



Analyse des sédiments de la rivière du Toudgha et l'évolution de l'occupation du sol du bassin versant, (Flanc sud du haut Atlas central. Maroc)

Kamal El Badaoui¹, Ahmed Algouti², Abdellah Algouti³, Fatiha Hadach⁴

1Phd student, Laboratory of 2GRNT, Department of Geology, Faculty of Sciences, Cadi Ayyad university.
2Professor, Laboratory of 2GRNT, Department of Geology, Faculty of Sciences, Cadi Ayyad university.
3Professor, Laboratory of 2GRNT, Department of Geology, Faculty of Sciences, Cadi Ayyad university.
4Phd student, Laboratory of 2GRNT, Department of Geology, Faculty of Sciences, Cadi Ayyad university.

RÉSUMÉ

L'approche sédimentologique proposée est basée sur la caractérisation des sédiments du réseau hydrographique principal de l'Oued Toudgha aux alentours de la ville de Tinghir, située au piedmont sud du Haut Atlas central du Maroc. Les variations des valeurs des paramètres sédimentologiques calculés nous renseignent sur la régularité du niveau énergétique de l'agent de transport. Ces analyses sédimentologiques permettent d'obtenir des résultats très précis qui peuvent permettre de reconstituer l'histoire de la sédimentation et de déterminer les milieux de dépôt des grains. Ceci suppose une détermination scientifique de différents types de grains en fonction de la nature des dépôts. Aussi, l'analyse des images Landsat à différentes époques nous a permis de suivre l'évolution des formations végétales naturelles dans le couloir de la vallée d'Oued Toudgha. L'objectif est de mettre en évidence le changement spatio-temporel des groupements végétaux, l'évolution démographique et l'occupation du sol de la zone. Le processus d'interprétation des images a été l'identification visuelle des classes d'occupation du sol par la classification supervisée. La précision a été validée par la connaissance de terrain et à l'aide des images Google Earth. L'image prise en 1985 montre une distribution moins dense de la végétation le long des rives des oueds et dans quelques autres endroits vers l'aval, relativement à l'image Landsat de 2019 qui montre une distribution dense et élargie due soit à l'exploitation des nappes aux alentours des oueds soit par l'utilisation directe des eaux superficielles (précipitation). Ceci avec une évolution remarquable de l'espace bâti résultant d'une dynamique de l'urbanisation au sein de la plaine de Toudgha.

Mots clés : Haut-Atlas central, Tinghir, Analyses sédimentologiques, Télédétection, Oued Toudgha

Toudgha river sediments analysis and the land use evolution of the watershed, (southern flank of the central High Atlas. Morocco)

Abstract

The proposed sedimentological approach is based on the characterization of the sediments of the main hydrographic network of the Oued Toudgha, located at the southern flank of the central High Atlas of Morocco. The variations of the values of these sedimentological parameters provide information on the regularity of the energy level of the transport agent. These sedimentological analyses allow us to obtain significant results that can be used to reconstruct the history of sedimentation and to determine the depositional environments of the grains. This implies a scientific determination of different types of grains according to the nature of the deposits. Also, the analysis of Landsat images at different times has enabled us to follow the evolution of land cover in the Oued Toudgha valley. The objective is to highlight the spatio-temporal change of vegetation cover, demographic evolution and land use in the area. The process of image interpretation has been the visual identification of land use classes through supervised classification. Accuracy was validated by field knowledge and by using Google Earth images: the 1985 image shows a less dense distribution of vegetation along the banks of the river and in other places in the downstream, compared to the Landsat 2019 image which shows a dense and widened distribution due either to the exploitation of groundwater in the vicinity of the river or to the direct use of surface water (rainfall). This with a significant evolution of the built area resulting from a dynamic of urbanization within the Toudgha plain.

Keywords: Central High Atlas, Tinghir, Sedimentological analyses, Remote sensing, Wadi Toudgha

¹ Corresponding author: kamalelbada@gmail.com

INTRODUCTION

Le bassin versant d'Oued Toudgha fait partie du bassin Ziz-Ghris qui correspond à une dépression tectonique d'effondrement mésozoïque. Elle est bordée au nord par les reliefs du Haut Atlas central et au sud par ceux de l'Anti Atlas. La rivière de l'Oued Toudgha draine la partie sud du Haut Atlas central, ce bassin contrôlé par la station hydrologique de Tamtattouch, située à l'amont des gorges de Toudgha à 20Km au nord et celle d'Ait Boujjane qui se trouve en zone des collines au sud des gorges. L'Oued Toudgha alimente la palmeraie de Tinghir, traverse ensuite la palmeraie de Tinjdad. Il reçoit, en rive gauche, l'Oued Tanguerfa. Il prend alors le nom de l'Oued Ferkla. La vallée du Toudgha apparaît plus ouverte dans sa partie aval. Tandis, qu'elle devient plus encaissée dans sa partie amont. Cela nous permet de subdiviser le bassin en trois domaines en se basant sur le relief global : Un domaine à haute montagne, montrant des reliefs à haute altitude, un deuxième domaine intermédiaire caractérisé par des reliefs assez importants, et un domaine caractérisé par des dépressions altitudinales (cuvettes). Le relief est globalement diversifié avec des terrains accidentés dans les parties nord et nord-ouest au Haut Atlas et sud-ouest au niveau de l'Anti-Atlas ; les plateaux sont localisés dans la partie centrale en particulier dans le sillon pré-africain ; tandis que les plaines sont occupées par des terrains sédimentaires d'âge quaternaire à la plaine de Tafilalt, oasis de Goulmima, Ferkla et de Ghellil. La carte de pentes montre les variations de la pente topographique du bassin versant de Toudgha. Elle permet de le subdiviser en trois parties en fonction de leur influence sur l'écoulement superficiel des eaux : Une partie Nord, appartient à la zone de haute montagne (les falaises jurassiques), elle comprend des pentes forte ; l'accélération du ruissellement est donc importante: les eaux s'écoulent à toute vitesse, chute des blocs... Une partie intermédiaire avec des pentes moyenne (massif de anti-atlas au sud) et la troisième partie qui se situe à la partie centrale du bassin et à l'est, comprend des pentes faible, leurs influence sur l'écoulement est faible. Le profil de pente hydrographique montre la variation de la pente le long de l'Oued Toudgha, il permet de le subdiviser en deux parties, la première avec une pente forte dans la face amont (NS) favorise l'accélération du ruissellement et l'autre faible en aval (WE). Les formations géologiques dans la zone d'étude sont constituées principalement de plusieurs unités, la plus ancienne d'âge précambrien situé au sud-ouest de bassin de Toudgha. Composée de séries sédimentaires et volcano-sédimentaires présentant des intrusions calco-alcalines. L'ensemble de cette zone a été affecté par un métamorphisme régional de faible intensité (Marini et Ouguir.1990, Gaber.1991, Fekkek.1992, Benkirane. 1987) ; suivi par des grès-quartzitiques et schistes d'âge paléozoïque (Cambro-ordovicen) et de terrains à dominance calcaire d'âge mésozoïque (jurassique et cretacé) (Margat 1962). Les affleurements d'âge tertiaires bordent l'Oued Toudgha au Nord de Tinghir. Ils sont formés essentiellement de calcaires, de grès-calcaires plus au moins consolidés et de grès blancs ou violacés tendres et mal consolidés. Le quaternaire récent est formé d'éboulis de pentes et d'alluvions qui bordent le parcours de Toudgha constitué essentiellement de limons [15]. Il ressort que le bassin versant de Toudgha est formé essentiellement par des terrains perméables à semi-perméables qui occupent la presque totalité de la superficie du bassin, ce qui favorise l'infiltration des eaux de surface et déclenchement d'érosion hydrique.

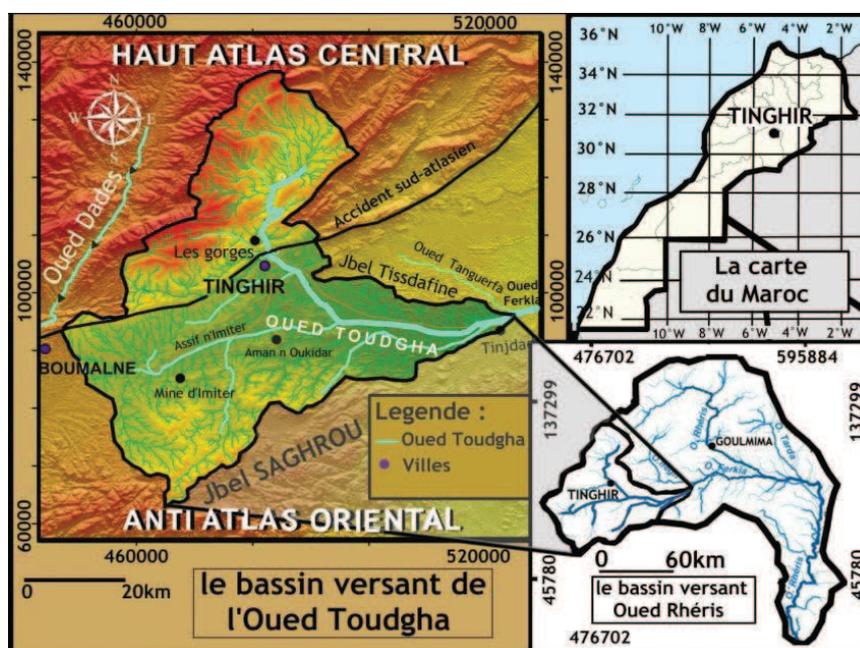


Figure 1 – Situation géographique du bassin versant de l'Oued Toudgha

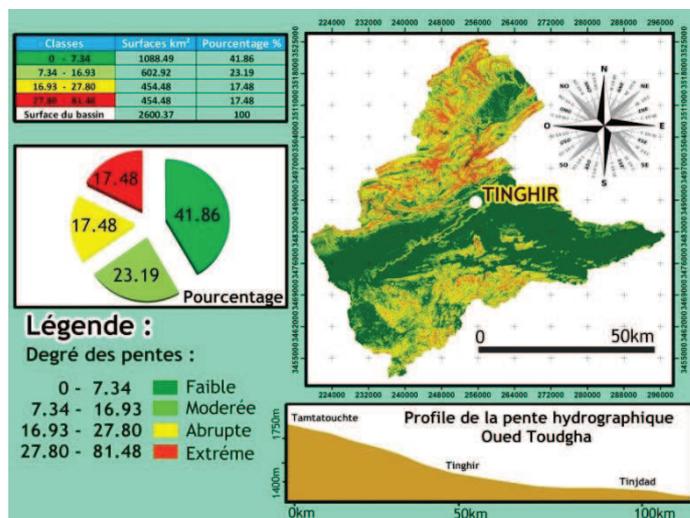


Figure 2 – La carte des pentes de bassin versant de l'Oued Toudgha

MATÉRIELS ET MÉTHODES

Plusieurs sources de données ont été exploitées afin de cartographier les caractéristiques de terrain d'étude :

- Cartes topographiques 1/100 000: BOUMALNE, TINERHIR , ALNIF et TINJDAD.
- Cartes géologiques : 1/200 000 JBELSAGHRO-DADES, TODGHA-MA'DER. 1/100 000 TINEGHIR et TINJDAD.
- Modèle Numérique de Terrain ALOS PLASAR avec une résolution de 12.5 m.
- Images Landsat : Landsat 8 Oli/Tirs 1ere image, Date d'acquisition : 2019-01-16.image Landsat 4 TM, Date d'acquisition : 08-04-1985.

La méthodologie contribué est l'ensemble des techniques permettant d'exploiter et d'interpréter les données granulométriques, l'étude morphoscopique et exoscopique des grains de quartz ainsi que la minéralogie des argiles compléter par une étude comparative des images satellitaires de la zone. Les méthodes sédimentologiques d'analyse et d'interprétation des données granulométriques se révèlent difficilement transposables au domaine purement fluvial. Afin de tenter d'expliquer les processus intervenant dans le dépôt des sables de l'Oued Toudgha, nous avons entrepris une étude générale de la granulométrie des sables de ce cours d'eau. Les prélèvements des échantillons ont été effectués le long de la rivière ; pour pouvoir localiser les paramètres du bassin influençant la variabilité granulométrique du bassin, on a figuré ci-dessous les points d'échantillonnages.

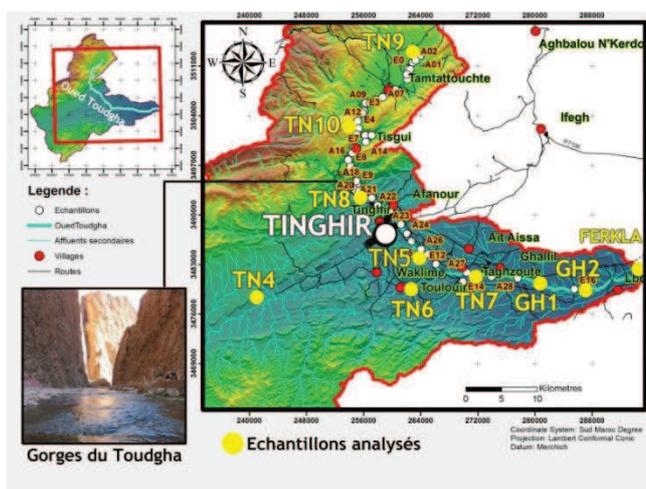


Figure 3 - Situation des prélèvements des échantillons analysés

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Caractéristiques granulométriques : Un certain nombre des courbes granulométriques ont été établies à partir de la mesure par comptage des fractions des sédiments et du calcul des écarts empiriques des échantillons prélevés le long d'oued (entre la station TN9 en amont et Ferkla en aval). La présentation des courbes cumulatives résume l'évolution de la distribution granulométrique des différents échantillons récoltés : les sédiments de la face amont sont bien classés, représentés par des sables à fraction grossière. Tandis que les sédiments de la face aval sont représentés par des sables mal classés. Les courbes cumulatives des échantillons, (TN9, TN6, TN4, HA1, TN7) montre une distribution hétérogène, le sable est mal trié ; caractérise deux apports de nature différents ou une zone de confluence de nature minéralogique différentes. L'analyse granulométrique des sédiments de cours d'eau ne présentent pas une taille de grain unique, mais sont formés d'un mélange de grains de tailles différentes. Le mélange est entièrement défini par des courbes de répartition granulométrique. La variation de la granulométrie cumulée est généralement tributaire des changements de topographie, elle est conditionnée par le transport préférentiel des sédiments fins et la diminution de la pente du lit vers l'aval.

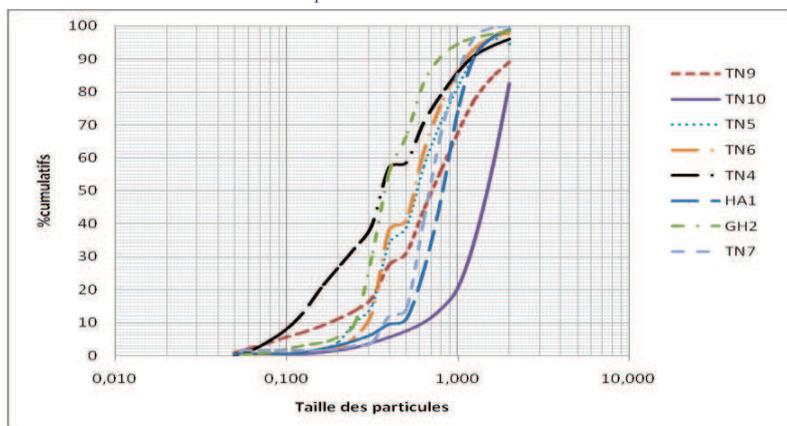


Figure 4 - Courbes granulométriques cumulatives des échantillons

Les indices granulométriques : Pour le calcul des paramètres et les indices des sables, nous avons eu recours à différentes approches granulométriques (Mastersizer, 2000 ; Folk et Ward, 1957; [17]; Rivière, 1977; [11]; [2]; [16]; Triat, 2012 ; [12] ; [8].

- Indices de Trask :

Tableau 1 : Valeurs des indices de Trask.

ID	S0	SK	Moy	Coef d'acuité
TN9	1.69	0.845	0,675	0,26
TN10	1.648	0.953	1,51	0,25
TN5	1.593	0.977	0.679	0,31
TN7	1.28	1,04	0.73	0,25
GH1	1.23	0.622	0.336	0,21
TN2	1.472	0.883	0.238	0,25
TN4	1,95	1,29	0.512	0,27
TN6	1.50	0.942	0.586	0,26

- Indices de Inman:

Tableau 2 : Valeurs des indices de Trask.

ID	Moy(ϕ)	Hétérométrie $\sigma \phi$	Coef d'asymétrie $As\phi$
TN9	0,735	1,04	-0,1096
TN10	0,248	0,756	1,097
TN5	0,592	0,913	0,108
TN7	0,442	0,394	0,128
GH1	0,9	0,249	2,66
TN2	1,241	0,62	0,407
TN4	1,365	1,36	0,06
TN6	0,789	0,797	0,069

Le diagramme de corrélation (Fig.5) de l'indice d'asymétrie « Sk » (Tableau 1) a été établi à partir de la mesure des fractions des sédiments pour caractériser la variabilité de Sk en fonction de la distance amont aval.

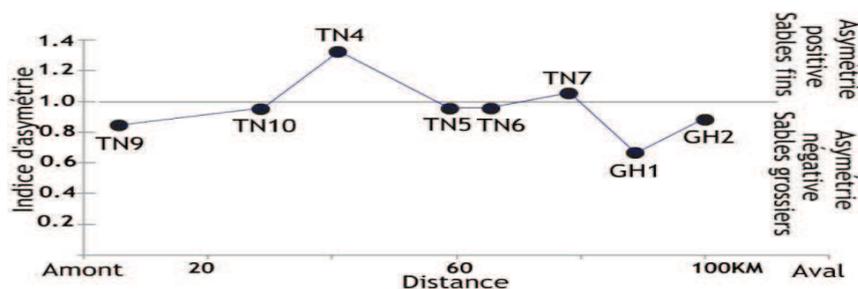


Figure 5 : Evolution de l'indice d'asymétrie de Trask (Sk).

Le graphe (Fig.5) met en évidence une sédimentation de sable de plus en plus fine de l'amont vers l'aval, les points d'échantillonnage (TN9, TN10, TN5, GH1, GH2, TN6), appartiennent au domaine d'asymétrie négative caractérisant une sédimentation grossière, ils sont expliqués par l'énergie très forte engendrée par une forte obliquité de pente. Par contre TN7, TN4 appartiennent au domaine positif caractérisant une sédimentation des sables fins ayant une énergie faible.

Le diagramme de corrélation de l'indice de classement « S0 » a été établi à partir des mesures des fractions des sédiments pour caractériser la variabilité de ce paramètre en fonction de la distance (Fig.6).

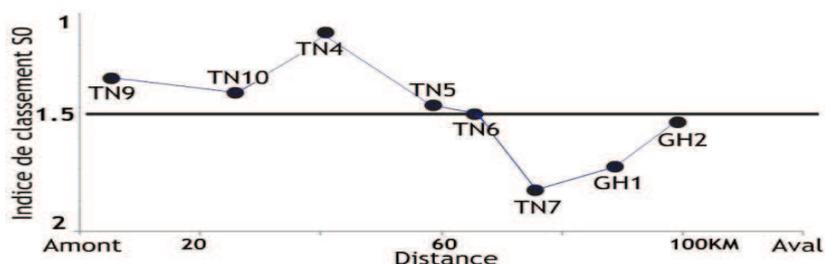


Figure 6 : Evolution de l'indice de classement par rapport à leur distance hydrographique

L'analyse de ce graphe montre deux domaines à interprétation distincte ; le premier avec $S0 \leq 1,5$ caractérise les sédiments de très bon classement ; il montre que la dynamique du transport est la même. Le deuxième avec $S0 \geq 1,5$ indique le bon classement des sables récoltés. Le champ de variation global de l'indice de classement est compris entre 1,95 et 1,23 ; ce qui confirme le bon classement (Fig.6), en general (si $1 < S0 < 2,5$ donc les sédiments sont bien classés). La variation de la distribution granulométrique des sables montre une liaison aux processus intervenant dans l'écoulement ; irrégularité du fond, accélération de l'écoulement sur la face amont et ralentissement sur la face aval, frottement sur le fond et de pente. La mobilisation des grains s'organise selon l'intensité de l'écoulement qui le met en mouvement en-deçà d'un certain seuil, l'écoulement est trop faible pour faire déplacer les sédiments, alors que la mobilisation des sédiments grossiers nécessite des pentes des lits plus fortes ou des conditions hydrauliques extrêmes.

La morphométrie : Depuis la publication par [5] d'une méthode simple de mesure de galets permettant le calcul des trois indices granulométriques (d'émoussé, d'aplatissement et de dissymétrie), l'on dispose de bons critères permettant, non seulement de caractériser la forme du galet mais aussi de décrire son histoire [4]. Les résultats de mesure des indices morphométriques, ont permis de déterminer les paramètres du bassin influençant la variabilité morphométrique d'Oued Toudgha. Pour l'ensemble des échantillons, on dresse les courbes cumulées pour déduire les indices moyens d'émoussé et d'aplatissement.

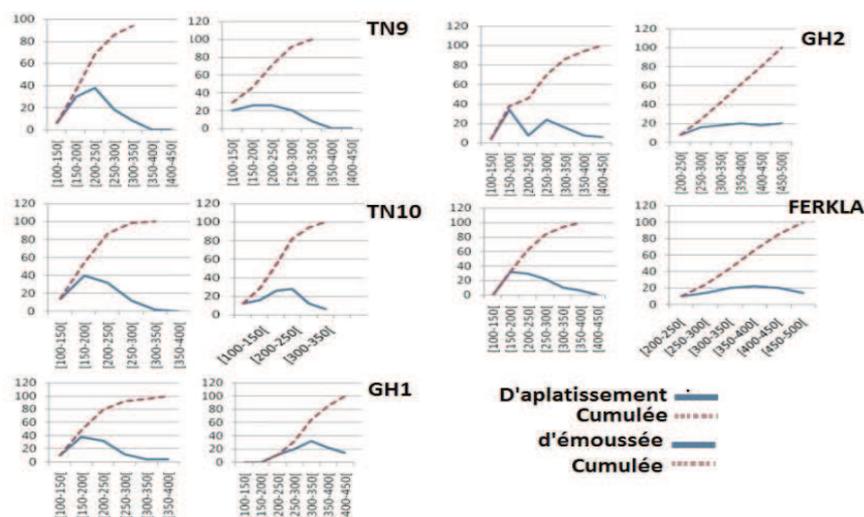


Figure 7 : Courbes de fréquences simples et cumulées de l'indice d'aplatissement et d'émoussé d'échantillons

Un diagramme reportant l'indice d'aplatissement en fonction de la distance de l'amont à l'aval a été établi pour caractériser la variabilité de ce paramètre le long de l'Oued (fig.8).

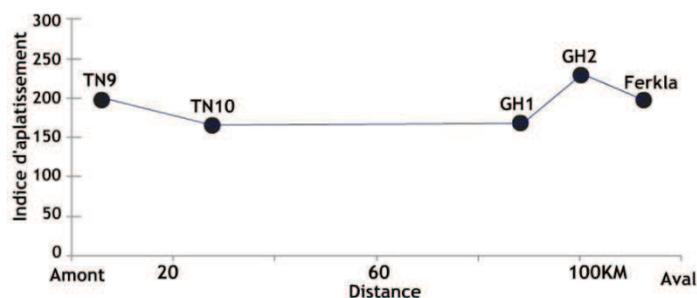


Figure 8 : Evolution de l'indice d'aplatissement par rapport à la distance hydrographique

La figure 8 montre la variation spatiale de l'indice d'aplatissement de l'amont vers l'aval. Elle montre une faible diminution de la forme aplatis des éléments jusqu'à 80km vers la face aval. La valeur élevée de GH2 correspond à un nouvel échantillon recolté après une confluence d'un affluent secondaire de nature minéralogique différente.

Le diagramme de corrélation de l'indice d'émoussée été établi pour caractériser sa variabilité en fonction de la distance (Fig.9).

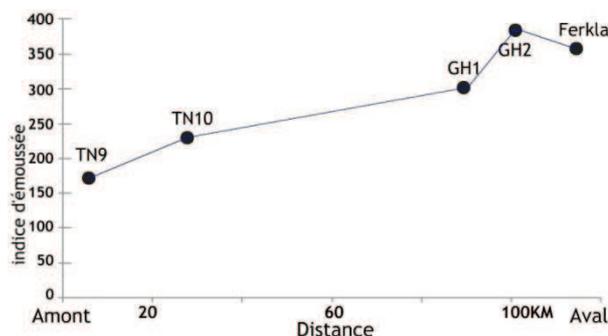


Figure 9 : Evolution de l'indice d'émoussée le long d'oued.

La figure 9 montre que l'indice d'émoussée augmente rapidement allant vers la face aval de TN9 à GH2, avec une diminution remarquable au-delà de GH2 (100 km) due au mélange et l'apport des affluents des galets du nature pétrographique différente. On remarque que l'indice est variable selon le façonnement par l'agent de transport et les propriétés physiques des roches. La variation des indices d'aplatissement et d'émoussée s'explique par le fonctionnement hydrosédimentaire d'Oued Toudgha : l'aplatissement en général diminue le long de l'Oued par opposition à l'indice d'émoussée qui augmente.

La nature pétrographique le long de l'Oued

Une étude le long de l'Oued de Toudgha a été faite pour pouvoir déterminer la variabilité pétrographique des échantillons récoltés. Son principe consiste à déterminer les différentes classes pétrographiques rencontrées lors des prélèvements de galets dans le lit de l'Oued.

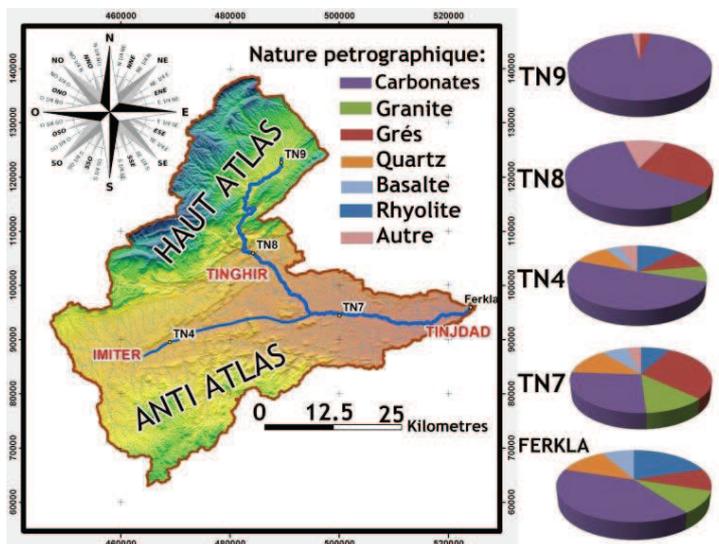


Figure 10 : evolution de la nature pétrographique le long d'oued Toudgha

De l'amont vers l'aval on remarque une diversification des classes pétrographiques. Ceci est dû à l'érosion des différents terrains que le cours d'eau a traversés. Les zones de provenance sont caractérisées par une rareté des classes pétrographiques, par contre les parties distales montrent une plus grande diversité avec augmentation des taux des roches magmatiques, et diminution des roches carbonatées.

L'étude morphoscopique à la loupe binoculaire (Cailleux et Tricart, 1963) est appliquée aux grains de quartz, pour les fractions comprises entre 315 microns et 2 mm. Elle est réalisée sur un fond noir afin de bien distinguer la forme et l'aspect des grains de quartz.

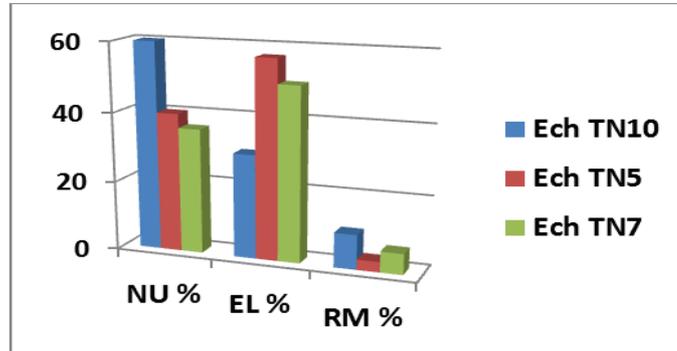


Figure 11 : Evolution de l'aspect des grains au long de l'Oued Toudgha.

Les résultats sont reportés dans la figure 11 et ordonnés selon la nomenclature suivant : NU - Grains non usés ; EL - Grains émoussés luisants ; RM - Grains ronds mats.

Au niveau de l'amont (TN10), les grains sont peu usés et présentent des formes anguleuses et des aspects luisant ou mat (NU dominant). Plus bas (TN5 et TN7) les grains montrent une usure plus marquée avec une majorité de grains de type EL à l'aspect de surface très poli, brillant ou luisant. Ils résultent d'une longue usure mécanique dans l'eau.

Pour l'échantillon TN7, localisé après la confluence entre l'Oued Toudgha et l'Oued Taghia, les grains présentent deux aspects différents luisant et mat, ce fait est expliqué par l'origine différente des sables alimentant la station de prélèvement TN7 (alimentation par des affluents secondaires).

D'après le fig.11, les grains non usés diminuent de l'amont vers l'aval, cette variation s'expliquerait par le transport des sédiments ; les grains non usés perdent leurs caractères avec le transport aquatique. Réciproquement, les grains émoussés luisants augmentent. Les grains ronds mats sont toujours peu abondants et traduiraient un apport éolien.

Les grains de quartz destinés à l'étude exoscopique ont été sélectionnés à la loupe binoculaire et la méthode utilisée à l'identification est celle développée par [10]. L'analyse des grains de quartz confirme les constatations faites par l'étude morphoscopique qui révèle la dominance des grains émoussés.

En général, les grains de quartz ont été transportés par l'eau. Les grains émoussés luisants, présents surtout dans la partie distale du cours d'eau, sont charriés à partir du sable d'âge Paléogène. Pendant la précipitation, l'eau piégée dans les dépressions devient très concentrée en silice et du fait de l'évaporation (augmentation de température), les précipitations siliceuses de différentes formes se mettent en place (cristaux et globule de silice).

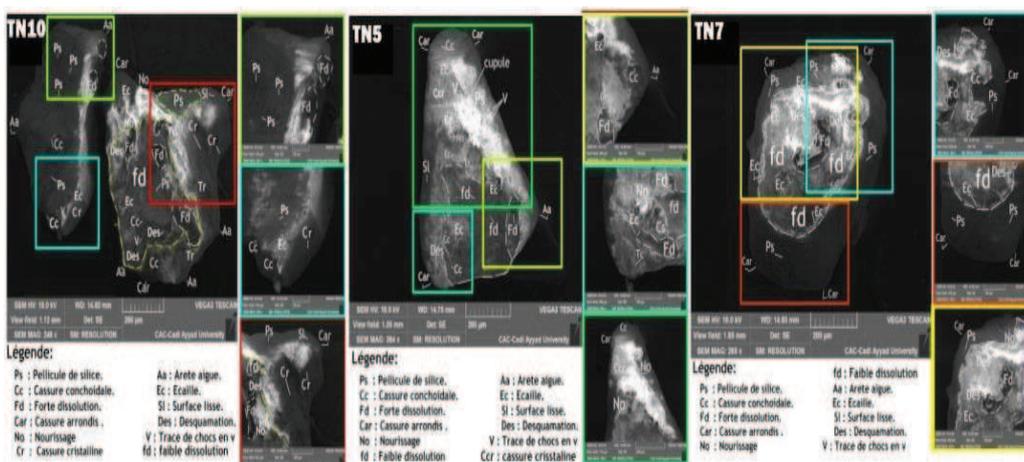


Figure 12 : Evolution de l'aspect des grains au long de l'Oued Toudgha.

Echantillon TN10 en amont du bassin : grain anguleux : Le premier environnement d'évolution correspond à un milieu torrentiel à très forte énergie se traduisant par de nombreuses cassures conchoïdales affectant toute la surface du grain (Fig.12). Suivi d'une immobilisation au niveau d'un horizon pédologique sursaturé en silice qui conduit à la formation d'une épaisse pellicule de silice en coulée qui recouvre complètement la surface du grain (arêtes, surfaces planes et cavités).

Par la suite, une forte dissolution se manifeste par des cavités essentiellement par une importante desquamation libérant une quantité d'écaillés. Aussi un certain polissage des traces de chocs est observé.

Echantillon TN5 : Grain sub-anguleux : Le milieu fluvial torrentiel se traduit par des cassures conchoïdales qui sont réalisées par une forte énergie de torrent à cause des chocs entre les grains (Cc) (Fig. 12). Le déplacement du grain dans un milieu fluvial de forte à moyenne énergie provoque la dissolution de la silice (le mélange des eaux favorise la diminution de la teneur en silice dans le milieu), avec une forte usure mécanique et un brassage qui guide à l'arrondissement des contours du grain (Fig. 12). Suivi d'un niveau pédologique. La baisse de l'énergie hydraulique provoque l'immobilisation du grain donc la formation d'écaillés sur la surface du ce dernier et son stabilité, ce milieu permet la formation d'une pellicule de silice qui vient postérieurement de toutes les structures précédentes,

Echantillon TN7 : Grain émoussé luisant : Les restes d'une pellicule de silice amorphe recouvrant toute la surface de grain sont observée (Fig.12), sauf au niveau des zones de contact avec les autres grains (contours du grain). Ces caractéristiques indiquent une altération chimique au sein de la roche mère suivie d'une importante dissolution par desquamation de la pellicule de silice initiale. La desquamation libère une grande quantité d'écaillés par attaque de toute la surface du grain. Ce phénomène s'est réalisé en milieu subaquatique, avec un fort brassage ce qui donne un bon mélange des eaux et donc la sous-saturation en silice reste la caractéristique du milieu d'évolution. Cette dissolution contribue fortement à l'arrondissement des contours en provoquant la forme subarrondie du grain de quartz.

Minéralogie des sédiments d'Oued Toudgha

Pour la minéralogie des argiles, nous avons utilisé la méthode mise au point par [7]. La détermination du cortège minéralogique des sédiments s'est faite par diffractométrie pour la fraction fine et par analyse à la loupe binoculaire pour la fraction grossière. La figure 13 présente un diffractogramme dont les pics correspondent aux différents minéraux des 3 échantillons analysés : (E3, E16, A23) :

- E3 : Spectre de diffraction de la fraction fine en amont ;
- E16 : Spectre de diffraction de la fraction fine de la partie centrale du bassin ;
- A23 : Spectre de diffraction de la fraction fine en aval.

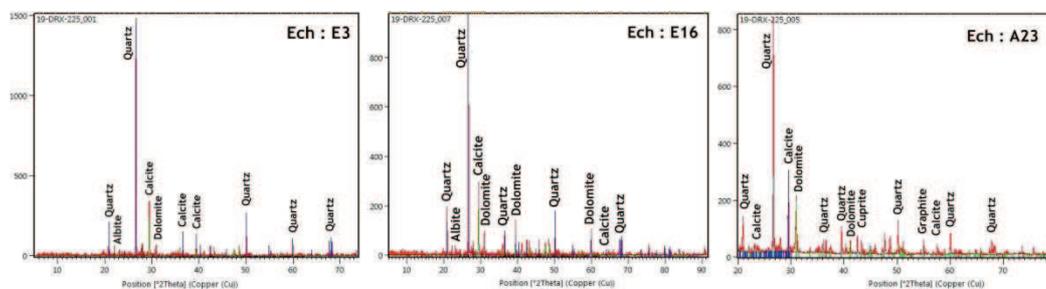


Figure 13 : Spectre de diffraction de la fraction fine des échantillons (E3, E16, A23).

Le spectre de diffraction de l'échantillon E3 (amont du bassin) présente un cortège minéralogique qui se compose de calcite, dolomite, quartz et albite. L'analyse de la fraction grossière à la loupe binoculaire met en évidence un cortège minéralogique qui se compose de quartz, feldspaths et autres. Le spectre de diffraction de l'échantillon A23 (aval du bassin) présente un cortège minéralogique qui se compose de quartz, calcite, dolomite, cuprite et graphite. La fraction grossière des sédiments présentent un cortège minéralogique qui se compose de quartz, feldspaths, calcite, biotite et autre. Le quartz, très abondant, a une proportion de 50 %. La calcite est le second minéral. Cette composition minéralogique montre des différences entre la partie amont située dans le Haut-Atlas carbonatés (dolomie, calcaires) et la partie aval située dans l'Anti-Atlas, caractérisé par des minéraux pouvant provenir des altérites des roches du socle précambrien (roches volcaniques et plutoniques). L'étude des minéraux non argileux et celle des phases argileuses, s'accordent pour montrer que les sources des sédiments du bassin versant de l'Oued Toudgha sont principalement les grès et des schistes ainsi que des formations carbonatées et magmatiques.

Traitement des images satellitaires : Selon [9] la détection des changements des zones peut se faire en observant à des dates différentes une même zone afin de comprendre l'évolution temporelle de cette dernière. Plusieurs études [3]; [6]; Tanina et al., 2013) ont montré que l'évolution de l'occupation du sol est liée à des facteurs, soit topographiques, climatiques , la

nature des sols et aussi anthropique, l'analyse des images Landsat à différentes époques nous a permis de suivre l'évolution des formations végétales naturelles dans le couloir de la vallée d'Oued Toudgha. L'objectif est de mettre en évidence le changement spatio-temporel des groupements végétaux, l'évolution démographique et l'occupation du sol dans la zone.

Le processus d'interprétation des images a été le suivant : identification visuelle des classes d'occupation du sol par la classification supervisée. La précision a été validée par la connaissance de terrain à l'aide des images Google EarthTM. L'image prise en 1985 montre une distribution moins dense de la végétation (couleur rouge) le long des rives des oueds et dans quelques autres endroits vers l'aval, relativement à l'image Landsat de 2019 qui montre une distribution dense et élargie due soit à l'exploitation des nappes aux voisinages des oueds soit par l'utilisation directe des eaux superficielles (précipitation). Ceci avec une évolution remarquable de l'espace bâti résultant d'une dynamique de l'urbanisation au sein de la plaine. La classification multi-spectrale des images Landsat par maximum de vraisemblance (Fig. 15A-B) permet une bonne identification des différentes classes avec une précision globale satisfaisante. Les surfaces de végétation (couleur verte) ont cru de plus de 17,31km², la zone urbaine (couleur noire) s'est développée de 9,08km² pendant ces 34 années. De 1985 à 2019 on déduit que la végétation au Sud du Haut-Atlas central s'est développée de même que celles des surfaces bâties.

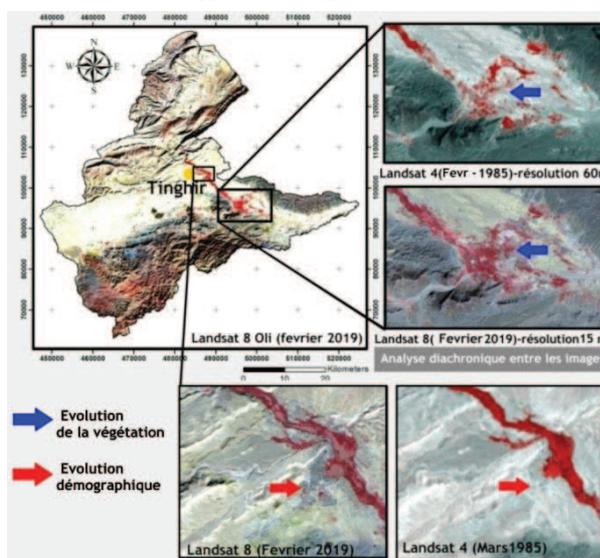


Figure 14 : Analyse diachronique entre les images Landsat de 1985 et 2019 au voisinage de l'Oued Toudgha.

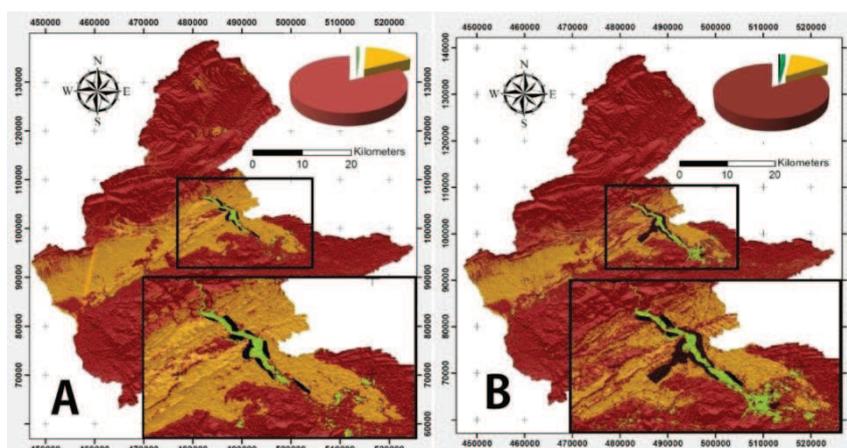


Figure 15 : A : carte d'occupation du sol du bassin en 1985 pour l'image Landsat 4 TM. B : carte d'occupation du sol en 2019 pour l'image Landsat 8 Oli.

Tableau 3 : Evolution de l'occupation du sol entre 1985 et 2019 au bassin versant de l'Oued toudgha

Classes	Surface(km ²)		%	
	1985	2019	1985	2019
Année				
Zone bâtis	4.42	13.50	0.19	0.59
Végétation	15.61	32.92	0.68	1.43
Sol nu (sédiments)	385.14	324.14	16.71	14.07
Substratum (roches)	1899.29	1933.90	82.42	83.92
Total	2304.46	2304.46	100	100

Discussion générale :

De la source de l'Oued Toudgha jusqu'à l'aval, l'évolution des indices granulométriques montre une variation brutale d'un échantillon à l'autre, il n'y a pas d'évolution franche. Cette évolution anarchique peut être expliquée par :

- La variation de la compétence de l'Oued lors du dépôt des sédiments. Elle est forte pour des dépôts grossiers et faible pour des dépôts de sédiment fin. L'hydrodynamisme est influencé par la pente élevée de l'Oued à l'amont ainsi que le climat (les crues).
- La proximité des formations géologiques sources des sédiments. Les dépôts de l'amont sont en général grossiers donc peu évolués parce qu'ils sont proches des formations carbonatées du jurassique. Cependant certains échantillons de l'amont ont un excès de sédiments fins dans les classes granulométriques. Ceci peut s'expliquer par un apport des formations silto-argileuses non loin des sites de prélèvement (érosion des berges).
- Apport des affluents et des torrents. Il est noté que les échantillons prélevés après les confluences du chenal principal avec les affluents montrent une augmentation de la fraction grossière ou fine selon la nature de l'apport de l'affluent et ou du torrent. Les échantillons GH1 et GH2 de l'affluent d'Ichem, TN4 de l'affluent Imider, chargent l'Oued Toudgha en sédiments grossiers en provenance des grès du paléozoïque, et des roches magmatiques du précambrien et paléozoïque.

D'une manière générale, la loi de l'affinité granulométrique et du meilleur classement des sédiments d'un cours d'eau, de l'amont vers l'aval [14] n'est pas respectée, car de l'amont vers l'aval, les sables ont un classement anarchique. La variation spatiale des indices granulométriques démontre que ce n'est pas le même stock de sédiment qui est transporté de l'amont à l'aval. Ce dernier est influencé par des apports des formations préexistantes érodées à la traversée de l'Oued et aussi les apports des différents affluents. La pente, la morphologie de l'Oued et le climat influencent le type de dépôt en jouant sur la compétence de l'agent de transport. L'étude des indices granulométriques nous a donc permis à ce stade de suivre l'évolution des dépôts alluviaux et de les caractériser de point de vue granulométrique au niveau de l'Oued Toudgha. Les variations morphologiques et de l'aspect des grains de quartz suggère que le stock sableux provient de diverses origines. Du fait de la diminution des quartz anguleux au profit des émoussés luisants, on conclut qu'une partie des sables provient de la source de l'Oued. Compte tenu de la prépondérance de l'aspect peu luisant des grains de quartz à l'amont, notre analyse permet de caractériser l'autre partie des sables de l'Oued Toudgha, comme résultant d'un dépôt éolien ou bien d'un dépôt fluvial où les quartz ont subi un phénomène de nourrissage (silicification). Dans le cas d'un dépôt éolien, les grains sont remaniés des formations gréseuses du tertiaire qui abondent l'Oued. Les quartz ont été façonnés par le vent avant leur sédimentation, qui est d'ailleurs confirmé par la présence de grains arrondis mats à l'amont caractéristique des sables éoliens avec quelques fois une teinte rougeâtre, résultat de la ferruginisation des sables. Ceci peut également expliquer l'abondance des grains émoussés peu luisants dans cette partie. Ceux ayant une couleur propre pourraient aussi provenir d'une action de vent du quaternaire. Cependant, de l'amont vers l'aval, il y a une diminution du pourcentage des ronds mats et parallèlement une augmentation des émoussés luisants qui indique la diminution des apports latéraux et la transformation des grains provenant de la source. Selon Cailloux (1963), les «Émoussés-Luisants» sont caractéristiques de longs transports en milieu aquatiques continentaux (rivières, fleuves). Leurs aspects luisants montrent qu'ils ont subi un transport en milieu aqueux.

Le cortège pétrographique des galets est dominé par les galets de roches sédimentaires suivi des roches magmatiques et enfin des roches métamorphiques. Les galets des roches sédimentaires qui tapissent le lit du cours principal du Toudgha, ont une source principalement locale (haut Atlas central). Alors que les galets des roches magmatiques proviennent essentiellement d'une source lointaine (massif de l'anti-atlas). Ceci peut être aussi confirmé par les résultats de l'étude morphométrique.

Les minéraux argileux peuvent aussi être utilisés comme marqueurs dans la détermination des zones sources de sédiments. Ils devraient, aussi, avoir la particularité de donner des indices sur la majeure partie des formations lithologiques du bassin versant dont ils sont issus. Cela en partie, grâce à leur nature granulométrique fine leur permettant des transferts rapides et éloignés par le biais du ruissellement et du réseau de drainage. La bonne connaissance actuelle des modalités de transport, de dépôts et de transformations (dégradation ou aggradation) qui risquerait de les affecter, suivant les conditions du milieu ; toutes ces considérations font que ce matériel soit très prisé et représente, aux mains de spécialistes, un très bon outil d'investigation [1].

CONCLUSION

L'interprétation des analyses de l'Oued Toudgha montre la variation de la distribution granulométrique des sables, cette variation est liée aux processus intervenant dans l'écoulement : irrégularité du fond, accélération de l'écoulement sur la face amont et ralentissement sur la face aval, le frottement sur le fond et de pente... Cette étude a permis de caractériser ces sédiments par des indices, et des courbes cumulatives. Elle a ainsi permis de remonter aux sources potentielles des apports des sédiments. Le tri et le classement des sédiments le long de l'Oued ne sont pas réguliers.

L'évolution amont-aval des fractions granulométriques le long de l'Oued Toudgha, montre l'influence des apports des affluents secondaires et des versants sur la composition de la charge de fond. Les apports sédimentaires ne sont pas uniformes. La texture des dépôts est contrôlée par la nature des apports, et les conditions de transport contrôlent les caractères morphoscopiques des quartz et morphométriques des galets. Le fonctionnement hydrosédimentaire d'Oued Toudgha est le principal facteur de la variation de l'indice d'aplatissement et d'éroulé. L'analyse pétrographique montre une diversification des classes pétrographiques en amont et ceci est dû à l'érosion des différents terrains que le cours d'eau a traversés (les deux massifs de haut et Anti-Atlas caractérisés par des terrains à lithologies différentes). Les zones de provenance sont caractérisées par une pauvreté des classes pétrographiques, par contre les parties distales sont riches en galets divers. L'évolution amont-aval de la pétrographie des galets montre une diminution des roches sédimentaire au profit des roches magmatiques. Comme pour les sables, la lithologie des galets du cours principal est influencée par les apports des affluents (Oued Target, Oued Taghya, Oued Ichem)

Le fait que les grains non usés diminuent vers l'aval s'expliquerait par le transport des sédiments dans un milieu aqueux, ces derniers perdent leurs caractères pendant le transport aquatique continental à la différence des grains éroulés luisants qui augmentent avec ce type de transport. Le pourcentage des grains ronds mats augmente par l'influence de l'action éolienne. Les grains de quartz confirment ces derniers résultats et attestent de la dominance des éroulés. Certains grains ont une histoire plus complexe. Dans un premier temps, les grains ont connu un transport par le vent, puis ont séjourné dans un milieu aquatique (effacement total ou partiel des cupules et des traces de choc par le vent sur la surface des grains éroulés).

L'étude diachronique de la dynamique de l'occupation du sol en utilisant la classification supervisée des images satellitaires sur une période de 34 années (1985-2019) a montré des changements notables des utilisations des terres au niveau de la vallée de l'Oued Toudgha. Ces techniques de télédétections pour l'évaluation de la dynamique de l'occupation des sols ne sera utile que si elle est répartit dans l'espace et dans le temps.

Références

1. Amil M. (1992). Bassin versant du Nekor recherche des zones sources d'invasement de la retenue du barrage M.B.A El Khettabi (maroc). Thèse 3^e cycle, Univ. Dakar, 226p.
2. Anderson (2007). Sand Sieve Analysis. In Pamela J. W. Gore "Historical Geology Online Laboratory Manual". Department of Geology. Georgia Perimeter College. 278 p.
3. Bigot, T. Yao Brou, J. Oszwald, A. Diedhiou, (2005). Facteurs de la variabilité pluviométrique en Côte d'Ivoire et relations avec certaines modifications environnementales, *Sécheresse*, 16 (1) : 5-13
4. Boys M (1960). Morphométrie des galets de quartz en Guyane française. 14-23 p.
5. Cailleux, Tricart (1963). Initiation à l'étude des sables et galets. Ed. C.D.U.Paris.
6. Cecchi, F. Gourdin, S. Koné, D. Corbin, J. Etienne, A. Casenave, (2009). Les petits barrages du nord de la Côte d'Ivoire : inventaire et potentialités hydrologiques, *Sécheresse* 20 (1) : 112-22.
7. Holtzapffel T. (1985). Les minéraux argileux ; préparation, analyse diffractométrique et détermination. 136 p.
8. Labied, M (2009). Granulométrie d'un cours d'eau en climat semi-aride exemple de l'Oued R'dat.
9. Lagabrielle, E., Metzger, P. Martignac, C., Lortic, B. et Durieux, L., (2007). Les dynamiques d'occupation du sol à la Réunion (1989-2002). *Mappemonde*, vol.86, n°2-2007, 23 p.
10. Le ribault, L. (1977). L'exoscopie des quartz. Edition Masson. 150 p.
11. Pye K. et Blott S.-J (2004). Particle size analysis of sediments, *Forensic Science International* Volume 144, Issue 1, 11 August 2004, Pages 19-27 p.
12. Riviere, A (1977). Méthodes granulométriques. Techniques et interprétations. Coll. Techniques et méthodes granulométriques. Masson édition, Paris, 170 p.
13. Saïdim, (1978). Carte géologique du Maroc. Echelle 1 / 500000. feuille de Ouarzazate. serv. Geol. Maroc.
14. Sternberg, H. (1875). Über Längen- und Quer profil geschiebeführender Flüsse, *Zeitschrift für Bauwesen*, 25 : 483-506.
15. Michard, A. (1976). Eléments de géologie Marocaine. Notes et Mémoire. Services Géol. Du Maroc, n°252.
16. Vatan, A (1967). Manuel de sédimentologie. Ed. Technique. 333 p. 16.
17. Verger, F. (1963). Les techniques d'analyse granulométrique. Mémoires et documents, tome IX, fasc. 1, CNRS, 64 p.