

État des sols et évolution dans un contexte de changements climatiques

LUC DESCROIX et ARONA DIEDHIOU
LTHE, IRD, Université de Grenoble, BP 53, 38041, Grenoble Cedex 9 (France)

Introduction

Préambule

Malgré la diminution des précipitations après 1968, on constate une augmentation des écoulements au Sahel après cette date. Cette augmentation est due essentiellement à l'encroûtement des sols et à la disparition progressive de la végétation ligneuse.

Pour restaurer la teneur en eau des sols, leur capacité à retenir l'eau et limiter le ruissellement et l'érosion, il faut « rugosifier » à la fois le sol et le paysage : tout faire pour qu'à l'échelle ponctuelle ou de la parcelle, l'eau s'infilte au lieu de ruisseler ; et tout faire pour que de l'échelle de la parcelle à celle du terroir, le paysage soit morcelé, compartimenté, rugosifié : haies, arbres au milieu des champs, arbres dans les villages et en bordure des villages, travaux de restauration des sols et de la végétation dans les secteurs déjà dégradés : zaï, cordons pierreux, demi-lunes, terrasses, reboisement là où le sol est vraiment décapé. Cette restauration de la teneur en eau des sols et de leur « rugosité » doit permettre de rétablir son potentiel évaporant « naturel » supposé alimenter en rétroaction la proche atmosphère en vapeur d'eau.

Cela permet à la fois :

- de faire pénétrer l'eau dans le sol au profit de la végétation (naturelle ou cultures, ligneuse ou herbacée) ;
- de limiter l'érosion hydrique par les coupures des haies, les obstacles des arbres et diminution des fetchs hydriques ;

- de limiter l'érosion éolienne par diminution de la taille des fetchs éoliens ;
- de rétablir le potentiel évaporant de la surface continentale.

État des lieux

L'Afrique de l'Ouest connaît depuis 1968 un déficit pluviométrique prolongé ; celui-ci est d'autant plus accentué en direction du nord et du Sahel, où la diminution de la pluviométrie moyenne est plus marquée dans cette zone par nature semi-aride à aride. Malgré une atténuation de ce déficit à partir de 1995 et seulement dans la partie centrale et orientale du Sahel, ce déficit reste prégnant et, là où il s'est amoindri, il a laissé place à une variabilité interannuelle accrue (Ali et Lebel, 2009 ; Lebel et Ali, 2009). L'Afrique de l'Est a connu aussi de graves épisodes de sécheresses (début des années 1980, années 2009-2011).

Cette sécheresse a entraîné directement une dégradation de la végétation naturelle par une diminution de la biomasse des plantes annuelles, herbacées et graminées, et par la mort de nombreux ligneux, épuisés par la succession d'années sèches (essentiellement pendant la « grande sécheresse du Sahel, c'est-à-dire la succession d'années sèches 1972-1973 puis 1983-1985, ces deux périodes étant précédées et suivies uniquement d'années déficitaires. Un grand nombre d'arbres, parfois âgés et centenaires, sont morts durant ces épisodes (Luxereau, comm. pers. ; Gardelle *et al.*, 2010). Par ailleurs, cette période a été marquée par de très mauvaises récoltes et un sévère déficit alimentaire, débouchant sur des famines très accentuées et récurrentes.

Cette sécheresse a aggravé et accéléré un processus de dégradation des sols déjà perceptible, localement, avant la sécheresse ; l'augmentation de la population a entraîné une accélération du système agraire fondé sur une récupération de fertilité par repos prolongé du sol (jachère). Les temps de jachère ont été raccourcis dès lors que l'espace cultivable a occupé l'ensemble de l'espace total, et que la population a continué de croître. Comme les sols des zones semi-arides sont en général des sols peu structurés, sableux, peu fertiles et très fragiles, l'accélération des rotations s'est traduite par une diminution des rendements et une dégradation des sols caractérisée par leur encroûtement sur plusieurs centimètres, plusieurs dizaines de centimètres même le plus souvent (Albergel et Valentin, 1988 ; Casenave et Valentin, 1989 ; D'Herbès et Valentin, 1996).

Ainsi, on assiste à une très forte modification de l'occupation des sols, aussi bien au Sahel qu'en Afrique de l'Ouest ; un certain « reverdissement » est observé par un grand nombre d'auteurs, mais ferait l'objet d'une controverse. En effet, depuis la fin des années 1990, de nombreux scientifiques ont montré que la couverture végétale semblait reprendre de l'importance (Prince *et al.*, 1998 ; Rasmussen *et al.*, 2001 ; Anyamba et Tucker, 2005 ; Hermann *et al.*, 2005 ; Prince *et al.*, 2007 ; Fensholt et Rasmussen, 2011, entre autres). Par ailleurs, des travaux de restauration des terroirs semblent, au moins localement, avoir porté leurs fruits (Reij *et al.*, 2005, Larwanou *et al.*, 2006 ; Reij *et al.*, 2009). Govaerts *et al.* (2008) montrent eux une diminution de l'albedo qui serait également signe d'un regain de la végétation. Mais certains auteurs semblent démontrer que l'évolution tend plutôt vers une poursuite de la désertification (Hountondji *et al.*, 2004 ; Hein et De Ritter, 2006) ou que dans

certains secteurs, la dégradation de la couverture végétale perdurait (Diello *et al.*, 2006 ; Leblanc *et al.*, 2008, Ruelland *et al.*, 2011). Dans ces conditions, il est difficile de bien cerner la réalité de cette évolution, mais on peut au moins mettre en valeur les points suivants :

– la végétation semble dans des secteurs très étendus avoir progressé depuis le début des années 1990 (Rasmussen *et al.*, 2001), du fait que les années les plus sèches sont les années 1970 et 1980 et qu'une certaine reprise des pluies est observée au moins au centre et à l'est du Sahel depuis cette date (Ali et Lebel, 2009 ; Lebel et Ali, 2009) ;

– les champs continuent à s'étendre au détriment de la végétation naturelle, et de plus en plus, aux dépens de la jachère qui est le système de restauration de la fertilité le plus répandu, au moins dans les régions sahéliennes ; or la biomasse d'un champ de mil est supérieure en fin de saison à celle de la jachère, d'où un accroissement des valeurs des indices de végétation (Hiernaux *et al.*, 2009a) ;

– c'est au nord, en limite du Sahara, que la pluie a le plus baissé durant la grande sécheresse ; il est probable que l'atténuation relative de la sécheresse y entraîne une forte augmentation de la biomasse herbacée et graminéenne, du moins par rapport aux années les plus sèches ;

– les études basées sur la télédétection semblent très majoritairement pencher pour un reverdissement du Sahel (en particulier ses franges nord en limite du désert), en particulier une hausse des indices de végétation (NDVI pour le plus employé), alors que celles qui utilisent la photographie aérienne comme support de comparaison montrent une dégradation de la végétation et des sols ; cependant, ces dernières études sont forcément plus limitées dans l'espace, moins représentatives de l'ensemble, et peut-être aussi localisées sur des secteurs particuliers effectivement en cours de dégradation prolongée. La plupart des études de l'occupation des sols fondées sur des photos aériennes montrent une diminution du couvert végétal dans le Sahel (Ada et Rockstrom, 1993 ; Loireau, 1998 ; Chinen, 1999 ; Le Breton, 2005 ; Leblanc *et al.*, 2008 ; Amogu, 2009, entre autres). Cela est corroboré par les statistiques officielles de surface cultivée. Pour le Niger, durant la période 1999-2006, Garba (Garba, 2010) a observé une diminution de la biomasse dans une étude utilisant le NDVI ; mais il l'explique par le fait que l'année 1999-2000 était une année humide. Karambiri *et al.* (2003), Diello *et al.* (2006) et Hauchart (2008) ont aussi noté une réduction du couvert végétal dans deux différentes régions du Burkina Faso (les bassins du Nakambé et du Mouhoun). Liénoy *et al.* (2005) ont fait les mêmes observations au Cameroun, qui sont en accord avec les résultats de Amani et Nguetora (2002), et Mahé *et al.* (2003) sur la rive droite du fleuve Niger. Les données statistiques de la FAO indiquent une diminution de 3,7 % par an de la biomasse au Niger, et Hiernaux *et al.* (2009a) ont mesuré une réduction annuelle de 2,7 % de la biomasse dans le Fakara (Niger) ;

– on connaît les méthodes de restauration des sols et de la végétation, et les conditions à mettre en œuvre pour leur divulgation spontanée (Larwanou *et al.*, 2006 ; Reij *et al.*, 2009) et on sait combien les sociétés sont attachées aux arbres et conscientes de leur rôle, tant au niveau des paysages et du maintien de la biodiversité que de leur importance

sociale, culturelle et de plus en plus économique (Luxereau et Roussel, 1997 ; Luxereau, comm. pers.), par l'apport d'une diversification synonyme d'amélioration de la sécurité alimentaire ;

– localement et au nord de la bande sahélienne, on a pu remarquer que la végétation progressait, sauf dans des secteurs, assez étendus, où les sols squelettiques portaient avant la sécheresse une maigre végétation xérophile. Dans ces secteurs, la végétation a été tuée par la sécheresse, la capacité de rétention en eau des sols ayant vite été annulée par la succession des années sèches ; les sols, auparavant retenus par la végétation, ont été emportés par l'érosion après la disparition de leur maigre couverture végétale. De ce fait, la végétation ne peut s'y rétablir spontanément, et ces secteurs ont été déterminés comme étant devenus des zones de ruissellement expliquant dans ces zones septentrionales la forte croissance du volume et de l'extension des mares (Hiernaux *et al.*, 2009b ; Gardelle *et al.*, 2010).

Il est par contre évident dans toute l'Afrique subsaharienne, et l'Afrique sahélienne en particulier, que la pression anthropique sur le milieu s'accroît rapidement et devrait continuer à s'accroître dans les prochaines décennies. Il est donc important de tout faire pour pérenniser les conditions de la sécurité alimentaire en préservant et en améliorant la productivité durable du milieu et en favorisant une diversification des sources d'alimentation et de revenus.

Le contexte climatique

L'Afrique subsaharienne a connu les plus fortes variations climatiques observées ces dernières décennies. L'Afrique de l'Ouest est la région qui a connu les plus fort signal de changement climatique jamais enregistré depuis le début des enregistrements météorologiques normalisés au milieu du XIX^e siècle (Hulme, 2001). Sur plus de 5 millions de km², la pluviométrie a diminué de 10 à 30 % pendant une période de 25 ans au moins (1968-1995), et le déficit perdure dans de nombreuses régions, en particulier à l'Ouest. Cette sécheresse semble s'atténuer dans la partie centrale du Sahel (Ali et Lebel, 2009 ; Lebel et Ali, 2009) (fig. 1), alors qu'elle persiste de manière très prononcée dans l'Ouest. Elle se caractérise par une baisse du nombre d'événements pluvieux plutôt que par une baisse de la quantité d'eau tombée par événement (Le Barbé et Lebel, 1997). Par ailleurs, l'est de l'Afrique est soumis à des sécheresses récurrentes (entraînant souvent, comme à l'ouest, des déficits alimentaires et des famines) comme celle du début des années 1980 en Éthiopie et l'ensemble de la Corne de l'Afrique. Paradoxalement, les crues et inondations sont aussi plus nombreuses sur toute la bande sahélienne d'un océan à l'autre.

Dans une étude sur le bassin du Niger (le plus vaste d'Afrique de l'Ouest), on n'a pour le moment remarqué aucune modification notable dans le nombre d'événements pluvieux de plus de 20 à 70 mm en 24 heures, ni dans la répartition mensuelle des

La GMV. Capitalisation des recherches et valorisation des savoirs locaux

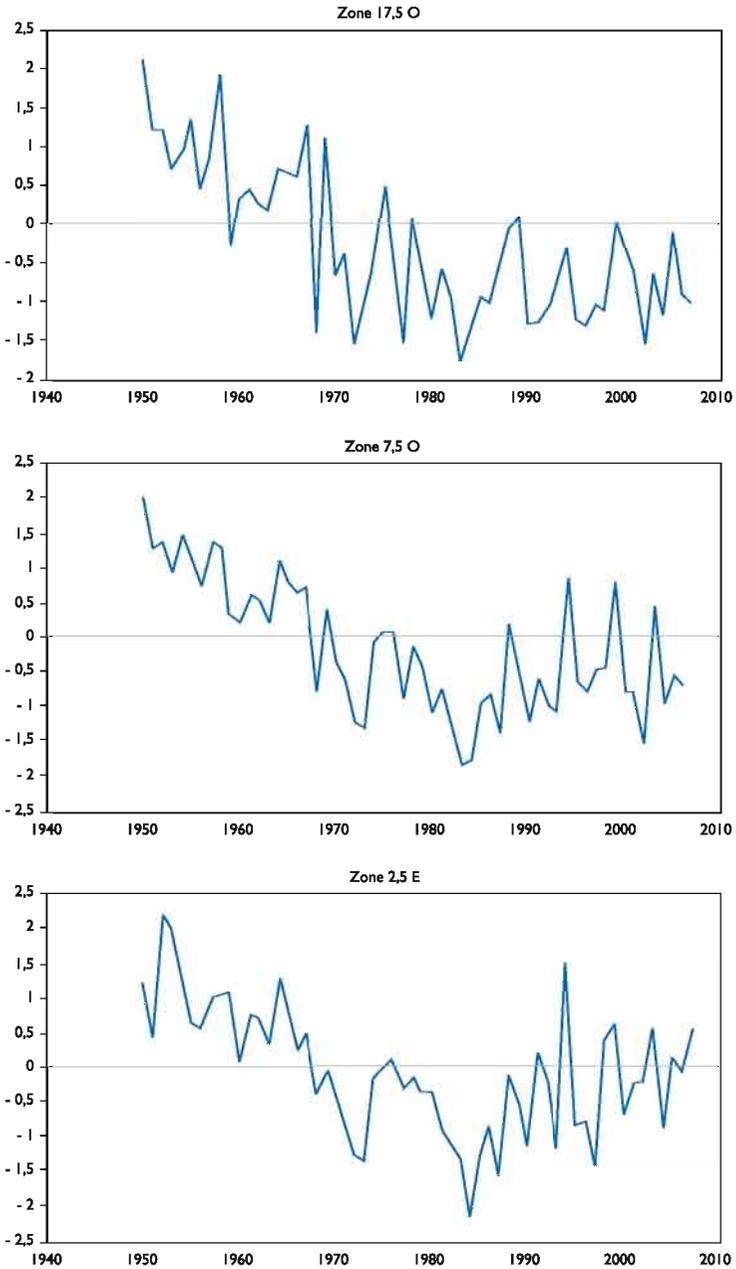


Figure 1.

Évolution des indices pluviométriques en Afrique de l'Ouest (d'après Ali et Lebel, 2009) ;
a : secteur Ouest ; b : secteur central, c : secteur Est..

précipitations dans l'année (fig. 2) (Descroix *et al.*, 2011). Il ne semble pas non plus y avoir de modification de l'intensité moyenne des précipitations (Amogu *et al.*, 2010).

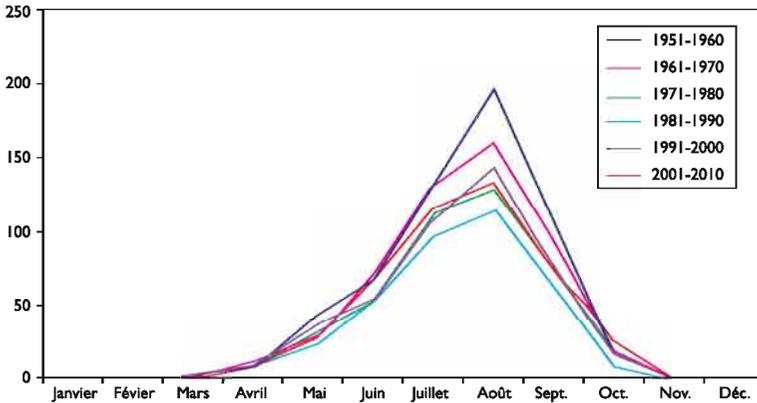
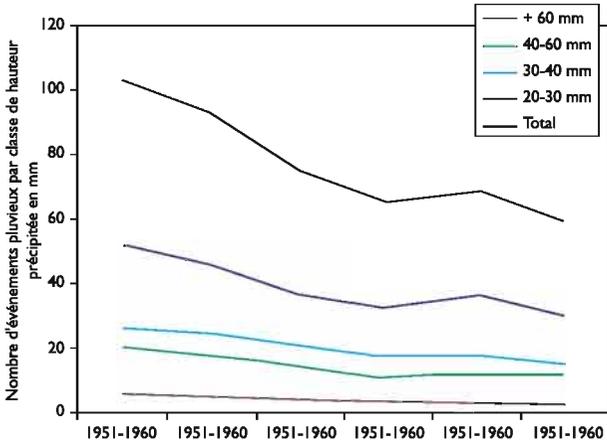


Figure 2.

a. Évolution de la distribution par hauteur tombée des évènements pluvieux de plus de 20 mm sur le bassin central du Niger.

2. b Évolution de la répartition mensuelle des précipitations (Descroix *et al.*, 2011).

Les rapports du GIEC montrent que la température a déjà augmenté de 0,6 °C en Afrique (fig. 3) et qu'elle va encore augmenter de 3 ou 3,5 °C pendant le XXI^e siècle dans la zone sahélienne, tandis que la pluviométrie diminuerait à l'ouest mais augmenterait à l'est du continent.

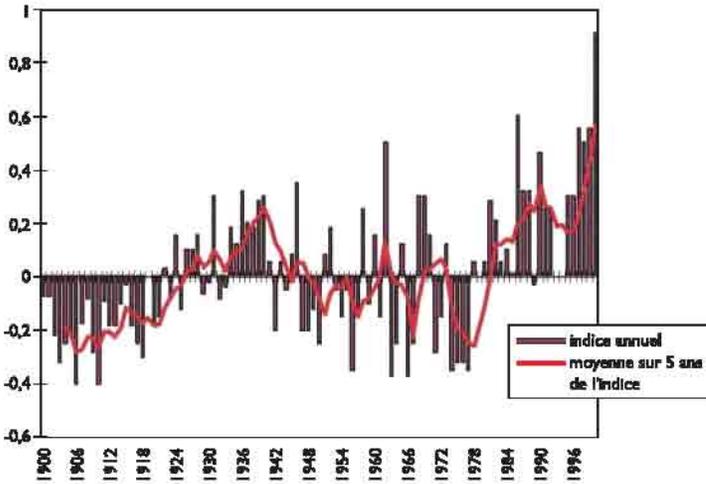


Figure 3.
Évolution observée de la température en Afrique au XX^e siècle
d'après le rapport GIEC 2007.

Ces travaux et prévisions permettent aussi aux organismes internationaux de diffuser des scénarii d'évolution du climat et des ressources à destination des décideurs ; on dispose ainsi d'estimations sur l'évolution de la durée des moussons suivant divers scénarii.

Une étude récente (Ardoin *et al.*, 2009) a proposé une simulation de l'évolution des ressources en eau pour certains bassins d'Afrique de l'Ouest. Cette étude aborde le problème de l'utilisation des données issues des modèles de circulation générale (GCM) pour évaluer les impacts du changement climatique sur les écoulements en Afrique de l'Ouest.

Les données annuelles et mensuelles de précipitations de quatre GCM utilisés dans le troisième rapport de l'IPCC ont été étudiées sur la période 1950-1998 : les modèles CSIRO-Mk2, ECHAM4, HadCM3 et NCAR-PCM. Deux faiblesses communes à tous ces modèles sont leur incapacité à reproduire les volumes précipités en zone sahélienne et leur difficulté à simuler la dynamique saisonnière des pluies en zone guinéenne. Deux scénarii climatiques basés sur les variations prévues par le modèle HadCM3-A2 ont alors été élaborés, afin de générer des chroniques de précipitations et d'évapotranspiration potentielle jusqu'à la fin du XXI^e siècle, pour simuler les conditions climatiques futures probables. Ces scénarii ont ensuite été utilisés comme entrées du modèle hydrologique GR2M afin d'évaluer les impacts du changement climatique sur les écoulements des fleuves Sénégal, Gambie, Sassandra et Chari. Les résultats montrent que les variations envisageables des écoulements dans le futur sont très dépendantes des précipitations et donc de la qualité des sorties du GCM utilisé. Les deux modèles utilisés prédisent une augmentation des pluies au sud-est d'un axe joignant la côte guinéenne au bassin du Lac Tchad, et une diminution

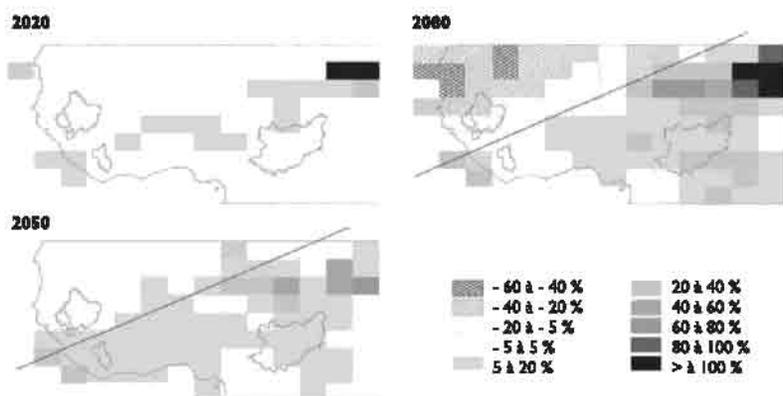


Figure 4.

Changements de la moyenne pluviométrique (scénario anomalies) pour trois horizons par rapport à la moyenne observée 1969-1998 (en %).

Les taux de changements entre les deux scénarii (anomalies et horizons) sont du même ordre de grandeur (Ardoin et al., 2009).

au nord-ouest de cet axe (fig. 4). Hulme (1998) pour sa part trouve qu'il n'y a pas dans les simulations de modèle HADCM2 la persistance interannuelle des pluies que l'on trouve dans les moyennes observées pour la deuxième moitié du ^{xx}e siècle. Des prévisions sont également faites sur le bassin du Nil Bleu, car des projets hydro-électriques d'ampleur y sont en projet, pour lesquels des prévisions saisonnières et sur le long terme sont indispensables (Block, 2011).

Les incertitudes concernant les prochaines décennies sont grandes, excepté pour les températures ; mais l'évolution récente montre que l'Afrique subsaharienne est particulièrement concernée par le changement climatique ; ses sociétés sont aussi très vulnérables, ainsi que ses agrosystèmes, comme nous le verrons plus loin.

Des sols pauvres soumis à un « stress productif »

L'Afrique sahélienne est la région qui connaît la plus forte croissance démographique du monde depuis le début de la décennie 1990. Celle-ci intervient dans un contexte de changement climatique fort (voir ci-dessus). Les sols de l'Afrique subsaharienne, sauf quelques exceptions en zones de montagne (andosols d'Éthiopie, sols plus siliceux du Fouta Djallon), sont majoritairement des sols pauvres peu structurés ; les zones semi-arides et arides du Sahel sont surtout des sols ferrallitiques tropicaux caractérisés par une forte proportion de sables ; ils sont fragiles et sujets à l'érosion hydrique et éolienne. Casenave et Valentin (1989 et 1992) ont montré que, plus que

leur structure ou leur texture, plus que leur classification, c'étaient les « états de surface » qui permettaient le mieux de classer les sols d'après leur fonctionnement hydrique et leur évolution face à la sécheresse, la désertification et l'érosion hydrique et éolienne. En Éthiopie, la dégradation des sols constitue la plus grande menace à long terme pour la survie des hommes et demeure l'un des plus grands défis pour la population toujours croissante et le gouvernement. Dans ce pays, comme en Érythrée, on constate un accroissement des problèmes d'érosion, malgré une forte politique de conservation des sols (Nyssen *et al.*, 2000 ; Nyssen *et al.*, 2004).

Dans ce double contexte de changement climatique et de changements d'usage des sols, les populations ont adopté des stratégies de survie connues et plutôt adaptées sur le court terme : adoption de semences de « cycle court » permettant d'avoir des récoltes même lors de moussons plus courtes, extension des cultures et raccourcissement des temps de jachère pour compenser la chute des rendements, vente de bétail, recherche de secteurs pastoraux plus préservés pour les nomades, émigration temporaire vers la côte du Golfe de Guinée, émigration lointaine pour les secteurs occidentaux (ouest du Mali, Sénégal, Mauritanie). Par contre, ces stratégies ne sont pas compatibles avec une pérennisation de la sécurité alimentaire à moyen et long terme. En effet, la jachère est le seul mode de fertilisation utilisé traditionnellement sur de grandes étendues ; la fumure est bien sûr très employée, mais réservée aux champs proches du village, où les jachères ne se pratiquent presque plus. Donc les sols s'appauvrissent, ce qui se reflète dans la baisse continue des rendements observée sur le long terme, par exemple au Niger (Guengant et Banoin, 2003).

Le système agraire traditionnel d'alternance culture-jachère ne peut se perpétuer avec des densités de population au-dessus de 25 habitants au km². Il n'est en effet, par définition, pas intensifiable. La mise en culture suivant cette méthode de l'ensemble de la zone sahéenne « cultivable » (pluviométrie annuelle supérieure à 300 mm) signe l'arrêt de mort de cette pratique, puisque la population continue de doubler tous les vingt ans (18 ans au Niger). Préserver l'autosuffisance alimentaire, à peu près remplie, hors pics de sécheresse, pour l'ensemble des pays sahéens, excepté le Sénégal et la Mauritanie, jusqu'au début des années 2000, suppose l'adoption de techniques nouvelles relevant de l'intensification de la production, par l'apport de ce qui ne manque pas pour le moment : à défaut de capitaux, c'est la main-d'œuvre qui doit être mise à profit pour tenter d'améliorer les rendements. Il faut en profiter pour opérer une diversification des cultures, des pratiques et des sources de revenus, en tentant d'intégrer les services de l'écosystème et à l'écosystème. En effet, dans presque tout le Sahel, les terroirs sont, malgré l'actuel reverdissement (en fait une récupération post-sécheresse), très dégradés, et les sols sont érodés (fig. 5 ci-dessous). L'accroissement indispensable de la production passe par une récupération des sols dégradés, par des techniques connues et à généraliser.

Ce qui paraît inéluctable à moyen terme, c'est une disparition de la jachère. Le Sahel ayant une population rurale à plus de 70 % (85 % au Niger), c'est vers les zones rurales qu'il faut porter l'effort. Comme tout l'espace cultivable ou presque (fig. 6 ci-dessous) est désormais utilisé, seule une véritable intensification-diversification vertueuse peut permettre d'accroître la production pour conserver ou atteindre l'autosuffisance et la sécurité alimentaires.



Figure 5.
Photos de sols dégradés au Niger (en haut)
et en Éthiopie (en bas)

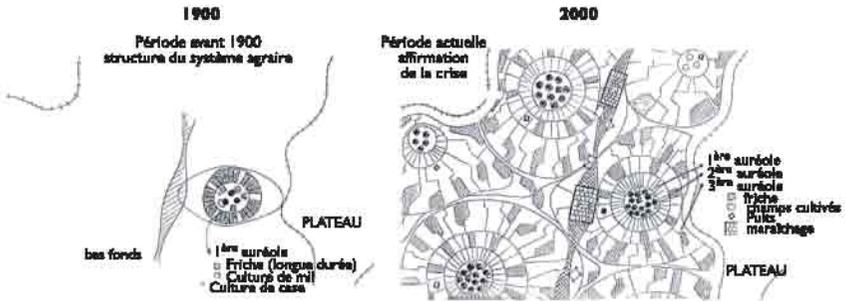


Figure 6.
Extension et évolution caractéristiques
des terroirs de la région de Niamey
durant le XX^e siècle
(Ada et Rockstrom, 1993).

Un constat : la fatigue des sols

On connaît depuis plusieurs décennies les formes de dégradation des sols qui apparaissent dans les zones semi-arides d'Afrique avec la surexploitation des terroirs. Les principaux types de dégradation sont les encroûtements des sols. Les différents types de sols encroûtés et leur formation respective ont été très précisément décrits par Casenave et Valentin (1989). On peut avantageusement se référer aux pages 66 à 74 de leur manuel des états de surface de la région sahélienne pour comprendre comment un sol et ses agrégats se dégradent et évoluent en croûtes : « Il est possible de distinguer plusieurs phases au cours d'une pluie : la mobilisation des particules, leur arrachement, leur transport et leur dépôt ; après dessèchement de la surface, le vent peut à son tour provoquer arrachement, transport et dépôt de certaines fractions. Au bilan, l'ensemble de ces processus conduit à une redistribution à la fois verticale et latérale des constituants ». Les mécanismes décrits pour expliquer l'encroûtement sont :

- l'humectation : celle-ci provoque elle-même éclatement, dispersion et/ou fissuration des agrégats, suivant leur teneur en argile
- l'impact des gouttes d'eau, qui se caractérise par :
 - la mobilisation des particules par dispersion colloïdale et/ou fractionnement
 - le transport par rejaillissement (ou splash)
 - le dépôt
 - le tassement
- le ruissellement, qui cause :
 - l'arrachement mécanique
 - le transport
 - le dépôt qui peut être turbulent ou laminaire
- la dessiccation, marquée par :
 - le retrait
 - l'induration
- l'action du vent, caractérisée en particulier par :
 - l'arrachement par déflation ou corrasion
 - le transport en suspension ou par saltation ou reptation
 - le dépôt
 - le tri granulométrique

D'après ces mêmes auteurs, les principaux types de croûtes sont :

- les croûtes structurales (pour « effondrement sur place de la structure du sol »), liées principalement à la mobilisation des particules et au splash ;
- les croûtes de ruissellement, formées par les matériaux emportés, souvent indurés par la dessiccation ;
- les croûtes d'érosion, qui sont les plus répandues et celles dont l'impact agronomique et hydrologique est le plus important ; elles sont formées par l'arrachement des particules par le vent et l'eau ; elles se forment aux dépens d'une croûte structurale, sableuse ou argileuse, ou d'une croûte de ruissellement ;

- les croûtes de dépôts éoliens ;
- les croûtes de décantation ;
- les croûtes de dessiccation.

Casenave et Valentin (1989) décrivent ensuite la réorganisation superficielle des particules et des agrégats qui conduisent particulièrement à ces encroûtements et expliquent leur évolution. Leur ouvrage comporte surtout un grand nombre de photos qui décrivent chaque type de croûtes et permettent de bien comprendre leur évolution, ainsi que les résultats de tests de ruissellement et infiltration normalisés effectués sous pluie artificielle (simulateur de pluies), qui constituent une analyse complète de leur comportement hydrodynamique. Pour Ambouta *et al* (1996), « les premiers travaux réalisés sur les processus de formation des croûtes superficielles ont montré que l'encroûtement procède essentiellement de la dégradation de la structure de surface des sols, par suite de la destruction des agrégats (Le Bissonnais, 1990), de la disjonction des particules et de la compaction de surface par les gouttes de pluie (Duley, 1939). Très tôt, juste après les études effectuées par Ellison (1947) et McIntyre (1958) sur le rôle primordial que jouerait l'encroûtement dans le déclenchement du ruissellement et de l'érosion, les principaux efforts de recherche ont été orientés vers la caractérisation des changements que ces processus pourraient induire dans les propriétés de surface des sols affectés ».

Casenave et Valentin (1989) décrivent plus loin comment le raccourcissement des jachères conduit à l'encroûtement des sols : « Faciles à travailler, ces sols présentent généralement des conditions favorables de minéralisation, d'aération et d'infiltration. Une fois infiltrée, l'eau n'est que peu reprise par l'évaporation grâce à l'effet de "mulch" des horizons superficiels grossiers et souvent bouillants. Sous une pluviométrie suffisante, ces sols permettent la culture de mil (le plus souvent, surface de type CI), entrecoupée de longues jachères. Si l'équilibre cultures-jachères est rompu, l'horizon superficiel subit l'érosion hydroéolienne et l'horizon B, très pauvre et peu perméable, affleure – surface de type ERO – (Mainguet *et al.*, 1979 ; Brabant et Gavaud, 1985) ».

D'après Ambouta *et al.* (1996), « au Sahel, le système traditionnel d'utilisation des sols consiste, généralement, en une phase de culture de courte durée suivie d'un abandon cultural plus ou moins long (ou phase de jachère) après la baisse des rendements. Dans la majeure partie de la zone sahélienne, ce système a aujourd'hui conduit à la saturation des agrosystèmes dont la principale caractéristique est l'augmentation de surfaces cultivées (Haywood, 1981) aux dépens, d'une part, des terres marginales et, d'autre part, des jachères dont la durée a été de plus en plus raccourcie. La forte corrélation observée entre ce phénomène et l'accroissement des surfaces érodées (Albergel et Valentin, 1988) pourrait, assez rapidement, conduire à l'installation d'un système écologique dégradé à niveau de productivité très bas (Floret *et al.*, 1993) ».

Toutefois, l'étude menée par Ambouta *et al.* (1996) tend à montrer que « la mise en culture, en favorisant l'allègement de la texture par érosion surtout hydrique et éolienne et en remaniant la couche de surface par les façons culturales répétitives, contraire fortement la formation et l'extension de la croûte d'érosion. Lorsque, en

revanche, le niveau d'anthropisation est demeuré faible (précédent culturel "récent") et que la parcelle est en jachère, les sols ont tendance à subir un encroûtement très sévère ; cette forte susceptibilité à l'encroûtement des sols dès qu'ils sont mis en jachère serait probablement favorisée par l'enrichissement superficiel des sols en éléments fins éoliens piégés par la végétation qui se réinstalle après l'arrêt de la culture et par la baisse de l'activité des termites liée à l'absence des résidus de récolte. Aussi, l'efficacité de la jachère comme technique de restauration de propriétés de l'hydrodynamique de surface des sols sableux fins au Sahel ne serait optimale que pour une fourchette d'âge de jachère comprise entre 4 et 7 ans et en dehors de laquelle son influence tendrait plutôt à être négative ». On observe donc clairement un processus à deux termes : à l'échelle locale et à court terme, la mise en culture favorise l'infiltration ; on mesure alors dans les sols des conductivités hydrauliques de 150-200 mm/h et des coefficients de ruissellement à l'échelle parcelle de 3-4 %, contre respectivement 80-120 mm/h et 10-15 % sur les jachères. Par contre, c'est bien la mise en culture et finalement le raccourcissement des jachères qui viennent à bout de la fragile structure du sol et facilitent la formation des croûtes.

« Pour la plupart des auteurs, l'encroûtement modifie rapidement les propriétés hydrauliques de surface, en particulier le taux d'infiltration, à travers deux facteurs temporels : l'épaisseur de la croûte et/ou sa conductivité hydraulique (Tackett et Pearson, 1965 ; Morin *et al.*, 1981 ; Hadas et Frenkel, 1982). Une autre conséquence de la dégradation de l'état structural liée à la formation des croûtes est la compaction de la surface du sol (Canarache, 1965 ; Valentin, 1981) pouvant affecter l'émergence des semis et le stockage de l'eau dans le sol (Arndt, 1965 ; Boiffin, 1984). En zone semi-aride de l'Ouest africain, la croûte d'érosion, caractérisée par une fine pellicule plasmique (mélange de particules fines d'argile et de limon) colmatant un horizon sous-jacent tassé, serait un des états de surface qui influencerait de façon extrême l'ensemble de ces propriétés (Casenave et Valentin, 1992)» (Ambouta *et al.*, 1996).

Une diminution forte de l'infiltration entraînant un accroissement fort du ruissellement

Albergel (1987) et Albergel et Valentin (1988) ont été les premiers à mettre en évidence l'augmentation des écoulements en Afrique sahélienne. En effet, ils ont constaté une augmentation des coefficients d'écoulement, voire localement, des débits, au moment où la sécheresse était la plus accentuée (milieu des années 1980). Comme la cause ne pouvait pas en être climatique (la pluviométrie était au plus bas), ils en ont déduit que c'était la couverture végétale, reflet de l'occupation des sols, qui par sa modification profonde avait modifié les conditions du ruissellement. Ils ont observé une forte augmentation de la surface occupée par les champs ; or, d'après eux, « le

doublent des zones cultivées, la division par deux des jachères, le défrichement des zones marginales, des années très déficitaires en pluie (ce qui tend à laisser le sol nu) sont les facteurs qui favorisent la dégradation des sols par érosion hydrique » (Albergel et Valentin, 1988). Et de fait, ils montrent aussi dans la même étude que de 1956 à 1980, les surfaces très érodées que l'on peut considérer comme impropres à la culture ont été à peu près multipliées par 20 sur leur bassin d'étude (celui de Kognéré, au nord-est de Ouagadougou sur le plateau mossi). Pour eux, l'augmentation démographique rapide (2,6 % par an) conjuguée à une pluviométrie déficitaire pousse les agriculteurs à modifier leurs pratiques culturales : « Une des réponses adoptées face à la faiblesse des rendements est l'extension des cultures. Les nouvelles zones érodées apparaissent surtout lors de la mise en culture de la zone de piedmont aux sols peu épais, sous les cuirasses ferrugineuses, ainsi que des zones de bas-fonds, qui deviennent l'une et l'autre, assez vite (quelques années), des surfaces érodées à sables grossiers ». Ce bassin étant situé plutôt en zone soudano-sahélienne qu'au Sahel, ils concluent qu'on assiste à une « sahéliisation » des zones soudaniennes.

C'est exactement ce qu'on a observé au Fakara (ouest du Niger) dans les décennies 1990 et 2000. Les études à petite échelle ont montré une augmentation forte des surfaces cultivées (Loireau, 1998 ; Otlé et al, 2005 ; Leblanc *et al.*, 2008) et la plupart notent aussi une augmentation des surfaces de sols dégradés.

Récemment, des études ont bien montré le lien entre changement d'usage des sols et cycle hydrologique. Certaines ont été menées dans le cadre du programme AMMA et se sont intéressées à la région proche de Niamey (Niger) ; d'autres, en lien avec ce programme, ont été menées en collaboration entre l'IRD et l'ABN (Autorité du Bassin du Niger) (fig 7).

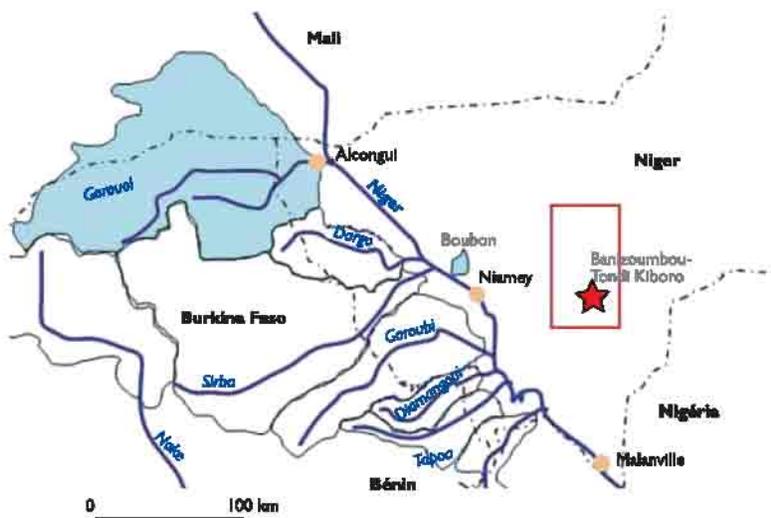


Figure 7.
Localisation des sites de mesures de l'évolution des usages des sols
et des modifications hydrologiques concomitantes.

Il a été constaté tout d'abord, à l'échelle ponctuelle, une diminution sensible de la conductivité hydraulique sur les secteurs encroûtés. Le tableau 1 montre que l'encroûtement des sols (qu'il s'agisse de la croûte ERO évoquée plus haut comme étant la plus répandue et celle dont l'extension spatiale est la plus rapide) se traduit par une forte augmentation du ruissellement et de l'érosion, ce qui est dû (colonne de droite) à la très forte diminution de la perméabilité des sols, caractérisée ici par sa mesure physique, la conductivité hydraulique, mesurée à l'aide d'infiltromètres à succion contrôlée (Amogu *et al.*, 2012).

Tableau 1.
Caractéristiques hydriques des principaux types d'occupation des sols
(Amogu *et al.*, 2012).

Type de surface	Coefficient de ruissellement %	Érosion en kg. ha ⁻¹	Conductivité hydraulique mm. hr ⁻¹
Mil sur sol non encroûté	3,8	373	162
Jachère sur sol non encroûté	10,5	881	108
Croûte ERO	60	5 566	18
Croûte ALG	26	863	31

Ces mesures représentent la moyenne de dizaines de mesures sur ces surfaces représentatives. Les mesures de ruissellement et d'érosion ont été obtenues sur des parcelles instrumentées (fig. 8). Celles-ci sont équipées de collecteurs ; après chaque événement pluvieux, on mesure le total des volumes d'eau et de sédiments transportés. Les surfaces de croûte ERO, telle qu'elle est représentée sur la figure 8, sont en forte croissance dans tout le Sahel. On a montré plus haut comment Casenave et Valentin (1989) expliquaient leur formation et leur extension dans l'espace, à partir de l'évolution des usages des sols.



Figure 8.
Une parcelle « jachère sur sol non encroûté » et une parcelle « croûte ERO »
(site de Bouban, 2012).

Ces résultats ont été acquis dans les zones sédimentaires du Continental Terminal (bassin des Iullemeden, Niger occidental) ; mais des mesures réalisées en zone de socle sous le même climat montrent le même accroissement de ruissellement avec l'encroûtement croissant des sols. À l'échelle de petits bassins de quelques hectares, l'accroissement constaté des zones de sols encroûtés entre 1993 et 2007 (fig. 9), dont la surface a doublé entre les deux dates, s'est traduit par une augmentation de 50 % des écoulements, ce qui ne traduit qu'imparfaitement l'accroissement du ruissellement, car il a été déterminé que d'importants volumes d'eau s'infiltraient dans le lit des ravines principales (Amogu *et al.*, 2012).

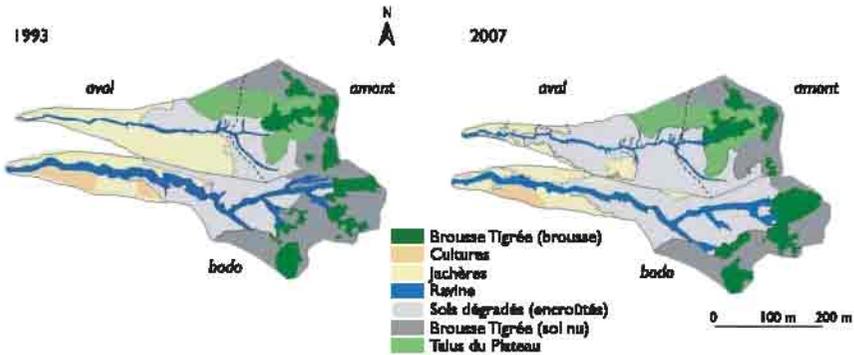


Figure 9.
Évolution des occupations des sols des bassins expérimentaux de Tondi Kiboro (Ouest du Niger, voir localisation figure 7) entre 1993 et 2007. On constate un doublement des surfaces de sols encroûtés (Souley Yéro, 2008 ; Amogu *et al.*, 2012).

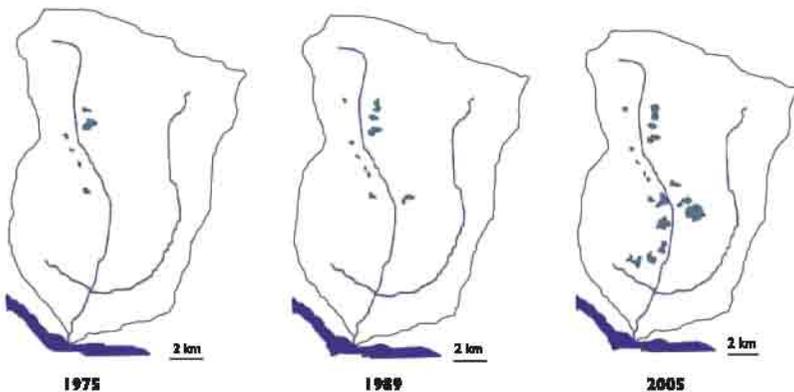


Figure 10.
Évolution des surfaces de sols encroûtés (croûte ERO majoritairement) sur le bassin versant de Boubon (160 km²), à 25 km en amont de Niamey, rive gauche du Niger.

À une échelle plus grande de bassins de plusieurs dizaines voire centaines de km², se jetant directement dans le fleuve Niger, tel celui de Boubo, en rive gauche et en amont de Niamey (voir figure 7), on constate encore une augmentation des surfaces de sols encroûtés (fig. 10). Celle-ci s'est traduite, à l'échelle régionale par une augmentation d'un ordre de grandeur des débits de ces affluents directs, certains devenant de nouveaux affluents du fleuve Niger après avoir été des dépressions endoréiques depuis la péjoration hydrologique post-Atlantique. Le cumul de ces nouveaux apports peut représenter jusqu'à plusieurs milliards de km³ par an, depuis la fin des années 1990 (Amogu *et al.*, 2010).

On constate le même type de dégradation à grande ampleur dans le Fakara, qui est l'ensemble de la région de Banizoumbou-Tondi-Kiboro avec l'accroissement notable des zones de cultures et des zones de sols dégradés et encroûtés (fig. 11).

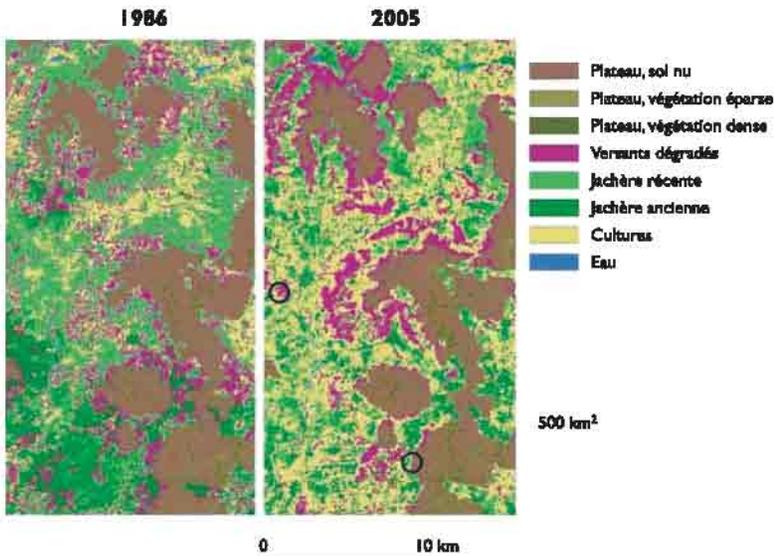


Figure 11.
Évolution de l'occupation des sols dans la région de Banizoumbou-Tondi Kiboro entre 1986 et 2005 (Otté *et al.*, 2007).

Cette région est située en zone endoréique. On a vu plus haut que, à l'échelle locale, on avait mesuré de forts accroissements de l'écoulement (site de Tondi Kiboro) ; à l'échelle régionale, comme l'eau finit toujours dans des dépressions fermées et que, par ailleurs, les mares ont été définies comme les principales zones de recharge de la nappe (Leduc *et al.*, 2001), cet accroissement des écoulements observés en zone endoréique se traduit par une remontée sensible de la nappe phréatique, de l'ordre de la dizaine de centimètres par an à la fin du siècle passé, plutôt autour de 30 cm par an actuellement (Leduc *et al.*, 2001 ; Leblanc *et al.*, 2008).

Cette évolution des occupations des sols s'observe aussi à l'échelle des grands bassins affluents du fleuve Niger. La figure 12 montre une portion représentative du bassin du Gorouol, l'un des principaux affluents sahéliens du fleuve Niger, en rive droite (comme vu ci-dessus, les secteurs de rive gauche sont majoritairement endoréiques). On constate une forte diminution de la couverture végétale durant les deux dernières décennies du xx^e siècle (Amogu *et al.*, 2010).

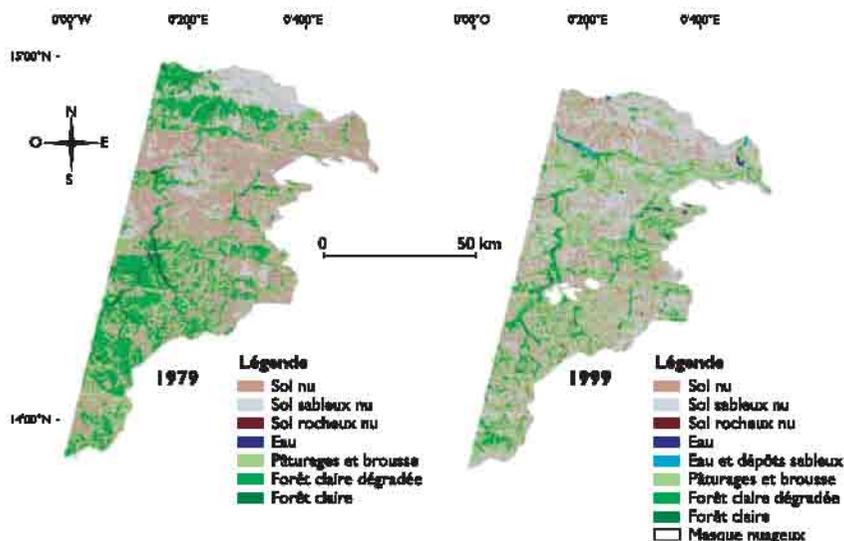


Figure 12.

Cartes de l'occupation des sols de la partie aval du bassin du Gorouol, issues de la télédétection d'images Landsat ; on constate une forte diminution des couverts végétaux (Amogu *et al.*, 2010).

Évolution de l'occupation des sols sur l'ensemble de l'emplacement de la GMV

Une question récurrente, et qui est aussi à l'origine d'un grand nombre d'études et de plusieurs travaux basés sur la télédétection, c'est de savoir si le milieu (sol-végétation-eau) en Afrique de l'Ouest, et en particulier dans la bande soudano-sahélienne, est en voie de dégradation ou pas. La désertification est-elle toujours en cours ?

Les deux questions majeures sont :

– y a-t-il dégradation ou progression de la végétation et des milieux en Afrique de l'Ouest soudano-sahélienne ?

– l'évolution des NDVI, RUE, PPN/P est-elle un indicateur pertinent pour répondre à la question n°1 ?

À l'échelle locale des petits bassins versants expérimentaux de Wankama et Tondi Kiboro, on assiste indéniablement à une dégradation des sols et de la végétation (Souley Yéro, 2008) conduisant à une accélération du ruissellement. Par ailleurs, on note, sur les rares bassins instrumentés d'Afrique de l'Ouest, une augmentation continue des débits sans relation avec une augmentation des pluies. Ce dernier point conduit à penser que l'on assiste bien à une diminution de la capacité des sols et des bassins à conserver l'eau, ce qui est en principe en lien avec une diminution de la végétation et des capacités d'infiltration des sols. Mais le lien entre ces deux échelles de travail, malgré des travaux récents (Amogu, 2009 ; Descroix *et al.*, 2009 ; Amogu *et al.*, 2010) n'est pas encore suffisamment établi, et on manque toujours, du reste, de matériau permettant de régionaliser et spatialiser l'information obtenue expérimentalement à l'échelle ponctuelle ou locale.

Mais la très bonne synthèse récente de Fensholt et Rasmussen (2011) doit permettre d'y voir plus clair, même si ses résultats énoncés ne sont pas forcément toujours en adéquation avec ce que montrent ses figures. En effet si la figure 13a montre une progression générale du NDVI sur la région (moins franche d'ailleurs sur la partie ouest du Niger) entre 1982 et 2007, ce n'est pas le cas si on compare 1996 à 2007 (figure 14c), où la bande soudano-sahélienne est bien plus contrastée et où, clairement, l'ouest et le centre du Niger, c'est-à-dire les deux régions les plus peuplées du

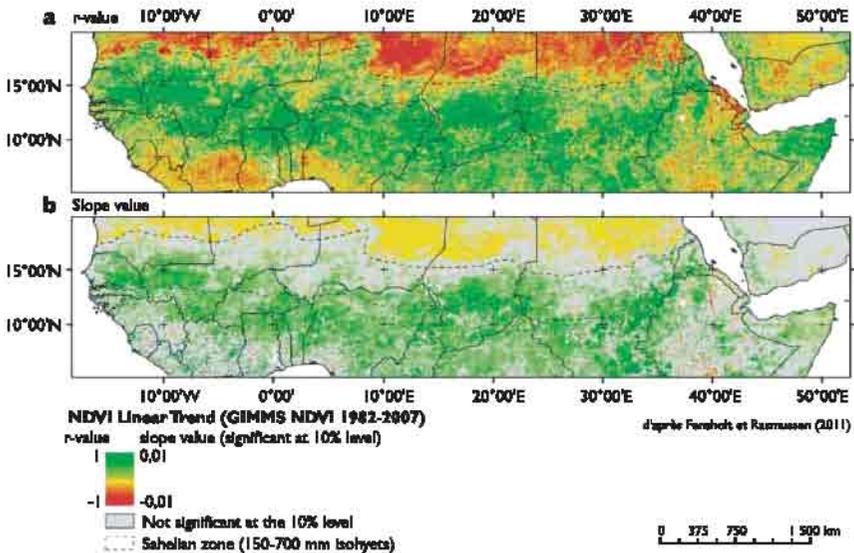


Fig. 13 a et b.

Carte de l'analyse de la tendance de la régression linéaire du GIMMS NDVI valeurs de r (a) et valeurs de pente (b) 1982-2007.

Seules les pentes fondées sur des tendances significatives au seuil de 10 % de confiance sont signalées dans la figure b.

La zone sahélienne est délimitée par les tirets, représentant les isohyètes de 150 et 700 mm.

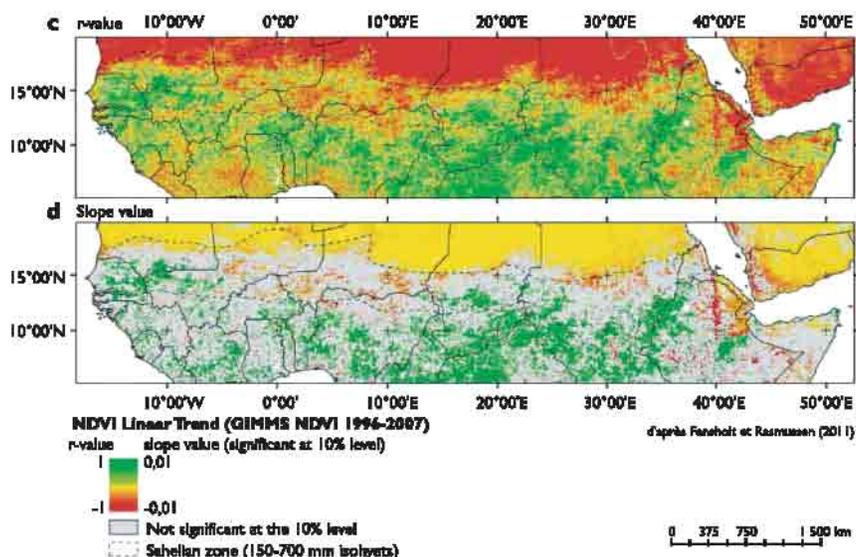


Fig. 14 c et d.

Carte de l'analyse de la tendance de la régression linéaire du GIMMS NDVI
valeurs de r (c) et valeurs de pente (d) 1996-2007.

Seules les pentes fondées sur des tendances significatives au seuil de 10 % de confiance
sont signalées dans la figure b.

La zone sahélienne est délimitée par les tirets, représentant les isohyètes de 150 et 700 mm
(moyenne RFE 1996-2007).

pays, semblent voir régresser leurs valeurs de NDVI. Par ailleurs, sans rien enlever du très grand intérêt de ce travail de synthèse, est-ce que la comparaison 1982-2007 ne souffre pas, comme dans un précédent travail du même auteur sur les environs de la mare d'Oursi (Rasmussen *et al.*, 2001), d'un point de départ au creux de la sécheresse, et donc forcément d'un point bas des NDVI, après lequel la tendance ne pourrait qu'être positive ?

Cela confirme les tendances observées sur les cartes de Prince *et al.* (1998), sur lesquelles on peut constater que malgré un reverdissement général (durant la période succédant au creux le plus prononcé de la sécheresse, du milieu des années 1980) la zone du Niger central et sahélien (à cheval sur le Burkina et le Niger) continue à perdre de la biomasse. Une stagnation de la biomasse à partir de la fin des années 1990 est également observée par I. Garba de Agrhymet (travaux en cours). Les données de Fensholt et Rasmussen (2011) sont étayées par une troisième carte représentant l'évolution du RUE (Rain Use Efficiency). Encore une fois, non seulement la progression de celui-ci à l'échelle de l'Afrique de l'Ouest n'est pas flagrante, mais elle semble carrément négative sur l'ouest et le centre du Niger. Les observations réalisées pendant AMMA montrent que le site nigérien de ce programme est en fin de compte très peu représentatif de l'ensemble de la bande sahélienne (en poursuite de désertification alors que le reste reverdirait plutôt [Mougin, 2009]).

L'ensemble de ces résultats montrent globalement :

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

Cela se traduit par une très forte baisse de la perméabilité des sols et donc de l'infiltration de l'eau, une forte augmentation des ruissellements, des écoulements et des débits ; comme on est dans une zone endoréique, ces eaux se concentrent dans les bas-fonds, formant des mares qui sont les principaux points de recharge de la nappe phréatique. Le niveau de celle-ci, dans le DCN, a donc monté de 3-4 m dans les 20 dernières années. Cependant, autant la forte augmentation de l'encroûtement et du ruissellement est un processus qu'on observe presque partout en Afrique de l'Ouest soudano-sahélienne, autant la hausse de la nappe ne concerne que certains secteurs endoréiques.

Malgré la conclusion des auteurs sur le reverdissement affirmé, on observe avant tout dans leurs cartes :

- une croissance de la végétation après 1986, au moment de la remontée de la pluviométrie
- une désertification persistante dans la partie centrale du Sahel après 1996 (Niger, nord du Burkina, est du Mali).

Par ailleurs, dans les montagnes du Tigré (nord de l'Éthiopie), on note une croissance forte des sols mis en cultures, du fait de la croissance démographique ; cela n'entraîne pas encore de fatigue des sols, mais une augmentation du ruissellement (Descheemaeker *et al.*, 2006) et de la consommation d'eau de pluie et une baisse de la nappe (Walraevens *et al.*, 2009).

Évolution de l'occupation des sols et conséquences hydrologiques : augmentation des écoulements et du risque de crue

Les processus d'encroûtement des sols et d'accroissement des ruissellements décrits plus haut ont entraîné un accroissement des débits des cours d'eau sahéliens durant la grande sécheresse du Sahel (fig. 15). C'est ce que l'on appelle le « paradoxe hydrologique du Sahel » (Descroix *et al.*, 2009 ; Amogu *et al.*, 2010, Descroix *et al.*, 2012).

La figure 16 montre que ce n'est le cas strictement que des cours d'eau sahéliens et de quelques cours d'eau nord-soudaniens (Tapoa, Diamangou, Goroubi, tous affluents de droite du Niger). Mais de l'Atlantique au lac Tchad, on assiste bien à un accroissement des débits des cours d'eau sahéliens, en Mauritanie (Mahé et Paturel, 2009) et au Sahel central, au Burkina Faso, au Mali et au Niger (Nakambé, Gorouol, Dargol, Sirba) (Mahé *et al.*, 2003 ; 2005 ; Descroix *et al.*, 2009 ; Amogu *et al.*, 2010), ainsi qu'au Nigeria (Mahé *et al.*, 2011).

En l'absence d'explication climatique (ces augmentations se produisent pendant et en dépit de la sécheresse), il semblerait donc que les sols sahéliens ont changé de comportement. En zone soudanienne et guinéenne, par contre, les débits ont baissé avec le déficit pluviométrique (et en général plus fortement que la pluie), ce qui tendrait à montrer que les sols y ont conservé leur capacité de rétention en eau.

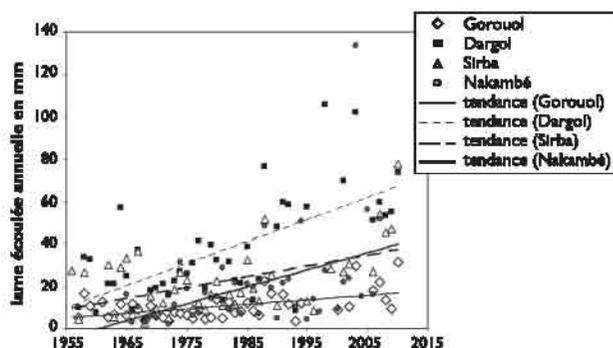


Figure 15.

Augmentation des débits des cours d'eau sahéliens durant la sécheresse :
évidence du paradoxe hydrologique sahélien (Amogu *et al.*, 2010).

Depuis quelques années, on constate même une augmentation du risque de crue en Afrique de l'Ouest. Les paramètres climatiques n'ont pas évolué sensiblement : les pluies ont regagné une partie de ce qui avait été perdu dans les années 1968-1995, mais seulement dans la partie centrale du Sahel ; et par ailleurs, ni l'intensité des pluies, ni leur répartition spatiale ou temporelle n'ont évolué dans un sens pouvant expliquer cet accroissement des crues. On pense donc avant tout à la réponse des sols aux précipitations pour expliquer ce regain d'activité. Le tassement et l'encroûtement des sols facilitent le ruissellement, dans le même temps que la diminution de la couverture végétale réduit l'évapotranspiration. Tchakert *et al.* (2010) ont montré que les crues devenaient plus fréquentes ces dernières années au Sahel et dans toute l'Afrique de l'Ouest, alors même qu'on ne parle que des « dry spells » et de leur impact. Sécheresses et crues caractériseraient conjointement ces régions pour les prochaines décades. De même, Di Baldassare *et al.* (2010) montrent également une hausse du risque de crue sans qu'aucun élément climatique puisse l'expliquer, mais vue sous l'angle de la vulnérabilité accrue des sociétés, plus nombreuses, plus

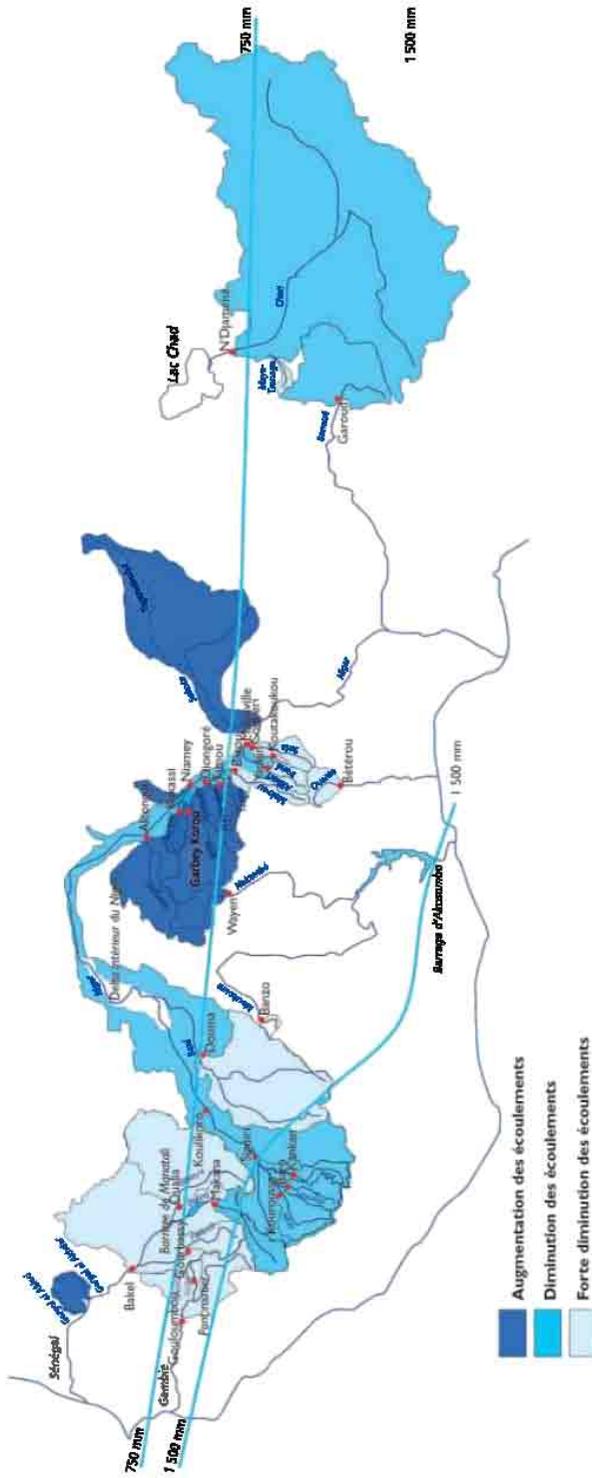


Figure 16. Évolution des débits des cours d'eau d'Afrique de l'Ouest et centrale durant la sécheresse (Mahé et Paturel, 2009 ; Amogu et al., 2010 ; Mahé et al., 2011).

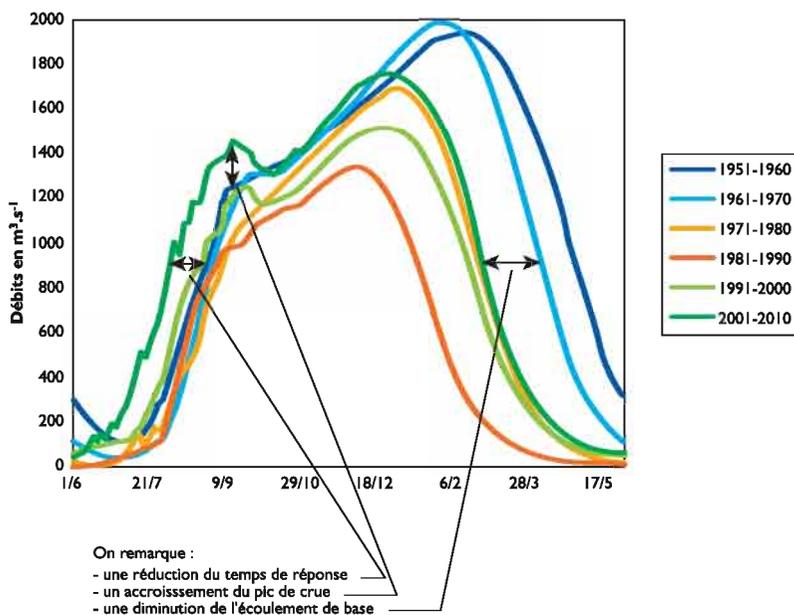


Figure 17.

Évolution du débit et du régime du Niger à Niamey depuis 1951 :
mise en évidence d'une réduction de la capacité de rétention en eau des sols du bassin..

urbanisées et occupant plus de terroirs. Il semblerait toutefois que l'on assiste bien à un accroissement du risque de crue en lien avec les changements d'usage des sols, et des travaux récents (Descroix *et al.*, 2011) et en cours (fig. 17) montrent pour le fleuve Niger à Niamey, dont le bassin est assez vaste pour être considéré comme représentatif et intégrateur, des modifications significatives sur les deux dernières décennies (les enregistrements existent depuis 1929). Sans qu'aucun élément climatique ne vienne l'expliquer, on assiste durant la décennie 1990, et plus encore durant la suivante, à un ensemble de manifestations caractéristiques : une réduction du temps de réponse des sols et des bassins aux précipitations, une réduction de l'écoulement de base et un accroissement de l'écoulement de crue, signes d'une diminution de la capacité de rétention en eau des sols, donc d'une modification de leurs caractéristiques hydrodynamiques.

Ainsi la ville de Niamey a été inondée sévèrement durant le mois d'août, puis en septembre 2010, par les deux crues les plus fortes jamais observées durant la saison des pluies (crue « locale » ou crue « rouge ») depuis 1929. Or la pluviométrie enregistrée cette année-là dans le bassin concerné, c'est-à-dire les affluents sahéliens du fleuve entre Gao et Niamey, avait été dépassée 21 fois depuis 1950 sans provoquer de telles crues. Et ni l'intensité ni la répartition des pluies dans la saison ne permettent de mettre en avant un rôle des précipitations dans cette crue. Enfin, la réduction des écoulements de base se traduit par une augmentation du risque d'étiage des cours d'eau.

Une diminution des rendements agricoles et l'urgence de les améliorer

La fatigue des sols évoquée plus haut se ressent bien sûr pour les sociétés en termes de production, et le constat est sans appel : les rendements baissent, obligeant comme on l'a vu les agriculteurs à étendre les zones de culture pour atteindre une production assurant l'autosuffisance d'une population croissante et pour compenser cette baisse des rendements.

La faible fertilité des sols et leur fragilité sont à la base de la baisse globale des rendements observée dans certaines régions du Sahel. Ben Mohamed *et al.* (2002) montrent bien pour le Niger que les rendements baissent en tendance à long terme entre 1967 et 1998, passant de 475 à 400 kg/hectare sur la moyenne des régions de Dosso (ouest du Niger), Maradi (Centre) et Zinder (Est). Cela est confirmé, à l'ouest du Niger, pour les rendements fourragers et pour la seule période post-sécheresse. Tous types d'occupations des sols confondus (cultures, jachères, pâturages), la productivité des terroirs en matières sèches passe de 1 700 kg/ha en 1994 à 1 000 en 2006 (Hiernaux *et al.*, 2009a), alors même qu'on est dans la période de relative récupération des précipitations et que, par ailleurs, les mêmes auteurs observent une croissance continue de la part cultivée de l'espace du terroir ; celle-ci passe de 45 à 55 % de l'espace total, ce qui devrait conduire à une augmentation de la biomasse fourragère car ils ont noté que la biomasse totale des champs de mil est sensiblement supérieure à celles de la jachère et des pâturages. Guengant et Banoïn (2003) ont observé, à l'échelle de l'ensemble du Niger, que l'accroissement des surfaces cultivées devait aller au moins aussi vite que celui de la végétation (fig. 18), étant donné qu'on assiste à une baisse des rendements moyens (fig. 19).

On constate donc simultanément :

- une diminution des rendements agricoles ;
- une baisse de la capacité de rétention en eau des sols ;
- une augmentation de l'érosion et une extension des sols encroûtés et dégradés ;
- une augmentation du risque de crue et d'étiage sur les cours d'eau en aval.

Ces éléments sont concomitants et posent aux sociétés des défis importants pour les prochaines années. Il faut simultanément lutter contre l'encroûtement et la fatigue des sols, la raréfaction de la végétation ligneuse, l'érosion et la perte en sols, le ruissellement trop rapide : il faut tout faire pour favoriser l'infiltration de l'eau dans les sols pour qu'elle profite avant tout au végétal, qu'il s'agisse de végétation naturelle, de cultures ou de pâturages (ces derniers sont en grande partie inclus dans les deux précédentes catégories). Il s'agit de reconstituer une rugosité qui doit être effective à deux échelles, celle de la micro-topographie afin de permettre l'infiltration de l'eau, et celle du paysage, car la végétation doit permettre de limiter l'érosion hydrique et éolienne. Comme on l'a vu précédemment, le système d'alternances cultures/jachères a atteint ses limites et il faut trouver d'autres moyens pour à la fois restaurer la fertilité des sols, accroître les productions, restaurer les terroirs, diversifier sources d'alimentation et de revenus.

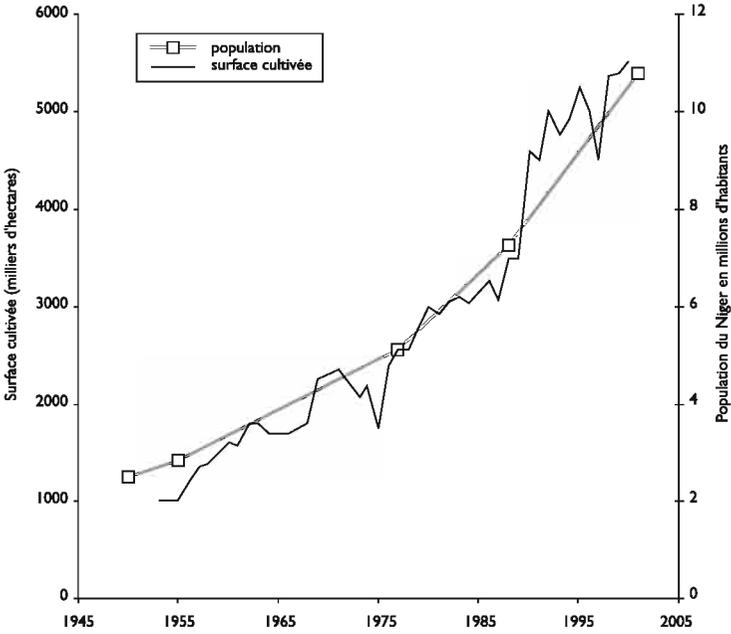


Figure 18.
Augmentation de la population et de la surface cultivée au Niger depuis 1950 (d'après Guengant et Banoin, 2003).

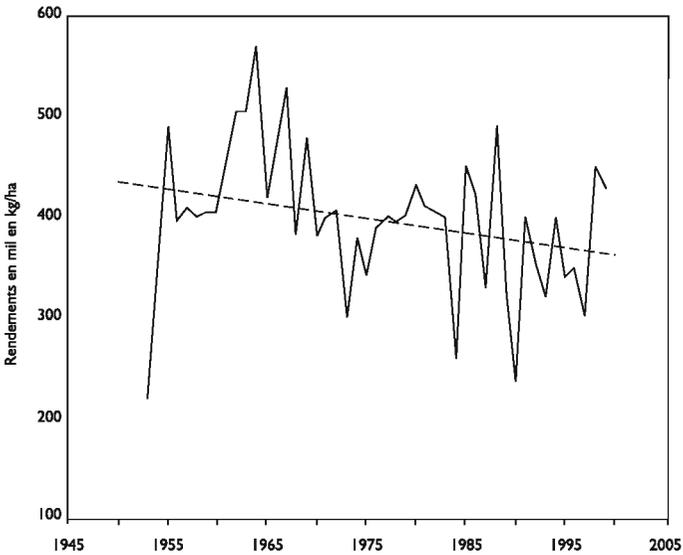


Figure 19.
Diminution des rendements moyens en mil au Niger depuis 1950 (d'après Guengant et Banoin, 2003).

On oppose souvent les théories d'Ester Boserup (1965) à celles de Malthus (1798). De fait, des chercheurs ont montré que dans certaines régions et dans certaines circonstances, la hausse de la population se traduisait par l'apparition d'un processus « vertueux » permettant l'émergence de systèmes agraires plus productifs au fur et à mesure de l'accroissement démographique. Et de fait, au moins deux exemples sont cités en Afrique subsaharienne de réussites de modèles « boserupiens ». Le premier concerne les villages Machakos de l'ouest du massif du mont Kenya (Kenya), qui ont su concilier restauration des terres, croissance démographique et hausse de la production agricole (Tiffen *et al.*, 1994). Au nord de la Côte d'Ivoire, Demont *et al.* (2009) décrivent une région, celle de Dikodougou, dans laquelle ils ont étudié l'évolution de 4 villages et où ils ont pu constater que processus « boserupiens » et « malthusiens » pouvaient coexister. À l'heure actuelle, ces modèles vertueux semblent peu en vigueur en Afrique subsaharienne, et on trouve plus de cas semblant répondre à la « tragédie des communs » (Hardin, 1968) ; mais c'est un point de vue potentiellement biaisé, et lié à l'absence de propriété privée dans la plupart des sociétés agraires subsahariennes (Descroix *et al.*, 2008).

De nombreuses expériences ont été tentées pour réussir cette « quadrature du cercle ». Le travail des ONG et des ingénieurs en agro-foresterie est remarquable à cet égard. Certains succès ont été enregistrés dans la restauration des terroirs, montrant que la désertification est rarement un processus irréversible ; ainsi, sur le nord du plateau central (plateau mossi) burkinabé (Reij *et al.*, 2005 ; Reij *et al.*, 2009) et dans certains secteurs du centre et de l'est du Niger (Larwanou *et al.*, 2006 ; Di Vecchia *et al.*, 2006 ; CRESA, 2006 ; Reij *et al.*, 2009), en particulier la région de Keita, celle dite des 3M (Maggia, Madarounfa, Maradi) ou encore vers Aguié et Zinder. Dans certains cas (plateau mossi, plateau de Keita), une remontée locale de la nappe phréatique est attribuée aux travaux de restauration des terroirs (Reij *et al.*, 2009) et aux seuils d'épandage de crues, comme près de Keita (CRESA, 2006).

Les travaux de restauration des terroirs sont à la portée des villageois avec un outillage basique (daba, pelles, pioches). Ils sont très classiques et répandus en Afrique de l'Ouest ; il s'agit d'abord des demi-lunes (fig. 20), des banquettes (fig. 21) et des cordons pierreux (fig. 22). Les zaï, dépressions d'ordre métrique creusées pour accumuler eau et matière organique, se sont répandus à travers le Sahel à partir du Burkina Faso. De nombreux travaux, adaptés aux montagnes, sont également réalisés dans les highlands d'Éthiopie et d'Érythrée (Nyssen *et al.*, 2000 ; Nyssen *et al.*, 2004 ; Descheemaeker *et al.*, 2006).

Les reboisements sont peu répandus et peu recommandés, étant donné le manque d'espace dont souffrent les sociétés sahéliennes depuis quelques années. On peut recommander le reboisement uniquement dans les secteurs réputés incultes ou vraiment très peu fertiles ; ainsi les plateaux latéritiques (fig. 23) sont adaptés aux reboisements en arbres utiles (gommiers, jujubiers, prosopis, balanites, etc.) ; ils y pousseront très doucement mais ne concurrenceront aucune autre activité. Les parcs à gaos (fig. 24) sont à développer, car ils sont une forme d'amélioration durable des terroirs ; en effet, *Faidherbia albida* est une variété d'acacia, une légumineuse réputée fixer l'azote dans le sol. Par ailleurs, leur présence limite sérieusement l'érosion tant hydrique qu'éolienne.



© L. Desroix

Figure 20.
Demi-lunes sur le versant nord du bassin de Tondi Kiboro (Niger).



© L. Desroix

Figure 21.
Grande banquette rectangulaire pouvant accueillir 3 arbres.



© L. Desroix

Figure 22.
Exemple de cordons pierreux bien réalisés (ici dans le bassin de la Sirba, au Burkina Faso).



© L. Desroix

Figure 23.
Exemple de plantation de gommiers
en cuvette réussie
(Boubon, au nord de Niamey).



© L. Desroix

Figure 24.
Parc à goo (Faidherbia albida)
près de Banizaumbou
(ouest du Niger).

Contrairement aux idées reçues, les ressources en eau sont notoirement sous-utilisées au Sahel. Les réserves en eaux souterraines pourraient être extraites plus efficacement avec des systèmes d'exhaure animale à double téléphérique, ce qui permet de développer la petite irrigation villageoise sans dépendre aucunement de technologies extérieures. Cela autorise à la fois une forte augmentation de productivité, une diversification agricole et des revenus, et une amélioration substantielle des terroirs, avec une utilisation intensive et à haute intensité de main-d'œuvre des bas-fonds, de manière pérenne ; cela est aisé dans les zones sédimentaires, l'eau se trouvant rarement à plus de 70 m de profondeur (encore loin de la profondeur possible des puits traditionnels, qui peuvent dépasser les 100 m). C'est un peu plus compliqué dans les zones de socle, où les nappes d'eau souterraines sont bien plus réduites et surtout difficiles à localiser ; mais dans ces zones, le substratum rocheux autorise par contre le stockage de l'eau en surface dans des lacs collinaires. Cette technique a été développée avec succès au Burkina Faso, où de nombreux périmètres irrigués villageois sont alimentés par des lacs collinaires.

Une action à entreprendre au niveau des villages, par les villageois

L'action de restauration doit être menée par les villageois avec les instruments locaux, et durant la saison sèche où la main-d'œuvre masculine est inemployée au Sahel durant de longs mois (de 6 à 9 mois suivant la latitude). Il est important que l'accès à l'eau soit aussi assuré par les villageois de manière à ne pas les rendre dépendants de techniques (et de techniciens) extérieurs : puits cimentés avec exhaure animale plutôt que forages motorisés ; par contre, les petits barrages des zones de socle ne sont pas aisément réalisables sans une intervention extérieure (ONG, organisme national, etc.).

Ces actions de restauration reposent sur 3 actions majeures, à savoir

- Constituer des pépinières, avant tout pour permettre l'essaiage des espèces utiles, autochtones ; en profiter pour aménager des jardins potagers et des vergers permettant de diversifier à la fois l'alimentation et les sources de revenus.
- Pérenniser les zones de cultures à haute valeur ajoutée dans les bas-fonds et/ou les zones très fumées.
- Promouvoir le rôle des sociétés rurales

« Cependant, si la désertification et le déboisement restent des faits d'actualité dans certaines régions du Niger, la tendance aujourd'hui, dans la région de Maradi comme en Ader, est au contraire à une multiplication des ligneux ; mais une multiplication maîtrisée, avec choix des espèces et des espaces reboisés.

Les perceptions paysannes de la nature et de sa dynamique ont changé, ainsi que les attitudes vis-à-vis des plantes et des végétations. Ces attitudes sont tout à fait diversifiées selon les lieux et selon les acteurs, et elles viennent contrebalancer ou au contraire amplifier l'effet négatif de l'aridification. Ce sont ces dynamiques sociales – en relation avec les dynamiques écologiques –, problématisées par l'analyse du changement de statut des plantes spontanées (c'est-à-dire celles dont le cycle n'est pas entièrement maîtrisé par l'homme), qui retiennent notre intérêt. » (Diarra et Luxereau, 2004).

Des auteurs ont souligné que les conditions de gestion des arbres révélaient les relations que les sociétés entretiennent avec leur environnement végétal. Ainsi le recul des ligneux et le lien entre régression de la forêt et désertification ont commencé à être sérieusement nuancés voire totalement remis en cause par les études récentes sur le reverdissement du Sahel, qui est une tendance forte due pour une bonne part à l'extension des couverts ligneux (A. Luxereau, comm. pers).

Le rôle de la rétroaction

Depuis les travaux de Charney (1975) sur l'albédo, on estime très probable un rôle déterminant de la surface terrestre sur le climat sous forme d'une boucle de rétroaction. Taylor *et al.* (1998) avaient montré que les pluies pouvaient être persistantes sur un même site, signe que l'humidité préalable d'une surface pouvait influencer la localisation des pluies suivantes. Koster *et al.* (2004) ont également montré que certaines régions du globe (la vallée du Mississippi, la plaine Indo-Gangétique et le Sahel) étaient celles où l'humidité du sol était le mieux corrélée avec les précipitations et le climat.

Le débat scientifique sur le reverdissement du Sahel doit être tranché assez vite ; il s'agit de déterminer quelle est la part qui revient à la seule récupération partielle post-sécheresse. En effet, de cet éventuel reverdissement dépendent de nombreux

paramètres nécessaires à la priorité à accorder à la recherche mais surtout à la prise de décision. Comment expliquer qu'on ait à la fois reverdissement et diminution de la capacité de rétention en eau des sols ? Il y a probablement coexistence d'un reverdissement et d'une dégradation des sols, mais alors il faut bien la définir et en montrer les conséquences en termes de gestion des terroirs et des eaux.

Des travaux menés au Niger (Leblanc *et al.*, 2008 ; Souley Yéro, 2008 ; Amogu *et al.*, 2010) montrent une poursuite de la désertification, mais ils concerneraient une région (le degré carré de Niamey) non représentative de sa « latitude », donc de son géo-climat. De fait, des travaux menés par télédétection à l'échelle de tout le Sahel montrent que le cours du fleuve Niger moyen (région à cheval sur le Niger et le Burkina Faso) continuerait à perdre de la biomasse, contrairement au reste du Sahel (Prince *et al.*, 1998 ; Fensholt et Rasmussen, 2011). Toutefois, dans le Nord-Sahel où le reverdissement semble plus prononcé, il a été défini qu'un gros tiers de la surface serait désertifié (de manière irréversible sauf intervention active des sociétés) et se comporterait à l'image des zones très dégradées (ruissellement accéléré, érosion éolienne et érosion hydrique très fortes). Ce débat est primordial pour la modélisation climatique, car de cet éventuel reverdissement dépendent directement :

- un albédo diminué (en cas de reverdissement effectif) ou au contraire accru par la diminution de la végétation ligneuse ; or Charney a montré dès 1975 que l'albédo jouait un rôle clé dans la dynamique des climats ;
- une ETR amoindrie par la diminution de la teneur en eau des sols et la disparition de la végétation ligneuse ou au contraire accrue par un reverdissement ;
- l'humidité du sol, qui est liée aussi à la végétation puisque celle-ci permet l'infiltration de l'eau au moment de la pluie en limitant le ruissellement ; même si cette eau est prélevée essentiellement par la végétation (ETR), celle-ci n'en permet pas moins pendant plusieurs jours le maintien d'une humidité bien plus élevée que celle d'un sol nu. L'humidité du sol est connue pour jouer un rôle dans le climat (Koster *et al.*, 2004) ou dans la distribution spatiale des pluies (Pellarin, travaux publiés et en cours ; Taylor *et al.*, 2011).

Par ailleurs, comme le montrent bien Dupriez et De Leener (1990), la végétation joue un rôle très important dans le mini et le micro-climat ; on peut supposer que reverdir le Sahel pourrait produire un effet climatique régional.

Par ailleurs, d'autres auteurs ont montré l'importance de la macro-rugosité représentée par la végétation pour la répartition des précipitations (Escourrou, 1981) mais aussi pour limiter l'érosion éolienne et hydrique (Riboldi *et al.*, 2006). Autant de raisons qui rendent impérieuse une bonne connaissance de la vraie tendance de l'évolution de la couverture végétale sur l'Afrique de l'Ouest. Par ailleurs, la couverture végétale influence la température au sol, qui est elle aussi connue pour avoir beaucoup d'importance sur les transferts d'énergie, donc sur le climat (Taylor *et al.*, 2011).

Les programmes de recherche récents en Afrique de l'Ouest (HAPEX, AMMA, etc.) ont permis d'avancer substantiellement dans la connaissance du milieu et des causes possibles du grand changement climatique que représente le déficit pluviométrique

observé depuis 1968. Il reste quelques zones d'ombre à éclairer pour comprendre les liens entre la surface et le fonctionnement des couches limites et des mécanismes de rétroaction surface/atmosphère. Le projet GMV peut être l'occasion de développer des travaux dans ce domaine, sachant qu'il y a urgence à faire des propositions aux décideurs et aux paysans permettant d'améliorer la sécurité alimentaire et de diversifier les sources de revenus.

Conclusion

Il semble donc que la désertification ne soit pas forcément derrière nous ; l'essentiel de la progression de la végétation observée depuis le début des observations satellitaires à haute définition (Landsat TM dès 1982, SPOT à partir de 1986) a commencé après le moment le plus prononcé de la sécheresse, et un cumul d'années déficitaires. De ce fait, la végétation, dont une partie a disparu du seul fait de la sécheresse, ne pouvait qu'entamer un processus de récupération. Par ailleurs, malgré le reverdissement assez généralement noté, les cartes montrent bien que dans le Sahel central (est du Mali, nord du Burkina, tout le Niger), la dégradation de la végétation se poursuit. Or, avec elle se dégradent aussi très vite les sols mis à nu et très vite soumis à l'encroûtement, et l'ensemble de l'agrosystème, ce qui menace la sécurité alimentaire et surtout l'avenir des sociétés rurales. Ce processus de « désertification des sols » est réversible, et ce en se fondant uniquement sur le travail des paysans (pendant les 8-9 mois de saison sèche par exemple), sans aucun apport extérieur, et avec des techniques connues dont certaines (le zaï par exemple) sont issues du même milieu paysan, d'autres ayant été remises à la mode après avoir disparu du fait de la pression démographique (la RNA, régénération naturelle assistée). L'accès à l'eau, fondé sur des puits cimentés réalisés aussi en suivant le savoir-faire local pour les zones de terrains sédimentaires, et avec un appui extérieur pour la réalisation de petits barrages ou de puits et forages, doit être encouragé pour :

- libérer la main-d'œuvre féminine (remplacée avantageusement par des systèmes d'exhaure animale également bien connus dans la sous-région) ;
- permettre le développement dans les bas-fonds de systèmes de jardinage à haute intensité de main-d'œuvre aboutissant à une diversification de l'alimentation comme des sources de revenus et ainsi permettant d'utiliser la main-d'œuvre féminine partiellement libérée des corvées d'eau et surtout la main-d'œuvre masculine presque totalement inemployée durant la saison sèche.

Une intensification des systèmes de culture doit aussi viser une amélioration de la productivité de l'élevage, fondée sur une forte diminution du nombre de têtes de bétail, mais avec une production maintenue voire augmentée par la sélection et une gestion améliorée des troupeaux ; la disponibilité en fumure autour des villages serait ainsi préservée voire améliorée.

Le projet GMV est intéressant et novateur en ce sens qu'il propose comme objectif un « Sahel vert » plutôt qu'une véritable Muraille Verte qui serait un objet technocratique imposé et probablement voué à l'échec. Les expériences de récupération des terroirs tentées en Afrique sahélienne ont souvent remporté des succès, quand elles ont été acceptées par la population et adaptées de manière à ce que les travaux puissent être réalisés sans apport financier ou technique extérieur important.

Références

- Ada, L., Rockstrom, J., 1993.
Diagnostic sur le système agricole du « Zarmaganda central » (Niger).
Master thesis of the INAPG, Paris, 82 p.
- Albergel, J., 1987.
Sécheresse, désertification et ressources en eau de surface — Application aux petits bassins du Burkina Faso. *The Influence of Climate Change and Climatic Variability on the Hydrologic Regime and Water Resources* (Proceedings of the Vancouver Symposium, August 1987). IAHS Publ. no. 168.
- Albergel J., Valentin C., 1988.
Sahélisation d'un petit bassin versant soudanien : Kognéré-Boulsa au Burkina-Faso.
In : Bret B, éd. Les hommes face aux sécheresses, Nordeste brésilien-Sahel africain. Paris : EST/IHEAL, coll. Travaux et Mémoires 42 : 179-91.
- Ali, A. and Lebel, T., 2009.
The Sahelian standardized rainfall index revisited.
Int. J. Climatol. 29, 1705-1714.
- Amani, A. and Nguetora, M., 2002.
Evidence d'une modification du régime hydrologique du fleuve Niger à Niamey.
In Van Lannen, H., Demuth, S. (Eds). FRIEND 2002 regional Hydrology : bridging the gap between research and practice. Proc. of Friend Conf. Cape Town, S.A., IAHS Pub. 274 : 449-456.
- Ambouta, JMK, Valentin, C. et Laverdière, M., 1996.
Jachères et croûtes d'érosion au Sahel. *Sécheresse* 7 ; 269-275.
- Amogu, O. 2009.
La dégradation des espaces sahéliens et ses conséquences sur l'alluvionnement du fleuve Niger : méthodes expérimentales et modélisation ; Ph.D. Thesis ; Université Joseph Fourier : Grenoble, France, 440 p.
- Amogu O., Descroix L., Yéro K.S., Le Breton E., Mamadou I., Ali A., Vischel T., Bader J.-C., Moussa I.B., Gautier E., Boubkraoui S., Belleudy P., 2010.
Increasing River Flows in the Sahel? *Water*, 2 (2):170-199.
- Amogu, O. Esteves, M., Descroix, L., Souley Yéro, K., Rajot, J-L., Malam Abdou, M., Boubkraoui, S., Lapetite, JM., Dessay, N., Zin, I., Bachir A., Bouzou Moussa, I., Le Breton, E., Mamadou, I., 2012.
Runoff evolution according to land use change in a small Sahelian catchment. Soumis à *Hydrological Sciences Journal*.
- Anyamba, A. ; Tucker, C.J., 2005.
Analysis of Sahelian vegetation dynamics using NOAA AVHRR NDVI data from 1981-2003. *Journal of Arid Environments*, 63 (3), 596-614.

La GMV. Capitalisation des recherches et valorisation des savoirs locaux

- Ardoin-Bardin, S., Dezetter, A., Servat, E., Paturol, J.E., Mahé, G., Niel, H., Dieulin, C., 2009. Using general circulation model outputs to assess impacts of climate change on runoff for large hydrological catchments in West Africa. *Hydrological Sciences Journal*, 54 (1), 77-89.
- Arndt W., 1965. The nature of the mechanical impedance to seedlings by soil surface seals. *Aust J Soil Res* 3 : 44-54.
- Ben Mohamed, A., N. van Duivenbooden, and S. Abdoussallam. 2002. "Impact of Climate Change on Agricultural Production in the Sahel - Part 1. Methodological Approach and Case Study for Millet in Niger," *Climatic Change*, Vol. 54, No. 3, August, pp. 327-348.
- Block, P., 2011. Tailoring seasonal climate forecasts for hydropower operations, *Hydrology and Earth System Sciences* 15: 1355-1368.
- Boiffin J., 1984. La dégradation structurale des couches superficielles du sol sous l'action des pluies. Thèse de doctorat. Paris : INAPG, 1984 ; 320 p.
- Boserup, E., 1965. *Évolution agraire et pression démographique*, trad. française de 1970, 224 p., coll. Nouvelle bibliothèque scientifique, Flammarion. Edition originale en anglais : *The Conditions of Agricultural Growth. The Economics of Agriculture under Population Pressure*. 124 pp., London and New York, 1965.
- Brabant, P. et Gavaud, M., 1985. Les sols et les ressources en terres du Nord Cameroun. Notices et Cartes, ORSTOM, 285 p.
- Canarache A., 1965. Les facteurs de la résistance mécanique des sols et les méthodes utilisées pour les étudier. *Sci. Soil* 2 : 89-107.
- Casenave, A. et Valentin, C., 1989. Les états de surface de la région sahélienne ; influence sur l'infiltration. Orstom Ed, coll. Didactiques, Paris, 231 p.
- Casenave A, Valentin C., 1992. A runoff capability classification system based on surface feature criteria in semiarid areas of West Africa. *J Hydrol* 130 : 231 -49.
- Charney, J.G., 1975. Dynamics of deserts and drought in the Sahel. *QJ RMS*, 101, 193-202.
- Chinen, T., 1999. Recent accelerated gully erosion and its effects in dry savanna. southwest of Niger. In *Human Response to Drastic Changes of Environments in Africa* ; Faculty of Economics, Ryutsu Keizai University publication N°120 : Hirahata, Ryugasaki, Japan, pp. 67-102.
- CRESA, 2006. *Impacts des investissements dans la gestion des ressources naturelles (GRN) au Niger : rapport de synthèse* ; CRESA : Niamey, Niger.
- D'Herbès, J.M. and Valentin, C. Land surface conditions of the Niamey region : ecological and hydrological implications *Journal of Hydrology* 188-189 (1997) 18-42, 1997.
- Demont, M., Jouve, P., Stessens, J. and Tollens, E., 2007. Boserup versus Malthus revisited: Evolution of farming systems in Northern Côte d'Ivoire. *Agricultural Systems*, 93: 215-228.
- Descheemaeker, K., Nyssen, J., Poesen, J., Raes, D., Haile, M., Muys, B., Deckers, S., 2006. Runoff on slopes with restoring vegetation: A case study from the Tigray highlands, Ethiopia. *Journal of Hydrology* 331, 219-241.
- Descroix, L., Gonzalez Barrios, J.L., Viramontes, D., Poulencard, J., Anaya, E., Esteves, M., Estrada, J., 2008. Gully and sheet erosion on subtropical mountainous slopes : Their respective roles and the scale effect. *Catena*, 72 :325-339.
- Descroix, L., Mahé, G., Lebel, T., G., Favreau, G., Galle, S., Gautier, E., Olivry, J-C., Albergel, J., Amogu, O., Cappelacere, B., Dessouassi, R., Diedhiou, A., Le Breton, E., Mamadou, I. Sighomnou, D. 2009. Spatio-Temporal Variability of Hydrological Regimes Around the Boundaries between Sahelian and Sudanian Areas of West Africa : A Synthesis. *J. of Hydrol., AMMA special issue*. 375, 90-102.

- Descroix, L., Genthon, P., Amogu, O., Sighomnou, D., Rajot, J-L., Vauclin, M., 2011. Recent hydrological changes of Sahelian rivers : the case of the 2010 red flood of the Niger River at Niamey. AGU, San Francisco, dec. 2011.
- Descroix, L., Laurent, J-P., Boubkraoui, S., Ibrahim, B., Cappelaere, B., Bousquet, S., G., Mamadou, I., Le Breton, E., Quantin, G., Boulain, N., 2012. Experimental evidence of deep infiltration under flat sandy areas. *Journal of Hydrology* 424-425, 1-15. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.11.019>
- Diarra-Doka, M. & A. Luxereau, 2004.- déboisement-reboisement en pays hausa : évolution des paysages et du rapport à l'arbre. *Annales de l'Université Abdou Moumouni*, NS, Niamey, 139-153
- Di Baldassarre, G., Montanari, A., Lins, H., Koutsoyiannis, D., Brandimarte, L., et Blöschl, G., 2010. Flood fatalities in Africa : From diagnosis to mitigation Geophysical Research Letters, Vol. 37, L22402, doi :10.1029/2010GL045467, 2010
- Diello, P. ; Mahé, G. ; Paturel, J-E. ; Dezetter, A. ; Delclaux, F. ; Servat, E. ; Ouattara, F., 2005. Relations indices de végétation-pluie au Burkina Faso : cas du bassin versant du Nakambé. *Hydrol. Sci. J.* ,50, 207-221.
- Di Vecchia, A. ; Genesio, L. ; Pini, G. ; Sorani, F. ; Tarchiani, V., 2006. Monitoring drylands ecosystems dynamics for sustainable development policies : The Keita experience. *International Scientific Conference on Desertification and Drylands Research Commemorating 50 Years of Drylands Research Tunis*. Tunisia 19 - 21 June 2006.
- Duley FL., 1939. Surface factors affecting the rate of intake of water by soils. *Soil Sci Soc Am Pro* ; 4 : 60-4.
- Dupriez, H. et De Leener, P., 1990. Les chemins de l'eau. Ruissellement, irrigation, drainage. Manuel tropical. Terre et vie - CTA - L'Harmattan - ENDA Editions - Nivelles - Wageningen - Paris - Dakar - 1990 ; ISBN : 287105009X ; 380 p.
- Ellison WD. 1947. Soil erosion. *Soil Sci Soc Am Pro*. 12 :4 79-84.
- Escourrou, G., 1981. *Climat et Environnement*. Masson, Paris, 190 p.
- FAO-CILSS, 2008. http://www.fao.org/nr/clim/docs/clim_080901_fr.pdf
- Fensholt, R. & Rasmussen, K. Analysis of trends in the Sahelian 'rain-use efficiency' using GIMMS NDVI, RFE and GPCP rainfall data. *Remote Sensing of Environment* 115, 438-451 2011.
- Floret C, Pontanier R, Serpantié G., 1993. La jachère en Afrique Tropicale. Dossier MAB 16. Paris : UNESCO, 86 p.
- Garba, I., 2010. Agrhyment engineer pan West African School of Agronomics, Hydrology and Meteorology, Niamey, Niger. Personal communication.
- Gardelle, J., Hiernaux, P., Kergoat, L. and Grippa, M., 2010. Less rain, more water in ponds : a remote sensing study of the dynamics of surface waters from 1950 to present in pastoral Sahel. (Gourma region, Mali) *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 14, 309-324.
- GIEC-IPCC, 2011: http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_fr.pdf
- Govaerts, Y.M. & Lattanzio, A. Estimation of surface albedo increase during the eighties Sahel drought from Meteosat observations. *Global and Planetary Change* 64, 139-145 (2008).
- Guengant, J-P., Banoïn, M., 2003. Dynamique des populations, disponibilités en terres et adaptation des régimes fonciers : le Niger. Pub. FAO-CICRED, 142 p.
- Hadas A, Frenkel H., 1982. Infiltration as affected by long-term use of sodic-saline water for irrigation. *Soil Sci Soc Am J.* 2 : 89-107.
- Hardin, G., 1968. The Tragedy of the Commons. *Science* (162). 3859, 1243 – 1248.
- Hauchart, V., 2008. Culture du coton, pluviosité et dégradation des sols dans le Mouhoun (Burkina Faso).

La GMV. Capitalisation des recherches et valorisation des savoirs locaux

Sécheresse, 19, 95-102.

Haywood M. 1981.

Évolution des terres et de la végétation dans la zone soudano-sahélienne du projet CIPEA au Mali.

Addis-Abeba : CIPEA/ILCA, 187 p.

Hein, L. et De Ritter, N., 2006.

Desertification in the Sahel : a reinterpretation. *Global Change Biology*, 12, 751-758.

Herrmann, S.M. ; Anyamba, A. ;

Tucker, C.J., 2005.

Recent trends in vegetation dynamics in the African Sahel and their relationship to climate. *Global Environmental Change*, 15, 394-404.

Hiernaux, P., Ayantunde, A., Kalilou, A.,

Mougin, E., Gérard, B., Baup, F.,

Grippa, M., Djaby, B., 2009a.

Trends in productivity of crops, fallow and rangelands in Southwest Niger : Impact of land use, management and variable rainfall.

J. Hydrol, 375, 65-77.

Hiernaux, P., Diarra, L., Trichon, V.,

Mougin, E., Soumaguel, N., Baup, F. 2009b.

Woody plant population dynamics in response to climate changes from 1984 to 2006 in Sahel (Gourma, Mali). *Journal of Hydrology, AMMA special issue*, 375, 103-113.

Hountondji, Y.C. ; Ozer, P., Nicolas, J., 2004.

Mise en évidence des zones touchées par la désertification par télédétection à basse résolution au Niger. *Cybergéo : revue européenne de géographie*. 291 <http://hdl.handle.net/2268/3923>

Hulme, M., 1998.

The sensitivity of Sahel rainfall to global warming: implications for scenario analysis of future climate change impact. Water resources Variability in Africa during XXth century (Proceedings of the Abidjan 98 Conference held in Abidjan, Côte d'Ivoire, November 1998, IAHS Publ. n° 252, 429-436.

Hulme, M., 2001.

Climatic perspectives on Sahelian desiccation : 1973-1998. *Global Environment Change* 11, 19-39.

Karambiri, H. ; Ribolzi, O. ; Delhoume, J.P. ;

Ducloux, J. ; Coudrain-Ribstein, A., 2003.

Importance of soil surface characteristics on water erosion in a small grazed sahelian catchment. *Hydrol. Process*, 17, 1495-1507.

Koster, R.D. 2004.

Regions of Strong Coupling Between Soil Moisture and Precipitation. *Science Vol. 305 no. 5687 pp. 1138-1140 DOI : 10.1126/science.1100217*

Larwanou, M., Abdoulaye, M., Reij, C., 2006.

Etude de la régénération naturelle assistée dans la région de Zinder (Niger) ; International Resources Group, USAID : Washington, DC, USA.

Le Barbé, L. and Lebel, T., 1997.

Rainfall climatology of the HAPEX Sahel region during the years 1950-1990. *Journal of Hydrology*, 188-189 : 43-73.

Lebel, T. ; Ali, A. , 2009.

Recent trends in the Central and Western Sahel rainfall regime (1990-2007). *J. Hydrol.*, 375, 90-102.

Leblanc, M., Favreau, G., Massuel, S.,

Tweed, S., Loireau, M., Cappelaere, B., 2008.

Land clearance and hydrological change in the Sahel: SW Niger. *Global and Planetary Change*. 008, 61 (3), p.135-150 [doi:10.1016/j.gloplacha.2007.08.011](https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2007.08.011)

Le Bissonnais Y., 1990.

Experimental study and modelling on soil surface crusting processes. In : Bryan RE, ed. Soil erosion, experiments and models. *Catena suppl.* 17 : 13- 29.

Le-Breton, E. 2005.

Ensemblement des bas-fonds sahélien : étude des transferts sédimentaires au fleuve Niger dans le secteur moyen Niger -Mali ; Niger ; Bénin. Master Thesis in Geomorphology ; Paris 7-Denis-Diderot University, Paris, France.

Leduc, C., Favreau, G. et Shroeter, P., 2001.

Long-term rise in a Sahelian water-table : the Continental Terminal in South West Niger. *Journal of Hydrology*, 243 :43-54.

Liéno, G. ; Mahé, G. ; Olivry, J-C. ;

Naah, E. ; Servat, E. ; Sigha-Nkamdkou, L. ;

Sighomnou, D. ; Ngoupayou, J-N. ;

Ekodeck, G-E. ; Paturel, J-E., 2005.

- Régimes des flux de matières solides en suspension au Cameroun : revue et synthèse à l'échelle des principaux écosystèmes ; diversité climatique et actions anthropiques. *Hydrol. Sci. J.*, 50, 111-123.
- Loireau, M.
Espaces, ressources, usages : spatialisation des interactions dynamiques entre les systèmes écologiques au Sahel nigérien.
PhD Thesis of Geography,
Université Montpellier 3, 410 p, 1998.
- Luxereau A. & B. Roussel, 1997.-
Changements écologiques et sociaux au Niger. Etudes africaines.
Ed. L'Harmattan, Paris, 239 p.
- Mahé, G., Leduc, C., Amani, A., Paturel, J-E. Girard, S., Servat, E., Dezetter, A. 2003, Augmentation récente du ruissellement de surface en région soudano-sahélienne et impact sur les ressources en eau.
In *Hydrology of the Mediterranean and Semi-Arid Regions, proceedings of an international symposium. Montpellier (France), 2003/04/1-4*, Servat E., Najem W., Leduc C., Shakeel A. (Ed.), Wallingford, UK, IAHS, 2003, publication n° 278, p. 215-222.
- Mahé G., Paturel J.E., Servat E., Conway D., Dezetter A., 2005.
Impact of land use change on soil water holding capacity and river modelling of the Nakambe River in Burkina-Faso.
Journal of Hydrology, 300, 33-43.
- Mahé, G.
Surface/groundwater interactions in the Bani and Nakambe rivers, tributaries of the Niger and Volta basins, West Africa.
Hydrol. Sci. J. 54, 704-712 (2009).
- Mahé G., Paturel J.E., 2009.
1896-2006 sahelian annual rainfall variability and runoff increase of sahelian rivers.
C.R. Geosciences, 341, 538-546.
- Mahé, G., Lienou, G., Bamba, F., Paturel, J-E., Adeaga, O., Descroix, L., Mariko, A., Olivry, J-C., Sangaré, S., Ogilvie, A., Clanet, J-C., 2011.
Le fleuve Niger et le changement climatique au cours des 100 dernières années.
Hydro-climatology variability and change Proceedings of symposium held during IUGG 2011, Melbourne, Australia ;
IAHS pub. n° 344, 131-137.
- Mainguet, M., Canon-Cossus, L., Chemin, M.C., 1979.
Dégradation dans les régions centrales de la République du Niger : degré de responsabilité de la nature du milieu, de la dynamique externe et de la mise en valeur par l'homme.
Trav. de l'Institut de Géographie de Reims, 4039-40 : 61-73.
- Malthus, T., 1798.
An essay of the principle of population.
Printed for J. Johnson, in St Paul's Church-Yard, London.
- Mamadou, I., 2012.
La dynamique accélérée des roris de la région de Niamey et ses conséquences sur l'ensablement du fleuve Niger.
Thèse de Doctorat de Géographie, Université Paris 1-Université de Niamey, 320 p.
- McIntyre DS., 1958.
Soil splash and the formation of surface crusts by raindrop impact.
Soil Sci 85 : 261 -6.
- Morin J, Benyamini Y, Michaeli A., 1981.
The effect of raindrop impact on the dynamics of soil surface crusting and water movement in the profile.
J Hydrol 52 : 321 -35.
- Mougin, E., 2009.
Vegetation dynamics over West-Africa during AMMA. Communication à la 3e Conférence Internationale AMMA (Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine), Ouagadougou, juillet 2009.
- Nyssen, J., Mitiku Haile, Moeyersons, J., Poesen, J., Deckers, J., 2000.
Soil and water conservation in Tigray (Northern Ethiopia) : the traditional daget technique and its integration with introduced techniques.
Land Degrad. Dev. 11 (3), 199-208.
- Nyssen, J., Poesen, J., Moeyersons, J., Deckers, J., Mitiku Haile, Lang, A., 2004.
Human impact on the environment in the Ethiopian and Eritrean Highlands—a state of the art.
Earth Sci. Rev. 64 (3-4), 273-320.

La GMV. Capitalisation des recherches et valorisation des savoirs locaux

- Ottlé, C., C. André, M. Zribi, S. Saux-Picart, R. Lacaze, N. Boulain, B. Cappelaere, J.L. Rajot, L. Descroix, Land cover evolution over the Niger Supersite between 1986 and 2005 from SPOT-HRV data, 2nd International AMMA Conference, Karlsruhe, 26-30 November 2007.
- Prince, S.D., Brown de Colstoun, E., Kravitz, L., 1998. Evidence from rain-use efficiencies does not indicate extensive Sahelian desertification. *Global Change Biology*, 4, 359-374.
- Prince, S.D., Wessels, K., Tucker, C.J., et Nicholson, S.E., 2007. Desertification in the Sahel : a reinterpretation of a reinterpretation. *Global Change Biology*, 13, 1308-1313.
- Rasmussen, K., Bjarne, F., Madsen, J-E., 2001. Desertification in reverse ? Observations from northern Burkina Faso. *Global Environmental Change*, 11, 271-282.
- Reij, C., Tappan, G., Belemvire, A., 2005. Changing land management practices and vegetation on the Central Plateau of Burkina Faso (1968-2002). *Journal of Arid Environments*, 63, 642-659.
- Reij, C. ; Tappan, G. ; Smale, M. , 2009. *Agroenvironmental Transformation in the Sahel, Another Kind of "Green Revolution" ; IFPRI Discussion Paper 00914, 2020 vision initiative ; IFPRI Pub, Washington, the USA.*
- Ribolzi, O., Hermida, M., Karambiri, H., Delhoume, J-P., Thiombiano, L., 2006. Effects of aeolian processes on water infiltration in sandy Sahelian rangeland in Burkina Faso. *Catena*, 67 (3) 145-154
- Ruelland, D., Tribotte, A., Puech, C., Dieulin, C. Comparison of methods for LUCC monitoring over 50 years from aerial photographs and satellite images in a Sahelian catchment. *International Journal of Remote Sensing*, 32 (6), 1747-1777, 2011.
- Souley Yéro, K., 2008. L'évolution de l'occupation des sols à l'échelle des bassins versants de Wankama et Tondikiborou : Quelles conséquences sur les débits et l'évapotranspiration réelle (ETR). Mémoire de DEA, Université Abdou Moumouni de Niamey, 124 p.
- Tackett JL, Pearson RW., 1965. Some characteristics of soil crust formed by simulated rainfall. *Soil Sci* 9 9 : 407-13.
- Taylor, C., et Lebel, T., 1998. Observational Evidence of Persistent Convective-Scale Rainfall Patterns. *Mon. Weath. Rev.*, 126, 1597-1607.
- Taylor, C., Gounou, A., Guichard, F., Harris, P.P., Ellis, R.J., Couvreur, F. et De Kauwe, M., 2011. Frequency of Sahelian storm initiation enhanced over mesoscale soil-moisture patterns. *Nature Geoscience Letters*, DOI : 10 :1038/NNGEO1173.
- Tiffen, M., Mortimore, M., and Gichuki, F., 1994. *More people, less erosion : Environmental recovery in Kenya*. John Wiley & Sons, London, 311 p.
- Tschakert, P., Sagoe, R., Ofori-Darko, G. & Codjoe, S.M. Floods in the Sahel : an analysis of anomalies, memory, and participatory learning. *Climatic Change* 103, 471-502 (2010).
- Valentin C. 1981. Organisations pelliculaires superficielles de quelques sols de région sub-désertique (Agadez-Niger). Dynamique de formation et conséquences sur l'économie en eau. Thèse de 3^{ème} cycle. Université Paris 7, 259 p.
- Walraevens, K., Vandecasteele, I., Martens, K., Nyssen, J., Moeyersons, J., Gebreyohannes, T., De Smedt, F., Poesen, J., Deckers, J. et Van camp, M., 2009. Groundwater recharge and flow in a small mountain catchment in northern Ethiopia, *Hydrological Sciences Journal*, 54:4, 739-753.



La Grande Muraille Verte

*Capitalisation des recherches
et valorisation des savoirs locaux*



Coordination scientifique
Professeur Abdoulaye DIA
Docteur Robin DUPONNOIS

La Grande Muraille Verte

Capitalisation des recherches
et valorisation de savoirs locaux

Coordination scientifique

Professeur Abdoulaye DIA
Docteur Robin DUPONNOIS

IRD
INSTITUT DE RECHERCHE POUR LE DÉVELOPPEMENT

Coordination
Corinne Lavagne

Mise en page
Alain Doudiès Conseil

Maquette de couverture
Michelle Saint-Léger

Maquette intérieure
Pierre Lopez

La loi du 1^{er} juillet 1992 (code de la propriété intellectuelle, première partie) n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article L. 122-5, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans le but d'exemple ou d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause, est illicite » (alinéa 1^{er} de l'article L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon passible des peines prévues au titre III de la loi précitée.

© IRD, 2012
ISBN : 978-2-7099-1738-4