

## Le projet « MORphodynamique des bassins-versants et flux hyDRO-sEDimentaires associés »

NGOUNOU NGATCHA B.<sup>1,R,C</sup>, SEBAG D.<sup>2,3,R,C</sup>, FAVREAU G.<sup>3,4,R</sup>, SERVAT E.<sup>3,R</sup>, LAIGNEL B.<sup>2,R</sup>, GARBA Z.<sup>4,C</sup>, DURAND A.<sup>2,R,C</sup>

<sup>1</sup> Université de Ngaoundéré, Département des Sciences de la Terre, BP 454 Ngaoundéré, Cameroun

<sup>2</sup> Université de Rouen, CNRS, UMR M2C, Département de Géologie, 76821 Mont Saint Aignan cedex, France

<sup>3</sup> Université de Montpellier II, IRD, UMR HSM, 34000 Montpellier, France

<sup>4</sup> Université Abdou Moumouni de Niamey, Département des Sciences de la Terre, BP 11416 Niamey, Niger

<sup>R</sup> Projet RIPIECSA ; <sup>C</sup> Projet CORUS-2 6116

### Résumé

Ce programme validé en juillet 2010 par l'IRD pour un financement sur la période 2011-2012 s'inscrit dans la poursuite des projets Corus 2 (6116) et FSP/RIPIECSA ainsi que dans le cadre du projet de Laboratoire Mixte International *Lac Tchad* porté par l'UMR HSM et soutenu par l'UMR M2C. Il vise notamment à poursuivre l'étude des impacts combinés de la variabilité climatique régionale et des activités humaines sur la réponse hydro-sédimentaire dans le bassin versant du Mayo Tsanaga (l'Extrême-Nord Cameroun) et étendre ces actions dans le bassin versant de la Komadougou Yobé qui est partagé par le Niger et le Nigeria.

**Mots-clés** : Lac Tchad, hydrologie, hydrogéologie, érosion des sols, climat, impact anthropique

### A l'origine du projet ...

Depuis plusieurs années, le laboratoire M2C (UMR 6143 CNRS) de l'Université de Rouen, l'Unité HydroSciences Montpellier (UMR 5569 CNRS), le Département des Sciences de la Terre de l'Université de Ngaoundéré et le Département de Géologie de l'Université Abdou Moumouni de Niamey sont engagés dans une politique de coopération dans le cadre de conventions inter-universitaires dans le domaine des Sciences de l'Environnement. Cette politique a rapidement reçu un soutien institutionnel à travers le financement de programmes de formation et de recherche par les FSP CORUS 2 et RIPIECSA et par le CNRS (programme EC2CO). Cette dynamique a permis l'accueil de chercheurs et le co-encadrement de masters et de doctorants dans le cadre de projets communs auxquels participent plusieurs équipes IRD (HSM, BIOEMCO, PALOC, ISEM). La pérennisation de ces efforts passe maintenant par la structuration des actions engagées autour d'une offre de formation commune (projet de Master International) et d'une meilleure coordination des activités de recherche et de formation (projet de LMI). La mise en place de ces deux dispositifs complémentaires (formation et recherche) pourra s'appuyer sur des liens scientifiques et humains forts nés de l'expérience de la gestion en binômes de programmes collaboratifs.

Notre projet comprend plusieurs volets complémentaires et intégrés. Sur le plan institutionnel, il s'agit de faire reconnaître et de pérenniser un programme de recherche lancé en 2007 (RIPIECSA) à l'origine d'une collaboration étroite et fructueuse entre une équipe universitaire Sud, une équipe CNRS (M2C) et une équipe IRD/CNRS (HSM). Sur le plan universitaire, il s'agit de finaliser un projet de Master International pour former des spécialistes en Sciences de l'Environnement susceptibles de renforcer les services environnementaux locaux ou d'intégrer les équipes de recherche grâce à un programme de bourses de thèse en cotutelle (Sud/Sud et Sud/Nord/IRD). Sur le plan logistique, il s'agit de poursuivre et de compléter l'instrumentation du Mayo Tsanaga afin de mettre en place un véritable site-pilote pour mesurer in situ les réponses hydro-sédimentaires d'un bassin versant en zone semi-aride. Pour intégrer la problématique à l'échelle régionale du Bassin, nous dupliquerons de manière ciblée ce dispositif à la partie aval de la Komadougou, où des évolutions hydro-sédimentaires fortes ont été constatées sur des échelles de temps comparables. Sur le plan scientifique, il s'agit de quantifier, d'analyser, puis de modéliser les transferts hydriques et sédimentaires à l'échelle de ces bassins versants. Concrètement, il s'agit de coordonner les efforts d'équipes thématiques qui auront pour tâche (1) d'étudier les caractéristiques du bassin-versant, d'identifier des marqueurs spécifiques et de réaliser une cartographie SIG de l'occupation des sols ; (2) d'analyser les chroniques hydro-climatiques, de quantifier les flux hydro-sédimentaires et de modéliser les interactions

surface/souterrain et (3) d'étudier le remplissage sédimentaire des lacs, d'établir des modèles d'âge robustes et de calculer des bilans sédimentaires.

### **Présentation du Projet**

Dans le bassin du Lac Tchad, la compréhension des liens entre les environnements, les fluctuations climatiques et la pression anthropique est un enjeu important, tant au plan des connaissances scientifiques qu'au plan de la gestion des ressources naturelles. Au cours des dernières décennies, les modifications de l'occupation des sols sont ainsi à l'origine d'un comblement progressif des plans d'eau, alors que l'augmentation des prélèvements hydriques combinés à des pluviométries déficitaires se traduisent par un raccourcissement de la période d'écoulement des cours d'eau temporaires. Ces changements environnementaux sont en grande partie responsables de la réduction drastique de la surface du lac, entraînant des conséquences majeures pour les populations et les économies locales. De nombreuses études se sont focalisées sur les cours d'eau de la région, cherchant à décrire, mesurer et prévoir les conséquences hydro(géo)logiques de l'impact combinés du Changement climatique et des activités humaines sur les ressources et environnements locaux. Pour la plupart des bassins, cette analyse se heurte à la disponibilité et à la longueur des séries de données ; d'autant plus que des mesures systématiques en continu nécessitent de longues et pénibles opérations de terrain et de laboratoire. Ce type de démarche est toutefois indispensable si l'on souhaite pouvoir valider les modèles qui pourront, ensuite, fournir les outils d'aide à la décision nécessaire à une gestion durable des ressources naturelles, en particulier hydriques.

Notre projet vise à étudier les impacts combinés de la variabilité climatique régionale et des activités humaines sur la réponse hydro-sédimentaire de bassins pilotes instrumentés. Les recherches porteront sur l'analyse de la variabilité climatique régionale, la quantification des changements d'occupation des sols, les relations entre les flux hydrologiques superficiels et le bassin hydrogéologique, la mesure des flux de matière et l'analyse des enregistrements sédimentaires. Cette approche intégrée des processus d'érosion, de transfert et de sédimentation permettra de calibrer des modèles numériques. Le programme scientifique prévoit trois phases successives. La première phase doit permettre de caractériser et d'évaluer les flux hydro-sédimentaires à court, moyen et long termes ; elle est déjà opérationnelle dans le cadre des projets RIPIECSA et CORUS. La deuxième phase doit permettre de préciser l'impact des fluctuations climatiques régionales et les effets des activités humaines sur l'érosion des sols et les flux hydro-sédimentaires. La troisième phase doit permettre de modéliser les interactions entre les flux superficiels et le bassin hydrogéologique et de hiérarchiser les facteurs de contrôle (structural, géologique, climatique, anthropique) en fonction de l'amplitude et de l'échelle de la réponse hydro-sédimentaire. Ce programme scientifique est complétée par un volet "Formation à la recherche" (Master International en Sciences de l'Environnement) et par un volet "Formation doctorale" (programme de thèses en cotutelle Sud/Sud et Sud/Nord).

### **Spécificités des sites**

Situé au Nord du Cameroun (région de Maroua ; zone soudanienne : 700 à 800 mm/an), le bassin versant du Mayo Tsanaga est de forme allongée WE (vers 10°40' N) sur près de 150 km de long pour 10 à 20 km de large (1700 km<sup>2</sup> environ). Son profil est contrasté avec une moitié amont en zone montagneuse (1400 à 400 m) constitué par les massifs volcaniques des Monts Mandara, et une moitié aval constituée par la plaine alluviale du Logone (400 à 300 m). Alimenté par un bassin artificiel (lac de Mokolo), ce cours d'eau temporaire débouche dans un lac de barrage (lac de Maga) destiné à l'irrigation. Peu profond, ce plan d'eau est en voie de comblement par les apports sédimentaires. En effet, le bassin versant est le siège de cultures qui entraînent une forte érosion des sols. Le bassin du Mayo Tsanaga est donc susceptible d'enregistrer directement l'évolution des contraintes climatiques et anthropiques locales, mais aussi celles des zones plus septentrionales, car les Monts Mandara constituent le premier obstacle topographique sur une trajectoire éolienne majeure NE-SW traversant le bassin du Lac Tchad.

Situé au sud-est du Niger (région de Diffa, zone sahélienne : 300 à 400 mm/an), la partie aval de la Komadougou Yobé coule sur 150 km de distance avant de rejoindre le Lac Tchad. Sa faible pente (< 0.1 pour mille) couplée à des sédiments fortement érodables induit une forte sinuosité (indice de 2.1). Au cours des dernières décennies, le déboisement de sa forêt-galerie à des fins d'irrigation a induit une augmentation de l'érosion et un comblement de la vallée. En corollaire, l'augmentation des

prélèvements et une pluviométrie déficitaire ont engendré un raccourcissement de sa période d'écoulement (de ~8 mois dans les années 1960s à < 7 dans les années 2000) et une baisse des débits, de l'ordre de 30% (Niel et al., 2005).

### Etat des connaissances

Les données de quantification des flux hydro-sédimentaires dans le bassin du Mayo Tsanaga résultent des travaux de Nouvelot (1969, 1972 ; 1973), Olivry et al. (1974), Olivry (1978).. Les mesures du débit du Mayo, de la concentration et de la quantité de MES ont été effectuées à la station de Maroua, de Bogu et de Minglia en 1966 et 1967. Nouvelot (1973) estime à 210 t/km<sup>2</sup>/an la quantité de MES exportée dans les Yaérés, soit une dégradation d'une lame de sol équivalente à environ 0,15 mm/an. Lienou (2007) estime les flux de MES à 167,9 ; 277,2 et 39,5 t/km<sup>2</sup>/an, pour des débits respectifs de 2,7, 6,1 et 1,8 m<sup>3</sup>/s à la station de Bogu. L'auteur pense qu'on pourrait s'attendre pour des débits équivalents à ceux de la période humide, à des flux spécifiques atteignant 400 t/km<sup>2</sup>.

D'importantes études ont été menées sur les fluctuations climatiques récentes : Patrel et al., 1997 ; Olivry et al., 1996 ; Servat et al., 1997 ; Nicholson, 2001 ; Sighomnou, 2004. Ces études ont permis d'identifier les manifestations de la variabilité climatique, notamment la sécheresse observée depuis une trentaine d'années en Afrique de l'Ouest et Centrale.

Des travaux axés sur la modélisation hydrologique du bassin du Lac Tchad concerne principalement deux aspects : 1) la modélisation de la dynamique de l'aquifère quaternaire (Gaultier, 2003), 2) la modélisation du bilan des eaux de surface en relation avec la variabilité climatique et les prélèvements en eau d'irrigation (Delclaux et al., 2005).

Les travaux sur le bilan hydrologique du lac ont été synthétisés par Olivry et al. (1996). Ils mettent en évidence le rôle du déficit pluviométrique des années 1970 dans la baisse du niveau du lac. L'hydrogéologie a été étudiée à l'échelle régionale (Fontes et al., 1969 ; Faure et al., 1970 ; Fontes et al., 1970) et localement par divers auteurs (Ketchemen, 1992 ; Ngounou Ngatcha, 1993 ; Njitchoua et Ngounou Ngatcha, 1997 ; Edmunds et al., 1998 ; Leduc et al., 1998 ; Goes, 1999 ; Djoret, 2000 ; Leduc et al., 2000 ; Ngounou Ngatcha et al., 2001 ; Goni, 2002 ; Gaultier, 2004 ; Goni, 2006 ; Ngounou Ngatcha et al., 2007 ; Ngounou et Djoret, 2010).

### Organisation des tâches

Sept "unités fonctionnelles" (Work Packages ou WP) comprennent plusieurs tâches élémentaires définies autour d'une question, d'une approche ou d'un objet d'étude commun. Chaque WP est supervisé par un chercheur et répond à un objectif concret qui conditionne la tâche suivante. La méthodologie spécifique à chaque tâche s'appuie sur les savoir-faire et les ressources des différents laboratoires impliqués.

Le **WP0 – Coordination** organise le planning des différentes actions, apporte le soutien logistique nécessaire à leur fonctionnement, stimule les interactions qui les lient, convoque et anime les réunions de coordination, et permet finalement au projet de fonctionner comme un programme de recherche cohérent.

Le **WP1 – Etude des sites** comprend trois tâches distinctes qui visent à quantifier les facteurs forçant les réponses hydro-sédimentaires du bassin. Le **contrôle structural** et la géomorphologie seront étudiés par morphométrie quantitative (MNT) afin d'identifier les compartiments fonctionnels (zones-sources, zones de transit, zones-puits). La **variabilité climatique** sera étudiée à partir de chroniques climatiques régionales (température et précipitations, vitesse et direction des vents, présence de brume sèche,...) établies pour certaines stations depuis les années 1920. L'évolution de l'**occupation des sols** sera quantifiée par analyse diachronique et cartographie SIG des photos aériennes et des images satellites disponibles. Le WP1 constitue un préalable aux missions de terrain et doit permettre de rationaliser la stratégie d'instrumentation et d'échantillonnage (WP2).

Le **WP2 – Instrumentation et mesures** regroupe toutes les activités nécessitant une présence sur le site, qu'il s'agisse d'observations ou de mesures localisées (échelles limniques, mesures de débit, paramètres physico-chimiques), de missions de prélèvements (chimie des eaux, MES, carottages,...) ou de l'installation d'instruments de mesure en continu (piézomètres, sondes multiparamètres, préleveurs automatiques,...).

Le **WP3 – Flux superficiels et souterrains** comprend trois tâches intimement liées qui visent à quantifier les réponses hydro-sédimentaires du bassin versant et qui reposent sur l'**analyse des**

**chroniques hydrologiques** disponibles et des **suivis réalisés au cours du projet**. L'étude des flux hydrologiques et sédimentaires permettra d'établir des bilans à l'échelle du bassin-versant et de quelques sous-bassins représentatifs. L'analyse des paramètres physico-chimiques des eaux et des propriétés de la charge particulaire (MES) permettra d'identifier les processus contrôlant les flux hydrologiques (écoulements/infiltrations) et sédimentaires (érosion/sédimentation). Une attention particulière sera portée aux interactions entre les flux superficiels et souterrains qui conditionnent la réponse hydrogéologique du bassin-versant. Ces données seront dans un second temps exploitées pour interpréter les enregistrements sédimentaires récents (WP4) et pour calibrer les modélisations numériques (WP5).

Le **WP4 – Enregistrements sédimentaires** comprend trois tâches complémentaires qui reposent sur une approche sédimentologique et visent à caractériser les flux de matière actuels et récents. Ainsi l'analyse des **formations superficielles** (colluvions, alluvions et sols) doit permettre d'identifier des marqueurs ou des signatures caractéristiques des principaux réservoirs primaires. Parallèlement, l'étude du **remplissage des plans d'eau** à partir de sondages acoustiques et/ou sismiques et de carottages permettra de reconstituer le comblement des lacs au cours des dernières décennies. L'ensemble de ces données permettront d'établir des **bilans sédimentaires récents** en relation avec les fluctuations climatiques et l'évolution de l'occupation des sols.

Le **WP5 – Modélisation** regroupe l'ensemble des tâches reposant sur l'utilisation de modèles pour **reconstituer les réponses du bassin** (flux hydrologiques, transferts sédimentaires) aux changements climatiques et à l'impact anthropique croissant. Plusieurs approches complémentaires seront exploitées pour modéliser les réponses hydrologiques et les bilans hydriques (e.g. modélisation numérique des flux, code Modflow), l'érosion des sols et les flux sédimentaires (e.g. modèle CAESAR) ou le comblement des vallées et des lacs (e.g. modèles 2D et 3D). Ces modèles pourront ensuite être exploités pour fournir des outils de gestion des ressources en eau (WP6a).

Le **WP 6 – Valorisation et diffusion** regroupe les activités de valorisation (atlas thématiques, bases de données, cartothèque) et la diffusion scientifique et au grand public des résultats du projet. Chaque mission ou stage de laboratoire fera l'objet d'un compte-rendu fournissant les éléments d'évaluation à court terme. Les études préliminaires feront l'objet de communications dans des colloques nationaux et de publications dans des revues spécialisées. Les synthèses méthodologiques et thématiques feront l'objet de communications dans des colloques internationaux et de publications dans des revues scientifiques à forte diffusion. Ces productions pourront tenir lieu d'indicateurs d'avancement et d'évaluation.

Par ailleurs, des réunions de coordination et des ateliers thématiques sont prévus au moins deux fois par an. Ces réunions ont pour objectif de faire le point sur l'avancée des différentes actions du projet, de faire la synthèse des résultats obtenus pendant l'année, et de les présenter aux équipes de recherche ou aux institutions régionales potentiellement intéressées. Chacune de ces réunions fera l'objet d'un rapport intermédiaire qui peut être valorisé au travers de publications scientifiques.

Finalement, un **meeting de restitution** est prévu au début de l'année 2013. Il sera ouvert aux contributions d'équipes de recherche qui n'étaient pas partie prenante dans le projet lui-même. Cette réunion aura pour objectif de communiquer autour de la question de l'évaluation des réponses des environnements régionaux aux changements climatiques et à l'impact anthropique. Une session spéciale regroupera les communications présentant les résultats du projet MORDRED et des autres projets effectués dans le cadre du LMI Lac Tchad. Les communications seront publiées dans un numéro spécial d'un journal spécialisé de rang international.

### **Calendrier prévisionnel**

Le calendrier prévisionnel est déjà programmé pour les 3 prochaines années universitaires. Il tient compte du calendrier des formations universitaires, de la disponibilité des enseignants-chercheurs impliqués, du planning des laboratoires et du contexte hydro-météorologique sahélien.

La première phase (2007/11) est déjà opérationnelle dans le cadre des projets CORUS 2 et RIPIECSA. Elle est dédiée à la géomorphologie du bassin et à la caractérisation et la quantification des flux hydro-sédimentaires. Plusieurs missions de mesures et de prélèvements ont été organisées par l'Université de Ngaoundéré en 2008 et en 2009. Elles ont, entre autres, permis de commencer la caractérisation des zones-sources (fractions minérales et organiques). Le suivi des flux hydro-sédimentaires actuels est

déjà entamé dans le cadre de 3 mémoires de Master de l'Université de Ngaoundéré. L'analyse des flux sédimentaires se poursuivra dans le cadre de la thèse de M<sup>lle</sup> FITA menée sous la co-direction de B. LAIGNEL (M2C, Univ. de Rouen), B. NGOUNOU NGATCHA (Univ. de Ngaoundéré) et de P. GENTHON (HSM) ; le suivi des flux hydrogéologiques sera réalisée dans le cadre de thèses menées sous la direction de G. Favreau (HSM). Il est prévu que ces premiers résultats soient présentés lors d'un séminaire organisé dans le cadre des projets CORUS 2 et RIPIECSA (septembre 2011).

La deuxième phase (2011/12) portera sur l'impact des fluctuations climatiques régionales et les effets des activités humaines. L'analyse des chroniques hydro-climatiques et des photos aériennes sera effectuées dans les laboratoires d'accueil dans le cadre de masters et de doctorats. Une mission de terrain est prévue à l'issue du premier atelier (décembre 2011) afin de poursuivre la caractérisation des zones-sources et de carotter les zones-puits (lacs de Mokolo et de Maga). Le suivi des flux hydro-sédimentaires se poursuivra durant toute la saison des pluies (juin 2011). Les premiers résultats seront présentés lors d'un séminaire à mi-parcours (septembre 2012).

La troisième phase (2012/13) portera sur la modélisation des interactions entre les flux superficiels et le bassin hydrogéologique. Une mission de terrain est envisagée à l'issue du séminaire à mi-parcours (septembre 2011/2012) afin de compléter les observations et mesures de terrain. Les résultats seront présentés lors d'un séminaire de restitution (mars 2013) dont les actes feront l'objet d'une publication dans une revue scientifique spécialisée.

### Partenaires scientifiques

Ce projet pluridisciplinaire (géomorphologie, climatologie, hydrologie, hydrogéologie, sédimentologie) a pour ambition de contribuer à la **structuration d'un réseau de compétence autour du projet de LMI Lac Tchad** porté par l'équipe IRD HSM. Il repose sur l'implication de plusieurs équipes universitaires au Cameroun (universités de Ngaoundéré, Yaoundé 1 et Dschang), au Niger (Université AM de Niamey), au Tchad (université de N'Djamena) et au Nigeria (université de Maiduguri) et de plusieurs équipes IRD et/ou CNRS déjà implantées en Afrique (HSM, M2C, ISEM, PALOC). Compte-tenu du nombre de partenaires, l'animation scientifique est organisée autour de 4 groupes thématiques pilotés par des membres des 3 équipes porteuses (Ngaoundéré, HSM et M2C). Pilotées par B. Ngounou Ngatcha et G. Favreau, les activités du **groupe 1** sont focalisées sur l'analyse de la variabilité spatiale des facteurs de contrôle (WP1 : géomorphologie et occupation des sols) et sur l'instrumentation du bassin-versant (WP2). Pilotées par A. Durand et B. Ngounou Ngatcha, les activités du **groupe 2** portent sur l'analyse de la variabilité temporelle des facteurs de contrôle (WP1 : fluctuations climatiques) et sur l'analyse des chroniques hydro-sédimentaires (WP3). Pilotées par D. Sebag, A. Durand et Z. Garba, les activités du **groupe 3** sont focalisées sur la caractérisation des flux particuliers (WP3 : analyse des MES) et sur l'analyse des enregistrements sédimentaires (WP4). Pilotées par B. Ngounou Ngatcha et G. Favreau, les activités du **groupe 4** portent sur l'analyse des interactions entre les bassins superficiels et souterrains (WP3) et la modélisation des flux hydro-sédimentaires (WP5).

### References

- Delclaux F., Faroux C., Favreau G., Lemoalle J., Ngo-Duc T. (2005) Sensitivity of hydrological model to land surface model outputs: application to lake Chad basin, Central Africa, in: "EGU General Assembly", Vienna, Austria, April 2005, HS37, Geophysical Research Abstract 7, 06717.
- Djoret D (2000) Etude de la recharge de la nappe du Chari Barguimi (Tchad) par les méthodes chimiques et isotopiques. Thèse Doctorat, Université d'Avignon et des pays de Vaucluse, 156p.
- Faure H, Fontes J-Ch, Gischler CE, Mook WG, Vogel JC (1970) Un exemple d'étude hydrogéologique isotopique en pays semi-aride, le bassin du lac Tchad, J Hydrol **10**: 141-150.
- Fontes J-Ch, Maglione G, Roche M A (1969) Données préliminaires sur les rapports du lac Tchad avec les nappes de la bordure nord-est, *Cahier ORSTOM, Série hydrologie*, VI (1), 17-34.
- Edmunds WM, Fellman E, Baba Goni I, McNeill G, Harkness DD (1998) Groundwater, paleoclimate and paleorecharge in the SW Chad basin, Borno State, Nigeria. In: Isotope techniques in the study of past and current environmental changes in the hydrosphere and the atmosphere. IAEA, Vienna, pp 693-707.
- Fontes J-Ch, Gonfiantini R, Roche MA (1970) Deutérium et oxygène-18 dans les eaux du lac Tchad, Isotope Hydrology, Proc Symp Vienna, 1970, 387p.
- GAULTIER,G., MARLIN,C. & LEDUC,C. (2003). Hydrogéologie isotopique de la dépression piézométrique du Kadzell (Niger oriental). IAHS Publ. [278], pp 168-173. Conference Proceeding Hydrology of the Mediterranean and Semiarid Regions, Montpellier 2003.

- Gaultier G. (2004) recharge et paléorecharge d'une nappe libre en milieu sahelien (Niger Oriental) : approches géochimique et hydrodynamique. Thèse Université Paris-Sud, UFR Scientifique d'Orsay, 179p + annexes.
- Goes BJM (1999) Estimate of shallow groundwater recharge in the Hadeija-Nguru Wetlands. Semi-arid northeastern Nigeria. *Hydrogeol J* 7: 305-316.
- Goni IB (2002) Réalimentation des eaux souterraines dans le secteur Nigérian du bassin du lac Tchad : approche hydrogéochimique. Thèse Doctorat, Université d'Avignon et des pays de Vaucluse, 123p.
- Goni, I.B. 2006. Tracing stable isotope signal from meteoric water to groundwater in the SW Chad basin. *Journal of Hydrogeology*. Vol. 14 (5), Pp. 742-752.
- Ketchemen B (1992) Etude hydrogéologique du Grand Yaéré (Extrême Nord du Cameroun). Synthèse hydrogéologique et étude de la recharge par les isotopes de l'environnement. Thèse de Doctorat 3<sup>ème</sup> cycle, Université Cheikh Anta Diop Dakar, Sénégal.
- Leduc C, Salifou O, Leblanc M (1998) Evolution des ressources en eau dans le département de Diffa (bassin du lac Tchad, Sud-Est nigérien). In: Servat E., Hugues D., Fritsch J. M., Hulme M. (éds), *Water resources variability in Africa during the XXth century*, AIH publ 252: 281-288.
- Leduc C, Sabljak S, Taupin J D, Marlin C, Favreau G (2000) Estimation de la recharge de la nappe quaternaire dans le Nord-Ouest du bassin du lac Tchad (Niger oriental) à partir de mesures isotopiques, *C R Acad Sci Paris*, 330: 355-361.
- Lienou G. (2007). Impacts de la variabilité climatique sur les ressources en eau et les transports de matières en suspension de quelques bassins versants représentatifs au Cameroun. PhD Thesis, Université de Yaoundé I, Cameroun, 405 p.
- Ngounou Ngatcha B. (1993) Hydrogéologie d'aquifères complexes en zone semi-aride. Les aquifères quaternaires du Grand Yaéré (Nord Cameroun). Thèse de Doctorat, Université de Grenoble 1, France.
- Ngounou Ngatcha B., Mudry J., Wakponou A., Ekodeck G.E., Njitchoua R., Sarrot-Reynauld J. (2001) Le cordon sableux Limani-Yagoua (N Cameroun) et son rôle hydraulique, *Journal of African Earth Sciences* 32, pp 889-898.
- Ngounou Ngatcha B., Mudry J., Aranyosy J.F., Naah E., Sarrot-Reynauld 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/Revue des Sciences de l'eau* 20 (1), pp 29-43.
- Ngounou Ngatcha B., Djoret D. (2010) Nitrate pollution in groundwater in two selected areas from Cameroon and Chad in the Lake Chad basin doi: 10.2166/wp.2010.017, *Water Policy* 1–13, IWA Publishing 2010.
- NICHOLSON S. E. (2001) Climatic and environmental change in Africa during the last two centuries. *Climate Research*, 17: 123-144.
- Niel H., Leduc C., Dieulin C. (2005) Characterization of spatial and temporal variability of rainfall in the Lake Chad Basin. *Hydrological Sciences Journal*, 50, 223-243.
- Njitchoua R, Ngounou Ngatcha B. (1997) Hydrogeochemistry and environmental isotopic investigations of the North Diamaré plain, Extreme-North of Cameroon, *J Afric Earth Sci* (25) 2: 307 - 316.
- Nouvelot J.F. (1969) Mesure et étude des transports solides en suspension au Cameroun. *Cahiers Orstom Hydrologie*, 6 : 43-85.
- Nouvelot, J.F. (1972). Le régime des transports solides en suspension dans divers cours d'eau du Cameroun de 1961 à 1971. *Cahiers ORSTOM, Hydrologie* 9 (1), 47-74.
- Nouvelot, J.F. (1973). Hydrologie des Mayo du Nord Cameroun : Monographie de la Tsanaga. Rapport terminal. ORSTOM, Yaoundé, Cameroun, 93 p.
- Olivry, J.C. (1978). Transports solides en suspension au Cameroun. *Cahiers de l'ONAREST* 1, 47-60.
- Olivry, J.C. (1986). Fleuves et rivières du Cameroun. Monographies hydrologiques, MESRES/ORSTOM 9, 733 p.
- Olivry J.C., Hoorelbecke R., Andiga J. (1974) Quelques mesures complémentaires de transports solides en suspension au Cameroun. Yaoundé' (Cameroun), ORSTOM.
- Olivry J.C., Chouret A., Vuillaume G., Lemoalle J., Bricquet J.P. (1996) Hydrologie du lac Tchad. *Monogr. Hydrol. ORSTOM, Paris, France* Vol. 12, 266 p.

- PATUREL J. E., SERVAT E., KOUAMÉ B., LUBÈS H., OUEDRAOGO M., MASSON J. M. (1997) Climatic variability in humid Africa along the Gulf of Guinea. Part two: an integrated regional approach. *J. Hydrol.*, 191: 16-36.
- SERVAT E., PATUREL J. E., LUBÈS H., KOUAMÉ B., OUEDRAOGO M., MASSON J. M. (1997) Climatic variability in humid Africa along the Gulf of Guinea. Part one: detailed analysis of the phenomenon in Côte d'Ivoire. *J. Hydrol.*, 191: 1-15.
- Sighomnou D. (2004). Analyse et redéfinition des régimes climatiques et hydrologiques du Cameroun : perspectives d'évolution des ressources en eau. Thèse de Doctorat d'Etat, Université de Yaoundé I, Cameroun, 290 p.