

LE BASSIN VERSANT DU MAYO-TSANAGA (NORD CAMEROUN) : UN BASSIN VERSANT EXPÉRIMENTAL POUR UNE COMPRÉHENSION DES RELATIONS HOMME/MILIEU

Louise Leroux^{1,2}, Johan Oszwald^{1,3,4}, Benjamin Ngounou Ngatcha⁵, David Sebag^{1,6}, Marie-Josée Penven³,
Eric Servat¹

1 : HydroSciences Montpellier, UMR 5569 CNRS/IRD. Université de Montpellier 2, Place Eugène Bataillon 34095 Montpellier Cedex 05
eric.servat@um2.fr

2 : CIRAD, UMR TETIS, Maison de la Télédétection, 500 rue François Breton, 34093, Montpellier
louise.leroux@teledetection.fr

3 : LETG-Rennes COSTEL, UMR 6554 CNRS. Université Rennes 2, Place Henri le Moal, 35000, Rennes
johan.oszwald@uhb.fr ; marie-josee.penven@uhb.fr

4 : ECODIV, EA 1293. Université de Rouen, Place Emile Blondel, F-76821, Mont-Saint-Aignan

5 : Université de Ngaoundéré, Faculté des Sciences, Département des Sciences de la Terre, BP 454 Ngaoundéré, Cameroun
Ngatchangou@yahoo.fr

6 : M2C, UMR 6143 CNRS. Université de Rouen, Place Emile Blondel, 76821, Mont-Saint-Aignan
david.sebag@univ-rouen.fr

Résumé

Depuis les trente dernières années, de nombreuses études scientifiques s'intéressent aux dynamiques hydrologiques relevées dans le bassin versant du lac Tchad. En effet, ce bassin versant a été, et est encore, une zone emblématique des impacts du changement climatique sur la ressource en eau en région sub-saharienne. La gestion de cette ressource est d'autant plus complexe que ce bassin versant se partage entre le Tchad, le Niger, le Nigéria et le Cameroun. Ce dernier, bien que important pour le fonctionnement hydrique du lac Tchad, est encore trop peu étudié par la communauté scientifique. Nous nous proposons donc de travailler sur le bassin versant du Mayo-Tsanaga, situé au Nord Cameroun et connecté au fleuve Logone, affluent du fleuve Chari et principal contributeur au bilan hydrique du lac Tchad. Quelques chercheurs de l'ORSTOM (Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer) ont déjà travaillé sur ce bassin versant dans les années 1970, mais très peu de travaux ont été mis en place ces vingt-cinq dernières années sur celui-ci. De ce fait, il est primordial aujourd'hui, afin de pouvoir relancer une étude du bassin versant du Mayo-Tsanaga par instrumentation, de remettre à jour nos connaissances géomorphologiques, hydrographiques et d'occupation du sol. Pour ce faire, nous avons recours à des données récentes et plus précises (MNT Aster, images satellites Landsat TM et ETM+) afin de suivre les dynamiques Hommes / milieux ayant cours depuis les 25 dernières années. Ce travail montre une mutation et une organisation complexe des pratiques, en relation notamment avec la géomorphologie et la pédologie du bassin versant du Mayo-Tsanaga.

Mots clés : Nord-Cameroun, Télédétection, landsat, Modèle Numérique de Terrain, Occupation du sol, Bassin versant.

Abstract

Since the last thirty years, many scientific studies take an interest in hydrological dynamics that taking place in the lake Chad catchment. Indeed, this catchment has been and still is an area representative of the impacts of climate change on water resources in sub-Saharan region. Management of this resource is especially complex because this catchment is divided between Chad, Niger, Nigeria and Cameroon. despite the fact that this basin is playing an important role in the functioning hydric of lake Chad, it is still too little studied by the scientific community. We propose to work on Mayo-Tsanaga catchment, located in North Cameroon and connected to the Logone River, a tributary of the Chari River and main contributor to the water balance of lake Chad. Some researchers of the ORSTOM (Office of Scientific and Technical Research Overseas) have worked on this catchment in the 1970s, but very little work has been put in place these last twenty-five years. Therefore, in order to revive a study about Mayo-Tsanaga catchment by instrumentation, it appears essential to update our knowledge about geomorphology, hydrography and land-use. To do this, we use recent and more accurate data (DEM Aster and satellite images Landsat TM and ETM+) that allow to monitor the dynamics Men / Background during the past 25 years. This work shows a changing and a complex organization of practices, particularly relating to the geomorphology and soils of Mayo-Tsanaga catchment.

Keywords : North Cameroon, Remote sensing, landat, Digital Elevation Model, land-use, Catchment.

1. Introduction

Depuis la fin des années 60, l'Afrique subsaharienne subit l'une des fluctuations climatiques les plus spectaculaires du XX^{ème} siècle, marqué par un déficit pluviométrique de l'ordre de 20 à 50% dans la zone sahélienne (L'Hôte et al., 2002; Lebel et al., 2009). Parallèlement, cette région a connu une des croissances démographiques les plus marquées au monde (Raynaut, 2001) associée à d'intenses flux migratoires, notamment un exode rural massif jusque dans les années 80-90. Cette combinaison de fluctuations climatiques et démographiques a entraîné des changements drastiques des environnements (Loireau, 1998; Herrmann et al., 2005). Dans le Sud-Ouest du Niger, la réponse hydrologique des bassins versants à ces changements environnementaux a été abondamment étudiée (Cappelaere et al., 2009; Favreau et al., 2009). Toutes ces études ont montré que ces changements s'accompagnent d'une augmentation du ruissellement qui entraîne une remontée de la nappe phréatique dans un contexte de sécheresse (Leduc et al., 1997; Leblanc et al., 2008) et peuvent s'expliquer par des changements d'occupation des sols et des états de surface (i.e., encroûtement), dans ce contexte de mutations accélérées, il semble nécessaire de multiplier les études locales afin de développer des modèles permettant de prévoir l'évolution de la ressource en eau et qui soient adaptés à la diversité des situations géomorphologiques, bioclimatiques et démographiques rencontrées. Si de nombreuses études sont engagées en Afrique de l'Ouest (Sénégal, Mali, Burkina Faso, Bénin), trop peu portent sur le bassin hydrologique du lac Tchad qui abrite pourtant une population très nombreuse et dépendante d'une gestion partagée des ressources en eau.

Au Nord Cameroun (Figure 1), de nombreux aménagements hydrauliques (barrages, retenues villageoises, puits, forages) ont été mis en place à partir de la fin des années 1970 pour répondre aux besoins de l'agriculture et garantir un approvisionnement en eau régulier toute l'année aux populations (Iyebey-Mandjek et Seignobos, 2000). Or, ces infrastructures favorisent l'implantation et l'augmentation des activités humaines, accentuant ainsi les modifications de l'occupation du sol et des états de surfaces (Mahe, 2006). En effet, cette pression anthropique se traduit par une extension des terres consacrées aux usages agricoles et une augmentation de la déforestation dans les espaces aval des bassins versants. En revanche, en raison d'un exode rural plus ou moins prononcé, les espaces amont ont connu des phénomènes de déprise agricole entraînant une reforestation progressive. Ces phénomènes ont pour conséquence de modifier le bilan hydrique du bassin à travers les capacités de ruissellement des surfaces et d'infiltration des sols. Cette modification des territoires hydrologiques remet alors en question le partage de la ressource en eau à l'échelle des bassins versants. Bien que la question de l'allocation

de la ressource en eau soit particulièrement aiguë dans la région, aucune solution n'a été jusqu'ici proposée pour établir des modèles de gestion intégrée à l'échelle des bassins. C'est pour contribuer à cet effort que des programmes de recherche internationaux ont été mis en place pour faire du bassin versant du Mayo Tsanaga un bassin versant pilote représentatif des situations rencontrées au Nord Cameroun.

Le Mayo-Tsanaga est un cours d'eau temporaire qui draine un bassin versant de 1500 km². Ce bassin versant a fait l'objet de nombreux suivis depuis les années 1970 (Nouvelot, 1973; Olivry et Hoorelbeck, 1975; Lienou et al., 2005, 2009). Cependant, ces travaux sont restés ponctuels. Il convient de réactualiser l'ensemble de nos connaissances, notamment au vu des dynamiques récentes. Cette étude vise à affiner nos connaissances sur le bassin et son fonctionnement, et ce en vue de la mise en place d'une modélisation des flux hydriques. A partir d'un jeu de données constitué initialement d'images satellites et d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT), cet article vise à répondre à deux objectifs :

1. Le bilan hydrique du bassin est en partie conditionné par le relief, particulièrement quand celui-ci est accidenté (Lienou et al., 2005). Le premier objectif de ce travail est de réaliser étude géomorphologique et hydrographique du bassin, notamment pour montrer l'influence de la distribution des reliefs de l'amont vers l'aval et leur influence sur le possible fonctionnement du système du Mayo Tsanaga. Il doit permettre l'identification de compartiments géomorphologiques qui seront traités indépendamment par les modèles hydrologiques ;
2. Les changements d'utilisation des sols ont aussi un impact important sur les cycles hydrologiques, sur la génération des écoulements (Casenave et Valentin, 1989; Buytaert et al., 2006) et sur la disponibilité en eau (Buytaert et al., 2006). Le second objectif développé dans cet article est de mettre en place une cartographie de l'occupation du sol sur le bassin versant du Mayo-Tsanaga sur plusieurs dates.

Le présent travail a été fait dans l'objectif d'une réactualisation de nos connaissances sur un bassin versant étudié depuis de nombreuses années. Les données utilisées sont aujourd'hui beaucoup plus précises que celles employées lors des premières études et obtenues avec des techniques différentes. Par conséquent, les paramètres morphométriques trouvés ici diffèrent des précédents. Cette étude a été effectuée à partir d'un Modèle Numérique de Terrain qui est une donnée pixellaire. De ce fait, les irrégularités observées peuvent être plus grandes que celles issues des cartes topographiques des années 1970. De plus, le MNT (ASTER GDEM) peut parfois être bruité. Pour pallier à ce problème, les auteurs ont veillé à compléter ou corriger le réseau hydrographique obtenu en projetant leurs résultats sur des images satellites à haute résolution spatiale, et ont vérifié

que des bassins versants voisins n'étaient pas intégrés dans l'analyse. Ce travail ne remet donc pas en cause les études faites précédemment, mais permet de préciser et améliorer nos connaissances sur ce bassin versant.

2. Matériel et méthodes

2.1. Présentation du site d'étude

Le bassin versant du Mayo-Tsanaga a été perçu dès les années 1960 comme étant un site remarquable. En effet, ce bassin s'étend des Monts Mandara à l'Ouest et s'étend jusqu'aux Yaérés vers l'Est, faisant ainsi la jonction avec la plaine alluviale du Logone et, plus largement avec le bassin hydrologique du lac Tchad. En outre, ce bassin particulièrement sensible aux fluctuations climatiques est anciennement anthropisé et connaît des dynamiques récentes importantes puisqu'il abrite la ville de Maroua, cinquième ville du Cameroun avec près de 400 000 habitants. Ces caractéristiques géomorphologiques, bioclimatiques et démographiques ont justifié plusieurs études menées dès les années 1960 (Nouvelot, 1973; Olivry et Hoorelbeck, 1975; Lienou et al., 2009). Celles-ci ont surtout porté sur les flux hydriques et sédimentaires et sur les conséquences de la géomorphologie contrastée du bassin versant du Mayo-Tsanaga (Nouvelot, 1973). A l'Ouest, la zone amont du bassin se caractérise par un relief montagneux, avec des pics culminant jusqu'à 1392 mètres et des pentes abruptes (entre 5% et 10%). la zone de piémont se distingue par des pentes moins marquées (entre 2% et 5%) et par un relief tabulaire associant des glacis-terrasses à des plaines alluviales d'où émergent quelques "inselbergs". A l'Est, la zone aval une vaste plaine alluviale, au relief plat et monotone (Nouvelot, 1973; Olivry, 1986), avec de très faibles pentes (< à 2%). Enfin, le réseau hydrographique est constitué de cours d'eau temporaires, appelés "mayos" en fulfulde (Ngounou Ngatcha et al., 2007), dont le Mayo-Tsanaga et son affluent principal le Mayo-Kalliao (Figure 1).

Brabant et Gavaud (1985) ont également mené une analyse détaillée sur la pédologie du bassin. la zone amont se caractérise par la présence de sols nus et de lithosols peu évolués. les sols du piémont sont majoritairement dérivés de matériaux transportés (alluvions, pédiments). Enfin, la partie aval, qui abrite des formations sablo-argileuses, est caractérisée par des vertisols (sols argileux noirs appelés "karals") et des planosols hydromorphes (Figure 2).

Du point de vue de la végétation, la région est marquée par une anthropisation très ancienne (Seghieri, 1990) se traduisant par la disparition des formations primaires. Ainsi, les formations végétales étudiées par (Letouzey, 1985) se trouvent aujourd'hui fortement modifiées par une pression anthropique croissante (Thebe, 1987; Barbier et al., 2002) et doivent être réactualisées

(Lienou et al., 2009). Toutefois, les grandes organisations végétales sont toujours présentes car seuls leur localisation et leur état de conservation se trouvent modifiés. Ainsi, la partie amont du bassin abrite une végétation soudanienne d'altitude fortement dégradée par les activités humaines (Fotius, 2000). Cependant, depuis les années 1990, des mouvements des populations montagnardes vers la plaine sont observés en raison des difficultés techniques et financières pour maintenir une agriculture rentable face au développement des cultures spéculatives dans les espaces de la plaine (Seghieri, 1990). de ce fait, on observe une reprise progressive de la végétation naturelle de cet espace amont du bassin. A l'aval, les zones de plaine sont essentiellement occupées par des steppes à épineux et des prairies inondables, plus communément appelées "yaérés" (Letouzey, 1985; Djoufack et al., 2009). Avec l'augmentation de la population, la végétation ligneuse est quasiment éradiquée des espaces propices au développement des cultures (Fotius, 2000). le piémont et l'aval du bassin sont ainsi devenus des espaces de culture, largement dominés par la production de Sorgho et de Mil (Ngounou Ngatcha et al., 2007).

Situé dans la province de l'Extrême Nord Cameroun, l'une des plus peuplées du pays (Seignobos, 1982), le bassin versant du Mayo-Tsanaga est donc très fortement anthropisé. Historiquement, la répartition des peuplements y est très inégale, avec notamment les densités les plus fortes dans les montagnes à l'amont : jusqu'à 200 habitants/km² dans les massifs au Nord de Mokolo. Cependant, le développement d'un réseau de pistes depuis les années 1980 a contribué à la concentration des populations autour des grands axes (Seignobos, 2000). Les pôles urbains (Maroua ou Bogo) sont maintenant caractérisés par un habitat dense qui s'oppose à un habitat dispersé sur le reste du bassin versant, regroupé en quelques dizaines d'habitations ou "saré" (regroupement de cases (Merle et Gautier, 2003)). Néanmoins, les regroupements villageois sont beaucoup plus vastes à l'aval qu'à l'amont. de plus, comme le souligne Seignobos (1982), l'organisation et l'architecture des villages dépend à la fois des différentes ethnies, mais également de la géomorphologie du bassin.

2.2. Données et méthodes

La pluviométrie dans le bassin versant du Mayo-Tsanaga est fortement contrôlée par le gradient altitudinal et varie de 1200 mm à l'amont (altitude moyenne de l'ordre de 900 m) à 550 mm à l'aval (environ 300 m d'altitude), ce qui correspond à un contexte soudano-sahélien. Il en résulte une très grande hétérogénéité spatiale des éléments paysagers, aussi bien sur le plan horizontal (mosaïques d'éléments paysagers hétérogènes) que sur le plan vertical (présence de plusieurs niveaux de strate). A cette hétérogénéité naturelle s'ajoutent les conséquences des interactions Homme/Milieus notables du fait de l'anthropisation

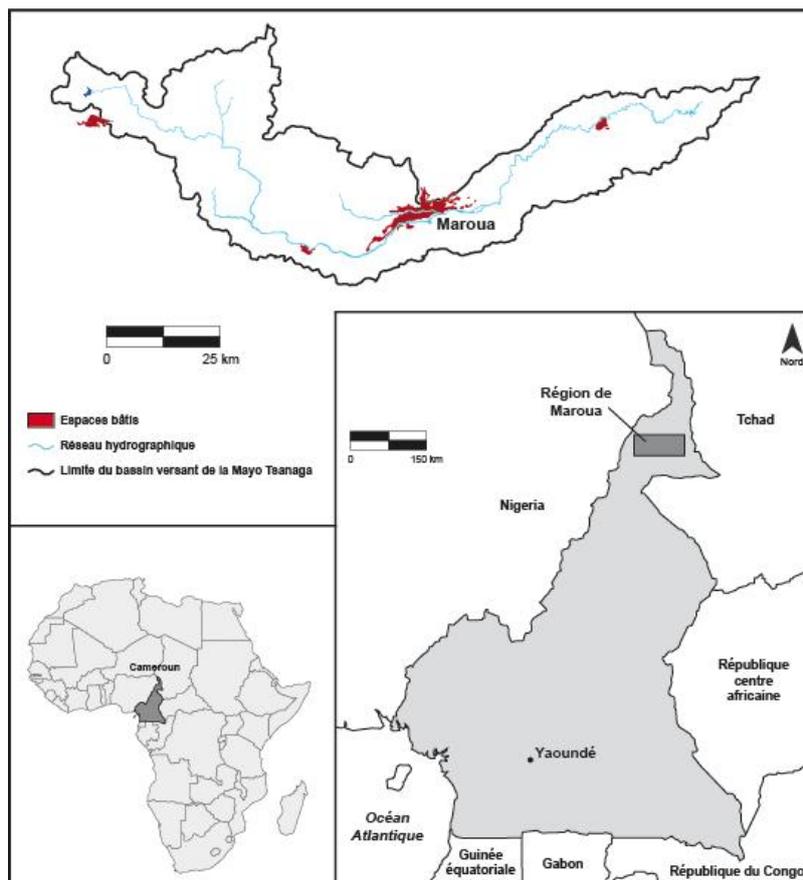


FIGURE 1 : Carte de localisation du bassin versant du Mayo-Tsanaga (Nord-Cameroun).

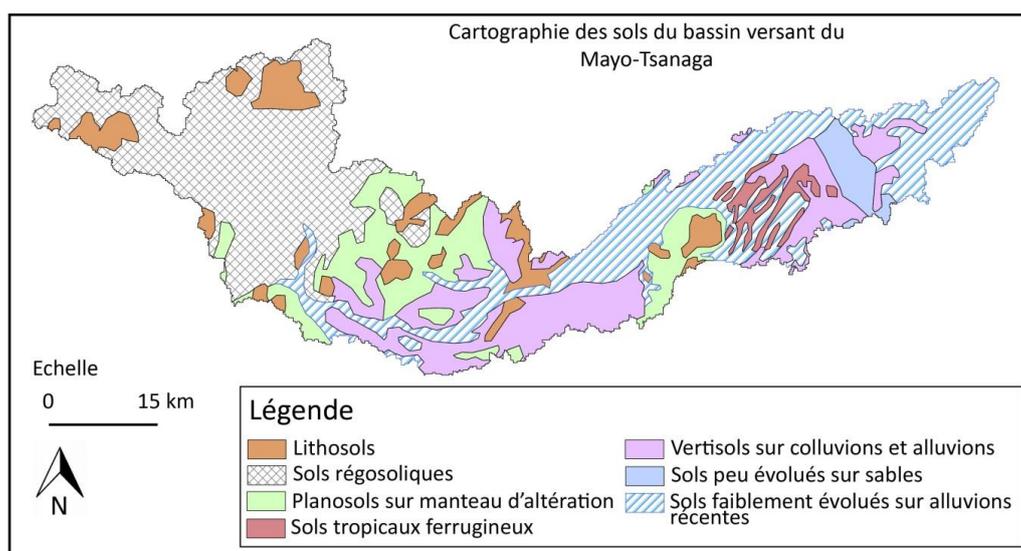


FIGURE 2 : Cartographie simplifiée des sols du bassin versant du Mayo-Tsanaga, d'après les travaux de Brabant et Gavaud (1985).



FIGURE 3 : Saré du bassin versant du Mayo-Tsanaga qui regroupe une dizaine d'habitations (Oszwald et al., 2011b).

ancienne du bassin qui complexifient davantage l'organisation du paysage.

Afin de faciliter l'étude du site, une campagne de terrain menée au cours du mois de novembre 2011 a permis l'identification de 12 classes d'occupation du sol. le mois de novembre marquant la transition entre la fin de la saison des pluies et le début de la saison sèche, c'est donc une période pendant laquelle le développement des couverts végétaux est encore important (Saar, 2009) et permet de ne pas subir une dégradation de l'image satellite par la présence de nuages ou de nébulosité. Au cours de cette campagne près de 1000 points GPS (Garmin 60 Cx) ont été relevés, associés à des fiches renseignant les différentes classes d'occupation du sol. Ce travail de terrain permet d'interpréter et de valider les données et traitements satellitaires.

Dans un contexte fortement anthropisé et marqué par une complexité et une diversité de l'organisation des types d'occupation du sol, le recours à la télédétection permet de créer une information spatiale homogène sur l'ensemble du bassin versant, et ce pour plusieurs dates d'acquisition satellitaire. les données satellitaires utilisées sont issues des plateformes Landsat TM 5 pour l'année 1987 (2 novembre) et Landsat ETM+ 7 pour l'année 2006 (20 novembre). Ces données sont gratuites et ont été téléchargées sur le site du Global Land Cover Facility (<http://glcf.umd.edu/data/>). la résolution spatiale de ces plateformes permet de suivre des surfaces de 900 m², ce qui rend possible la discrimination d'éléments paysagers cohérents. de plus, la taille des pixels est suffisante pour faire une réactualisation et permet de prendre en considération les particularités du terrain. les images ont toutes les deux été acquises en début de période sèche, au mois de novembre, afin de garantir une cohérence de la réponse spectrale des différents éléments, mais également avec les points d'échantillonnage de la campagne de terrain. Cette date permet aussi de garantir l'obtention d'images sans nuage, ce qui limite les biais atmosphériques. Enfin, ce sont des

données présentant une forte résolution radiométrique, ce qui permet d'obtenir de nombreuses informations spectrales permettant une identification plus fine des différents types d'occupation du sol (Tableau 1).

Pour chaque date, les différentes images ont été mosaïquées, corrigées radiométriquement par le logiciel 5S (Kergomard, 2000) et géométriquement à partir de points de calage émanant de la campagne de terrain (croisement de route, ponts). les connaissances de terrain acquises durant la campagne de novembre 2011 ont permis de réaliser la classification supervisée de l'image de 2006, avec l'application de l'algorithme du maximum de vraisemblance (Robin, 2002). Cet algorithme, basé sur un algorithme bayésien, est bien adapté à une classification supervisée car il permet de prendre en considération la probabilité d'un pixel d'appartenir à une classe selon les caractéristiques d'occupation du sol relevées in situ. dans un second temps, par reconnaissance spectrale des types d'occupation du sol, la cartographie de 1987 a pu être mise en place, avec toutefois une certaine marge d'erreur due à des changements de plate-forme satellite (Oszwald et al., 2011a). les classifications ont permis la cartographie de 12 classes d'occupation du sol pour lesquelles un test de séparabilité a été effectué (test de Jeffries-Matusita). Celui-ci a montré une séparabilité suffisante entre nos classes, avec une séparabilité la plus faible observée entre les steppes herbacées et les steppes herbacées enrichies (séparabilité de 1,90 sur une échelle de 0 à 2).

De plus, la campagne de terrain a permis de constater une organisation différente des couverts végétaux selon les compartiments géomorphologiques considérés (amont, piémont et aval). Ces observations soulignent l'importance de mener une étude géomorphologique du bassin visant à sectoriser les compartiments en question. Ce travail avait été mené en 1973 par Nouvelot à partir de cartes topographiques de l'Afrique centrale au 1/50 000 et au 1/200 000. dans le cadre de ce travail, l'utilisation d'un MNT ASTER à 30 m de résolution spatiale a permis d'affiner et de mettre à jour les résultats

Satellite	Résolution radiométrique [μm]	Bande
Landsat 5 TM [1984]	Bande 1 : 0,45 – 0,52	Bleu
	Bande 2 : 0,52 – 0,60	Vert
	Bande 3 : 0,63 – 0,69	Rouge
	Bande 4 : 0,76 – 0,90	Proche IR
	Bande 5 : 1,55 – 1,75	Moyen IR
	Bande 6 : 10,4 – 12,5	Thermique
	Bande 7 : 2,08 – 2,35	Moyen IR
Landsat 7 ETM+ [1999]	Bande 1 : 0,45 – 0,52	Bleu
	Bande 2 : 0,52 – 0,60	Vert
	Bande 3 : 0,63 – 0,69	Rouge
	Bande 4 : 0,76 – 0,90	Proche IR
	Bande 5 : 1,55 – 1,75	Moyen IR
	Bande 6 : 10,4 – 12,5	Thermique
	Bande 7 : 2,08 – 2,35	Moyen IR
	Bande 8 : 0,52 – 0,92	Panchromatique

TABLE 1 : Description des bandes radiométriques des satellites landsat. IR : Infra-Rouge.

obtenus par Nouvelot (1973). La résolution du MNT permet de faire un lien aisé avec les types d'informations issus de Landsat. Ce MNT gratuit et a été téléchargé sur le site ASTER GDEM (Tachikawa, 2009). dans un premier temps, le réseau hydrographique a été reconstitué par croisement d'informations topographiques (MNT) et d'informations issues de la base de données Google Earth [®] à très haute résolution spatiale sous le logiciel Quantum GIS 1.8. dans un second temps, l'extraction des sous-bassins versants a été effectuée à partir du réseau hydrographique et du MNT. En se basant sur les travaux de Nouvelot (1973), chaque sous-bassin versant a été caractérisé par le calcul de paramètres morphométriques et hydrographiques :

- Paramètres morphométriques : la superficie, le périmètre, les altitudes moyenne, maximale et minimale, la pente moyenne, l'indice de forme (coefficient de Gravelius), la longueur du rectangle équivalent, la largeur du rectangle équivalent, la dénivellée spécifique et l'élongation (Nouvelot, 1973).
- Paramètres hydrographiques : le nombre total de drains, la longueur totale de drains, la densité hydrographique et la densité de drainage (Paget et al., 2008).

Une Analyse en Composantes Principales (ACP) et une Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) ont permis de synthétiser l'ensemble du jeu de données et d'identifier des classes de sous-bassins versants ayant des caractéristiques géomorphologiques équivalentes. le regroupement des sous-bassins versants au sein des classes a été retenu pour les individus pour lesquels la distance mathématique est la plus faible (distance de Ward ; (Oszwald et al., 2011a)).

Enfin, la campagne de terrain a montré que la nature du sol est une donnée nécessaire pour comprendre les dynamiques anthropiques et environnementales en cours. Pour ce faire, nous avons réalisé une cartographie

des sols en nous basant sur la carte réalisée par Brabant et Gavaud (1985). Cette carte a été corrigée géométriquement à l'aide de points remarquables identifiés sur Google Earth [®], ceci afin de pouvoir la compiler dans le même Système d'Information Géographique (SIG) que l'ensemble du projet. Une digitalisation de chaque type de sol a été réalisée sous QGIS. Nous avons fait le choix d'utiliser prioritairement des logiciels et des données gratuites afin d'assurer la reproductibilité du travail par les opérateurs locaux du projet.

3. Résultats

3.1. Réactualisation des caractéristiques géomorphologiques et hydrologiques du bassin versant

Le réseau hydrographique obtenu suite au traitement du MNT et par photo-interprétation a permis l'identification du réseau principal (le Mayo-Tsanaga et son principal affluent le Mayo-Kallio), ainsi que le réseau secondaire (Figure 3). Pour le bassin versant du Mayo-Tsanaga, on peut constater une organisation complexe et différente du réseau hydrographique en fonction de la géomorphologie du bassin. En effet, la partie amont présente un réseau très développé et hiérarchisé et s'écoule au sein de vallées encaissées. En revanche, pour la partie du piémont, le relief étant moins marqué, les cours d'eau sont moins développés et moins encaissés. Enfin, dans la plaine que constitue l'aval du bassin, le cours d'eau est peu développé et peu encaissé, il peut donc méandriser librement.

Le MNT a permis de déterminer les limites exactes de séparation des eaux permettant de délimiter le bassin versant du Mayo-Tsanaga (Figure 2). le Tableau présente une comparaison entre les résultats obtenus par Nouvelot (1973) à l'aide des cartes topographiques au 1/50 000 et au 1/200 000 et ceux obtenus par la présente étude à l'aide du MNT à 30 m de résolution spatiale.

Les limites du bassin obtenues sont plus précises. la superficie et le périmètre sont plus élevés dans cette nouvelle étude. L'exploitation du MNT conduit à prendre en considération plus d'irrégularités (dues à une donnée pixellaire) qu'un simple tracé à la main (Roche, 1963; Bendjoudi et Hubert, 2002). les paramètres dérivés de la superficie et du périmètre sont donc aussi différents de ceux obtenus par Nouvelot (1973), c'est notamment le cas du coefficient de Gravelius. Cette différence vient remettre en question la pertinence quant à l'utilisation d'un tel indicateur puisque celui-ci dépend étroitement de l'échelle d'observation (Bendjoudi et Hubert, 2002). de plus, il n'est pas prouvé que les irrégularités prises en compte dans le calcul du périmètre et de la surface aient une réelle influence sur les écoulements du bassin versant (Roche, 1963; Bendjoudi et Hubert, 2002). Enfin, pour les paramètres d'altitude et pente, une différence est observée toujours en relation avec la différence de précision des sources. de même, le dénivellé spécifique étant dépendant de la superficie du bassin, il est différent

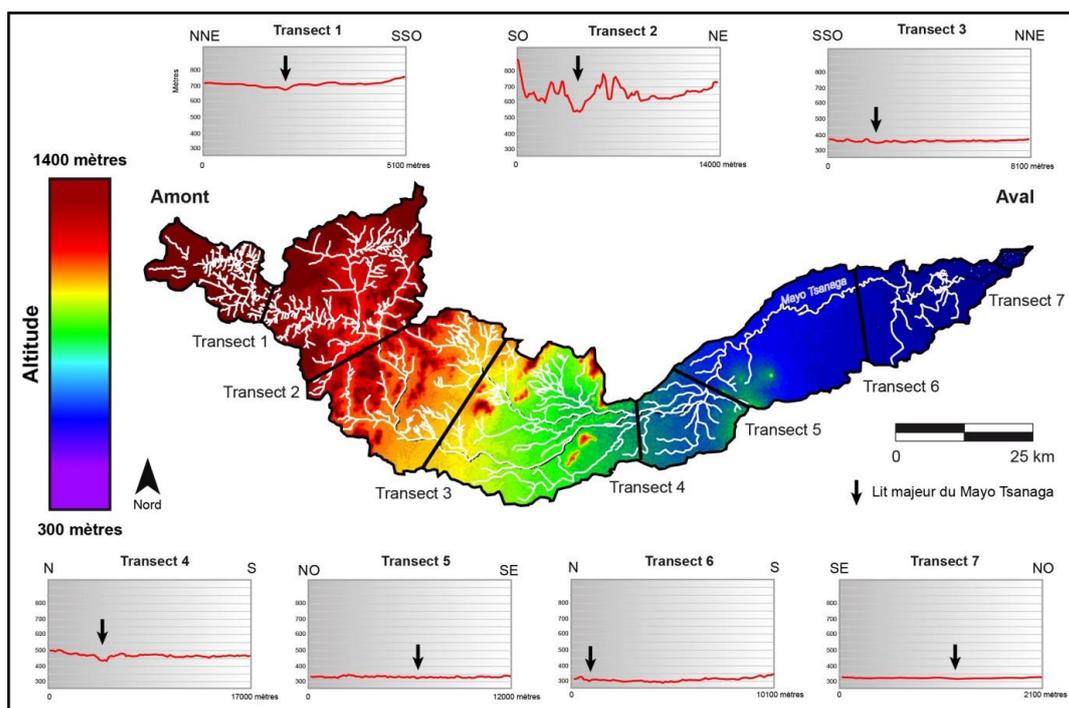


FIGURE 4 : Modèle Numérique de Terrain du bassin versant du Mayo-Tsanaga et diagrammes de huit transects altitudinaux.

Sources	Superficie	Périmètre	Gravelius	Altitude min	Altitude max	Altitude moyenne	Pente moyenne	Longueur du rectangle	Largeur du rectangle	Dénivelée spécifique
Nouvelot (1973)	1535 km ²	266 km	1,91	337 m	1425 m	547 m	3,91%	120,3 km	12,8 km	153 m
MNT	2064 km ²	569 km	3,53	290 m	1390 m	526 m	3,91%	255,9 km	8,7 km	177,2 m

TABLE 2 : Comparaison des paramètres morphométriques obtenus par Nouvelot en 1973 avec les résultats obtenus à l'aide du MNT ASTER à 30 mètres de résolution spatiale.

de celui observé par Nouvelot (1973). L'indice de pente moyenne reste le même (3,91%) ce qui permet de tirer la même observation que l'auteur, à savoir que le bassin présente globalement un relief fort.

Afin d'affiner la caractérisation géomorphologique du bassin versant, nous avons cherché à décrire les sous-bassins versants en fonction des facteurs géomorphologiques et hydrographiques. L'ACP montre que 88% de l'information est contenu dans le premier plan factoriel. la première composante de l'ACP (inertie = 57%) représente des sous-bassins versants qui vont s'opposer essentiellement au regard des variables d'altitude, de pentes et des variables hydrographiques. la seconde composante (inertie = 31%) souligne la différenciation des bassins en fonction de leurs paramètres de forme (Figure 5).

Ainsi, les sous-bassins se distinguent d'abord en fonction de leur position sur le gradient altitudinal et de leurs paramètres hydrographiques, puis de leur forme. la CAH a ensuite permis d'identifier 5 classes de sous-bassins versants (Figure 5). Les classes 1 et 2, correspondent à des bassins d'altitude (en moyenne 700m pour

la classe 2 et 850 pour la classe 1), sur de fortes pentes (pente moyenne > à 5%), petits et compacts (classe 2) ou très grands et étirés (classe 1), possédant un réseau hydrographique particulièrement dense. Ces bassins sont localisés dans la zone amont. les classes 3 et 4 semblent plus caractéristiques du piémont, avec des pentes et des altitudes plus moyennes (environ 400 m) : ce sont des bassins de petite taille (environ 50 km² ; classe 4) ou de taille moyenne (environ 140 km² ; classe 3), étirés et présentant un développement du réseau hydrographique moyen. Enfin, la classe 5 se caractérise par des pentes et altitudes inférieures à la moyenne, des bassins de grande taille (en moyenne 135 km²) et allongés et un réseau hydrographique peu développé. Cette classe est représentative de la partie aval du bassin. Cependant, l'analyse de la cartographie montre que hormis pour la classe 1, correspondant au sous-bassin de tête, la répartition des classes en fonction des compartiments géomorphologiques n'est pas si évidente, essentiellement en raison des particularités du bassin versant. Par exemple, certains individus de la classe 5, normalement représentatifs de la zone aval du bassin versant,

peuvent être localisés dans le piémont, notamment dans les espaces correspondant à des zones de replats et à faible densité du réseau hydrographique. De même, certains individus de la classe 3 sont distribués sur l'ensemble du bassin versant. Ainsi, le sous-bassin situé à l'amont se trouve sur une zone où l'altitude est plus proche de la moyenne de l'ensemble du bassin (560 m contre 526 en moyenne). En revanche, pour le sous-bassin de l'aval, cela s'explique par la proximité du réseau hydrographique principal en moyenne plus élevée que pour l'ensemble de la zone aval. Toutes ces caractéristiques sont alors proches de celles rencontrées au piémont du bassin.

3.2. Classification de l'occupation du sol en 1987 et 2006

La réalisation de cartes et l'analyse diachronique de l'occupation du sol ont pour objectif de rendre compte des grandes tendances d'évolution paysagères observées sur le bassin versant et de réactualiser les connaissances sur la répartition des grandes unités végétales. De plus, ce travail permettra d'appréhender les logiques d'organisation de l'occupation du sol au regard de paramètres structurels naturels et/ou anthropiques. Après confrontation de nos cartographies avec les relevés GPS au sein d'une matrice de confusion, la classification de 2006 présente 96% des pixels correctement classés (avec un indice de Kappa de 0,91 – Figure 6a) et la classification de 1987, 93% des pixels bien classés (avec un indice de Kappa de 0,88 – Figure 6a). L'analyse des cartes montre que les dynamiques de l'occupation des sols sont très contrastées à l'échelle du bassin versant. Ces dynamiques peuvent être scindées en deux trajectoires principales : les trajectoires de dynamiques progressives et les trajectoires de dynamiques régressives. Sur la zone d'étude (Figure b), les espaces ayant connu la progression spatiale la plus importante sont les espaces de cultures (+ 10%), de tissus urbains (+ 9%), de steppes arbustives (+ 9%) et de steppes arborées (+ 8%). Les espaces en recul spatial entre 1987 et 2006 correspondent surtout aux steppes herbacées (- 15%), aux espaces de brûlis (- 10%) et aux cultures sous couverts arborés (- 9%). L'augmentation des espaces de cultures et de tissus urbains est essentiellement imputable à la croissance démographique propre à la région (de l'ordre de 3,7% par an entre 1980 et 2000 (Mathieu et al., 2002)) et aux flux migratoires importants depuis les zones montagneuses vers les espaces urbains et les plaines (Thebe, 1987 ; Seghieri, 1990 ; Barbier et al., 2003). La diminution de la couverture des steppes herbacées est due à plusieurs facteurs conjugués : l'enfrichement de celles-ci dans la zone amont, et leur conversion pour les activités agricoles ou l'érosion. La diminution des espaces de brûlis s'explique essentiellement par une décision politique de l'Etat camerounais. En effet, suite à de nombreuses périodes de sécheresse au cours des années 1980, le gouvernement a décidé en 1990 d'interdire l'utilisation

de la technique du brûlis pour nettoyer les champs et favoriser la reprise des pâturages par apport nutritif. Les dégâts des brûlis successifs sur les parcelles étaient trop intenses, essentiellement à cause des sécheresses successives, pour entraîner une reprise de la végétation. De plus, le mosaïquage des patchs de végétation résultant de ces processus entraîne une progression des phénomènes d'encroûtements des sols. De ce fait, les phénomènes d'érosion ont pris de l'ampleur et ont menacé les activités agricoles de la région et la pérennité des aménagements hydriques. Cette interdiction, même si elle n'est pas suivie par l'ensemble de la population, explique en partie la diminution constatée entre 1987 et 2006.

Afin d'affiner cette analyse, nous allons considérer indépendamment les dynamiques de l'occupation des sols dans les trois composantes géomorphologiques :

- La zone amont est caractérisée, en 1987, par une forte prédominance des cultures sous couverts arborés, notamment le long du réseau hydrographique. Cependant, cette classe d'occupation des sols connaît une nette diminution entre 1987 et 2006 au profit des steppes arbustives et/ou arborées. Cette dynamique traduit un phénomène de déprise agricole qui peut être reliée aux flux migratoires constatés vers la plaine agricole du bassin et les difficultés financières et techniques de développer une agriculture rentable en zone montagneuse (Seghieri, 1990). De plus, la zone amont est caractérisée par des vallées encaissées du fait d'un relief marqué, rendant cette zone peu propice au développement des activités agricoles ou de l'élevage de rente.
- Sans la zone du piémont, les espaces de culture ont nettement augmenté en surface entre les deux dates, notamment au détriment des steppes herbacées. Cette dynamique peut s'expliquer par la nécessité de soutenir la croissance démographique, notamment autour de la ville de Maroua. De plus, consécutivement à la mise en culture, les espaces de jachère augmentent après deux ou trois années de culture ou bien suite à l'abandon de ces terres devenues improductives à force de surexploitation. Celles-ci sont alors progressivement recolonisées par de la végétation arbustives (Peltier et Eyog-Matig, 1988), ce que traduit l'augmentation des steppes arbustives.
- Enfin, la zone aval est l'espace pour lequel les changements dans les pratiques agricoles sont les plus nets. Les zones dédiées à la culture augmentent de près de 25%, notamment au détriment des steppes herbacées, des sols nus et des cultures sous couverts arborés. Ce phénomène est dû au développement des cultures de rente

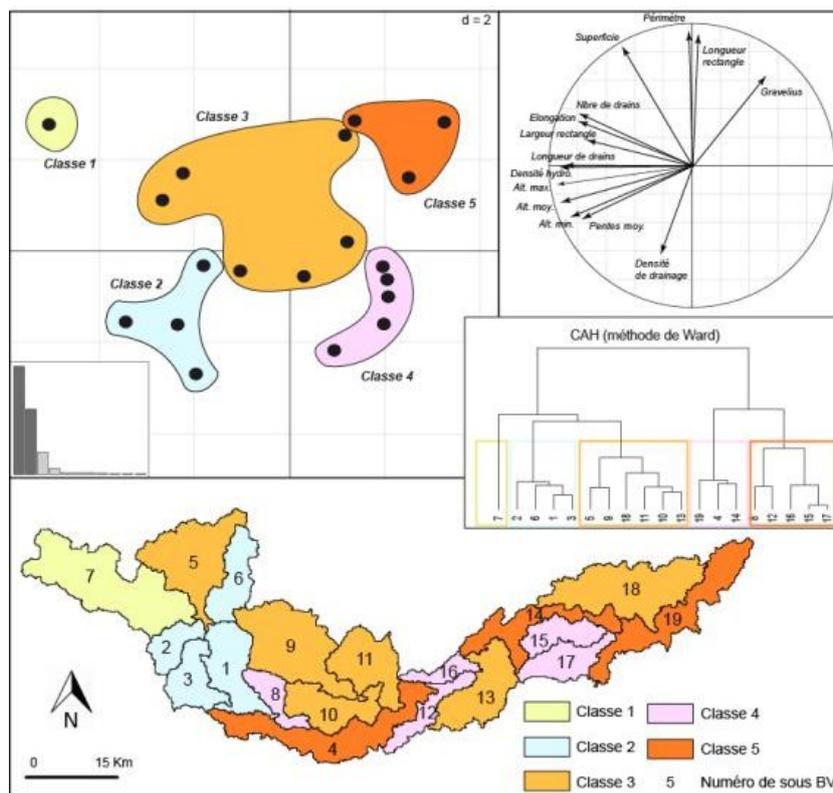


FIGURE 5 : Cartographie des classes de sous-bassins versants obtenues à partir d'une Analyse en Composantes Principales normée et d'une Classification Ascendante Hiérarchique.

comme le Sorgho ou le Maïs, en lien avec l'arrivée des nouveaux agriculteurs et de l'augmentation de la population (Figure 7). Cette situation entraîne également le développement des diguettes, qui sont des installations bloquant l'eau en saison des pluies, favorisant son infiltration. Elles permettent donc la remise en culture de terre autrefois improductives (Peltier et Eyog-Matig, 1988), notamment pour les nouveaux arrivants qui s'installent sur des terres plus médiocres (Seghieri, 1990).

3.3. Relation occupation du sol et types de sol

Si la géomorphologie semble être un facteur conditionnant l'occupation du sol, la répartition de l'occupation du sol est aussi fortement influencée par la répartition spatiale des sols (Figure 6). Une relation forte entre les sols argileux (de type vertisols ou planosols) et les systèmes de cultures (à hauteur de 36%) ou les steppes herbacées (entre 30 et 20%) peut être constatée, notamment dans la partie piémont du bassin. Les sols argileux favorisent la rétention en eau, ce qui facilite le développement des cultures de type Sorgho de contre saison, qui sont très exigeantes en eau (Fotsing et Mainam, 2002). Si ces vertisols étaient autrefois utilisés pour la culture du riz ou bien du coton, ils sont aujourd'hui quasiment exclusivement réservés à la culture du Sorgho (Fotsing et Mainam, 2002). De même, on retrouve la présence de cultures sur les sols exondés et inondés. Enfin,

il semble que la présence de sols peu évolués et régosoliques conditionnent en partie la présence des steppes arborées et arbustives, essentiellement pour la partie amont du bassin. En effet, ces sols pauvres en argiles sont alors peu adaptés au développement des cultures, notamment celle du Sorgho (Fotsing et Mainam, 2002).

4. Discussion

Les travaux menés précédemment par Nouvelot (1973) sur la morphométrie se basaient sur des cartes topographiques au 1/50 000 et au 1/200 000. L'utilisation d'un MNT a permis d'obtenir des résultats plus précis au travers d'une méthodologie automatisée. Cependant, les données pixellaires conduisent à prendre en considération plus d'irrégularités venant influencer certains paramètres comme le périmètre ou la surface du bassin versant. De même, en raison de la résolution spatiale du MNT (30 m), un réseau hydrographique fin ne peut pas être obtenu et des erreurs de localisation du réseau peuvent ainsi être engendrées, notamment dans les zones à faibles pentes (Kouame et al., 2007). Ces limites analytiques nécessitent l'utilisation de méthodes complémentaires de photo-interprétation pour vérifier et compléter le réseau hydrographique. Les imperfections engendrées par cette méthode sont minimes et peuvent être appréhendées facilement en prenant en compte ces

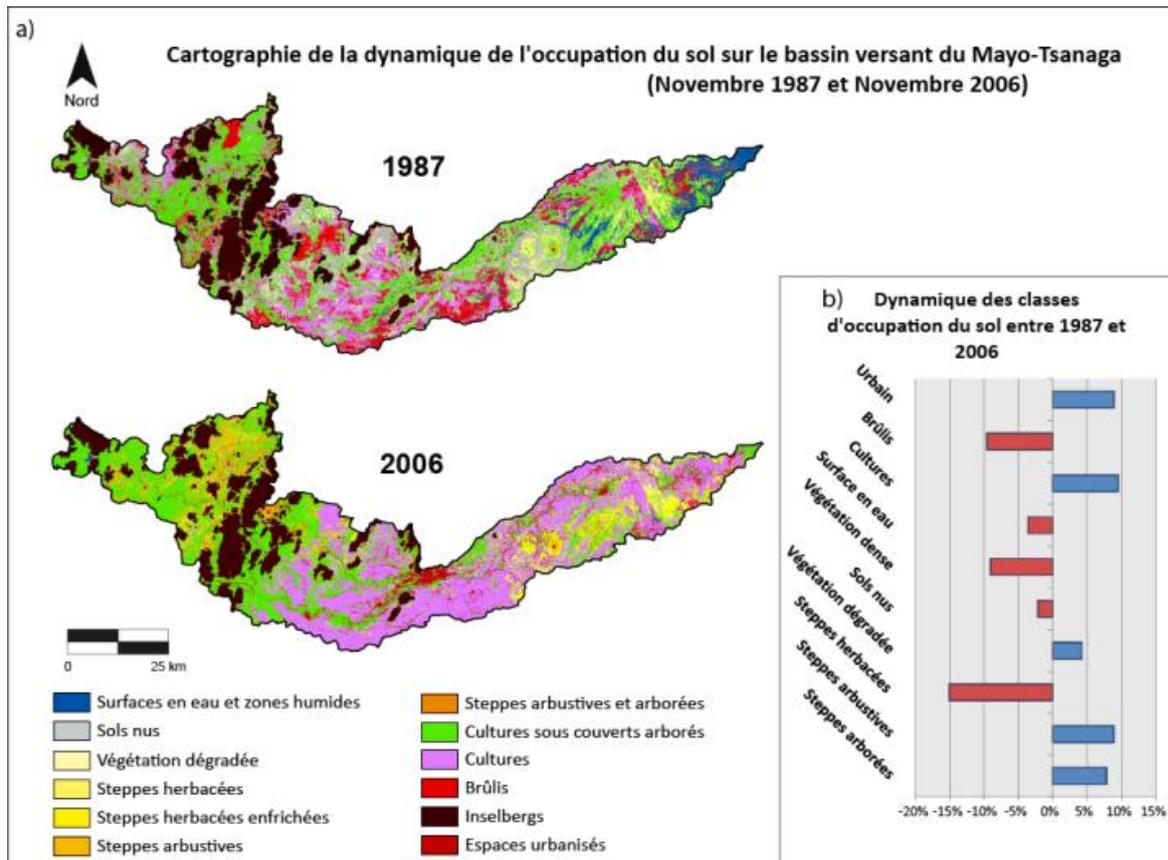


FIGURE 6 : La dynamique de l'occupation du sol sur le bassin versant du Mayo-Tsanaga : a) Cartographie de l'occupation du sol en 1987 et 2006 obtenues à partir de la classification d'images landsat ; b) statistiques d'évolution entre les deux dates.



FIGURE 7 : Culture sur diguette de Sorgho de contre-saison à l'aval du bassin versant du Mayo-Tsanaga (Oswald et al., 2011b).

Classe d'occupation du sol	Sols peu évolués ou régosoliques	Inselbergs	Planosols	Vertisols	Sols exondés ou inondés	Exandés tropicaux	Sols exondés anciens peu évolués
Système de culture sous couverts arborés	33%	27%	7%	17%	19%	10%	8%
Sols nus	2%	5%	5%	8%	7%	5%	4%
Urbain	1%	2%	3%	3%	3%	2%	3%
Cultures	7%	20%	37%	36%	31%	32%	36%
Surfaces en eau	3%	3%	1%	2%	2%	0%	1%
Steppes arborées et arbustives	51%	33%	17%	15%	21%	19%	17%
Steppes herbacées	3%	10%	30%	20%	18%	32%	33%

TABLE 3 : Pourcentages d'occupation du sol en fonction des types de sols. Ce croisement a été réalisé à partir de la cartographie de l'occupation du sol en 2006 (Figure 6) et de la carte simplifiée des sols (Figure 2). ■ Majoritairement à l'amont – ■ Majoritairement au piémont – ■ Majoritairement à l'aval.

erreurs. Ainsi, cette méthodologie permet de reproduire le même type d'étude rapidement et gratuitement sur l'ensemble des bassins versants de la région.

Les dynamiques spatio-temporelles de l'occupation du sol sont un paramètre clé pour modéliser la redistribution des précipitations au sol et les bilans hydriques à l'échelle des bassins versants. La mise en place d'une analyse diachronique à partir d'images satellites Landsat TM et ETM+ a permis d'effectuer un suivi du couvert végétal à 20 ans d'intervalle. L'utilisation d'un jeu de données à 30 mètres de résolution spatiale est suffisant pour suivre les processus à l'œuvre à l'échelle du bassin versant. Cependant, en raison de l'hétérogénéité spatiale des différents types d'éléments paysagers, la détection des structures d'occupation du sol reste difficile à réaliser. Pour cette raison, nous nous sommes basés sur des données terrain afin de mettre en place nos classifications d'images.

Cependant, la résolution spatiale de nos cartes ne permet pas de suivre des processus physiques plus fins, comme les encroûtements, pourtant indispensables à la compréhension de certains processus inhérents à la redistribution des précipitations au sol. Afin de pallier à ce problème, il faudrait mettre en place une analyse à très haute résolution spatiale pour compléter la réactualisation du jeu de données. Toutefois, de telles images sont payantes et ne couvrent que des zones plus petites (250 km² pour des satellites comme Quickbird), nécessitant d'importants efforts analytiques pour un bassin de méso-échelle comme celui du Mayo Tsanaga. L'analyse menée à partir des images Landsat a néanmoins permis de mettre en évidence les grandes étapes des transitions paysagères à l'échelle du bassin. Les années 1990 semblent être une période de transition scindant le bassin en deux systèmes distincts. L'amont représente un héritage de la carte de 1987, avec une domination des systèmes de cultures sous couvert arborés. Pour le reste du bassin, un inversement de la tendance est observé, due en partie au développement des cultures de rente, en relation avec l'anthropisation

croissante du milieu. Ces dynamiques soulèvent de nombreux problèmes quant à l'allocation de la ressource en eau. En effet, certaines activités comme les cultures pluviales, la riziculture ou encore le coton sont très gourmandes en eau. Cependant, sur le bassin versant du Mayo-Tsanaga, l'eau est un enjeu pour de nombreuses autres activités comme la pisciculture ou l'alimentation en eau des populations. De ce fait, des conflits autour du partage de la ressource en eau sont susceptibles d'émerger entre les différents utilisateurs. Par exemple, l'utilisation d'intrants agricoles (engrais, pesticides), notamment dans les zones amonts, peut entraîner des transferts de polluants dans les eaux, impactant aussi bien les activités d'élevage ou de pêche que la santé des populations locales.

De plus, l'anthropisation progressive du milieu entraîne une pression sur les espaces forestiers, notamment pour la production de bois de chauffage, entraînant des phénomènes de déforestation en lien avec la croissance démographique. Pourtant, dans le même temps, certaines zones du bassin sont mises en défense contribuant ainsi à leurs reboisements.

Enfin, la carte des sols avait été peu prise en compte, notamment dans le cadre de croisements de données afin d'identifier le lien avec les dynamiques anthropiques. Ce travail a permis de mettre en évidence que la donnée sol est une donnée supplémentaire indispensable à la compréhension des dynamiques spatiales, notamment dans les espaces soudano-sahéliens. En effet, dans ces espaces la répartition de la végétation dépend en premier lieu du climat, de l'altitude et du facteur anthropique. Bien souvent, le facteur édaphique ne joue qu'un rôle secondaire mais non négligeable (Olivry, 1986).

5. Conclusion

Cet article a permis de réaliser une étude de réactualisation de nos connaissances sur le bassin versant du Mayo-Tsanaga et de compléter l'ensemble des travaux

publiés depuis les années 1960. Cette analyse est indispensable pour la mise en place d'un bassin versant pilote dans la région du lac Tchad. Cette étude a mis en avant la complexité de l'organisation géomorphologique du bassin versant. L'utilisation des SIG et des analyses factorielles a permis de comprendre l'organisation des différentes entités composant le bassin au regard des variables morphométriques et hydrographiques et de les regrouper au sein de classes homogènes. Par ailleurs, la production de données d'occupation du sol pour le bassin versant du Mayo-Tsanaga à partir d'images Landsat TM et ETM+ a permis de montrer une mutation des pratiques sur le bassin. Ces dernières semblent présenter une organisation différenciée en fonction des zones géomorphologiques mais également de la pédologie. Dans l'espace du bassin du lac Tchad, les constats observés à l'échelle de ce bassin versant pilote permettent de mettre en avant la complexité des interactions Homme/Milieu dans un contexte où l'accès à la ressource en eau est un enjeu majeur, notamment pour le développement des pratiques agricoles. Ce facteur sera essentiel à prendre en compte afin de répondre aux problématiques croisées et complexes posées par l'étude d'un territoire hydrologique aussi emblématique que le bassin du lac Tchad. La mise en place d'une gestion intégrée de la ressource en eau sur le bassin versant du Mayo-Tsanaga est une nécessité. Pour ce faire il faut être en mesure de suivre et prévoir l'évolution de la ressource en eau dans un contexte de changement climatique et de mutation accélérée des environnements semi-arides. Ceci passe nécessairement par des informations spatialisées capable de prendre en compte des scénarii climatiques et démographiques. Ce travail de réactualisation à partir des méthodes de la géomatique a ouvert de nombreuses pistes de recherches et a fourni des données essentielles pour la suite des travaux visant à faire du bassin du Mayo-Tsanaga un bassin versant d'expérimentation visant à renseigner les dynamiques en cours dans le Sud du bassin du lac Tchad. Enfin, les démarches scientifiques actuelles sont de plus en plus souvent tournées vers un objectif de reproductibilité de la méthodologie et de transfert des connaissances. Dans le cadre d'un travail conjoint avec les acteurs camerounais, ce travail a permis la mise en œuvre d'une démarche originale, basée sur l'utilisation de données libres et la mise en place des traitements sous logiciels gratuits. Le logiciel QGIS, utilisé pour la majorité des traitements, a déjà montré son efficacité dans une étude similaire menée au Niger (Seguis et al., 2004). La difficulté se trouve pour le traitement des images satellites en vue des classifications de l'occupation du sol. En effet, les logiciels libres de télédétection sont aujourd'hui encore peu performants et peu efficaces au regard des plateformes payantes.

Références

- Barbier B., Weber J., Dury S., Hamadou O., Seignobos C., 2002. Les Enjeux du développement agricole dans le Grand Nord du Cameroun. In : Savanes Africaines : des espaces en mutation, des acteurs face à de nouveaux défis, Garoua, Cameroon, May 2002.
- Bendjoudi H., Hubert P., 2002. Le coefficient de compacité de Gravelius : Analyse critique d'un indice de forme des bassins versants. *Hydrological Sciences* 47(6) : 921-930.
- Brabant P., Gavaud M., 1985. Les sols et les ressources en terre du Nord-Cameroun. Carte et notice explicative. N°103 Mesures Ira, Yaoundé, Edition Orstom, Paris, France, 285p.
- Buytaert W., Cellier R., de Bièvre B., Cisneros F., Wyseure G., Deckers J., Hofstede R., 2006. Human Impact on the hydrology Of the Andean Páramos. *Earth-Sciences Reviews* 79 : 53-72.
- Cappelaere B., Descroix L., Lebel T., Boulain N., Ramier D., Laurent J.-P., Favreau G., Boubkraoui S., Boucher M., Bouzou Moussa I., Chaffard V., Hiernaux P., Issoufou H.B.A., Le Breton E., Mamadou I., Nazoumou Y., Oti M., Otle C., Quantin G. 2009. The Amma-Catch Experiment In The Cultivated Sahelian Area Of South-West Niger – Investigating Water Cycle Response To A Fluctuating Climate And Changing Environment. *Journal Of Hydrology* 375(1-2) : 34-51.
- Casenave A., Valentin C., 1989. Les états de surface de la zone sahélienne. Influence sur l'infiltration. Edition Orstom, Paris, France, 229p.
- Djoufack V., Fontaine B., Tsalefac M., Brou T., 2009. Variations de la Phénologie Végétale et Relations avec la Variabilité Pluviométrique et la Croissance Démographique dans le Nord du Cameroun. *Geographiatechnica* 2000 : 131-138.
- Favreau G., Cappelaere B., Massuel S., Leblanc M., Boucher M., Boulain N., 2009. Land Clearing, Climate Variability and Water Resources Increase in Semiarid Southwest Niger : a Review. *Water Resources Research* 45(7).
- Fotius G., 2000. Phytogéographie. In : Seignobos C., Iyebymandjek O. (Éd.). Atlas de la Province Extrême-Nord Cameroun, Edition Ird. Minrest Paris - Inc Yaoundé, 171p.
- Fotsing, E., Mainam, E., 2002. Dynamique du Sorgho de Contre Saison et Potentialité des Sols dans les Zones de Savanes de l'extrême-Nord du Cameroun. In : Savanes Africaines : des espaces en mutation, des acteurs face à de nouveaux défis. Garoua, Cameroon, May 2002, 7p.
- 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(4) : 394-404.
- Kergomard C., 2000. Pratique des corrections atmosphériques en télédétection : Utilisation du logiciel 5s-Pc. *Cybergeo : European Journal Of Geography*. <http://cybergeo.revues.org/1679>.
- Iyebymandjek O., Seignobos C., 2000. Hydraulique Villageoise, les " biefs " dans les Monts Mandara, Bilan des Programmes. In Seignobos C., Iyebymandjek O. (Éd.). Atlas de la Province Extrême-Nord Cameroun, Edition Ird. Minrest Paris - Inc Yaoundé, 171p.
- Kouame K.F., Bernier M., Gone D.L., Saley M.B., Iefebvre R., Soro N., Koudou A., 2007. Intégration de données géospatiales dans un modèle hydrologique distribué par la simulation des écoulements des eaux en milieu tropical humide de Côte d'Ivoire (Afrique de l'ouest). *Télédétection* 7(1-2-3-4) : 217-235.
- Lebel T., Cappelaere B., Galle S., Hanan N., Kergoat L., Levis S., Vieux B., Descroix L., Gosset M., Mougin E., Peugeot C., Seguis L., 2009. Amma-Catch Studies in the Sahelian Region of West-Africa : an overview. *Amma-Catch Special Issue. Journal of Hydrology* 375(1-2) : 3-13.
- Leblanc M.J., Favreau G., Massuel S., Tweed S.O., Loireau M., Cappelaere B., 2008. Land Clearance and Hydrological Change in the Sahel : SW Niger. *Global and Planetary*

- Change 61(3-4) : 135-150.
- Leduc C., Bromley J., Schroeterp., 1997. Water Table Fluctuation and Recharge in Semi-Arid Climate : Some results of the Hapex-Sahel Hydrodynamic Survey (Niger). *Journal of Hydrology* 188-189(1-4) : 123-138.
- Letouzey R., 1985. Notice de la phytogéographie du Cameroun au 1 :500000. Institut de la Carte Internationale et de la Végétation, Toulouse, France : 1-26.
- L'Hôte Y., Mahé G., Some B., Triboulet J.P. 2002. Analysis Of Sahelian annual rainfall index from 1896 To 2000 : the drought continues. *Hydrological Sciences Journal* 47(4) : 563-572.
- Lienou G., Sighomnou D., Sigha-Nkamdjou L., Mahe G., Ekodeck G.E., Tchoua F., 2003. Système hydrologique du Yaéré (Extrême-Nord Cameroun), changements climatiques et actions anthropiques : conséquences sur le bilan des transferts superficiels. In : *Hydrology of the Mediterranean and Semiarid Regions*, Montpellier, France, April 2003, 403-409.
- Lienou G., Mahe G., Olivry J.C., Naah E., Servat E., Sigha-Nkamdjou L., Sighomnou D., Ndam Ngoupayou J., Ekodeck G.E., Paturel J.E., 2005. Régimes des flux des matières solides en suspension au Cameroun : revue et synthèse à l'échelle des principaux écosystèmes ; Diversité Climatique et Actions Anthropique. *Hydrological Sciences* 50(1) : 111-123.
- Lienou G., Mahe G., Paturel J.E., Servat E., Ekodeck G.E., Tchoua F., 2009. Variabilité climatique et transport de matières en suspension sur le bassin de Mayo-Tsanaga (Extrême-Nord Cameroun). *Sécheresse* 20(1) : 139-144.
- Loireau M., 1998. Espaces, ressources, usages : Spatialisation des interactions dynamiques entre les systèmes sociaux et les systèmes écologiques au Sahel nigérien. PhD thesis, Université de Montpellier III, France, 411p.
- Mahe G., 2006. Variabilité pluie-débit en Afrique de l'ouest et centrale au 20ème siècle : Changements hydro-climatiques, occupation du sol et modélisation hydrologique. Habilitation thesis, Université des Sciences et Techniques, Montpellier 2, France, 160p.
- Mathieu B., Fotsing E., Gautier D., 2002. L'extension récente du Muskuwaari au Nord-Cameroun : Dynamiques endogènes et nouveaux besoins de recherche. In : *Savanes Africaines : des espaces en mutation, des acteurs face à de nouveaux défis*. Garoua, Cameroon, May 2002, 12p.
- Merle C., Gautier D., 2003. Prélèvements de bois de feu dans les villages du sud de Maroua (Cameroun) : une modélisation. *Mappemonde* 69(1) : 13-19.
- Ngounou Ngatcha B., Mudry J., Aranyosy J.F., Naah E., Sarrot Reynault J., 2007. Apport de la géologie, de l'hydrogéologie et des isotopes de l'environnement à la connaissance des "nappes en creux" du Grand Yaéré (Nord Cameroun). *Journal Of Water Science* 20(1) : 29-43.
- Nouvelot J.F., 1973. Hydrologie des Mayos du Nord Cameroun : Monographie de la Tsanaga. Cah O.R.S.T.R.O.M, Série Hydrologie, Vol. 10, 93p.
- Olivry J.C., Hoorelbeck R., 1975. Étude hydrologique du Haut-Bassin du Mayo-Tsanaga à Mokolo (1974-1975), Onarest, Orstom. Technical Report, 93p.
- Olivry J.C., 1986. Fleuves et rivières du Cameroun. Collection Monographie Hydrologique, Mesres-Orstom, Paris, France Vol. 9, 781p.
- Oszwald J., Lefebvre A., Arnault de Sartre X., Thales M., Gond V., 2011. Analyse des directions de changement des états de surface végétaux pour renseigner la dynamique du front pionnier de Maçaranduba (Para, Brésil) entre 1997 et 2006. *Télétection* 9(2) : 97-111.
- Oszwald J., Sebag D., Penven M.J., Ngounou Ngatacha B., 2011. Caractérisation géomorphologique et analyse diachronique de l'occupation du Sol dans le Bassin Versant du Mayo-Tsanaga (Nord Cameroun) In : *Sciences de l'eau, du climat et de l'environnement pour un développement durable de l'Afrique*, November 21-25 2011, Université de N'gaoundéré, Cameroon.
- Paget A., Perret J., Gleyze J.F., 2008. La géomatique au service de la caractérisation automatique des réseaux hydrographique. *Physio-Géo*. <http://physio-geo.revues.org/1031>.
- Peltier R., Eyog-Matig O., 1988. Les Essais d'agroforesterie au Nord Cameroun. *Bois et Forêts des Tropiques* 217 : 3-31.
- Raynaud C., 2001. Societies and nature in the Sahel : ecological diversity and social dynamics. *Global environmental change* 11(1) : 9-18.
- Robin M., 2002. Télétection, des satellites au signal. Une analyse complète du processus de création d'un type essentiel d'information géographique. Nathan Université, 318p.
- Roche, M., 1963. Hydrologie de surface. Gauthier-Villars et Orstom, Paris, France, 429p.
- Saar M.A., 2009. Cartographie des changements de l'occupation du sol entre 1990 et 2002 dans le nord du Sénégal (Ferlo) à partir des images Landsat. *Cybergeo : European Journal Of Geography*. <http://cybergeo.revues.org>.
- Seghier J., 1990. Dynamique saisonnière d'une savanne Soudano-Sahélienne au Nord-Cameroun. PhD thesis, Université des Sciences et Techniques du languedoc, Université Montpellier 2, France, 212p.
- Seguis L., Cappelaere B., Milesi G., Peugeot C., Massuel S., Favreau G., 2004. Simulated impacts of Climate Change and land-Clearing Runoff from a small Sahelian catchment. *Hydrological Processes* 18(17) : 3401-3413.
- Seignobos C. (Collaboration de Lafarge F.), 1982. Nord Cameroun, Montagnes et Hautes-Terres ("Architectures Traditionnelles"). Editions Parenthèses, Paris, France, 192p.
- Seignobos C., 2000. Répartition et densité de la population. In Seignobos C., Iyeb-Mandjek O. (Éd.). *Atlas de la Province Extrême-Nord Cameroun*, Edition Ird. Minrest Paris - Inc Yaoundé, 171p.
- Tachikawa T., Kaku M., Iwasaki A., 2009. Aster GDEM Validation. In : *The 35th Aster Science Team Meeting*, Kyoto, Japan.
- Thebe B., 1987. Hydrodynamique de quelques sols du Nord-Cameroun. Bassins versants de Mouda. Contribution à l'étude des Facteurs d'échelle. PhD thesis, Université des Sciences et Techniques du languedoc, Montpellier, France, 307p.