; De Jong, R. (2007). Modeling the hydrological impact of land-use change in West Africa. *J. Hydrol.*, 337, 258-268.
- Cormier-Salem, M-C (ed) (1999). *Rivières du Sud. Sociétés et mangroves ouest-africaines*. Paris, IRD, vol. I, 416 p et, vol. II, 288 p.
- CRESA (2006). Impacts des investissements dans la gestion des ressources naturelles (GRN) au Niger : rapport de synthèse. Ed. Centre Régional d'enseignement spécialisé en agriculture (CRESA, Niamey, Niger), 65 p.
- C.S.E. (2004). *Etude et cartographie du phénomène d'érosion côtière dans la zone de Saly Portudal*. Rapport SAPCO, Dakar, 28 p.
- Dabin, B. et Maignien, R. (1979). Les principaux sols d'Afrique de l'Ouest et leurs potentialités agricoles. *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, XVII, 4 : 235-257.
- Dacosta, H., Konaté, Y.K., Malou, R. (2002). La variabilité spatio-temporelle des précipitations au Sénégal depuis un siècle. Friend 2002 - *Regional hydrology: Bringing the Gap between Reseach and Praticce*, Cape Town, South Africa, Publ. IAHS. N° 274, 499-506.
- Dacosta, H. (2012). Note interne sur la pluie du 26 août 2012 à Dakar. UCAD + Météorologie Nationale du Sénégal, Dakar, 2 pages.
- Dahou, T. (2008). L'autosuffisance rizicole chronique d'un échec annoncé ; in Dahou Tarik (ed.). *Libéralisation et politique agricole au Sénégal Dakar (SEN)* ; Paris : CREPOS ; Karthala, 2008, p. 149-170. (Hommes et Sociétés). ISBN 978-2-8111-0223-4.
- Dai, A. (2012). Increasing drought under global warming in observations and models. *Nature Climate Change, Letters*, 3:52-59. | DOI: 10.1038/NCLIMATE1633.
- Dardel, C. (2014). Entre désertification et reverdissement du Sahel : diagnostic des observations spatiales et in situ. Thèse Université de Toulouse (UPS), 200 p.
- Dardel, C., Kergoat, L., Hiernaux, P., Grippa, M., Mougin, E., Ciais, P. et Nguyen, C-C. (2014). Rain-Use-Efficiency: What it Tells us about the Conflicting Sahel Greening and Sahelian Paradox *Remote Sens.* 2014, 6, 3446-3474; doi:10.3390/rs6043446.
- Davin, E. L., et de Noblet-Ducoudré, N. (2010). Climatic impact of global scale deforestation: Radiative versus non-radiative processes, *J. Clim.*, 23(1), 97–112, doi:10.1175/2009jcli3102.1.
- Dème, A., Gaye, A.T., Hourdin, F. (2015). Les projections du climat en Afrique de l'Ouest; évidences et incertitudes. In Sultan, B., Lalou, R., Sanni, M.A., Oumarou, A. et Soumaré, M.A. (Eds) « *Les sociétés rurales face aux changements climatiques et environnementaux en Afrique de l'Ouest* ». Ed IRD, pp. 61-87.
- Demont, M., Jouve, P. (1999). Evolution d'agro-systèmes villageois dans la region de Korhogo (ord Côte d'Ivoire): Boserup vs Malthus, opposition ou complémentarité ? Dynamiques agraires et construction sociale du territoire. Séminaire CNEARC-UTM, Montpellier, France, pp. 93–108.
- Deschamps, P. et Gourcoux, G. (2013). *Quand la mer monte, les coraux se souviennent* ; IRD, FAS 343.
- Deschamps P., Durand N., Bard E., Hamelin B., Camoin G., Thomas A.L., Henderson G.M., Okuno J., Yokoyama Y. (2012). Ice sheet collapse and sea-level rise at the Bølling warming 14,600 yr ago. *Nature* 483, 559-564.

- Descloitres M., Chalikakis K., Legchenko A., Moussa A. M., Genthon P., Favreau G., Le-Coz M., Boucher, M., and Oï M. (2013). Investigation of groundwater resources in the Komadugu Yobe Valley (Lake Chad Basin, Niger) using MRS and TDEM methods. *Journal of African Earth Sciences* (2013), pp. 71-85, doi: 10.1016/j.jafrearsci.2013.07.006.
- Desconnets JC. (1994) Typologie et caractérisation hydrologique des systèmes endoréiques en milieu sahélien (degré carré de Niamey, Niger). Thèse de doctorat, université de Montpellier.
- Desconnets, J-C., Taupin, J-D., Lebel, T., Leduc, C. (1997). Hydrology of the HAPEX-Sahel Central Site: surface drainage and aquifer recharge through the pool systems. *J. Hydrol.*, 188-189: 155-178.
- Descroix, L. (1994). L'érosion actuelle dans la partie occidentale des Alpes du Sud. Thèse, Université Lumière Lyon 2, 420 p.
- Descroix, L. et Lasserre, F. (2007). Or bleu et grands ensembles économiques : une redéfinition en cours des rapports de force interétatiques ?. *La Revue Internationale et Stratégique*, 66 : 93-104.
- Descroix, L., Viramontes, D., Estrada, J., Gonzalez Barrios, J-L., Asseline, J-P. (2007). Investigating the spatial and temporal boundaries of Hortonian and Hewlettian runoff in Northern Mexico. *Journal of Hydrology*, 346:144-158.
- Descroix, L., Esteves, M., SouleyYéro, K., Rajot, J-L., Malam Abdou, M., Boubkraoui, S., Lapetite, J-M., Dessay, N., Zin, I., Amogu, O., Bachir, T., Bouzou Moussa, I., Le Breton, E. et Mamadou I. (2011). Runoff evolution according to land use change in a small Sahelian catchment. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, 8, 1569-1607, 2011 www.hydrol-earth-syst-sci-discuss.net/8/1569/2011/doi:10.5194/hessd-8-1569-2011.
- 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. Hydrol*, 2009, 375, 90-102.
- Descroix, L. (2011). L'irrigation, multiplication des récoltes, concentration des nuisances. In Lasserre et Descroix « Eaux et territoires », pages 135-156. PUQ.
- Descroix, L. (2012). Chapitre 12 : Le bassin versant, unité de gestion des eaux idéale pour l'Afrique subsaharienne? Livre dirigé par Frédéric Julien « *la gestion intégrée des ressources en eau (GIRE) en Afrique subsaharienne* ». Ed.PUQ, coll. Géographie contemporaine, pp 75-102.
- Descroix, L. (2013). CR de mission dans le haut Niger. Programme « les ressources en eau au Mali », ARD UJF-IRD, représentation IRD Bamako.
- Descroix, L., Laurent, J-P., Vauclin, M., Amogu, O., Boubkraoui, S., Ibrahim, B., Galle, S., Cappelaere, B., Bousquet, S., Mamadou, I., Le Breton, E., Lebel, T., Quantin, G., Ramier, D., Boulain, N. (2012a). Experimental evidence of deep infiltration under sandy flats and gullies in the Sahel. *Journal of Hydrology* 424-425, 1-15; <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.11.019>
- Descroix, L., Genthon, P., Amogu, O., Rajot, J-L., Sighomnou, D., Vauclin, M. (2012b). 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.

- Descroix, L., Diongue-Niang, A., Dacosta, H., Panthou, G., Quantin, G., Diedhiou, A. (2013). Evolution des pluies extrêmes et recrudescence des crues au Sahel ; *Climatologie*, 10, 37-49.
- Descroix, L., Diongue Niang, A., Panthou, G., Bodian, A., Sané, T., Dacosta, H., Malam Abdou, M., Vandervaere, J-P., Quantin, G. (2015a). Evolution récente de la mousson en Afrique de l'Ouest à travers deux fenêtres (Sénégal et Bassin du Niger Moyen). *Climatologie*, 12 :25-43.
- Descroix, L., Mahé, G., Olivry, J-C., Albergel, J., Tanimoun, B., Amadou, I., Coulibaly, B., Bouzou Moussa, I., Faran Maiga, O., Malam Abdou, M., Souley Yero, K., Mamadou, I., Vandervaere, J-P., Gautier, E., Diongue-Niang, A., Dacosta, H., Diedhiou, A. (2015b). Facteurs anthropiques et environnementaux de la recrudescence des inondations au Sahel. In Sultan, B., Lalou, R., Sanni, M.A., Oumarou, A. et Soumaré, M.A. (Eds), « *Les sociétés rurales face aux changements climatiques et environnementaux en Afrique de l'Ouest* », Ed. IRD, 153-170.
- Descroix, L., Laurent Lambert, Aliou Barry, Honoré Dacosta, Anastasie Mendy, Bakary Faty, Gil Mahé, Mahamadou Diakité, Lamine Konaté. (2018a). Recession coefficients and wetlands emptying in Guinean mountains. *3rd International Conference on African Large River Basin hydrology*. Alger, 6-9 mai 2018.
- Descroix, Luc., Guichard, F., Grippa, M., Lambert, L.A., Panthou, G., Gal, L., Dardel, C., Quantin, G., Kergoat, L., Bouaita, Y., Hiernaux, P., Mahé, G., Vischel, T., Pellarin, T., Faty, B., Wilcox, C., Malam Abdou, M., Mamadou, I., Vandervaere, J-P., Diongue-Niang, A., Ndiaye, O., Sané, Y., Dacosta, H., Gosset, M., Cassé, C., Sultan, B., Barry, Aliou, Amogu, O., Nka Nnomo, B., Barry, Alseny, Paturel, J-E. (2018b). Surface hydrology evolution in the Sahelo-Sudanian stripe: An updated synthesis (accepté à *Water MDPI*, juin 2018).
- Dia, S.G. (2007). Avancée de la mer à Rufisque. Les populations de Thiawllène réclament un «Plan Jaxaay». Article de presse extrait du quotidien sénégalais *L'Observateur*, n°0854, mardi 03 juillet 2007, p. 6.
- Diallo, A. (2013). Etude de l'Evènement pluviométrique extrême survenu à Dakar le 26 aout 2012. Mémoire de Master UCAD, département de géographie, 52 p.
- Di Baldassarre, G., Montanari, A., Lins, H., Koutsoyiannis, D., Brandimarte, L. et Blöschl, G. (2010). Flood fatalities in Africa: From diagnosis to mitigation, *Geophys. Res. Lett.*, 37, L22402, doi:10.1029/2010GL045467.
- Diop, E.H.S. (1990). La côte ouest africaine, du Saloum (Sénégal) à la Mélanésie (Rép. de Guinée). Thèse de doctorat. Ed Orstom, 366 p.
- Diop, M., Houndenou, C., Richard, Y. (1996). Variabilité des dates de début et de fin de l'hivernage au Sénégal (1950-1991). *Publ. Assoc. Intern. de Climato.*, 9, 430-436.
- Diploweb, la revue géopolitique on line ;
- Dong, B. et Sutton, R. (2015). Dominant role of greenhouse-gas forcing in the recovery of Sahel rainfall. *Nature Climate Change, Letters*, 5 :757-761. DOI: 10.1038/NCLIMATE2664.
- Dresch, J. (1947). A propos de la capture du Logone par la Bénoué. *Bull. de l'Assoc. Des Géog. Français*, 186-189 : 100-105.

- Dumay, F., Mainguet, M., Georges, J-C., Fall, O., Guang, H., Lemine, O.H. et Lehibib, S.A. (2002). End of the global wind action system Saharo-Sahelian in Western Africa. *The 12th ISCO Conference, Beijing 223-231*, Tsinghua University press, Beijing, China.
- Dupriez, H., et De Leener, P. (1990). les chemins de l'eau : ruissellement, irrigation, drainage. Manuel tropical. CTA, L'Harmattan ENDA, Wageningen, Paris, Dakar, 380 p.
- Duvail, Stéphanie, Mietton, Michel, Gourbesville, Philippe (2001). Gestion de l'eau et interactions société-nature. Le cas du delta du Sénégal en rive mauritanienne. p.5. *Nature Sciences et Société*, vol..9, n°2 :5-16.
- Elouard, P. (1980). Géomorphologie structurale, lithologique et climatique de la Presqu'île du Cap Vert (Sénégal). *Notes Africaines*, IFAN, p. 57 - 68.
- Escourrou, G. (1981). Climat et environnement. Masson, Paris, 220 p.
- Esteves, M., Lapetite, J.M. (2003). A Multi-scale approach of runoff generation in a Sahelian gully catchment: a case study in Niger. *Catena*, 50, 255–271.
- Falkenmark, M. et Wildstrand, C. (1992). Population and Water Resources : a delicate balance. *Population Bulletin*, Population Reference Bureau, 47 :3, 4-36.
- Fall, S., Niyogi, D., Semazzi, F.H.M. (2006). Analysis of mean climate conditions in Senegal (1971-1998). *Earth Interactions*, 10 (5), 1-40.
- Fall, A. (2014). Le Ferlo sénégalais : Approche géographique de la vulnérabilité des anthroposystèmes sahéliens. Thèse de doctorat, Université Paris 13, 380 p.
- FAO (2001). Site FAO, feuille Sénégal, 2001.
- FAO, PAM-ONU (2008). rapport d'analyse de marché ; le Sénégal: commerce du riz. ochaonline.un.org/OchaLinkClick.aspx?link=ocha...
- FAO. (2009). *Etude de cas sur l'évaluation de la dégradation des forêts: la dégradation des forêts en République Démocratique du Congo*. Rome: Evaluation des ressources forestières, Doc de travail 169, 23p.
- Faure, L. (1986). Changements globaux en Afrique durant le quaternaire: passé, présent, futur : Dakar 21-28 avril 1986 ; Faure, H., Diop, E.S., Eds [*Volume 197 de Travaux et documents de l'ORSTOM*](#) ; Éditions de l'ORSTOM, 1986.
- Favreau, G. (2000). Characterization and Modeling of a Rising Water Table in the Sahel: Dynamic and Geochemistry of the Dantiandou Kori Natural Hollow Aquifer Southwest Niger). (Ph.D. thesis), Univ. Paris XI, Orsay, France (in French, 258 pp.).
- Favreau, G., Cappelaere, B., Massuel, S., Leblanc, M., Boucher, M., Boulain, N., et Leduc, C. (2009). Land clearing, climate variability, and water resources increase in semiarid southwest Niger: A review. *Water Resources Research*, vol. 45, W00A16, doi:10.1029/2007WR006785, 2009.
- Favreau, G., Nazoumou, Y., Leblanc, M., Guéro, A., Baba Goni, I. (2012). Groundwater resources increase in the Iullemeden Basin, West Africa 113. *Climate Change Effects on Groundwater Resources. A Global Synthesis of Findings and Recommendations*. Editors: Holger Treidel Jose Luis Martin-Bordes Jason J. Gurdak. UNESCO-IAHS-CRC Press, pp 113-128.
- Faye, B.B. (2007). Thiawlène, voyage en Outre-tombe. Article de presse extrait de l'hebdomadaire sénégalais *Weekend Magazine*, n°16, semaine du 8 au 12 juillet 2007, p.16 – 21.

- Faye, I.B.N. (2010). Dynamique du trait de côte sur les littoraux sableux de la Mauritanie à la Guinée-Bissau (Afrique de l'Ouest) : Approches régionale et locale par photointerprétation, traitement d'images et analyse de cartes anciennes. Thèse, UBO, Brest, 320 p.
- Fensholt, R. & Rasmussen, K. (2011). Analysis of trends in the Sahelian 'rain-use efficiency' using GIMMS NDVI, RFE and GPCP rainfall data. *Remote Sensing of Environment* **115**, 438-451.
- Ferry, L., Mietton, M., Muther, N., Martin, D., Renard-Toumi, A. (2012). Le Niger guinéen et malien : une ressource vitale pour l'Afrique de l'Ouest. *Dynamiques environnementales*, 2012, pp.67-79.
- Ferry, L., Mietton, M., Renard-Toumi, A., Martin, D., Barry, M.A., et 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. Revue de géographie et aménagement* 25-26 Gestions alternatives de la ressource en eau : Approches territoriales.
- FIDA, Fonds International pour le Développement Agricole (2001). Evaluation de la pauvreté rurale en Afrique de l'Ouest et du centre, Rome, IFAD, 130 p.
- Floret C, Pontanier R, Serpantie G. (1993). La jachère en Afrique Tropicale. Dossier MAB Paris : UNESCO, 86 p.
- Folland, C.K., Palmer, T.N., Parker, D.E. (1986). Sahel rainfall and worldwide sea temperatures. 1901–1985. *Nature* 320: 602–607. doi:10.1038/320602a0.
- Fournier, J., Serpantié, G., Delhoume, J-P., Gatherlier, R. (2000). Rôle des jachères sur les écoulements de surface et l'érosion en zone soudanienne du Burkina Faso : Application à la gestion des terres cultivées. *Sud Sciences et Technologies*, N° 5 06/2004; DOI: 10.4314/sset.v5i1.18301
- Fraval, P., Bader, J-C., Mané, L.K., David-Benz, H., Lamagat, J-P., Diop Diagne, O. (2002). The quest for integrated and sustainable water management in the Senegal River Valley. *5th Inter-Regional Conference on Environment and Water: Envirowater2002 EIER - ETSHER Ouagadougou Novembre 5-8, 2002*.
- Galle, G., Ehrmann, M., Peugeot, C. (1999). Water balance in a banded vegetation pattern A case study of tiger bush in western Niger. *Catena* 37, 197–216.
- Garcia, M., Sandholt, I., Ceccato, P., Ridler, M., Mougou, E., Kergoat, L., Morillas, L., Timouk, F., Fensholt, R., Domingo, F. (2013). Actual evapotranspiration in drylands derived from in-situ and satellite data: Assessing biophysical constraints. *Remote Sensing of Environment* 131: 103-118
- Gardelle, J., Hiernaux, P., Kergoat, L., et 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. Sciences*, 14, 309-324.
- Gaye, O. (2003) ; http://forum1.inter-reseaux.net/imprimer.php3?id_article=370 ; Workshop on integrated assessment of the AoA (<http://www.unep.ch/>).
- Genthon, P., Hector, B., Luxereau, A., Descloitres, M., Abdou, H., Hinderer, J., Bakalowicz, M. (2015). Groundwater recharge by Sahelian rivers – consequences for agricultural development: example from the lower Komadugu-Yobé river (Eastern Niger, Lake Chad, Basin). *Environ Earth Sci*. DOI 10.1007/s12665-015-4119-y.

- Goutorbe, J-P., Lebel, T., Dolman, A.J., Gash, J.H.C., Kabat, P., Kerr, Y.H., Monteny, B., Prince, S.D., Stricker, J.N.M., Tinga, A., Wallace, J.S. (1997). , An overview of HAPEX-Sahel: a study in climate and desertification. *Journal of Hydrology* Volumes 188–189, February 1997, Pages 4–17.
- Guengant, J-P., Banoin, M. (2003). Dynamique des populations, disponibilités en terres et adaptation des régimes fonciers : le Niger. Pub. FAO-CICRED, 142 p.
- Guichard, F. (2010). Contribution à l'étude et à la modélisation des processus convectifs atmosphériques dans les régions tropicales océaniques et continentales. Mémoire HDR, CNRM Université de Toulouse, 183 pages.
- Guichard, F., Kergoat, L., Hourdin, F., Léauthaud, C., Barbier, G., Mougin, E. et Diarra, B. (2015). Le réchauffement climatique observé depuis 1950 au Sahel. In Sultan, B., Lalou, R., Sanni, M.A., Oumarou, A. et Soumaré, M.A. (Eds) « *Les sociétés rurales face aux changements climatiques et environnementaux en Afrique de l'Ouest* ». Ed. IRD, pp. 23-42.
- Guillobez, S. (1993). Le Mouhoun, un ancien affluent du Niger : exemple de capture en milieu tropical aride ; The Mouhoun, a former tributary of the Niger : an example of capture in arid-tropics. 1993. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences. Série 2*, 317 : 537-542
- Lasserre, F. et Gascon, A, 2003 Les partages des eaux du Nil et les politiques éthiopiennes. Conférence [Saint Dié 2003, Géographie de l'eau](#).
- Hassane, R. (2015). Un exemple de stratégie adaptée à l'insécurité alimentaire. La culture de la pomme de terre dans l'Imanan (Niger). In Sultan, B., Lalou, R., Sanni, M.A., Oumarou, A. et Soumaré, M.A. (Eds) « *Les sociétés rurales face aux changements climatiques et environnementaux en Afrique de l'Ouest* ». Ed. IRD, pp 429-448.
- Hawkins, E. (2011). Our evolving climate: communicating the effects of climate variability. *Weather* – July 2011, Vol. 66, No. 7
- Haywood M. (1981). Évolution des terres et de la végétation dans la zone soudano-sahélienne du projet CIPEA au Mali. Addis-Abeba : CIPEA/ILCA, 1981 ; 187 p.
- Hewlett, J.D. (1961). Soil moisture as a source of base flow from steep mountain watershed. US forest Service, Southeastern Forest Experiment Station, Asheville, North Caroline.
- Horton, R.E. (1933). The role of infiltration in the hydrologic cycle. EOS. *American Geophysical Union Transactions* 14, 44–460.
- Hubert, P. et Carbonnel, J-P., 1987. Approche statistique de l'aridification de l'Afrique de l'Ouest. *J. of Hydrol.*, 95 : 165-183.
- Hubert, P, Carbonnel, J-P. et Chaouche, A. (1989). Segmentation des séries hydrométéorologiques – applications à des séries de précipitations et de débits de l'Afrique de l'Ouest. *J. of Hydrol.*, 110 : 349-367.
- Hulme, MR.; Doherty, T.; Ngara, N.M.; and Lister, D. (2001). African climate change: 1900–2100. *Climate research*, 17, 145-168.
- Hulme, M. (2001). Climatic perspectives on Sahelian desiccation : 1973-1998. *Global Environmental Change* 11, 19-29.
- Ibrahim, B. (2008). Mise en évidence de la persistance pluviométrique à petite échelle des évènements pluvieux sur le degré carré de Niamey. Mémoire de Master UPMC 2iE, 48 p.
- IESOL, LMI (2015). l'atelier du LMI IESOL, Dakar, 2-4 juin 2015, Bel Air.

- Itiveh, K.O.; Bigg, G.O. (2008). The variation of discharge entering the Niger Delta system, 1951–2000, and estimates of change under global warming. *Int. J. Climatol.*, 28, 659-666. 51.
- Janicot, S. et Fontaine, B. (1997). Evolution saisonnière des corrélations entre précipitations en Afrique guinéenne et températures de surface de la mer (1945-1994). *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, série IIa*, 324, 785-792.
- Janicot, S. et Sultan, B. (2001). Intra-seasonal modulation of convection in the West African Monsoon. *Geophysical Research Letters*, 28 (3), 523-526.
- Jolly D., Harrison S. P., Damnati B. & Bonnefille R. (1998). "Simulated climate and biomes of Africa during the late quaternary: Comparison with pollen and lake status data", *Quaternary Science Reviews*, 17(6-7), p.629-657.
- Joussaume, S., Taylor, K. E., Braconnot, P., Mitchell, J. F. B., Kutzbach, J. E., Harrison, S. P., Prentice, I.C., Broccoli, A. J., Abe-Ouchi, A., Bartlein, P. J., Bonfils, C., Dong, B., Guiot, J., Herterich, K., Hewitt, C. D., Jolly, D., Kim, J. W., Kislov, A., Kitoh, A., Loutre, M. F., Masson, V., McAvaney, B., McFarlane, N., de Noblet, N., Peltier, W. R., Peterschmitt, J. Y., Pollard, D., Rind, D., Royer, J. F., Schlesinger, M. E., Syktus, J., Thompson, S., Valdes, P., Vettoretti, G., Webb, R. S. & Wyputta, U. (1999). "Monsoon changes for 6000 years ago: Results of 18 simulations from the Paleoclimate Modeling Intercomparison Project (PMIP)", *Geophysical Research Letters*, 26(7), p.859-862.
- Julien, F. (2007). « Maîtrise de l'eau et développement durable en Afrique de l'Ouest : de la nécessité d'une coopération régionale autour des systèmes hydrologiques transfrontaliers », in *Vertigo, la revue en sciences de l'environnement*, vol. 7, n° 2, p. 1-28, cf. p. 9.
- Kamagaté, B., Séguis, L., Favreau, G., Seidel, J-L., Descloitres, M., Affaton, P. (2010). Processus et bilan des flux hydriques d'un bassin versant de milieu tropical de socle au Bénin (Donga, haut Ouémé). *C.R. Geoscience (Géosciences de surface, Hydrologie Hydrogéologie)* 339, 418–429.
- Karambiri, H. (2009). Brève analyse fréquentielle de la pluie du 01/09/2009 à Ouagadougou. Note technique 2iE.
- Kasei, R., Diekkruger, B., and Leemhuis, C. (2010). Drought frequency in the Volta Basin of West Africa. *Sustainability Science*, 5 (1), 89–97.
- Kergoat, L., Grippa, M., Hiernaux, P., Ramarohetra, J., Gardelle, J., Dardel, C., Gangneron, F., Gal, L., Descroix, L. (2015). Evolutions paradoxales des mares en Sahel non cultivé : Diagnostic, causes et conséquences. In Sultan, B., Lalou, R., Sanni, M.A., Oumarou, A. et Soumaré, M.A. (Eds) « *Les sociétés rurales face aux changements climatiques et environnementaux en Afrique de l'Ouest* ». Ed. IRD, pp 189-201
- Kim K.Y., Park, Y.S., Kim, G.P. et Park, H.H. (2009) Dynamic freshwater –saline water interaction in the coastal zone of Jeju Island, South Korea, *Hydrogeology Journal*, 17, 617-629.
- Kosmowski, F., Gibigaye, M., Muller, B., Lalou, R. (2015). Innover en milieu rural ouest-africain. Quels changements dans les pratiques agricoles des exploitants ? In Sultan, B., Lalou, R., Sanni, M.A., Oumarou, A. et Soumaré, M.A. (Eds) « *Les sociétés rurales face aux changements climatiques et environnementaux en Afrique de l'Ouest* ». Ed. IRD, pp 359-375.
- Kropelin S., Verschuren D. & Lezine A. M. (2008a). "Response to Comment on "Climate-Driven Ecosystem Succession in the Sahara: The Past 6000 Years"", *Science*, 322(5906).

- Kropelin S., Verschuren D., Lezine A. M., Eggermont H., Cocquyt C., Francus P., Cazet J. P., Fagot M., Rumes B., Russell J. M., Darius F., Conley D. J., Schuster M., von Suchodoletz H. & Engstrom D. R. (2008b). "Climate-driven ecosystem succession in the Sahara: The past 6000 years", *Science*, 320(5877), p.765-768.
- Lacombe, G., McCartney, M., and Forkuor, G. (2012). Drying climate in Ghana over the period 1960-2005: evidence from the resampling-based Mann-Kendall test at local and regional levels. *Hydrol. Science Journal*, 57 :2, 1594-1609. doi.org/10.1080/02626667.2012.728291.
- Lançon, F. (2011). La compétitivité du riz ouest africain face aux importations : vrais enjeux et fausses questions. *Grain de sel* n° 54-56.
- Larwanou, M., Abdoulaye, M., Reij, C. (2006). *Etude de la régénération naturelle assistée dans la région de Zinder (Niger)*. International Resources Group, USAID : Washington, DC, USA.
- Lasserre, F., et Descroix, L. (sous la direction de) (2011). « Eaux et territoires ». Presses Universitaires du Québec, collection « Géographie contemporaine », 480 pages. 3^{ème} édition actualisée.
- Lasserre, F. (2014). Guerres de l'eau : inévitables ? **le 26 janvier 2014**   *Copyright Janvier Diplo2014-Lasserre/Diploweb.com*
- Lasserre, F. et Gascon, A. (2003). Les partages des eaux du Nil et les politiques éthiopiennes. Conférence [Saint Dié 2003, Géographie de l'eau](#) .
- Lavabre, J. et Andreassian, V. (2000). Eaux et Forêts : la forêt, un outil de gestion des eaux ? coll Ecosystèmes Forestiers, CEMAGREF Editions 115 pages.
- Léauthaud, C., Demarty, J., Cappelaere, B., Grippa, M., Kergoat, L., Velluet, C., Guichard, F., Mougin, E., Chelbi, S. et Sultan, B. (2015). Revisiting historical climatic signals to better explore the future : prospects of water cycle changes in Central Sahel. *Proc. IAHS*, 371, 195-201. Doi : 10.5194/piahs-371-195-2015.
- Le Barbé, Luc et Lebel, Thierry (1997). Rainfall climatology of the Hapex-Sahel region during the years 1950-1990. p. 54; *Journal of Hydrology*, 188-189 : 43-73.
- Le Bars, M. (2012). Les motopompes changent la donne au Mali. *Sciences au Sud*, IRD, N°66.
- Lebel, T., Diedhiou, A., Laurent, H. (2003). Seasonal cycle and interannual variability of the Sahelian rainfall at hydrological scales. *J. Geophys. Res.* 108, 8839.
- Lebel, T., Ali, A. (2009). Recent trends in the Central and Western Sahel rainfall regime (1990–2007). *J. Hydrol.*, 375, 52-64. (2009), doi:10.1016/j.jhydrol.2008.11.030.
- Leblanc, M., Favreau, G., Massuel, S., Tweed, S., Loireau, M., Cappelaere, B. (2008). Land clearance and hydrological change in the Sahel: SW Niger. *Glo Pla Cha*, 61, 49-62.
- Le Breton, E. (2005). *Ensablement des bas-fonds sahélien : étude des transferts sédimentaires au fleuve Niger dans le secteur moyen Niger –Mali; Niger; Bénin*; Mémoire de Master 2 en géomorphologie; Paris 7-Denis–Diderot University: Paris, France, 80 p.
- Le Breton, E. (2012). « Réponses hydrologiques et géomorphologiques aux changements environnementaux au Sahel nigérien ». Thèse de géographie en cotutelle Université Paris 1 Panthéon Sorbonne et Université Abdou Moumouni de Niamey, 210 p.

- Lecerf R. (2008). *Suivi des changements d'occupation et d'utilisation des sols d'origine anthropique et climatique à l'échelle régionale par télédétection moyenne résolution (application à la Bretagne)*. Rennes: Thèse de Doctorat, Univ Rennes 2-Univ.
- Ledoux E., S. Sauvagnac et A. Rivera (1990). A compatible single-phase/two phase numerical model : 1. Modeling the transient salt-water/fresh-water interface motion. *Ground Water*, 28, 79-87.
- Leduc, C., Bromley, J., Shroeter, P. (1997). Water table fluctuation and recharge in semi-arid climate: some results of the HAPEX Sahel hydrodynamic survey (Niger). *J. Hydrol.*, 188-189, 123-138.
- Leduc, C., Favreau, G., Shroeter, P. (2001). Long term rise in a Sahelian water-table:the Continental Terminal in South-West Niger. *Journal of Hydrology* 243, 43–54.
- Lemoalle, J., Bader, J-C., Leblanc, M., Sedick, A. (2012). Recent changes in Lake Chad: Observations, simulations and management options (1973-2011). *Global and Planetary Change* 80-81, 247-254.
- Lemoalle J. (ed.), Magrin G. (ed.), Ngaressesem G.M., Ngounou Ngatcha B., Raimond C., Issa S. (2014). Le développement du lac Tchad : situation actuelle et futurs possibles. Development of lake Chad : current situation and possible outcomes. Marseille : IRD [Marseille], 215 p. (Expertise collégiale).
- Leroux, M. (1983). *Le climat d'Afrique Tropicale*. Paris, Champion Ed., 633 p.
- Leroux, Marcel (2000). *La dynamique du temps et du climat*, 2^{ème} édition, Dunod, Paris., pp. 285-298.
- Le Soleil*, Dakar, 20 décembre (2004). « La filière riz local : dans la vallée, les grains de l'espoir de renouveau ».
- L'Hôte, J-P. t Mahé, G. (1996). *Afrique centrale et de l'Ouest : précipitations moyennes annuelles (période 1951-1989)* ; IRD (Orstom), Bondy, 1 carte.
- Li, D., et Bou Zeid, E. (2013). Synergistic Interactions between Urban Heat Islands and Heat Waves: The Impact in Cities Is Larger than the Sum of Its Parts. DOI: JAMC 2051-2061. <http://dx.doi.org/10.1175/JAMC-D-13-02.1>
- LI, D., Bou Zeid, Baeck, M. L., Jessup, S., Smith, J.A. (2013). Modeling Land Surface Processes and Heavy Rainfall in Urban Environments: Sensitivity to Urban Surface Representations. *J. of Hydrometeorology*, vol 14, 1098-1118.
- Li, K.Y., Coe, M.T., Ramankutty, N., De Jong, R. (2007). Modeling the hydrological impact of land-use change in West Africa. *J. Hydrol.*, 337, 258-268.
- Livre Blanc AMMA (2002) (Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine). 102 p.
- Lo, S.F. (1996). 65 millions pour le transfert de Djiffère. Article de presse extrait du quotidien sénégalais *Le Soleil*, n°7969, mardi et mercredi 25 décembre 1996.
- Lubès-Niel, H., Masson, J-M., Paturel, J-E. et Servat, T E. (1998). Variabilité climatique et statistiques. Etude par simulation de la puissance et de la robustesse de quelques tests utilisés pour vérifier l'homogénéité de chroniques. *Revue des sciences de l'eau*, 3, 383-408.
- Luxereau, A. et Roussel, B. (1997). Changements écologiques et sociaux au Niger, études africaines, L'Harmattan, 239 p.

- Luxereau, A. et Roussel, B. (2009). L'arbre au Sahel : éléments pour la chronique d'une non-disparition ; présentation de l'arbre dans le contexte GMV, réunion GMV, Dakar, février 2009 ;
- Luxereau, A., Genthon, P. et Ambouta Karimou, J-M. (2012). Fluctuations in the size of Lake Chad: consequences on the livelihoods of the riverain peoples in eastern Niger. *Reg. Environ. Change* DOI. 10.1007/s10113-011-0267-0.
- 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. *C.R. Acad. Sci. Paris, série Ila* 330, 689–692.
- Mahé, G., Leduc, C., Amani, A., Paturel, J.E., Girard, S., Servat, E., Dezetter, A. (2003). Augmentation récente du ruissellement de surface en région soudano-sahélienne et impact sur les ressources en eau. In: Servat, E., Najem, W., Leduc, C., Ahmed, S. (Eds.), *Hydrology of the Mediterranean and Semiarid Regions*, IAHS Pub. 278, pp. 215–222.
- Mahé, G, Bamba, F, Soumaguel, A, Orange, D, Olivry, J.C. (2009). Water losses in the Niger River inner delta: water balance and flooded surfaces. *Hydrological Processes* 23(22): 3157–3160.
- Mahé, G., Diello, P., Paturel, J-E., Barbier, B., Karambiri, H., Dezetter, A., Dieulin, C., Rouché, N. (2010). Baisse des pluies et augmentation des écoulements au Sahel : impact climatique et anthropique sur les écoulements du Nakambe au Burkina-Faso. *Sécheresse* 21(4): 330–332.
- Mahé, G., Lienou, G., Bamba, F., Paturel, J.E., Adeaga, O., Descroix, L., Mariko, A., Olivry, J.C., Sangaré, S., Ogilvie, A., Clanet, J.C. (2011). Le fleuve Niger et le changement climatique au cours des 100 dernières années. In: Hydroclimatology variability and change, (Proceedings of symposium held during IUGG 2011, Melbourne, Australia); IAHS pub. 344 ; 131–137.
- Mahé, G. (2009). Surface/groundwater interactions in the Bani and Nakambe rivers, tributaries of the Niger and Volta basins. West Africa. *Hydrol. Sci. J.*, 54, 704-712.
- Mahé, G. et Gioda, A. (2009). *Les données climatiques devraient devenir publiques*. Le Monde.fr 21/12/09.
- Mahé, G, Olivry, J.C. (1995). Variations des précipitations et des écoulements en Afrique de l'Ouest et Centrale de 1951 à 1989. *Sécheresse* 1(6): 109–117.
- Mahé, G., Olivry, J.C. (1999). Assessment of freshwater yields to the ocean along the intertropical Atlantic coast of Africa. *Comptes Rendus de l'Academie des Sciences, Series Ila* 328: 621–626.
- Mahé G, Paturel J.E. (2009). 1896–2006 Sahelian rainfall variability and runoff increase of Sahelian rivers. *Comptes Rendus Geoscience* 341: 538–546.
- Mahé, G., Paturel, J.E., Servat, E., Conway, D., Dezetter, A. (2005). Impact of land use change on soil water holding capacity and river modelling of the Nakambe River in Burkina-Faso. *Journal of Hydrology* 300(1–4): 33–43.
- Mahé, G., Lienou, G., Descroix, L., Bamba, L., Paturel, J-E., Laraque, A., Meddi, M., Habaieb, M., Adeaga, O., Dieulin, C., Chahnez Kotti, F., and Khomsi, K. (2013). The rivers of Africa: witness of climate change and human impact on the environment; *Hydrol. Process.* 27, 2105–2114 (2013) DOI: 10.1002/hyp.9813.

- Mahé, Gil (1993). Les écoulements fluviaux sur la façade atlantique de l'Afrique. Etude des éléments du bilan hydrique et variabilité interannuelle, analyse de situations hydroclimatiques moyennes et extrêmes. p. 153. Thèse de l'Université Paris 11, Orsay, 438 p.
- Mahé G. (2006). The impact of land-use/land-cover change and climate variability on the hydrology of the Sahel. In : Demuth S, Gustard A, Planos E, Scatena F, Servat E, eds. *Climate variability and change – Hydrological impacts*. Proceedings of the Fifth FRIEND World Conference. Publ. AISH 308. Wallingford (Great Britain) : AISH. .
- Malam Abdou, M. (2014). Etats de surface et fonctionnement hydrodynamique multi-échelles des bassins sahéliens ; études expérimentales en zones cristalline et sédimentaire. Thèse en cotutelle UJF Grenoble et UAM Niamey, 300 p.
- Malam Abdou, M. Vandervaere, J-P., Descroix, L, Bouzou Moussa, I., Faran Maiga, O., Abdou, S., Bodo Seyni, B., Laouali Maman Daouda (2015). Evolution temporelle de la conductivité hydraulique d'un sol cultivé de l'Ouest du Niger. *BASE-Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, 19 (3), 269-279.
- Mamadou I. (2006). *Erosion et ensablement dans les kori du Fakara- degré carré de Niamey Niger*. Mémoire de DEA de Géographie, Mémoire de géographie, Université Abdou Moumouni Niamey, FLSH, 144 p.
- Mamadou, I., Gautier, E., Descroix, L., Noma, I., Bouzou Moussa, I., Faran Maiga, O., Genthon, P., Amogu, O., Malam Abdou, M., et Vandervaere, J-P. (2015). Exorheism growth as an explanation of increasing flooding in the Sahel. *Catena*, 130:131-139.
- Mamadou, I. (2012). La dynamique accélérée des koris de la région de Niamey et ses conséquences sur l'ensablement du fleuve Niger. Thèse en cotutelle UJF Grenoble UAM. 324 p.
- Marius, C. (1984). Contribution à l'étude des mangroves du Sénégal et de la Gambie. Ecologie- Pédologie- Géochimie. Mise en valeur et aménagement. Thèse de doctorat ès Sciences. Université de Strasbourg, 335 p.
- Marlet, S., N'Diaye, M.K. (2002). La fertilité des sols. Des risques d'alcalinisation liés à l'irrigation et aux pratiques culturales. In : Kuper M, Tonneau JP, Bonneval, eds. *L'Office du Niger, grenier à riz du Mali : succès économiques, transitions culturelles et politiques de développement*. Montpellier : Cirad éditions.
- Marlet, S., Vallès, V., Barbiero, L. (1996). Field study and simulation of geochemical mechanisms of soil alkalization in the sahelian zone of Niger. *Arid Soil Research and Rehabilitation* (10) : 243-56.
- Marteau, R., Moron, V. et Philippon, N. (2009). Spatial coherence of monsoon onset over Western and Central Sahel (1950-2000). *Journal of Climate*, 5, 1313-1324.
- Marteau, R., Sultan, B., Moron, V., Alhassane, A., Baron, C. et Traoré, S.B. (2011). The onset of the rainy season and farmers' sowing strategy for pearl millet cultivation in Southwest Niger. *Agric. Forest Meteorol.*, 151, 10, 1356-1369, doi:10.1016/j.agrformet.2011.05.018.
- Marut, Jean Claude (1998). La question de Casamance (Sénégal) : une analyse géopolitique ; thèse de géopolitique, Université Paris 8 ; éditions du Septentrion, Villeneuve d'Ascq.
- Marut, Jean-Claude (2010). Le conflit de Casamance. Ce que disent les armes. Karthala, Paris, 420 p.

- Massuel, S. (2005). Evolution récente de la ressource en eau consécutive aux changements climatiques et environnementaux du sud-ouest Niger. Modélisation des eaux de surface et souterraines du bassin du kori de Dantiandou sur la période 1992-2003. PhD thesis, Montpellier 2 University, 250 p.
- Massuel, S., Favreau, G., Descloitres, M., Le Troquer, Y., Albouy, Y., Cappelaere, B. (2006). Deep infiltration through a sandy alluvial fan in semiarid Niger inferred from electrical conductivity survey, vadose zone chemistry and hydrological modelling. *Catena*, 67 :2, 105-118. DOI : 10.1016/j.catena.2006.02.009.
- Maugis, P., Aguiar, L., Grenier C. (2009). Hydrogeological modeling as a tool supporting the interpretation of pollen proxies for palaeoclimate reconstitution: the Senegalese “Niayes” case-study. *C.R. Geoscience*, 341:8-9, 783-793.
- Mbow, C., Mertz, O., Diouf, A., K.Rasmussen, K., Reenberg, A. (2008). The history of environmental change and adaptation in eastern Saloum—Senegal—Driving forces and perceptions. *Glob. Planet. Change*. 64, 209–220 doi:10.1016/j.gloplacha.2008.09.008.
- Mietton, M., Ferry, L., Gareyane, M., Bader, J-C., Coulibaly, N.T., Muther, N. (2013). Permanence d’une voie d’eau entre Tombouctou et le fleuve Niger. *Dynamiques Environnementales*, n°32, pp. 41-56.
- Millot J.A. (1913). Les crues du Niger. In: *Annales de Géographie*. t. 22, n°121. pp. 68-93. doi : 10.3406/geo.1913.8385 http://www.persee.fr/web/revues/home/prescript/article/geo_0003-4010_1913_num_22_121_8385. .
- Molle, F., Wester, P., Hirsch, P., Jensen, J-R., Murray-Rust, H., Paranjpye, V., Pollard, S., Van der Zaag, P. (2007). River basin development and management. IWMI Books, Reports. H040208.
- Monget, C. (1997). Les impacts des barrages sur le fleuve Sénégal. Synthèse bibliographique, réalisée par les élèves de l’ENGREF, Montpellier, 9p. .
- Monfort, M. (1996). Reconstitution géologique des aquifères du Continental Terminal dans la région de Niamey. Mémoire de 2^e cycle universitaire (maîtrise). Université de Montpellier II, France, p. 50.
- Montoroi, J-P. (1990). «Demain, encore le riz ? Fin d’une civilisation ?»; dans *Comprendre la Casamance, chronique d’une intégration contrastée*, F.G. Barbier Wiesser (dir.), Karthala, Paris, pp. 351-384. .
- Morel. A. (2011). Quarante ans d’Afrique et de déserts ; carnets de route d’un géographe. IBIS Press, Paris, 126 p.
- Morel, R., 1995. La sécheresse en Afrique de l’Ouest. In *Sahel : la grande sécheresse. Rev. de Géogr. de Lyon*, 3-4., cité par Leroux (2000), page 287.
- Moron, V. (1994). Guinean and sahelian rainfall anomaly indices at anual and monthly scales (1933-1990). *Int. J. Climatol.*, 14, 325-341.
- Mounirou, L, A. (2012). Etude du ruissellement et de l’érosion à différentes échelles spatiales sur le bassin versant de Tougou en zone sahélienne du Burkina Faso : quantification et transposition des données ; PhD thesis Cotutelle 2iE/UM2, 236 p.
- Muller, B., Lalou, R., Kouakou, P., Soumaré, M.A., Bourgoïn, J., Dorégo, S., Sine, B. (2015). Le retour du mil sanio dans le Sine. Une adaptation raisonnée à l’évolution climatique. In Sultan, B., Lalou, R., Sanni, M.A., Oumarou, A. et Soumaré, M.A. (Eds) « *Les sociétés*

- rurales face aux changements climatiques et environnementaux en Afrique de l'Ouest* » Ed IRD, pp 377-402.
- Musy, A. et Soutter, M. (1991). *Physique du sol*. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes (PPUR), Lausanne, 348 p.
- Mutin, G. (2000). *L'eau dans le monde arabe*. Ellipses Ed, Paris. coll. carrefours de géographie.
- Naudts, K., Chen, Y., McGrath, M., Ryder, J., Valade, A., Otto, J., Luyssaert, S. (2016). Europe's forest management did not mitigate climate warming. *Science* 05 Feb 2016: Vol. 351, Issue 6273, pp. 597-600; doi: 10.1126/science.aad7270.
- N'tchayi, G.M., Bertrand, J., Legrand, M. et Baudet, J. (1994). «Temporal and spatial variations of the atmospheric dust loading throughout West Africa over the last thirty years», *Annales Geophysicae*, 12, pp. 265-273.
- Ndiaye B. Esteves, M., Vandervaere, J-P., Lapetite, J-M. et Vauclin, M. (2005). Effect of rainfall and tillage direction on the evolution of surface crusts, soil hydraulic properties and runoff generation for a sandy loam soil. *Journal of Hydrology*, 307(1-4), p.294-311.
- New, M., Hewitson, B., Stephenson, D.B., Tsiga, A., Kruger, A., Manhique, A., Gomez, B., Coelho, C.A., Masisi, D.N., Kululanga, E. (2006). Evidence of trends in daily climate extremes over southern and West Africa. *J. Geophys. Res.*, 111, D14102.
- Niang, S. (2017). *Dégradation des terres agricoles et recompositions socio spatiales dans le Gandiolais, littoral Nord du Sénégal* » Université Gaston Berger, Saint Louis du Sénégal, 350 p.
- Nouvelot J.F., Descroix L. (1996). Aridité et sécheresse du Nord-Mexique. *Revue Trace*. CEMCA, México, déc. 96 n° 30, pp 9-25.
- Paeth, H., Fink, A. H., Pohle, S., Keis, F., Mächel, H. et Samimi, C. (2010). Meteorological characteristics and potential causes of the 2007 flood in sub-Saharan Africa. *Int. J. Climatol.*, 31, 1908-1926, doi:10.1002/joc.2199.
- Niasse, M. (2004). « Prévenir les conflits et promouvoir la coopération dans la gestion des fleuves transfrontaliers en Afrique de l'Ouest », in *VertigO, la revue en sciences de l'environnement*, vol. 5, n° 1, 2004, p. 1-11, cf. p. 2.
- Nicholson, S.E. (2005). On the question of the “recovery” of the rains in the West African Sahel. *Journal of Arid Environments*, 63, 615–641. doi:10.1016/j.jaridenv.2005.03.004.
- Nicholson, S.E. (2013). The West African Sahel: A review of recent studies on the rainfall regime and its interannual variability. Hindawi Publishing Corporation ISRN *Meteorology*, Vol. 2013, Article ID 453521, 32 pages, <http://dx.doi.org/10.1155/2013/453521>.
- Noba, K., Ablaye Ngom, Madiop Guèye, César Bassène, Maïmouna Kane, Ibou Diop, Fatou Ndoye, Mame Samba Mbaye, Aboubacry Kane et Amadou Tidiane Ba. (2014). *L'arachide au Sénégal : état des lieux, contraintes et perspectives pour la relance de la filière*. OCL 2014, 21(2) D205 c_ K. Noba *et al.*, [Published by EDP Sciences](#) 2014 DOI: [10.1051/oc/2013039](https://doi.org/10.1051/oc/2013039). . .
- Obuobie, E. (2008). *Estimation of groundwater recharge in the context of future climate change in the White Volta River Basin, WestAfrica*. Bonn: University of Bonn, Ecology and Development Series, Volume 62.
- OCDE (2011). Atlas de l'intégration régionale, Afrique de l'Ouest, www.atlas-ouestafrique.org/spip.php?rubrique33

- Office du Niger (2009). Note technique sur la situation des aménagements en cours et ceux projetés à l'Office du Niger ; Note technique sur la situation des aménagements en cours et ceux projetés à l'Office du Niger. Ségou (Mali) : Office du Niger.
- Oguntunde, P.G., Friesen, J., Van de Giesen, N. et Savenije, H.H.G. (2006). Hydroclimatology of the Volta River Basin in West Africa: Trends and variability from 1901 to 2002, *Physics and Chemistry of the Earth*, 31 (2006) 1180–1188.
- Olivry, Jean-Claude (1982). Le point en 1982 sur l'évolution de la sécheresse en Sénégal et aux îles du Cap Vert. P.35 Rapport Orstom, éditions de l'Orstom, Dakar, 46 p. .
- Olivry, J-C. (2002). *Synthèse des connaissances hydrologiques et potentiel en ressources en eau du fleuve Niger*. World Bank, Niger Basin Authority, provisional report, 160 p, Niamey.
- OMVG. (2002). Organisation pour la Mise en Valeur du Fleuve Gambie. Etude des moyens de production et de transport de l'énergie électrique des pays membres de l'OMVG - Plan d'action environnemental. Evolution de l'environnement physique de l'estuaire de Gambie. Impacts possibles des modifications du régime du fleuve sur les mangroves. Rapport final. Annexe au rapport n°10861 Etude environnementale du projet Sambangalou. Cabinet Gressard, 42 p.
- Opoku-Ankomah, Y. et Amisigo, B-A. (1998). Rainfall and runoff variability in the south western river system of Ghana. Water Resources Variability in Africa during the 20th century (proceedings of the Abidjan '98 Conference held at Abidjan, Côte d'Ivoire, nov.. 1998), IAHS Publi n° 252, 307-314.
- Orange, D., Arfi, R., Kuper, M., Morand, P., Poncet, Y. (2002). Gestion intégrée des ressources naturelles en zones inondables tropicales. IRD Ed. , coll. Colloques et séminaires, Paris, 980 p.
- Origny, J. (2006). Les migrations climatiques générées par la hausse inégale du niveau de la mer - Perspectives géopolitiques. Vol. Collège Interarmées de Défense. REF ?
- Ozdogan, M. et Salvucci, G. (2004). Irrigation-induced changes in potential evapotranspiration in southeastern Turkey: Test and application of Bouchet's complementary hypothesis. *Water Res. Research*, Vol. 40, W04301, doi:10.1029/2003WR002822, 156 p.
- Pagès, J. et Citeau, J. (1990). Rainfall and salinity of a sahelian estuary between 1927 and 1967. *Journal of Hydrology*, 113 (1990) 325-341.
- Paillard S, Treyer S, Dorin B, eds. (2010). *Agrimonde. Scénarios et défis pour nourrir le monde en 2050*. Versailles : éditions Quae.
- Panthou, G., Vischel, T., Lebel, T., Quantin, G., Favre Pugin, A-C., Blanchet, J., Ali, A. (2013). From pointwise testing to a regional vision: an integrated statistical approach to detect non stationarity in extreme daily rainfall. Application to the Sahelian region. *Journal of Geophysical Research*, Volume 118, Issue 15, pages 8222–8237. DOI: 10.1002/jgrd.50340.
- 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.
- Panthou G., Lebel T., Vischel, T., Quantin, G., Sané, Y., Ba, A., Ndiaye, O., Diongue-Niang A., Diopkane M. (2018). Rainfall intensification in tropical semi-arid regions: the Sahelian case *Environ. Res. Lett.* in press <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aac334>.

- Parent, G., Poda, J-N., Zagré, N-M., de Plaen, R., Courade, G. (2002). Irrigation, santé et sécurité alimentaire en Afrique' quels liens? *Cahiers Agricultures* ; 11 : 9- 15.
- Paskoff, R. (1998a). Conséquences possibles sur les milieux littoraux de l'élévation du niveau de la mer prévue pour les prochaines décennies. In: *Annales de Géographie*. 1998, t. 107, n°600. pp. 233-248. doi : 10.3406/geo.1998.20847.
- Paskoff, R. (1998b). Impacts à attendre d'une élévation du niveau de la mer sur les côtes françaises). In : *Impacts potentiels du changement climatique en France au 21^{ème} siècle* Ministère de l'Aménagement du Territoire, p. 46-53.
- Paskoff, R. (2001). L'élévation du niveau de la mer et les espaces côtiers ; Le mythe et la réalité. Collection « Propos », Institut Océanographique, Paris, 191 p., 70 fig.
- Paturel, J-E., Servat, E., Kouamé, B., Boyer, J-F., Lubes-Niel, H., Masson, J-M. (1996). Procédures d'identification de « ruptures » dans des séries chronologiques – modification du régime pluviométrique en Afrique de l'Ouest non-sahélienne. *IAHS Publ.* 238 : 99-110.
- Paturel, JE, Ouedraogo, M, Servat, E, Mahé, G, Dezetter, A and Boyer, JF. (2003). The concept of hydropluviometric normal in West and central Africa in a context of climatic variability. *Hydrol. Sci. J.* 48 (1) 125-137.
- Pélissier, P. (1966). *Les paysans du Sénégal*. Saint-Irieix, Imprimerie Fabrègue, 939 p., 64 pi. hors texte et 74 fig.
- Pellarin, T., Louvet, S., Gruhier, C., Quantin, G., Legout, C. (2013). A simple and effective method for correcting soil moisture and precipitation estimates using AMSR-E measurements. *Remote Sensing of Environment*, 136, 28-36.
- Pellarin, T. (2016). Apport de la Télédétection Spatiale de L'humidité du sol pour L'étude du Cycle de L'eau. HDR French Senior Investigator Memory Thesis, Université Grenoble-Alpes, Saint-Martin-d'Hères, France,; 70p.
- Planel, S. (2008). La chute d'un Éden éthiopien. Le Wolaita, une campagne en recomposition. IRD Eds., Bondy, coll. A Travers champs, 420 p.
- Planton, S., Cazenave, A., Delecluse, P., Dorfliger, N., Gaufres, P., Idier, D., Jamous, M., Le Cozannet, G., Le Treut, H., Peings, Y. (2012). Evolution du niveau de la mer Sous la direction de J. Jouzel Février (Ministère de l'écologie, du développement durable, des transports et du logement ; L'Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique (ONERC).
- Postel, Sandra (1999). Pillar of sand. Norton-Worldwatch book, New York, p.138.
- Postel, S. et Wolf, A.T. (2001). « Dehydrating Conflict », *Foreign Policy*, septembre-octobre 2001, disponible sur le site du Global Forum Policy à l'adresse : www.globalpolicy.org/security/natres/water/2001/1001fpol.htm. (cité par M. Niasse, *op.cit.*).
- Poussin JC, Boivin P. (2002). Performances des systèmes rizicoles irrigués sahéliens. *Cah Agric* 11 : 65-73.
- 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. *The Influence of Climate Change and Climatic Variability on the Hydrological Regime and Water Resources*. Proceedings of the Vancouver Symposium, August 1987. IAHS Publ. no. 168.

- Prince, S.D., Brown de Colstoun, E., Kravitz, L. (1998). Evidence from rain-use efficiencies does not indicate extensive Sahelian desertification. *Global Change Biology* 4, 359–374 <http://dx.doi.org/10.1046/j.1365-2486.1998.00158.x>.
- Prodi, R. (2014). Le lac Tchad, un espoir pour la paix ? *Le Monde Diplomatique*, juillet 2014.
- Prospero, J. M., and Nees, R. T. (1986). Impact of the North African drought and El Niño on mineral dust in the Barbados trade winds. *Nature*, 320, 735 – 738, doi:10.1038/320735a0, Prospero, 2014 : communication à l'AGU
- Quensière, J., Diaw, A.T., Ould El Moustapha Senhoury, A., Charles-Dominique, E. (2006). Un réseau ouest-africain de recherche sur la gestion durable des zones côtières : le projet "Bilan Prospectif. In (Symoens, J.-J., Ed.) *Les écosystèmes côtiers de l'Afrique de l'ouest*. SBWOA / PRCM, Bruxelles, p. 159 - 176.
- Rajot, J-L., Karambiri, H., Ribolzi, O., Planchon, O., Thiébaux, J-P. (2009). Interaction entre érosions hydrique et éolienne sur sols sableux pâturés au Sahel : cas du bassin-versant de Katchari au nord du Burkina Faso. *Sécheresse*, 2009, 20 (1), pp.17-30.
- Ramamurthy, P. et Bou-Zeid, E. (2013). Contribution of impervious surfaces to urban evaporation. AGU Publication WWR.
- Reij, C.; Tappan, G.; Smale, M. (2009). *Agroenvironmental Transformation in the Sahel, Another Kind of "Green Revolution"*; IFPRI Discussion Paper 00914, 2020 vision initiative; IFPRI Pub, Washington, the USA.
- Riou, G. (1990). L'eau et les sols dans les géosystèmes tropicaux. Masson, Paris, 250 p.
- Rodier, J. (1966). Les déversements du Logone vers la Bénoué. *Terres et Eaux*, 19 (49), p. 1-1 ;
- Rognon, P. (1989). Biographie d'un désert, le Sahara. L'Harmattan, 340 p.
- Roudier, P., Sultan, B., Quirion, P. et Berg, A. (2011). The impact of future climate change on West Africa crop yields: What does the recent literature say ? *Global Environment Change*, 21, 1073-1083.
- Ruë, O. (2002). Evolution de l'environnement physique de l'estuaire de Gambie. Impacts possibles des modifications du régime du fleuve sur les mangroves. Etude des moyens de production et de transport de l'énergie électrique des pays membres de l'OMVG - Plan d'action environnemental. Rapport final. Annexe au rapport n°10861. Etude environnementale du projet Sambangalou. Organisation pour la Mise en Valeur du Fleuve Gambie, cabinet Gressard, 42 p.
- Ruë, Olivier (2004). Evolution séculaire du régime des vents générateur de houle en Afrique de l'Ouest ; communication aux « Journées du littoral », Nouakchott, Palais des congrès, Décembre 2004.
- Ruelland, D., Dezetter, A., Puech, C., Ardoin-Bardin, S. (2008). Long term monitoring of land cover changes based on Landsat imagery to improve hydrological modelling in West Africa. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 29, n° 12, 3533-3551.
- SAED (2011). Recueil des statistiques de la vallée du fleuve Sénégal 2008/09. Éditions 2011. 2011. ; Recueil des statistiques de la vallée du fleuve Sénégal 2008/09. Éditions 2011. 2011; Saint-Louis (Sénégal) : SAED, www.saed.sn/.
- Salem-Murdock, Muneera et Niasse Madiodio (1996). Conflits de l'eau dans la vallée du fleuve Sénégal : Implications d'un scénario « zéro inondation ». pp. 12-16 ; Programme Zones Arides IIED, Intl. Inst. For Environment and Development., dossier n°61, 30 p.

- Sall, M.M. (1971) *Dynamique et morphogénèse actuelles (Contribution à l'étude géomorphologique du Sénégal occidental)*. Thèse de Doctorat de troisième cycle de Géographie, Université de Dakar, 290 p.
- Sall M. (1982) *Dynamique et morphogénèse actuelles au Sénégal Occidental*. Thèse de Doctorat d'Etat ès Lettres, Université Louis PASTEUR-Strasbourg 1, Strasbourg, 604 p.
- Sanogo, S., Fink, A.H., Omotosho, J.A., Ba, A., Redl, R. et Ermert, V. (2015). Spatio-temporal characteristics of the recent rainfall recovery in West Africa. *Int. J. Climatol.* DOI: 10.1002/joc.4309.
- Senghor, M-J. (2017). Contribution à l'étude de la salinisation des eaux souterraines de la zone côtière du Sénégal : Cas De l'estuaire du Sine Saloum. Master memory, Senghor University of Alexandria, Egypt. 90 p.
- Senghor, M-J., Descroix, L., Bouaita, Y., Niang, S., Sy, A. A., Sy, B. A., Dianko, I., Diouf, A., Thior, M. (2017). Ressources en eau douce en zone de Mangrove dans les rivières du sud (Sénégal). Colloque International Eau-Société-Climat'2017 (ESC-2017) Hammamet le 2, 3 et 4 Octobre 2017.
- Severino, J-M. (2002). « Gestion intégrée des ressources en eau », Contribution de l'Agence française pour le développement (AFD) à la session du Réseau international des organismes de bassins (RIOB), in *Les progrès réalisés dans le monde dans la gestion intégrée des ressources en eau par bassin*, Forum de l'eau de Kyoto, 2002.
- Sighomnou, D., Descroix, L., Genthon, P., Mahé, G., Bouzou Moussa, I., Gautier, E., Mamadou, I., Vandervaere, J-P., Bachir, T., Coulibaly, B., Rajot, J-L., Malam Issa, O., Malam Abdou, M., Dessay, N., Delaitre, E., Maiga, O-F., Diedhiou, A., Panthou, G., Vischel, T., Yacouba, H., Karambiri, H., Paturel, J-E., Diello, P., Mougin, E., Kergoat, L., Hiernaux, P. (2013). La crue de 2012 à Niamey : un paroxysme du paradoxe du Sahel ? *Sécheresse* : 1-11. doi : [10.1684/sec.2013.0370](https://doi.org/10.1684/sec.2013.0370).
- Sivakumar MVK. (1988). Predicting rainy season potential from the onset of rains in southern Solis Moreno, R., 2007. "Impact du déboisement sur l'hydrologie de la Sierra Madre Occidentale". Thèse UJF et UNL Linares, 220 p.
- Soro, T.D., Djè, K. B., Ahoussi, K. E., Soro, G., Kouassi, A. M., Kouadio, K. E., Oga, Y. M-S., Soro, N. (2012). Hydro climatologie et dynamique de l'occupation du sol du bassin versant du haut Bandama à Tortiya (nord de la Côte d'Ivoire). *VERTIGO* 23 p.vol5.
- Souley Yéro, K. (2007). Genèse et morphodynamique des bas-fonds sahélien : caractérisation du bas-fonds de Boubon. Mémoire de Maîtrise de Géographie, université Abdou Moumouni de Niamey. 92p.
- Souley Yéro, K. (2008) : L'évolution de l'occupation des sols à l'échelle des bassins versants de Wankama et Tondi Kiboro : Conséquences sur les débits ; Mémoire de DEA, université Abdou Moumouni de Niamey, 80 p.
- Souley Yéro, K., Dessay, N., Descroix, L. (2010). Rapport et base de données sur l'historique de l'occupation des sols. Livrable ANR ECLIS, 54 p.
- Souley Yéro, K. (2012). Evolution de l'occupation des sols dans l'Ouest du Niger : influence sur le cycle de l'eau. Thèse de l'Université Joseph Fourier de Grenoble, 250 p.
- Stroeve, J., M.K. Holland, W. Meier, T. Scambos, and M. Serreze (2007). Arctic sea ice decline: faster than forecast, *Geophys. Res. Lett.*, 34, L09501, doi: 10.1029/2007/GL029703.

- Sultan, B. et Janicot, S. (2000). Abrupt shift of the ITCZ over West Africa and intra-seasonal variability. *Geophysical Research Letters*, 27 (20), 3353-3356.
- Sultan, B., Baron, C., Dingkuhn, M., Sarr, B. et Janicot, S. (2005). Agricultural impacts of large-scale variability of the West African Monsoon. *Agricultural and Forest Meteorology*, 128, 95-110.
- Sultan, B. (2012). Global warming threatens agricultural productivity in Africa and South Asia. *Environ. Res. Lett.*, 7, 041001.
- Sultan, B., Roudier, P., Quirion, P., Alhassane, A., Muller, B., Dingkuhn, M., Ciais, P., Guimberteau, M., Traoré, S. et Baron, C. (2013) : Assessing climate change impacts on sorghum and millet yields in the Sudanian and Sahelian savannas of West Africa. *Environ. Res. Lett.*, 8, 014040 (9 pp), doi:10.1088/1748-9326/8/1/014040.
- Sultan, B., Guan, K., Kouressy, M., Biasutti, M., Piani, C., Hammer, G.L., McLean, G., et Lobell, D.B. (2014). Robust features of future climate change impacts on sorghum yields in West Africa. *Environ. Res. Lett.* 9:104006; doi:10.1088/1748-9326/9/10/104006.
- Sultan, B., Roudier, P., Traoré, S. (2015). Les impacts du changement climatique sur les rendements agricoles en Afrique de l'Ouest. . In Sultan, B., Lalou, R., Sanni, M.A., Oumarou, A. et Soumaré, M.A. (Eds) « *Les sociétés rurales face aux changements climatiques et environnementaux en Afrique de l'Ouest* » Ed IRD, pp 209-224.
- Sultan, B., Lalou, R., Sanni, M.A., Oumarou, A. et Soumaré, M.A. (Eds) (2015). « *Les sociétés rurales face aux changements climatiques et environnementaux en Afrique de l'Ouest* » Ed IRD, 460 pages.
- Surell, A. (1841). Etude sur les torrents des Alpes. Ed/ Dunod, Paris, rééd. 1870, 2 vol, 317 et 386 pages.
- Surugue, B. (2008). Un fleuve nommé Niger. film IRD, 52 minutes.
- Sy, S. (2016). Impact du changement d'occupation des sols passé et à venir sur la dynamique de la circulation de la mousson ouest africaine. Thèse de Doctorat UPMC/UCAD, 181 p.
- Sy, S., Noblet-Ducoudré, N.D., Quesada, B.; Sy, I., Dieye, A.M., Gaye, A.T., Sultan, B. (2017). Land-Surface Characteristics and Climate in West Africa: Models' Biases and Impacts of Historical Anthropogenically-Induced Deforestation. *Sustainability*, 9, 1917, doi:10.3390/su9101917.
- Tallaksen, L. M. (1995). A review of baseflow recession analysis. *Journal of Hydrology*, n° 165, p. 349-370.
- Tarhule, A. (2005). Damaging rainfall and floodings: the other Sahel hazards. *Climatic Change*, 72, 355-377. doi: 10.1007/s10584-005-6792-4.
- Taylor, C. M. et T. Lebel (1998). Observational evidence of persistent convective rainfall patterns. *American Meteorological Society*, June 1998, 1597-1607.
- Taylor, C.M., Parker, Douglas J., Kalthoff, Norbert, Gaertner, Miguel Angel, Philippon, Nathalie, Bastin, Sophie, Harris, Phil P., Boone, Aaron, Guichard, Françoise, Agusti-Panareda, Anna, Baldi, Marina, Cerlini, Paolina, Descroix, Luc, Douville, Hervé, Flamant, Cyrille, Grandpeix, Jean-Yves, Polcher. Jan (2011). New Perspectives on Land-Atmosphere Feedbacks from the African Monsoon Multidisciplinary Analysis (AMMA). *Atmos. Sci. Lett.*, 12 : 38-44.

- Taylor, C.M., Gounou, A., Guichard, F., Harris, P.P., Ellis, R.J., Couvreur, F., De Cauwe, M. (2011). Frequency of Sahelian storm initiation enhanced over meso-scale soil-moisture patterns. *Nat. Geosci.*, 4, 430–433, doi:10.1038/ngeo1173.
- Taylor, C.M., De Jeu, R.A.M., Guichard, F., Harris, P.P., Dorigo, W.A. (2012). Afternoon rain more likely over drier soils. *Nature*, 489, 423–426, doi:10.1038/nature11377.
- Taylor, C.M., Belušić, D., Guichard, F., Parker, D.J., Vischel, T., Bock, O., Harris, P.P., Janicot, S., Klien, C., Panthou, G. (2017). Frequency of extreme Sahelian storms tripled since 1982 in satellite observations. *Nature*, 544, 475–480, doi:10.1038/nature22069. .
- Tiffen, M., Mortimore, M., Gichuki, F. (1994). *More People, Less Erosion: Environmental Recovery in Kenya*. John Wiley & Sons, London. 311 pp.
- Tilho, G^{al} (1947). *Le Tchad et la capture du Logone par le Niger*. Edité par Librairie-Imprimerie Gauthier-Villars, Paris, 190 p.
- Tschakert, P., Sagoe, R., Ofori-Darko, G. & Codjoe, S.M. (2010). Floods in the Sahel: an analysis of anomalies, memory, and participatory learning. *Climatic Change* 103, 471-502. doi: 10.1007/s10584-009-9776-y.
- Umali, D.L. (1993). *Irrigation-induced salinity : a growing problem for development and the environment*. World Bank Techn Paper 215. Washington (DC) : World Bank.
- Valentin, C. et Bresson, L-M. (1992). Morphology, genesis and classification of surface crusts in loamy and sandy soils. *Geoderma*, 55, 225-245.
- Vandermotten, C. (2004). *Géopolitique de la vallée du Sénégal*. L'Harmattan, 163 p. ; p.64-65.
- Velicogna, I. (2009). Increasing rates of ice mass loss from the Greenland and Antarctic ice sheets revealed by GRACE, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L19503, doi:10.1029/2009GL040222.
- Vernet R. (2002). "Climate during the late Holocene in the Sahara and the Sahel: Evolution and consequences on human settlement.", In F. A. Hassan (Eds.), *Droughts, Food and Culture*, New York/Boston: Springer, p.47-63.
- Viramontes, D. (2000). « Comportement hydrodynamique des milieux dans la Sierra Madre Occidentale : causes et conséquences de leur évolution » thèse UJF Grenoble, 350 p.
- Viramontes, D. et Descroix, L. (2002). Modifications physiques du milieu et conséquences sur le comportement hydrologique des cours d'eau de la Sierra Madre Occidentale (Mexique). *Revue des Sciences de l'Eau*, 15/2 : 493-513
- Vischel, T., Lebel, T., Panthou, G., Quantin, G., Rossi, A., Martinet, M (2015). Le retour d'une période humide au Sahel ? Observations et perspectives. In Sultan, B., Lalou, R., Sanni, M.A., Oumarou, A., Soumaré, M.A. (Eds), "*Les sociétés rurales face aux changements climatiques et environnementaux en Afrique de l'Ouest*", Ed. IRD, 43-60.
- Vouillamoz, J. M., Sokheng, S., Bruyere, O., Caron, D., Arnout, L. (2012). Towards a better estimate of storage properties of aquifer with magnetic resonance sounding. *Journal of Hydrology*, 458, 51-58.
- Watson, T.A., Werner, A.D. et Simmons, C.T. (2010): Transience of seawater intrusion in response to sea level rise, *Water Resources Research*, 46, W12533, 10p, doi:10.1029/2010WR009564.
- Waziri Mato, M. (2000). *Les cultures de contre-saison dans le sud de la région de Zinder au Niger*. Lausanne, Faculté des Lettres. Université de Lausanne

Werner A.D. et Simmons, C.T. (2009). Impact of sea-level rise on sea water intrusion in coastal aquifers, *Ground Water*, 47, 197-204, doi:10.1111/j.1745-6584.2008.00535.x.

Wittfogel, K. (1974). *Le despotisme oriental : étude comparative du pouvoir total*. Editions de Minuit, Pars, 672 p.

Yaméogo Ouandaogo, S. (2008). Ressources en eau souterraine du centre urbain de Ouagadougou au Burkina Faso : qualité et vulnérabilité. Thèse d'hydrogéologie, Université d'Avignon, 254 p

Zaïri, R. (2008). Etude géochimique et hydrodynamique de la nappe libre du Bassin du Lac Tchad dans les régions de Diffa (Niger oriental) et du Bornou (nord-est du Nigeria) ? univ Montpellier 2, 220 p.

Zhang, W., Brandt, M., Guichard, F., Tian, Q., Fensholt, R. 2017. Using long-term daily satellite based rainfall data (1983–2015) to analyze spatio-temporal changes in the sahelian rainfall regime. *J. Hydrol.*, 550, 427–440, doi:10.1016/j.hydrol.2017.05.033.

Zhao Y., Braconnot P., Marti O., Harrison S. P., Hewitt C., Kitoh A., Liu Z., Mikolajewicz U., Otto-Bliesner B. & Weber S. L. , 2005. "A multi-model analysis of the role of the ocean on the African and Indian monsoon during the mid-Holocene", *Climate Dynamics*, 25(7-8), p.777-800.

http://www.xibar.net/AUTOSUFFISANCE-ALIMENTAIRE-Une-production-record-de-cereales-au-Mali-ATT-riz,-Wade-specule_a13849.html;

<http://fr.allafrica.com/stories/200811260897.html>

<http://www.portail-omvs.org/presentation/objectifs/objectifs>

http://www.sosfaim.be/ppt/filiere_riz_senegal.ppt;

<http://www.omvg.org/> .

<http://www.on-mali.org/>

<http://www.fao.org/nr/water/aquastat/tables>

<http://www.fao.org/docrep/w7304f/w7304f0b.htm>

<http://www.en-quete.net/index.php?no=10&page=32>

<http://www.who.int/fr/news-room/detail/02-05-2018-9-out-of-10-people-worldwide-breathe-polluted-air-but-more-countries-are-taking-action>

<http://www.commodafrica.com/14-03-2016-des-performances-mitigees-dans-le-riz-en-afrique-de-louest>

..

ANNEXE : Cultures irriguées et cultures pluviales,

Le difficile choix de gestion de l'eau

« La production alimentaire de l'Afrique a augmenté d'environ 2 % par an pendant ces 25 dernières années, alors que la croissance démographique annuelle moyenne a été de 3 % au cours de la même période. Pour suivre le rythme de l'accroissement démographique, il faudra améliorer les rendements et augmenter sensiblement la production vivrière en améliorant la maîtrise de l'eau, en préservant l'eau et les sols, et en utilisant des techniques améliorées et des meilleures pratiques de culture ». (Justino Vieira, 2003, alors Directeur des études au SE de OMVG, devenu depuis SE de l'OMVG).

L'irrigation peut apparaître comme un multiplicateur de récoltes, a minima comme une assurance anti-sécheresse, ce qui fait qu'elle est utilisée dans les zones tempérées là où l'agriculture pluviale obtient des rendements très honorables. En France, elle a justifié et permis en même temps la transformation de terres à blé en terroirs à maïs, celui-ci nécessitant 200 mm de plus par saison pour pousser ! (Descroix, 2011). A l'échelle mondiale, la progression des surfaces irriguées a été spectaculaire au cours du 20^{ème} siècle. Les surfaces irriguées sur la Planète sont passées de 8 millions d'hectares en 1800 à 40 millions en 1900, 100 millions en 1950 et 255 millions en 1995. *« Plus de la moitié de ces surfaces se trouvent dans les 4 principaux pays concernés : l'Inde (19,6%), la Chine (19,5%), les Etats-Unis (8,4%) et le Pakistan (6,7%). Parmi ces pays, seul le Pakistan est essentiellement aride. Les pays qui eux, sont le plus dépendants de l'irrigation, sont les pays essentiellement arides, comme l'Egypte (100% de l'agriculture est irriguée), l'Ouzbekistan (89%), le Pakistan (80%) et l'Irak (61%) ».* (Descroix, 2011).

Des Agences de bassin aux objectifs pluriels

On a vu au chapitre 2 que les cinq grands bassins d'Afrique de l'Ouest (Gambie, Sénégal, Niger, Volta, Lac Tchad) avaient chacun leur agence de bassin, incluant un nombre plus ou moins important de pays. Ces agences entendent proposer et promouvoir une GIRE (Gestion Intégrée des Ressources en Eau) adaptée à la fois au potentiel du bassin et aux besoins de leurs habitants. Elles ont élaboré des initiatives ou une « vision partagée » qui a fédéré leurs membres.

Ainsi, la « Vision Partagée sur laquelle se sont rassemblés les 10 pays de l'ABN (Autorité du Bassin du Niger) regroupe des objectifs ambitieux pour le bassin du fleuve Niger : il s'agit en effet d'augmenter la régulation des cours d'eau pour améliorer les débits d'étiage, de faciliter le développement hydro-agricole, la navigation et augmenter la production hydroélectrique ; d'augmenter les superficies irriguées, sécuriser la production agricole, d'augmenter la production d'électricité et améliorer sa desserte, d'appuyer la filière pêche pour une meilleure gestion de la ressource halieutique ; de développer la pisciculture notamment semi-intensive (PADD de l'ABN, 2007) ».

L'objectif poursuivi par l'OMVS (Organisation pour le Mise en Valeur du bassin du fleuve Sénégal) est *« de mettre en œuvre un programme de gestion intégrée et concertée des ressources en eau et des écosystèmes pour un développement durable du bassin. Son ambition*

est d'instaurer une vision globale du développement du bassin du fleuve Sénégal intégrant les différents objectifs sectoriels - parfois antagonistes - que sont l'hydroélectricité, la navigation, le développement de l'eau potable et de l'assainissement, le transport, le développement rural, l'exploitation minière et l'industrie, en s'appuyant sur une analyse fine des ressources en eau du bassin et des écosystèmes qui en dépendent. Pour répondre à cette préoccupation l'OMVS a formulé un schéma directeur d'aménagement et de gestion du bassin, le SDAGE ». (OMVS (<http://www.portail-omvs.org/presentation/objectifs/objectifs>)). Il est prévu que la pêche aussi soit aussi développée.

L'OMVG, quant à elle (Organisation pour la Mise en valeur du Bassin du Fleuve Gambie), n'est pas en reste, qui propose d'atteindre une production de 1 350 GWh/an d'énergie propre pour contribuer à la satisfaction de la demande croissante de la zone OMVG ; mais aussi « *d'apporter une contribution majeure à l'intégration sous-régionale, à l'exploitation de ressources naturelles renouvelables dans un souci de développement durable* » (<http://www.omvg.org/>). Mais aussi « *d'assurer un prix de revient de l'énergie inférieur aux solutions thermiques alternatives, d'améliorer la fiabilité globale du secteur électrique, de réduire les coûts de production électrique grâce à la mutualisation de la réserve tournante des 4 pays et enfin de réduire les émissions de CO₂* » (<http://www.omvg.org/>), cela uniquement dans le domaine de l'énergie ; il est prévu aussi par cette organisation de développer l'irrigation et la pêche.

Tous ces organismes prévoient, quoiqu'il en soit, comme priorité la **production hydroélectrique** et **l'irrigation** ; or ces deux éléments indépendants sont assez difficiles à concilier, la production électrique devant être la plus régulière possible, l'irrigation étant surtout menée par campagnes. Par ailleurs il n'existe pas encore d'inter-connection des réseaux électriques même à l'échelle d'un pays, encore moins d'un bassin ou d'un ensemble de bassin, et avec des centres de consommation de courant souvent très éloignés des barrages et centrales électriques, causant des pertes en lignes proportionnellement 3 à 10 fois plus importantes qu'en Europe. Prétendre y adjoindre un soutien à la pêche et une mise en navigabilité relève donc du défi. Et vouloir faire cela en préservant ressources, zones humides, zones à protéger, en déplaçant le moins possible d'habitants et en améliorant la résilience des milieux et des sociétés au changement climatique fait donc forcément l'objet de discussions devant mener à prioriser les objectifs ; mais les deux premiers (hydroélectricité et irrigation) sont prioritaires avec la fourniture en eau potable.

L'irrigation, une voie obligée ?

« L'Afrique de l'Ouest est relativement peu dotée en grandes infrastructures hydrauliques capables de satisfaire les demandes. Les cultivateurs, trop dépendants des aléas climatiques, réclament l'irrigation. Les consommateurs veulent du riz, qu'il faut irriguer. Les populations sont encore mal desservies en eau potable et le coût de l'énergie appelle à la mise en valeur du potentiel hydroélectrique. Les décideurs nationaux et internationaux sont bien déterminés à relancer les grands projets hydrauliques, mais la régulation des débits des fleuves va nécessiter des négociations serrées entre États à l'échelle des bassins hydrographiques dans le cadre des organisations de bassins mais aussi dans le cadre des accords énergétiques notamment entre les États de la Communauté Économique des États d'Afrique de l'Ouest (CEDEAO). Les négociations vont nécessiter des compromis importants, surtout en ce qui concerne les zones

humides, déjà en voie d'assèchement du fait de la baisse des pluies et qui vont souffrir de la construction de nouveaux barrages » (Barbier et al., 2009)

Dans les zones sahéliennes et soudaniennes, le riz ne peut se cultiver que irrigué ou inondé ; il peut être planté en pluvial au dessus de 1200 mm de pluies annuelles, donc il est fréquent de trouver du « riz de plateau » ou « riz de montagne » en Guinée (dans les bas fonds des montagnes), dans les pays du Golfe de Guinée, et dans les « Rivières du Sud » où il concurrence le riz de mangrove. La demande en riz augmente très fortement avec l'urbanisation ; or celle-ci est galopante en Afrique de l'Ouest, qui reste la région la plus « rurale » de la planète, et qui est donc l'objet d'un rattrapage en cours. *« Le riz constitue un aliment traditionnel pour les populations de l'arc côtier qui s'étend de la Casamance au Libéria, et où les consommations annuelles par habitant atteignent des niveaux comparables à ceux enregistrés en Asie (plus de 90 kg/hab/an en Guinée). Le riz est aussi une des composantes ancestrales des systèmes de cultures autour des fleuves (Niger en particulier). Néanmoins, cette croissance exceptionnelle du marché rizicole repose pour une large part sur une modification des habitudes alimentaires, la consommation moyenne annuelle de riz par tête étant passée de 13 kg dans les années 1960, à plus de 30 kg durant la dernière décennie. L'urbanisation est une des principales causes de cette transition alimentaire, le riz étant un produit bien adapté aux modes de vie des citoyens ouest-africains : temps de préparation réduit et conservation plus facile que pour les autres céréales. Cette forte croissance de la demande a été satisfaite pour une part croissante par les importations. La diffusion du riz dans les habitudes alimentaires va être confortée à partir des années 1990 par des importations facilitées par la mise sur le marché mondial de façon régulière de surplus de riz de quelques pays asiatiques, combinée à des prix bas et à une libéralisation des marchés ouest-africains » (Lançon, 2011).*

De ce fait, la principale motivation des grands périmètres irrigués, au Sénégal (vallée du Sénégal), au Mali (Office du Niger) au Niger (dans la vallée du fleuve) est la volonté d'étendre la riziculture afin d'améliorer la sécurité alimentaire.

Des barrages pourquoi faire ?

« Alors que les projets de grande hydraulique sont à nouveau sur les tables de l'Organisation pour la Mise en Valeur du Sénégal (OMVS), de l'Autorité du Bassin du Niger (ABN) et de l'Autorité du Bassin de la Volta (ABV), il devient important de clarifier les priorités entre les nouveaux usages sachant que les différentes demandes en eau potable, en nourriture, en électricité, en poisson vont croître rapidement. De la même manière, les pressions des groupes environnementaux pour préserver les zones humides vont s'intensifier à mesure que ces zones s'assèchent et que la biodiversité mondiale s'amenuise » (Barbier et al., 2009). Comme on l'a vu au chapitre 2, de nombreux barrages sont prévus dans les prochaines années, avec des justifications multiples, mais avant tout pour produire du courant et permettre l'irrigation. Certains ont été définis comme des « machines à évaporer » (Taoussa, au Mali qui provoquerait l'évaporation d'un volume d'eau supérieur à sa capacité de stockage. Mais il n'est pas encore en voie d'être construit. Par contre, le barrage projeté à Sambangalou, à la frontière de la Guinée et du Sénégal sur le fleuve Gambie, ne serait pas rentable en soi, mais permettrait de justifier une interconnection des réseaux guinéen et sénégalais, et viendrait en « complément » du barrage en voie d'achèvement de Kaleta sur le Konkouré en Guinée. Ce projet aurait toutefois un impact très important sur les mangroves de la Gambie, le deuxième estuaire le plus profond du monde après l'Amazone (plus de 400 km). En effet, d'après Rüe (2002) *« Le report du front salé d'étiage à 100 km en aval de sa position actuelle provoquera-t-il le report sur une distance équivalente en aval de l'ensemble du prisme biogéographique et paysager de l'estuaire ? Le*

risque est grand. Si c'est le cas, c'est la plus belle moitié des mangroves de Gambie qui disparaîtrait ». C'est ce qui se produit depuis plusieurs décennies par exemple dans l'estuaire du Konkouré, suite à la régularisation des flux d'eaux douces par le barrage de Garafiri. (Capo et al., 2006).

Cultures irriguées ou pluviales ?

« L'agriculture Ouest africaine pourrait très bien satisfaire la demande croissante des populations urbaines, même si ces dernières se tournent vers de nouveaux modes alimentaires à base de riz et de blé. Il faudra probablement continuer à importer le blé, mais la sous-région pourrait produire l'essentiel de sa consommation de riz (Abernethy et al., 1985). Les périmètres irrigués représentent moins de 2% des terres cultivées Ouest africaines contre 18 % au niveau mondial et 33 % en Inde et elles ne contribuent que modérément à la sécurité alimentaire de la région » (Barbier et al., 2009)

De fait, les rendements en agriculture pluviale sont faibles en Afrique de l'Ouest (tableau 1). Entre 350 kg/ha pour le mil au Niger jusqu'à un peu plus de 800 kg pour le sorgho au Burkina Faso, de toutes façons bien en dessous des moyennes mondiales et surtout loin de ce qu'on peut espérer raisonnablement. Un fait est incontournable : les sols de la bande sahélo-soudanienne sont pauvres et peu fertiles. Il s'agit trop souvent de sols sableux (souvent moins de 10% de limons et argiles), qui s'encroûtent facilement ; plus au sud, les sols ferrallitiques sont mieux structurés mais pas beaucoup plus fertiles. Tous manquent cruellement d'azote et on sait qu'il suffit souvent d'un seul sac d'engrais azotés à l'hectare pour doubler les rendements....

Tableau 1. Des rendements céréaliers faibles et souvent en baisse

Pays	rendement mil 1980	rendement mil 1995	rendement sorgho 1980	rendement sorgho 1995	rendement riz 1980	rendement riz 1995
Burkina	650	600	600	800		2030
Mali	750	650	700	700		1630
Niger	400	350	420	300		
Sénégal	700	600				2340
Afrique de l'Ouest	700	600	900	700		

source : FAOSTAT

Par ailleurs, l'introduction de méthodes d'intensification écologique de l'agriculture permet aussi d'améliorer significativement ces rendements. Plusieurs exposés l'ont montré lors de l'atelier du LMI IESOL à Dakar en juin 2015 (IESOL, 2015) : l'intégration élevage/cultures, l'utilisation des composts, des bois raméaux, des produits résiduels organiques, la sélection de micro-organismes symbiotiques, l'association plantes/arbustes ou plantes arbres (légumineuses en particulier), la symbiose mycorhizienne, sont autant de pratiques qui permettent d'améliorer les rendements, de mieux infiltrer l'eau, et donc en même temps d'améliorer les rendements de l'eau de pluie, les teneurs en eau du sol, la re-végétalisation, et l'infiltration des intrants et du carbone.

Lors d'un forum organisé par un institut universitaire sénégalais pour la journée de l'environnement en 2015, un groupe de discussion ouvert a eu comme sujet à débattre, après deux exposés par des spécialistes, de : « l'autosuffisance en riz du Sénégal comme menace sur

la gestion des ressources naturelles ». Le pays est très loin de l'autosuffisance, mais ses ressources en eau lui permettraient tout à fait de l'atteindre. La dépendance alimentaire du Sénégal vient en grande partie du fait de la mondialisation : en effet, le cours du riz et plus encore du riz cassé, très prisé par les sénégalais, est très bas, ce qui rend le riz local pratiquement invendable à coût économique, peut être depuis plus d'un siècle. Le Sénégal peine à augmenter ses surfaces rizicoles. Le pays possède deux régions rizicoles potentielles : la Casamance, région de riziculture traditionnelle depuis plus de 800 ans, et la vallée du fleuve Sénégal, où les volumes d'eau attribués au pays par l'OMVS autorisent de prévoir l'équipement de 240000 hectares de rizières avec deux récoltes par an. Cependant, en Casamance, les surfaces cultivées ont diminué de plus de 80% en 50 ans, passant de 125000 hectares en 1960 à environ 25000 aujourd'hui, surtout du fait de l'exode rural mais aussi de la sécheresse et de l'insécurité ; dans la vallée du fleuve, où deux récoltes par an sont possibles, seuls 110000 hectares ont été équipés depuis 30 ans et la mise en eau du barrage de Manantali, au Mali, qui permet de réguler les flux pour l'irrigation. Mais plus du quart (30000 hectares) ont déjà été dégradés par salinisation, et peu de surfaces sont récoltées deux fois, malgré le coût très élevé des casiers, les agriculteurs préférant avoir une seconde spéculation non irriguée pour limiter les risques. Le pays est très loin de l'autosuffisance, les importations continuent de croître, se situant aux alentours d'un million de tonnes par an depuis le début des années 2010. Or, la réhabilitation des casiers de riziculture inondée en Casamance, la création dans cette même région de nouveaux casiers dans des vallées non encore exploitées, l'extension du « riz de montagne » (pluvial), et une intensification écologique (en fait un retour aux méthodes traditionnelles, souvent) permettraient de récolter 2,5 tonnes de riz/hectares (le rendement traditionnel, mais aujourd'hui on n'atteint pas la moitié de ce rendement en moyenne) sur 200000 hectares, soit une production de 500000 tonnes par an ; dans la vallée du fleuve, en atteignant les rendements moyens de l'Office du Niger au Mali (5 tonnes par hectares), 200000 hectares pourraient produire 1 million de tonnes, avec dans les deux cas des potentiels de progression conséquents (en Casamance en introduisant la culture attelée, limitée pour l'heure par des interdictions culturelles ; dans la vallée du fleuve en généralisant la double récolte). Avec un million et demi de tonnes annuels sur seulement 400000 hectares (environ 4% de la SAU), le Sénégal serait autosuffisant jusqu'en 2025 et les ressources en eau ne seraient pas du tout menacées. Le Mali a vu sa production de riz paddy passer de 600000 à 2600000 tonnes de 2008 à 2017 (<http://www.on-mali.org/> et <http://www.commodafrica.com/14-03-2016>)

Au cours du débat cité, un étudiant a posé benoîtement la question : n'est-ce pas vraiment une menace pour les ressources naturelles que de vouloir atteindre l'autosuffisance en riz ? Ce qui était l'objet du débat. Or depuis 150 ans, plus de 35% de la SAU du pays est consacrée à la culture de l'arachide, qui épuise les sols, se pratique après défrichage total, et qui n'est plus transformée sur place, les bas cours mondiaux de l'arachide et surtout les fameux PAS (Plans d'Ajustement Structurels imposés par le FMI au début des années 1990) ayant conduit à la disparition d'une grande partie de la filière : l'arachide est exportée brute ou peu traitée. Il est difficile et coûteux au Sénégal, de se procurer en 2015 un litre d'huile d'arachide : on la trouve, mais entre 20 et 100% plus chère que l'huile de soja OGM d'Argentine ou que l'huile de palme d'Indonésie. Ou alors l'huile d'arachide, si on la trouve, provient très rarement du Sénégal, plus souvent de France ou de l'UE. Dans ce contexte, quelle doit être la priorité du Sénégal : faire perdurer un système de traite colonial en déclin qui a épuisé les sols et ne rapporte plus grand chose au pays, sinon la paille qui elle seule justifie encore le maintien d'une « filière », ou tenter d'améliorer les productions vivrières, les importations représentant plus de la moitié de la consommation du Sénégal et 15% du total du PNB sénégalais ?

Ceci étant, au Sénégal, la hausse de la production céréalière passe avant tout par celle du riz (sur les 400000 hectares facilement équipables) et éventuellement par une amélioration des

rendements du mil ; et aussi, dans les provinces pluvieuses du sud, par le remplacement de l'arachide par des cultures vivrières telles que manioc, igname, sorgho, maïs et riz pluvial toutes cultures possibles sous les 1200 mm de pluie annuelle des régions sud.

Si le Sénégal parvient à cultiver 400000 hectares de riz dont la moitié en irrigué et en double récolte (vallée du fleuve Sénégal), l'autre moitié en inondé (Casamance), il devrait assurer mieux que sa sécurité, son autosuffisance en céréales, excepté le blé qui continuera à être importé.

Une consommation d'eau agricole faible

Comme le montre le tableau 2, la consommation d'eau est très faible en Afrique de l'Ouest. Cela est dû principalement au défaut d'adduction d'eau qui fait que les robinets d'eau domestiques sont rares, surtout en zone rurale. La faiblesse du tissu industriel et la faible part de l'irrigation expliquent aussi la faiblesse des volumes consommés. Les pays les plus gros consommateurs sont sans surprise le Nigeria et ses 187 millions d'habitants, suivi par les pays ayant déjà développé l'irrigation, surtout le Mali, suivi de loin par le Sénégal et la Mauritanie.

Tableau 2. Distribution de la consommation d'eau par pays et secteur d'activité

pays	usage agricole		usage industriel		usage municipal et domest.		total
	en 10 ⁹ m ³ /an	en % du total	en 10 ⁹ m ³ /an	en % du total	en 10 ⁹ m ³ /an	en % du total	en 10 ⁹ m ³ /an
Bénin	0,06	45	0,03	23	0,41	32	0,13
Burkina Faso	0,42	51	0,02	3	0,32	46	0,82
Cameroun	0,75	70	0,1	9	0,25	21	1,1
Cap Vert	0,025	91	0,0004	2	0,002	7	0,022
Côte d'Ivoire	0,6	38	0,3	21	0,65	41	1,55
Gambie	0,04	43	0,017	19	0,034	38	0,091
Ghana	0,65	65	0,1	1	0,24	24	1
Guinée	0,3	53	0,05	9	0,2	38	0,55
Guinée-Bissau	0,14	82	0,008	5	0,023	13	0,175
Liberia	0,012	9	0,053	36	0,08	55	0,14
Mali	5,1	98	0,004	0,07	0,11	1,9	5,2
Mauritanie	1,22	91	0,03	2	0,1	7	1,35
Niger	0,66	67	0,03	3	0,29	30	0,99
Nigeria	7	54	2	15	4,1	31	13,1
Sénégal	2,1	93	0,06	3	0,1	4	2,26
Sierra Leone	0,046	22	0,055	26	0,11	52	0,212
Tchad	0,67	76	0,1	12	0,1	12	0,88
Togo	0,08	45	0,004	2	0,09	53	0,17

Source FAOSTAT, année 2005

Cependant, du fait que l'essentiel des surfaces cultivées le sont en pluvial, et du fait des très faibles rendements céréaliers obtenus à l'heure actuelle par ce type d'agriculture (voir tableau 1), on peut supposer que l'essentiel des gains de production dans les prochaines années se fera en agriculture pluviale. Sauf bien sûr pour le riz où la culture pluviale n'est possible qu'au sud des régions soudaniennes et surtout en zone guinéenne où la pluviométrie annuelle dépasse 1200 mm.

C'est donc le Sénégal, plus gros pays consommateur de riz par habitant des pays de la bande soudano-sahélienne, qui peut le plus attendre de l'irrigation en termes de sécurité alimentaire. Le pays est à la fois celui qui est le plus urbanisé, mais surtout c'est le pays où la colonisation

a le plus marqué les structures agraires et les spéculations ; en effet depuis le milieu du 19^{ème}, le colonisateur a forcé les paysans sénégalais à produire de l'arachide pour le marché métropolitain. Vu l'importance de la surface consacrée à cette culture, le Sénégal indépendant n'a pas réussi à modifier cet état d'économie de traite extravertie. Au contraire, la culture s'est même étendue vers le nord et vers le sud, ces dernières années, du fait du retour de la pluviométrie : en plein marasme de la filière, les champs d'arachide s'étendent à présent sur les pâturages du Ferlo où ils entrent en concurrence avec les éleveurs nomades (Fall, 2014) ; et aussi surtout vers le sud, où la région de Kolda est celle qui connaît le plus rapide déboisement de toute l'Afrique de l'Ouest, devant l'avancée d'un front arachidier qui consiste à couper à blanc la forêt pour faire pousser une production qui n'est plus valorisée sur place, de surcroît dans une région où on pourrait avec succès pratiquer des cultures vivrières qui manquent tant au pays : manioc, igname, maïs, sorgho, bananes plantain, etc.

Des difficultés de créer ex nihilo un périmètre rizicole dans une région sans tradition

De fait, le Sénégal cumule tous les désavantages cités par Lançon (2011) : « *À l'opposé de ce que l'on observe ailleurs dans le monde, la croissance de la riziculture ouest-africaine repose surtout sur l'extension des superficies rizicoles. L'échec relatif de ces politiques d'intensification a des causes multiples. D'une part l'environnement physique en Afrique de l'Ouest est très différent de la situation asiatique. Si l'irrigation est la technique de production la plus répandue en Asie, elle ne représente que 13% des superficies rizicoles en 2006 en Afrique de l'Ouest. Son développement à grande échelle dans le contexte ouest-africain, qui ne bénéficie pas des grandes plaines alluviales et des deltas asiatiques, demande davantage de ressources techniques et financières. La pression foncière moins forte dans le contexte ouest-africain ne favorise pas non plus la sensibilisation des producteurs à des techniques de production plus intensive en travail. Pourtant, l'essentiel de l'investissement public en termes de recherche et développement est concentré sur la riziculture irriguée. Ces programmes d'intensification rizicole ont été également confrontés à des environnements politiques et économiques peu favorables. Au niveau national on a pu observer des incohérences dans les mesures publiques, certains États poursuivant à la fois des objectifs de développement de la riziculture nationale tout en facilitant l'accès des populations « politiquement sensibles » (fonctionnaires, urbains) au riz importé. Les pouvoirs publics étaient d'autant plus incités à maintenir ces objectifs contradictoires que la croissance de la demande était rapide et que les progrès en termes de développement de l'offre locale étaient inévitablement plus lents. Par ailleurs, la disponibilité en riz sur le marché mondial permettait d'assurer un approvisionnement régulier et ces importations assuraient des ressources fiscales parfois significative* ». (Lançon, 2011).

On a vu au chapitre 2 que la vallée du fleuve Sénégal avait pu être un foyer de tension autour de la ressource pastorale, plus qu'autour de l'eau. Le pays lui-même, comme mentionné ci-dessus (Lançon, 2011) cumule les handicaps ; en plus de la faible rentabilité du riz local (coûts de production élevés, monnaie surévaluée ?), le pays a hérité de son histoire récente un très grand poids économique des importateurs, qui constituent un lobby pas trop favorable aux productions locales.

Une croissance récente de l'irrigation

Après une première phase de croissance dans les années 1960-1970 en Guinée (dans la vallée du Niger) et au Ghana (correspondant à la construction du barrage d'Akosombo), c'est surtout dans les années 1990-2000 que l'irrigation décolle en Afrique de l'Ouest, avec en particulier les aménagements importants de l'Office du Niger (Mali) et le début de la riziculture dans la vallée du Sénégal après la mise en eau du barrage de Manantali en 1988 (figure 1).

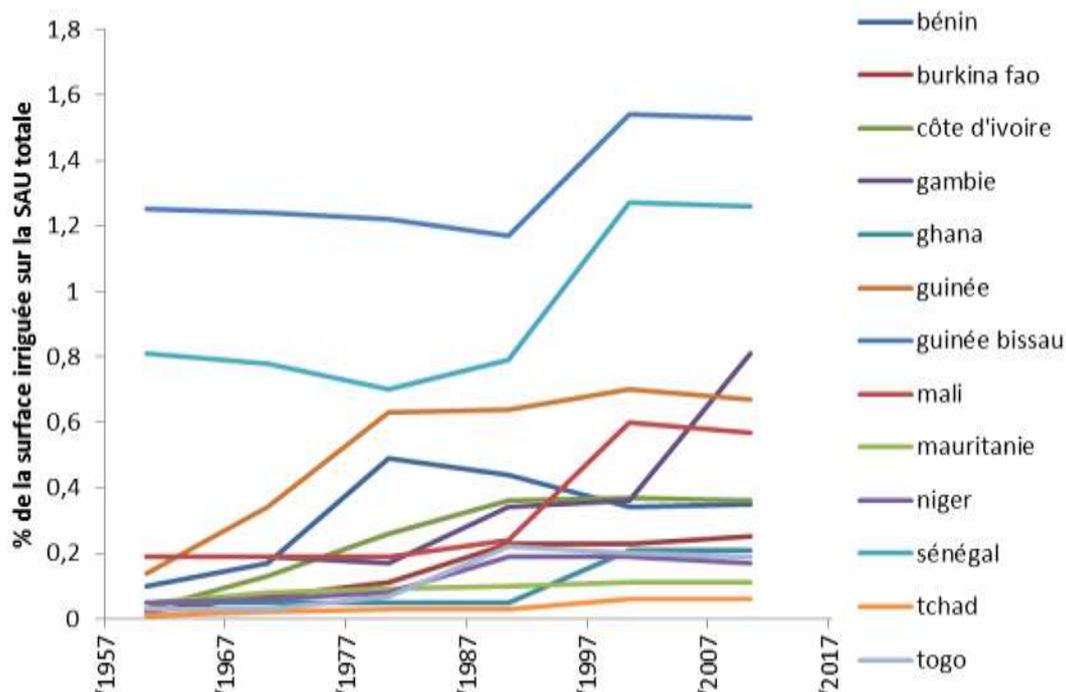


Figure 1. Evolution de la part de la SAU consacrée aux cultures irriguées en Afrique de l'Ouest

Comme les surfaces irriguées restent faibles (Tableau 3 et figure 1), même au Mali et au Sénégal qui y consacrent les plus grandes proportions de leur SAU), et comme l'eau reste relativement abondante (car peu utilisée justement), il est clair que le potentiel de développement et extension des périmètres irrigués en Afrique de l'Ouest est important.

		1995			2015			2030			2015
	potentiel d'irrigation	surf irriguée	intensité cult	surf cultivée	surf irriguée	intensité cult	surf cultivée	surf irriguée	intensité cult	surf cultivée	% irrigation
Bénin	300	1	158	2	4	155	6	6	153	9	0,35
Burkina Faso	164	24	160	39	28	170	48	33	180	59	0,25
Cameroun	240	33	85	28	38	90	34	42	100	42	0,30
Côte d'Ivoire	475	69	85	59	92	100	92	113	120	135	0,36
Ghana	1900	4	100	4	4	110	5	5	120	6	0,21
Guinée	520	93	80	74	108	100	103	114	110	125	0,67
Liberia	600	3	85	3	3	90	3	4	100	4	0,11
Mali	560	128	200	258	157	200	315	183	200	365	0,57
Mauritanie	221	91	150	137	101	150	151	108	150	163	0,11
Niger	270	66	90	60	74	100	74	82	110	91	0,17
Nigeria	3137	249	100	249	304	110	334	380	120	456	0,38
Sénégal	400	71	73	52	96	85	82	118	100	118	1,26
Sierra Leone	807	32	100	32	32	100	32	32	100	32	0,87
Tchad	935	13	85	11	15	100	15	16	120	20	0,06
Togo	180	8	106	8	9	114	10	10	123	12	0,19
<i>surf en 1000 ha; intensité en %</i>											
	source: Faurès et Sonou, 1996										

Tableau 3. Potentiel d'irrigation, surfaces irriguées, intensité culturelle, surfaces cultivées et pourcentage des surfaces irriguées sur la SAU dans les principaux pays d'Afrique de l'Ouest.

Risques environnementaux, fonciers et sanitaires de l'irrigation

Dans les cours de géographie générale, d'agronomie, d'anthropologie, on entend souvent parler des sociétés hydrauliques et du despotisme oriental, chers à Wittfogel (1974) ; en effet, c'est bizarrement dans des régions de régime pluviométrique « méditerranéen » c'est-à-dire caractérisés par une sécheresse estivale, que l'existence de l'agriculture la plus ancienne est attestée (Mésopotamie, vallée de l'Indus, basse vallée du Nil). En fait l'agriculture a probablement existé auparavant ; ce sont les traces des agricultures les plus anciennes, qu'on trouve dans ces régions, du fait qu'elles étaient irriguées ; il faut en effet mettre en place une sévère « police des eaux » pour arriver à partager l'eau dans les milieux où elle est rare. Mais il est d'autant plus intéressant de se référer à ces régions qui ont connu l'agriculture irriguée sans discontinuer depuis 5000, 6000 voire 7000 ans, quand des périmètres irrigués créés au milieu ou à la fin du 20^{ème} siècle sont abandonnés à cause de la salinisation en quelques années ou quelques décennies avec nos moyens modernes, comme cela s'est produit aux Etats-Unis, au Mexique, au Maroc, entre autres. On a souvent juste oublié de copier nos ancêtres et de prévoir un bon drainage des sols pour éviter que les sels, toujours contenus en faible quantité dans l'eau douce, ne s'accumulent dans le profil cultural.



Figure 3 : la micro-irrigation (culture d'oignons) pratiquée par les paysans dogons sur le plateau de Bandiagara (Mali central)

« Pour que l'irrigation soit durable, il ne faut pas qu'elle engendre de dégradation à l'environnement et, en premier lieu, aux sols. En effet, les plus grands dangers, communs à la plupart des zones arides, sont la salinisation et l'alcalinisation des sols (Umali, 1993). Ces risques concernent ainsi aussi bien de grands aménagements comme ceux de l'Office du Niger et du delta du Sénégal, que des périmètres de taille plus modeste comme ceux situés au Niger (Poussin et Boivin, 2002 ; Marlet et N'Diaye, 2002 ; Barbiero et al., 2005). Une solution est

d'améliorer le drainage pour évacuer les sels. Mais cela impose d'aménager un réseau de drainage fonctionnel, voire d'installer une station d'exhaure lorsque l'irrigation est gravitaire. Les petits périmètres ne sont pas épargnés par ce type de problème, même s'ils sont souvent situés sur des sols de bourrelet de berge ou de terrasse, plus filtrants (Marlet et al., 1996). Les impacts de l'irrigation sur les zones humides naturelles constituent un autre problème environnemental de plus en plus sensible » (Barbier et al., 2011).

Les problèmes de tenure sont également fréquents dans nos régions sans propriété privée traditionnelle. « Depuis la crise des prix alimentaires en 2008, les médias relatent de nombreuses initiatives privées ou publiques destinées à acquérir des terres agricoles en Afrique. L'Office du Niger (ON) au Mali et le delta du fleuve au Sénégal comptent parmi les zones qui attirent les investisseurs étrangers. Les pouvoirs publics y investissent depuis le milieu du xx^e siècle mais les surfaces actuellement cultivées sont inférieures au quart du potentiel de terres aménageables (Office du Niger, 2009 ; SAED, 2011). L'exploitation des terres irriguées par l'agriculture familiale a été privilégiée jusqu'aux années 2000, les investissements privés étrangers se limitant à des complexes industriels sucriers. Mais cette seconde option semble être privilégiée par les gouvernements depuis une dizaine d'années.

Ce choix semble paradoxal pour deux pays pauvres, marqués par de fortes croissances démographiques et par l'émigration massive de jeunes ruraux vers les villes et à l'étranger. Dans les deux situations, les listes d'attente de paysans désirant accéder à l'agriculture irriguée, accroître leurs surfaces ou installer leurs enfants sont longues. Le développement d'une agriculture familiale, créatrice d'emplois et de surplus est a priori, plus approprié que l'installation de grandes entreprises privées ». (Bélières et al., 2013). De fait de nombreux cas d'accaparement (land grabbing) dont signalés dans la sous région, comme celui du projet de production d'agro-carburants de Ndiavel dans le delta du Sénégal.



Figure 4 : une micro-irrigation ayant permis de créer un terroir sur du sable : le Gandiolais et son maraîchage (nord du Sénégal)

L'apport de grandes quantités d'eau douce là où il n'y en avait pas auparavant, où là où l'eau était auparavant salée, ne va pas sans poser des problèmes de santé publique. « *La plupart des programmes d'hydro-aménagement partent de l'hypothèse qu'en augmentant les quantités d'eau disponibles dans des régions à déficit hydrique, ils permettront d'accroître les productions agricoles et, par voie de conséquence, la couverture des besoins alimentaires, contribuant ainsi, d'une part, à l'amélioration de l'état nutritionnel des individus et, d'autre part, à l'amélioration des revenus des paysans - en particulier celui des femmes - via la commercialisation des surplus. Les bénéfices économiques attendus de ces projets offriront donc aux populations la possibilité de réinvestir une partie plus importante de leurs ressources dans les soins de santé et la prévention des maladies. Dans le contexte africain, toutefois, les acteurs du domaine de la santé tiennent à souligner que l'eau peut être également avant tout synonyme de maladies et, qu'en conséquence, toute situation en changement implique de savoir gérer de nouveaux risques* ». (Parent et al., 2002).

« *De nombreux pays africains ont misé sur l'irrigation pour accroître la production agricole et assurer une meilleure sécurité alimentaire aux populations. Cependant, ces hydro-aménagements, souvent synonymes de risques sanitaires, n'ont pas toujours atteint leurs objectifs* » (Bouguerra, 2007). L'agriculture et l'irrigation en particulier, semblent pouvoir permettre de sortir de la pauvreté et de la précarité. « *Or, l'agriculture exige de l'eau et les retenues d'eau (barrages, barrages collinaires, mares et marigots) présentent des risques d'anophélisme. Le paludisme coûte deux millions de morts par an au Continent Noir. L'incidence de la maladie sur l'économie est énorme. D'après l'OMS, 38 % du PNB africain partirait en fumée du fait de la morbidité et de la mortalité. La bilharziose, quant à elle, est aussi un problème d'éducation car souvent les gens, dans la vallée du Nil – où elle fait des ravages – par exemple, font leurs besoins dans le fleuve ou les canaux d'irrigation. S'ils sont contaminés, le parasite va proliférer. Il est vrai que l'habitat est si rudimentaire que les gens n'ont pas le choix* » (Bouguerra, 2007)



Figure 5 : périmètre maraîcher expérimental dans le centre de la Grande Muraille Verte à Widou (Ferlo, nord du Sénégal)

« Outre le fait qu'elles favorisent un certain nombre de vecteurs de maladies, les eaux utilisées pour l'irrigation peuvent également être source de contaminations directes, soit microbiologiques (coliformes, streptocoques fécaux, virus, parasites), soit physico-chimiques (pesticides, métaux lourds). Ces risques sont surtout le fait des cultures maraîchères, principalement celles pratiquées en milieu urbain, où l'arrosage des légumes se fait très souvent avec des eaux usées non traitées » (Parent et al., 2002).

Quelques belles réussites

A grande échelle

Les deux grands périmètres irrigués d'Afrique de l'Ouest ont été équipés sur les deux plus grands fleuves : l'Office du Niger (au Mali) a été créé avant l'indépendance, mais s'est beaucoup accru depuis.

Le delta intérieur du Niger, "grenier à riz" du Mali, est l'une des surfaces irriguées les plus étendues et les plus anciennes d'Afrique de l'Ouest. L'Office du Niger au Mali gère un périmètre irrigué situé en rive gauche du fleuve Niger, à environ 30 km en aval de Ségou, 250 km en aval de Bamako. Les périmètres irrigués y représentent aujourd'hui environ 100 000 ha, installés dans le delta mort du fleuve, les productions principales sont le riz, le maraîchage, le sucre et les produits d'élevage. La croissance démographique, l'arrivée de migrants et les modes de gestion du périmètre entraînent une pression accrue sur les ressources en terres et en eau. Aujourd'hui la population concernée représente environ 500 000 personnes, environ 25 000 exploitations familiales sont installées sur la zone, avec une superficie moyenne inférieure à 4 ha. Les possibilités d'extension du domaine aménagé sont importantes : le potentiel estimé dès les années 1930, à la conception du projet, était d'environ 1 000 000 d'ha de sols aptes à la culture irriguée avec une irrigation gravitaire à partir du barrage de Markala. Cependant, les études sur la disponibilité en eau sont beaucoup moins optimistes et évaluent le potentiel irrigable avec les techniques actuelles d'irrigation (gravitaire) à 250 000 ha environ. La zone de l'Office du Niger a connu une évolution spectaculaire des performances agricoles depuis les années 1980 ce qui en a fait une "success story" : « entre 1980 et 2006, les rendements en riz ont été multipliés par 4 pour atteindre environ 6 t/ha selon les statistiques de l'Office du Niger. La production de riz est passée de 60 000 à plus de 500 000 t/an. Cette dynamique s'explique par la réhabilitation des infrastructures, l'introduction de techniques intensives, la libéralisation du système économique, la responsabilisation des producteurs et par une demande en riz et en produits maraîchers (échalote) en forte progression » (www.on-mali.org/site Office du Niger). Elle s'est poursuivie puisqu'on a dépassé les 2,5 millions de tonnes de paddy en 2016.

L'équipement du Sénégal, qui est prévu pour une superficie de 375000 hectares irrigués (240000 au Sénégal, 120000 en Mauritanie, 15000 au Mali), est bien plus récent, puisqu'il n'a pu commencer qu'avec la construction du barrage de Manantali ; comme on l'a vu au chapitre deux et ci dessus, l'équipement est bien plus lent que prévu, des surfaces importantes ont déjà été dégradées par salinisation, le riz est produit à un prix de revient bien au dessus du cours mondial, et a du mal à se faire une place que le marché sénégalais (une grande partie serait revendu plus ou moins licitement en Mauritanie). Malgré tout cela, les environ 110000 hectares équipés (mais 80000 cultivés seulement) produisent entre 200 et 500000 tonnes chaque année depuis une quinzaine d'années, pourvoyant entre le quart et le tiers du marché national

sénégalais. L'échec n'est pas patent, il y a des retards, des freins, mais rien ne dit que les 240000 hectares ne seront pas un jour équipés au Sénégal, les 375000 dans les 3 pays concernés.

A petite échelle

De nombreux petits périmètres sont apparus, souvent aux alentours des villes pour les alimenter en produits maraîchers, mais aussi, partout, sous formes de périmètres villageois ou inter villageois.

- a- Le Bas Sankarani, au Mali : *« Au-delà des grands périmètres étatiques dédiés à la riziculture, les bénéficiaires du barrage de Sélingué sur le Sankarani sont une aubaine pour les petits maraîchers maliens. Depuis 1982, cet affluent du fleuve Niger a vu son débit amélioré et son niveau de basses-eaux augmenté de moitié. L'idée d'utiliser cet apport en eau a alors germé dans la tête des exploitants familiaux. De fait, transporter sa motopompe sur son vélo pour aller irriguer sa parcelle est désormais chose courante... » « En comparant les images satellites entre 2007 et 2010, nous avons constaté une augmentation de 20 % des surfaces irriguées sur la rive droite du Sankarani »*, confirme Marjorie le Bars, spécialiste en modélisation des systèmes complexes à l'IRD. Ces solutions alternatives, bien que reposant sur des initiatives individuelles, ont leur place dans la stratégie de réduction de l'insécurité alimentaire. *« D'ici 2025, la population du Mali aura en effet presque doublé et seul un quart des terres potentiellement irrigables est exploité. D'ores et déjà les agriculteurs qui ont recours à ce mode d'irrigation peuvent ainsi intensifier et diversifier leurs productions (maraîchage, mangues, papayes, agrumes) et par là améliorer leurs revenus »* (Le Bars, 2012).
- b- La basse Komadougou (Est du Niger). Les sociétés rurales de la région de Bosso ont implémenté un système bien adapté aux fluctuations du niveau du lac : les périodes de hautes eaux étaient favorables à la pêche et à la régénération des sols, alors que les périodes de basses eaux ont permis le développement de l'agriculture ; en dépit de la diminution des pluies et de la baisse du niveau du lac, ces sociétés ont su s'adapter en transformant leur agriculture. Deux systèmes co-existent : sur la rive de la Komadougou-Yobé, la spéculation actuelle est le poivron ; c'est une activité récente et très monétarisée ; elle a attiré les actions d'améliorations des sols et est très profitable ; dans les dépressions du lac Tchad, les cultures de décrue sont moins coûteuses et elles fournissent tant la consommation domestique que les marchés. (Luxereau *et al.*, 2012) ;
- c- Le pays dogon (centre du Mali) est devenu en quelques décennies une grande zone de production d'oignons, création ex nihilo dans un contexte hostile de rareté de sols (seulement 22% de terres arables), par ailleurs peu fertiles, une forte érosion hydrique et éolienne et la présence de nombreux prédateurs ; l'oignon représente 70% des cultures dans les petits casiers aménagés autour des points d'eau : il faut noter l'extraordinaire travail de création de zones cultivables sur le socle rocheux par un apport de terre à proximité des points d'eau. Les oignons du pays dogon sont appréciés dans toute la sous région où ils sont vendus surtout sous forme déshydratée (voir figure 3).



Figure 6 : jardins maraîchers dans les environs de Niamey, dans un bas fonds, alimenté par des séanes de quelques mètres (Karma, 35 km au nord de Niamey)

- d- le Gandiolais. Dans l'arrière pays de Saint Louis du Sénégal, le Gandiolais est sinistré ; cette région s'est spécialisée depuis le début du 20^{ème} siècle dans le maraîchage ; elle est une réussite de la fabrication d'un terroir ; avec uniquement de la main d'œuvre, les agriculteurs ont rendu cultivables des dunes de la rive gauche du fleuve Sénégal, à l'aide d'une multitude de puits et séanes (quelques mètres de profondeur) et des petites planches de 1-2 m² arrosées à la main, avec des rendements élevés ; c'est devenu une grande région productrice d'oignons (très demandés sur le marché sénégalais), mais aussi de carottes, de tomates, etc. Toutefois, comme on l'a vu au chapitre 9, la région est sinistrée dans sa partie nord par la salinisation progressive de la nappe qui l'alimente, en raison des changements de régime du fleuve Sénégal induits par la construction du barrage de Diama (1985) et surtout l'ouverture de la brèche de la Langue de Barbarie, en 2003 (voir figure 4). Non loin de là, dans le Ferlo, des petits jardins villageois ont été installés pour diversifier les sources de revenus (figure 5).
- e- Les alentours de Niamey ont vu se développer d'importantes zones irriguées spécialisées dans le riz, et, plus près, de la ville, dans le maraîchage, comme dans les basses vallées des principaux affluents « locaux » du Niger, comme la vallée de Boubon et celle de Karma (figure 6). Quelques oasis au Niger central : bien avant la région de Bosso, le Niger central s'est spécialisé dans des cultures irriguées à haute intensité de main d'œuvre ; ainsi la région de Galmi, non loin de Maradi a vite cultivé la tomate,

très recherchée dans les pays du Golfe de Guinée où la tomate ne rougit pas, faute de soleil ; elle est maintenant spécialisée surtout dans l'oignon violet qui, lui aussi, s'exporte très bien dans les pays plus peuplés du sud où l'oignon a du mal à venir ; cette spéculation a rejoint aussi la tomate et quelques fruits comme le pamplemousse dans les oasis bordières de l'Aïr, au nord du pays, comme Timia (figures 7 et 8) et surtout Tabelot. Mais la multiplication des motopompes y menacent la pérennité des nappes de ces oasis.



Figure 7 : mécanisme d'exhaure animal dans l'oasis de Timia (Aïr, Niger)



Figure 8 : maraîchage et maïs au cœur de l'oasis de Timia (Aïr, Nord Niger)



Figure 9 : rizières dans la proche banlieue de Niamey (Haro banda, en rive droite)

Enfin, en dehors des grands périmètres et des petits périmètres spécialisés dans une culture de rente, la vallée du Niger, comme celle du Sénégal, a depuis longtemps, vu l'installation de casiers rizicoles, aussi bien dans des périmètres de plusieurs centaines d'hectares au Niger, consacrés au riz, surtout dans les régions de Niamey et Tillabéri (Figure 9) que plus en amont et au fil de l'eau comme dans les îles de la région de Gao au Mali (figure 10).

Conclusion

« L'avenir de l'irrigation au Sahel sera d'abord porté par les dynamiques rurales, car les agricultures familiales assurent encore la quasi-totalité de la production céréalière et maraîchère irriguée. Mais il va aussi être déterminé par de puissants changements en cours : forte croissance urbaine induisant des demandes alimentaires en augmentation rapide et qui évolue vers une plus grande consommation de fruits, de légumes et de produits animaux – lait et viande (Paillard et al., 2010) ; déficits énergétiques très importants poussant à l'aménagement et à la régulation des fleuves (Niasse, 2004) ; acquisitions foncières massives par de grandes sociétés privées et des États étrangers (Brondeau, 2011) ; et enfin changements climatiques, dont l'orientation pluviométrique reste très incertaine au Sahel, où les très fortes irrégularités interannuelles sont difficilement prévues par les modèles (Hulme et al., 2001), tandis que le recul de la végétation arborée au profit des cultures augmente les volumes écoulés et la précocité des crues (Mahé, 2006). » (Barbier et al, 2011)



Figure 10 : rizières inondées dans le lit du Niger (dune rose de Gao, Mali oriental)

L'Afrique de l'Ouest est peut être un peu décalée : Barbier *et al.* (2009) évoquent « le retour des grands investissements hydrauliques en Afrique de l'Ouest », et citent les nombreux projets envisagés dans la sous-région. Peu de temps après, Descroix (2011) indique que « la mode des grands périmètres est finie », mais cela à l'échelle mondiale. La contradiction n'est qu'apparente, l'Afrique de l'Ouest est effectivement sous-équipée ; elle est aussi relativement peu peuplée ; donc elle peut sans trop de dégâts environnementaux et sociaux constituer quelques grands périmètres irrigués ou agrandir ceux qui existent déjà ; par contre dans les pays du nord et dans les pays du sud densément peuplés, il est difficile d'installer ou d'agrandir les périmètres car l'eau y est devenue rare du fait de la surconsommation, et que les habitants

n'accepteraient plus des déplacements de masse ; pas plus que les sociétés civiles ne toléreraient de trop grandes atteintes à l'environnement, qu'elles soient liées aux barrages ou aux périmètres eux-mêmes. Mais l'échec relatif du riz dans la vallée du Sénégal et le déplacement progressif des zones irriguées, de la vallée très peuplée aux espaces relativement vides autour du lac de Guiers, l'accaparement récent de la moitié de la réserve de Ndiael, le développement de l'agrobusiness à force d'intrants autour du lac qui est la zone de captage de la ville de Dakar, montrent que la maîtrise de la tenure et de l'eau ne se font pas sans conséquences néfastes, pour la sécurisation foncière et pour l'état sanitaire des communautés.

Les derniers développements et la croissance de l'agrobusiness entrent de plus en plus en contradiction avec le fait qu'il faille réduire les émissions de carbone, et que les barrages produisent un courant « propre » ; il faut tout de même prendre en compte la destruction de biomasse qu'ils peuvent représenter et la pollution bien émettrice de CO₂ produite pendant la construction des barrages et autres équipements hydroélectriques.

En résumé,

- La population ouest africaine augmente de 3% par an, et sa croissance va rester forte durant encore une génération et demie environ ; il faut donc tenter d'accroître les récoltes de produits vivriers afin de combler cette demande. L'irrigation est demandeuse de main d'œuvre, donc peut aussi retenir les jeunes à la campagne**
- La sous région est encore très peu équipée en périmètres irrigués, ce qui lui laisse un gros potentiel de développement, en particulier dans les bassins du Niger, du Sénégal et le haut bassin de la Volta**
- De nombreux petits périmètres se sont développés pour répondre à des demandes fortes, par exemple en oignons ou en autres produits maraîchers, ce qui montre que les sociétés rurales ouest africaines savent s'adapter au marché, et au changement climatique, en faisant appel à l'irrigation quand cela est possible et nécessaire**