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 dîtes 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 4, chapitre 1) 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 42). 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.

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

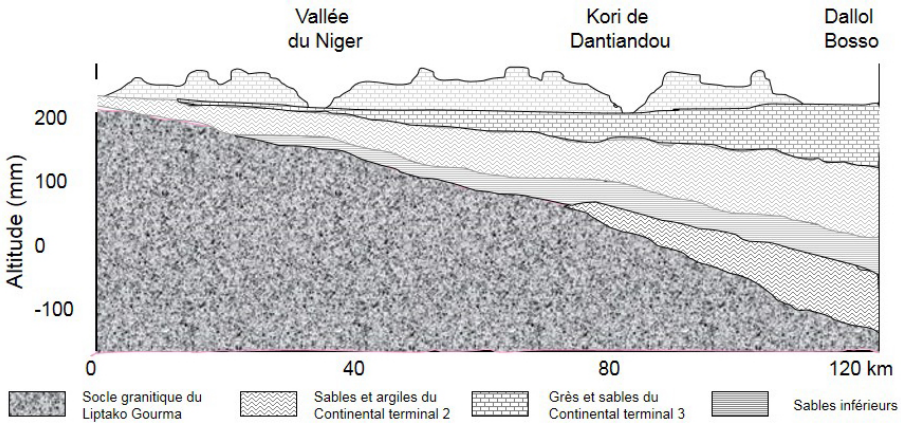


FIGURE 42 – Configuration de la nappe du CT3, affleurante ou proche de l'affleurement dans les bas-fonds et les vallées les plus profondes à l'ouest du bassin sédimentaire des Iullemeden (d'après Montfort 1996, *in* Favreau, 2000)

faible recours aux engrais fait que l'accroissement de la production agro-alimentaire s'est fait en augmentant la surface cultivée.

Le tableau 4 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).

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 vingt 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 43 et 44 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 45.

Le tableau 5 donne l'évolution des surfaces de chacune des catégories retenues dans les figures 43 et 44. 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'entretemps, 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.

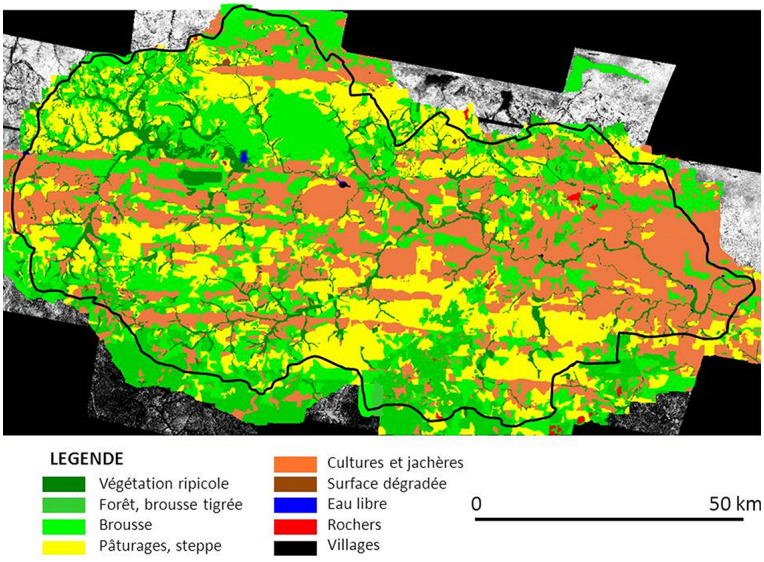


Figure 43 – Carte de l'occupation des sols du bassin du Dargol en 1965 ; les alignements Ouest-Est sur cette carte et la suivante sont liés à la présence de dunes fossiles qui occupent une grande surface dans tout le Nord du Liptako Gourma

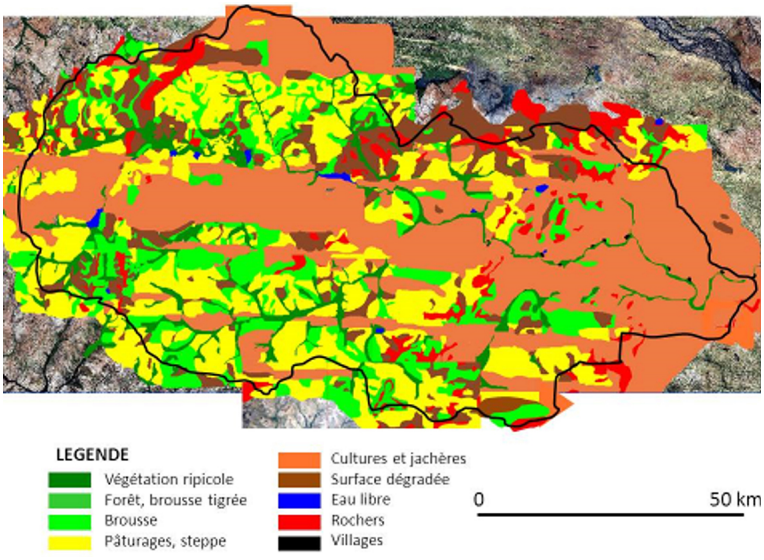


Figure 44 – Carte de l'occupation des sols du bassin du Dargol en 2010

Tableau 4 – 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 inexpliquée ; 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).*

Tableau 5 – Principales classes d'occupation des sols dans le bassin du Dargol en 1965 et en 2010

Bassin versant du Dargol	**1965**		**2010**	
Classe d'occupation des sols	*km²*	*%*	*km²*	*%*
Cultures et jachères	2 109	29,9	2 729	38,7
Pâturages	1 755	24,9	1 540	21,8
Végétation ripisylve	514	7,3	506	7,2
Forêts et brousse tigrée	1 739	24,6	0	0
Brousse	755	10,7	1 034	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	**7 060,4**	**100**	**7 060,4**	**100**

Afin d'éviter les polémiques sur les évolutions des NDVI (indice de différence normalisée de végétation), 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 × 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 45. Les figures 46 et 47 montrent l'évolution de l'occupation des sols aux deux dates choisies.

Le tableau 6 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.

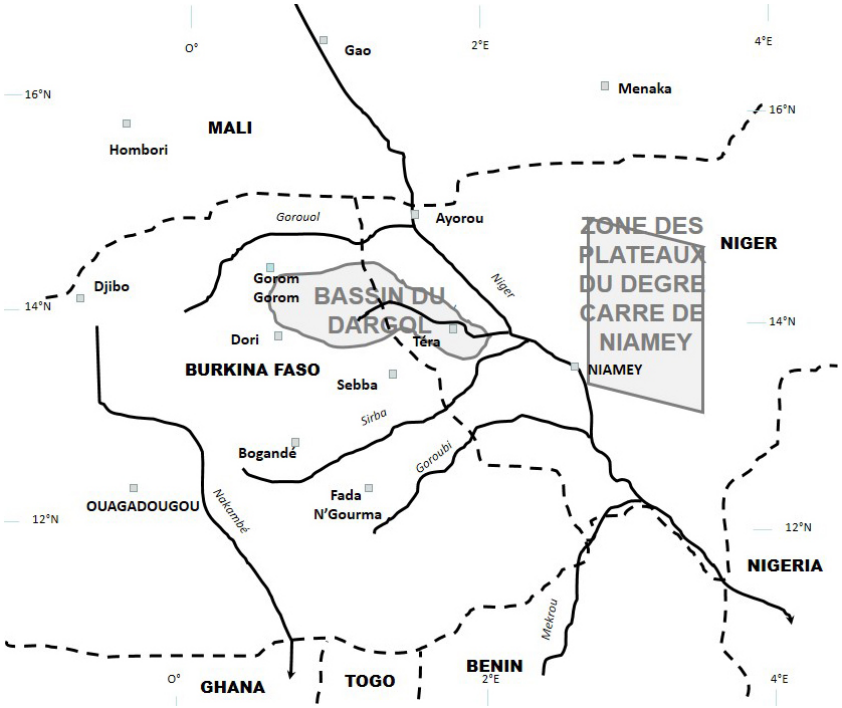


FIGURE 45 – Carte de localisation du bassin du Dargol (figures 43 et 44) et de la zone des plateaux centraux du degré carré de Niamey (figures 46 et 47)

Tableau 6 – Évolution 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 (km²)	**Surface 2010 (km²)**	**% 1965**	**% 2010**
Brousse	2 932	0	44,2	0
Cultures + jachères	1 311	3 541	19,8	53,4
Sols dégradés	0	1 209	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	**6 633**	**6 633**	**100**	**100**

Clairement on constate de profondes évolutions entre ces deux dates (figures 46 et 47) :

- 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.
- 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 refertilisation ; cette classe a presque triplé entre 1965 et 2010, comme cela a été constaté pour l'ensemble du Niger (Guengant et Banoin, 2002) (voir figure 48) et du reste dans l'ensemble du Sahel. Les rendements restant 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 les 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).

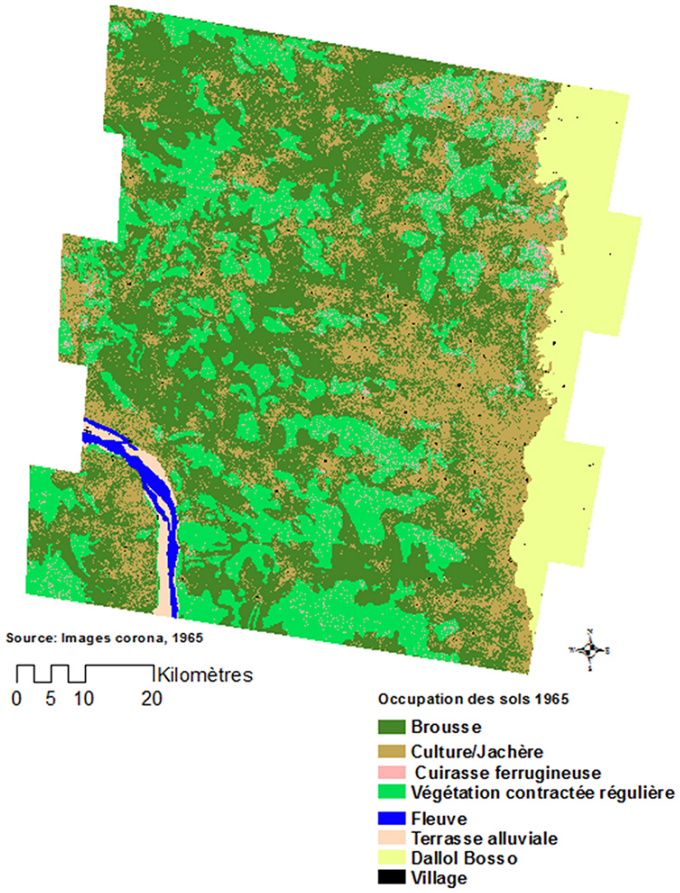


FIGURE 46 – Cartographie de l'occupation des sols par photo-interprétation d'images CORONA prises en 1965 de la zone de plateaux du degré carré de Niamey (voir figure 45)

- 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 végé-

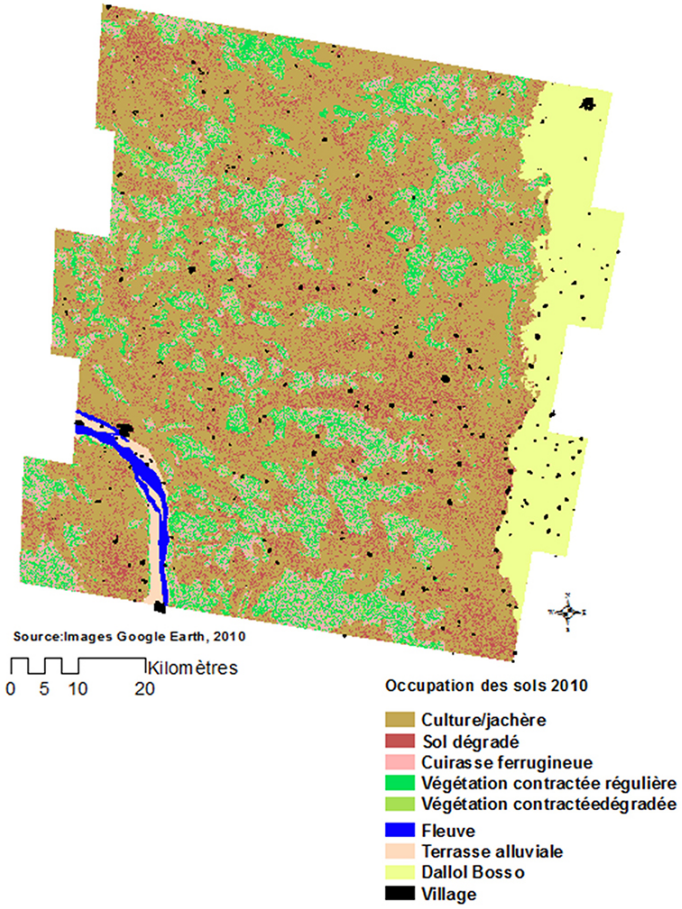


FIGURE 47 – Cartographie de l'occupation des sols par photo-interprétation d'images satellitaires Google Earth de 2010 de la zone de plateaux du degré carré de Niamey (figure 45)

tation 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'exoréisme (chapitre 7), qui lui-même est générateur des inondations dans cette même vallée du Niger. La figure 48, tirée des travaux de Guengant et Banoin (2003),

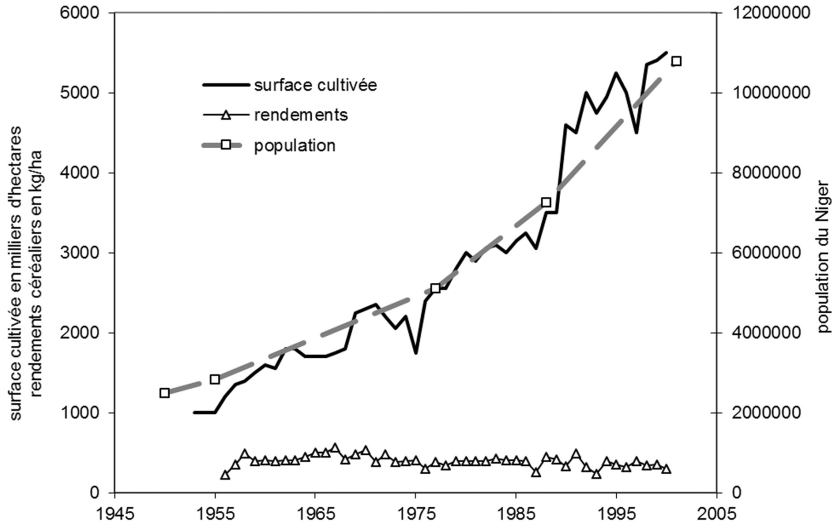


Figure 48 – Évolution de la population, des surfaces cultivées et des rendements en mil au Niger (d'après Guengant et Bansoin, 2003)

montre l'évolution de la population, de la surface cultivée et des rendements en mil pour le Niger.

Cependant le Niger n'est pas complètement 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'Éthiopie ont des densités localement supérieures à 400 hab/km^2 sans que cela ne se traduise par une dégradation des sols (Planel, 2008).

Il est probable que l'apparition, à la fin de la décennies 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/km^2 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/km^2, 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, figure 191 chapitre 9) quand les 11 000 hectares coupés à blanc à Ndiael dans l'arrière pays (20 000 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 probablement 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).

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 49 et 50). 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).

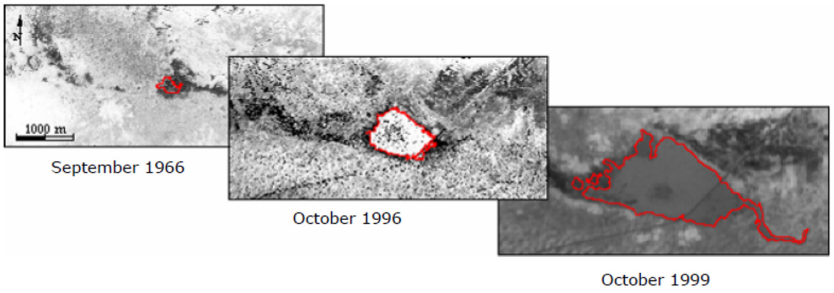


Figure 49 – Évolution de la mare d'Agoufou (est du Mali, région de Gao) (Gardelle *et al.*, 2010)

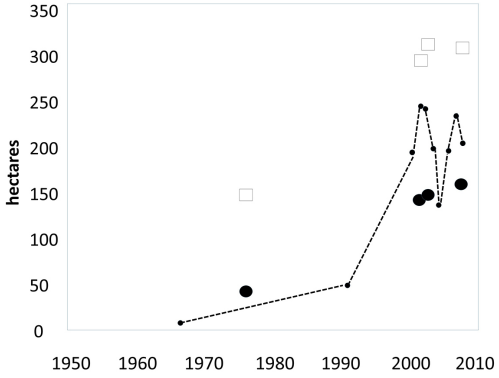


Figure 50 – Évolution de la surface totale cumulée des 91 mares du Gourma Malien (carrés vides), des eaux troubles (cercles pleins) et de la mare d'Agoufou (ligne pointillée) (mois de septembre) (*in* Gardelle *et al.*, 2010)

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 :

- 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 51 et 52), 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



FIGURE 51 – Mare de Bangou Bi (10 km à l'est de Niamey, près de l'aéroport). État en novembre 2006 ; affleurement de la nappe



FIGURE 52 – Affleurement de la nappe du CT3 au fond du Dallol Bosso (près de Harikanassou) ; janvier 2004

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 (comm. 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 53) ; la tendance à la hausse s'est accélérée durant

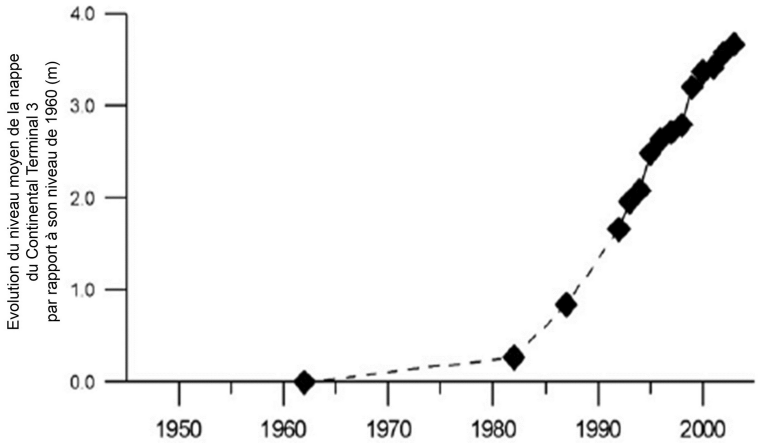


Figure 53 – Le paradoxe de Niamey (Leduc *et al.*, 1997) et sa principale manifestation : la remontée de la nappe phréatique du CT3 depuis 1950 (Massuel *et al.*, 2006)

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.

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, pourtant situé exactement à la même latitude que la partie ouest du bassin des Iullemeden (figure 54) (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 55) (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 (qui a fait 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 24, 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

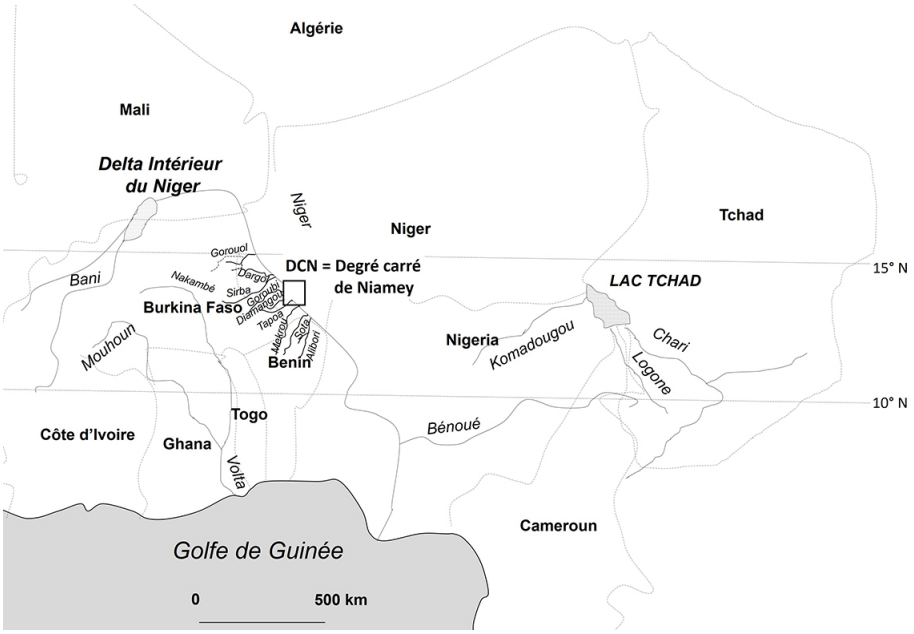


Figure 54 – Localisation du lac Tchad et de la région de Niamey, à une latitude similaire

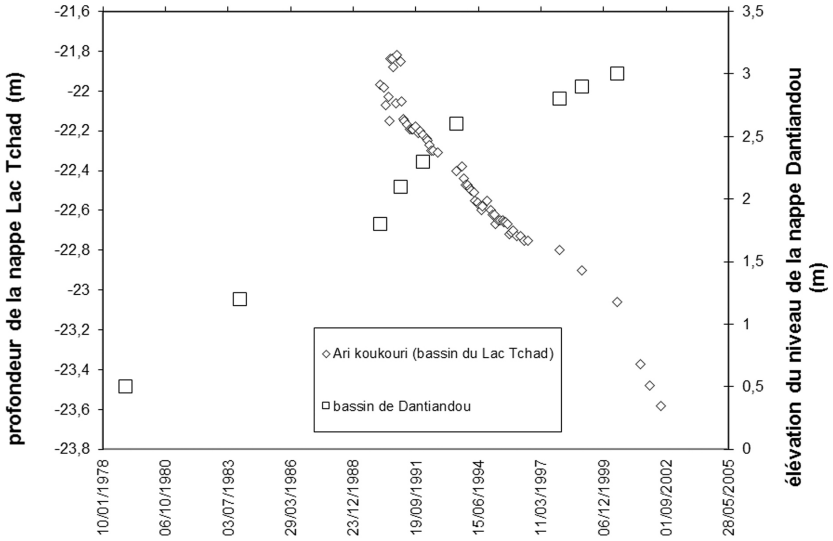


Figure 55 – Opposition entre deux comportements des eaux souterraines à la même latitude (12-13°N) : baisse de la nappe sous le bassin du lac Tchad (Zairi, 2008), hausse de la nappe dans le bassin du kori de Dantiandou, degré carré de Niamey (Massuel, 2005) (*attention, cette dernière n'est pas graduée en altitude, mais indique juste l'ampleur de la montée de la nappe !*)

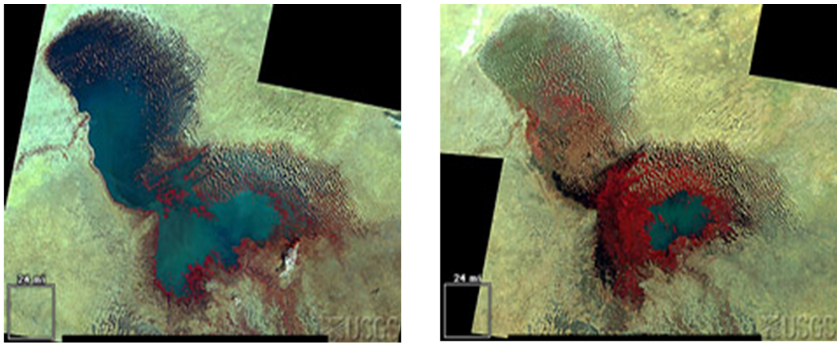


Figure 56 – Étendue du lac Tchad à la fin des années 1970 (à gauche) et en 2007 (à droite) sur images fournies par la NASA (d'après Zaïri, 2008)

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 56). 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 ?

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 42, 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 quelques km au nord de la piste de l'aéroport de Niamey (figure 51), 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 , toute petite, sur une photo, dans la thèse de Favreau (2000). La nappe affleure surtout, de manière de plus en plus étendue, dans le Dallol Bosso (figure 42 ; et figures 51 et 52), 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, et les zones recouvertes par la remontée de la nappe, de plus en plus étendues (figure 52).

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 57).

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, on observe globalement une baisse de la nappe liée à la surconsommation d'eau accélérée par l'introduction des motompompes (Fare, 2018). Mais près de Dakar, 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).

À 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 corréler 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 58, 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 57 – 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

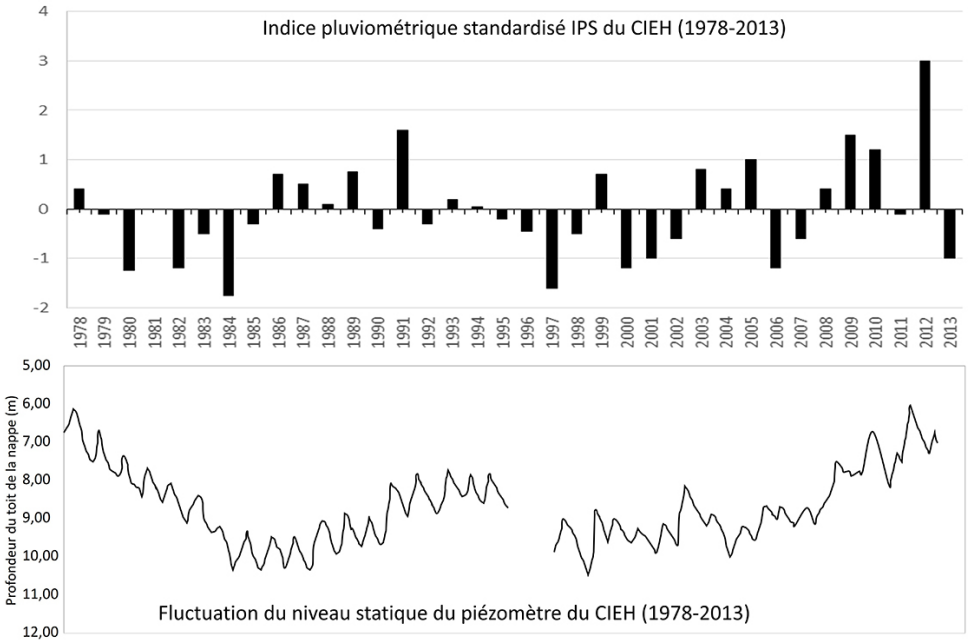


FIGURE 58 – Évolution d'une nappe de socle : la piézométrie à la station CIEH (Ouagadougou) montre une remontée de la nappe calquée ces dernières années sur celle de la pluviométrie (source Yameogo, 2008, actualisée)

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 (Orstom jusqu'en 1999) 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.

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'exoréisme, une surexploitation drastique du milieu près des villes en lien avec une croissance démographique restée très élevée. Et plus généralement, un retour des évènements 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 résument Favreau *et al.* (2012) :

> « L'évolution à long terme du bilan de l'eau est le résultat d'une baisse de l'efficience 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'efficience 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 nulle doute lié à l'augmentation, rapide, de la densité de population (passée de 5 à 10 hab/km^2 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 !

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.

Encart 1 – Les limites du paradoxe de Niamey ?

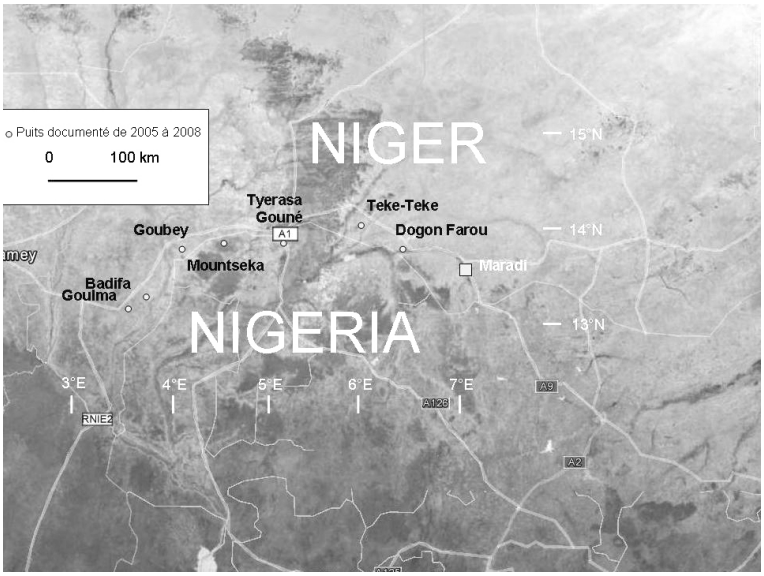


Figure 59 – Localisation des points de mesure sur la route Niamey-Maradi

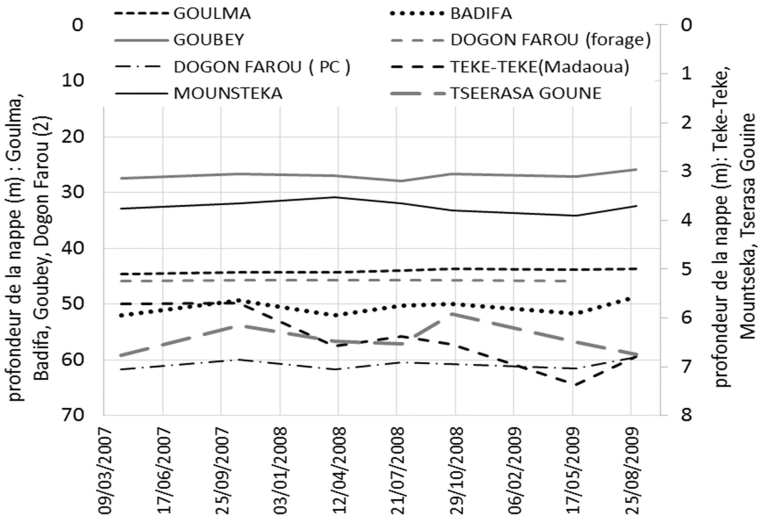


Figure 60 – Relevés des suivis piézométriques faits de début 2007 à fin 2009 sur la route de Niamey à Maradi

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, de 2006 à 2009, 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 59 ci-dessus. Le puits de Mountseka fut abandonné assez vite du fait de sa difficulté d'accès.

Les mesures sont représentées sur la figure 60, 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.

Des travaux récents (Favreau *et al.*, 2012) ont permis d'estimer à au moins 100 000 km^2 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 ».