Chapitre 2

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

« Le Fouta Djalon possède tout de même plus de 8 000 sources. »
(Colonel Cheikh Tidiane Ndiaye, ex-chef du projet « Fouta Djalon » au ministère sénégalais de l'Environnement et du Développement durable)

Château d'eau ? Certes, les hauteurs de Guinée, c'est-à-dire l'ensemble constitué par les Monts Nimba, le Fouta Djalon et la « dorsale guinéenne », c'est-à-dire la ligne de hauteurs d'altitude en général inférieure à 1 000 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 12), autant dans celui du Niger, seules les sources du Niger lui-même et du Tinkisso sont à une altitude proche de 1 000 mètres (tels les inselbergs marquant la ligne de partage des eaux entre le haut Bafing et le Haut Niger, près de Dabola, figure 13), 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 14 et 15).

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

Ceci avait été observé dès la fin du XIX^{e} siècle :

> « Tel est le fait ; quelles en sont les causes ? Des trois éléments qu'il y a lieu 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

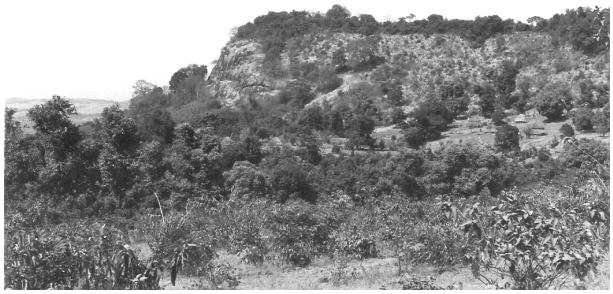


FIGURE 12 – Rebord de bowal (plateau latéritique) sur la route de Gaoual à Labé (haut bassin de la Gambie)



FIGURE 13 – 30 km à l'ouest de Dabola, des inselbergs marquant la ligne de partage des eaux entre Tinkisso (Niger) et Bafing (Sénégal)

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'Équateur et de



FIGURE 14 – Un des innombrables bas-fonds du haut bassin du Niger (région de Faranah)



FIGURE 15 – 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

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 1 000 mm, voire plus de 1500 mm et jusque près de 1750 mm par endroits) et une saison des pluies de plus de cinq 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

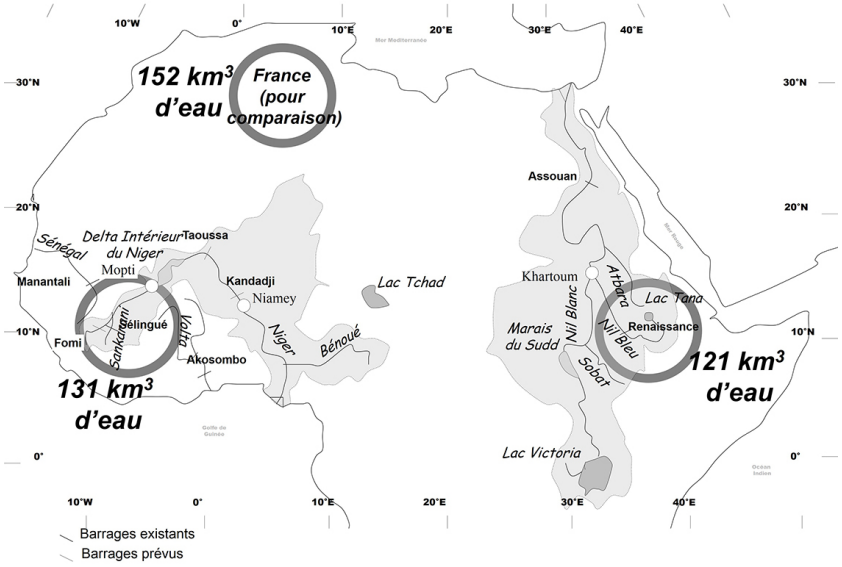


FIGURE 16 – Le « château d'eau » guinéen au volume comparé avec son pendant est-africain d'Éthiopie et la France

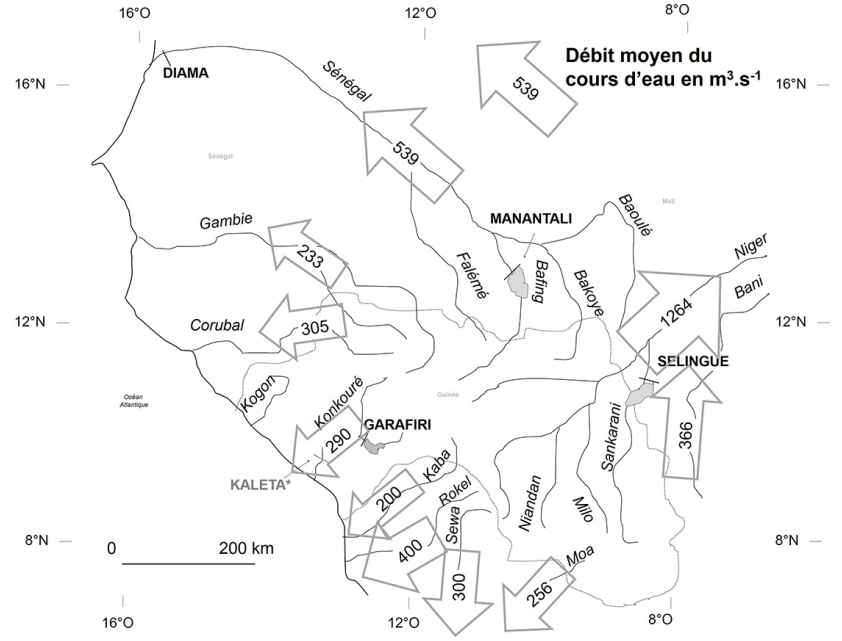


FIGURE 17 – Le « château d'eau guinéen » et ses principaux fleuves. Débit annuel moyen des fleuves indiqué en m^3/s

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, alors chef du projet « Fouta Djalon » au ministère sénégalais de l'Environnement, le Fouta Djalon possèderait tout de même plus de 8 000 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'adviendrait-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 16 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'Éthiopie (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 17). 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 2 000 m^3/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.

2 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 fonction-



Figure 18 – Station hydrométrique de Kounsi (haut bassin de la Gambie) ; état en avril 1986

ner 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 XX^{e} 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.

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'Éthiopie 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

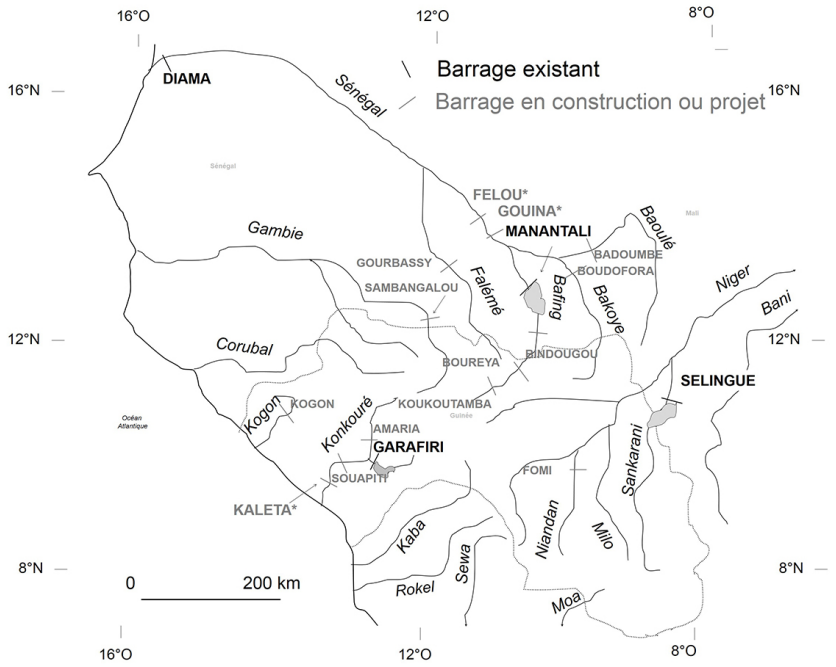


FIGURE 19 – Le « château d'eau guinéen » et les projets de barrage (en noir : barrages existants ; en gris : projets de barrages)

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 »).

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.

3 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

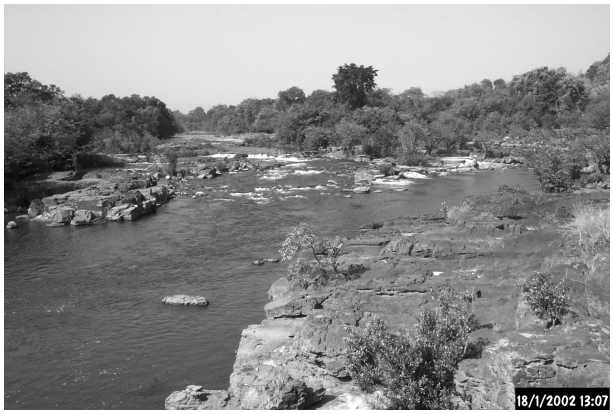


Figure 20 – La Kakrima, affluent du Konkouré, en amont de la station hydrométrique de Kaba (photo Luc Ferry)



Figure 21 – Le barrage de Manantali, sur le Bafing, bras principal du haut Sénégal, situé dans les Monts Mandingues, au Mali

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) (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).

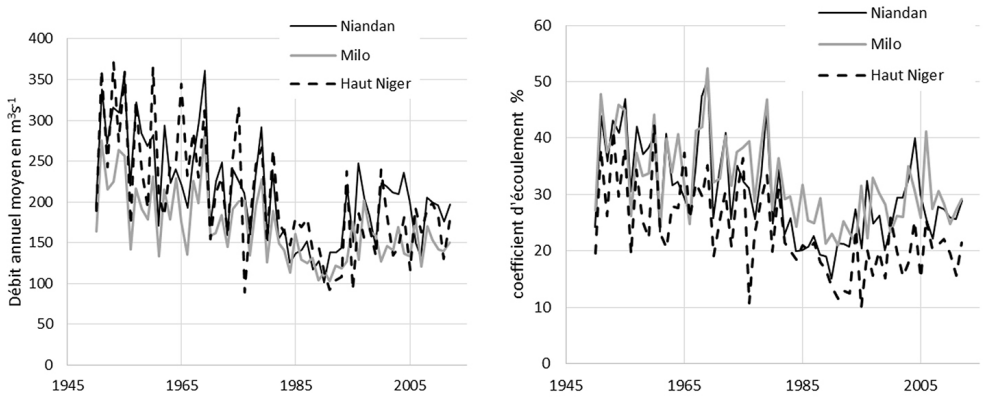


FIGURE 22 – Haut bassin du Niger : évolution des débits (gauche) et des coefficients d'écoulement (droite) des trois principaux cours d'eau alimentant le haut bassin : le Niger à Kouroussa, le Niandan à Baro, le Milo à Kankan

Ceci explique la petite différence, signalée au chapitre 1 (voir figure 8) 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.

Eu égard au manque de données pluviométriques et hydrométriques, les hydrogrammes représentés (figure 8, 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 22, 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 23 montre les hydrogrammes des trois principaux cours d'eau coulant du Fouta Djalon 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 confluents de ses grands

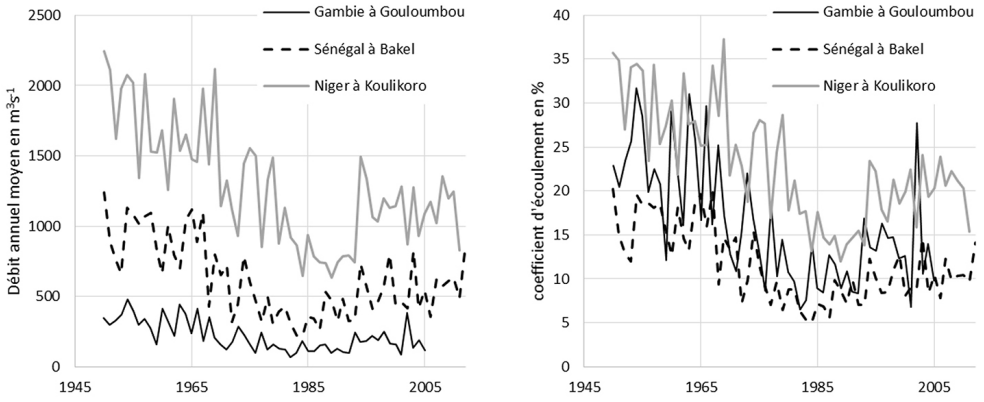


FIGURE 23 – Fouta Djalon : évolution des débits (gauche) et des coefficients d'écoulement (droite) des trois principaux cours d'eau coulant vers le Sahel, Gambie, Sénégal et Niger

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 24 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).

La figure 25 compare les débits des trois principaux constituants du Haut Niger (Milo, Niandan et Niger amont), dont les bassins ont entre 8 000 et 16 000 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.

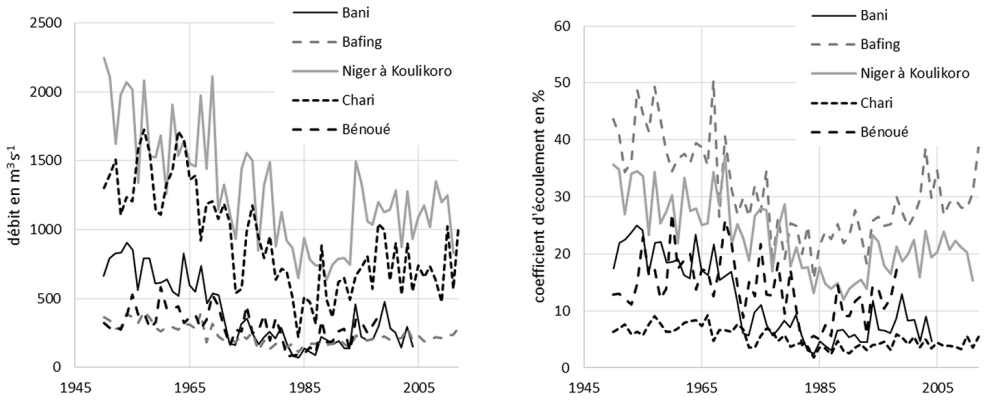


FIGURE 24 – Évolution des débits (gauche) et des coefficients d'écoulement (droite) du haut Niger (à Koulikoro), du Bafing (à Dakka Saidou) et du Bani (Douna) comparés avec ceux du Chari et de la haute Bénoué, à l'est du Sahel

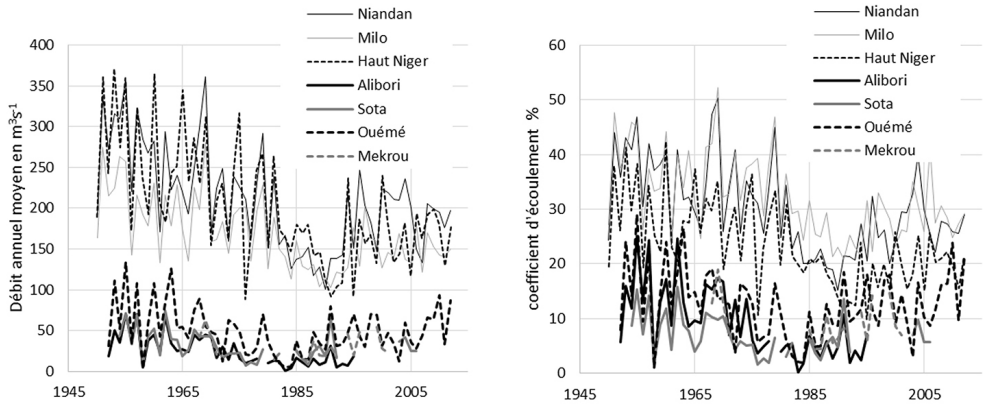


FIGURE 25 – Comparaison de l'évolution des débits (gauche) et des coefficients d'écoulement (droite) de cours d'eau des régions soudano-guinéennes : Est contre Ouest : creux plus précoce et remontée des débits plus rapide à l'est qu'à l'ouest ; les BV ont à peu près tous la même taille (alentour de 10 000 km²) mais l'hydraulicité est bien meilleure à l'ouest (pluviométrie plus élevée, contexte géologique plus « ruisselant »

4 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 sahélienne 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 soudanienne et guinéenne ; les tendances passées et futures sont variées, s'appuyant sur des observations, des prédictions, des modèles et aussi sur les prévisions (scénarios) 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 géographiques des régions étudiées.

4.1 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 aiguë 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).

4.2 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 106 000 km^2 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).

4.3 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).

4.4 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 plan 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 m^3/s pour la période humide 1951-1970 à 17 m^3/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.

5 À l'échelle des grands bassins ouest-africains

À 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 ».

5.1 Dans la basse vallée du Niger, au Nigeria

Le Niger à sa confluence avec la Bénoué a une hydraulicité 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 ».

6 Retour au Fouta Djalon !

Enfin, on résume ci après des travaux déjà anciens, mais pleins d'enseignements, sur le Fouta Djalon. 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 Djalon est réputé pour ses fortes densités démographiques. En effet, sur les hauts plateaux, des chiffres de 100 habitants au km^2 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 Djalon 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'Élevage 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-Djalon, 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-Djalon. De nombreux projets poursuivant cette seule fin ont donc été mis en œuvre, dont le plus important, d'envergure régionale, "Restauration et protection du massif du Fouta-Djalon", initié par l'OUA en 1979 » (André et Pestaña, 2002).
> « L'hypothèse d'un environnement menacé, déchu même, reposait sur un scénario associant pratiques culturales traditionnelles prédatrices et pression démographique exagérée. Les conséquences annoncées et souvent décrites comme avérées – elles hantent les représentations courante 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 (*nguessa*, 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-Djalon 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 26 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 (120 000 km^2), 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 27), et aussi un certain appauvrissement des écosystèmes lié au passage fréquent des feux de brousse (figure 28). Les débits des cours d'eau constituants du haut Niger ne paraissent pas avoir été modifiés par les changements d'occupation des sols, encore modérés pour influencer notoirement 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.

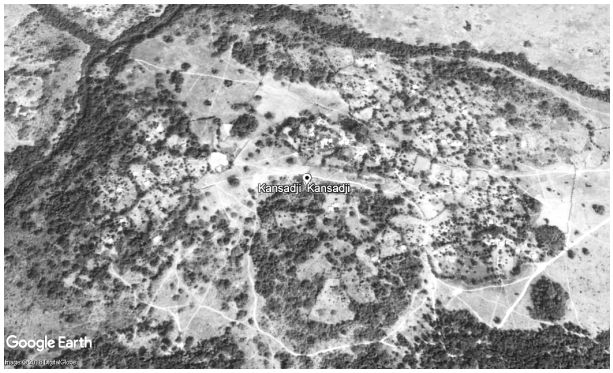


FIGURE 26 – Image satellite (Google Earth®) de la région de Kansadji, près de Pita, plateaux centraux du Fouta Djalon, altitude proche de 1 000 m, densité rurale de plus de 100 habitants/km^2

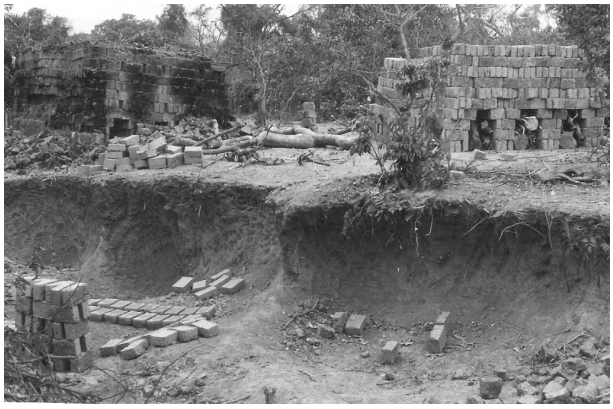


FIGURE 27 – Fabrication de charbon de bois dans le haut bassin de la Gambie

7 Une hausse observée des coefficients de tarissement

Les montagnes de Guinée, c'est-à-dire le Fouta Djalon et la Dorsale Guinéenne, sont la source des plus grand scours d'eau ouest-africains : Niger, Sénégal, Gambie, Corubal, 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 23). 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 29), 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



FIGURE 28 – Clairière dans la forêt claire (route Kourémalé-Bamako) ; feux de brousse fréquents au début de la saison sèche

coefficient de tarissement s'exprime, suivant la loi de Maillet (1905) citée par Tallaksen (1995) de la façon suivante :

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

Comme le montre la figure 4 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 Djalon : 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 8 000 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 XX^{e} 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).

Une différence apparaît entre deux types de comportements hydrologiques des hauts bassin (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, adossé 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

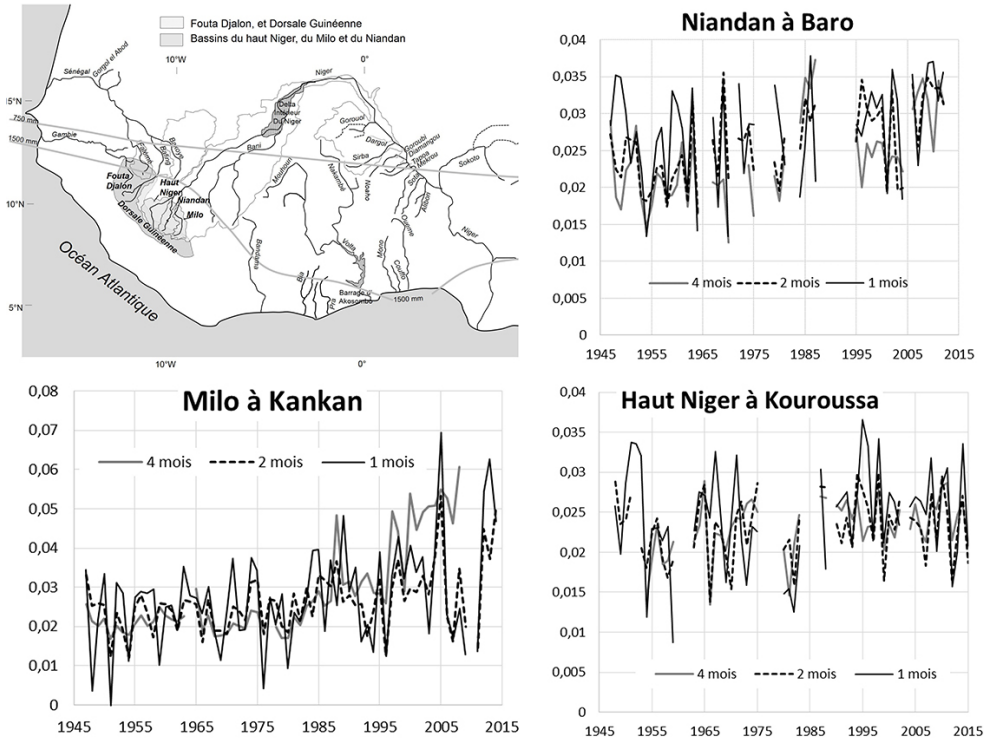


Figure 29 – Évolution des coefficients de tarissement dans les bassins des trois sous-affluents principaux du Haut Niger

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 les 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.