

# Évaluation de l'érosion du site de Wankama (Niger) par comparaison de différents MNT

■ Thibaud GENDRE - Gilbert FERHAT - Jacques HINDERER - Guillaume FAVREAU - Bernard CAPPELAERE - Eric LE BRETON

*Cette étude s'inscrit dans le projet GHYRAF (Gravité et HYdRologie en AFrique) qui vise à mieux comprendre la mousson africaine*

*à partir de mesures au sol et par satellites sur 4 sites le long d'un transect Nord-Sud de l'Algérie au Bénin. Un de ces sites est équipé de différents instruments géophysiques et hydrométéorologiques. Il s'agit du site de Wankama au Niger. Pour comprendre les variations de stocks d'eau sur le bassin versant de Wankama, il est nécessaire de disposer d'un MNT précis et de mesures de géophysique de surface (gravimétrie, piézométrie). En février et avril 2010, nous avons réalisé un levé topographique par GPS (3 156 points) sur l'ensemble du bassin versant (2,54 km<sup>2</sup>). À partir de ces données et d'autres plus anciennes (1992, 1998, 2007) il a été possible de mettre en évidence l'évolution du terrain (abrasion de certains versants, élargissement de certaines ravines) et de calculer un taux moyen de sédimentation de 186 T/ha/an sur la mare Ouest du bassin versant.*

## MOTS-CLÉS

MNT, bassin versant, Niger, érosion

bathymétrie de la mare et la position des points de mesure gravimétrique et hydrométéorologique (pluviomètres, stations de flux, sondes à neutrons, scintillomètre).

L'objectif principal concernant la mare est d'établir des courbes de conversion bathymétrique permettant de retrouver les variations de volume et de surface à partir d'une lecture sur mire en position fixe dans la mare. Par ailleurs, disposant de MNT réalisés à différentes époques, il est possible de détecter des changements dans le temps pouvant être reliés à de l'érosion mécanique (éolienne et hydrique).

## Présentation du site

Wankama est un village situé à environ 60 km à l'est de Niamey, capitale du Niger (*figure 1a*). On y accède par la route N25 reliant Niamey à Filingué. Le bassin versant se situe en bordure du Kori de Dantiandou, affluent fossile de la rive droite du Dallol Bosso et fait partie du site central-sahélien de l'observatoire AMMA-CATCH. D'une superficie de 2.54 km<sup>2</sup> (Gendre, 2010), il s'étend d'aval en amont du village à l'est jusqu'à un plateau à cuirasse latéritique (sol rougeâtre, riche en hydroxyde de fer et alumine) côté ouest. Il est limité au nord par la route N25 et au sud par une ligne de crête très peu marquée dans une savane arbustive à *Guiera senegalensis* (*figures 1b et 2*).

La mousson africaine s'étale sur environ 3-4 mois de pluies brèves et espacées mais qui peuvent être intenses, et qui apportent l'essentiel des précipitations à partir du mois de juin. L'eau de pluie s'infiltrant relativement peu dans les sols nus et encroûtés, se concentre rapidement dans les ravines et ruisselle vers l'aval du bassin versant, formant une mare temporaire endoréique (*mare Ouest, figure 1b*).

L'eau s'infiltre ensuite vers la zone saturée, créant un dôme piézométrique d'amplitude pluri-métrique (de l'ordre de 5 m) à son maximum (vers fin août). Ce phénomène a été mis en évidence et est décrit à partir des fluctuations saisonnières de la piézométrie mesurée à proximité de la mare (*figure 2*) (Leduc et al., 1997).

Un réseau conjoint de mesures de gravimétrie absolue (FG5, Micro-g Solutions Inc.) en 2008 et de microgravimétrie (CG5, Scintrex) en 2009 a été installé sur le site (*figure 2*). Quinze sites sont équipés de dalles en béton de 30 x 30 x 60 cm dans

**L**e bassin versant de Wankama (Niger) est le site principal de l'observatoire hydro-environnemental AMMA-CATCH<sup>1</sup> au Niger (Capeleare et al., 2009). Il est également l'un des sites étudiés dans le cadre du programme de recherche GHYRAF<sup>2</sup> (Gravité et HYdRologie en AFrique, Hinderer et al., 2009). Ce programme vise à comprendre la variabilité des stocks d'eau en Afrique de l'Ouest, du Sahara au Golfe de Guinée, en passant par le Niger.

Cet article est une synthèse d'un projet de fin d'études (PFE) du cycle ingénieur INSA<sup>3</sup> de Strasbourg, spécialité topographie (Gendre, 2010). L'objectif de ce PFE est de disposer d'une topographie précise du bassin versant de Wankama afin de pouvoir mieux y caractériser l'évolution des stocks d'eau superficiels et souterrains. Le travail consiste à réaliser un Modèle Numérique de Terrain (MNT) précis du site à partir d'observations GPS en temps réel. Ce modèle permet de connaître de façon précise : la surface topographique, la

(1) Analyses Multidisciplinaires de la Mousson Africaine \ Couplage de l'Atmosphère et du Cycle Hydrologique.

(2) <http://eost.u-strasbg.fr/obsgrav/pages/recherches/ghyraf.html>

(3) Institut National des Sciences Appliquées



1a. Le Niger, Afrique de l'Ouest.



1b. Limite approximative du bassin versant de Wankama délimité par le plateau à l'est et la mare à l'ouest.

Figure 1. Présentation du bassin versant de Wankama au Niger.

des zones aux caractéristiques hydrologiques différentes. Des campagnes de mesures de gravimétrie absolues (2008, 2009 et 2010) et relatives de type CG5 (juin et septembre 2009) devront permettre d'évaluer des variations spatiales de quelques microgals ( $10^{-8} \text{ m.s}^{-2}$ ) liées aux variations de stocks d'eau.

D'autres instruments hydrométéorologiques (température, pression, évapotranspiration, humidité) sont présents sur le bassin versant. Les coordonnées UTM31N(WGS84) et la hauteur ellipsoïdale WGS84 de ces divers instruments sont déterminées de façon précise dans le mémoire d'ingénieur de Gendre, 2010.

## Les données topographiques de 1992, 1998 et 2007

Le bassin versant de Wankama est étudié depuis 1991. Les données topographiques existantes datent de différentes époques et sont exprimées dans différents systèmes géodésiques. Le datum POINT58 est utilisé au Niger et le datum WGS84 est utilisé pour exprimer les éphémérides radiodif-

fusées du GPS. Les données utilisées dans cette étude sont synthétisées dans le *tableau 1*.

En 1992, l'ORSTOM, renommé IRD<sup>4</sup> en 1998, a chargé l'IGN Niger (IGNN) de réaliser un document topographique du bassin versant de Wankama. Le plan topographique au 1/5000 a été réalisé en juin 1993, à partir de 574 points levés en 1992 au théodolite Wild T16 équipé d'un distancemètre Wild DI4L (communication personnelle Hasimi Adamou, directeur IGNN). Les coordonnées planimétriques sont exprimées dans un système local et les altitudes sont référencées dans le Nivellement Général de l'Afrique de l'Ouest (NGAO) (AJCI et IGN Niger, 1993). Ce plan est disponible au format JPG avec une résolution de 5856 x 6550 pixels.

Un semis de points a été obtenu par digitalisation du plan topographique de 1993. Le semis de points a ensuite été recalé à partir de photographies aériennes de 1992, géoréférencées dans le datum POINT58 en projection UTM31N (Cappelaere et al., 2003, Peugeot et al., 2003). Les coordonnées planes du semis de points sont données au mètre près et les altitudes au centimètre.

La comparaison entre le document topographique et le semis de points révèle un biais de 5.07 m entre les altitudes du plan topographique  $H_{NGAO}$  et les altitudes du semis de points  $H_{semis}^{1992}$ .

$$H_{semis}^{1992} = H_{NGAO} - 5.07 \text{ m} \quad (1)$$

Ce biais correspond à un écart entre le système NGAO et un modèle de géoïde global comme par exemple l'EGM96.

En décembre 1998, l'IRD a chargé l'IGNN de réaliser un nivellement de la mare ouest. Le levé a été réalisé sous la forme d'une grille régulière avec un pas de 20 m. Nous ne disposons d'aucune information sur le matériel utilisé. L'IGNN a rattaché la planimétrie au système local ayant servi au levé de 1992. L'altimétrie a été rattachée au système NGAO (à partir de la borne BN14, *figure 1b*). Le semis de points a

(4) Institut français de recherche scientifique pour le développement en coopération.

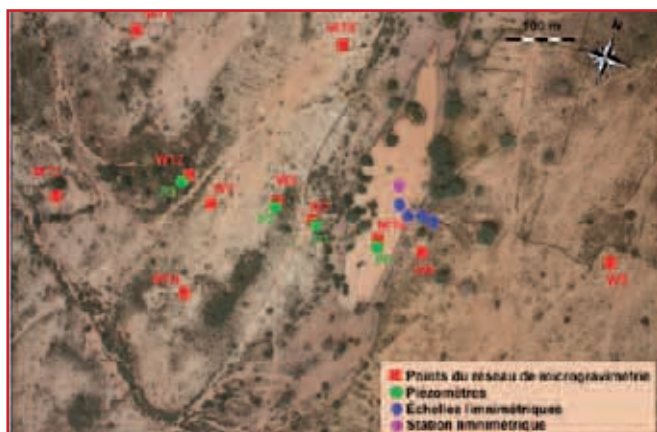


Figure 2. Instrumentations de la mare Ouest.

Date d'observation	1992		Décembre 1998	2007
Zone	Bassin versant		Mare ouest	Bassin versant
Type de données	Plan topo 1/5000	Semis de points	Semis de points (grille régulière)	Semis de points (13 profils N-S)
Format	JPG 5856x6550	Tableau Excel	Tableau Excel	Tableau Excel
MOA	IRD (ORSTOM)		IRD	Eric Le Breton (thèse)
MOE	IGNN		IGNN	Eric Le Breton
Méthode	Tachéométrie	Digitalisation	Nivellement	GPS cinématique
Datum	Local	POINT58	POINT58	WGS84
Projection	-	UTM31N	UTM31N	UTM31N
Système altimétrique	NGAO	NGAO – 5,07 m	NGAO + 24,04 m	he WGS84
Nombre de points	574		378	1148
Surface	3,8 km <sup>2</sup>		0.073 km <sup>2</sup>	-
Densité de points	150 pts.km <sup>2</sup>		5200 pts.km <sup>2</sup>	-

**Tableau 1.** Synthèse des données topographiques du site de Wankama (1992-2007).

ensuite été recalé dans le système référentiel POINT58, projection UTM31N. La transformation s'est faite par translation E, N à l'aide de points d'amer identifiables sur des images satellites et aériennes (Leblanc et al., 2008 pour la méthodologie). La hauteur ellipsoïdale WGS84 de chaque point a été calculée en ajoutant 24.024 m à l'altitude NGAO (comm. pers. Christophe Peugeot).

$$he_{WGS84}^{1998} = H_{NGAO} + 24.024 \text{ m} \quad (2)$$

Cette valeur de 24.024 m correspond à l'ondulation du géoïde sur la zone et à des corrections instrumentales (hauteur d'antenne...). Chaque point levé est donc exprimé par un triplet (E, N, he), où (E, N) sont les coordonnées UTM31N (POINT58) et he la hauteur ellipsoïdale WGS84.

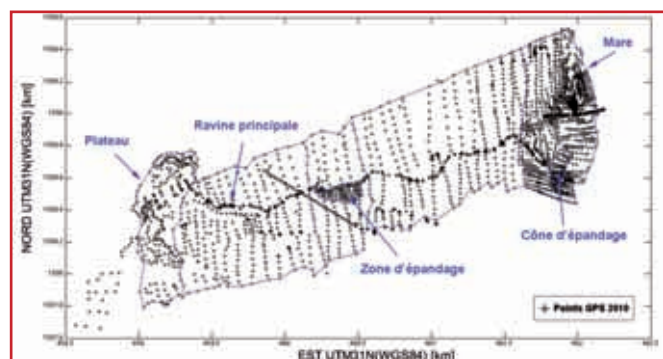
Dans le cadre de sa thèse : *"Réponses des systèmes hydrologiques et érosifs aux changements environnementaux dans le bassin du Niger moyen"* (Université Paris 8), M. Éric Le Breton a réalisé différents levés GPS cinématiques sur le site de Wankama (2006, 2007, 2008). Seules les données de 2007 sont exploitées dans le cadre de cette étude.

Les observations ont été faites par GPS cinématique en temps réel (RTK). La base a été stationnée sur un rivet dans

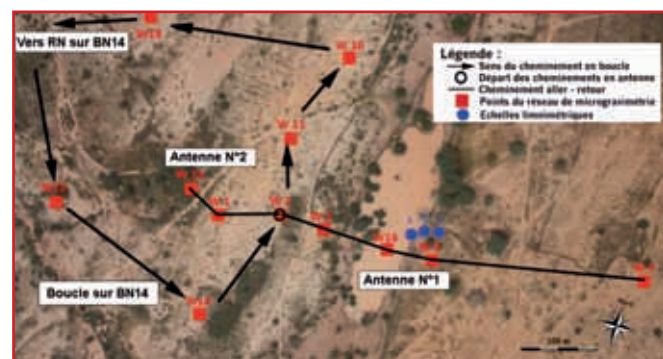
une dalle en béton (toujours présent et levé en 2010). Le bassin versant a été levé par profil nord-sud. Au total 13 profils sont disponibles, espacés d'un pas de 200 m. Chaque point est exprimé par ses coordonnées planes UTM31N(WGS84) et sa hauteur ellipsoïdale WGS84. La mare ouest, la zone d'épandage et le cône d'épandage ont aussi été levés mais ces données ne sont pas utilisées dans cette étude.

## Levers topographiques de 2010

Deux missions de terrain (du 4 au 16 février et du 3 au 25 avril 2010) ont permis d'acquérir un semis de 3156 points GPS représentant la surface topographique du bassin versant (figure 3a), observés en mode *stop and go* (5 secondes). Le matériel utilisé était successivement un GPSTrimble R6 puis un Trimble 5700. La partie aval correspondant à la mare a été densifiée (1464 points sur une surface de 0,443 km<sup>2</sup> tout comme la zone d'épandage et le cône d'épandage. La ravine principale a été levée. Les dalles gravimétriques et les instruments hydrométéorologiques présents sur le site ont été levés en mode *fast-static* (20 minutes). Les levés GPS ont été



**3a.** Lever GPS du bassin versant.



**3b.** Nivellements du réseau de microgravimétrie.

**Figure 3.** Levés topographiques de 2010.



► rattachés à la station GPS permanente de l'aéroport de Niamey.

Des nivellements ont permis de déterminer l'altitude NGAO des points du réseau de microgravimétrie et des échelles limnimétriques de la mare Ouest (figure 3b).

À partir de ces observations, un MNT de type TIN (*Triangular Irregular Network*) représente la surface topographique du site par des facettes triangulaires dont les sommets sont les points du lever GPS (triangulation de Delaunay). Un plan topographique au 1/5000 et des fiches signalétiques pour les points de microgravimétrie ont été réalisés pour l'année 2010.

## Conversion d'une altitude en hauteur ellipsoïdale

Une méthode pour obtenir l'ondulation d'un géoïde est de calculer la différence entre la hauteur ellipsoïdale (fournie par GPS) et l'altitude nivelée dans le système altimétrique (méthode géométrique). Cette différence correspond en fait à l'ondulation du système de référence par rapport à l'ellipsoïde (voir équation 3 et figure 4).

$$N' = N + \Delta Z \quad (3)$$

On obtient ainsi une surface de conversion altimétrique entre un modèle mathématique associé à une référence géodésique (WGS84) et un référentiel altimétrique donné (NGAO). Selon Duquenne et al. [2005], cette méthode permet d'obtenir une précision de quelques centimètres sur des zones peu étendues (< 100 km<sup>2</sup>) et peu accidentées. Pour chaque point GPS nivelé on évalue l'écart suivant :

$$N' = he_{WGS84} - H_{NGAO} \quad (4)$$

avec :

$N'$ , l'ondulation du système de référence par rapport à l'ellipsoïde WGS84 ;

$he_{WGS84}$ , la hauteur ellipsoïdale WGS84 ;

$H_{NGAO}$ , l'altitude NGAO (orthométrique).

La grandeur  $N'$  (équation 4) a été calculée en chaque point du réseau de microgravimétrie nivelé et observé par GPS (figure 3b). Une valeur moyenne de l'ondulation a été calculée à partir de ces 12 points (figure 3b et équation 5).

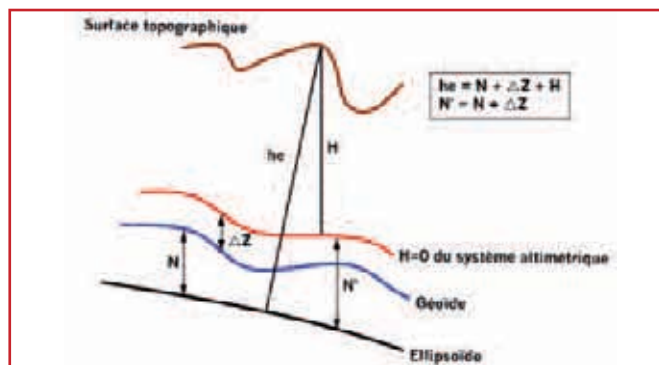


Figure 4. Altitude et hauteur au-dessus de l'ellipsoïde d'après (Duquenne et al., 2005) modifié.

L'écart-type des écarts entre la valeur moyenne de l'ondulation et les valeurs de  $N'$  en chaque point étant égal à  $\pm 2,2$  cm, le géoïde peut être assimilé localement à un plan horizontal.

$$N' = 22.157 \pm 0.022 \text{ m} \quad (5)$$

Cette valeur de  $N'$  permet alors de convertir une altitude NGAO (leviers de 1992 et 1998) en hauteur ellipsoïdale WGS84.

## Courbes de conversion bathymétrique

Une courbe de conversion bathymétrique est une fonction mathématique, élaborée à partir d'un modèle numérique de terrain, qui permet de déterminer, pour une hauteur d'eau donnée de la mare, le volume et la surface de la mare. Le niveau d'eau se détermine à partir d'une lecture sur l'une des 4 échelles limnimétriques (mires) situées dans la mare (figure 2).

Le zéro des 4 échelles limnimétriques implantées dans la mare se situe à une altitude NGAO de 200,58 m (nivellement en février 2010). La hauteur ellipsoïdale  $he_{eau}$  d'une lecture sur une échelle limnimétrique  $l_{eau}$  s'obtient à partir de la surface de conversion  $N'$  (équation 5) entre le référentiel altimétrique NGAO et l'ellipsoïde WGS84 :

$$he_{eau} = l_{eau} + 200.58 + N' \quad (6)$$

Pour calculer le volume d'eau et la surface correspondante, nous avons utilisé une méthode basée sur la décomposition de la surface en prismes. La base de chaque prisme correspond au triangle plan des faces du MNT TIN 2010. Il s'agit ensuite de calculer le volume nécessaire de ces prismes (en positif ou en négatif) pour ramener le terrain naturel à la hauteur définie par  $he_{eau}$  (figure 5).

On définit pour tout point  $j$  formant la base du prisme  $i$ , l'écart  $e_{ij}$  entre la hauteur ellipsoïdale des points du fond de la mare  $h_j$  et celle du plan d'eau  $he_{eau}$  :

$$e_{ij} = he_j - he_{eau} \quad (7)$$

La base de chaque prisme  $i$  correspond au triangle plan formé par la triangulation de Delaunay. La surface  $A_i$  formant la base de chaque prisme  $i$  se calcule à partir de la formule

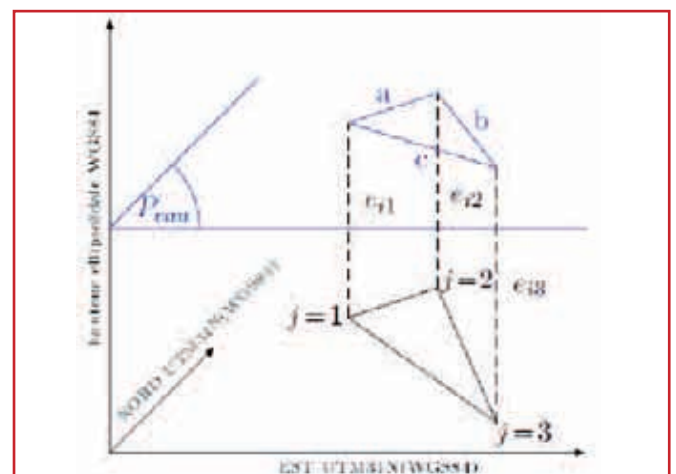
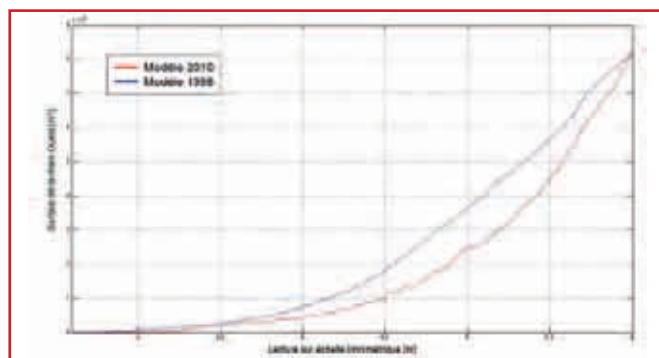
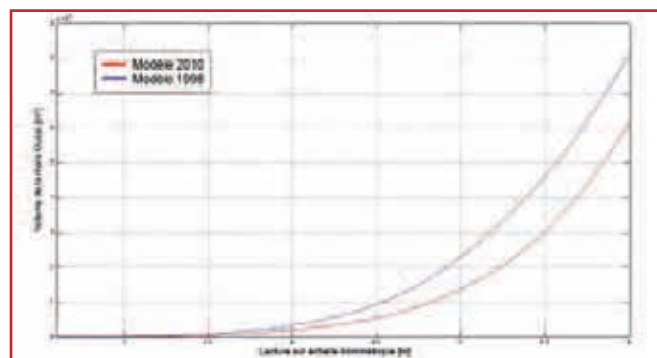


Figure 5. Calcul de cubatures par prismes pour trois points  $j = 1, 2, 3$ .



6a. Surface de la mare Ouest.



6b. Volume de la mare Ouest.

Figure 6. Courbes de conversion bathymétrique 2010 et 1998.

de Héron d'Alexandrie où  $a$ ,  $b$  et  $c$  sont les trois côtés du triangle plan :

$$A_i = \frac{1}{4} \sqrt{(a+b+c) \cdot (-a+b+c) \cdot (a-b+c) \cdot (a+b-c)} \quad (8)$$

La hauteur moyenne du prisme se calcule de la façon suivante :

$$h_i = \frac{1}{3} \cdot (e_{i1} + e_{i2} + e_{i3}) \quad (9)$$

En multipliant l'aire du triangle par la moyenne des hauteurs ellipsoïdales de chaque point diminuée de la hauteur ellipsoïdale du plan d'eau  $he_{eau}$ , on obtient le volume du prisme contenu entre le plan d'eau et le terrain naturel. Une valeur négative correspond à un volume sous le niveau d'eau et une valeur positive correspond à un volume au-dessus du niveau d'eau. Le volume total d'eau est égal à la somme du volume de chaque prisme  $i$  dont la valeur est négative.

$$V_{total} = \sum A_i \cdot h_i \quad \forall j \in N^*, h_i \leq 0$$

La comparaison (figures 6a et 6b) avec une courbe de conversion bathymétrique réalisée par les géophysiciens à partir du lever IGNN de décembre 1998, montre la perte du volume de la mare entre 1998 et 2010. L'écart observé pour une lecture du niveau d'eau supérieur à 5,2 m est supérieur à 10000 m<sup>3</sup>. Hormis une erreur due à un déplacement des échelles avec le temps et une erreur due à la différence des méthodes de détermination des courbes de conversion bathymétrique, cet écart montre l'apport de sédiments dans la mare.

## Comparaison des MNT

### ■ MNT 1992 et 2010

Afin de comparer le MNT 1992 exprimé dans le datum POINT58 avec le MNT 2010 référé en WGS84, le MNT 1992 a été recalé dans le système géodésique WGS84 projection UTM31N (figure 7) à partir des formules de Molodensky (Ferhat, 2010). La précision du recalage est limitée par la précision du vecteur translation entre le datum POINT58 et le datum WGS84 ( $\pm 25$  m) (NIMA, 2000).

Les altitudes aux coordonnées des points IGNN 1992 ont ensuite été interpolées à partir du MNT 2010 afin d'étudier le MNT différence 2010 - 1992 (figure 8). La valeur moyenne des écarts est de -0.79 m et l'écart-type est de 1.00 m. On observe une valeur maximale de l'écart entre les deux MNT (+3.05 m) au niveau de la ligne de crête reliant le plateau au

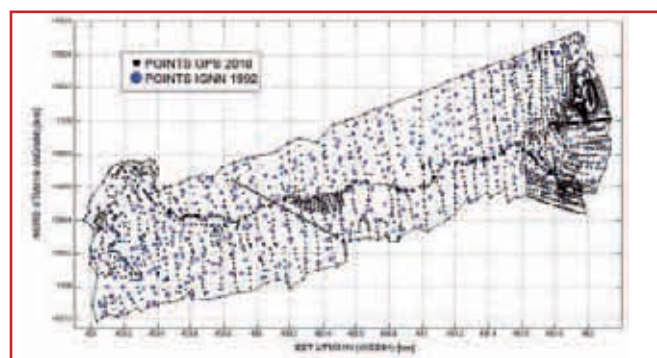


Figure 7. Semis de points 1992 et 2010.

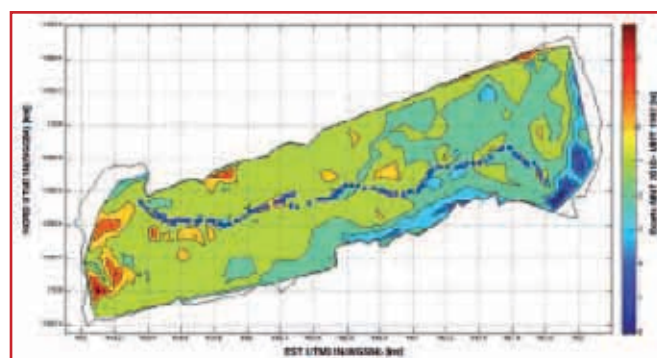


Figure 8. Ecart anormal du MNT différence 2010 - 1992, les points bleus marquent la ravine principale.

reste du bassin versant. Cela s'explique par la faible densité de points levés en 1992 (tableau 1) et la répartition spatiale des points (figure 7). Pour la partie aval du bassin versant, le MNT 1992 a tendance à être au-dessus du MNT 2010. On observe un écart de -6.00 m entre les deux modèles au droit de la ravine principale (cône d'épandage). Cet écart n'est pas en accord avec la réalité hydrologique de la zone qui se caractériserait plutôt par un apport de sédiments avec le temps.

La précision verticale que l'on peut espérer obtenir sur la détermination d'un écart se calcule par transmission d'erreurs moyennes quadratiques, emq. En considérant une emq de 1 cm sur une détermination tachéométrique de 1992, une emq de 2 cm sur la composante verticale de la position GPS et une emq sur l'ondulation du géoïde de 3 cm, on obtient une emq de 4 cm sur l'écart des MNT.

Les valeurs importantes des écarts observés laissent donc suggérer des erreurs dans le MNT 1992. De plus le passage du plan papier au plan numérisé, la digitalisation du semis de points et les transformations / conversions de coordonnées dégradent obligatoirement la précision des données. À ce stade de l'étude, le MNT 1992 ne peut être utilisé pour modéliser des phénomènes d'érosion.

## ■ Profils N-S 2007 et MNT 2010

Le MNT de 2007 est réalisé à partir d'observations GPS, tout comme le MNT 2010. Cela facilite la comparaison des données car la méthode d'acquisition est identique et aucune transformation de système géodésique n'est nécessaire. Cependant la répartition spatiale des données de 2007 (figure 9) ne permet pas une étude sur toutes les parties du bassin versant. Les hauteurs ellipsoïdales aux coordonnées des points des 13 profils nord-sud de 2007 ont été interpolées à partir du MNT 2010.

La comparaison par profils consiste à analyser les écarts

$$v = he_{2010} - he_{2007}$$

La moyenne des écarts est égale à -3 cm. L'écart-type est égal à 26 cm. Ce faible écart de -3 cm montre que les 2 MNT sont d'une part très proches, et qu'ils ont peu évolué en 3 ans. Toutefois quelques écarts supérieurs au mètre sont observés. Ils correspondent à des erreurs d'interpolation essentiellement dues à la différence de densité de points (le long des profils) entre les deux levés dans les zones où l'altitude varie brusquement (ravines secondaires non levées en 2010).

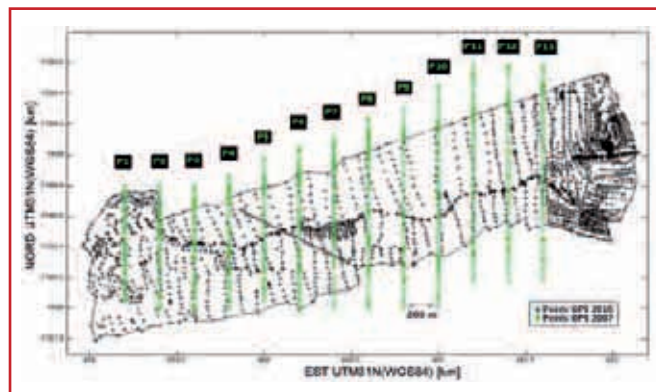
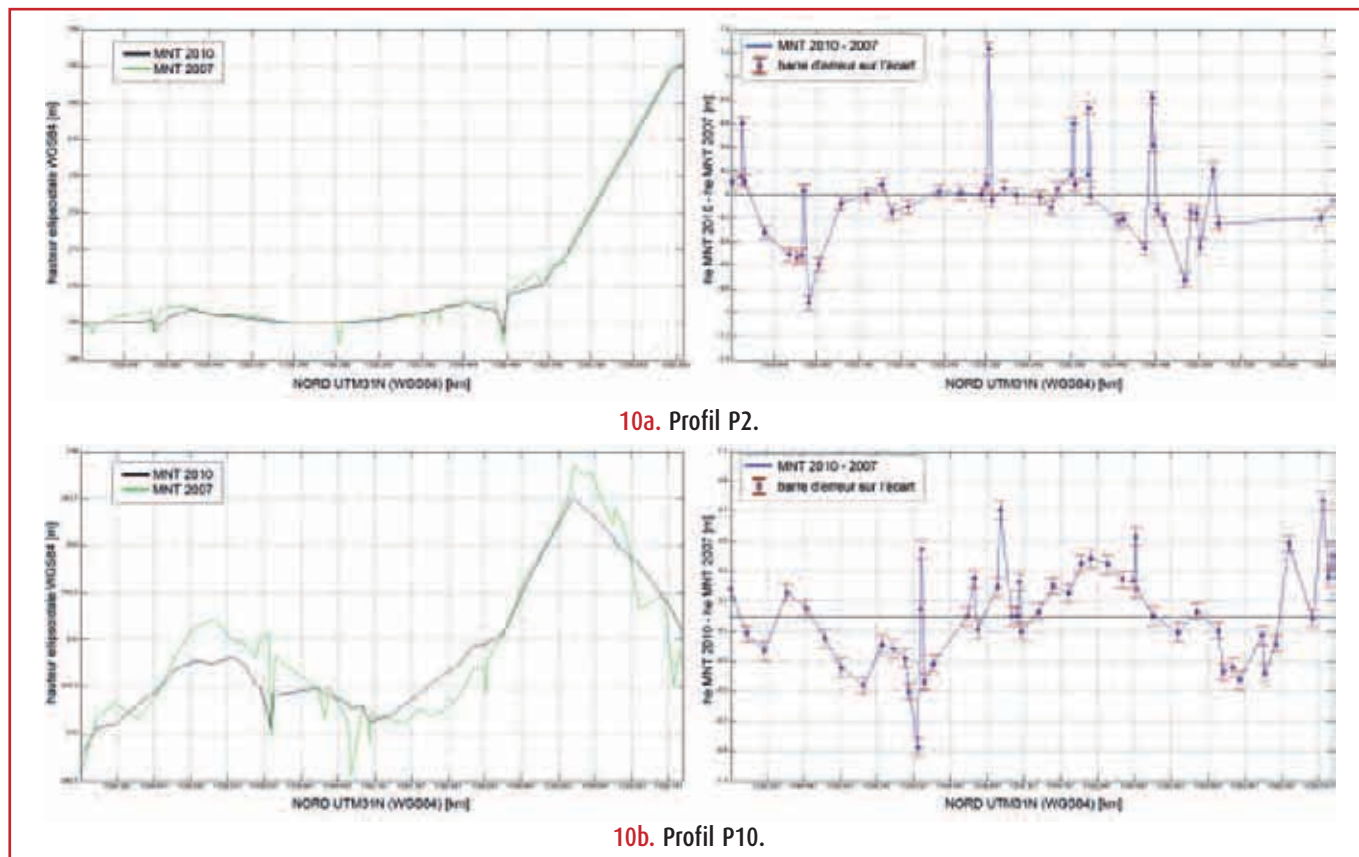


Figure 9. Semis de points 2007 et 2010 et localisation des 13 profils P1 à P13.

En tenant compte d'une précision de la composante verticale issue du GPS de 2 cm, un écart est considéré comme significatif (précision sur la détermination d'un écart à un intervalle de confiance  $2\sigma$ ) s'il est supérieur en valeur absolue à 6 cm. L'exemple du profil P2 (figure 10a) montre l'abrasion des versants à proximité des ravines. L'exemple du profil P10 (figure 10b) montre l'abrasion des versants à proximité de la ravine principale, l'abrasion des lignes de crêtes et le chargement des cônes alluviaux en sédiments.

## ■ La mare Ouest de 1998 à 2010

Afin d'observer l'évolution de la mare Ouest du bassin versant de Wankama de 1998 à 2010, le MNT 1998 a été recalé



10a. Profil P2.

10b. Profil P10.

Figure 10. Comparaison par profils entre 2007 et 2010.



dans le système géodésique WGS84 projection UTM31N à partir des formules de Molodensky (figure 11). La précision du recalage est limitée par la précision du vecteur translation entre le datum POINT58 et le datum WGSS84 ( $\pm 25$  m) (NIMA, 2000).

Les hauteurs ellipsoïdales aux coordonnées des points IGNN 1998 ont ensuite été interpolées à partir du MNTTIN 2010. La

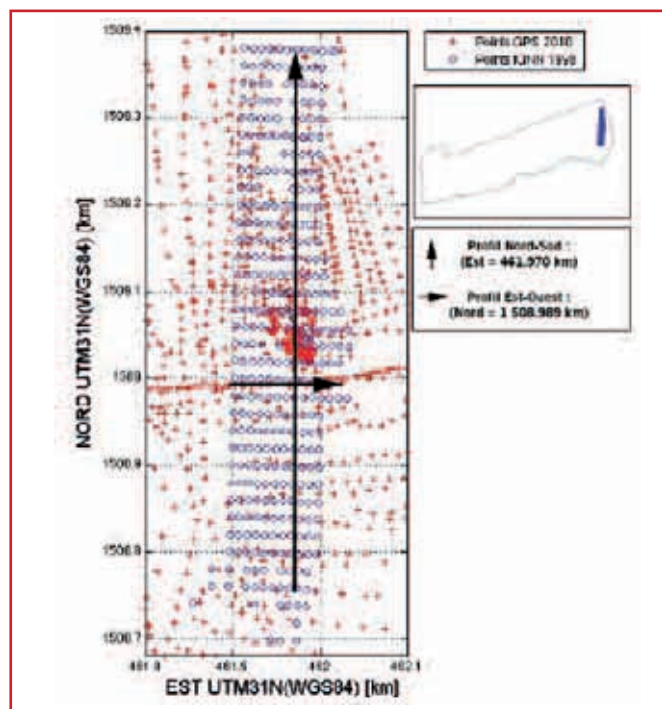
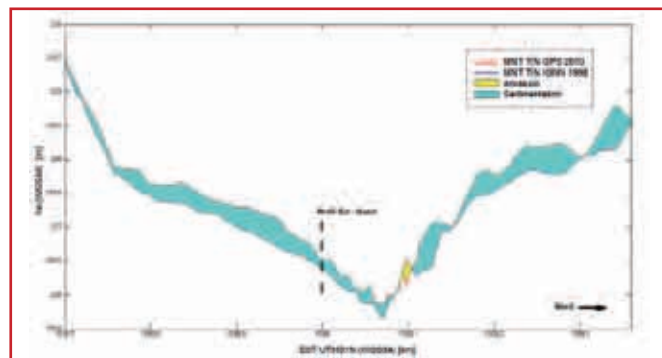


Figure 11. Semis de points 1998 et 2010.

moyenne des écarts observés ( $he_{2010} - he_{1998}$ ) est égale à +0,17 m avec un écart-type de 0,23 m. Les écarts extremums (+1,00 m et -1,14 m) correspondent aux zones d'érosion anthropique. En effet, dans ces zones, l'homme extrait l'argile de la mare pour réaliser des briques en banco, utiles à la fabrication de cases d'habitation.

L'analyse des profils Nord-Sud (figure 13a) et Est-Ouest (figure 13b) montrent l'apport de sédiments entre les deux périodes. Cette analyse est confirmée par l'ensablement des échelles limnimétriques avec le temps. Cela s'explique par le processus d'érosion. Lors de pluies intenses, le sol en amont



13a. Profil Sud-Nord.

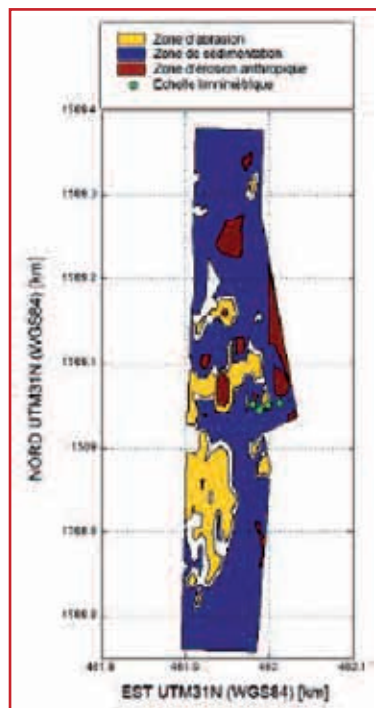
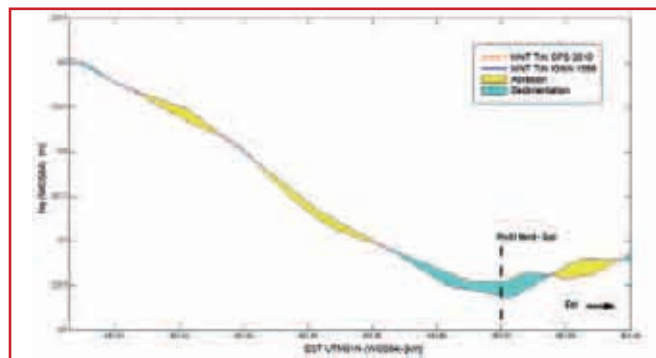


Figure 12. Zones potentielles d'érosion sur la mare Ouest de Wankama sur la période 1998 - 2010.

du bassin versant est abrasé. Les particules (sédiments) sont ensuite transportées par le ruissellement de surface et les ravines. Les particules s'accumulent alors dans la partie aval du bassin versant (mare), c'est la phase de sédimentation. A ce phénomène d'érosion hydrique s'ajoute le phénomène d'érosion éolienne (transport des particules par le vent). Le volume de sédiments calculé entre les deux MNT (sur 12 ans) est de 7 700 m<sup>3</sup>. Il correspond à un taux de sédimentation de 186 T/ha/an. Ce résultat dépend du recalage des données de 1998 (précision de  $\pm 25$  m) et de la précision verticale des deux MNT (centimétrique). Il reste en accord avec un taux d'érosion moyen maximum de 200T/ha/an pour le Niger (Warren et al., 2001). À partir du MNT différence, une carte des zones potentielles d'érosion a donc été réalisée sur la mare Ouest du bassin versant de Wankama (figure 12).

## Conclusion

Ce projet dresse la liste des différents MNT (1992, 1998, 2007 et 2010) disponibles sur le site de Wankama (Niger). A partir de ces derniers, il est possible de suivre plus ou moins précisément l'évolution de la topographie du bassin versant de Wankama. Des phénomènes de sédimentation sont visibles dans la mare Ouest sur la période 1998 - 2010. Sur la partie amont du bassin versant, la sédimentation et l'abrasion sont difficilement quantifiables étant donné les imprécisions liées au calage, à la digitalisation, et aux transformations de coordonnées.



13b. Profil Ouest-Est.

Figure 13. Comparaison par profils des MNT 1998 et 2010.

À partir du MNT précis de 2010, il sera possible dans le futur de quantifier précisément les zones d'abrasion et de sédimentation, et ainsi mieux comprendre l'évolution de la mare Ouest. Par ailleurs, les résultats de ce projet (MNT 2010, courbes de conversion bathymétrique) combinés à des mesures de piézométrie permettent d'effectuer un calcul précis des effets d'attraction gravitationnelle des stocks d'eau superficiels et souterrains. Dans sa globalité ce projet contribue à l'objectif du projet GHYRAF, à savoir mieux estimer les variations de stock d'eau dans le sous-sol depuis la zone désertique du Sahara à la zone de mousson intense du Bénin. Un projet similaire est envisagé sur un autre site du projet GHYRAF (Djougou, Bénin). ●

## Remerciements

Nos sincères remerciements à :

Mlle Julia Pfeffer pour son aide sur le terrain et pour ses connaissances techniques en hydrologie et gravimétrie ;  
M. Guillaume Favreau pour sa disponibilité lors des opérations de terrain au Niger ;  
M. Bodo Seyni pour ses qualités d'homme de terrain et son rôle de porte-mire lors du nivellement ;  
M. Bernard Cappelaere pour la mise à disposition des données de nivellement de 1998 et pour ses commentaires sur mes résultats ;  
M. Éric Le Breton pour la mise à disposition d'observations GPS acquises en 2007 dans le cadre de sa thèse ;  
M. Hassimi Adamou, directeur de l'IGN Niger, pour la mise à disposition de rapports d'études relatifs aux opérations de géodésie au Niger ;  
M. Samuel Nahmani, doctorant à l'IGN France, pour l'accès aux données de la station GPS permanente AMMA-GHYRAF de Niamey.

Tous nos remerciements à Pierre Genthon, Jean-Louis Rajot et Luc Descroix pour leur disponibilité et leurs connaissances en hydrologie, érosion et sédimentation en rapport avec le site de Wankama.

Nous remercions également tout le personnel de l'équipe GHYRAF et de l'équipe IRD à Niamey qui ont contribué aux opérations de terrain au Niger.

## Contacts

**Thibaud GENDRE** - Ingénieur INSA spécialité topographie  
Thibaud.Gendre@insa-strasbourg.fr  
**Gilbert FERHAT** - Enseignant-chercheur INSA de Strasbourg et IPGS  
Gilbert.Ferhat@insa-strasbourg.fr  
**Jacques HINDERER** - Directeur de l'IPGS, Institut de Physique du Globe de Strasbourg, UMR 7516 : CNRS / Université de Strasbourg,  
Jacques.Hinderer@unistra.fr  
**Guillaume FAVREAU** - Chargé de recherche, Institut de Recherche pour le Développement, UMR HydroSciences Montpellier  
Guillaume.Favreau@ird.fr  
**Bernard CAPPELAERE** - Chargé de recherche, Institut de Recherche pour le Développement, UMR HydroSciences Montpellier  
Bernard.Cappelaere@mpl.ird.fr  
**Eric LE BRETON** - Doctorant, laboratoire de Géographie Physique  
Pierre Birot, Université Paris 1

## Références

- AJCI et IGN Niger (1993)** - *Rapport de l'étude pour la réalisation de la carte topographique des régions du Djerma Ganda et des Dallols en République du Niger (Première année)*, Rapport Technique, Agence Japonaise de Coopération Internationale et Institut Géographique National du Niger.
- Cappelaere, B., Vieux, B.E., Peugeot, C., Maia, A. and Séguis, L., 2003.** *Hydrologic process simulation of a semiarid, endoreic catchment in Sahelian West Niger : 2. Model calibration and uncertainty characterization.* Journal of Hydrology, 279(1-4): 244-261.
- Duquenne, F., Botton, S., Peyret, F., Bétaille, D. et Willis, P. (2005)** - *GPS, localisation et navigation par satellites* 2<sup>e</sup> édition revue et augmentée, Numéro ISBN : 2-7462-1090-8, Hermes Sciences, 330 p.
- Ferhat, G. (2010)** - *Changement de système géodésique*, support de cours, INSA de Strasbourg, Topographie, 16 p.
- Gendre, T. (2010)** - *Évaluation de différents modèles numériques de terrain du site de Wankama (Niger) pour la restitution des stocks d'eau souterrains et superficiels*, Mémoire d'ingénieur spécialité topographie, Institut National des Sciences Appliquées de Strasbourg, 131 p.
- Leblanc, M. J., Favreau, G., Massuel, S., Tweed, S., Loireau, M. et Cappelaere, B. (2008)** - *Land clearance and hydrological change in the Sahel : Sud-Ouest Niger*, Global and Planetary Change, 61, p. 135-150.
- Hinderer, J. et GHYRAF team, 2009.** *The GHYRAF (Gravity and Hydrology in Africa) experiment: description and first results*, J. of Geodynamics, Volume 48, Issues 3-5, 172-181.
- Leduc, C., Schroeter, P. et Bromley, J. (1997)** - *Water table fluctuation and recharge in semi-arid climate : some results of the HAPEX-Sahel hydrodynamic survey (Niger)*, J. hydrol., 188-189(1-4), 123-138.
- NIMA (2000)** - *Department of Defense, World Geodetic System 1984, Its definition and relationships with local geodetic systems*, third edition, National Imagery And Mapping Agency.
- Peugeot, C., Cappelaere, B., Vieux, B.E., Séguis, L. and Maia, A., 2003.** *Hydrologic process simulation of a semiarid, endoreic catchment in Sahelian West Niger: 1. Model-aided data analysis and screening.* Journal of Hydrology, 219(1-4): 224-243.
- Warren, A., Batterbury, S. et Osbahr, H. (2001)** - *Soil erosion in the west african Sahel : a review and an application of "a local political ecology" a approach in south west niger*, Global environmental change, N11, p79-85.

## ABSTRACT

DEM, watershed, Niger, erosion  
This study is a part of the GHYRAF project (Gravity and Hydrology in Africa) aimed at better understanding the African monsoon from ground and satellite measurements on 4 sites along a north-south transect from Algeria to Benin. One of these sites is equipped with various geophysical and hydrometeorological instruments. This is the Wankama site, in Niger. To understand the changes in water storages in the Wankama watershed, it is necessary to have an accurate DTM and geophysical measurements at the surface (gravity, groundwater level). In February and April 2010, we conducted a topographic GPS survey (3156 points) on the entire watershed (2.54 km<sup>2</sup>). Based on this data and older data (1992, 1998, 2007), it was possible to highlight the evolution of the ground (abrasion of slopes, widening of gullies) and calculate a mean sedimentation rate between 1998 and 2010 of 186 T/ha/yr on the west pond of the watershed.