



N° d'ordre : 40/2023

Centre des Etudes Doctorales : Langues, Sciences Humaines, Arts et Sciences de l'Education
Formation Doctorale : Ressources, Aménagement et Développement Territorial
Discipline : Géographique
Spécialité : Géographique physique
Laboratoire : Espace, Histoire, Dynamique & Développement Durable (EH3D-FPT)

Thèse pour l'obtention de DOCTORAT

UTILISATION DE L'APPROCHE HYDROGEOMORPHOLOGIQUE ET DE LA MODELISATION HYDRAULIQUE DANS LA CARTOGRAPHIE DES ZONES INONDABLES. CAS DU BASSIN VERSANT DE L'OUED LAHDAR, (HAUT INAOUENE, MAROC)

Préparée par :

Hamid FATTASSE

CNE : 2725805236

Sous la direction de :

Pr. Jaouad GARTET

Soutenue le 16-02-2023 devant le Jury :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
HOUARI Abdelghani	PES	FLSH Sais Fès	Président
JANATI IDRISSE Abdelhamid	PES	FLSH Sais Fès	Rapporteur
NEJJARI Abdelouahab	PH	FLSH Meknès	Rapporteur
GARTET Jaouad	PES	FLSH Sais Fès	Directeur de thèse

Année Universitaire : 2022/2023



N° d'ordre : 40/2023

Centre des Etudes Doctorales : Langues, Sciences Humaines, Arts et Sciences de l'Education
Formation Doctorale : Ressources, Aménagement et Développement Territorial
Discipline : Géographique
Spécialité : Géographique physique
Laboratoire : Espace, Histoire, Dynamique & Développement Durable (EH3D-FPT)

Thèse pour l'obtention de DOCTORAT

UTILISATION DE L'APPROCHE HYDROGEOMORPHOLOGIQUE ET DE LA MODELISATION HYDRAULIQUE DANS LA CARTOGRAPHIE DES ZONES INONDABLES. CAS DU BASSIN VERSANT DE L'OUED LAHDAR, (HAUT INAOUENE, MAROC)

Préparée par :

Hamid FATTASSE

CNE : 2725805236

Sous la direction de :

Pr. Jaouad GARTET

Soutenue le 16-02-2023 devant le Jury :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
HOUARI Abdelghani	PES	FLSH Sais Fès	Président
JANATI IDRISSE Abdelhamid	PES	FLSH Sais Fès	Rapporteur
NEJJARI Abdelouahab	PH	FLSH Meknès	Rapporteur
GARTET Jaouad	PES	FLSH Sais Fès	Directeur de thèse

Année Universitaire : 2022/2023



REMERCIEMENT

Je remercie chaleureusement toutes les personnes qui m'ont donné de l'aide soit de près ou de loin, par leurs discussions et leurs conseils durant la réalisation du présent mémoire.

J'exprime tout d'abord ma gratitude et mes vifs remerciements au professeur Jaouad GARTET, qui a bien voulu assurer l'encadrement de ce travail ; il n'a cessé de me prodiguer les judicieux conseils et critiques constructives tout au long de ma recherche au dépend de ses nombreuses occupations.

Mes reconnaissances vont également à tous mes professeurs qui nous ont garanti une formation de haut niveau : Mr le Vice-doyen Abdelouahed BOUBERRIA ; Mr le Directeur du Laboratoire : Espace, Histoire, Dynamique et Développement Durable Mohamed ABAHROUR ; Mr Mustapha AAFIR ; Mr Jamal CHAAOUANE ; Mr Radouane BRIOUAL ; Mr Mohamed HANCHANE ; Mr Mohamed ERRAFIK ; Mr Mohamed EL BOUCHIKHI ainsi que les professeurs des autres Facultés. Je remercie tous les enseignants qui ont contribué à ma formation.

Je tiens aussi à remercier Mr Aziz EL ALOUI de l'agence urbaine de Taza, pour le temps qui m'a consacré.

A mes chers parents Mohamed et Maryem ; mes frères Abdenbi, Said ; mes sœurs Hakima et Hananne; ainsi que ma grande famille.

Je tiens enfin à remercier infiniment mes collègues, Kamal, Khalid, Abdelmoniam, Bouzalmat, Younsse, Tarik, Omar, Said, pour leur sympathie, leur amitié et leur aide. Je n'aurais garde d'oublier dans mes remerciements tous les étudiants du Laboratoire : L'espace, Histoire, Dynamique & Développement Durable.



Résumé de la thèse

La genèse des inondations de l'Oued Lahdar s'expliquent par des facteurs naturels : topographie, lithologie, couvert végétal, sols, précipitations, en plus des pratiques humaines désastreuses. Les Centres territoriaux du bassin versant sont fréquemment menacés par les inondations, provoquant des dégâts conséquents.

Les crues de l'Oued Lahdar causent des inondations répétées et provoquent des dégâts au niveau des infrastructures routières et particulièrement les ouvrages de franchissement, les terrains agricoles et les habitations.

En raison de la rareté des données des débits des crues, nous avons appliqué les méthodes usuelles d'estimation des crues : les méthodes hydrométéorologiques pour estimer la crue de projet et les méthodes empiriques. Ces méthodes ont permis d'estimer les débits maximums de crues et les débits fréquentiels. L'application de ces méthodes a permis d'approcher le débit de pointe pour des périodes de retour différentes au niveau des Centres territoriaux Had Msila et Bni Ftah.

L'étude hydraulique et l'utilisation du logiciel Hec-RAS ont permis de simuler la propagation des crues dans différentes sections étudiées de la vallée de l'Oued Lahdar. Cette étude a permis d'obtenir la cartographie des zones inondables sous Arc-GIS des Centres Had Msila et Bni Ftah, et ce pour les différentes périodes de retour 10, 20, 50, 100 et 1000 ans.

L'application de la méthode hydrogéomorphologique dans le BV de l'Oued Lahdar a permis la détermination des zones inondables, avec des degrés de risque très fort, fort, moyen et faible, correspondant respectivement aux lits fluviaux constituant la plaine alluviale actuelle (L1, L2, L3 et L4).

La comparaison des résultats cartographiques, obtenus par les différentes approches utilisées, a permis de nuancer les résultats des approches utilisées, de souligner le rôle de la validation des résultats par le travail de terrain, et de conclure en l'importance de l'utilisation de l'approche hydrogéomorphologique dans l'établissement de la carte de risque d'inondation des vallées fluviales.

La carte des zones inondables de l'Oued Lahdar, au niveau des Centres territoriaux du BV Lahdar, est un document de base nécessaire pour tout éventuel projet d'aménagement, particulièrement les plans d'exposition aux risques (PER).

Mots clés :

Oued Lahdar, Inondation, Méthodes empiriques, Méthode hydrométéorologique, modélisation hydraulique, HEC-RAS, Bassin versant, Crue.



Abstract:

The floods of the Wadi Lahdar are explained by natural factors topography, lithology, vegetation cover, soil, rainfall, in addition to disastrous human practices. The territorial centers of its watershed are frequently threatened by floods, causing significant damage. The floods of the Wadi Lahdar cause repeated flooding and damage to road infrastructure and especially the crossing structures, agricultural land and homes.

Due to the scarcity of flood flow data, we applied the usual methods of flood estimation : hydrometeorological methods to estimate the project flood and empirical methods. These methods were used to estimate the maximum flood flows and frequency flows. The application of these methods allowed to approach the peak flow for different return periods at the level of the Had Msila and Bni Ftah Territorial Centers.

The hydraulic study and the use of the software Hec-RAS allowed to simulate the propagation of the floods in different studied sections of the valley of the wadi Lahdar. This study allowed to obtain the mapping of the floodable areas under ARC-GIS of the Had Msila and Bni Ftah Centers, and this for the different return periods 10, 20, 50, 100 and 1000 years.

The application of the hydrogeomorphological method in the watershed of Oued Lahdar has allowed the determination of flood-prone areas, with degrees of risk very strong, strong, medium and low, corresponding respectively to the river beds constituting the current alluvial plain (L1, L2, L3 and L4).

The comparison of the cartographic results, obtained by the various approaches used, allowed to qualify the results of the approaches used, to underline the role of the validation of the results by the field work, and to conclude in the importance of the use of the hydrogeomorphological approach in the establishment of the map of flood risk of the fluvial valleys

The map of flood risk areas of Wadi Lahdar, at the level of the Territorial Centers of the watershed Lahdar, is a basic document necessary for any possible development project, especially the risk exposure plans (PER).

Key words :

Lahdar river, Flood risk, Empirical method, Hydrometeorological method, Hydraulic modeling, HEC-RAS, catchment, flood.

ملخص الأطروحة:

ترجع فيضانات واد لحضر إلى العوامل الطبيعية: التضاريس، والصخور، والغطاء النباتي، والتربة، وهطول الأمطار، بالإضافة إلى الممارسات البشرية الكارثية. كثيراً ما تتعرض المراكز الإقليمية داخل حوض واد لحضر لتهديد الفيضانات، مما يتسبب في أضرار جسيمة. تسببت فيضانات وادي لحضر في حدوث أضراراً بالبنية التحتية للطرق وخاصة هياكل المعابر والأراضي الزراعية والمنازل.

نظراً لندرة معطيات الصبيب، طبقنا طرق تقدير الفيضان المعتادة: طرق الأرصاد الجوية المائية للتقدير والطرق التجريبية. التي مكنت من تقدير الحد الأقصى للصبيب وصبيب التردد. أتاح تطبيق هذه الأساليب الاقتراب من الصبيب الأقصى لفترات عودة مختلفة على مستوى المراكز الإقليمية لحد مسيلة وبني فتاح. مكنت الدراسة الهيدروليكية واستخدام برنامج Hec-RAS من محاكاة انتشار الفيضانات في الأقسام المختلفة التي تمت دراستها في واد لحضر. أتاحت هذه الدراسة الحصول على خرائط لمناطق الفيضان تحت Arc-GIS لمركزي هاد مسيلا وبني فتاح، وذلك لفترات العودة المختلفة التي تبلغ 10 و 20 و 50 و 100 و 1000 سنة.

سمح تطبيق الطريقة الهيدروجيومورفولوجية في واد لحضر بتحديد مناطق الفيضان، بدرجات عالية جداً وعالية ومتوسطة ومنخفضة المخاطر، تتوافق على التوالي مع مجاري الأنهار التي تشكل السهل الغريني الحالي (L1، L2، L3 و L4).

أتاحت مقارنة النتائج الكارطوغرافية للفيضانات التي تم الحصول عليها من التمييز بين نتائج الأساليب المستخدمة، والتأكيد على دور التحقق من صحتها من خلال العمل الميداني، واستنتاج أهمية الاستخدام للمقاربة الهيدروجيومورفولوجية في إنشاء خريطة مخاطر الفيضانات في واد لحضر. تعد خريطة مناطق الفيضانات في واد لحضر على مستوى المراكز الإقليمية وثيقة أساسية ضرورية لأي مشروع تنموي محتمل، لا سيما خطط التعرض للمخاطر.

الكلمات المفتاح:

واد لحضر، الفيضانات، الطرق التجريبية، الطريقة الهيدروجيومورفولوجية، النمذجة الهيدروليكية، (HEC-RAS، حوض المائي، امتطاح.

SOMMAIRE :

Introduction Générale,.....	1
Première partie : Caractéristiques du bassin versant de l'O Lahdar,.....	10
Chapitre 1 : Analyse des composantes naturelles et humaines du bassin versant de l'O Lahdar,.....	12
Chapitre 2 : Caractéristiques morphométriques du bassin versant de l'O Lahdar,.....	47
Deuxième partie : Hydrologie et modélisation hydraulique de l'Oued Lahdar,.....	69
Chapitre 3 : Etude du régime hydrologique de l'Oued Lahdar et l'estimation des crues de projet,.....	71
Chapitre 4 : Modélisation hydraulique et cartographie des zones inondables,.....	111
Troisième partie : Dynamique fluviale et zonation du risque d'inondation de l'Oued Lahdar,.....	144
Chapitre 5 : Dynamique des chenaux et des lits fluviaux de l'Oued Lahdar,.....	146
Chapitre 6 : Cartographie hydrogéomorphologique des zones inondables de l'Oued Lahdar et zonation du risque d'inondation,.....	187
Conclusion Générale,.....	231
Références bibliographiques.....	234

INTRODUCTION GENERALE



INTRODUCTION GENERALE

1 - PROBLEMATIQUE GENERALE :

Les inondations fluviales sont des problèmes récurrents, affectant des grands secteurs de la population mondiale. Bien qu'il y ait beaucoup d'initiatives pour réduire leurs effets négatifs sur les populations et leurs biens, dommages socio-économiques qu'elles induisent continuent à augmenter autant dans les pays développés que dans le cas des pays sous-développés. Aujourd'hui, la fréquence ou l'ampleur du phénomène hydrologique naturel est plutôt la cause de l'occupation croissante des zones susceptibles d'être inondées.

Au Maroc, le phénomène des inondations est ressenti de plus en plus fortement surtout depuis les années 90, en raison notamment de l'extension des espaces urbains et périurbains sur des zones fluviales inondables. Ces inondations ont été parfois très dommageables aussi bien pour l'infrastructure publiques ou privées que pour l'habitat et l'agriculture. Elles ont même causé des victimes parmi la population, surtout lorsqu'il s'agit des crues éclair.

Devant l'accroissement des menaces et des dégâts produits par ces inondations, une approche participative et concertée a été adoptée par les pouvoirs publics afin d'établir un plan National de protection contre les inondations accidentelles et des terres agricoles. D'autre part, dès le début des années 2000, le gouvernement marocain a entamé des coopérations avec les pays de l'Europe (notamment avec la France et la Suisse) en matière de prévention et de gestion des risques liés aux inondations catastrophiques.

Le risque naturel, notamment les inondations sont représentées comme les principaux champs de réflexion à l'étude. En effet ; les inondations s'inscrivent aujourd'hui d'une façon fréquente qui se manifestent d'une manière catastrophique constituant ainsi une contrainte pour les activités humaines et handicapent toutes les opérations de développement (économique, sociale, ...) et provoquent des dégâts immenses. En effet ; Les inondations représentent la source de catastrophes naturelles la plus fréquente dans le monde ; ainsi au Maroc

Dans ce contexte très complexe, le risque d'inondation est perçu à l'échelle mondiale, et le Maroc n'en est donc pas exclue, est l'un des pays du monde qui ont été confronté aux effets néfastes des inondations dans de notre pays nombreuses villes.

Par conséquent ; les impacts de cette catastrophe naturelles des crues et inondations sont souvent intensifiées par des facteurs qui provoquent des effets aigues d'inondation tel que : l'urbanisation anarchique par l'occupation des zones inondables et la défaillance des réseaux des eaux pluviales.

2 - PROBLEMATIQUE DE LA THESE :

Le Maroc, à l'instar de nombreux pays, souffre de nombreux problèmes liés à la gestion de la rareté et l'excès en eau ; ce qui nécessite d'avoir une meilleure connaissance en terme de la variabilité spatio-temporelle des régimes hydrologiques à l'échelle des BV (crues et étiages). De plus, le risque d'inondation lors des périodes d'excès engendre des dégâts de plus en plus importants. Ces dégâts humains et matériels compromettant la pérennité des infrastructures et des biens des habitants et entravent tous efforts de développement local durable.

Les crues et les inondations de l'Oued Lahdar sont des phénomènes naturels, aggravés par les aménagements (routes, habitations et activités) qui se trouvent dans sa plaine alluviale.

Les aménagements inventoriés (infrastructures, bâtiments, parcelles agricole, etc.) continuent d'investir des terrains proches ou du domaine de la plaine alluviale. La récurrence des crues et les ampleurs des débordements engendrent et expliquent les menaces de l'Oued Lahdar. Cette situation entretient le sentiment relatif à la peur au risque, au hazard (aléa) et à la vulnérabilité de l'espace.

En effet cette problématique pourra être abordée depuis plusieurs points de vue, cependant on a choisi une approximation basée sur l'étude comparative des techniques d'évaluation de la vulnérabilité au risque d'inondation. Habituellement, ces approches se classent en trois catégories : les approches basées sur des processus de simulations hydraulique, les approches historiques et les approches hydrogéomorphologiques.

L'étude propose d'établir la carte des zones inondables (CZI), avec des degrés de risque d'inondation, à l'instar des CZI proposées en Europe et dans d'autres pays développés ; ces cartes sont à la base des plans d'exposition aux risques (PER).

Pour répondre à la problématique soulevée dans ce projet de thèse, nous la décomposons aux les questions suivantes :

- quels sont les paramètres intrinsèques du bassin versant qui expliqueront l'amplification des crues de l'Oued Lahdar ?
- quelles sont les limites externes des crues de l'Oued Lahdar ?
- quelle les fréquences des crues dans les lits de la plaine alluviale de l'Oued Lahdar ?
- qu'elle impact du type des crues de l'Oued Lahdar sur le caractère hydrodynamique et la morphogenèse dans la plaine alluviale de l'Oued Lahdar ?

3 - HYPOTHESES DE LA THESE :

A partir des études bibliographiques sur la problématique de la thèse, plusieurs hypothèses ont été retenues. Elles permettent de s'interroger sur :

Le rôle de la lithologie, de la structure, du climat dans l'individualisation et l'évolution du BV de Lahdar,

Le rôle de la dynamique fluviale dans la morphologie de la plaine alluviale de l'oued Lahdar,

Le rôle des caractéristiques morphologiques du BV et hydrométriques du réseau hydrographique dans la genèse et les types des crues de l'oued Lahdar,

L'importance des dégâts provoqués par les crues de l'oued Lahdar,

La caractérisation hydrologique de l'oued Lahdar et la typologie de ces crues,

La fréquence et l'importance des crues dans la genèse des inondations et l'importance des dégâts engendrés,

La fiabilité des résultats cartographiques de zonage du risque d'inondation obtenus par l'approche historique,

La fiabilité des résultats cartographiques de zonage du risque d'inondation obtenus par l'approche modélisation hydraulique,

La fiabilité des résultats cartographiques de zonage du risque d'inondation obtenus par l'approche hydrogéomorphologique.

4 - DELIMITATION DU TERRAIN D'ETUDE :

La recherche envisagée investira le bassin versant de l'Oued Lahdar, affluent de la rive droite de l'Oued Inaouène à l'amont.

Le BV de l'Oued Lahdar couvre une superficie d'environ 610 km². Il appartient au découpage administratif de la région de Fès-Meknès et à la Province de Taza. Les terrains du BV s'étendent sur le territoire de sept communes : Taineste, Beni Frassene, Bab El Mrouj, Ain Boukellal, Gouzate, Meknassa El Gharbiya et Larbaâ Bni Lent.

L'assemblage des cartes topographiques 1/50 000°, couvrant le BV de l'Oued Lahdar est formé des feuilles de Taza, Ain Boukellal, Bab El Mrouj, Taineste, Beni Frassene et Aknoul.

Le bassin versant est drainé par oued Lahdar l'un des principaux affluent de l'Oued Inaouène. La vallée de Lahdar est située dans la zone des collines prérimaires. Il prend naissance au sud-est de Taineste à l'extrême amont de ce bassin sous forme des plusieurs cours d'eau : Oued Taineste, Oued sebt.

5 - OBJECTIFS DE LA THESE :

Comme tout travail, qui se veut scientifique, a un objectif ; notre objectif principal est, l'étude de la vulnérabilité au risque d'inondation de l'Oued Lahdar dans le but de cartographier les zones à risque. Il se base sur l'élaboration d'un document cartographique, tout le gestionnaire de risque d'inondation pourra utiliser lors de planification. Ce document pourra donc être utilisé dans la planification et l'aménagement du BV en conseillant l'installation des activités humaines à risque à des endroits où le potentiel de détérioration de l'environnement est plus faible.

La présente thèse s'inscrit dans le cadre de cette préoccupation environnementale. Son objectif principal est de mettre à la disposition des gestionnaires de risque d'inondation une méthodologie qui permet de réduire les dégâts possibles qui peuvent atteindre ce risque, suite mauvaise due au manque d'information des degrés du risque, les principaux objectifs de cette recherche sont :

- Déterminer les facteurs naturels qui agissent sur la circulation d'eau. Ils permettent d'expliquer les différents processus hydrologiques qui se produisent au sein du bassin et qui influencent la dynamique du cours d'eau.
- Déterminer les éléments et le fonctionnement de la plaine alluviale de l'Oued Lahdar,
- Tester différentes approches de cartographie des zones inondables sur le BV de l'Oued Lahdar,
- Etablir la carte des zones inondables de l'Oued Lahdar.

6 - DISCUSSION DES ETUDES ANTERIEURES (ETAT D'ART) :

Au Maroc, le phénomène des inondations est ressenti de plus en plus fortement surtout depuis les années 90, en raison notamment de l'extension des espaces urbains et périurbains sur des zones fluviales inondables.

Ces inondations ont été parfois très dommageables aussi bien pour l'infrastructure publiques ou privées que pour l'habitat et l'agriculture. Elles ont même causé des victimes parmi la population, surtout lorsqu'il s'agit des crues torrentielles.

Ailleurs et en particulier en France, les inondations sont au rang de premier risque naturel (Berz G., 2000). Dans les dernières décennies, les dommages engendrés par les inondations ont été particulièrement importants, avec des coûts imputables moyens annuels estimés à 611 M€ pour la période 1980-2000 (Gresillon. J. M, 2004). L'importance de ces dommages est principalement imputable à une urbanisation et une industrialisation implantées en plaine d'inondation (Torterotot J. P, 1993), qui ont eu pour conséquence une augmentation de la vulnérabilité des biens et des personnes. Les enjeux très importants, liés aux inondations, expliquent les efforts qui sont aujourd'hui mis en œuvre pour analyser et comprendre ce phénomène afin de réduire le risque.

Les recherches traitant de la cartographie hydrogéomorphologique ont montré les avantages de la méthode tels que la fiabilité coût de réalisation, la rapidité d'exécution ou la vision maximisée des zones inondables (Masson et al., 1996 ; Ballais et al., 2011). Elles ont également permis d'établir sa pertinence pour la cartographie des crues extrêmes à travers des comparaisons avec des crues historiques telles que l'Ouvèze en 1992 (Masson, 1993), l'Aude en 1999 (Chave, 2003 ; Garry et al. 2002) ou encore les Gardons en 2002 (Ballais, 2006).

7-METHODES ET APPROCHES UTILISEES :

Il existe actuellement trois grandes méthodes pour cartographier les zones inondables par débordement de cours d'eau : **l'approche historique, l'approche hydrogéomorphologique et l'approche modélisation ou hydraulique**. Certaines études peuvent combiner plusieurs approches et l'ensemble des études contiennent des éléments communs tels que la recherche de données historiques ou l'analyse hydrologique. On peut néanmoins distinguer les atlas selon la méthode qui sous-tend le plus directement la cartographie finale.

7.1 Les approches adoptées :

7.1.1 L'approche historique :

L'analyse historique est nécessaire pour compléter les autres approches. Elle consiste en une collecte des données à partir de la littérature ancienne, des archives et des enquêtes de terrain.

En effet, depuis longtemps, de nombreux auteurs ont exploité cette piste pour en extraire l'information historique. Ces recherches ont concerné : les aménagements, l'hydrologie, la géomorphologie de sa vallée. Donc nous nous sommes concentrés sur :

- Les documents écrits : extraits de journaux, rapports administrative, lettres communales, notes... les documents dépouillés pour l'information historique se réfèrent à l'espace régional.
- Les cadastres et les cartes anciennes qui informent plus particulièrement sur l'évolution du tracé du cours d'eau.
- Les traces laissées sur le terrain et les témoignages des riverains : ils concernent les événements exceptionnels.

7.1.2 L'approche de la modélisation hydraulique :

Les modélisations hydrauliques sont des méthodes variées qui consistent à déterminer les hauteurs d'eaux, les vitesses d'écoulements, les zones submergées...à partir des débits prédéterminés, en fonction des conditions d'écoulement des oueds.

La modélisation hydraulique s'est basée sur le logiciel Hec-RAS (Hydrologic Engineering Center River Analysis System) qui est un logiciel permettant de calculer les niveaux d'eau, les niveaux d'énergie, les débits maximaux atteints au niveau des rivières ainsi que d'autres variables de

sortie ce logiciel permet de déterminer les zones inondées pour un débit connu.

Les résultats fournis par Hec-RAS sont :

- Les niveaux d'eau et d'énergie dans chaque profil en travers ;
- Le temps d'arrivée de l'onde des lâchers d'eau ;
- Le temps d'obtention du plan maximal ;
- Les vitesses d'écoulement dans chaque section ;
- Le profil en long temporel des lignes d'eau ;

Les données de base pour la mise en place du modèle ont été fournies par différents établissements publics au niveau provincial puis complété par le travail du terrain. Cette étude s'est basée sur plusieurs profils transversaux sélectionnés le long de la vallée de l'Oued Lahdar. Sur ces profils nous avons fait la simulation des crues pour différentes périodes de retour (10 ans, 20 ans, 50 ans et 100 ans), afin de connaître l'intensité du risque d'inondation (très fort, fort, moyen, faible), qui peut être produit par les débits de différentes fréquences, qui se résument comme suite :

- Détermination des crues de projet : L'étude des crues a été faite par l'utilisation de deux méthodes (la méthode du Gradex et la méthode rationnelle). Ces deux dernières permettent d'atteindre deux objectifs :
 - ✓ Estimation des débits de pointe (Q_p) à l'exutoire du bassin versant étudié, pour des périodes de retour allant de 10 à 1000 ans,
 - ✓ Détermination de la forme de l'hydrogramme des crues et l'estimation des volumes de crues.
- Détermination des zones submergées (inondées) selon le débit de la période de retour recherchée,
- Etablissement de la carte de zonage du risque d'inondation.

7.1.3 L'approche hydrogéomorphologique :

IL s'agit d'une approche géographique qui étudie le fonctionnement naturel des cours d'eau en analysant la structure des vallées et en particulier les formes fluviales mises en place au fur et à mesure des crues successives.

Une première présentation de la méthode hydrogéomorphologique de détermination des zones inondables a été effectuée il y a 26 ans (M. Masson *et al.* 1996). Cette méthode est basée sur une démarche naturaliste qui met en évidence les différents lits des cours d'eau, les divers aménagements susceptibles de perturber les écoulements, en les accélérant ou en les ralentissant, et à en déduire les zones inondables ainsi que les valeurs approchées des paramètres physiques des inondations (hauteur d'eau et vitesse d'écoulement). La cartographie qui en résulte peut être directement exploitée pour choisir des orientations en termes de planification et d'aménagement. Mais elle n'est pas exclusive et ne se substitue pas aux méthodes hydrologique et hydraulique.

Pour identifier et délimiter les unités hydrogéomorphologiques, la méthode s'appuie essentiellement sur la morphologie des éléments de la plaine alluviale (reconnaissance des ruptures de pente : les talus) et la sédimentologie : (analyse de la granulométrie, de la géochimie, de la couleur, etc.) des formations alluviales. D'autres indices fournissent une aide appréciable : les traces d'inondation (laisses de crues, traces des courants sur les photographies aériennes) et/ou l'occupation

du sol (la végétation diffère en fonction de la nature du sol et de ses caractéristiques hydriques) (Ballais et al., 2011).

L'approche hydrogéomorphologique produit des cartes représentant les emprises naturelles des zones inondables, accompagnées d'analyses hydrogéomorphologiques du fonctionnement des cours d'eau

Dans cette approche, nous définissons les concepts structurant l'approche hydrogéomorphologique, ainsi que les grandes étapes de son émergence en montrant comment elle puise ses fondements dans la culture géomorphologique, mais aussi comment elle répond à des exigences pratiques en termes de prévention des risques. On a clairement dans la méthode hydrogéomorphologique de détermination des zones inondables, un exemple d'application des concepts de la géomorphologie à des fins gestionnaires. Cela participe à la solidité de la méthode, mais également à ses limites. (Ballais et al., 2011).

7.2 Outils de recherche utilisés :

Ce travail repose sur un grand nombre de données de divers formats : cartes papiers, séries temporelles de données pour des postes météorologiques et des stations hydrométriques, MNT, images satellites brutes, variables dérivées des mesures satellitales, résultats de dizaines d'enquêtes, données exogènes etc. les données seront spatialisées dans un référentiel cartographique. La cohérence spatiale de ces données multisources s'est faite dans un système d'information à référence spatiale et plus particulièrement dans un Système d'information Géographique (SIG).

Le terme SIG s'utilise pour évoquer les outils logiciels (systèmes informatiques) mis en œuvre dans les organisations et susceptibles d'assurer les quatre grandes fonctions informatiques (saisie et acquisition. gestion et stockage. analyse et enfin affichage/édition/présentation sur des données géographiques (Poron, 2011).

Dans notre démarche le SIG s'entend davantage du point de vue fonctionnaliste comme Huxhold et al (1995). in Roche, (2000) définissent un ensemble de technologie informationnelles, de données et procédures pour la collecte. Le stockage, la manipulation, l'analyse et la présentation de cartes et l'information descriptive sur les objets qui peuvent être représentés sur une carte.

Tous les traitements de données impliquant l'analyse spatiale des facteurs et variables intervenant dans la dynamique des écoulements de surfaces et souterrains et par conséquent dans celle de la ressource s'est fait dans le logiciel ArcGis. Les cartes présentées dans le présent document sont produites à partir de ce logiciel. Le traitement statistique des données hydro-climatiques s'est appuyé sur des logiciels généralistes comme "Excel".

Collecte de l'information existante : bibliographie, enquête, travail de terrain :

Cette étape, qui en réalité, s'est poursuivie tout au long de la thèse, a consisté en la collection de plusieurs types d'information. Cette collecte des données se décline en quatre phases :

La première phase concerne essentiellement le travail bibliographique. Elle représente la base de l'étude, car elle va nous permettre d'être à jour au niveau des travaux traitant cette problématique. Cette phase consiste en l'acquisition, la collecte et la synthèse des données existantes sur le bassin versant de l'Oued Lahdar (documents, projets, analyses, études, ...) et disponibles dans les différentes administrations, services, communes et laboratoires...

La deuxième phase comprend la collecte des données climatiques et hydrométriques : les données des précipitations, les débits et des températures. Pour les données pluviométriques, on dispose de 5 stations dans le bassin et 5 aux alentours immédiats.

La troisième phase concerne essentiellement la partie historique dont la collecte des données s'effectue aux archives disponibles dans les différentes administrations, services, communes.

La quatrième phase concerne le travail de terrain. Il s'agit de la partie opérationnelle de l'étude, qui permet de caractériser l'état du terrain actuel. Ce travail de terrain concerne la collecte des données générales sur le cours d'eau et la plaine alluviale. Le type d'information recueillie sert surtout à positionner le bassin dans son contexte local, et la cartographie des ensembles morphologiques de l'Oued et la réalisation des profils en travers, Généralement, cette phase est préparatoire à un travail plus précis.

8 - PRINCIPAUX TERMES VOCABULAIRES DE LA PROBLEMATIQUE :

Le BV est un territoire délimité par la ligne de crêtes, c'est-à-dire la ligne de partage des eaux qui passe souvent par les points topographiques les plus hauts des interfluvies

Inondation est une submersion, rapide ou lente, d'une zone habituellement hors d'eau. « l'eau qui peut sortir de son lit habituel d'écoulement »

Risque : La notion de risque est communément définie comme la combinaison de deux composantes qui sont l'aléa et la vulnérabilité. Il n'y a pas de risque sans aléa naturel, il n'y en a pas sans élément vulnérable exposé.

Vulnérabilité exprime l'importance des dommages potentiellement subits par des enjeux soumis à un aléa d'intensité donnée. La notion d'enjeu intègre les personnes, les biens et les activités susceptibles d'être affectées par l'aléa.

La notion de vulnérabilité concerne les conséquences néfastes, les dommages. Qui peuvent être de plusieurs natures:

- pertes en vies humaines et effets sur la santé des personnes,
- dégâts matériels,
- impacts liés aux difficultés de fonctionnement, d'échange et de communication (qualifiés d'impacts indirects).

Aléa : L'aléa est un phénomène physique, naturel et non maîtrisable, d'occurrence et d'intensité donnée. Il peut être caractérisé suivant deux composantes, l'une fréquentielle (occurrence), l'autre spatio-temporelle (intensité).

Crue est un phénomène naturel et saisonnier. Elle correspond à une augmentation rapide et temporaire du débit d'un cours d'eau au-delà d'un certain seuil. Elle est caractérisée par trois paramètres : la hauteur de l'eau, la vitesse du courant et le débit (exprimé en m³/sec) qui est égal à la surface de la section d'écoulement (en m²) divisée par la vitesse d'écoulement (en m/s). Ainsi la crue est une élévation du niveau du cours d'eau au-dessus de son niveau naturel. En fonction de l'importance des débits, une crue peut être contenue dans le lit habituel du cours d'eau, dénommé lit mineur, ou déborder de son lit moyen ou majeur (ordinaire et exceptionnel).

Plaine alluviale est composée de plusieurs lits topographiques que la rivière a façonné dans le fond vallée au fur à mesure des crues successives.

Lits fluviaux : Ces unités représentent les enveloppes morphologiques contenant respectivement les crues fréquentes, rares et exceptionnelles. La délimitation n'est pas toujours évidente, particulièrement lorsque la plaine alluviale est fortement aménagée et que les formes fluviales ont été altérées.

Dynamique fluviale : Est une science qui étudie la complexité des formes, des processus et des rétroactions des cours d'eau selon une gamme d'échelle allant des sections transversales du chenal au bassin versant. C'est le fonctionnement morphologique d'un cours d'eau : évolution du lit sous l'effet du transport liquide (déplacement de l'eau dans le sens amont-aval et dans le sens transversal) et du transport solide (déplacement et dépôt des matériaux).

Modélisation hydraulique permet de fournir sur le tronçon de plaine alluviale les limites des zones inondables, les hauteurs d'eau et les vitesses d'écoulement qui caractérisent ces deux types de crues. La modélisation est méthodologiquement la seule approche qui permette de déterminer les paramètres de l'aléa tels que demandés par ce guide. A pour but le calcul des hauteurs d'eau pour la cartographie de l'aléa. Il s'agit d'une étape importante dans l'évaluation des risques liés aux inondations, car les aménagements et les réglementations ultérieures se référeront aux côtes et aux enveloppes de crues issues de la modélisation hydraulique.

Hydrogéomorphologique : « approche ayant pour objet la description et l'explication du relief terrestre, continental et sous-marin ». En étudiant à la fois la mise en place des reliefs à l'échelle des temps géologiques, les effets des variations climatiques et les processus morphogéniques actuels, elle fournit les bases d'une compréhension globale de l'évolution des reliefs à différentes échelles temporelles et spatiales.

Cartographie hydrogéomorphologique : Est une méthode de cartographie des zones inondables par reconstitution du fonctionnement de l'hydrosystème. Elle repose sur l'étude des lits fluviaux qui constituent la plaine alluviale. Les fondements de cette méthode s'inscrivent dans les théories telles que le système fluvial, la rapidité d'exécution ou la vision maximisée des zones inondables. Elles ont également permis d'établir sa pertinence pour la cartographie des crues extrêmes à travers des comparaisons avec des crues historiques.

9 - REPARTITION DU MEMOIRE :

Le travail est structuré en 6 chapitres, répartis en 3 parties, précédées par une introduction générale et terminées par une conclusion générale.

Introduction générale.

Première partie : Caractéristiques du bassin versant de l'Oued Lahdar :

Chapitre 1 : Analyse des composantes naturelles et humaines du bassin versant de l'Oued Lahdar,

Chapitre 2 : Caractéristiques morphométriques du bassin versant de l'Oued Lahdar,

Deuxième partie : Hydrologie et modélisation hydraulique de l'Oued Lahdar :

Chapitre 3 : Etude du régime hydrologique de l'Oued Lahdar et l'estimation des crues de projet,

Chapitre 4 : Modélisation hydraulique et cartographie des zones inondables,

Troisième partie : Dynamique fluviale et zonation du risque d'inondation de l'Oued Lahdar :

Chapitre 5 : Dynamique des chenaux et des lits fluviaux de l'Oued Lahdar,

Chapitre 6 : Cartographie hydrogéomorphologique des zones inondables de l'Oued Lahdar et zonation du risque d'inondation,

Conclusion générale.

Première partie :

CARACTERISTIQUES DU BASSIN VERSANT DE L'OUED LAHDAR

Introduction de la première partie,

Chapitre 1 : Analyse des composantes naturelles et humaines du bassin versant de l'O Lahdar,

Chapitre 2 : Caractéristiques morphométriques du bassin versant de l'O Lahdar,

Conclusion de la première partie.

INTRODUCTION DE LA PREMIERE PARTIE :

La présente partie traite les caractéristiques physiques et humaines du bassin versant de l'Oued Lahdar. L'étude de l'environnement physique et anthropique du bassin versant est entreprise, à fin de développer les caractéristiques de divers facteurs qui régulent l'écoulement d'eau.

Aussi dans cette partie, on va identifier et évaluer les caractéristiques physiographiques et les caractéristiques morphométriques du bassin versant de l'Oued Lahdar, dans le but de les mettre en relation avec le comportement hydrologique et mettre en évidence de leurs influences dans celui-ci.

Dans on va entamer une analyse fréquentielle à l'échelle annuelle, mensuelle, saisonnière et une spatialisation probable pour une analyse cartographique afin d'établir les relations qui relient les variables géographiques (longitude et l'altitude) avec la variabilité spatio-temporelle des précipitations. Cette analyse des précipitations présente un socle rigide pour l'étude des crues et constitue un intérêt majeur pour la gestion et l'aménagement durable du bassin versant de l'Oued Lahdar.

L'analyse de la géologie du bassin versant de l'Oued Lahdar a été faite pour évaluer la nature des terrains liée à la lithologie et à la structure des roches, aux sols et aux formations superficielles. Il est donc, nécessaire de connaître la structure géologique du bassin puisqu'elle permettra une meilleure connaissance des potentialités des ressources en eau.

L'étude du réseau hydrographique essaie de caractérisée le mode de réponse des précipitations sur les versants et le type d'écoulement, particulièrement l'abondance relative du ruissellement et de l'infiltration à l'origine des processus morphogéniques sur les versants.

L'étude des activités humaines (socio-économiques) a été faite pour évaluer la pression exercée sur les versants par le déboisement, le labour, le surpâturage et autres pratiques agricoles.

Chapitre 1 :

ANALYSE DES COMPOSANTES NATURELLES ET HUMAINES DU BV DE L'OUED LAHDAR

Introduction,

- 1 Localisation du bassin versant d'Oued Lahdar,
- 2 Les facteurs climatiques du bassin versant d'Oued Lahdar,
- 3 Le couvert végétal dans le bassin versant d'Oued Lahdar,
- 4 Le contexte structural,
- 5 Les substrats,
- 6 Les sols,
- 7 Les caractéristiques humaines et l'occupation des sols dans le bassin versant les d'Oued Lahdar,

Conclusion.

INTRODUCTION :

Le présent chapitre traite le milieu physique et humain du bassin versant de l'Oued Lahdar. L'étude de ce milieu nous permet de reconnaître le rôle des paramètres naturels (le climat, le couvert végétal, la topographie, lithologie) et humain dans l'aggravation des risques liés à la dynamique fluviale.

Dans ce chapitre, nous allons se limiter à l'explication du rôle et de l'importance de chaque paramètre et déterminer leurs influences sur l'écoulement et les types de risque d'inondation.

Nous nous sommes interrogés sur les types des climats qui règnent sur la zone d'étude, particulièrement sur les modes des précipitations annuelles, mensuelles et journalières ; ensuite sur le rôle des températures, de même que sur le rôle du couvert végétal, du degré de protection des sols, de son état de dégradation et sur son rôle dans la vulnérabilité des versants.

L'analyse des caractéristiques topographique et géométriques du bassin versant de l'Oued Lahdar (analysé dans le chapitre : 2) essaie de caractériser les types du relief dominant et l'état de son évolution et les altitudes caractéristiques dans cette zone, ainsi que le rôle du système des pentes et d'orientations des versants dans la dynamique des eaux.

L'analyse du cadre géologique a été faite pour évaluer la part de la vulnérabilité des terrains liée à la lithologie des roches, à la structure, aux sols et aux formations superficielles. Cependant, l'étude des caractéristiques pédologique essaie de caractériser le mode de réponse des précipitations sur les versants et le type d'écoulement, particulièrement l'abondance relative du ruissellement et de l'infiltration à l'origine des processus morphogéniques des crues.

Le présent chapitre présente aussi l'état de l'occupation humaine dans le bassin versant de l'Oued Lahdar. Après avoir analysé des facteurs physiques, nous présentons un aperçu historique sur le développement des Centres territoriaux dans le BV de l'Oued Lahdar. Ensuite, nous abordons dans ce chapitre les aspects démographiques de la population, et la progression de l'entité territoriale dans cet espace fluvial du domaine rifain.

1 LOCALISATION DU BASSIN VERSANT D'LOUED LAHDAR :

Le secteur d'étude englobe la partie droite du bassin versant d'Oued Inaouène qui compte parmi les affluents principaux du bassin versant d'Oued Sebou. Il couvre une superficie de 611,44 km² et un périmètre de 142.21 Km, Soit 11,81% du bassin d'Inaouène (Fig. 1.1).

Situé entre les méridiens (4°15'W ; 3°58'W) et les parallèles (34°34'N ; 34°13'N), le bassin versant d'Oued Lahdar est limité à l'Est et au Sud par les affluents d'Oued Larbaâ, à l'Ouest par Oued Leben, et au Nord par le haut de l'Oued Quergha.

Le bassin versant Lahdar est traversé par plusieurs réseaux routiers, reliant plusieurs villages au nord de Taza, à l'instar de la route régional RR N 508 qui a travers les Centres de Meknassa al Gharbiya, Had Msila, El Gouzate et Taineste ; en plus d'une série de routes provinciales qui relient entre plusieurs communautés rurales.

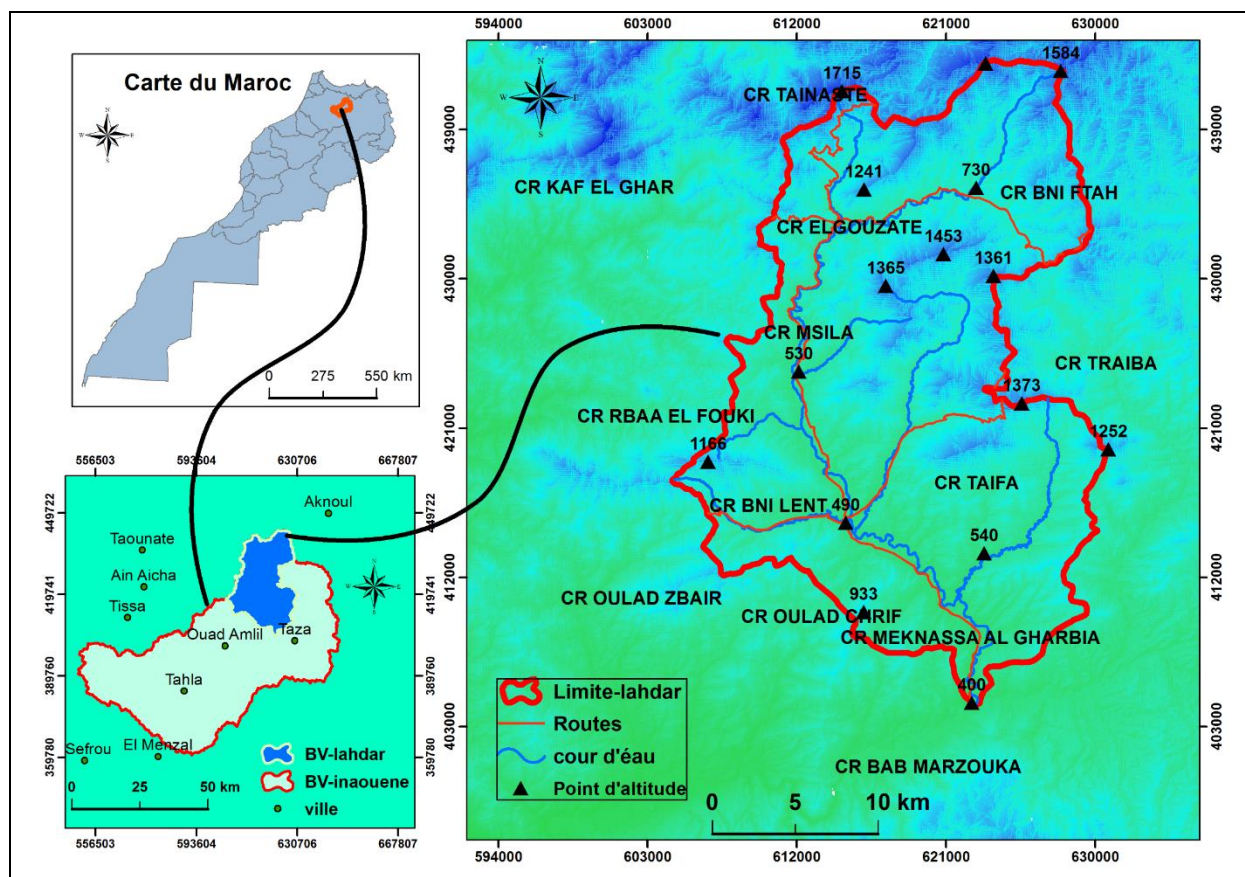


Fig. 1. 1-Localisation du bassin versant de l'Oued Lahdar.

2 LES FACTEURS CLIMATIQUES DU BASSIN VERSANT DE L'OUED LAHDAR :

La recherche climatologique est indispensable à toute recherche hydrologique ou hydrogéographique. Ceci permet d'analyser le comportement de ces facteurs (précipitations, température, ...), ainsi que les différentes interactions avec l'environnement physique du BV.

Les précipitations et les températures sont les principaux paramètres climatiques nécessaires pour décrire l'environnement climatique dans le bassin de l'Oued Lahdar, à l'aide des données fournies par plusieurs stations réparties dans le terrain.

Les caractéristiques climatiques de la zone d'étude sont l'interaction des centres de hautes et de basses pressions, qui divisent l'année hydrologique en deux saisons distinctes : l'hiver pluvieux et froid, qui se prolonge de novembre à mars – avril ; quant à l'été chaud et sec, il se prolonge de juin à septembre.

2.1 Les précipitations :

Les précipitations font référence à toute l'eau météoriques qui tombent sur la surface de la terre, tant sous forme liquide (brume, pluie, averse) que sous forme solide (neige, grésil, grêle) et les précipitations déposées ou occultes (rosée, gelée blanche, givre, ...) Elles constituent l'entrée des principaux systèmes hydrologiques et hydrogéologiques. Elles sont caractérisées par trois paramètres principaux : leurs volumes, leurs intensités et leurs fréquences qui varient selon les lieux, les jours, les mois et aussi l'année. La compréhension de ces trois paramètres est essentielle pour planifier l'utilisation des précipitations. Elles sont des données climatiques qui varient considérablement dans l'espace et dans le temps, de telle sorte que la seule considération des

valeurs moyennes des précipitations n'a qu'une signification limitée. Il faut, en effet, associer les pluies leurs fréquences d'occurrence. Cela permet d'introduire les notions des types des années hydrologiques : années sèches, normales et humides.

La mesure directe des précipitations est réalisée à l'aide des pluviomètres installés dans des stations pluviométriques, qui forment un réseau couvrant la zone d'étude. Tout simplement, ils peuvent mesurer la quantité d'eau de pluie collectée à un point. Mais cette valeur unique dans un point x donnée ne constituant aucun intérêt pour des opérations d'aménagement, de gestion des eaux et de prévention des risques naturels et surtout dans l'interprétation des phénomènes pluvieux extrêmes.

Afin de décrire les caractéristiques climatiques du bassin versant de l'Oued Lahdar et montrer la variabilité spatiale et temporelle des précipitations, nous avons utilisé les données pluviométriques disponibles des stations situées dans la zone d'étude et d'autres stations proches. (Tabl. 1.1).

Tabl. 1. 1 - Coordonnées et données annuelles des stations choisies.

Stations	Durée et période D'observation	Coordonnées			Précipitation		
		X (km)	Y (km)	Z(m)	Moyenne (mm)	Maxima (mm)	minim (mm)
Oued Amlil	1978/1979-2010/2011 (33ans)	603	399,2	300	478,07	1027,5	191,2
Taza	1931/1932-2010/2011 (80ans)	626,19	404,58	458	589,12	1044,6	274,7
Bab El Mrouj	1953/1957-1963/1964 (10ans)	624,2	425	1060	1367	512	512
Bab Echhoub	1992/1993-2013/2014 (22ans)	222,47	406,25	410	597,61	1151	247
Bab Marzouka	1970/1971-2010/2011 (42 ans)	615,84	400,84	365	562,58	987	300
Taineste	1973/1974-2006/2007 (34ans)	616,2	439,6	1250	942,18	1098,05	294,06
Marticha	1962/1963-1982/1983 (20ans)	613,89	428,15	700	783,89	1165,5	387,7
Bab Lakhmis	1973/1974-1984/1985 (13ans)	604,64	438,76	1210	724,5	907,7	518,3
El Kifan	1973/1974-2006/2007 (34ans)	641,64	432,44	800	301,4	433,4	116,1
Had Msila	1975/1976-2017/2018 (43ans)	610,9	425,1	600	696,27	1400	289,3
Ain Boukellal	1977/1978-1993/1994 (17ans)	635,3	417,6	550	619	263	263

(Source : ABHS, 2014)

Pour l'analyse du taux des précipitations annuelles et du taux des précipitations mensuelles, nous avons utilisé toutes les informations disponibles, bien que la période d'observation relative ne soit pas homogène, allant de 80 ans à Taza à 10 ans à Bab El Mrouj : à travers la base de données de ces 11 sites, nous tentons de réaliser une synthèse climatique qui reflète la réalité des conditions environnementales.

2.1.1 La répartition spatiale des pluies annuelles dans le BV de l'Oued Lahdar :

A partir du tableau des données annuelles des stations sélectionnées, la répartition des précipitations moyennes annuelles dans le bassin versant Lahdar montre une répartition inégale entre le nord et le sud et souligne le contraste entre les différents secteurs du bassin versant.

La partie nord du bassin de l'Oued Lahdar, à 1700 m d'altitude, est située au Centre de la zone territoriale de Taineste et reçoit les précipitations les plus importantes, elles sont estimées à la station de Taineste à 945 mm pour une durée d'observation de 34 ans (1973/1974-2006/2007) et à la station de Marticha à 783,89 mm pour une durée d'observation de 20 ans (1962/1963-1981/1982) cette partie du bassin versant est relativement élevée et ouverte à la perturbation océanique chargée d'humidité.

Au sud de BV Lahdar, dans le Centre territoriale de Meknessa El Gharbiya, il atteint 400 m d'altitude, la station de Bab Echhoub a reçu 597,61 mm pour une durée d'observation de 22 ans (1992/1993-2013/2014), au Centre du BV, la station de Had Msila a reçu 696,27 mm, pour une durée d'observation de 43 ans (1975/1976-2017/2018).

La différence des quantités des précipitation reçues par les différentes stations du BV s'explique par l'altitude et l'orientation des versants vers l'ouest des versants exposées aux perturbations océaniques chargées d'humidité sont très arrosés. Vers l'est, les versants sont par contre situés à l'abri des vents humides et reçoivent par conséquent moins de pluies signalons que le nombre annuel de jours de pluies reste extrêmement variable selon les années. Ou en raison principalement de la différence de hauteur entre les différentes régions du bassin versant considérant que les régions de haute montagne reçoivent des chutes de neige, surtout pendant l'hiver comme le cas du secteur de Taineste.

La comparaison des variations des précipitations interannuelles concernant les stations de Had Msila et Bab Echhoub montre une grande variabilité d'une année à l'autre, (Fig. 1.2 et 1.3).

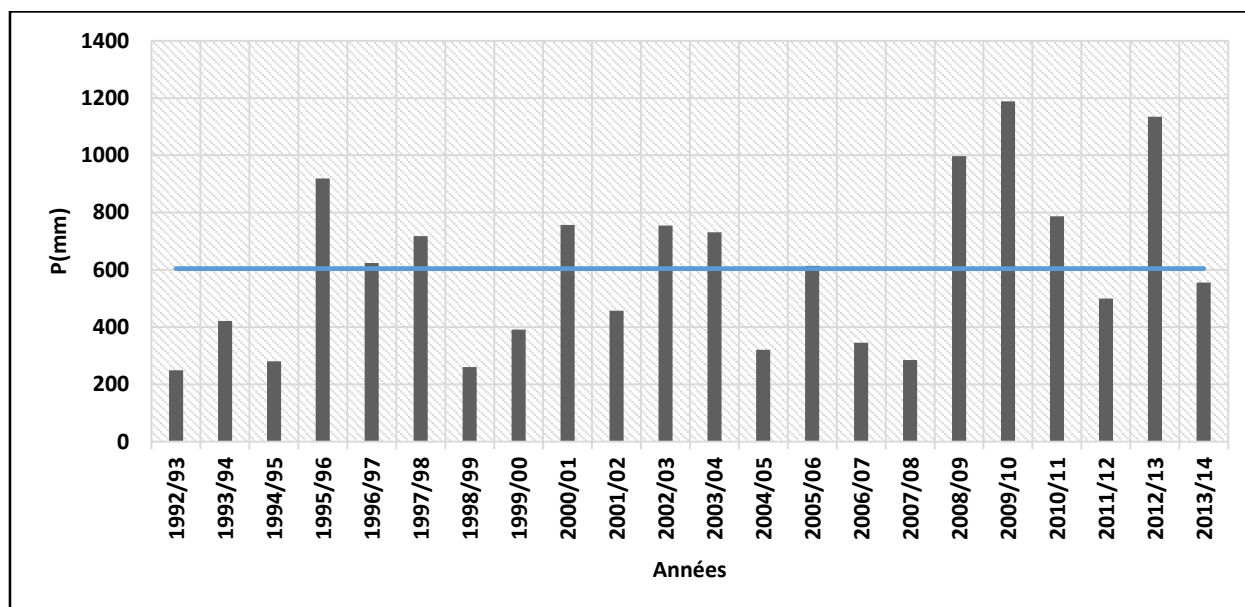


Fig. 1. 2- Variations des précipitations annuelles dans la station de Bab Echhoub (1992/1993-2013/2014).

Les quantités d'eau précipitées sur le bassin versant de l'Oued Lahdar pendant la période étudiée mettent en évidence la forte irrégularité spatiale et temporelle de la pluviométrie, ce qui est caractéristique du bassin versant de l'Oued Lahdar. Les précipitations annuelles varient considérablement d'une année à l'autre, ce qui est typique des régions semi arides. La variabilité spatiale existe mais est moins prononcée, car si elle est forte à l'échelle de l'évènement, cette variabilité s'estompe en valeurs cumulées à l'échelle de l'année. La pluie annuelle varie de 250 mm sur la station de Bab Echhoub en 1992/1993 à 1400 mm sur la station de Had Msila en 2009/2010.

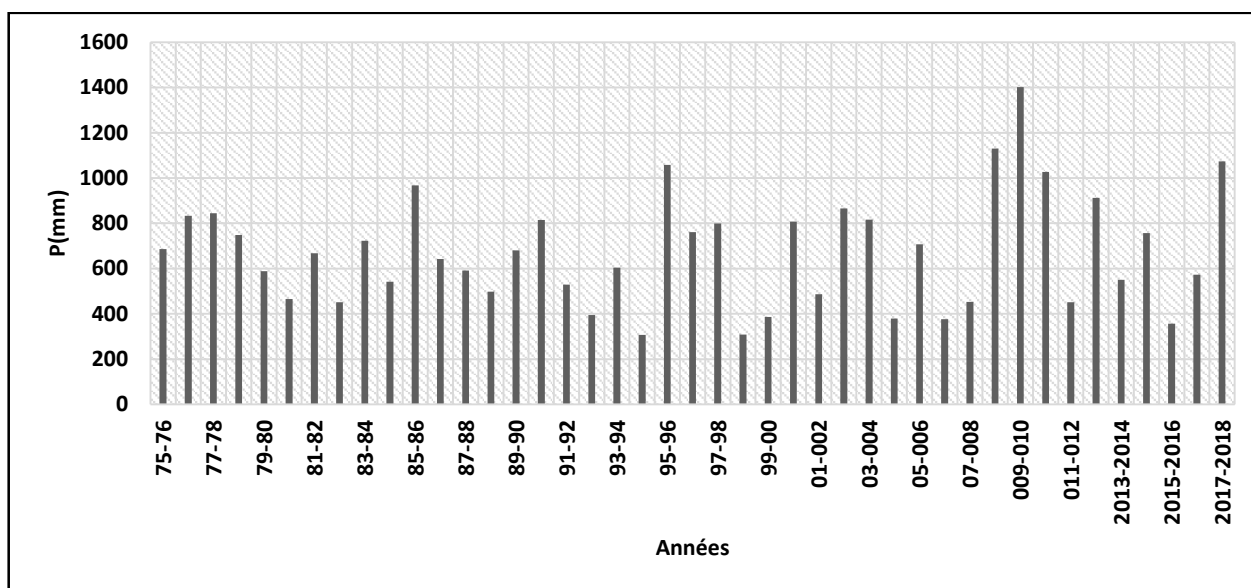


Fig. 1. 3 - Répartition des précipitations annuelles dans la station de Had Msila (1975/1976-2017/2018).

Cette variabilité est liée localement aux versants orientés vers l'ouest sont plus mouillés pendant la phase pluvieuse, que les versants orientés vers l'Est, les versants W sont plus exposés au vent océanique chargé d'humidité. On peut en déduire que les caractéristiques climatiques changent en fonction du changement de l'orientation des versants. L'exposition aux vents d'est (Chergui) que l'exposition des versants aux vents d'ouest (Gharbi).

Le graphe de l'écart à la moyenne de la station de Bab Echhoub (Fig. 1.4) montre des précipitations faibles à l'époque des années 90, sauf les années de 1995/1996 et 1998/1999 et les années deux-milles qui dépassent la moyenne interannuelle ; ainsi cette valeur a variée entre 82 % et -41% dans les années deux-milles et dans les années 90 entre 38% et -60%. En revanche, le graphe de l'écart à la moyenne de la station de Had Msila montre une succession des années sèches et humide, (Fig. 1.5). Cette période d'observation de l'écart à la moyenne enregistre une valeur maximale de 107% à l'année 2009/2010 et un pourcentage négative de -54% pour l'année 1998/1999.

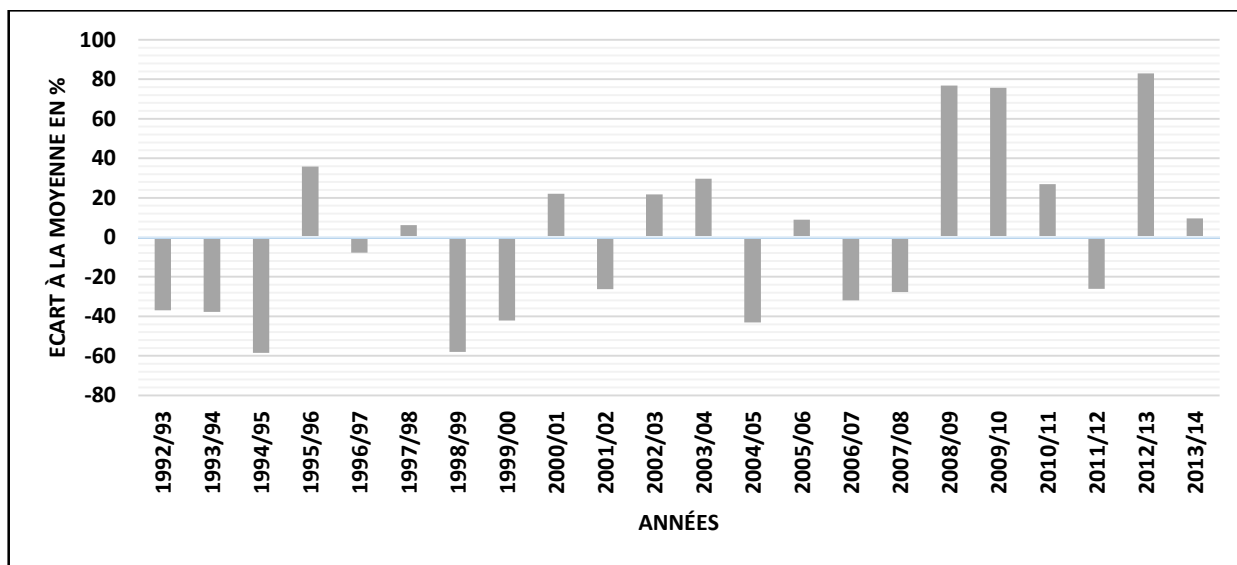


Fig. 1. 4 - L'écart à la moyenne des précipitations annuelle dans la station de Bab Echhouf (1992/1993-2013/2014).

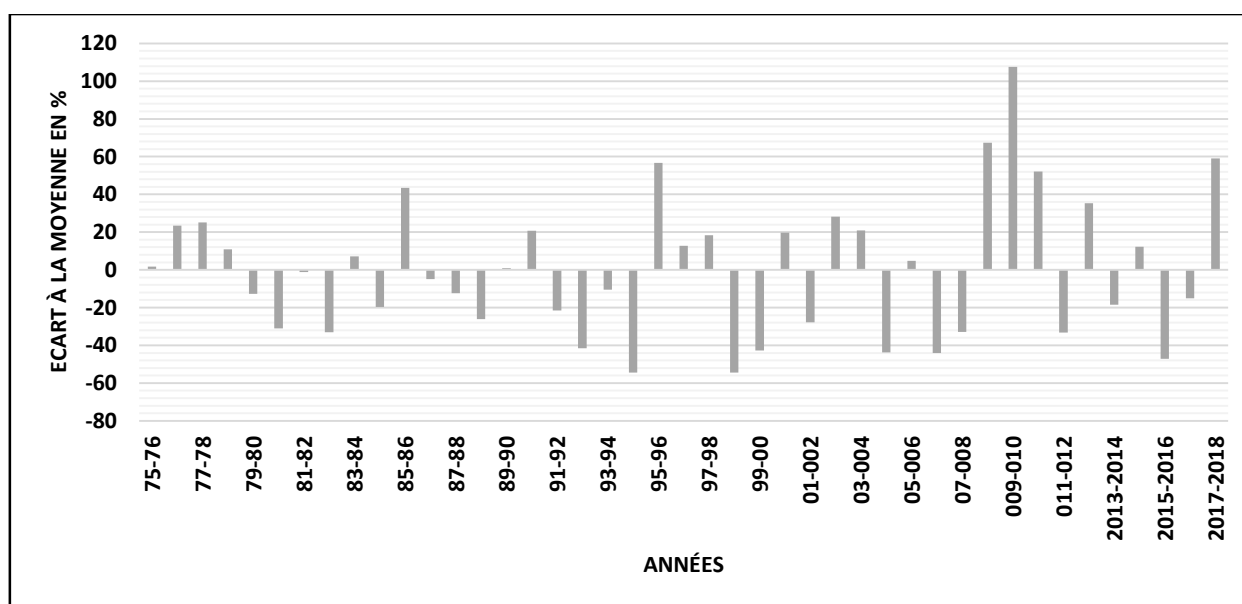


Fig. 1. 5 - L'écart à la moyenne des précipitations annuelle dans la station de Had Msila (1975/1976-2017/2018).

L'analyse de l'évolution annuelle des pluies montrent le caractère très irrégulier (propre au climat méditerranéen) de la pluviométrie dans cette région du Prérif. Les périodes de sécheresse par exemple dans la station de Had Msila sont plus homogènes et sont marquées par une succession presque ininterrompue au cours des années déficitaires (phases sèches de 1979/1980-1994/1995).

Les périodes humides sont souvent intercalées entre des périodes sèches, qui sont des fois très sévères. La dernière phase de la série se démarque clairement par des indices records qui indiquent une réelle augmentation du cumul pluviométrique des années 2008/2009, 2009/2010, 2010/2011.

2.1.2 Les précipitations mensuelles :

L'objectif de cette analyse est de comprendre la répartition des précipitations à l'échelle mensuelles dans le bassin versant. En effet, les changements mensuels des précipitations peuvent fournir une meilleure compréhension de la distribution temporelle des apports du bassin versant d'un point de vue qualitatif et quantitatif.

Dans le BV de l'Oued Lahdar, pour une année normale, les premières pluies abondantes débutent à la dernière décade d'octobre elles redoublent de vigueur dans la deuxième moitié de décembre, puis elles vont en diminuant régulièrement à partir de mars pour s'arrêter au début du mois de juin (Fig. 1.6 et 1.7).

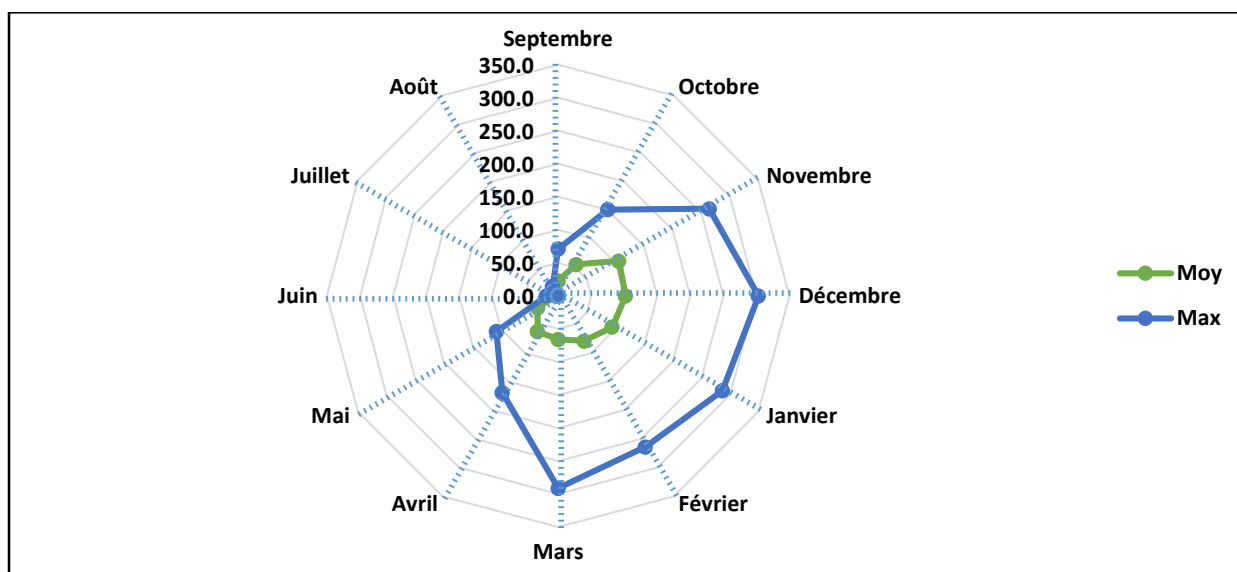


Fig. 1. 6 - Moyenne mensuelles des précipitations à la station de Bab Echhoub (1992/1993-2013/2014).

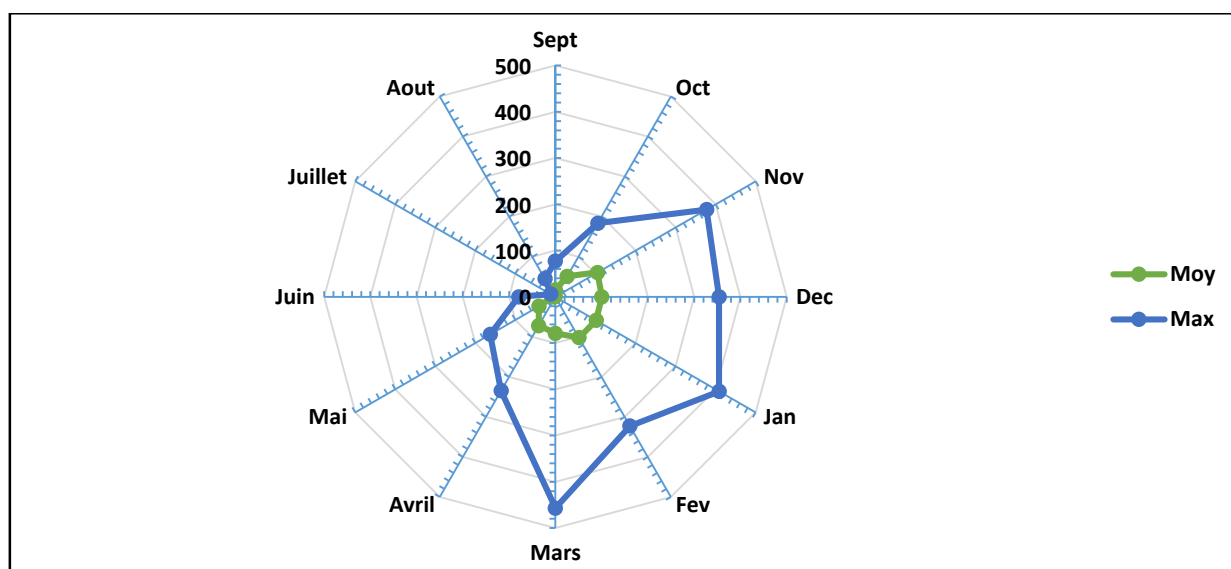


Fig. 1. 7 - Moyenne mensuelles des précipitations à la station de Had Msila (1975/1976-2017/2018).

Cette différenciation est basée sur les hauteurs moyennes mensuelles des précipitations qui se caractérisent par des discontinuités évidentes et une différence entre deux périodes de l'année : la saison des pluies et la saison sèche.

L'analyse des diagrammes montre que la période de pluviométrie importante commence dès le mois de septembre pour l'ensemble des stations observées et s'étend jusqu'au mois de mai. La période de faible pluviométrie commence dès le mois de juin (début d'été) et se termine au mois de septembre.

Les résultats de l'analyse des variations mensuelles des précipitations de chaque station montrent que :

Période pluvieuse : correspond à la période qui se prolonge depuis le mois Octobre, jusqu'au mois Avril. Sa particularité est que la répartition est relativement régulière, et les deux stations ont atteint leurs maximums en mois décembre.

Période sèche : s'étend depuis le mois mai jusqu'au mois septembre, Cette période a été caractérisée par le manque de précipitations et la sécheresse, expliquée par la dominance de l'anticyclone Açores qui entraîne la stabilité de l'atmosphère, avec une valeur minimum au mois juillet.

2.1.3 Variation saisonnière des précipitations :

Le climat de la région est défini par succession de deux saisons très tranchées dans l'année ; à un été chaud et sec se succède une saison relativement pluvieuse et plus fraîche. La période humide se prolonge globalement de la fin de l'automne au début du printemps. La variation saisonnière de la pluviométrie au niveau des deux stations (Bab Echhoub et Had Msila), est assez prononcée. (Fig. 1.8 et 1.9) :

L'analyse des variations saisonnières est également importante pour déterminer les saisons où les précipitations sont plus fréquentes. Alors que la variation saisonnière des stations de Bab Echhoub et Had Msila montre que l'hiver est la saison la plus pluvieuse avec des précipitations qui peuvent atteindre 1023 mm à Had Msila et de 794 mm à Bab Echhoub. En revanche, l'été est la saison la plus sèche, mais avec des précipitations exceptionnelles qui peuvent atteindre 86 mm à la station de Had Msila et de 25 mm à la station de Bab Echhoub.

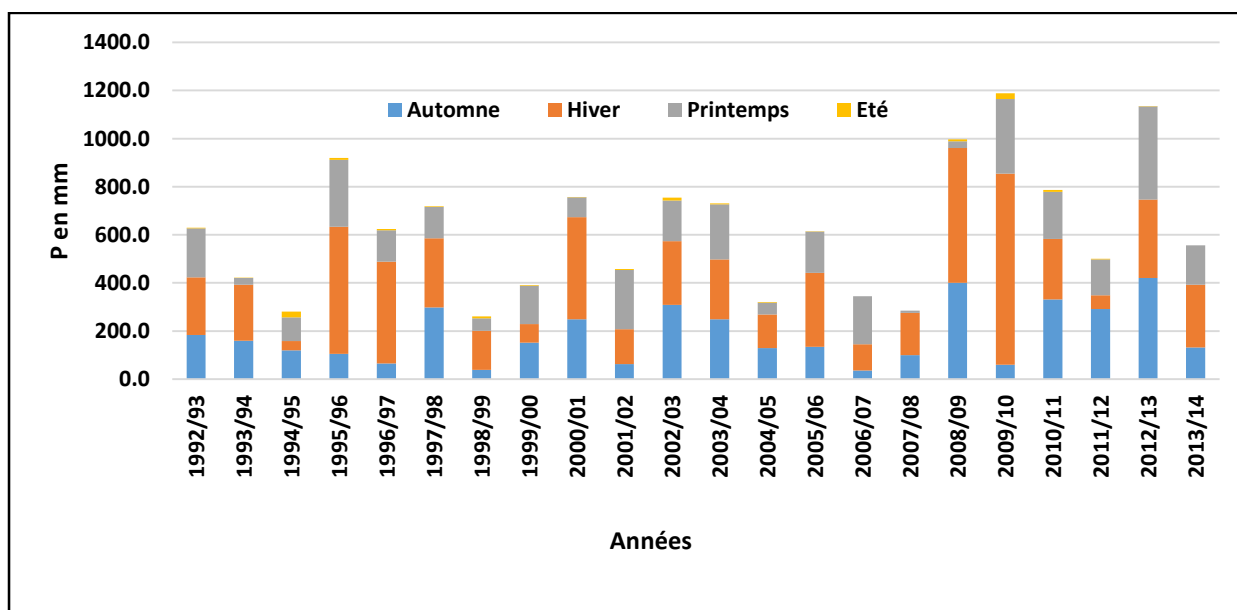


Fig. 1. 8 - Répartition saisonnière des précipitations annuelles dans la station de Bab Echhoub (1992/1993-2013/2014).

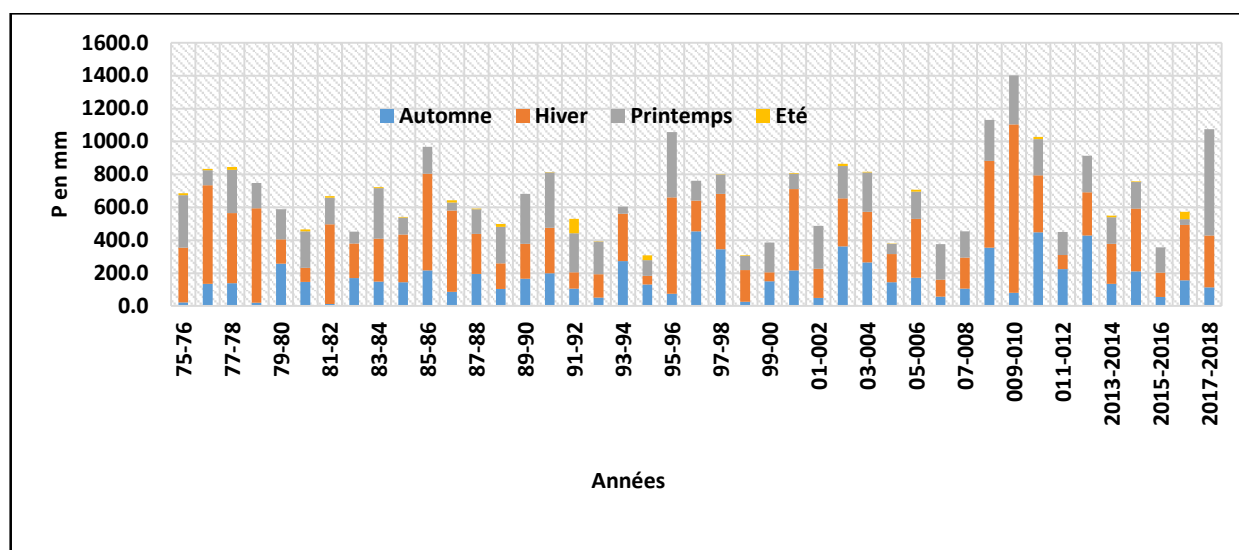


Fig. 1. 9 - Répartition saisonnière des précipitations annuelles dans la station de Had Msila (1975/1976-2017/2018).

A partir de la figure on peut dire que les précipitations maximales se produisent non seulement au niveau de l'hiver, mais sont également importantes aux niveaux d'automne et de printemps, puisque les quantités maximales sont enregistrées pendant l'automne et pendant le printemps, on a observé aussi des périodes où l'hiver enregistre des quantités inférieures à celle du printemps et d'automne, à titre d'exemple la période 1993/1994-1999/2000 l'hiver a enregistré 23% de la quantité des précipitations, par contre le printemps a enregistré 35% et 39% pour l'automne, la même chose pour la période de 2001/2009 puisque l'hiver a enregistré que 21.8%, le printemps a enregistré 38.4% et 40% pour l'automne. Les mêmes observations pour les périodes de 1991/1992 et 1994/1995, la période 2008/2009 a enregistré 81.3% des précipitations pendant l'hiver.

Même observation à la station de Had Msila qui enregistre la répartition inégale des précipitations entre les saisons, (Fig. 1.9). Celle-ci montre (au cours de la période 1979/1980) que l'automne enregistre 44.13% des précipitations, et le printemps 31.04%. Par contre, la saison d'hiver a enregistré que 24.83%, au cours de la période 1974/1975 ; le printemps et la saison la plus pluvieuse avec 62.46% des quantités des précipitations, la période 1980/1981, le printemps a enregistré 43.11% suivi par la saison d'automne avec 38.25%, par contre la saison d'hiver a enregistré que 16.70%, tandis que pendant la période 2011/2012 la saison d'automne a enregistré 60.49%, et le printemps avec 21.91%, la saison d'hiver a enregistré que 17.60% des quantités des précipitations, on a observé au niveau de la période de 1996/1997 que l'hiver est la saison la plus pluvieuse avec 90% des quantités des précipitations.

Considère que les premières pluies d'automne qui se caractérisent par leur intensité et leur brutalité et l'augmentation de l'érodabilité de sol et des averses orageuses. (Exemple de l'année 1996/1997, la saison d'automne enregistrée 454 mm), favorisent la formation des inondations dans cette saison et les dégâts menaçant des infrastructures et les dégâts humaines.

L'étude pluviométrie de la zone étudiée montre que les agents climatiques sont des principaux facteurs responsables de la variation de la dynamique fluviale. L'eau précipitée est

souvent brutale sous forme d'averse très concentrée dans le temps et l'espace et le contraste saisonnier est très important. Ce qui permet de caractériser le climat de la zone étudiée d'agressif.

2.2 La température :

La température intervient directement dans la structure des matériaux en particulier pour le détachement des particules rocheux et de formations superficielles, le sol nu est très exposé à l'impact du soleil, il est très influencée par la température minimale d'hiver et maximale d'été et par l'amplitude thermique annuelle, qui se caractérise par de forte température pendant la période sèche. Cette analyse conclue en le rôle principal de l'altitude et son influence sur la répartition de la température spatiale.

2.2.1 La Température moyenne (maximale et minimale) :

Le bassin versant de l'Oued Lahdar est caractérisée par des amplitudes thermiques annuelles importantes. Il présente des températures fortes pendant la période sèche qui ont lieu aux mois de juillet et Aout, Approximativement de (34.8 °C) et des températures minimales durant la saison d'hiver qui a lieu aux mois de décembre et janvier, environ de (5.53°C).

Afin de montrer les changements de température temporelle, nous avons utilisé les données de température mensuelles de la station de Taza, (Tabl. 1.2). Cette dernière montre que le mois le plus chaud, est celui de Juillet (40 °C). Alors que, la moyenne minimale est celle du mois de Janvier (2.7°C).

Comme dans tout le Maroc, le mois le plus chaud et le mois de Juillet et Août, et le mois le plus froid est Janvier. Pendant la saison d'hiver la moyenne minimum peut atteindre des valeurs absolues en dessous de 0°C ; ce qui se répercute par la formation de la grêle et de la neige en altitude.

Tabl. 1. 2 - Variations mensuelles des températures dans la station de Taza (1990/1991-2012/2013).

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
T°, Moy	10.67	12.23	14.69	16.16	19.98	25.24	28.94	29.17	24.38	19.44	15.03	15.78
T°, max	36.2	21.7	23.4	24.9	30.1	36.2	40	40.4	3.33	31.6	25.8	18.8
T°, min	2.7	4.1	7.6	9.5	10.9	14.3	18.5	19.5	16.5	6.6	8.3	5.5

La moyenne maximale s'étend sur quatre mois (Juillet, Juin, Août et Septembre), elle influe sur les formations superficielles. En effet, la température d'été renforcé la vulnérabilité des sols. Pendant la saison d'hiver, les premières pluies forment sur ces sols des couches imperméables (croûte de battance) renforçant le phénomène de ruissellement qui peut provoquer l'écoulement des chaâbat et par conséquent la création des crues.

En effet, la température joue un rôle secondaire dans la naissance et l'aggravation des crues dans le bassin de l'Oued Lahdar ,elle influe sur l'état du sol notamment lors de la saison d'été qui précède les premières averses ,elle devient au niveau de la compaction des gouttes des pluies qui provoquent les processus d'érosion hydrique et de perte de sol ,ce qui constitue des conditions favorables pour l'accentuation du ruissellement lors de la saison d'hiver ,donnant des débits élèves, qui participent à la naissance et l'aggravation des crues et des inondations.

2.3 Le diagramme ombrothermique :

Il est utilisé pour déterminer les périodes sèches et humides de l'année. Il a défini la période humide comme les précipitations mensuelles dépassant le double de la température mensuelle, et la période sèche lorsque la température mensuelle dépassait le double des précipitations mensuelles.

Le diagramme ombrothermique (Fig. 1.10) de la station de Taza (période 1990/1991 – 2012/2013) montre que la période humide dure huit mois et couvre la période d'octobre à Mai.

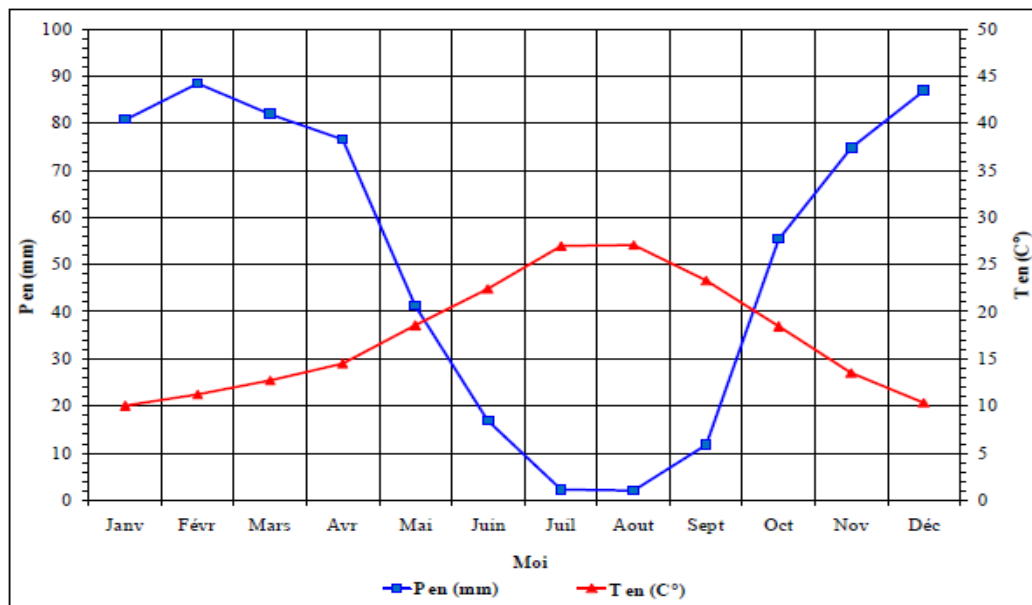


Fig. 1. 10 - Diagramme ombrothermique Gaussen de la station de Taza période (1990/1991 – 2012/ 2013).

La région de Taza se caractérise par un climat méditerranéen, avec des hivers humides et des étés secs. Elle se caractérise par deux saisons bien distinctes :

- La saison pluvieuse s'étend sur près de huit mois d'octobre à avril de l'année suivante, avec une pluviométrie annuelle moyenne d'environ 596mm.
- La saison sèche s'étend de Juin à Septembre où la moyenne des températures maximales enregistrée est de 36.2°C à Juin.

Les éléments climatiques, notamment les précipitations, ont été analysées en détail afin de déceler les caractéristiques les plus sévères, qui conduisent à la genèse des crues, dans la zone étudiée.

Les résultats de cette analyse nous pouvons souligner les conclusions suivantes :

La moyenne mobile sur cinq ans reflète de graves déficits pluviométriques, en particulier dans les années 1980/1981 et 1990/1991. Elle est considérée comme une période de sécheresses alternées, cependant, quelques années humides voire très humides sont encore propices à la réémergence des crues.

Les précipitations mensuelles exceptionnelles changent avec le temps et elles sont très importantes car elles contribuent beaucoup au module annuel, conduisant aussi les crues.

Dans les mois entre novembre et février, les précipitations quotidiennes de plus de 20 mm représentaient une proportion très importante et étaient considérées comme probablement les plus agressives. La plupart des stations enregistrent des précipitations exceptionnelles dépassant les 80 mm par jour ; elles atteignent parfois des records de morphogénèse très importants.

La température, caractérise plus particulièrement la saison sèche, interviennent largement sur l'état structural des sols et influencent, par conséquent, le ruissellement. Une dessiccation excessive se traduit, au niveau des structures, par une prise en masse dans les sols argileux et une pulvérisation des sols limoneux (Rognon. 1984).

3 LE COUVERT VEGETAL DANS LE BASSIN VERSANT DE L'OUED LAHDAR :

L'étude des facteurs climatiques joue un rôle important dans la compréhension de la nature du couvert végétal, les espèces végétales s'adaptent au climat existant, d'un milieu naturel à un autre milieu naturel différent, le facteur climatique de la région de Taza influence primordialement sur la répartition du couvert végétal au niveau du bassin versant sur des zones limitées. Aussi l'intervention humaine dans cette zone est considérée comme un facteur très important (surpâturage, défrichement, incendies de forêt, et évolution de culture) qui peut orienter d'une façon à la fois qualitative et quantitative le façonnement de couvert végétal, et donner aussi naissance à une régression du couvert végétal et au déclenchement des processus d'érosion sur les versant et aux phénomènes des crues aux pieds des versants surtout dans les milieux rifains.

La carte de répartition géographique de la couverture végétale et de l'occupation des sols dans le bassin versant de Lahdar (Fig. 1.11) montre que les montagnes sont couvertes de forêts, et d'autres zones sont sous forme de forêts dégradées ou de terres cultivées.

D'après la carte (Fig. 1.11) ; la répartition de la couverture végétale dans le bassin versant étudié est caractérisée par une densité au niveau de la zone nord, par contre elle est moyenne et nulle vers la partie centrale et la zone sud de ce bassin. Une telle répartition confirme l'impact des facteurs climatiques suivant l'orographie et l'exposition.

la partie nord du BV montre l'importance des surfaces couverte par le matorral et la foret, cette partie est principalement composée de chêne vert (*Quercus ilex*), de pin d'Alep et de chêne-liège et de quelques espèces moins propagées comme par exemple le thuya qui occupe une région étroite de l'espace étudié ,et l'oxycedre ,par contre l'aire de pin maritime n'occupe qu'une partie très réduite dans la région de el Gouzate.

Sur le long de la vallée du Lahdar, les zones cultivées de type Bour alternés par des terrains de culture irriguée sont abondantes, situées sur les lits des rivières, les terrasses et les cônes de déjection, car la disponibilité de l'irrigation permet le développement de l'agriculture moderne.

La majorité des zones pré rifaines au long de l'Oued Lahdar sont caractérisées par la colonisation des plantes d'oliviers et des arbres fruitiers et l'extension de céréales (blé dure, orge etc.,) la prolifération des zones nues dans le BV de Lahdar correspond parfaitement aux sols nus, terrains rocheux, aux lits de l'Oued et surtout aux traces d'érosion (badlands et ravines).

L'arboriculture dans le bassin est pauvre et certaines terres agricoles sont équipées pas de puits. La plupart des arboricultures sont des oliviers et des arbres fruitiers.

A l'état naturel, lorsque l'homme n'intervient pas, le sol est couvert de végétation, les feuilles et les branches constituent une protection contre l'impact de la pluie. Les feuilles mortes et les brindilles cassées forment une litière superficielle qui permet de retenir l'eau précipitée (Gartet.2001).

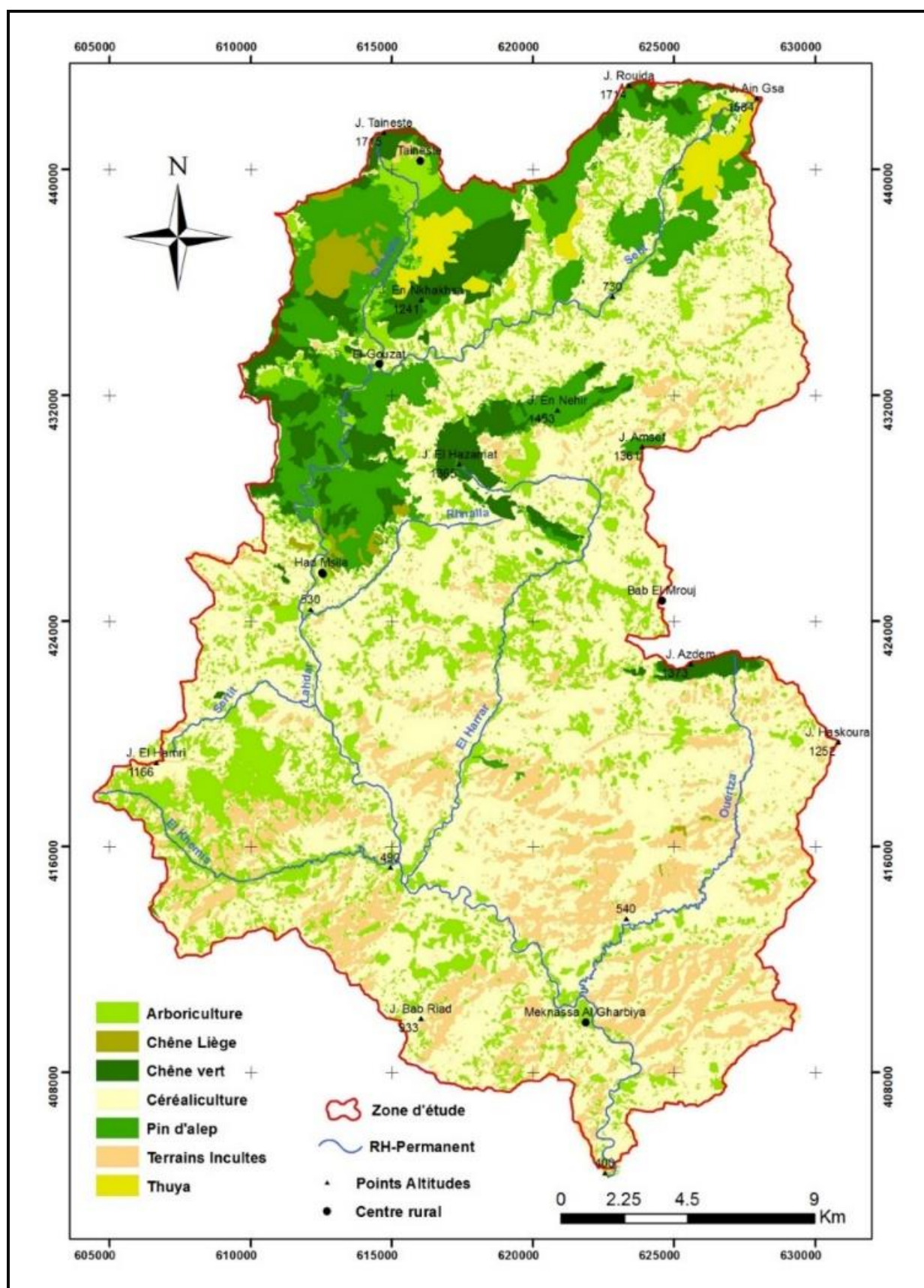


Fig. 1. 11 - Répartition du couvert végétal et l'occupation du sol dans le bassin versant de Lahdar (D'après la carte du couvert végétal et l'occupation de sol de Taza.1/250000).

D'une manière générale, l'impact du couvert végétal sur le ruissellement peut être brièvement décrit comme suit :

- La modification du drainage interne du sol, est liée à la présence du réseau racinaire superficiel et profond.
- L'amortissement des crues de faible et moyenne amplitudes.
- la régularité des débits du cours d'eau.
- l'augmentation de l'évapotranspiration et de l'évaporation.
- la rétention et le freinage du ruissellement, l'effet de ce facteur varie selon le type de tapis végétal.

Au contraire, comme la situation actuelle du bassin versant de Lahdar, (la superficie forestière représente 20% de la superficie totale du BV) lorsque le couvert végétal disparaît (par la culture, ou le surpâturage, les incendies ou aux aléas climatiques) le sol nu devient fragile et vulnérable et incapable de retenir l'eau précipitée.

Les gouttes de pluie ont un grand impact sur du sol et la formation superficielle, La première pluie peut facilement boucher les vides du sol, réduire l'infiltration interne et provoquer un ruissellement de surface presque au aussitôt que la pluie commence à tomber.

4 LE CONTEXTE STRUCTURAL :

Le bassin versant de l'Oued Lahdar appartient à la chaîne rifaine, qui fait partie du système des chaînes alpines de la Méditerranée occidentale, et qui se prolonge vers l'Est dans le Tell algérien avec lequel elle forme les maghrébines (Aubouin et Debelmas. 1980, Durant et Delga. 1980, In Frizon et al. 1991).

Les caractéristiques géologiques que représentent le cadre lithologique et structurale, ainsi que la fracturation et la porosité des roches dans le BV contrôlent les schémas d'écoulement et la morphogénèse. Ils agissent sur la circulation des eaux de pluie et déterminent l'écoulement rapide dans le cas des formations imperméables, ou là l'infiltration et le stockage de l'eau dans le cas des formations perméables. Donc il est obligatoire de connaître la structure géologique de notre BV, Parce qu'il permet aux gens de mieux compréhension le potentiel des ressources en eau.

L'analyse des caractéristiques géologiques de notre BV sont basées sur la carte géologique du rif (1/500 000). On peut dire que l'ensemble du bassin de Lahdar appartient à un environnement géologique dominé par des couches principalement marneuses et marno-calcaire autochtones du crétacé et de la fin du tertiaire, les roches gréseuses au conglomératique résistantes, plus particulièrement sur les sommets des montagnes au nord du BV sont encore rarement représentatives, de plus l'intensité de la fracturation et la présence de plusieurs accidents tectoniques renforcent la fragilité des terrains dans le BV de Lahdar. Par conséquent l'ensemble du bassin versant de Lahdar est formé par trois ensembles d'unités morpho-structurales sont distingués dans le bassin versant de l'Oued Lahdar : l'unité du Prérif (Interne/Externe), nappe d'Ouezzane (Unité de Tsoul) et l'unité de Jbel en Neher (Fig. 1.12). Au Nord, le domaine interne est constitué en majorité par des terrains allochtones à matériel résistant (nappe de Bouhadoud, unité de type J. Enjir) avec quelques terrains autochtones marneux ou schisto-gréseux. Au Sud, dominant les terrains marneux autochtones de la nappe Prérifaine qui sont en partie couverts par des terrains allochtones appartenant au système d'Ouazzane (Leblanc. 1975)

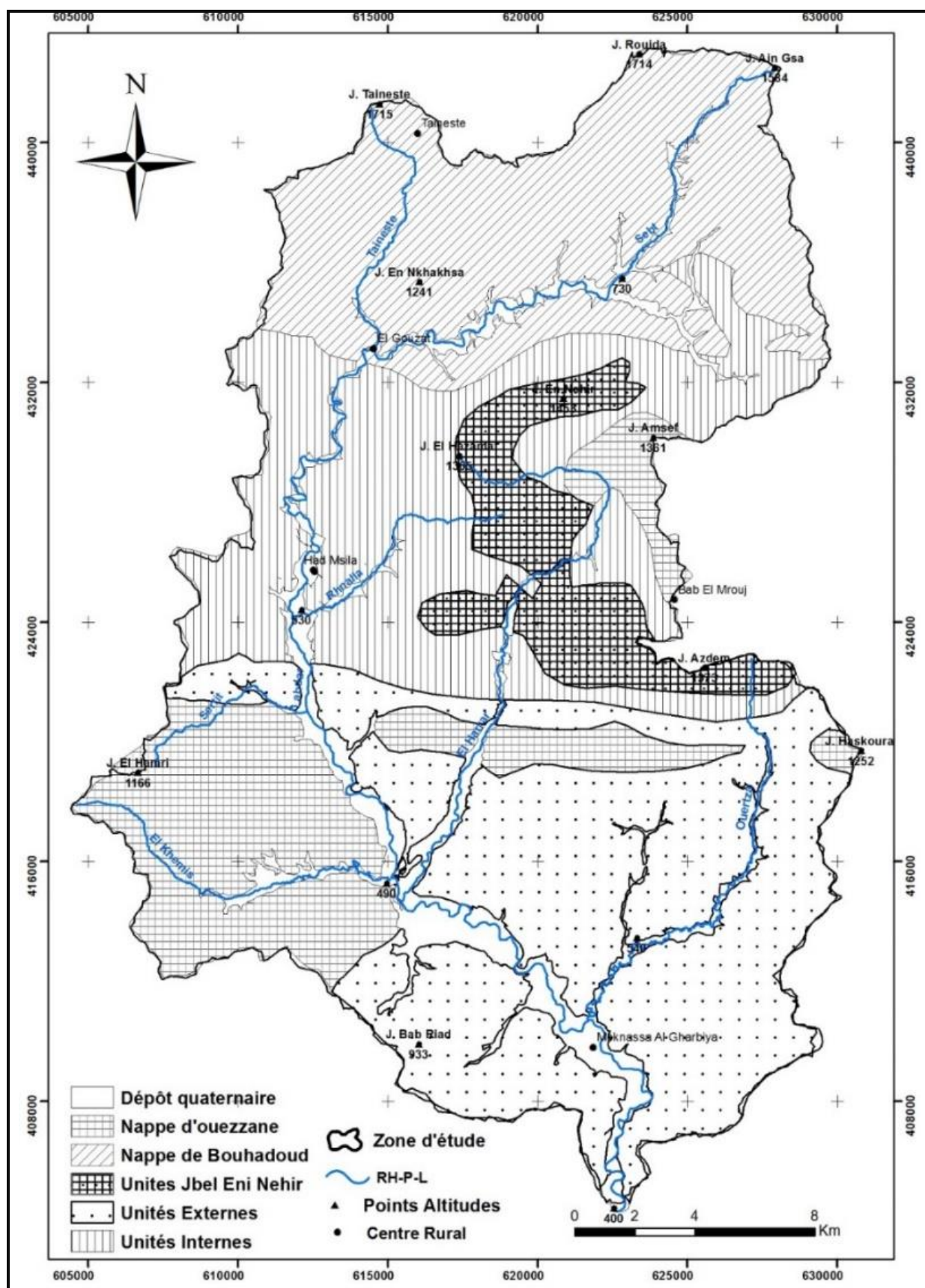


Fig. 1. 12 - Carte des unités structurales de bassin versant de l'Oued Lahdar.

La région d'étude est un milieu géologique, qui combine une formation très fragile et imperméable, ce qui permet un ruissellement important pendant la saison pluvieuse, ce qui peut conduire à des crues plus rapides et plus violentes.

L'unité du Prérif :

En dehors de l'ensemble montagneux rifain, il existe une zone dominée par des collines argilo-marneuse. On l'appelle aussi Prérif. Il forme l'extrémité la plus méridionale de la rifaine. Il est limité au Sud par la plaine du Saïs, sur laquelle sont bâties les villes de Fès et Meknès, à l'Ouest par la plaine du Rharb et le pays des Zemmour, et vers l'est, il ne dépasse pas la vallée du Sebou. Subdivisé en Prérif interne et Prérif externe (Wildi, 1983, Marçais et Suter in Durand- Delga et al. 1962).

La nappe Prérifaine forme une vaste ceinture olistostromique qui frange au sud, avec des nappes gravitaires associées, l'édifice rifain (Frizon De La motte. 1985). Cette nature olistostromique de la nappe Prérifaine est mentionnée par de nombreux chercheurs ayant travaillé sur le Prérif (Vidal. 1984, Ennadifi. 1974, Leblanc. 1975). Selon Vidal, les marnes du complexe Prérifaine constituent la matrice d'un vaste olistostrome déposé sur l'avant pays et dans lequel les formations de la série Prérifaine seraient des olistolites d'origine lointaine ». Dans notre région, les unités Prérifaines, largement affleurantes, sont très variées ; elles vont du Trias, le terme le plus ancien, jusqu'au Miocène post-nappe. Néanmoins, une certaine opposition peut apparaître entre les unités du Prérif interne et celles du Prérif externe ; elle se traduit par des discontinuités dans le premier qu'on ne trouve pas dans le second. Mais, de manière générale, les faciès demeurent presque semblables et les séries se caractérisent par la prédominance de matériel tendre marneux(Tribak.2000).

Au niveau tectonique, les recherches menées par Leblanc. 1975 concerne le Rif externe, a permis d'identifier le mécanisme principal responsable de la position actuelle des unités de Prérifaine.

A, la nappe du Prérifaine est couverte par des unités de raccordement extérieur à des emplacements anomaux, de liaison dépendant de la nappe d'Ouezzane

De plus, la nappe Prérifaine est recouverte à des emplacements anomaux, par des unités allochtones de liaison dépendant de la nappe d'Ouezzane, Ces unités flottantes qui constituent superstructure des olistostromes externes occupent une position perchée sur les autres unités du Prérif (Frizon De La motte, 1985) ; les plus typiques sont celles des Tsoul (Fig. 1.13), Hallaya et Haskoura où les formes topographiques sont nettes et facilement identifiables dans le paysage.

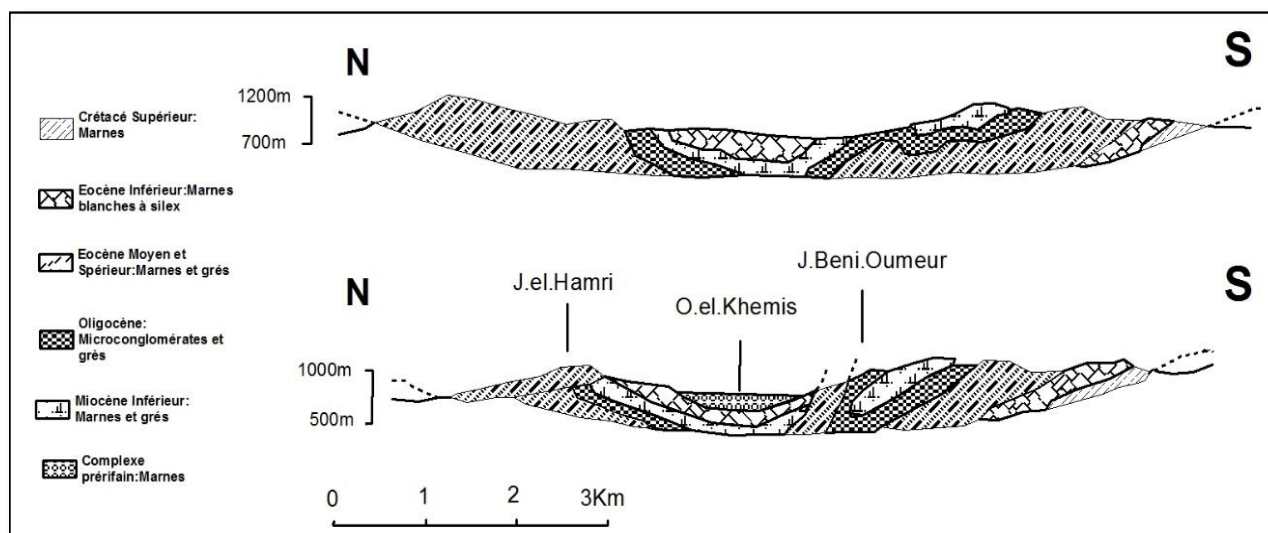


Fig. 1. 13 - Coupes dans des unités de type « Tsoul » (d'après Leblanc : 1975).

Pour l'unité Tsoul, la série stratigraphique est complète du Sénonien jusqu'au sommet du Miocène. Cependant, les autres unités ne sont représentées que par des séries miocènes, comme le synclinal d'Amseft, ou seulement de faciès oligocènes tel est le cas de J.Hallaya et J.Haskoura (Tribak.2000).

Les unités de type (Tsoul) la nappe d'Ouezzane,

Elles sont constituées par des structures généralement synclinales flottant sur le Prérif. Du fait de la relative dureté de certaines de leurs assises par rapport à celles du Prérif, elles forment la plupart des sommets les plus élevés dans notre zone d'étude (El Hallaya 1310m, Haskoura 1251 m).

Comme dans le rif occidental où Suter a défini l'unité d'Ouezzane dont la position structurale est comparable, la série stratigraphique des éléments de type 'Tsoul' ne comporte ici, avant le miocène moyen, que peu de lacunes ou de discordances d'origine véritablement sédimentaire, ou, sur un substratum éocène relativement horizontal, reposent des grès oligocènes très redressés, et donc fortement rabotés, reste tout à fait exceptionnel, et cette disposition résulte certainement d'une disharmonie de plissement et non d'une discordance réelle.

Nappe Intrarifiane :

Unité allochtones de type J. Enhir,

En dehors des unités de type 'tsoul', il en existe aussi d'autre qui occupent la même position structurale élevée, c'est-à-dire 'perchée' au-dessus de la zone Prérifaine.

Ces unités sont géographiquement limitées à une sorte de grande arc de cercle qui entoure bab mrouj au nord-ouest, à l'ouest et au sud en passant par les jbel en nehir, hazamat, annseur, taricht, gzoula et jbel azdem, elles se distinguent des unités de type 'tsoul' par leur série stratigraphique et surtout par leur faciès. Elles sont en effet essentiellement formées par une puissante série gréseuse dont les bancs, souvent épais de plus d'un mètre, sont fortement redressés et rabotés à la base ce qui les amène à reposer par la tranche sur le Prérif sous-jacent.

La nature de leur matériel sédimentaire leur confère une résistance à l'érosion beaucoup plus grande que celle des séries marneuses de Prérif et ces unités forment donc toujours des reliefs accusés (le Blanc. 1975).

Nappe de Bou-Haddoud,

Ce nappe est largement charriée sur les unités sous-jacentes sur lesquelles elle s'étale largement (Marçais et al 1957). Leblanc D (1975) a distingué trois groupes d'unités appartenant aux nappes intrarifaines, dont la plus méridionale porte le nom de Bouhadoud. Elle constitue à la limite septentrionale de notre région le coeur des hautes montagnes. Dans son matériel dominant les séries schisto-gréseuses jurassiques ainsi que les marnes et marno-calcaires crétacées. Quant à la structure de cette nappe, elle montre un certain empilement des unités les unes sur les autres avec un pendage assez régulier. Cette unité est affectée de failles et de petits décrochements souvent liés aux phénomènes de charriage. Elle est parfois fortement plissée, mais gardent une structure monoclinale (leblanc1975). Leur contact charrié sur le Prérif se traduit souvent par une accentuation des altitudes et une déclivité des pentes (Fig. 1.14).

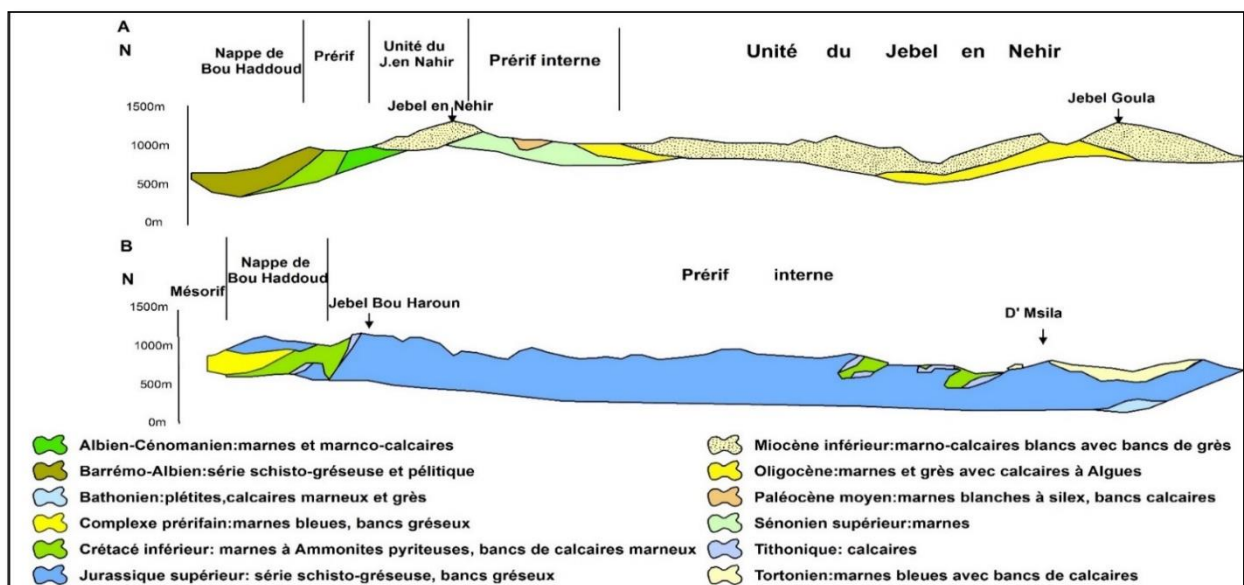


Fig. 1. 14 - Coupe dans des unités de type « Nappe de Bou-Haddoud »
(d'après la carte géologique : Bab El Mrouj, 1971).

Unités Internes et Externes,

Il est subdivisé en Prérif interne et Prérif externe (Wildi, 1983 ; Durand-Delga et al, 1960-1962).

Le Prérif interne est constitué d'écaillés vraisemblablement enracinées sous le Mésorif. Il contient des terrains carbonatés du Lias et du Dogger et les carbonates de plateforme du Kimméridgien et du Tectonique qui forment les « Sofs ».

Le Prérif externe se présente principalement sous forme d'une nappe gravitaire à structure chaotique (nappe Prérifaine) (Suter, 1965 ; Vidal, 1971). Cette nappe est à matrice marno-sableuse du Miocène supérieur où sont emballés des éléments de toute taille (Ben Yaich, 1991) qui résultent de la destruction des fronts des nappes en se déplaçant vers l'extérieur.

Dépôts et formes quaternaires,

Après la fin du cycle sédimentaire du miocène post-nappe, il n'y a plus eu de dépôts marins dans le rif externe oriental. On doit noter cependant qu'il existe quelques bancs de calcaire lacustres (pliocène probable) qui forment le sommet de buttes-témoins. Après ces dépôts la région n'a plus guère été soumise qu'à l'érosion dont certaines formes sont probablement antérieures au quaternaire ou du moins d'un âge quaternaire très ancien.

Les principales formations quaternaires sont donc constituées par les dépôts de terrasses qui peuvent couvrir de vastes surfaces le long des Oueds principaux.

Les éboulis actuels sont très rares, l'action de l'érosion se manifeste plutôt par des glissements en masse de paquets marneux tendres le long des pentes.

Appartient entièrement à un contexte géologique marqué par la prédominance de formation tendre essentiellement marneuses et marno-calcaire autochtones du crétacé et de la fin du tertiaire, les roches gréseuses au conglomératique résistantes, plus particulièrement sur les sommets des montagnes au nord du BV restent peu représentées, de plus l'intensité de la fracturation et la présence de plusieurs accidents tectoniques renforcent la fragilité des terrains dans le BV de Lahdar.

5 LES SUBSTRATS :

Les divers types de roches et leurs structure donnent une indication précieuse sur la capacité d'infiltration des zones occupée par les roches et en conséquence sur la quantité de sol susceptible d'être érodée (Krynin et Judd 1957, FAO 1980, Demmak 1982). La faible infiltration des affleurements rocheux indique une grande quantité d'eau de ruisselle.

Le type de substrat est généralement considéré à travers sa relation avec les sols et les formations superficielles dont le rôle est prépondérant.

La carte lithologique du bassin versant de l'Oued Lahdar (Fig. 1.15), démontré la prédominance des matériaux tendres, principalement marneux ou marno-calcaires. Dans une structure tourmentée, elle constitue un facteur important, qui conditionne une évolution rapide et désordonnée des versants.

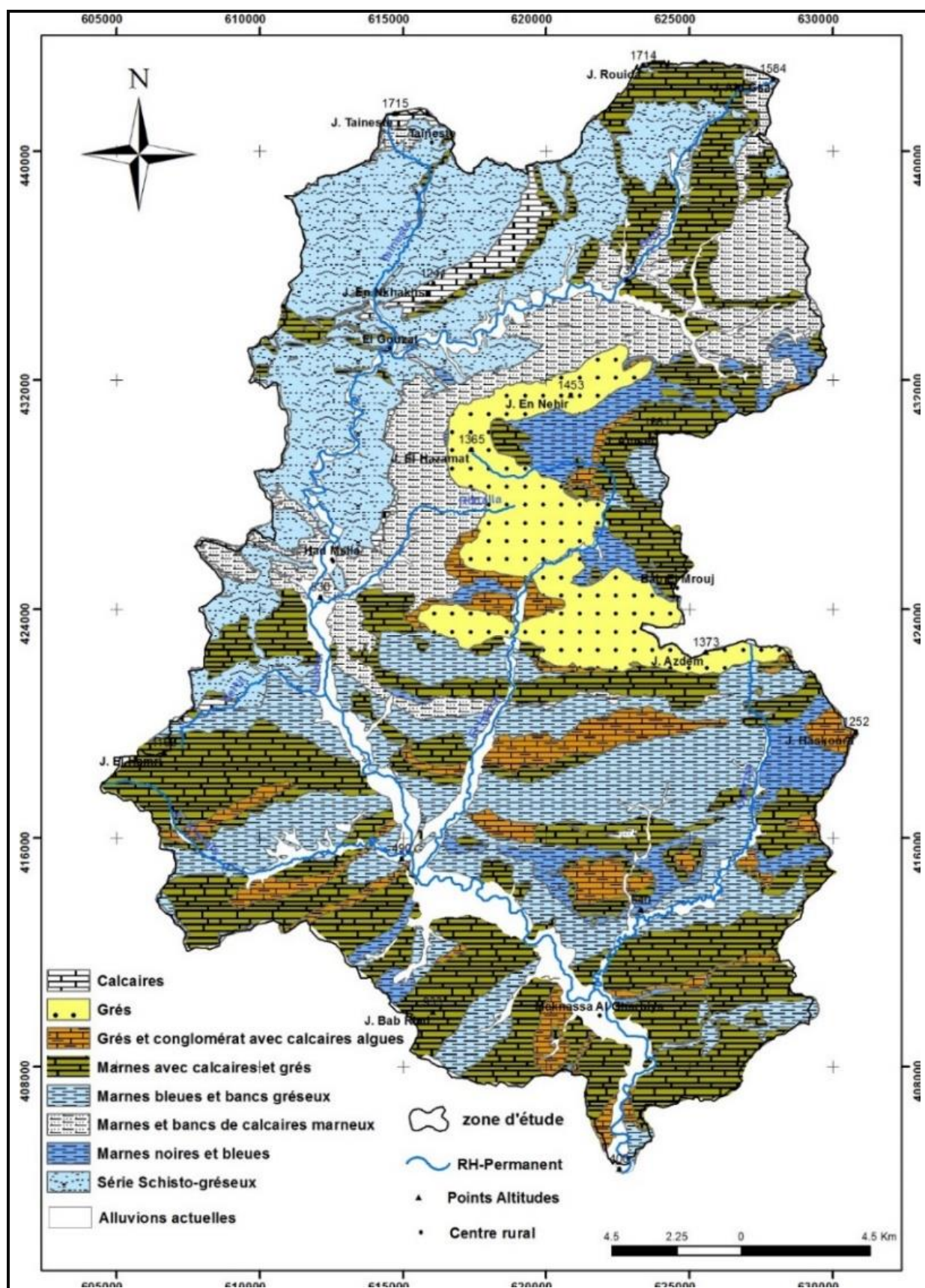


Fig. 1. 15 - Carte lithologique du bassin versant de l'Oued Lahdar.

Les séries marneuses autochtones, datées du Crétacé et surtout de la fin du Tertiaire, occupant la quasi-totalité du bassin versant de l'Oued Lahdar (Fig. 1.16). Elles sont en partie surmontées par des roches gréseuses qui arment plus particulièrement les zones les plus élevées des unités allochtones charriées notamment J.Azdem, J.Haskoura et J. El Hallaya.

La Figure 1.16 montre que le faciès le plus représentatif est les formations marneuses avec un pourcentage plus de 50%. On note ici que le degré de résistance des roches jouent un rôle primordiale dans l'infiltration dans la zone d'étude qui se caractérise par la diversité des faciès lithologique et la prédominance des roches tendres, essentiellement marneux, l'agressivité des pluies dans cette zone et l'absence du couvert végétale dense qui protège la roche contre les facteurs climatiques qui influencent d'une manière directe sur la ruissellement et aussi sur les cours d'eau.

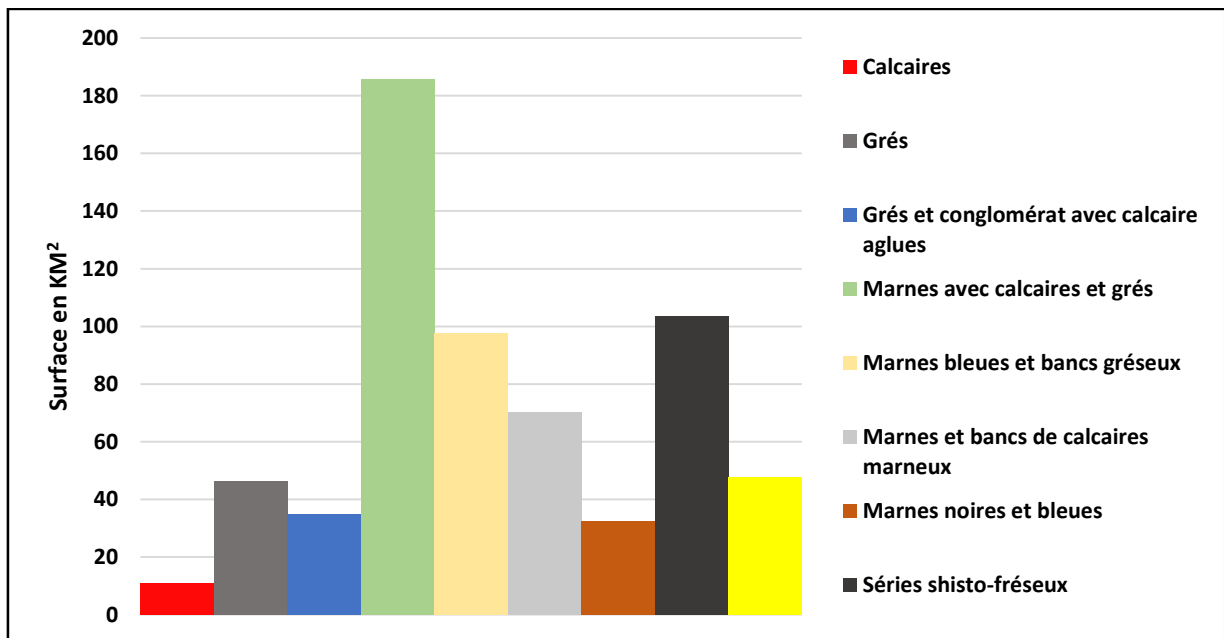


Fig. 1. 16 - Répartition de la lithologie dans le BV de l'Oued Lahdar en Km²

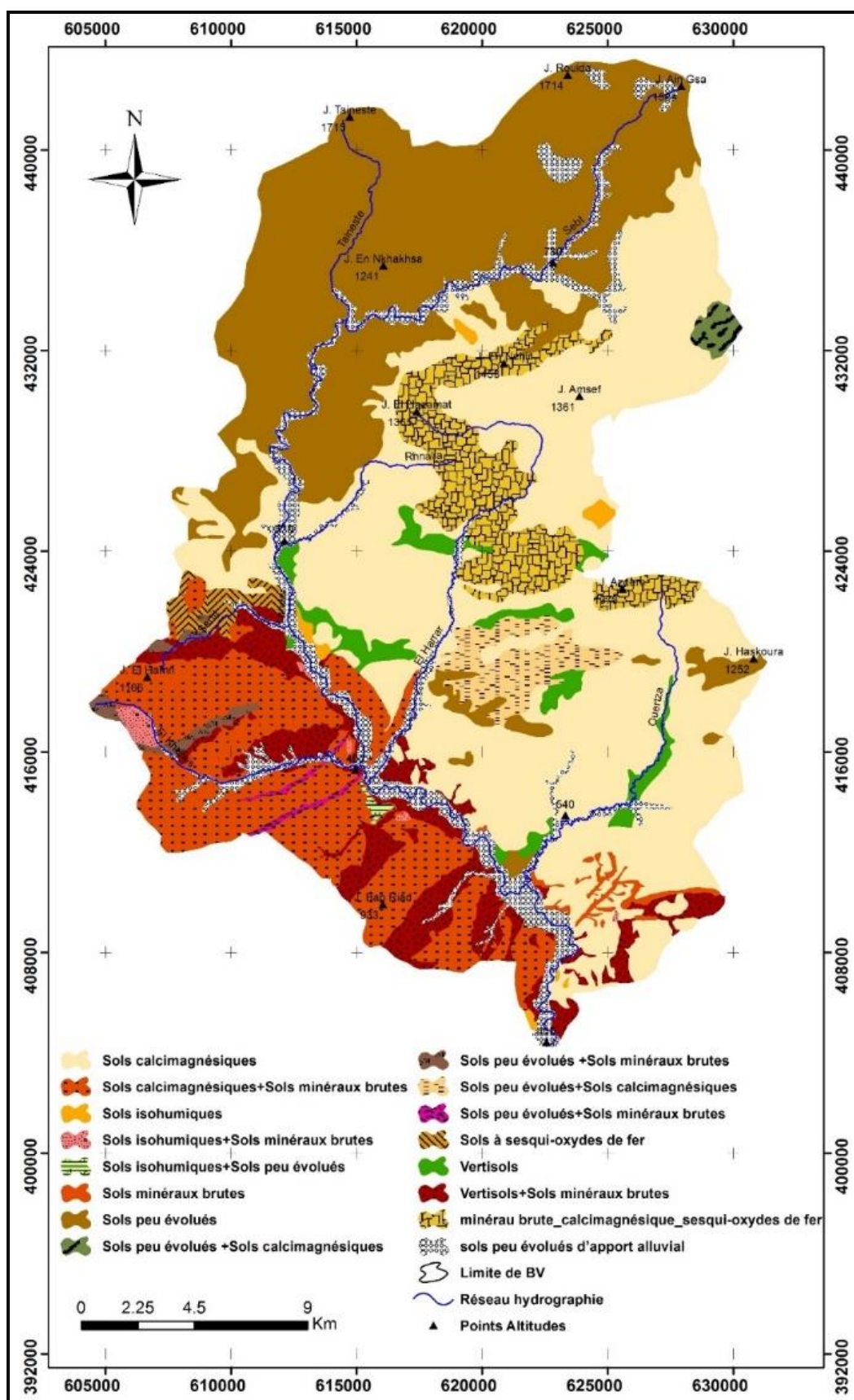
Notre zone d'étude est caractérisée par les roches de faible résistance, qui couvrant la quasi-totalité de la surface, représentant 59 % de la superficie totale du BV, les roches de résistance moyenne représentant 31 % et les roches de haute résistance ne dépassant pas 10 % du total du bassin versant de l'Oued Lahdar.

6 LES SOLS :

Le sol est avant tout un milieu vivant complexe et dynamique, en évolution constante due au climat, à la végétation et à l'action de l'homme. Le sol est le résultat d'un processus très lent d'altération et d'évolution de la roche mère (l'ensemble des couches géologiques qui forment la croûte terrestre) sous l'influence du climat, des gaz atmosphériques, des plantes et des composés organiques. Ces processus sont appelés : érosion, minéralisation, décomposition, humification, stratification et recomposition superficielle (Calbrix, 2005).

Un certain nombre d'études menées dans différentes régions du monde, notamment par des pédologues, ont pu montrer la relation entre l'érodabilité du sol et ses propriétés physiques et chimiques. (Heusch 1970, Henin 1979, Imeson et al 1982, Brayn et al 1987, De PLoey 1974, Roose 1981). En effet, la dégradation des sols, n'affectant dans de nombreux cas que la couverture pédologique, diffèrent de nature et d'intensité d'un point à l'autre en fonction des caractéristiques des sols et de leurs propriétés physico-chimiques.

L'objectif de cette partie est d'étudier la distribution spatiale des principaux types de sols dans le bassin versant de l'Oued Lahdar. Cette répartition (Fig. 1.17 et 1.18) est très compliquée au niveau de l'ensemble de la zone d'étude et au niveau d'un même versant. Elle est soumise à plusieurs facteurs, dont la position topographique, l'exposition, la nature et la structure de surface du substrat sont encore les plus déterminants.



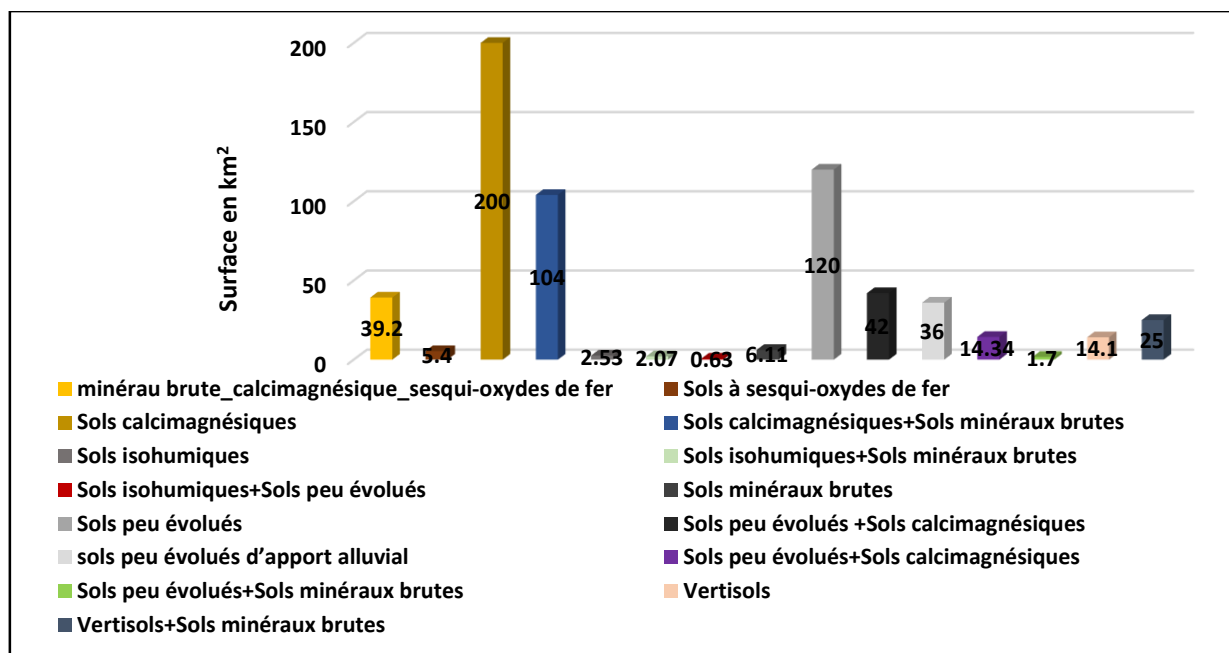


Fig. 1. 18 - répartition des types de sols en (Km²) dans la zone d'étude.

Les sols dans notre zone d'étude appartiennent essentiellement aux classes des sols peu évolués d'érosion, des sols isohumiques, des vertisols, des sols calci-magnésiques et des sols sesquioxides de fer bras rouge.

6.1 La répartition des sols dans le BV de l'Oued Lahdar :

6.1.1 Les sols peu évolués :

Ce sont des sols très jeunes qui se caractérisent par une faible altération du milieu minérale et une faible teneur en matière organique (Duchaufou 1977). Pour ce groupe de sols, deux types de base sont dessinés dans notre zone d'étude : les sols régosoliques et peu évolués d'apport alluvial et colluvial.

6.1.2 Les sols peu évolués régosoliques :

Le développement de ces sols est essentiellement entravé par des facteurs mécaniques. Ils se forment sur des pentes très accusées où l'érosion, extrêmement forte, freine toute évolution de ces sols. Ils restent, par conséquent, peu profonds et très pauvres en matière organique qui est le plus souvent mal incorporée à la matière minérale (Duchaufou 1977). Ces sols sont moyennement calcaire et ont une capacité moyenne d'échange cationique (14 méq/100 g). (Source : Maroc développement 1996).

6.1.3 Les sols peu évolués d'apport alluvial :

Ce sont des sols formés par des alluvions quaternaires les plus proches autour du cours d'eau principal. La faiblesse de leur évolution pédologique et les origines variées de leurs éléments constitutifs, l'horizon supérieur, relativement profonds, repose en générale sur des formations limon-sableuses qui alternent parfois avec des cailloutis de terrasses. Il est souvent poreux, fragile et de texture légère. La structure est peu développée, généralement de tendance massive à polyédrique. La teneur en argiles est faible et la texture demeure limoneuse à limono-

sableuse. Les teneurs en calcaire sont importantes (38 à 44%), la capacité d'échange cationique est élevée (42 à 44%), quant à la matière organique, elle présente des taux très faibles (Maroc développement 1996). Ces sols peuvent dans certain cas, correspondre à des alluvions argileuses et prennent ainsi des caractères vertiques qui se traduisent par des textures fines riches en argile avec apparition de fentes de retrait en surface.

6.1.4 Les vertisols :

La Vertisol se développe dans les zones de faible et moyenne pente avec un drainage très limité. Ils occupent de vastes étendues des communes de Had Msila et Meknassa et correspondent généralement à des bas-fonds colluviaux dérivant des marnes crétacées, et surtout des marnes néogènes, ainsi que sur certaines formations du quaternaire moyen ou ancien. Ils constituent des sols profonds et stables avec une capacité de fissuration élevée et une faible sensibilité à la battance. La texture est essentiellement argileuse avec une teneur en argile qui dépasse la plupart des cas 40% (Maroc.dev 1996). Leurs caractéristiques vertiques faciles à reconnaître en surface, et elles conduisent à l'installation de fentes de dessiccation largement béantes qui exercent une grande influence sur le schéma d'écoulement.

6.1.5 Les sols calci-magnétiques :

Les sols calci-magnétiques de type rendziniiformes sont bien représentés dans la zone d'étude 50 % de la surface totale. Ils dérivent des roches riches en calcaire, essentiellement le calcaire marneux éocène et des marnes et marno-calcaires d'âges divers qui affleurent un peu partout. Dans l'ensemble ces sols sont peu profonds, en particulier sur les pentes fortes des versants d'exposition sud ou sud-ouest. Les teneurs en matière organique sont moyennes en surface faibles en profondeur (Maroc. dev 1996). Ils deviennent, cependant, plus profonds en bas de pentes et évoluent en sols brunes calcaires, voir en vertisols, lorsque leur teneur en carbonates diminue. Leur teneur en carbonates, exceptionnellement élevée, contribue souvent à conserver une structure polyédrique à grumeleuse dans les horizons supérieurs, et massive moins nette dans les horizons inférieurs, de nature généralement stable. Par ailleurs, leur position géomorphologique ainsi que leur faible teneur en eau due à leur composition granulométrique et à leur alcalinité exagère, contribuent à freiner l'évolution pédologique de ces sols et accélère leur décapage, qui reste particulièrement intense sur les versants sud.

6.1.6 Les sols isohumiques :

Ces sols occupent une superficie totale de 120 km², soit 19 % de la surface totale de la zone d'étude. Ils se développent sur des alluvions argileuses des terrasses moyennes du quaternaire. Ils se caractérisent par une imprégnation profonde de la matière organique dans le profil, une faible calcaire différencié avec un début de décarbonation en surface et une accumulation en profondeur sous forme de tâches, d'amas et de granules. Ces sols sont le plus souvent bien structurés et bien aérés.

6.2 La capacité d'infiltration des sols :

La capacité d'infiltration est le flux maximum que le profil des sols peut absorber à travers sa surface maintenue en contact avec de l'eau à la pression atmosphérique (Hillel. D. 1974), Elle dépend de nombreux facteurs interactifs qui restent liés à l'humidité et à la succion initiale aussi bien qu'à la texture et la stratification du profil (Hillel. 1974).

Au Prérif, du fait de la formation de marnes, les éléments argileux et limoneux dominent dans la plupart des sols, rendant le mécanisme d'infiltration très compliqué. La capacité d'expansion et de contraction d'un large éventail de sols, ainsi que leur sensibilité aux phénomènes de battance, affectent grandement les conditions d'infiltration du sol. L'installation de fissures dans les sols les plus argileux facilite l'infiltration, notamment en fin de saison sèche, plus particulièrement en fin de saison sèche, pendant laquelle les fissures de dessiccation, très intenses, peuvent communiquer avec la surface et permettre l'écoulement de l'eau en profondeur dès les premières pluies automne (Tessier. 1994). Par ailleurs, la dégradation structurale, sous l'effet de la pluie, affectant les horizons superficiels des sols à texture fine, peut être à l'origine d'une imperméabilisation favorable au ruissellement (GTZ.1996). Les croûtes superficielles, formées sous l'action des pluies, peuvent changer le régime hydrique de surface et limiter énormément l'infiltration des eaux dans le sol (Hillel. 1974). Dans notre zone d'étude elles intéressent la plupart des sols, en raison de la prédominance des textures limoneuses ou limono-argileuses, bien que leur importance soit encore différente d'un type de sol à l'autre, en fonction de la variabilité des caractéristiques granulométriques. Des mesures d'infiltration concernant les principaux types de sols dans la région (Maroc développement 1996), nous permettent de dégager les constatations suivantes (Tabl. 1.3) :

Tabl. 1. 3 - Composition granulométrique et minéralogique de la formation marneuse
Source : Tribak.A (2000).

Type de marne	Argiles	L-fins	L-gros	S-fins	S-gros	pH	CaCO ₃	Minéralogie	
								Phyllos	autre
Marne gréseuse Miocène.moy	22.3	32.5	20	21	4	8.4	—	—	—
Marne bleue complexe. Prér	35.3	39.9	17.1	5.2	2	8.5	12.5	I. K. Sm	Cal .q. g
Marne bleue Miocène.sup	9.1	42.6	20	22	5.2	8.1	43.9	Sm .I. Ch	Cal. q. g
Marne bleue complexe. Prér	16.9	43.7	17	15	7	8.7	46.5	Sm .I. K	Cal. q. g
Marne bleue complexe. Prér	17.1	38	30	13.5	2	8.5	30.1	Sm .I. K	Cal. q
Marne gréseuse Miocène.sup	15.4	25.4	13.5	38	8	8	16.4	I. K. Sm	Cal. q .g
Marne gréseuse Miocène.moy	23.1	36.6	24	16	1	8.9	33.7	Sm .I. K	Cal. q
Marne gréseuse Miocène.moy	29.2	34.4	16	16	3.5	8.2	41.7	Sm. I. Ch	Cal. q
Marne bleue Tortonien	35.2	21.3	13.6	25.5	4.4	8.9	24.2	—	—
Marno-calcaire Miocène. Moy	10.8	46.5	12	10.2	18	8.4	54.6	—	—

SM	Smectite
i	Illite
K	Kaolinite
ch	Chlorite
cal	Calcite

q	Quartz
g	Gypse
—	sans résultat

Le taux d'infiltration des sols est plus important en surface, en fonction de l'importance de la force de succion liée à une forte porosité, le pourcentage d'argile qui augmente avec la profondeur tend à démunir la circulation de l'eau.

La vitesse d'infiltration est d'autant plus importante que le taux d'argile est faible dans les profils. Ce phénomène apparaît nettement en comparant les sols bruns calcaires vertiques qui n'enregistrent que 7.03 cm/h en surface et 2.9 cm/h en profondeur, alors que les sols bruns calcaires modaux enregistrent 18.9 cm/h en surface et 12.3 cm/h en profondeur. Il reste aussi vrai en comparant les sols peu évolués modaux aux sols peu évolués vertiques et le groupe de vertisols aux autres types.

Les différents types de sols étudiés présentent généralement des comportements propices à un ruissellement rapide, bien que ces comportements varient en nature et en intensité d'un type de sol à l'autre.

7 LES CARACTERISTIQUES HUMAINES ET L'OCCUPATION DES SOLS DANS LE BV DE L'OUED LAHDAR :

Ce titre montre l'état de l'occupation humaine dans la vallée de l'Oued Lahdar. Après avoir maîtrisé les caractéristiques physiques de la zone d'étude, on présente un aperçu historique sur le développement démographique du BV. Ensuite, on aborde dans cette partie les aspects démographiques de la population, et la progression des entités rurales dans l'espace fluvial, Cette partie porte sur les aspects démographiques de la population et la progression des entités rurales dans l'espace fluvial. Il va concentrer principalement sur l'identification et la description des différentes activités économiques rencontrées dans la zone d'étude, ainsi que les interventions humaines influentes directement liées aux problématiques de notre travail.

Le petit Larousse définit l'anthropisation comme étant "le Processus par lequel les populations modifient ou transforment l'environnement naturel (La déforestation, l'élevage, l'urbanisation et l'activité industrielle sont parmi les principaux facteurs d'anthropisation)".

En géographie et en écologie, l'anthropisation est la transformation d'espaces, de paysages ou de milieux naturels par l'action de l'homme.

A partir de ces deux définitions, on peut dire que l'anthropisation constitue le comportement et les effets humains dans les espaces naturels ; en d'autres termes, elle inclut toutes les interventions humaines dans les espaces naturels purs et leurs effets directs et indirects (comme le changement de l'espace fluviale par l'homme).

Cependant, cette interrelation entre l'homme et la nature s'est récemment conjuguée par l'émergence de divers dysfonctionnements environnementaux et d'une variété de phénomènes extrêmes (changement climatique, inondations, incendies de forêt, érosion, etc.).

En effet, cette interface entre la société et les différentes composantes de la nature porte une vocation multidimensionnelle, du fait des besoins humains accrus de manière sans cesse pour satisfaire les besoins d'une population qui connaît annuellement une augmentation rapide.

Tabl. 1. 4 - Evolution de la population et la densité démographique des communes dans le BV entre 1982 et 2014.

Année	1982		1994		2004		2014	
C.R	Population	Densité hab/km ²	Population	Densité hab/km ²	Population	Densité hab/km ²	Population	Densité hab/km ²
El Gouzate	8331	80.1	8992	86.5	7710	74.2	6575	63.2
Taineste	9023	72.74	10732	86.51	9341	75.30	13225	106.61
Bni Ftah	12964	74.2	14248	81.5	12378	70.8	10919	62.5
Had Msila	9593	81.9	11161	95.2	10153	86.6	8356	71.3
Taifa	12136	88.3	11013	80.1	8808	64.1	6992	50.9
Bni Lent	12964	147.4	15033	170.9	13678	155.5	10919	124.1
Oulad Chrif	9548	133.2	11088	154.7	10439	145.6	9237	128.8
Meknassa El Gharbiya	3639	77.4	4500	95.8	4070	86.6	3890	82.8

Depuis l'Antiquité, le processus anthropique a été déclenché par l'implantation humaine et la fixation dans tous les systèmes géographiques jusqu'à ce que le système géosystème change (biosphère, lithosphère, hydrosphère...), sans toutefois négliger l'impact de l'exploitation des sous-systèmes et ses composantes naturelles : eau, sol, végétation... (Sammaa. 2010).

Comme de nombreuses régions du Maroc, le Prérif a connu de profondes mutations, liées aussi bien à l'histoire politique du pays (succession des dynasties), à la croissance démographique de la population et aux changements socio-économiques.

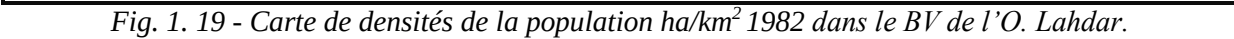
7.1 L'impact du développement démographique et l'expansion de la population sur la dynamique de la zone :

Les caractéristiques du développement démographique et de l'expansion démographique des communes rurales appartenant au bassin sont caractérisées par la dissemblance d'une commune à l'autre, et dans la même commune d'un douar à l'autre, en raison de conditions naturelles et humaines, en particulier la sécheresse et l'émigration.

Les données statistiques montrent l'impact de la sécheresse et de l'émigration sur la croissance démographique, alors que l'augmentation et la densité de la population ont connues deux phases qui sont dissemblable (Tabl. 1.4).

A partir des données de tableau 1.4 en 1982, le nombre d'habitants dans le bassin de l'Oued Lahdar était de 78 198, soit une densité de 128.19 hab/km². Cette densité est très élevée par rapport à la moyenne nationale de l'époque, 45 hab/km². La population comptait en 1994 à peine 76 035 habitants. Ce chiffre se recule à 67 236 habitants en 2004, et continue de revenir jusqu'à 56 888 en 2014, en revanche la densité à reculer de 113 hab/km² à 93 hab/km² en 2014.

Les cartes (Fig. 1.19, 1.20, 1.21 et 1.22) fournissent des données relatives à l'évolution de la densité des communes du Bassin de l'Oued Lahdar de 1982, 1994, 2004 et 2014.



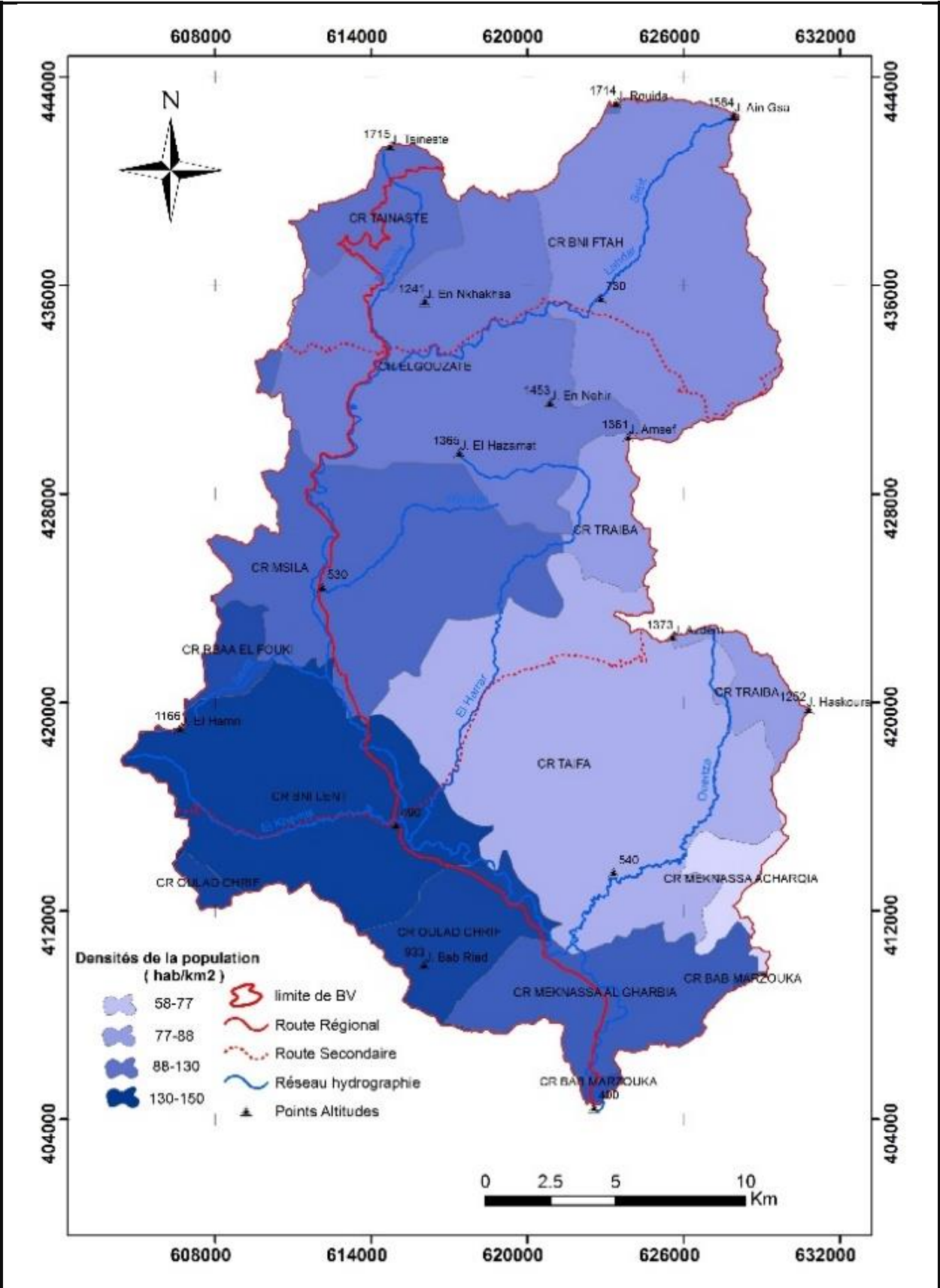


Fig. 1. 20 - Carte de densités de la population ha/km² 1994 dans le BV de l'O. Lahdar.

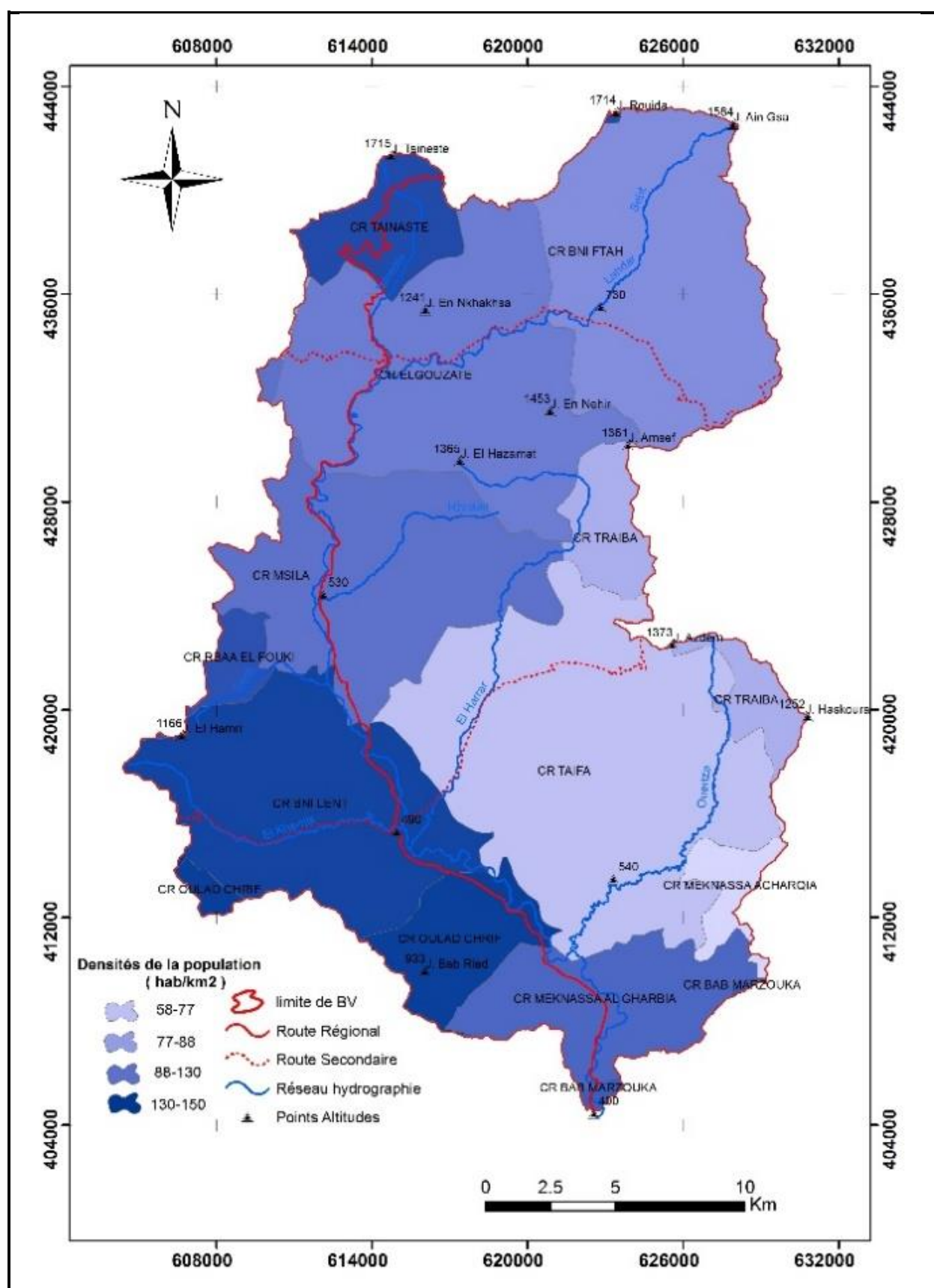


Fig. 1. 21 - Carte de densités de la population ha/km² 2004 dans le BV de l'O. Lahdar.

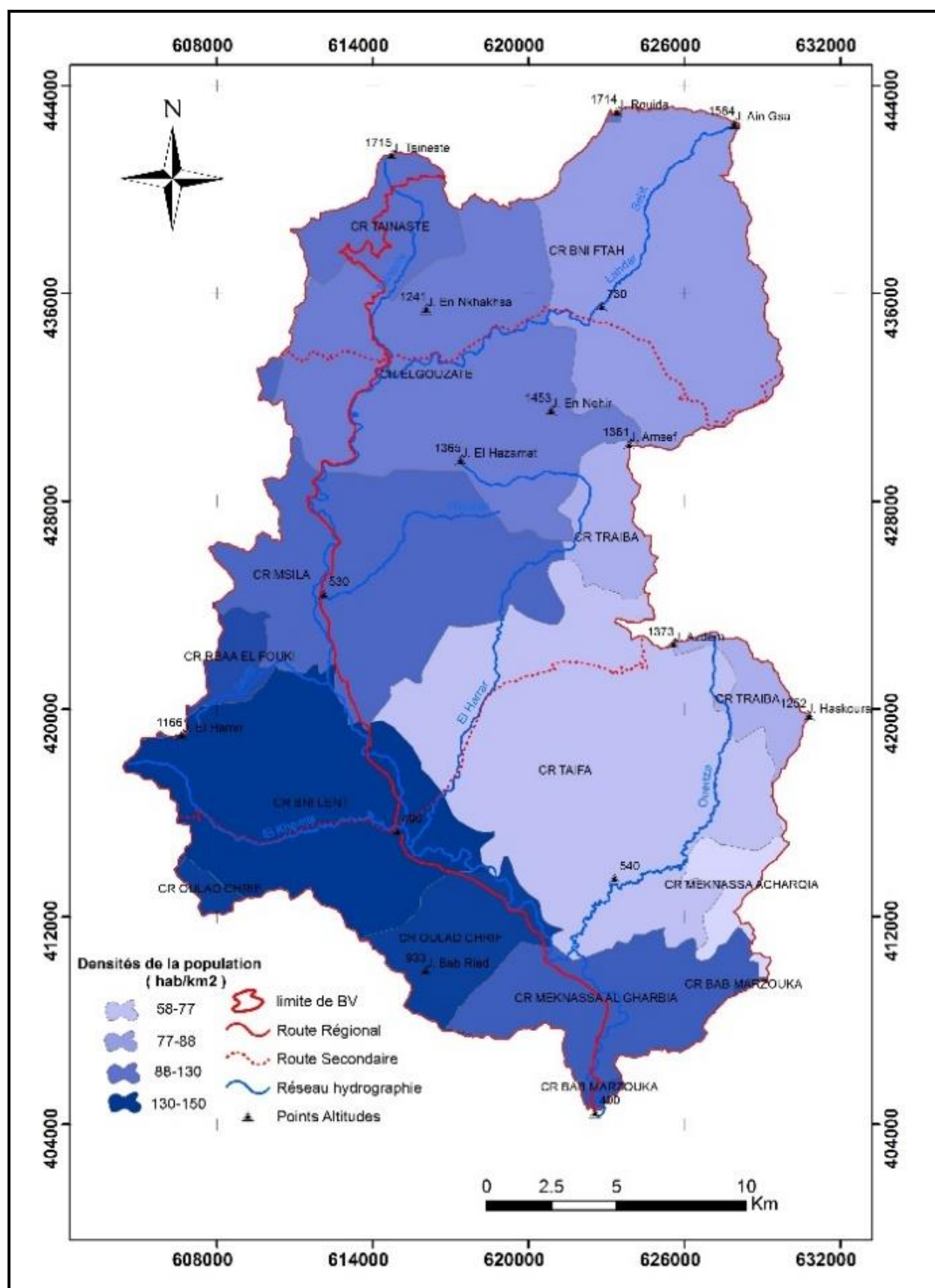


Fig. 1. 22 - Carte de densités de la population ha/km² 2014 dans le BV de l'O. Lahdar.

Les données indiquent le bassin versant de l'Oued Lahdar connue une augmentation durant la période de 1982-1994 et une régression durant les périodes 1994-2004 et 2004-2014 aux niveaux de la population. Cependant, l'évolution de la population de la commune n'est pas entièrement liée à la différence entre les taux de mortalité et de natalité, mais d'autres facteurs sont intervenus : l'augmentation du taux d'immigration est principalement due au caractère attractif de certaines zones, d'un point de vue agricole, emploi opportunités offertes par le secteur primaire (agriculture). c'est le cas par exemple de la plupart des communes, ou socio-économique (les activités commerciales, la scolarisation...). Cette migration prend une forme interne entre les communes du BV de l'Oued Lahdar ou une forme externe.

L'époque d'avant les années 2000 était caractérisée par une croissance démographique positive, dont le taux annuel de la croissance démographique s'est varié de 0.7% à 2.1% entre les années 1982 et 1994 sauf la commune rurale de Taifa le taux de croissance est négative (-1%), de même pour la densité de la population qui s'est augmentée pour les communes qui composent le BV, alors que le taux annuel de la croissance de toutes les communes a connu une stabilité de développement (Fig. 1.23), la croissance est devenue négative dans toutes les communes durant la période de 1994 à 2014, ils ont enregistré -2.2 dans la commune Taifa et -1.5 dans la commune Bni lent, de même pour la densité de la population (Tabl. 1.4). Depuis les années quatre-vingt cette régression est due à des facteurs naturels citant la sécheresse et les changements climatiques qui a prévalu les pays méditerranéens ; qui ont eu un impact sur les campagnes qui ne présentent même pas le minimum des moyens de vie ; en dehors de l'agriculture, le pâturage, et donc la migration vers les villes voisines à la recherche de travail.

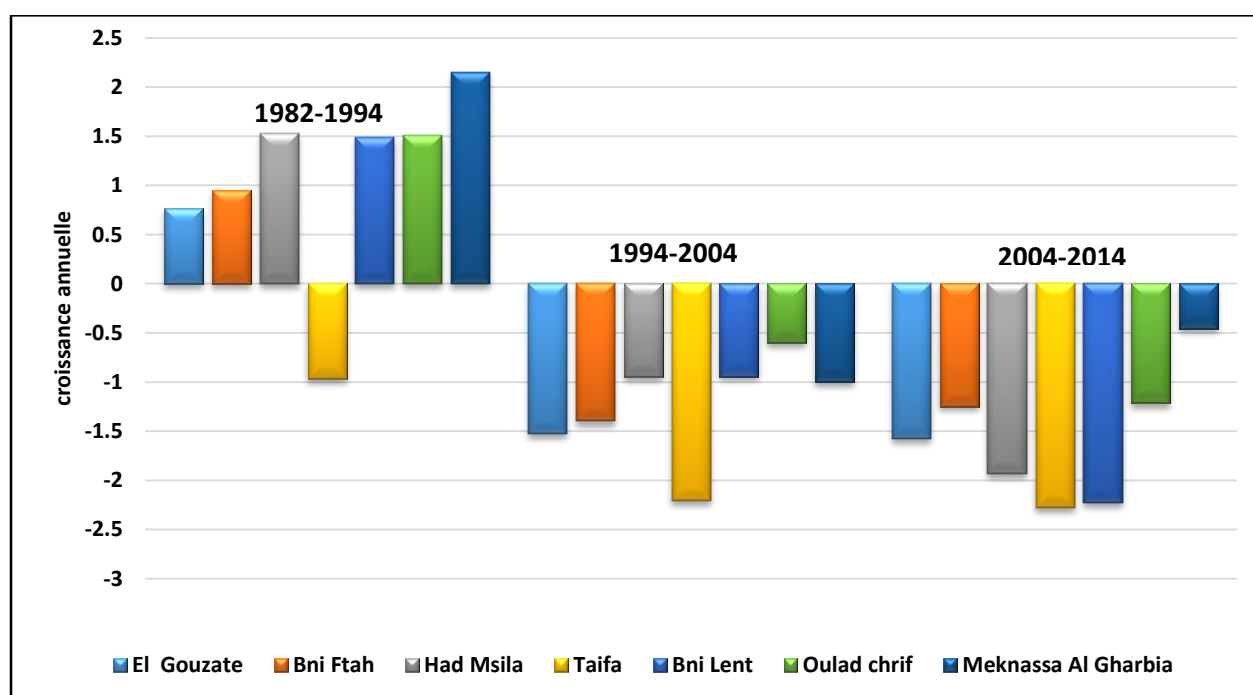


Fig. 1. 23- Répartition de la croissance annuelle des populations dans le BV de l'Oued Lahdar selon la date de statistique.

Malgré cette régression au niveau des caractéristiques de la population du milieu d'étude, la densité de la population reste très élevée par rapport au taux national qui a enregistré 42,05

habitants par km² durant l'année 2004, cette densité de population affecte sur le milieu fluviale, surtout que la distribution de la population dans le bassin prenne une forme sporadique, et concentrer aux niveaux de plaine alluviale de l'Oued Lahdar.

Cependant, pour le taux d'accroissement entre les communes du BV on note une grande hétérogénéité. En effet, la population est principalement concentrée dans des lieux propices aux activités agricoles, que ce soit le long des vallées et des bassins ou à proximité de la source. En revanche, Par contre, les zones de montagnes ont une faible densité de population.

De l'analyse du taux de croissance annuel et de la densité de population, on peut dire que le bassin versant de l'Oued Lahdar connue une régression aux niveaux de la population à cause des plusieurs facteurs qui interviennent, y compris la dégradation des sols causée par la réduction des terres cultivés, ce qui a conduit à la migration vers les villes voisines.

Il y a d autres Douars qui ont été vidé, donc cette régression affecte négativement la zone et le milieu naturel, alors que l'absence des habitants contribue à la dégradation rapide du sol à cause de l'absence des formes de protection. Mais la concentration des habitants dans des Douars situés au proche de la plaine alluviale affecte négativement la dynamique des milieux fluviaux. Alors que l'installation de la population mène à créer une menace de risque d'inondation sur l'installation de l'infrastructure et les bâtiments et d'autre part sur l'activité agriculture.

7.2 L'occupation du sol :

La manière d'utilisation de l'espace est affectée par de nombreux facteurs, parmi lesquels la structure agricole, les caractéristiques du milieu physique, et l'intervention humaine sur le milieu sont toujours les plus importants.

La structure du sol a été affectée par divers événements historiques, introduisent des variétés d'occupation dont certaines sont incompatibles avec les données du milieu physique. Les tailles des exploitations, très diverses, influencent de leur côté les modes de faire valoir existantes ainsi que les rapports entre les paysans et la terre qu'ils mettent en valeur (Tribak.2000).

En général, les aspects traditionnels de la combinaison de l'utilisation des terres, des cultures herbacées, des plantations d'arbustes et de l'élevage existent toujours. Au niveau des cultures, on a pu constater les avantages évidents des cultures annuelles (blé, orge), ces cultures occupent une grande surface dans le sol profond formé par la couche marneuse et le sol ingrat dans la zone marginale. Des espaces très réduits sont réservés aux arbres fruitiers, en particulier autour des hameaux et aux abords des points d'eau. L'élevage qui impose une charge supplémentaire sur le milieu est également réalisé de manière traditionnelle.

Les recherches sur les changements dans la couverture et l'utilisation du sol sont très importantes car elles peuvent comprendre les tendances actuelles de la déforestation, de la dégradation, de la désertification et de la perte de biodiversité dans des zones spécifiques.

La carte de la variation spatiale de l'occupation des sols de la zone d'étude a été réalisée sur la base de la carte topographique (1/25 000) et l'image satellitaire et visite de terrain. (Fig. 1.24)

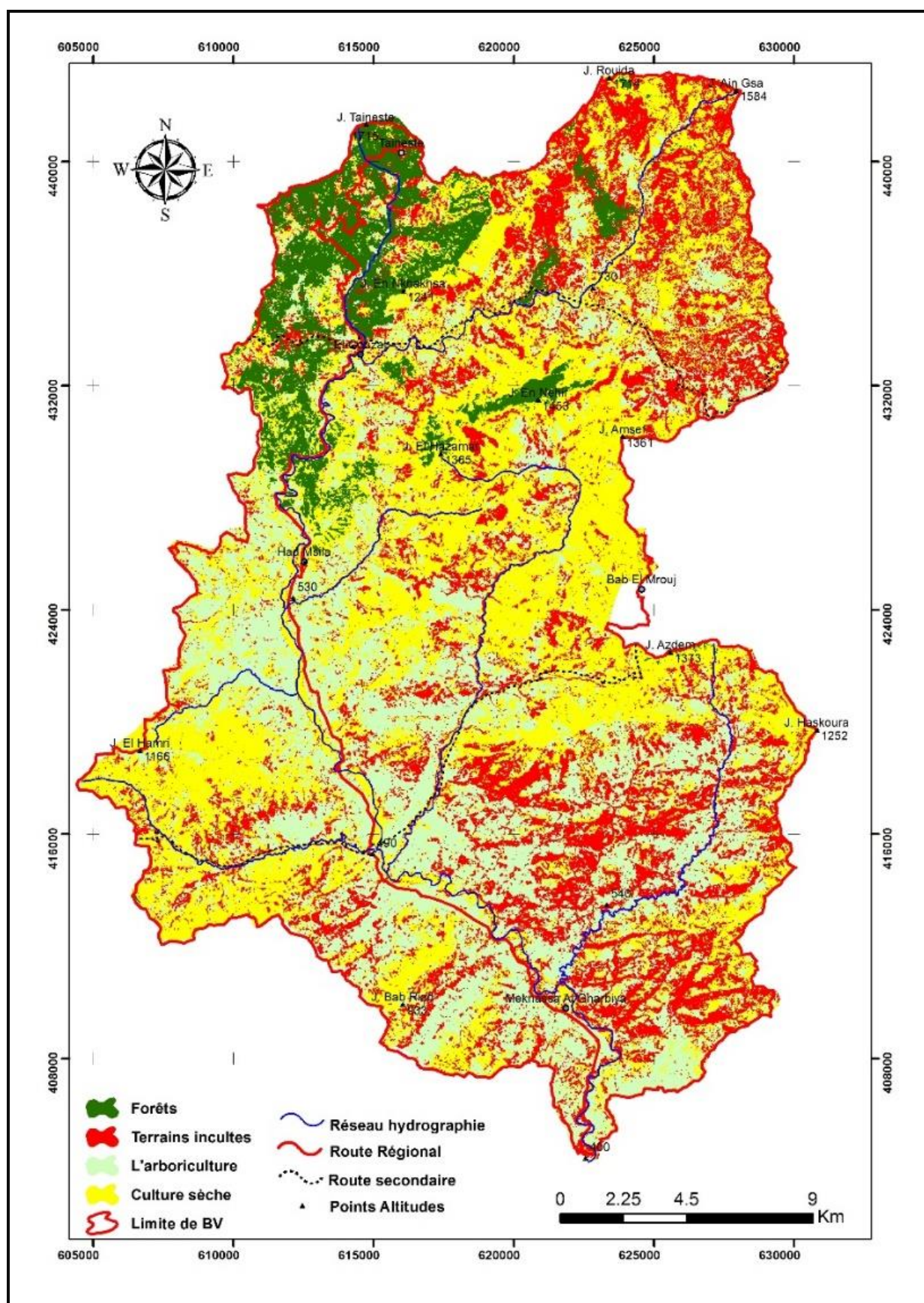


Fig. 1. 24- Carte d'occupation du sol dans le BV de l'Oued Lahdar.

Le milieu du Prérif est un espace qui impose certaines restrictions aux occupations humaines. L'altitude est élevée et les montagnes se chevauchent. Le degré de dénivelé représente un obstacle à l'utilisation permanente des terres.

Dans le BV de l'Oued Lahdar, bien que la surface agricole utilisée ne soit pas très importante, il semble que les riverains fassent bon usage de cet espace, car les cuvettes et les plaines sont utilisées à l'agriculture, et les piedmonts et les causses sont utilisés comme des parcours.

Cependant que, Les montagnes sont dominées par les forêts. Ainsi, afin de simplifier l'analyse de l'utilisation du sol, ont été regroupées les classes existantes en 3 classes pertinentes du point de vue hydrologique : terrain de cultures ; terrain inculte et forêts. (Fig. 1.25)

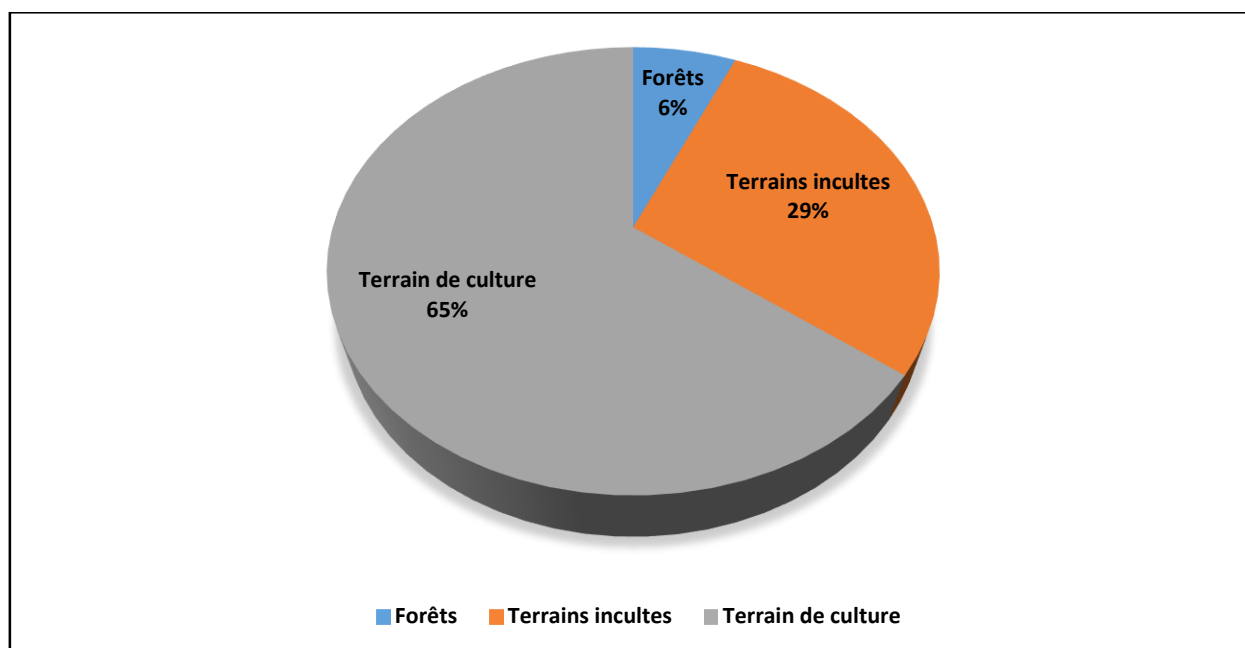


Fig. 1. 25- Répartition des différentes variables d'occupation dans le BV de l'Oued Lahdar.

Les terrains cultivés représentent la majeure partie du bassin versant, suivies des terres non cultivées, et les forêts représentent 6 % de la BV.

7.2.1 Terrain de culture :

La surface agricole utilisée dans le BV représente 65% de la superficie du bassin. Les terrains de cultures sont divisés en trois types : l'agriculture irriguée, la culture booléenne et l'arboriculture, et les activités agricoles dépendent de nombreuses conditions : les fluctuations climatiques, l'abondance des ressources en eau. Le sol, la topographie... ce qui entraîne une forte hétérogénéité spatiale et une discontinuité dans l'occupation du sol.

A partir de la carte d'occupation du sol, les exploitations sont diversifiées qualitativement et quantitativement. En effet, la répartition spatiale de la surface agricole utile selon le type de culture est dominée par les cultures sèches.

L'arboriculture de toute la région a fortement décliné ; d'une part, elle est toujours liée à l'extension des terres de culture, en raison des causes ont été analysées auparavant, et principalement en raison des conditions climatiques défavorables causées par la continuité de la sécheresse au cours des dernières décennies. Cependant, il reste à préciser que la situation actuelle

de l'arboriculture varie d'une région à l'autre, il existe donc un antagonisme très net entre la région sud et la région nord. La monotonie des collines marneuses qui occupent le sud de la région est rarement rompue par des vergers d'arbres fruitiers qui restent essentiellement dominés par des olivettes. Le figuier et l'amandier sont quasi absents et n'apparaissent que rarement autour de quelques foyers. Quant à la vigne elle est totalement absente. Malgré cela, les parcelles de la région nord, relativement abondantes de source, bénéficient d'une extension considérable d'arbres fruitiers. Cependant, la distribution et la structure des plantations sont encore largement affectées par l'altitude et l'abondance des sources, de sorte que le versant e est exposé. Les vergers composés principalement d'oliviers d'amandiers et de figuiers, offrent souvent un aspect discontinu et restent dispersés autour des douars (Tribak.2000).

En général, L'olivier reste la plus largement distribué dans toute la région, et leur distribution spatiale dépend du climat local, des propriétés du sol et des différentes nuances d'intervention humaine.

La majorité des oliveraies occupent généralement les versants nord les plus humides, ainsi que quelques terrasses alluviales près des cours d'eau, Sur les sols riches en bas de versants, spécialement réservé aux cultures, l'olivier se fait très rare, il se trouve sous forme d'ilots éparpillés.

Cependant, les olivettes se multiplient en hauteur et deviennent plus denses autour des habitations situées à mi-pente ou à proximité de certains sommets. La disposition des plantations n'obéit à aucun ordre, exception faite de quelques plantations modernes de DRS fruitières,

Dans le même versant peuvent observer des plantations clairsemées et des plantations denses, La plantation d'arbres est irrégulière ; en particulier dans les petits domaines où les oliviers sont mélangés à d'autres arbustives ou plantes herbacées, En effet, dans le cadre d'une polyculture vivrière, l'oléiculture prend fréquemment une forme mixte, selon l'association des oliviers avec des arbres fruitiers, des céréales, des légumineuses ou des cultures maraîchères.

Au milieu du BV plus précisément la surface cultivée en bour (culture sèche) présente des superficies plus que les surfaces de culture irriguée. Cela est dû aux mauvaises conditions climatiques et aux faibles ressources en eau de surface.

La carte d'occupation des sols actuelle montre clairement la taille de la superficie des terres cultivées, estimée à 65% de la surface totale de BV. L'étendue cultivée est, cependant, plus importante dans le Prérif externe, L'emprise est beaucoup plus forte sur les collines marneuses où la conquête est certainement plus ancienne, La totalité des terrains marneux ont été défrichés et mis en culture, au point que sur de grandes surfaces ne subsiste aucune espèce arborescente ou arbustive si l'on excepte quelques vergers d'oliviers ou touffes de jujubier qui rompent, dans certains points la monotonie des paysages.

L'impact sur les collines marneuses les plus anciennes est beaucoup plus important. La plupart des terrains marneux ont été défrichés et cultivés, de sorte qu'il ne reste pas de vastes étendues arbustives ou d'espèces arborescentes, à l'exception de quelques vergers d'oliviers ou touffes de jujubier qui rompent, dans certains points la monotonie des paysages. En général, dans toute la région, l'espace agricole dépasse de loin les champs permanents, au-delà des champs permanents sur des terrains défavorables aux cultures. La situation la plus évidente a été observée dans la région du nord du BV, où les cultures s'accrochent aux sols les plus pauvres et aux pentes les plus raides.

Il faut noter que malgré la variété des cultures (céréales, haricots, cultures maraîchères), l'essentiel de l'espace agricole est utilisé par la culture des céréales car elles sont importantes dans

la vie économique et sociale de la population. En effet, les cultures herbacées sont majoritairement concentrées en céréales (blé, orge)

La plupart des terres utilisées pour les cultures herbacées peuvent être très vulnérables en termes de ruissellement, ils demeurent pendant une bonne partie de l'année exposés directement aux agents météoriques. La saison automnale est la plus critique, elle correspond à une période où la nudité des terrains est totale après la moisson des récoltes et le broutage des chaumes par les troupeaux, cependant, Les premières pluies de l'automne peuvent facilement provoquer le colmatage superficiel des sols, en diminuant l'infiltration interne et en provoquant des ruissellements en surface presque aussitôt que la pluie commence à tomber. Ce phénomène favorise des écoulements rapides au niveau du réseau hydrographique.

7.2.2 Terrain inculte et les parcours :

Malgré l'évolution de l'utilisation de l'espace et les activités exercées par les habitants, le Prérif est toujours considéré comme un territoire fragile en raison des conditions climatiques et du potentiel environnemental.

Par rapport à d'autres activités, l'élevage est l'épine dorsale de l'économie de la région montagneuse. Dans le BV de l'Oued Lahdar, cette activité bénéficie des terrains incultes et des parcours qui représentent plus de 35% de la superficie total dii bassin du BV. Certaines conditions naturelles et anthropiques ont contribué à l'expansion de ces terrains. Il s'agit principalement des facteurs suivants : le déficit et le l'irrégularité pluviométrique.

Cette catégorie comprend les terrains réservés aux versants qui ne peuvent pas être utilisées pour l'agriculture ou les terrasses inondables au fond. Elle englobe des terrains franchement stériles qui correspondent soit à des badlands où l'érosion a atteint un stade très avancé soit à des versants rocheux ou des cônes rocaillieux. Il représente 18,3% de la superficie totale des deux cercles de Taza et Taineste, et 33,5% dans la commune de Meknassa est où l'extension des parcours et des badlands, développés sur les marnes miocènes. Par ailleurs, dans la vallée de l'Oued Lahdar, les affleurements rocheux engendrent des terrains rocaillieux incultes sur les fortes pentes et les sommets des unités gréseuses situées à l'amont du bassi; à l'aval, la fréquence des formations marneuses, laisse apparaître des aires importantes de badlands. Sur les terres incultes la végétation est généralement très maigre ; elle est constituée essentiellement des espèces suivantes : chamaerops humilis, ziziphus lotus, asphodelus microcarpus, avec d'autres espèces qui se développent surtout au printemps tels, asparagus altissimes, cytissus battandieri, myrtus communis, scolymus hispanicus, ornemis mixta, daphné gnidium. etc. (espèces définies par Rejdali; IAV, Rabat).

7.2.3. Forêt :

Avant d'aborder l'extension de la forêt connue une composante importante de l'occupation du sol dans le Haut Inaouène, rappelons le rôle que joue le couvert végétal sur le cycle de l'eau. Selon de nombreux auteurs, l'interception de la pluie par le couvert végétal pourrait provoquer un accroissement de l'évapotranspiration (Martin et al.. 2003). Bien que difficilement quantifiables, les effets de la végétation sur le comportement hydrologique sont un fait et vont de le sens de la régulation de l'écoulement dans les bassins (Taous. 2005). La végétation influence donc le taux d'évaporation, la capacité de rétention du bassin, et la vitesse de l'écoulement superficiel. Dans le même ordre d'idées. Tayebi (2006) écrit que la couverture végétale, surtout forestière, crée une véritable zone « tampon » entre les actions

externes et le sol sous-jacent. Le couvert végétal est considéré comme une couche intermédiaire entre la surface du sol qu'elle enveloppe et l'atmosphère : Comme dit (Scaetta et al., 1937) « cette couche (couverture végétale) agit par rapport au sol connue amortisseur dont l'existence ou la disparition sont de nature à influencer directement l'action du climat atmosphérique sur le sol ».

Matorral clair à base de chêne vert : Ce sont des strates dérivées des forêts par une dégradation accrue. Elles existent dans les massifs schisto-gréseux localisés entre le poste de Gouzate et Had Msila prédominant une partie de la section moyenne de l'Oued Lahdar. Ces formations relativement diverses sont principalement composées de chênes verts (*Quercus ilex*), des essences secondaires qui l'accompagnent tels, *Arbutus unedo*, *Juniperus oxycedrus*, *Olea-europea*, ainsi que d'un maigre sous-bois de cystes. Ces espèces ne forment dans le paysage que des associations basses groupées en buissons qui laissent en partie dépourvus les versants. Le chêne vert qui forme l'association la plus importante est généralement d'une hauteur qui ne dépasse pas 1,5 m. Il se distingue parmi les autres espèces par une rusticité et une résistance exceptionnelles aux conditions du climat, ainsi que par son indifférence à la nature des sols. Il sert pour la protection des boisements et contribue largement au maintien de l'équilibre des pentes. Par ailleurs, il reste à souligner que ce domaine de matorral est fort sensible aux nuances de l'exposition. Le contraste est très net entre les versants exposés au Nord mieux protégés, et ceux exposés au Sud intensément livrés à l'érosion.

La vallée d'Oued Lahdar a été entièrement exploitée par l'homme, que ce soit par l'expansion de l'habitat, l'activité économique ou l'activité agricole. Aujourd'hui, la plaine alluviale de l'Oued Lahdar dans la zone d'étude est entièrement artificielle, et quelques bâtiments ont été installés sur la plaine inondable. Des ponts sous dimensionnés, des digues, des remblais se répartissent le long de l'Oued Lahdar. Ces activités humaines influencent les écoulements et jouent un rôle dans le risque de débordement de l'Oued vers les quartiers situés en ses abords.

CONCLUSION :

A partir de l'analyse de l'environnement physique des crues actuelles dans le bassin versant de l'Oued Lahdar, témoignent d'un déterminisme physique spécifique et montrent par conséquent, une sensibilité intrinsèque de la zone d'étude qui tient surtout à :

Un climat semi-aride se caractérise par une agressivité des agents météoriques, et une répartition spatiale inégale des pluies, les quantités des pluies enregistrées pendant un jour présentent un pourcentage important des quantités des pluies enregistrées pendant le mois, ainsi que les variations au niveau des températures ou les écarts thermiques sont variables d'un mois à l'autre et dans le même mois, cette situation climatique influence d'une manière négative sur le milieu qui se caractérise par une grande vulnérabilité.

Un contexte morpho-structurale caractérisé par une unité autochtone et des nappes allochtones favorable à une évolution rapide des ruissellements dans les versants, cette structure responsable de la diversité des paysages topographiques et des formations lithologiques, ces dernières se caractérisent par la prédominance des roches tendres, essentiellement marneuses, ces dernières se caractérisent par l'imperméabilité en raison des quantités importantes des argiles gonflantes, particulièrement Smectite et Illite, ce qui favorise l'évolution de ruissellement.

L'étude du facteur anthropique a mis en évidence la croissance démographique et le processus de l'installation humaine dans le bassin du Haut Sebou. Ce processus est accompagné par des mutations au niveau des activités exercées et des modes d'occupation de l'espace. Ce

territoire a connu une intensification rapide ait niveau de l'exploitation agricole. Les besoins en eau de l'agriculture et des villages ne cessent d'augmenter surtout dans la période de basses eaux. Ces pratiques ont une influence directe ou indirecte sur le milieu physique, et plus particulièrement, sur les ressources en eau.

Par ailleurs, ce chapitre a permis de mettre l'accent sur les principales variables de l'occupation du sol, afin d'illustrer la pression sur les ressources naturelles, entre autres les ressources en eau. Ce constat induit une pression alarmante sur les ressources en eau superficielles et souterraines.

Chapitre 2 :

MORPHOMETRIE DU BASSIN VERSANT DE L'OUED LAHDAR

Introduction,

1 - Les caractéristiques morphométriques du bassin versant de l'Oued Lahdar,

2 - Caractéristiques topographiques (Relief),

3 - Caractéristiques du réseau hydrographique,

Conclusion.

INTRODUCTION :

L'empreinte des processus hydrologiques se reconnaît dans la topographie du BV, le réseau des cours d'eau, leurs nombre et leurs importance, le type de sol, la géologie et la végétation qui permettent de prédire le comportement spatio-temporelle du bassin versant pour un événement pluvial donné, d'où l'intérêt d'une meilleure compréhension de ces paramètres afin de mieux cerner la réponse hydrographique du bassin versant.

Les principales caractéristiques physiques étudiées pour tout bassin hydrologique constituent des paramètres d'entrée des formules et des modèles de calcul pour la caractérisation des bassins versants.

Les caractéristiques physiographiques d'un bassin versant influencent fortement sa réponse hydrologique, et notamment le régime des écoulements en période de crue ou d'étiage (Biswas, 1999, Michel, 1973). Le temps de concentration (T_c), qui caractérise en partie la vitesse et l'intensité de la réaction du bassin versant à une sollicitation des précipitations, est influencé par diverses caractéristiques morphologiques : en premier lieu, la taille du bassin (sa surface), sa forme, son relief, sa pente longitudinale et son orientation. A ces facteurs s'ajoutent encore la lithologie des terrains et la nature des sols, le couvert végétal et les caractéristiques du réseau hydrographique. Ces facteurs, d'ordre purement physique, s'estiment aisément à partir de cartes adéquates ou en recourant à des techniques digitales et aux modèles numériques.

Le bassin versant marque à la fois la notion topographique de zone limitée par une ligne de partage des eaux et celle de surface d'interception des précipitations susceptibles d'être drainées jusqu'à l'exutoire par le réseau hydrographique (FAO 1996).

1 LES CARACTERISTIQUES MORPHOMETRIQUES DU BASSIN VERSANT DE L'OUED LAHDAR :

Les caractéristiques intrinsèques des bassins versants influencent fortement leur comportement hydrologique face à une sollicitation de précipitations. Leur réponse est largement déterminée par différents caractéristiques morphologiques, comme par exemple la taille du bassin, sa forme, son élévation, sa pente, son orientation, etc..., ainsi que par le couvert végétal, le type de sol, les caractéristiques du réseau hydrographique et le facteur anthropique. Le comportement hydrologique du bassin versant de l'Oued Lahdar est influencé par les facteurs physiographiques suivants :

1.1. Caractéristiques des formes :

Plusieurs chercheurs en hydrologie ont essayé d'approcher la forme des bassins versants via des indices, dits « indices morphométriques ». Car, la forme des bassins versants joue un rôle déterminant sa réponse hydrologique. (Roche, 1963 ; Strahler, 1964 ; Obda, 2004). Ces indices morphométriques sont l'indice de compacité de Gravelius (K_c) ainsi que la longueur (L) et la largeur (l) du rectangle équivalent.

1.1.1. Surface et périmètre du BV de l'Oued Lahdar :

La surface (A) du bassin versant, exprimée en km^2 , est obtenue par planimétrie sur la carte topographique couvrant le BV, ou comme dans ce travail, à l'aide des logiciels de cartographie par des techniques de digitalisation et de délimitation (Fig. 2.1).

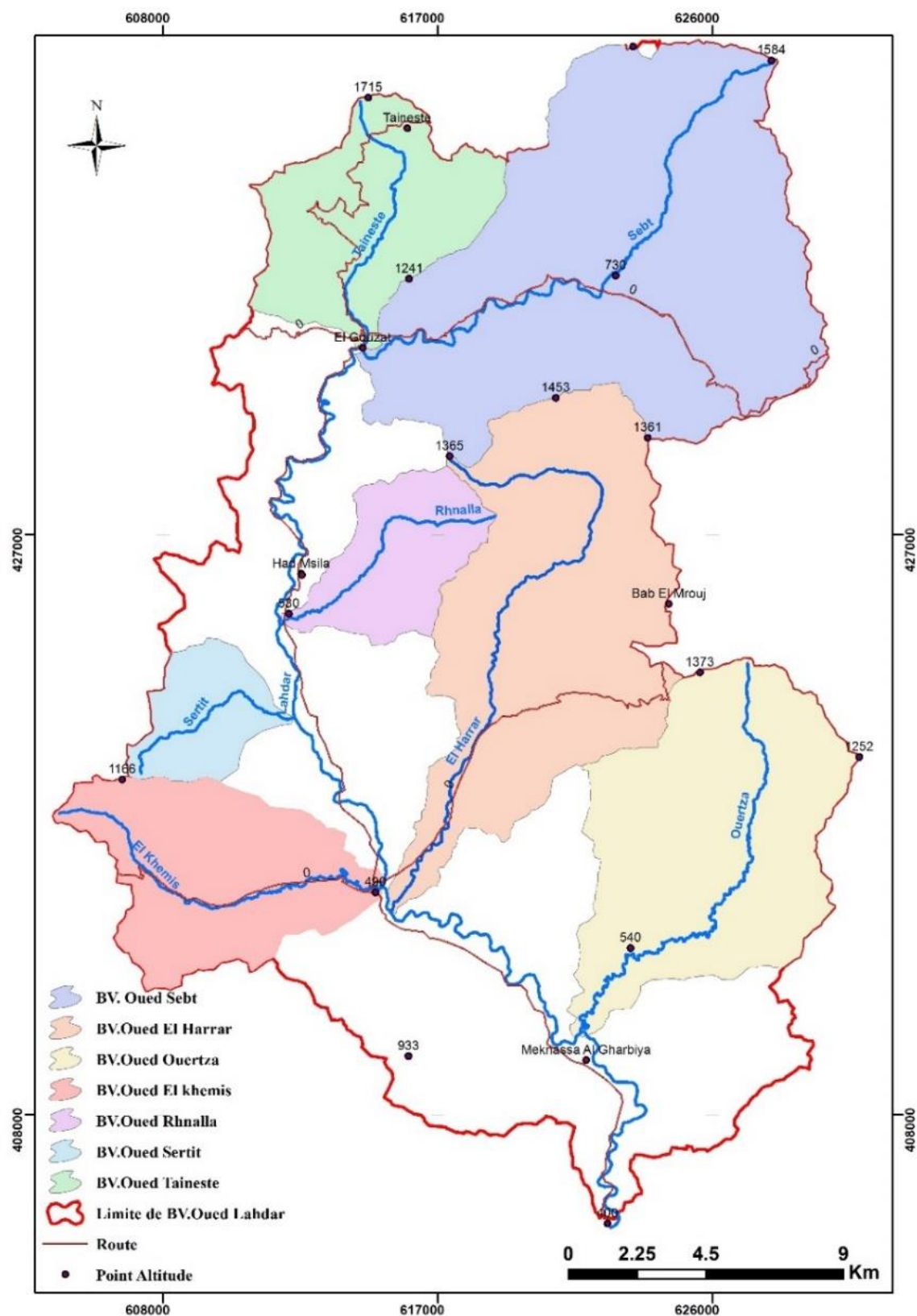


Fig. 2. 1 - Carte des sous-bassins versants de l'Oued Lahdar.

Le périmètre, représente toutes les irrégularités du contour ou de la limite du bassin versant, est exprimé en km. Le contour du bassin est constitué par une ligne joignant tous les points les plus élevés. Il n'influence pas l'état d'écoulement du cours d'eau au niveau du bassin versant. Dans ce travail, nous avons mesuré le périmètre du BV, à l'aide d'un curvimètre et aussi à l'aide de logiciels informatiques.

Le bassin versant étant l'aire de réception des précipitations et d'alimentation des cours d'eau, les débits vont donc être en partie reliés à sa surface, Celle-ci correspond l'aire délimitée par l'ensemble des points les plus hauts qui constituent la ligne de partage des eaux. (Laborde. 2000).

Ces deux paramètres, superficie et périmètre, apportent des informations précieuses dans l'étude du bassin versant. Leurs influences se manifestent dans la nature de la relation entre le débit et le temps de concentration des eaux, Ces derniers sont calculés automatiquement par le logiciel ArcGIS. Ce logiciel nous a permis de calculer le périmètre du BV de Lahdar ($P = 141.21$ km) et sa surface ($A = 611$ km²), Cette superficie est composée de plusieurs sous-bassins, secondaires (Ouertza, El Harrar, Sebt, Taineste, Sertit, Rhnalla et El khemis). Cet air montre l'importance de la zone de réception des eaux pluviales alimentant les affluents de l'Oued Lahdar.

1.1.2. L'indice de compacité Gravelius K_G du BV de l'O Lahdar :

L'indice de compacité de Gravelius (1914) K_G est défini comme le rapport du périmètre du bassin au périmètre du cercle ayant la même surface. Cet indice se détermine à partir d'une carte topographique en mesurant le périmètre du bassin versant et sa surface. Le Coefficient de compacité est défini comme le périmètre du bassin divisé par la circonférence d'un cercle à la même zone du bassin. Cette caractéristique est donnée par l'indice de Gravelius qui a proposé en 1914 le coefficient de compacité (K_G "compactness coefficient").

Il y a plusieurs formules permettant de calculer la forme du bassin versant, entre autres, l'indice de compacité (ou de forme) de Gravelius permet de mieux déterminer la forme géométrique d'un bassin versant. Il est proche de 1 pour un bassin versant de forme quasiment circulaire et il est supérieur à 1 lorsque le bassin est de forme allongée.

Il est défini, comme le rapport du périmètre du bassin au périmètre du cercle ayant la même surface, par la formule mathématique suivante :

$$K_G = \frac{P}{2 \times \sqrt{\pi \times A}} \approx 0.28 \times \frac{P}{\sqrt{A}}$$

K_G : Indice de Gravelius, sans dimension.

P : Périmètre du bassin versant (Km).

A : Surface du bassin versant (Km²).

Le tableau suivant résume les résultats de k_G de sous bassin versant de l'Oued Lahdar.

Tabl. 2. 1 - Indices de compacité pour sous-bassins versants du BV de l'Oued Lahdar.

Bassins versants	Superficie (km ²)	Périmètre (km)	Indice de Compacité
Oued Sebt	131.7	58.1	1.4
Oued Taineste	39.75	30.44	1.4
Oued Rhnalla	22.52	22.48	1.3
Oued Sertit	15.4	17.43	1.2
Oued El Harrar	89.09	56.58	1.7
Oued El khemis	44.56	32.6	1.4
Oued Ouertza	73.27	40.84	1.3
Oued Lahdar	611.44	142.21	1.6

Les calculs de compacité du BV de l'O Lahdar permettent de conclure que le bassin versant de Lahdar a une forme allongée. Cette allure favorise, pour une même pluie, les faibles débits de pointe de crue, en retardant l'acheminement de l'eau à son exutoire. Un BV circulaire est mieux drainé qu'un bassin allongé. (Musy., 2005).

1.1.3. Circularité du bassin :

La circularité d'un bassin versant R_c est le rapport entre sa surface et celle d'un cercle ayant le même périmètre que ce dernier (Miller, 1959). Elle s'exprime par :

$$R_c = \frac{4\pi \cdot A}{P^2}$$

La valeur tend à être influencée par la longueur et la fréquence de flux dans leur ordre respectif, leur gradient, leur lithologie et leur mode de drainage (Umrikar., 2016.). Le rapport de circularité du BV de l'Oued Lahdar est de 0.38, ce qui indique une forme modérée du bassin. Cela implique un stade de jeunesse tardif du développement géomorphologique du bassin de drainage. Le tableau suivant résume les résultats de R_c de sous bassin versant de l'Oued Lahdar.

Tabl. 2. 2 - Indice de circularité du bassin pour différents bassins versants de l'Oued Lahdar.

BVs	Oued Lahdar	Oued Sebt	Oued Taineste	Oued Rhnalla	Oued Sertit	Oued El Harrar	Oued El khemis	Oued Ouertza
Périmètre (km)	142.21	58.10	30.44	22.48	17.43	56.58	32.60	40.84
Superficie (km ²)	611.45	131.70	39.75	22.52	15.40	89.09	44.56	73.27
R_c	0.38	0.49	0.54	0.56	0.64	0.35	0.53	0.55

1.1.4. Indice de forme de Horton, K_H :

L'indice de forme K_H d'un bassin versant est la relation entre la surface du bassin (km²) et la longueur du cours d'eau principal en Km (Horton, 1945). Il est inférieur à 1 pour un bassin versant de forme allongée et supérieur à 1 pour un bassin de forme ramassée.

Il est utilisé pour prédire l'intensité de l'écoulement à l'exutoire d'un bassin versant. Le facteur de forme K_H montre une relation inverse avec la longueur du cours d'eau principal et possède une relation directe avec le débit de pointe à l'exutoire du bassin versant (Gregory et Walling, 1973). Un facteur de forme élevé ($> 0,5$) indique un BV de forme plutôt circulaire, et un débit de pointe élevé d'une durée relativement courte (Singh, 1992, Reddy et al., 2004).

Il exprime le rapport de la largeur moyenne du bassin versant à la longueur du cours d'eau principal (Horton, 1932).

$$K_H = \frac{A}{L^2}$$

K_H : Indice de Horton sans dimension.

- $K_H < 1$: Bassin de forme allongée.

- $K_H > 1$: Bassin de forme ramassée.

Le tableau suivant résume les résultats de K_H de sous bassin versant de l'Oued Lahdar.

Tabl. 2. 3 - Indice de forme de Horton pour différents bassins versants de l'Oued Lahdar.

BV	Oued Lahdar	Oued Sebt	Oued Taineste	Oued Rhnalla	Oued Sertit	Oued El Harrar	Oued El khemis	Oued Ouertza
Superficie (km ²)	611.44	131.7	39.75	22.52	15.4	89.09	44.56	73.27
Longueur du cours d'eau Principal (km)	73.79	23.31	10.31	9.69	7.23	24.70	14.80	21.58
Indice de forme de Horton	0.11	0.24	0.37	0.24	0.29	0.15	0.20	0.16

Pour le bassin versant de l'Oued Lahdar, on a la surface $A = 611.44 \text{ km}^2$ et la longueur du cours d'eau principal $L = 73.8 \text{ km}$. Donc l'indice de forme d'Horton, $K_H = 0,11$, est inférieur à 1, et par conséquent, la forme du bassin versant est allongée et donc elle est apte à générer des écoulements diluviaux en périodes des précipitations orageuses.

1.2. Rectangle équivalent :

Il s'agit d'une transformation purement géométrique du bassin en un rectangle de longueur (L) et de largeur (l) ayant le même périmètre et la même surface que le bassin versant. C'est une transformation purement géométrique dans laquelle les droites parallèles aux largeurs du rectangle et l'exutoire sont le petit côté ou largeur du rectangle. Les courbes de niveau y sont parallèles et sont tracées en respectant les répartitions hypsométriques. La répartition du bassin versant par tranches d'altitude, dans un rectangle équivalent, donne une importance capitale pour les études hydrologiques du fait que la plupart des facteurs météorologiques et hydrologiques sont influencés par l'altitude.

Cette notion a été introduite pour pouvoir comparer des bassins versants entre eux du point de vue de l'influence de leurs caractéristiques géométriques sur l'écoulement. Il faut noter que moins un bassin versant est allongé mieux il est drainé. Les dimensions du rectangle équivalent sont déterminées par la formule suivante :

$$L = \frac{K_G \sqrt{S}}{1.12} \times \left(1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K_G} \right)^2} \right) \quad \text{et} \quad l = \frac{K_G \sqrt{S}}{1.12} \times \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K_G} \right)^2} \right)$$

Pour le bassin versant de l'Oued Lahdar, **L= 60.52 km** et **l=10.09 km**. Ces dimensions traduisent que la longueur est 6 fois plus grande que la largeur. Elles permettent également de dessiner le rectangle équivalent de la zone d'étude (Fig. 2.2) en se basant sur les données de la carte et de la courbe hypsométriques (Fig. 2.4 et Tabl. 2.4).

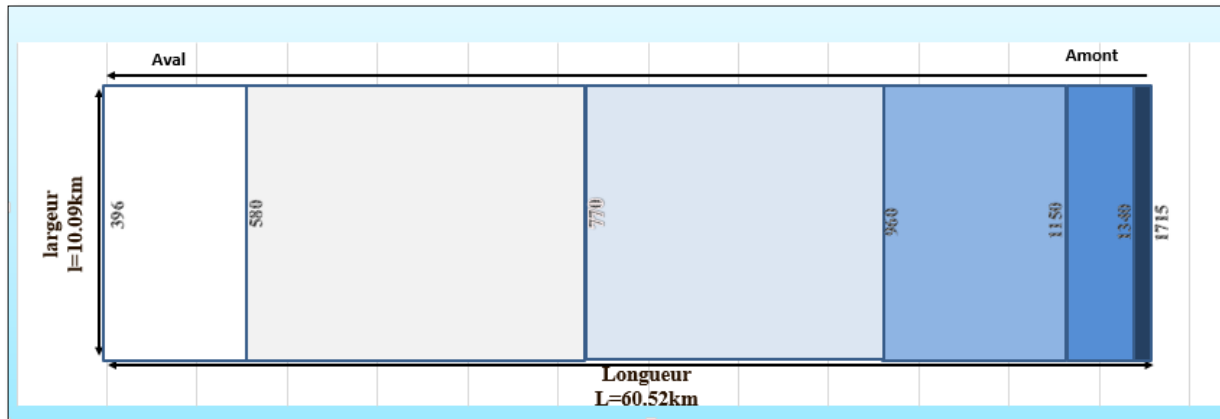


Fig. 2. 2 - Rectangle équivalent du bassin versant de l'Oued Lahdar.

2- CARACTERISTIQUES TOPOGRAPHIQUES (RELIEF) :

L'influence du relief sur l'écoulement est encore plus évidente et se conçoit aisément, car de nombreux paramètres hydrométéorologiques varient avec l'altitude (précipitations, températures, etc.) et la morphologie du bassin versant. En outre, la pente influe sur la vitesse d'écoulement, les styles fluviaux que prennent les cours d'eau et l'évolution spatiale de l'importance des processus sédimentaires fluviaux.

Sur la carte, le relief est indiqué par les courbes de niveau en joignant les points d'égale altitude. Il est nécessaire de répartir le bassin versant en tranches d'altitude à fin de pouvoir dégager les différents paramètres du relief. La répartition des altitudes a été déterminée à partir d'un MNT de 30*30m de résolution. Les résultats, obtenus à l'aide des logiciels SIG, ont permis d'établir la carte et la courbe hypsométriques.

2.1. Modèle Numérique de Terrain (MNT) :

Le Modèle Numérique de Terrain (MNT) est une représentation numérique du relief donc des valeurs d'altitude d'une zone donnée. Il permet d'avoir une représentation en 3 dimensions (3D) du bassin versant. Il est établi à partir des courbes de niveau numérisées du bassin. Les altitudes sont calculées aux points d'une grille dont la taille d'une maille élémentaire détermine le pas du modèle. On peut en dériver des indications sur différents paramètres : altitude moyenne, direction de drainage, pente moyenne, exposition, formes de la surface topographique etc.

Morphologiquement, le MNT du BV de l'Oued Lahdar présente une topographie avec une dénivelée importante entre 396m et 1711m (Fig. 2.3).

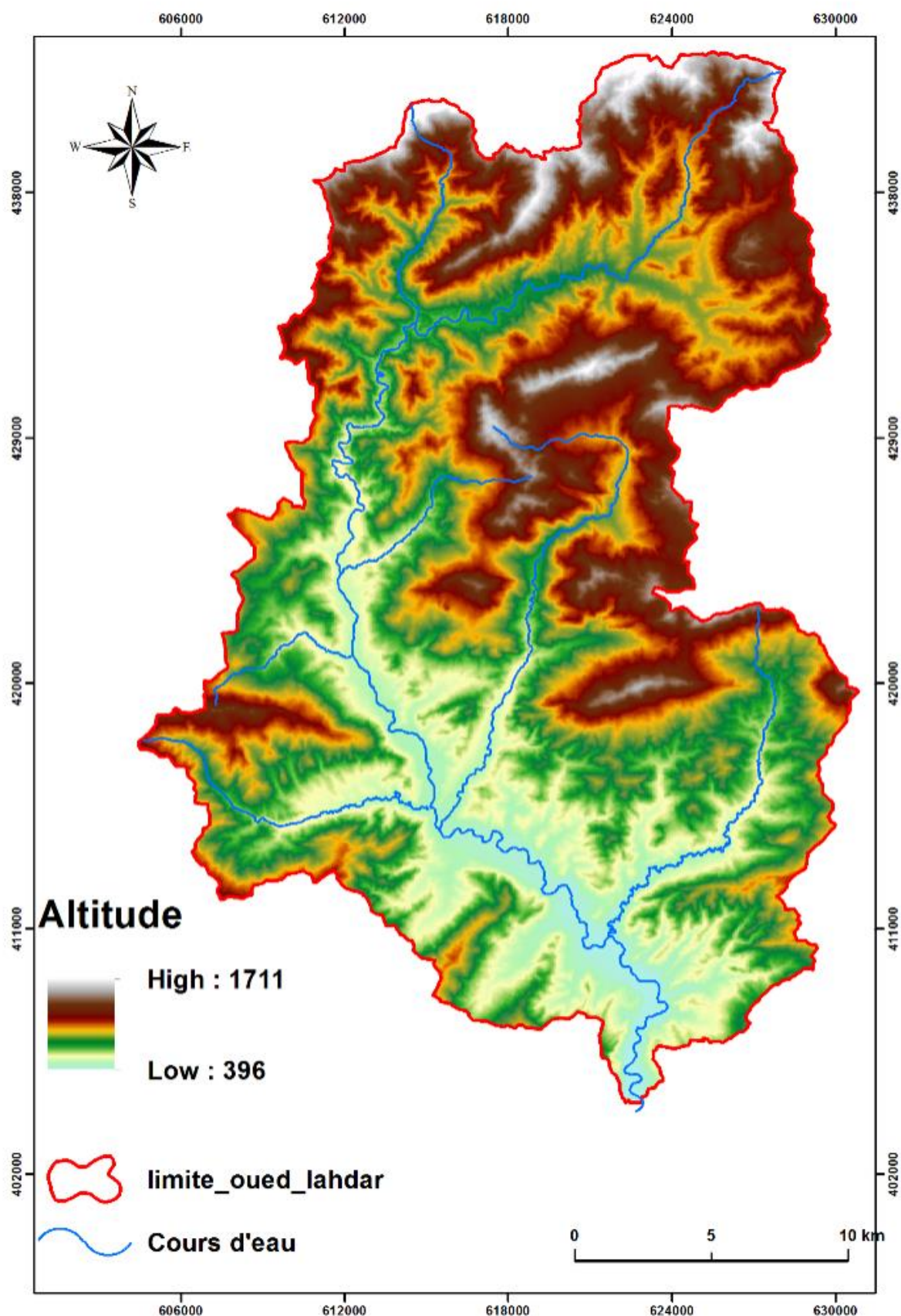


Fig. 2. 3 - Modèle numérique du terrain du bassin versant de de l'Oued Lahdar.

2.2. Carte hypsométrique :

Le modèle numérique de terrain (MNT) permet de réaliser une analyse spatiale représentative car il reflète des informations relatives à la structure morphologique sur l'ensemble du bassin versant (Fig. 2.4). Il donne aussi des prévisions sur la nature et l'intensité des précipitations.

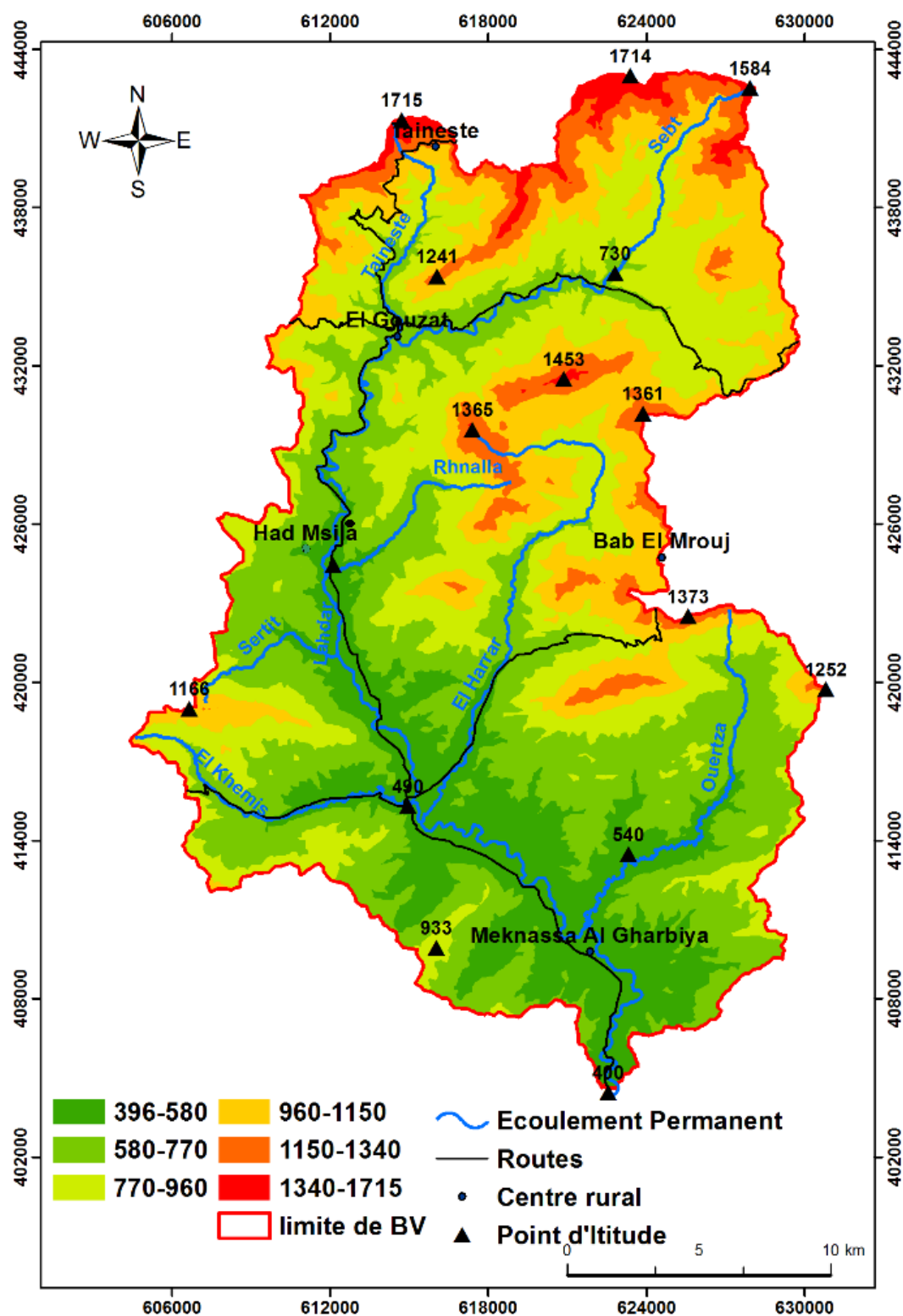


Fig. 2. 4 - Tranches d'altitudes du bassin versant de l'Oued Lahdar.

Les surfaces comprises entre les courbes de niveau de la carte hypsométrique sont représentées sous formes de classes de couleurs différentes, en partant de la classe de haute altitude dont le point culminant se tient à 1710 m jusqu'à celle de basse altitude dont le point le plus bas présente une altitude égale à 396 m.

Dans cette carte hypsométrique, les tranches d'altitudes sont équidistantes de 190m. Les zones de haute altitude (dépassant 1700m) occupent le Nord du bassin par contre les étendues planes constituent le couloir Fès-Taza occupé par le cours de l'Oued Inaouène.

2-3- Courbe hypsométrique :

La plupart des facteurs météorologiques et hydrologiques sont fonction de l'altitude. La courbe hypsométrique traduit la répartition des altitudes à l'intérieur du bassin versant et permet, en outre, de déterminer les altitudes caractéristiques.

Pour mieux comprendre les variations d'altitudes au sein du bassin versant du Lahdar, on va appliquer une méthode statistique qui permet grâce à un histogramme et une courbe hypsométrique de traduire la répartition des altitudes à l'intérieur de la zone d'étude et permet en outre de déterminer les altitudes caractéristiques.

La méthode consiste à calculer les pourcentages des surfaces en fonction des altitudes, puis le calcul des pourcentages au-dessus du cumulé (Tabl. 2.4). Pour les bassins versants jeunes, la superficie est faible par rapport au changement d'altitude, ce qui caractérise des versants abrupts, Les vieux bassins présentent l'inverse, une plaine douce près d'un cours d'eau où l'altitude varie peu malgré une superficie importante. En ce qui concerne le bassin versant de Lahdar, on a commencé par le calcul des surfaces en fonction des altitudes, puis les pourcentages des surfaces cumulées.

Tabl. 2. 4 - Répartition des surfaces en fonction des altitudes de bassins versants de l'Oued Lahdar.

Altitude en (m)	Surface (km ²)	Surfaces partielles (%)	Surface Cumulé en (%)	La courbe Hypsométrique du BV de l'Oued Lahdar	Elévation
396-580	105.76	17.26	17.26	100	396
580-770	189.28	30.90	48.17	98.63	580
770-960	167.57	27.36	75.53	92.34	770
960-1150	102.96	16.81	92.34	75.53	960
1150-1340	38.53	6.29	98.63	48.17	1150
1340-1715	8.34	1.36	100	17.26	1340
-	-	-	-	0	1715

La courbe hypsométrique du bassin versant de l'Oued Lahdar a été tracée à partir des élévations par tranches d'altitudes (en mètre) et des surfaces relatives calculées (en km²). Elle montre une légère concavité vers le bas, avec une pente assez élevée vers les hautes altitudes. Vers les basses altitudes, la pente devient faible. Ces deux zones sont séparées par une zone d'inflexion dont le point culminant coïncide avec l'altitude médiane de 1150m. Cette dernière correspond de point de vue structural à un dôme qui sépare deux dépressions.

La Courbe hypsométrique (Fig. 2.5) c'est une représentation graphique des pourcentages des superficies cumulées à la surface totale du bassin versant où les altitudes sont supérieures à une cote H donnée. A partir de cette courbe on peut extraire par une simple projection, les altitudes caractéristiques du bassin versant (altitude moyenne, médiane...).

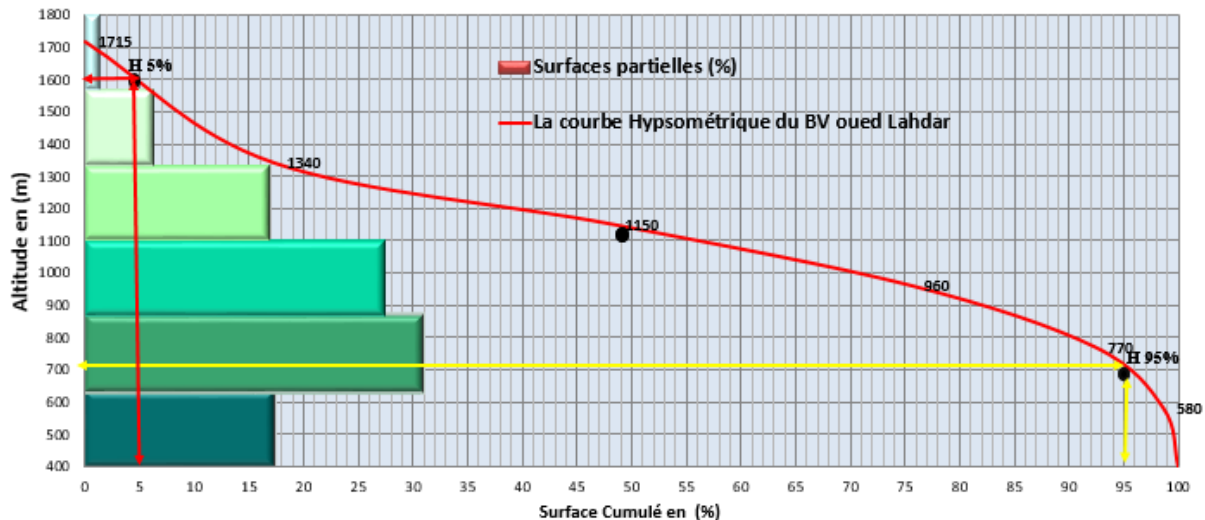


Fig. 2. 5 - Courbe hypsométrique du bassin versant d'Oued Lahdar.

Cette courbe, qui permet de juger de l'âge et du degré d'érosion des bassins versants, constitue aussi un outil de comparaison entre des sous bassins versants.

En effet, la forme de la courbe hypsométrique est caractéristique de l'état de maturité du relief (jeune, en équilibre et vieux) ainsi que de sa capacité érosive, l'allure de la courbe hypsométrique caractérise le cycle d'érosion du relief actuel étudié. En effet, une courbe convexe est caractéristique d'un relief accusé et jeune où l'érosion est encore intense, tandis qu'une forme concave reflète un vieux relief non rajeuni par les soulèvements tectoniques et où l'érosion est devenue faible et stable (Bannister, 1980). L'interprétation de l'aspect de la courbe hypsométrique est donnée en fonction du degré d'érosion associé à l'âge du bassin (Fig. 2.6) :

- Les bassins plus jeunes montrent une superficie faible par rapport au changement d'altitude initiale, ce qui est caractéristique des bassins abrupts.
- Les vieux bassins présentent de larges topographies pratiquement planes où l'altitude varie très peu.
- Les bassins, correspondant à la courbe du milieu, sont des bassins proches de l'état dit d'équilibre ou « mature ».

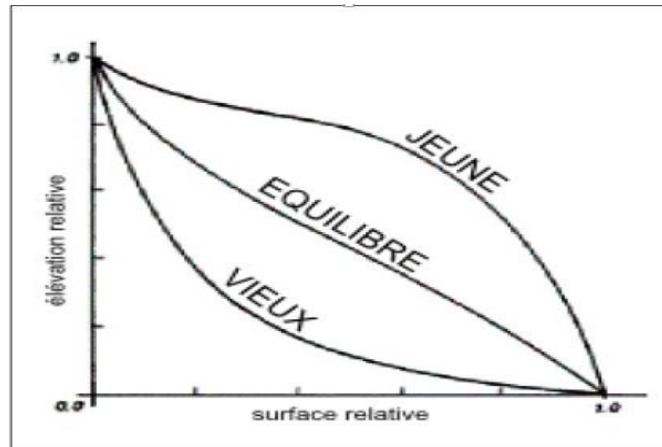


Fig. 2. 6 - Etat de maturité du relief du bassin versant.

2-4- Les Altitudes

Les principales altitudes extrêmes du bassin versant de l'Oued Lahdar, extraites à partir du MNT et de la courbe hypsométrique (Fig. 5), sont les suivantes :

- L'altitude minimale est : $H_{min} = 396\text{m}$;
- L'altitude maximale est : $H_{max} = 1715\text{m}$;
- La hauteur à 5 % de la surface totale est : $H_{5\%} = 1600\text{ m}$;
- La hauteur à 95 % de la surface totale est : $H_{95\%} = 700\text{ m}$;

Les altitudes maximales et minimales sont obtenues directement à partir des cartes topographiques ou bien du MNT à l'aide des logiciels du SIG comme c'est le cas dans le présent travail, L'altitude maximale représente le point le plus élevé du bassin tandis que l'altitude minimale considère le point le plus bas, généralement à l'exutoire. Ces deux données deviennent surtout importantes lors du développement de certaines relations faisant intervenir des variables climatologiques telles que la température, la précipitation et le couvert neigeux. Elles déterminent l'amplitude altimétrique du bassin versant et interviennent aussi dans le calcul de la pente.

Altitude moyenne

L'altitude moyenne est peu représentative de la réalité. Toutefois, elle est parfois utilisée dans l'évaluation de certains paramètres hydrométéorologiques ou dans la mise en œuvre de modèles hydrologiques.

Elle se déduit directement de la courbe hypsométrique ou de la lecture d'une carte topographique. Elle est définie par :

$$H_{moy} = \sum \frac{A_i \times h_i}{A}$$

Avec :

H_{moy} : altitude moyenne du bassin [m] ;

A_i : aire comprise entre deux courbes de niveau [km^2] ;

h_i : altitude moyenne entre deux courbes de niveau [m] ;

A : superficie totale du bassin versant [km^2].

L'altitude moyenne du bassin versant de l'Oued Lahdar est $H_{moy} = 806,05\text{ m}$ calculée manuellement d'après la formule ci-dessus et le Tabl. 2.5.

Tabl. 2. 5 - Altitude moyenne de bassins versants de l'Oued Lahdar.

Altitude en (m)	Ai (km ²)	hi(m)	A (km ²)	Hi_moy(m)	H _{moy}
396-580	105.76	488	612.46	84.27	806.05
580-770	189.28	675		208.60	
770-960	167.57	865		236.67	
960-1150	102.96	1055		177.35	
1150-1340	38.53	1245		78.32	
1340-1715	8.34	1527.5		20.81	

Altitude médiane

L'altitude médiane correspond à l'altitude lue au point d'abscisse 50% de la surface totale du bassin, sur la courbe hypsométrique. Cette grandeur se rapproche de l'altitude moyenne, dans le cas où la courbe hypsométrique, du bassin concerné, présente une pente régulière.

Pour le bassin de l'Oued Lahdar : H_{moy} = 806.05 m H_{médiane} = 1150 m.

L'altitude médiane est supérieure à l'altitude moyenne donc la pente du bassin est irrégulière. Elle est trop forte en amont du bassin (avec la présence de hauts reliefs) et s'adoucit en descendant vers la plaine.

2-5- Pente du bassin versant :

Pente moyenne du bassin versant :

La pente moyenne (Im) d'un bassin versant est un paramètre qui a un rapport important et complexe avec l'infiltration, le ruissellement superficiel et la saturation du sol en eau. Elle contrôle le temps de ruissellement et de concentration des eaux pluviales dans les artères de drainage. Plusieurs méthodes ont été développées pour estimer la pente moyenne d'un bassin versant. Elles se basent toutes sur la lecture d'une carte topographique réelle ou approximative ou bien à partir d'un MNT en utilisant le SIG comme c'est le cas dans le présent travail. L'estimation de la pente moyenne peut se faire par diverses relations. Une valeur approchée de la pente moyenne est donnée par la relation suivante :

$$i_m = \frac{D \times L}{A}$$

Avec

i_m : pente moyenne (m/Km ou %).

L : longueur totale de courbes de niveau (Km).

D : équidistance entre deux courbes de niveau (m).

A : surface du bassin versant (km²)

Il existe d'autres méthodes permettant le calcul de la pente moyenne, la plus utilisée est celle de l'indice de P_{moy}.

$$P_{moy} = \frac{\Delta H}{L}$$

$$\Delta H = Alt_{max} - Alt_{min}$$

L : la longueur du rectangle équivalent.

Tabl. 2. 6 - Pentes moyennes des sous-bassins versants d'oued Lahdar.

Bassins versants	L	ΔH	Pente en (m/Km)	Pente en (m/m)
Oued Sebt	23.42	1037	44.278	0.044
Oued Taineste	11.87	1074	90.480	0.090
Oued Rhnalla	8.63	812	94.090	0.094
Oued Sertit	6.25	667	106.720	0.107
Oued El Harrar	24.68	987	39.992	0.040
Oued El khemis	12.83	690	53.780	0.054
Oued Ouertza	15.77	935	59.290	0.059
Oued Lahdar	61	1319	21.623	0.022

Les indices de pente :

Leur connaissance est d'une grande importance car il est évident que les eaux ruissellent d'autant plus que la pente des versants est grande, c'est ainsi qu'en montagne on rencontre, pour une averse donnée, des crues plus importantes qu'en plaine où les pentes sont beaucoup plus faibles.

L'indice de pente globale I_g :

Il est défini comme étant le rapport entre la dénivellation utile (D_u) et la longueur (L) du rectangle équivalent.

$$I_g = \frac{D_u}{L_{eq}} = \frac{H_5 - H_{95}}{L_{eq}} \quad (3.5)$$

I_g : indice de pente globale en m/Km.

D_u : dénivellation utile

H_5 : altitude correspondant à 5% de la surface totale du bassin.

H_{95} : altitude correspondant à 95% de la surface totale du bassin.

L_{eq} : la longueur du rectangle équivalent.

$$I_g = 14.46 \text{ m/km}$$

$$\text{Donc : } I_g = 0,014 \text{ m/m}$$

Cette valeur d' I_g semble plus élevée, ce qui donne l'hypothèse d'un relief modéré pour le bassin versant de Lahdar, en tenant compte de la classification ORSTOM (Tabl. 2.7).

Tabl. 2. 7 - Classification ORSTOM du relief à partir de l'indice de pente globale.

Relief très faible	$I_g < 0.002$
Relief faible	$0.002 \leq I_g < 0.005$
Relief assez faible	$0.005 \leq I_g < 0.01$
Relief modéré	$0.01 \leq I_g < 0.02$
Relief assez fort	$0.02 \leq I_g < 0.05$
Relief fort	$0.05 \leq I_g < 0.5$
Relief très fort	$I_g > 0.5$

On peut déduire l'indice de pentes à partir de l'indice de pente globale selon la formule :

$$I_g = 0.8I_p^2$$

$$\text{Donc } I_p = \sqrt{\frac{I_g}{0.8}} = 0.13$$

Carte des pentes :

La pente topographique est un paramètre capital dans tout travail d'aménagement ; elle conditionne le drainage (Abbassi, 2004). En effet, elle affecte d'une façon directe par son intensité les phénomènes d'infiltration, de ruissellement et d'érosion, sa forme, et la longueur sur laquelle elle agit.

La carte des pentes du bassin versant de l'Oued Lahdar a été établie à partir du MNT de la région étudiée (Fig. 2.7). Elle montre que les pentes les plus abruptes, très fortes à fortes, se concentrent dans la partie amont, les pentes faibles à très faibles se développent dans les plaines dans la partie aval du bassin versant.

La carte des pentes montre que plus de 14.30% de la topographie du bassin présente une pente inférieure à 12%, soit 53.70% de la superficie du bassin versant, présente une pente qui varie entre 12% et 35% et la classe des pentes les plus fortes (>35%) couvre 32 % de la surface de BV.

Ces valeurs de pente sont à mettre en relation avec la structure géologique et surtout la lithologie des terrains qui déterminent leur comportement vis à vis de l'érosion et l'inondation. L'observation et l'analyse de la carte des pentes (Fig. 2.7) confirment les données de la carte hypsométrique et montrent que la topographie du bassin est formée en amont de plateaux étagés du NW vers le SE qui passent vers l'aval à des plaines alluviales.

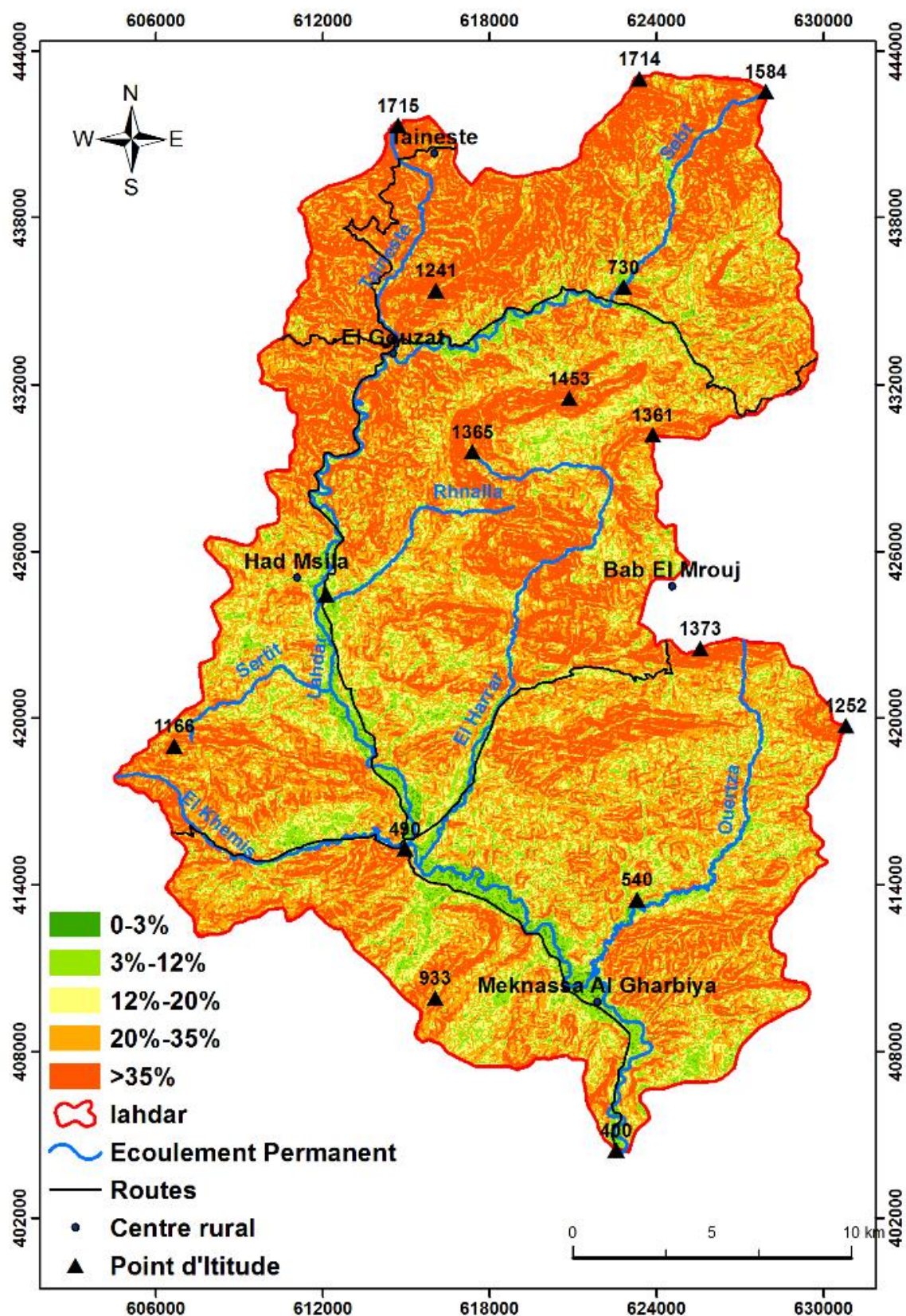


Fig. 2. 7 - Carte de pente du bassin versant de l'Oued Lahdar.

3 CARACTERISTIQUES DU RESEAU HYDROGRAPHIQUE :

Le réseau hydrographique se définit comme l'ensemble des cours d'eau naturels ou artificiels, permanent ou temporaire, qui participe à l'écoulement dans le bassin versant. La définition d'un cours d'eau est difficile à donner avec précision, en particulier pour les cours d'eau temporaires. Selon le support cartographique utilisé, on étudiera le réseau avec plus ou moins de détails : en carte topographique, on pourra déceler des thalwegs de très faibles extensions, tandis qu'on ne verra que les cours d'eau pérennes et importants sur une carte au 1/50 000.

L'état actuel du réseau hydrographique résulte d'une longue évolution géomorphologique. Le substratum de BV se compose essentiellement d'argiles et de marnes, ce qui génère un réseau hydrographique assez dense. Le développement du réseau hydrographique d'Oued Lahdar est différent suivant la région naturelle drainée.

La direction d'écoulement de l'Oued Lahdar est de Nord vers Sud sur une distance de 64,95Km, Le cours principal de l'Oued Lahdar reçoit les débits les plus importantes de la rive Nord, du fait de la nature argileuse, en général, du front des nappes Prérimaires.

Dans la région amont, Lahdar coule d'est en ouest. Elle a la particularité d'avoir un tracé presque rectiligne jusque d'Arfia en raison d'actions anthropiques qui ont modifié le tracé. Dans la partie médiane, à partir de Centre El Gouzate, l'écoulement prend une direction générale Nord-Sud. Le tracé est très sinueux avec une succession de grands et petits méandres. A l'aval, à partir de l'affluent oued El khemis, on observe des moins sinueux. En alternance avec un tracé rectiligne. Vers l'aval du bassin, le tracé devient sinuosités plus libres.

Vu la nature imperméable du bassin de BV qui favorise le ruissellement plutôt que l'infiltration, BV reçoit de nombreux affluents dont le plus important (Tabl. 2.8), le réseau hydrographique se caractérise par des affluents assez courts, souvent temporaires. Dans cette zone, les affluents les plus importants se trouvent en rive gauche (O. Sebt, O. Rhnalla, O. El Harrar, Oued Ouertza). En rive droite, ils sont moins nombreux et plus courts (O. El Khemis, O. Sertit). Dans la partie médiane, les affluents sont moins nombreux. Les plus importants sont en rive gauche (O. El Harrar). En rive droite (O. El khemis).

Tabl. 2. 8 - Longueur du cours d'eau Principal des sous-bassins versants d'Oued Lahdar.

BVs	Oued Lahdar	Oued Sebt	Oued Taineste	Oued Rhnalla	Oued Sertit	Oued El Harrar	Oued El khemis	Oued Ouertza
Superficie	611.44	131.7	39.75	22.52	15.40	89.09	44.56	73.27
Longueur du cours d'eau Principal	61	23	11.87	8.63	6.25	24.68	12.83	15.77

La majorité de ces affluents sont pérennes et alimentés essentiellement par les précipitations. Il est clair que ces affluents vont jouer un rôle important dans l'alimentation de BV, surtout dans la partie amont. Ils contribuent au gonflement des débits du cours d'eau lors de la période des hautes eaux ce qui conduit à une accélération de l'érosion fluviale. Ce type d'alimentation provoque parfois des montées rapides des débits qui conduisent aux inondations.

3.1 Le profil en long de l'Oued Lahdar :

Le profil en long (Fig. 2.8), permet d'estimer la pente moyenne du cours d'eau, cette dernière est calculée pour estimer le temps de concentration de l'eau dans le bassin versant.

Mais généralement la vitesse de l'eau varie en fonction des tronçons, ce qui exige une décomposition le profil en long en des pentes constantes et faire un moyenne arithmétique.

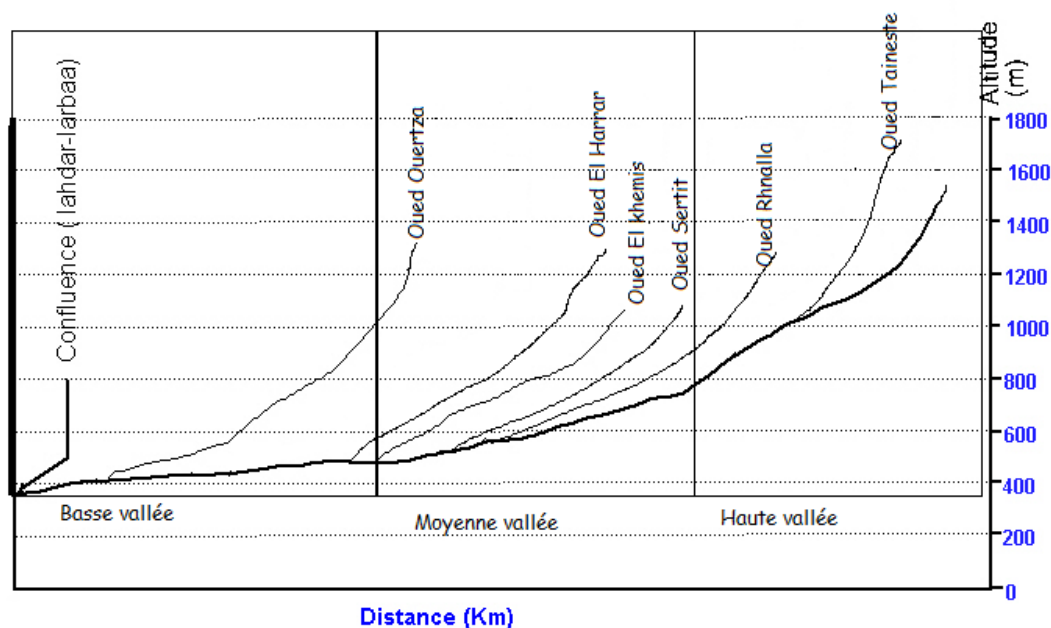


Fig. 2. 8 - Profil en long de l'Oued Lahdar et différents sous bassins versants de l'Oued Lahdar.

Le profil en long de Lahdar, sur 64 km, est concave à l'amont et présente une succession de ruptures de pente à l'aval.

- * La partie amont s'inscrit dans des roches imperméables et présente une pente forte sur une distance de 19 km jusqu'à la confluence de l'Oued sebt ; l'abaissement de pente se fait de façon régulière vers l'aval,
- * La partie médiane oued coule sur des terrains majoritairement imperméables, enregistre une pente faible Sur une distance de 25 km jusqu'à la confluence de l'Oued El Harrar,
- * Dans la partie aval, la pente longitudinale diminue progressivement sur une distance de 20km Les ruptures de pente visible dans cette partie sont certainement d'origine anthropique. Au final, la longueur du talweg est de 64 km,

Dans le détail, la partie amont enregistre une pente de 31.32 ‰, la partie médiane une pente de 6.43 ‰ et à l'aval la pente ne dépasse pas les 2.98 ‰. La longueur du talweg de la BV n'atteint pas 24 km. Le réseau hydrographique est très influencé par le substratum du bassin, qui conduit à une diversité de ses caractéristiques (profil en long, hiérarchisation du réseau, densité de drainage, ...).

Le profil en long du cours d'eau principal est un graphique représentant les différentes élévations du fond du cours d'eau en fonction de la distance à l'exutoire, Ce profil donne une idée sur l'allure du cours d'eau.

3.2 Hiérarchisation du réseau hydrographique :

Le réseau hydrographique du BV de l'Oued Lahdar est de type permanente et temporaire. La classification d'un réseau hydrographique est une manière d'hiérarchiser l'ensemble des branches de ce réseau en attribuant à chacune une valeur qui caractérise son importance. Cette classification, qui peut être reprise au niveau des stations de mesure, aide à la définition du cours d'eau et permet des comparaisons entre réseaux hydrographiques différents. Il existe beaucoup de classifications et d'indices de classement qui servent à préciser les spécificités de chaque réseau.

Parmi toutes les méthodes de numérotation des cours d'eau d'un bassin versant on va choisir celle de Strahler. Cette méthode est basée sur la numérotation de chaque cours d'eau de la manière suivante.

- tout cours d'eau n'ayant pas d'affluent est dit d'ordre 1.
- au confluent de deux cours d'eau de même ordre n , le cours d'eau résultant est d'ordre $n + 1$,
- un cours d'eau recevant un affluent d'ordre inférieur garde son ordre, ce qui se résume par : $n + n = n + 1$ et $n + m = \max (n, m)$.

Vu l'absence des cartes topographiques à petites échelles (1/10 000 ou 1/5 000), et les photographies aériennes, on a utilisé les cartes topographiques de Bab El Mrouj, Ain Boukellal, Taineste, Taza, Aknoul, Beni Frassene (1/50000). L'ordre du cours d'eau va changer selon l'échelle de la carte topographique, dans notre cas l'échelle de la carte est 1/50 000 alors que l'ordre réel du cours d'eau corrigé devient 7.

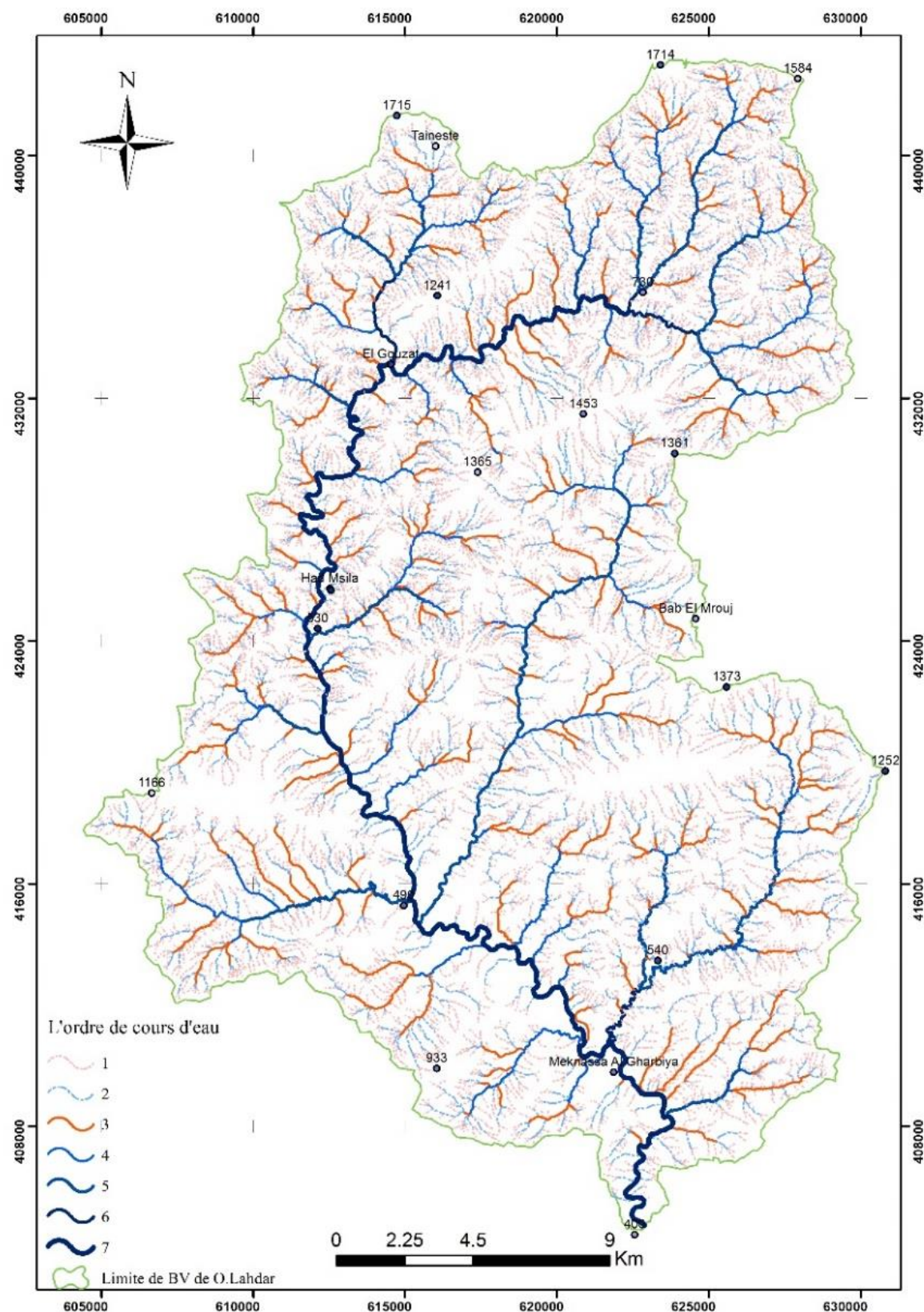


Fig. 2. 9 - Hiérarchisation du réseau hydrographique du bassin versant de l'Oued Lahdar.

3.3 La densité de drainage et la fréquence du chenal :

Pour expliquer la ramification ou la rareté du réseau hydrographie dans le bassin versant de l'Oued Lahdar, on va calculer la densité de drainage et hydrographie pour donner une idée sur l'importance du ruissellement et aussi pour la connaissance de la réaction des eaux de surface avec la formation superficielle.

La densité de drainage d'un bassin est un paramètre reflétant son écoulement, la stabilité du réseau hydrographique et le type de ruissellement de surface (Llamas, 1993). Cette densité est représentée par un indice de concentration plus ou moins rapide des écoulements, qui permet d'apprécier les possibilités d'évacuation de l'eau (eaux de surface et souterraines).

La densité du drainage (Dd), introduite par Horton (1932), est la longueur totale du réseau hydrographique par unité de surface d'un bassin versant. Elle s'exprime en km/km^2 . Elle est contrôlée par plusieurs facteurs notamment la nature géologique des terrains, la capacité d'infiltration du sol et sous-sol, les conditions climatiques et le couvert végétal du bassin (Humbert, 1990). La densité du drainage des sous-bassins versants de l'Oued Lahdar varie de 3.66 à 5,78 (Tabl. 2.9).

Tabl. 2. 9 - La densité du drainage des sous-bassins versants de l'Oued Lahdar.

BVs	Ni	Li en (Km)	A en km^2	Dd (km/km^2)
Oued Lahdar	7475	2863.09	611.44	4.68
Oued Sebt	2118	740.93	129.58	5.72
Oued Taineste	668	224.10	39.53	5.67
Oued Rhnalla	368	130.56	22.58	5.78
Oued Sertit	157	59.15	16.15	3.66
Oued El Harrar	855	376.49	89.14	4.22
Oued El khemis	432	183.84	43.98	4.18
Oued Ouertza	665	288.76	73.20	3.94

Les faibles valeurs de cette densité indiquent que le sol et le sous-sol sont très perméables, tandis que les hautes valeurs montrent que les terrains sont imperméables, dans notre cas d'étude le bassin versant de Lahdar est caractérisé, en grande partie, par un substratum marneux imperméable. Du point de vue couvert végétal, la zone d'étude est presque nue à l'exception de quelques oliviers, ceci favorise l'érosion du terrain. On ne peut oublier le rôle du contraste des saisons et l'influence des averses sur l'érosion des marnes.

3.4 La densité hydrographique du BV de l'Oued Lahdar :

La densité hydrographique représente le nombre de chenaux d'écoulement par unité de surface, (Musy A., 2005).

Avec :

F : densité hydrographique (km^{-2})

Ni : nombre de cours d'eau

A : superficie du bassin versant (km^{-2})

F = 12.2 km^{-2}

Tabl. 2. 10 - La densité du hydrographique des sous-bassins versants de l'Oued Lahdar.

BVs	Ni	Li en (Km)	A en km ²	F (km ⁻²)
Oued Lahdar	7475	2863.09	611.44	12.2
Oued Sebt	2118	740.93	129.58	16.3
Oued Taineste	668	224.10	39.53	16.9
Oued Rhnalla	368	130.56	22.58	16.3
Oued Sertit	157	59.15	16.15	9.7
Oued El Harrar	855	376.49	89.14	9.6
Oued El khemis	432	183.84	43.98	9.8
Oued Ouertza	665	288.76	73.20	9.1

En somme, les régions à haute densité de drainage et à haute densité hydrographique (deux facteurs allant souvent de pair) présentent en général une roche mère imperméable, un couvert végétal restreint et un relief montagneux. L'opposé, c'est-à-dire faible densité de drainage (F) et faible densité hydrographique se rencontrent en région à substratum très perméable, à couvert végétal important et à relief peu accentué.

Le bassin versant de l'Oued Lahdar présente un réseau hydrographie très ramifié, et forte densité de drainage et hydrographie, elle traduit des conditions lithologiques imperméables. Celle-ci joue un rôle important dans le décapage du sol et l'instabilité des versants.

3.5 La fréquence des cours d'eau :

Elle représente le rapport du nombre du cours d'eau d'ordre 1 à la surface du bassin versant d'étude.

$$F = 9.34 \text{ km}^{-2}$$

D'après cette valeur, on remarque que le bassin versant présente une fréquence plus au moins forte, ce qui traduit que le réseau hydrographique présente une hiérarchisation forte et par conséquent l'érosion hydrique est très active dans la zone d'étude.

3.6 Le coefficient de torrentialité :

Le coefficient de torrentialité est étroitement lié à la densité de drainage. Il donne une idée sur le comportement du réseau de drainage c'est-à-dire comment l'eau provenant des cours d'eau d'ordre inférieur arrive à la rivière principale.

C'est le rapport entre la fréquence des cours d'eau d'ordre 1 avec la densité de drainage $C_t = \frac{D_d}{F}$ pour le bassin de l'Oued Lahdar est égale à 43.71 Km/km².

Cette valeur traduit que le bassin représente des caractéristiques morphométries adaptées à l'écoulement, ainsi qu'il est constitué par des formations imperméables ce qui favorise le ruissellement et la perte du sol.

CONCLUSION :

Concernant les facteurs qui influencent la variabilité spatiale des régimes hydrologiques, il est ressorti que les caractéristiques physiques des bassins sont de loin le principal facteur qui influence plus ou moins la variabilité spatiale. En effet, l'examen des caractéristiques physiques de ces bassins versants a révélé que ce sont principalement les caractéristiques de forme (Superficie, Périmètre, Indice de compacité de Gravelais, Longueur, Largeur) qui ont présidé à la classification statistique des différents sous-bassins versants en groupes distincts. Ainsi, les bassins versants de plus grandes dimensions se distinguent toujours des autres.

Les paramètres morphométriques employés pour voir si la forme d'un bassin versant (**allongement**, compacité, circularité) influence le régime d'écoulement, et conditionnent en partie le régime d'écoulement dans le bassin de l'Oued Lahdar.

Les manifestés incontournables de notre classification est qu'ils sont basée sur des critères précis et faciles à appliquer pour classer et caractériser tout bassin versant. Il faut ajouter que l'analyse des paramètres morphométriques est importante, mais reste néanmoins insuffisante pour connaître les réponses hydrauliques d'un grand bassin versant comme celui de la Lahdar.

CONCLUSION DU PREMIERE PARTIE :

L'étude climatique a été d'une grande importance, car elle a permis de caractériser le climat de la région de Taza avec ses variations spatio-temporelles. Les résultats ainsi obtenus vont constituer la plateforme sur laquelle se fondera l'étude hydrologique du bassin versant de l'Oued Lahdar.

L'étude de caractéristiques du bassin versant de l'Oued Lahdar a permis de caractériser ses composantes les plus importantes, et de révéler un tas d'informations qui vont aider à expliquer et à justifier les résultats obtenus dans le chapitre suivant. En effet, il s'est avéré que toutes les conditions notamment l'imperméabilité des formations géologiques, les apports pluviométriques, l'occupation du sol en dégradation continue, les sols peu évolués, le temps de concentration court, les pentes dure, toutes ces conditions sont influencent sur la variabilité spatiale des régimes hydrologiques

L'analyse des différents paramètres physiques du bassin versant de l'Oued Lahdar a permis de caractériser les pentes, les altitudes caractéristiques, les caractéristiques du réseau de drainage l'occupation des sols.... Cette analyse est la clef pour déchiffrer les interactions entre le milieu physique et l'aspect hydrologique du bassin versant et son comportement vis-à-vis l'événement pluviométrique.

L'analyse de ces caractères a été réalisée à cause de son importance sur le régime hydraulique du bassin, et l'intervention directe sur sa dynamique fluviale, la torrentialité et sur les risques hydrologiques dans la plaine alluviale et tous ces résultats physiques de bassin versant de l'Oued Lahdar contribuer à l'accélérations de l'activité et la dynamique fluviale dans la plaine alluviale de l'Oued Lahdar soit sur la dynamique de l'eau dans la vallée au la dynamique des sédiments en zone à l'autre.

Deuxième partie :

HYDROLOGIE ET MODELISATION HYDRAULIQUE DE L'OUED LAHDAR

Introduction de la deuxième partie,

Chapitre 3 : Etude du régime hydrologique de l'Oued Lahdar et l'estimation des crues de projet,

Chapitre 4 : Modélisation hydraulique et cartographie des zones inondables,

Conclusion de la deuxième partie.

INTRODUCTION DE LA DEUXIEME PARTIE :

L'analyse et la compréhension des régimes hydrologiques des cours d'eau et leurs variations temporelles ainsi que l'étude de leurs situations hydrologiques particulières revêtent une place importante au sein de l'hydrologie. Le bassin versant de l'Oued Lahdar, que nous sommes en train d'étudier son hydrologie, de par sa situation géographique distincte, donc son régime hydrologique et ses phases extrêmes sont commandés, d'une part, par les conditions topographiques et géologiques, et d'autre part par la forte dynamique du climat méditerranéen, qui se reflète dans la forte variabilité temporelle et spatiale.

Dans cette partie, nous étudierons la variabilité hydrologique de l'Oued Lahdar en analysant les variations naturelle des débits de la station de Bab Echhoub à différentes échelles temporelles, afin de mettre en évidence les périodes de concentration des eaux et celles d'indigence, et donc déterminer la nature du régime hydrologique.

De plus cette partie synthétise les principales méthodes utilisées pour l'estimation des crues de projet au Maroc. Deux grandes familles sont distinguées. La première famille englobe les méthodes hydrométéorologiques, elles reposent sur des paramètres régionaux calculés à partir de l'information apportée par la pluie. Deux méthodes sont des plus utilisées au Maroc : La méthode du Gradex et la méthode rationnelle. La deuxième famille constituée par les méthodes empiriques qui sont utilisées lorsqu'on ne possède que peu ou pas de données sur les débits des crues dans une région.

L'étude hydraulique consiste à faire le diagnostic de la zone d'étude pour tout événement hydraulique. Elle consiste à calculer les hauteurs d'eau et déterminer les zones de débordement. Pendant cette étude, nous avons utilisé deux logiciels : un logiciel de Système d'Information géographique (ArcGIS) et un logiciel de modélisation de rivières (Hec-RAS) qui permettent de reproduire l'état de la zone naturelle à l'état numérique.

La modélisation hydraulique est basée sur la résolution des équations d'écoulements des fluides au niveau des canaux artificiels ou naturels (rivière, Châaba...). L'efficacité et la précision des calculs dépendront directement de la qualité des données de base et de l'inventaire, exhaustif si c'est possible, des éléments existants sur le terrain et qui participent, directement ou indirectement, à l'écoulement de surface (coefficient de Manning, profils...).

Dans cet égard, on a décidé de faire une étude hydraulique du bassin versant de l'Oued Lahdar, dont l'objectif est d'évaluer et intégrer tous les paramètres fondamentaux, tels que la géométrie, le débit, et les conditions aux limites pour avoir un model hydraulique plus proche de la réalité. Ce travail est réalisé par une combinaison de plusieurs logiciels Hec-Ras, Hec-GéoRAS et ArcGIS.

Chapitre 3 :

ETUDE DU REGIME HYDROLOGIQUE DE L'OUED LAHDAR ET ESTIMATION DES DEBITS DE PROJET

Introduction,

- 1 – La variation temporelle des débits annuels,
 - 2 – Variation saisonnière des débits,
 - 3 - La variabilité interannuelle des débits saisonniers,
 - 4 – Variabilité mensuelle des débits,
 - 5 – Variabilité naturelle des débits journaliers,
 - 6 – Analyse fréquentielle des débits journaliers maximaux,
 - 7--corrélation précipitation/débits, précipitations/coefficient d'écoulement et précipitation/déficit,
 - 8 – Les différents types de modèles et loi d'ajustement des Q_p ,
 - 9 – Données disponibles,
 - 10 – Présentation et application des méthodes adoptées pour la production des données,
- Conclusion.

INTRODUCTION :

L'étude hydrologique du bassin versant d'Oued Lahdar est réalisée en se basant sur les données hydrométriques de la station de Bab Echhoub. Pour étudier le fonctionnement hydrologique de ce bassin versant, ainsi que son bilan, nous entreprendrons principalement l'étude du régime des débits et leurs relations pour cette station puis la relation entre les précipitations et les débits et en fin nous préciserons quelques caractéristiques de la genèse des crues.

La sélection de l'année hydrologique est aussi une phase délicate, parce qu'il faut tenir compte de la combinaison des principaux termes du cycle annuel de l'eau : précipitations, l'évapotranspiration et ruissellement (superficiel et souterrain). Toutefois l'abondance moyenne de l'écoulement a pour unité chronologique de référence "l'année moyenne", mais, nous savons que pour des variables considérées comme aléatoire telles que les débits, cette notion d'année moyenne est sujette à caution, du fait qu'elle conduit à une "régularisation artificielle" du régime hydrologique par compensation des années humides et sèches (Rémenieras, 1976). Par la suite l'intégration de l'année humide et sèche dans toute étude hydrologique s'avère essentielle.

La variation temporelle des débits dépend, d'une part, des facteurs hydrogéologiques et d'autre part, elle dépend largement des conditions climatiques, notamment l'irrégularité des précipitations. L'étude de l'évolution temporelle des débits est très importante pour caractériser les changements intra-annuels et interannuels du régime hydrologiques de chaque cours d'eau.

L'importance de l'étude des crues s'explique en grande partie par des facteurs géographiques : les zones de fortes concentrations urbaines sont très fréquemment près des fleuves ; les terres agricoles les plus riches sont généralement dans les basses vallées. D'autres facteurs économiques ont également justifié l'étude approfondie des inondations. Par exemple, nous notons que les ouvrages de franchissement représentent une part très importante des coûts des infrastructures routières ou ferroviaires, le coût de l'évacuateur de crue qui protège une retenue en terre peut très bien être du même ordre de grandeur que celui de la digue elle-même... (Gresillon. et Puech.1996).

Il semble que pour certaines raisons, la prévision des crues et la prédétermination soient devenues nécessaires. Par conséquent, nous avons trouvé plusieurs façons de traiter ce problème dans la littérature, dont certaines sont anciennes, d'autres réadaptées, voire nouvelles.

Nous avons étudié et appliqué certaines méthodes d'estimation des crues : la méthode Gradex, méthode rationnelle et autres pour trouver un débit de projet, ce débit du projet est basé sur les données hydrologiques, les caractéristiques du bassin, mais dépend aussi fortement de la méthode de calcul utilisée.

1 LES VARIATIONS TEMPORELLES DES DEBITS ANNUELS :

L'analyse de la variabilité interannuelle nécessite l'évaluation de plusieurs paramètres tels que les changements de module et les caractéristiques d'amplitude, d'intensité et de valeurs extrêmes de ces changements.

L'objectif primordial est de découvrir la variabilité de débit qui dépend en grande partie des précipitations. A cet égard, les modules des débits annuels permettent d'identifier les évolutions internes des chroniques 1988-2011 de la station Bab Echhoub située à la sortie du BV.

1.1. Module annuel :

Le module annuel (le débit brut moyen annuel) est la moyenne des débits bruts journaliers de l'année ou la moyenne du débit moyen sur 12 mois, également appelée abondance moyenne annuelle, (Remenieras , 1976). Cette variable représente des volumes (en m^3/s) qui transitent annuellement dans les cours d'eau. Elle est donc le témoin, par excellence, de toutes les variations en matière de ressources en eau disponibles.

La figure 3.1 fait apparaître une irrégularité interannuelle. Sur un échantillon de 23 ans (1988/1989 - 2010/2011), la moyenne de la période d'étude est de $2.53 \text{ m}^3/\text{s}$.

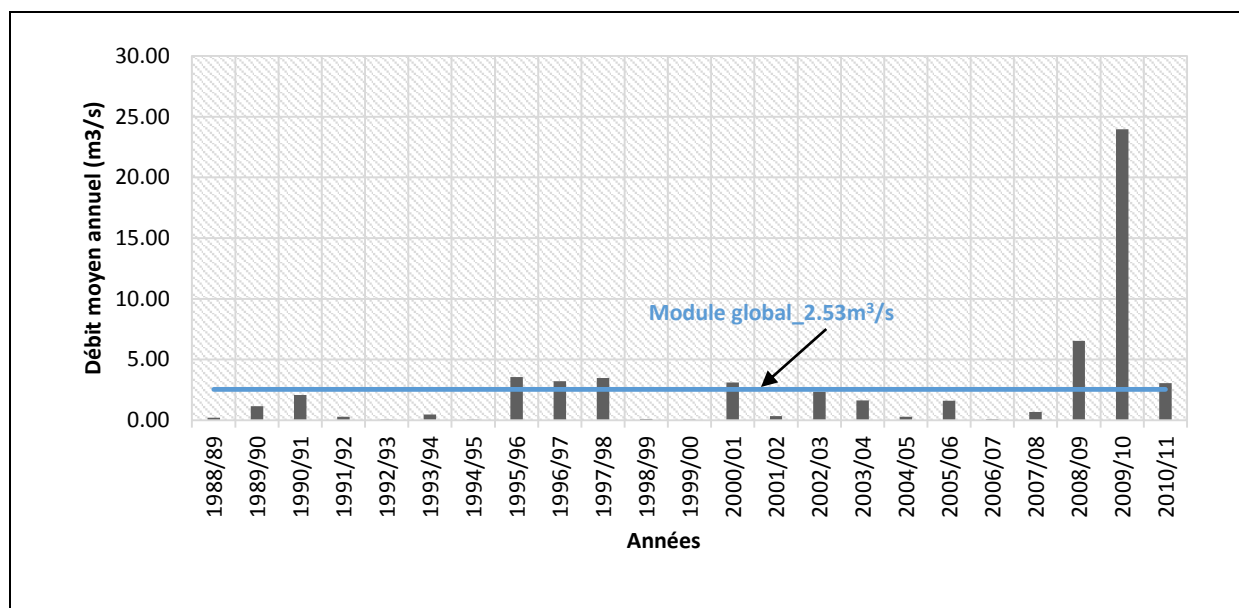


Fig.3. 1 - Variabilité interannuelle des débits moyens annuels de l'Oued Lahdar (station de Bab Echhoub).

La variation interannuelle du débit annuel de l'Oued Lahdar est très importante, (Fig. 3.1). En effet, le graphique montre une succession des années humides (débits supérieurs à la moyenne de série hydrologiques) d'autres sèches (Q inférieurs au module global). Quant aux années extrêmement humides, elles correspondent aux années hydrologiques 2009-10, avec un débit de $23.97 \text{ m}^3/\text{s}$. Et quand 'aux années extrêmement sèches, on peut citer les années 1992/1993, 1999/2000, 2006/2007, et l'année de 2001/2002, pendant lesquelles le débit moyen annuel n'atteint pas la valeur $1 \text{ m}^3/\text{s}$, il est resté toujours en-dessous de ce seuil. Outre ces années, il y a d'autres années où les débits étaient proches de la moyenne globale de la série hydrologique, dites années normales, ici on peut citer l'année 2002/2003 ($2.33 \text{ m}^3/\text{s}$). On remarque aussi que dès le 1988/1989 jusqu'au 2008/2009 les débits n'ont dépassé pas le seuil de $4 \text{ m}^3/\text{s}$, et pendant toute cette longue durée (23ans) le débit a enregistré des oscillations dans les valeurs parfois il baisse et tantôt il s'élève.

De plus, le rapport irrégulier du débit, c'est-à-dire le rapport du débit le plus fort au débit annuel le plus faible, détermine l'énorme différence entre le maximum et le minimum, et exprime des phases d'humidité et d'autres de sécheresse. Ce rapport sur le bassin versant de l'Oued Lahdar indique que le bassin versant est affecté par des irrégularités hydrologiques annuelles extrêmes, qui reflètent le changement climatique dans le bassin versant.

1.2. Méthodologie des Ecart (EC) des débits moyens annuels au débit moyen interannuel :

Une analyse hydrologique par le coefficient EC (écart à la moyenne), sert à regrouper les phases hydrologiques de l'O. Lahdar en deux familles :

-les phases excédentaires dont les valeurs des débits annuels sont supérieures à la moyenne et l'écart à la moyenne est positif ($EC > 0$), et pendant lesquelles il y a une abondance hydrologique.

-les phases déficitaires dont les valeurs des débits sont inférieures à la moyenne, et l'écart à la moyenne est négatif ($EC < 0$), et lors ces phases elle apparaît une indigence hydrologique.

Pour mettre en évidence les fluctuations hydroclimatiques qui ont affecté le bassin versant de Lahdar, la méthodologie des écarts (Ec) des débits moyens annuels (Q_{ma}) au débit moyen interannuel (Q_{mi}) semble adéquate, puisqu'elle est utilisée avec succès par plusieurs auteurs : Probst et Tardy (1987) sur les fleuves mondiaux, Etchanchu (1988) sur la Garonne, Haida et al (2000) sur le Sebou, Sibari et al (2002) sur l'Inaouène.

Cette méthode permet de distinguer les périodes humides ou excédentaires ($Ec > 0$), des périodes sèches ou déficitaires ($Ec < 0$), la formule utilisée est :

$$x = \frac{(Q_{ma} - Q_{mi})}{Q_{mi}} * 100$$

Avec : Q_{ma} : débits moyens annuels,

Q_{mi} : débit moyen interannuel

Les résultats obtenus (Fig. 3.2), révèlent une alternance des séries de période excédentaire et de période déficitaire au niveau de station Bab Echhoub. Selon Haida et al (2000), l'alternance de ces périodes est expliquée par les fluctuations climatiques qui permettent de recharger les réservoirs hydrologiques en périodes humides par contre ils seront vidangés en périodes sèches.

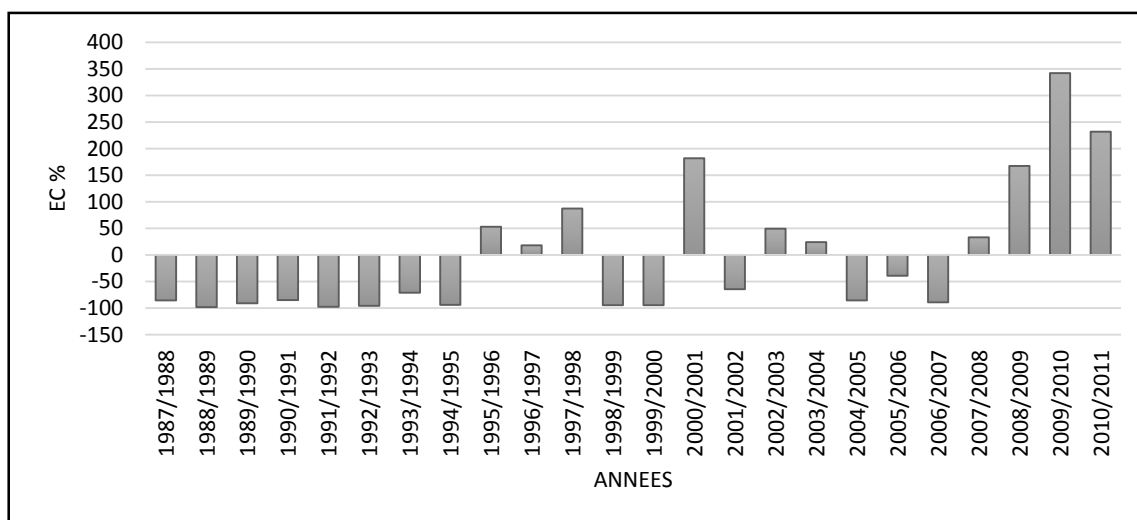


Fig.3. 2 - Variations des écarts des débits moyens annuels au débit moyen interannuel dans la station de Bab Echhoub (Période 1987/1988-2010/2011).

L'application de la méthode des écarts (EC) sur le bassin de l'Oued Lahdar révélée une succession de périodes excédentaires et déficitaires. Le nombre des années déficitaires est égal à 14, tandis qu'il n'atteint que 10 années pour les périodes d'excédent, et ce dû au caractère climatique du bassin (Climat semi-aride).

D'une manière générale, le bassin a connu pendant longtemps une pénurie hydrologique quasi-stationnaire. Cette période a duré de 1988/1989 à 2006/2007, et pendant laquelle il ne s'est paru que quelques nombres limités d'années d'excédent (5ans). Cette pauvreté hydrologique a été remplacée par l'abondance hydrologique, notamment en 2008/2009 et 2010/2011.

1.3. Coefficient d'hydraulicité :

Ce coefficient se définit comme étant le rapport du débit moyen d'une année au module global de la série d'observation. Il exprime la variabilité interannuelle des débits. Pour un coefficient $CH > 1$, il atteste d'une année humide, à écoulement important, et pour un $CH < 1$ l'année serait sèche à faible écoulement.

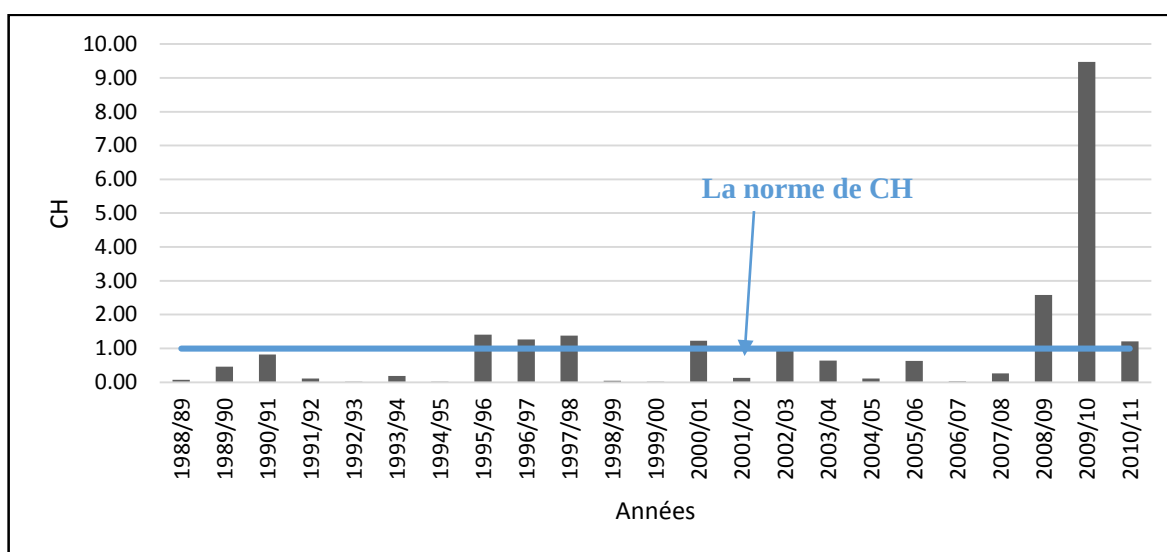


Fig.3. 3 - Variabilité interannuelle des coefficients d'hydraulicité de l'Oued Lahdar (station de Bab Echhoub).

Comme on peut le voir sur ce graphe (Fig. 3.3), le bassin connaît parfois des périodes de faible écoulement plutôt que de fort écoulement. Le nombre des années pendant lesquelles était supérieur à 1 égal à 15, tandis que 14 années ont enregistré un $CH < 1$. Les années qui ont connu un fort coefficient d'hydraulicité ce sont du 2009-10 ($CH = 9.5$) et l'année de 2008-09 avec un CH égal à 2,58. Au contraire, les années qui ont eu un très faible CH , ce sont celle de 1999-00 (0,02) et de 1998-99(0,04). La différence entre les extrêmes coefficients d'hydraulicité équivaut à 9,45, tout ceci traduit la forte variabilité interannuelle des débits de l'Oued Lahdar au niveau de la station de Bab Echhoub.

1.4. Coefficient d'écoulement :

L'estimation de la capacité d'un bassin versant à ruisseler peut se faire à travers le calcul d'un indice, très souvent utilisé en hydrologie de surface : le coefficient de ruissellement (Cr), considéré habituellement comme le rapport entre la « pluie nette », c'est-à-dire le débit ruisselant en sortie de la surface considérée et la « pluie brute ». Mais la notion de coefficient de ruissellement reste néanmoins d'emploi assez délicate ; car, il est loin d'être constant ; il varie, pour un même site, avec la nature, le volume et l'intensité de la pluie, ainsi qu'avec les divers types de surfaces (Pratt et al. 1984 ; Schaake et al. 1967).

Parmi les formules approximatives citées par Chocat et al. (1982), et qui peuvent conduire à des écarts importants par rapport aux valeurs observées, on peut mentionner :

- Relation de Schaake, Geyer et Knapp (1967) :

$$Cr = 0.14 + 0.65IMP + 0.05I$$

(Relation a été établie pour $IMP > 0.08$, I compris entre 0.5 et 6%)

Avec : IMP : la fraction de surface imperméabilisée

I : la pente en %.

- Relation Sogreah (Normand, 1976) :

$$Cr = 0.10 + 0.65IMP + 0.015I$$

(Relation avec le même domaine de validité que la précédente)

La détermination précise de la valeur de Cr et de ses variations reste donc difficile (Copertino et Molino, 1990) et passe par des mesures sur site. En effet on adopte la méthode la plus simple pour l'estimation du Cr, qui consiste à utiliser le rapport de la lame d'eau écoulée (H) sur la lame précipitée(P).

$$C = \frac{H}{P}$$

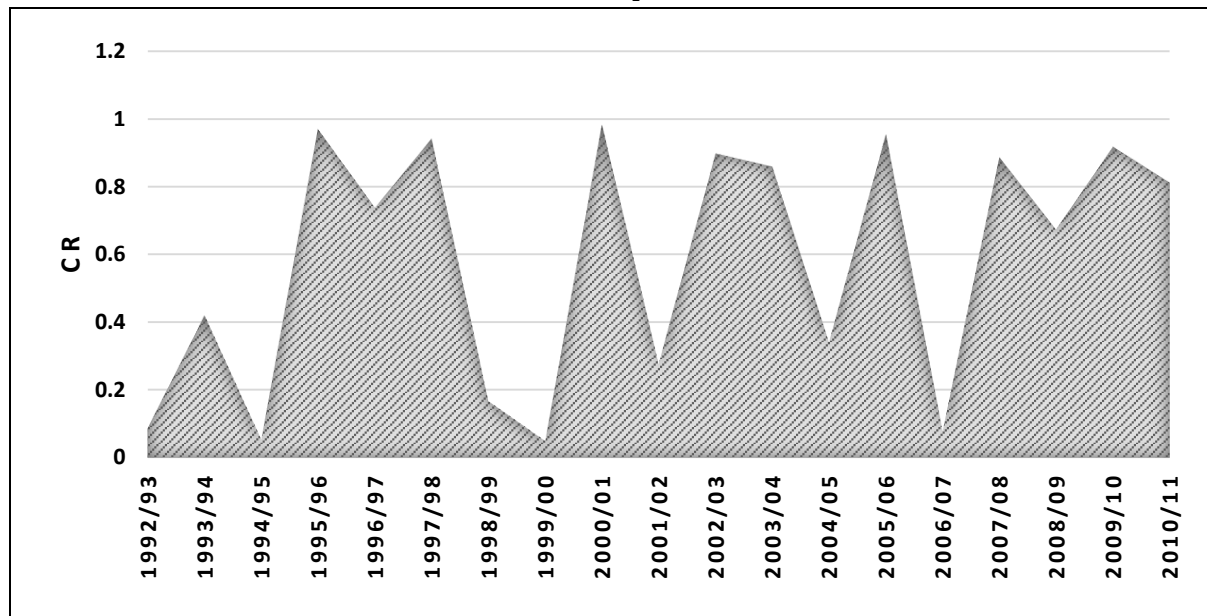


Fig.3. 4 - Coefficient annuelle des débits à l'O. Lahdar à Bab Echhouh.

Le coefficient d'écoulement est le rapport entre la lame d'eau écoulée et les pluies contemporaines. Il constitue le troisième terme du bilan hydrologique après les pluies et le déficit. Il s'exprime en pourcentages de tranche d'eau précipitée qui ruisselle jusqu'à l'exutoire du bassin versant. Il dépend de plusieurs facteurs :

- ✓ La pluie qui intervient par son intensité, sa répartition, et sa durée.
- ✓ Les caractéristiques physiques du bassin versant :
 - Sa superficie,
 - Sa forme,
 - La nature géologique,
 - La perméabilité de son substratum,
 - Le degré de pente.

- ✓ La température qui régit l'évaporation.
- ✓ L'état d'humidité des sols et le niveau d'eau dans les réserves souterraines au moment de la pluie.

Le calcul du coefficient d'écoulement pour la série d'années qu'on a confirmé les résultats précédant de la contribution de la composante de fonte de neige qui est pour ce bassin très négligeable puisqu'on a aucune année dont le coefficient dépasse le 100 %.

2- VARIABILITE SAISONNIERE DES DEBITS :

L'étude de la distribution saisonnière du débit permet de comprendre les saisons de reconstitution des ressources en eau et de leur épuisement. Les saisons que nous choisissons sont les saisons normales dites cosmiques. Ces saisons dans les régions méditerranéennes, comme le nord du Maroc, semblent correspondre aux caractéristiques des saisons hydrologiques :

- Automne hydrologique : débute de septembre et finit à novembre, commence avec des pluies capables de humecter les sols mais non d'arrêter le ressuyage ; y le tarissement et l'étiage continuent.
- Hiver hydrologique : se prolonge du décembre au février. Il surgit avec la tendance à la saturation des sols, et dès lors toute pluie lance le processus de saturation-ressuyage et l'alternance crue-décru, l'intensité des crues est proportionnelle à l'efficacité des averses.
- Printemps hydrologique : commence dès le mois de mars et s'achève en mai. Il connaît un puissant développement de l'évapotranspiration. Les précipitations tendent à la baisse de l'efficacité des pluies donc des débits.
- Été hydrologique : début de juin et finit à août, est dominée par la sécheresse atmosphérique qui tend à dessécher les sols et entraîne le tarissement des nappes et étiage des cours d'eau, voire la mise à sec des ruz et ruisseaux.

Ces caractéristiques ne peuvent pas parfois apparaître dans les saisons du calendrier, du fait de changement continu de la nature des années pendant la succession. A partir de la Fig.3.5 nous avons 3 années hydrologiques à caractères différents, dont nous allons étudier la répartition saisonnière des débits et ses caractéristiques.

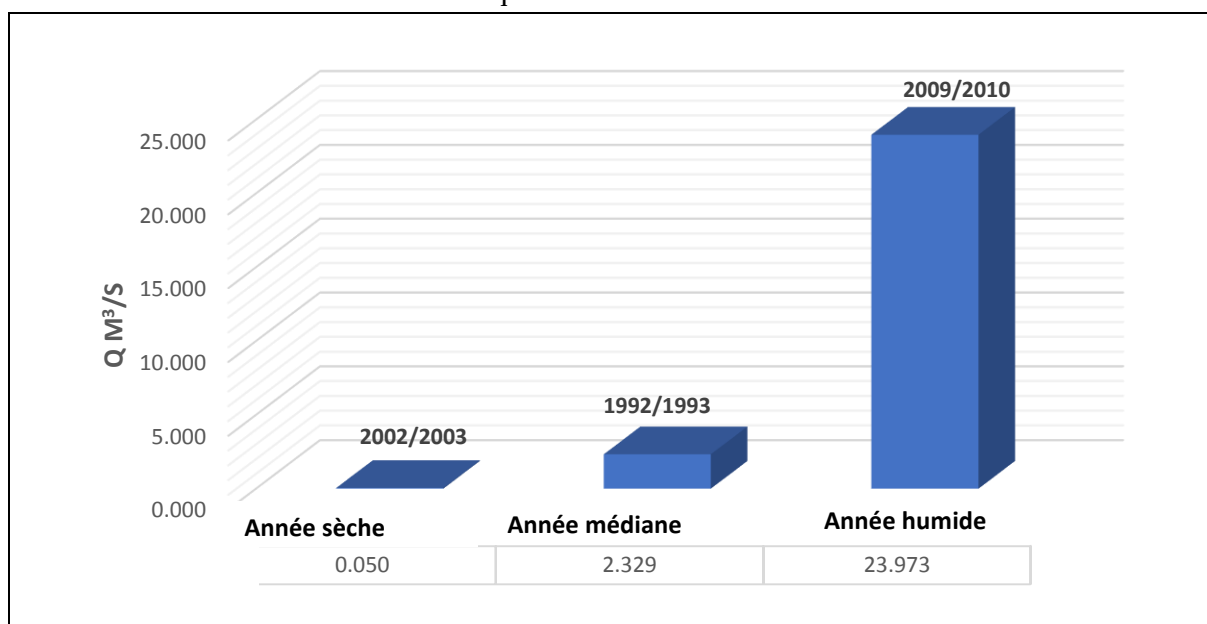


Fig.3. 5 - Années caractéristiques de l'O. Lahdar à Bab Echhoub.

Ces caractéristiques ne peuvent pas parfois apparaître dans les saisons du calendrier, du fait de changement continu de la nature des années pendant la succession. A partir des 3 années hydrologiques à caractères différents, nous allons étudier la répartition saisonnière des débits et ses caractéristiques :

- L'année 2009/2010 ; considérée humide et pendant laquelle les débits étaient importants et des crues ont été produites. Le module annuel de cette année a été estimé à $23,97 \text{ m}^3/\text{s}$, le coefficient d'hydraulicité a atteint à 9.47, et l'écart à la moyenne était positif.
- L'année 1992/1993 ; considérée sèche, durant laquelle de longs étiages étaient marqués, le débit moyen annuel de cette année égal à $0,04 \text{ m}^3/\text{s}$, l'écart à la moyenne de cette année est très négatif et égal à 0.02.
- L'année 2002/2003 ; qui se considère comme année médiane, le moyen annuel des débits de cette année égal à $2,33 \text{ m}^3/\text{s}$. les valeurs des coefficients hydrologiques de cette année n'étaient pas très extrêmes.

Ces années seront retenues aussi pour l'analyse des autres variations des débits.

2.1 L'analyse du régime saisonnier de l'année humide (2009/2010) :

Du point de vue de l'indice de précipitation standardisé (ISP), cette année est considérée comme une année extrêmement humide, la pluviosité a été estimée à 1142mm (station de Bab Echhoub) (Fig. 3.6) avec des variations d'un mois à autre, la plus importante est celle comprise entre le printemps et l'été. Le rapport débit printanier/débit estival (P/E) est une bonne représentation des irrégularités temporelles du débit de ces deux saisons, et par suite il reflète la rapidité de changement des valeurs lors de passage du printemps à l'été. Tandis que tel ce rapport mais entre les débits printaniers et les débits hivernaux (P/H) n'atteint que 0,20.

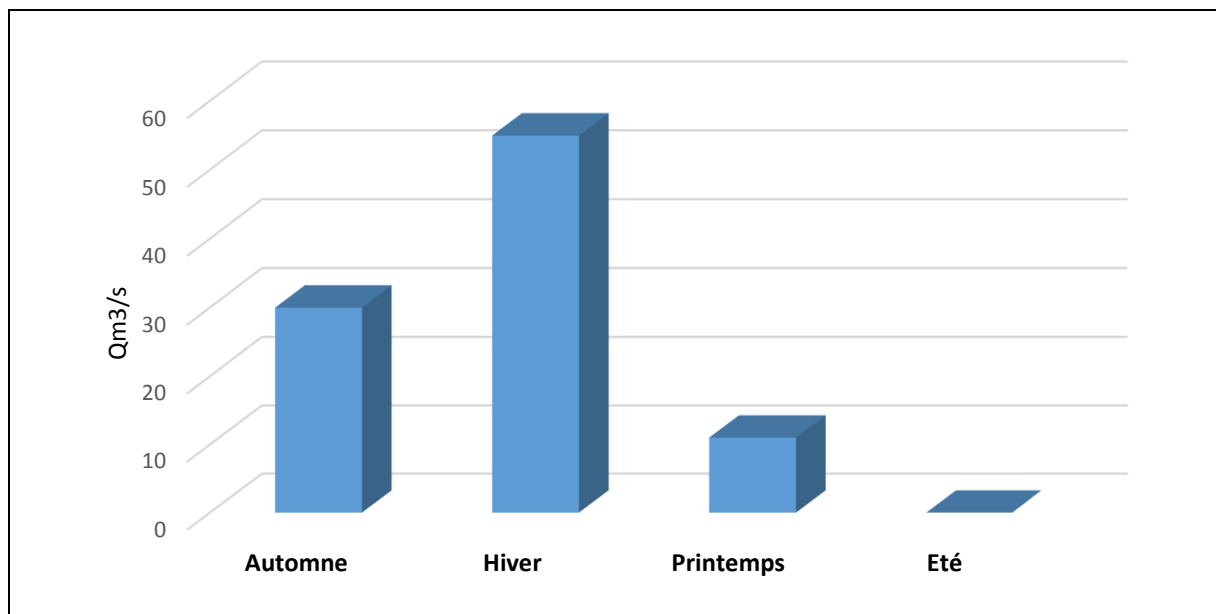


Fig.3. 6 - Régime saisonnier de l'année humide (2009/2010) de l'O. Lahdar à Bab Echhoub.

D'une manière générale, on peut déduire deux périodes aux caractéristiques hydrologiques différentes :

- première période ; incluant le printemps et l'hiver, l'abondance moyenne annuelle est relativement élevée, dépassant les $10\text{m}^3/\text{s}$.
- deuxième période ; comprend la saison automnale et estivale, l'indigence hydrologique est très extrême.

2.2 L'analyse du régime saisonnier d'une année sèche (1999/2000) :

Le coefficient de l'hydraulicité et de l'écart à la moyenne nous montre que cette année est hydrologiquement sèche, ainsi que l'analyse fréquentielle des moyennes annuelles. Où l'abondance moyenne annuelle est estimée à $0,038\text{ m}^3/\text{s}$, la variation des débits d'une saison à autre est très faible, toutes les valeurs sont en-dessous de $1\text{m}^3/\text{s}$. on remarque aussi dans la figure 6 qu'en 3 saisons (été, automne, hiver)) le débit était nul, sauf le Automne qui a marqué une moyenne égale à $0.02\text{m}^3/\text{s}$ (Fig. 3.7).

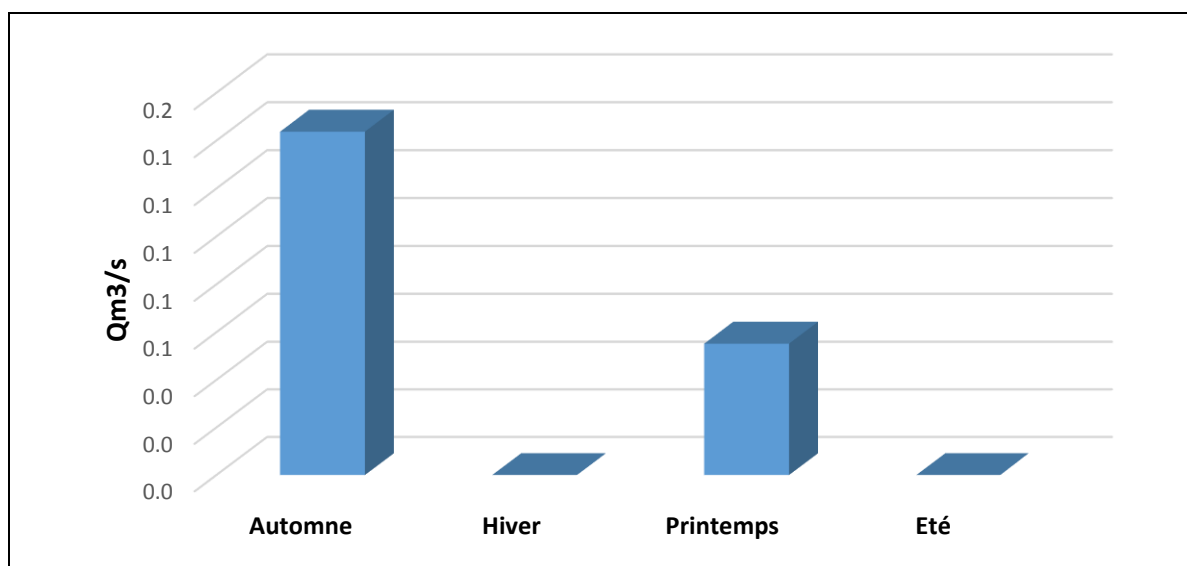


Fig.3. 7 - Régime saisonnier de l'année sèche (1999/2000) de l'O. Lahdar à Bab Echhoub.

2.3 L'analyse du régime saisonnier d'une année médiane (2002/2003) :

La variabilité des débits suivant les saisons d'une année médiane est faible par rapport à l'année humide et sèche. A partir dans la Fig. 3.8, les débits au niveau de 3 saisons sont presque semblable, le débit à l'automne égal à $2.96\text{ m}^3/\text{s}$, à l'hiver $4,53\text{ m}^3/\text{s}$ et en printemps $1,8\text{ m}^3/\text{s}$, tandis que l'été ne dépasse pas la valeur de $0,02\text{ m}^3/\text{s}$ que l'on peut considérer comme période d'étiage absolu.

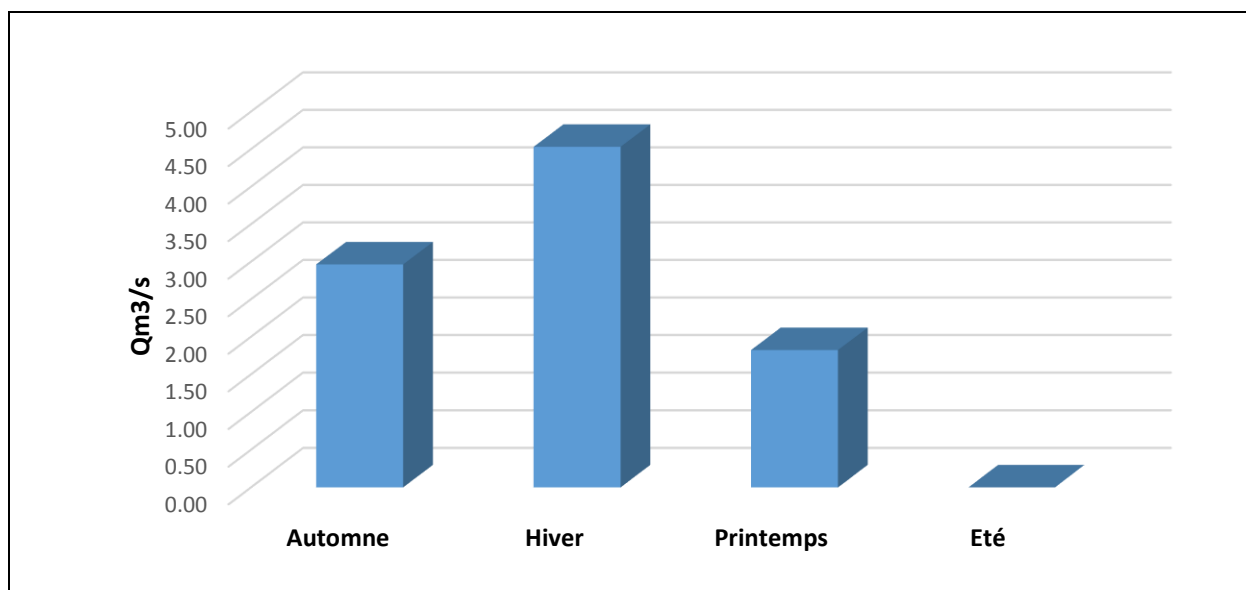


Fig.3. 8 - Régime saisonnier de l'année médiane (2002/2003) de l'O. Lahdar à Bab Echhoub.

3 LA VARIABILITE INTERANNUELLE DES DEBITS SAISONNIERS :

En ce qui concerne la variabilité interannuelle globale des débits saisonniers, on observe (Fig. 3.9) que l'été se caractérise par des fluctuations interannuelles beaucoup très faibles, tandis qu'elles sont fortes pour le printemps et l'hiver. Le coefficient de variation et l'amplitude entre les extrêmes valeurs confirment qu'il y a deux périodes pendant l'année qui diffèrent l'une de l'autre, la première englobe les deux saisons l'Hiver et l'Eté, durant laquelle le coefficient de variation et l'écart-type ainsi que l'amplitude des extrêmes sont très importants, alors que dans la deuxième, ces paramètres deviennent faibles. Cette irrégularité saisonnière est la conséquence d'une forte variabilité climatique qui lui-même due aux mécanismes de la circulation atmosphérique.

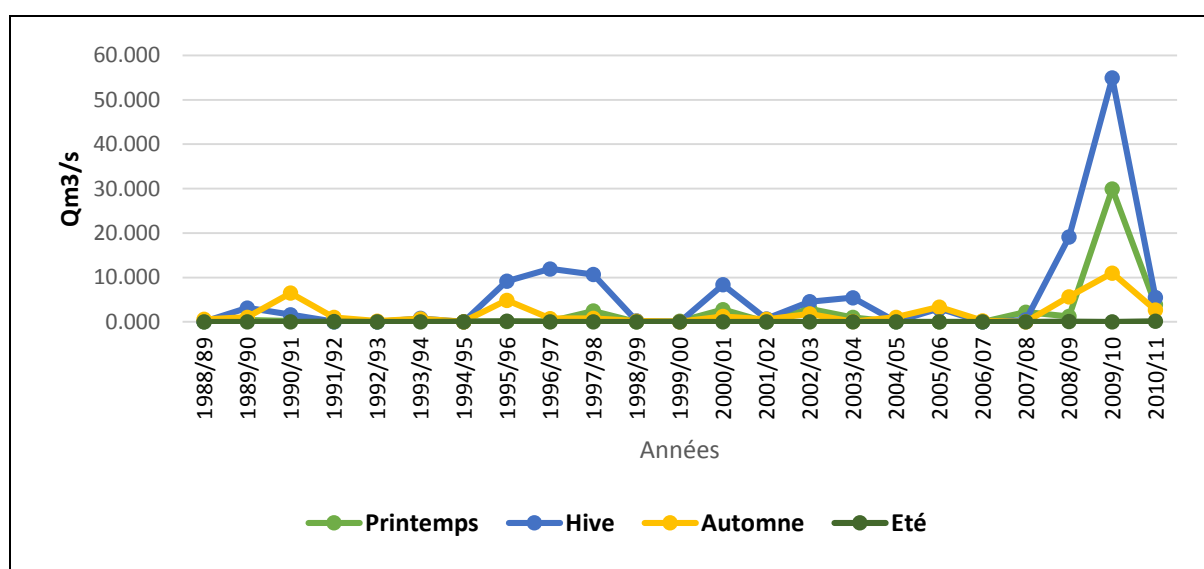


Fig.3. 9 - Variabilité interannuelle des Débits saisonniers de l'O. Lahdar à Bab Echhoub.

4 VARIABILITE MENSUELLE DES DEBITS :

On calcule les débits mensuels en faisant la moyenne des débits journaliers de chaque mois. Ces débits caractérisent bien l'évolution en volume d'un mois à autre et donc ils qualifient le rythme mensuel du régime hydrologique. Une analyse des débits mensuels de l'O. Lahdar d'après leurs fréquences calculées sur 23 années, donne une meilleure comparaison entre les différents mois et entre le même mois selon les fréquences considérées. Le graphique ci-dessous (Fig. 3.10) montre qu'à toutes les fréquences, les débits des mois de décembre, janvier, février, et mars sont toujours les plus élevés avec un net maximum en février. Aux fréquences 90% et 75%, l'irrégularité entre les débits mensuels est très forte, tandis qu'elle est faible aux autres fréquences.

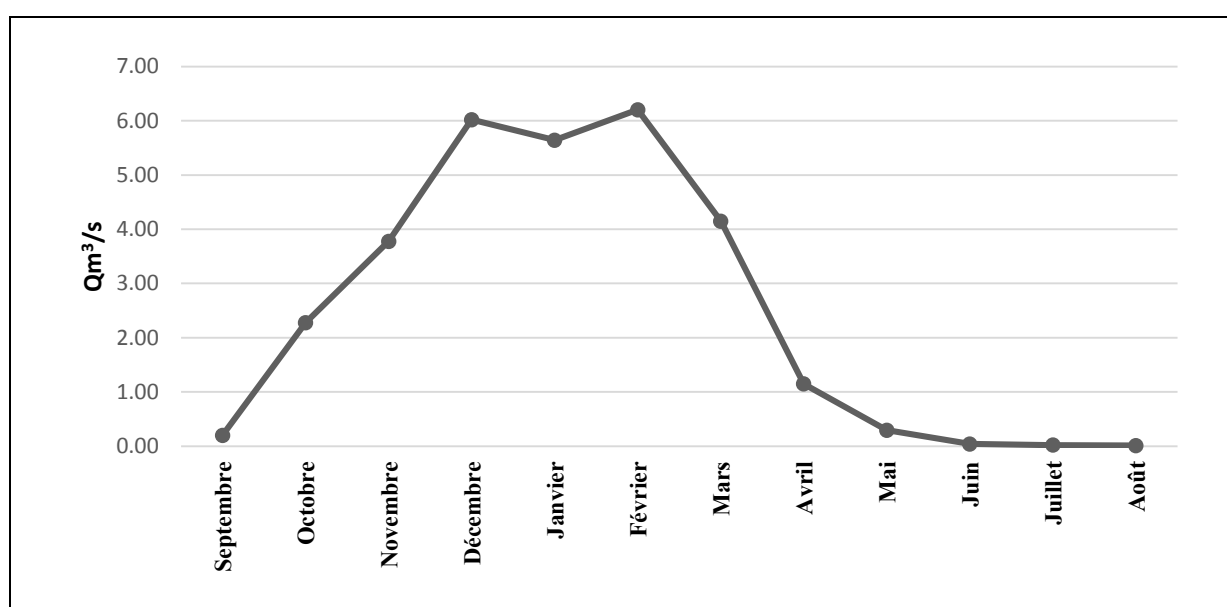


Fig.3. 10 - Débits mensuels de l'O. Lahdar à Bab Echhouh (1988/1989-2010/2011).

4.1 La variabilité interannuelle des débits mensuels :

La figure 3.11 montre quant à la variabilité interannuelles des débits mensuels de l'Oued Lahdar est importante. Tantôt il passe des années très humides, durant lesquelles les débits mensuels deviennent importants, le cas des années 1990/1991, 1995/1996, 1997/1998, 2000/2001 et 2009/2010 ; alors que lors des années sèches, les débits deviennent très faibles, le cas de la période qui a été prolongée de 2002 à 2008 et aussi la période de 1992 à 1994. Ce que nous constatons c'est que cette variabilité se caractérise par une cyclicité des périodes de hautes eaux et d'autres de basses eaux, attestant un climat irrégulier.

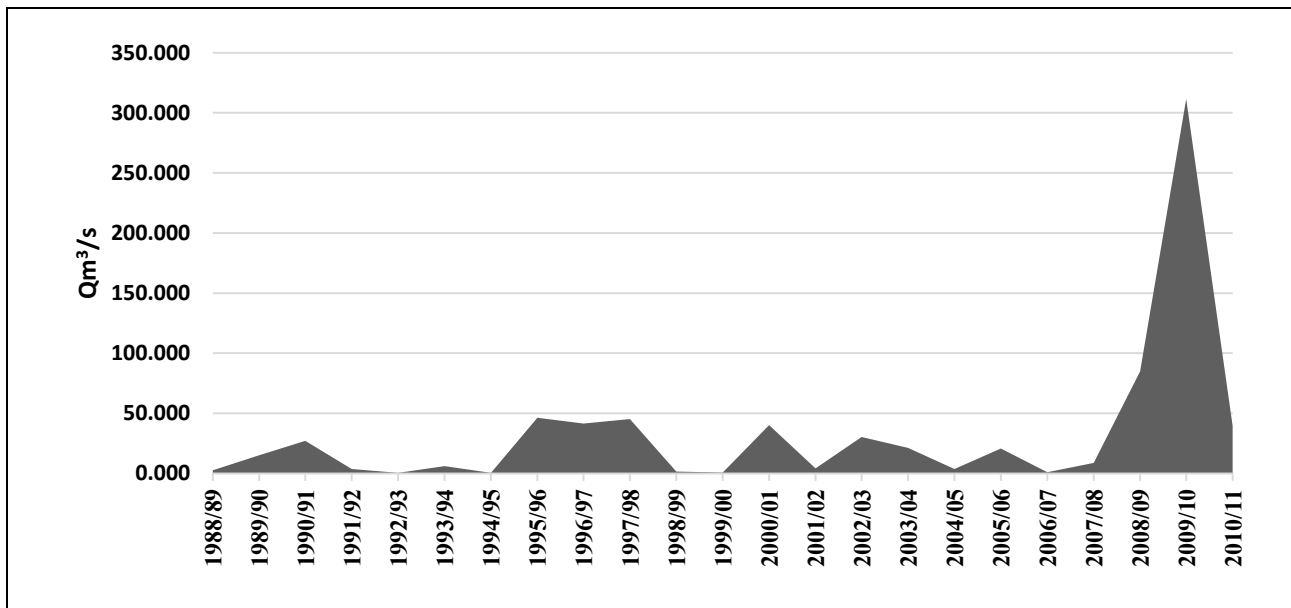


Fig.3. 11 - Variations interannuelles des débits mensuels de l'Oued. Lahdar.

5 VARIATION NATURELLE DES DEBITS JOURNALIERS :

L'analyse des débits journaliers de l'Oued Lahdar permet de caractériser le rythme de croissance et de décroissance des débits pendant les jours de l'année, et de déterminer les débits caractéristiques de l'année, et aussi de mettre des relations entre les débits et la pluviométrie, afin de déterminer le rôle de celle-ci dans cette évolution. Ces paramètres varient d'une année à une autre, pour cela nous allons effectuer l'analyse sur les trois années caractéristiques (année humide, année sèche, année médiane) qui ont déjà été choisies dans l'analyse saisonnière.

L'étude du régime fluvial, à l'échelle journalière, mérite une analyse, car les oueds subissent des variations journalières quantitatives et spatiales importantes. Nous possédons une chronique des débits journaliers instantanés s'étalant de 1987/1988 à 2010/2011.

Dans le but d'une analyse précieuse des débits journaliers moyens dans les dites stations, nous avons ciblé les débits journaliers instantanés des années considérées comme caractéristiques (humide, moyenne et sèche). Ces débits journaliers ont été traités avant de les représenter dans les Fig. 3.12, 13 et 3.14.

L'analyse des résultats montrent des fluctuations spatiales entre les deux stations, ainsi que temporelles au sein de la même station. Ces variations temporelles des débits journaliers évoluent selon une fréquence propre à chaque type d'année et à chaque mois.

5.1 Année humide (2009/2010) :

Rappelons que cette année a été caractérisée par une abondance moyenne annuelle égale à $23.97 \text{ m}^3/\text{s}$ correspondant à un volume total annuel d'eau de $287.67 \text{ m}^3/\text{s}$. Le coefficient de l'hydraulicité est de 9.47, et l'écart à la moyenne est positif (170%), et le cumul annuel de précipitation lui-même était important (1147mm), il porte ainsi toutes les manifestations d'une année humide.

Pour l'année humide (2009/2010), la courbe des débits journaliers (Fig. 3.12) fait ressortir deux périodes :

- Une saison à débit élevé qui s'étend de décembre à mars, avec un débit maximum de toute la chronique d'observation en février de 398 m³/s. Cette saison a débutée avec des débits moyens, arrivant à son apogée au mois de février pour revenir à la phase moyenne.
- La saison à faible débit recouvre plus de 50% de l'année, elle s'étale du mois de mai jusqu'au début de décembre. Le minimum est de 0 m³/s.

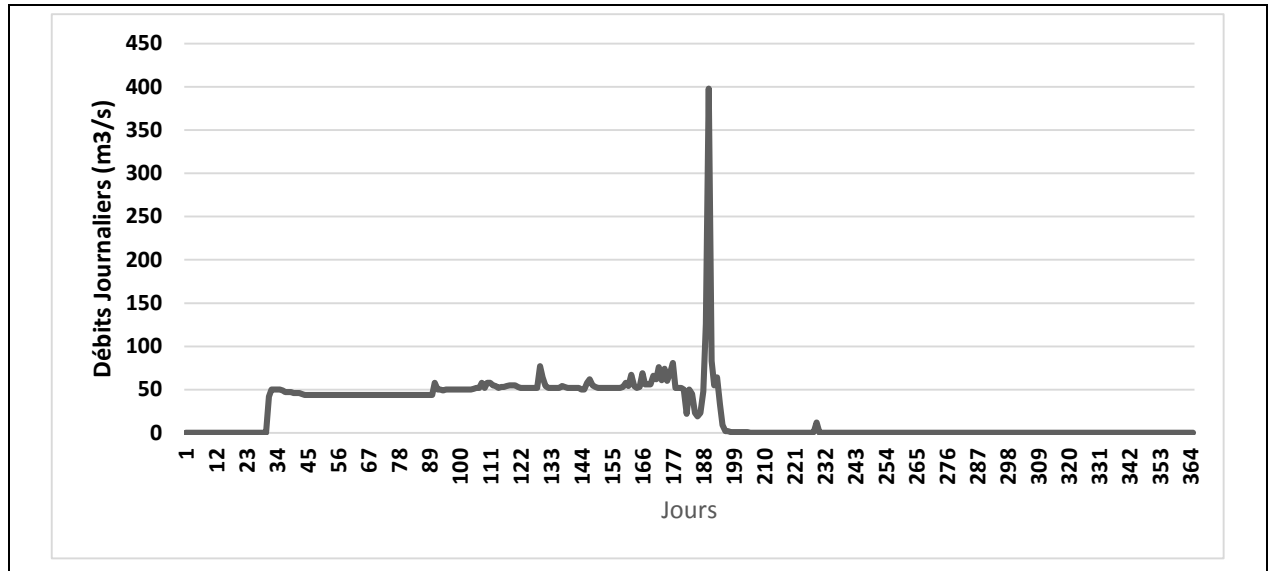


Fig.3. 12 - Répartition des débits journaliers de l'Oued Lahdar au cours de l'année humide (2009/2010).

Pour l'année humide (2009/2010), l'évolution de la courbe des débits journaliers (Fig.3.12) suit un régime saisonnier :

L'automne se caractérise par des crues très brutales et occasionnelles, marquées par une croissance et décroissance brusque des débits ; ce phénomène est provoqué par les précipitations torrentielles qui marquent cette saison. Une grande partie de la lame d'eau précipitée ruisselle, étant donné que le sol est complètement sec et étanche à cause d'une longue période estivale sèche.

L'hiver et le printemps sont caractérisés par des débits très importants. La remontée brusque des eaux et leur décroissance progressive s'expliquent par l'intensité des précipitations et la nature lithologique.

L'été correspond à une saison de tarissement, expliqué par la rareté d'alimentation des eaux par les précipitations, l'accentuation de l'évaporation, en plus de nombreux prélèvements anthropiques le long de l'Oued.

5.2 L'année sèche (1999/2000) :

Pour l'année sèche (1999/2000) dans un premier temps de l'Oued Lahdar est resté sec pendant le mois de septembre et octobre (Fig. 3.13), après une crue modeste qui a fait varier l'harmonie pour atteindre son maximum vers la fin du mois de novembre avec un débit maximal de 4 m³/s.

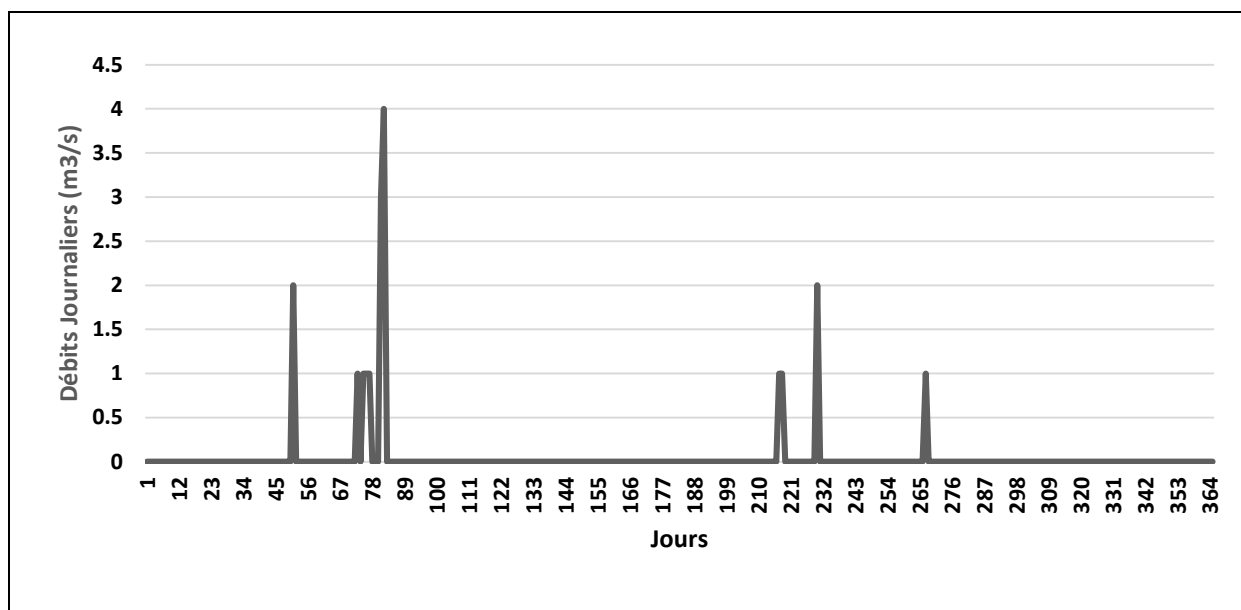


Fig.3. 13 - Répartition des débits journaliers de l'O. Lahdar au cours de l'année sèche (1999/2000).

Cette année est caractérisée par l'indigence hydrologique et pluviométrique. Le cumul annuel des précipitations est de 370 mm avec la saisonnalité de distribution, l'abondance moyenne annuelle est très faible et égal de $0,75 \text{ m}^3/\text{s}$, et le coefficient de l'hydraulicité égal à 0,02. Cette année se caractérise par la prédominance des basses eaux et des étiages qui se prolongent longtemps.

5.3 L'année moyenne (2002/2003) :

Pour l'année moyenne (Fig. 3.14), l'évolution des débits, montre une évolution distincte, cette année connut plus de 5 crues, par exemple la crue de 25/11/2002 où il est arrivé $122 \text{ m}^3/\text{s}$. L'automne est marqué par des crues plus importantes et répétées, avec un maximum des débits. L'hiver et le printemps, par contre sont marqués par des débits moyens ; l'été est toujours sec.

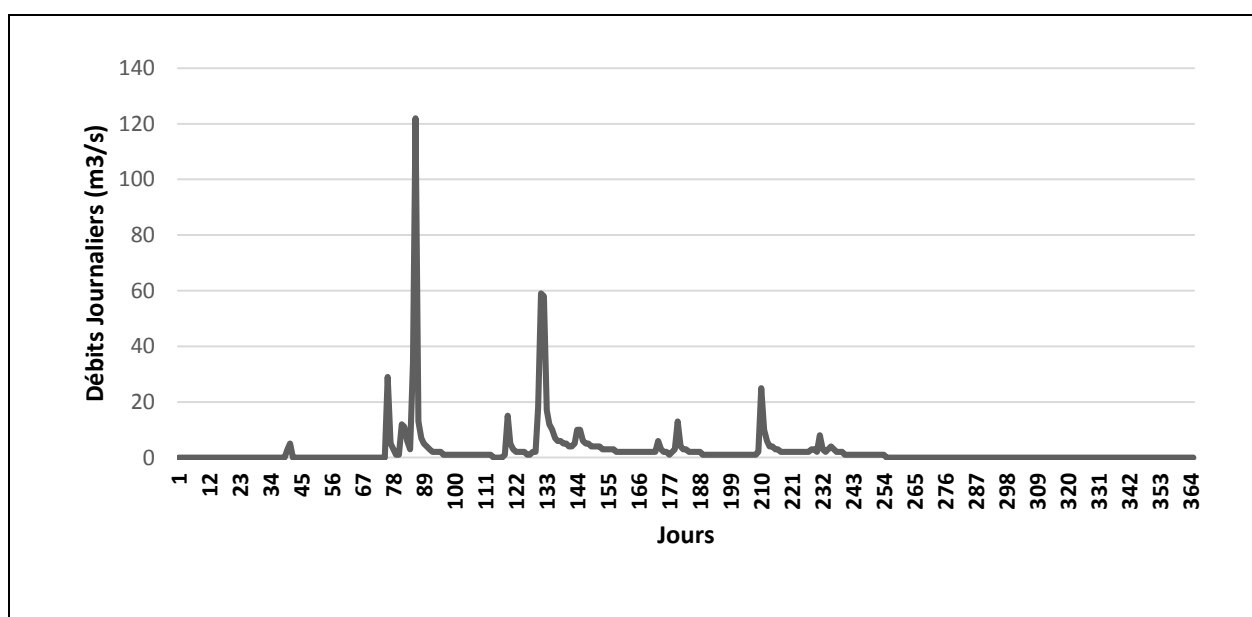


Fig.3. 14 - Répartition des débits journaliers de l'O. Lahdar au cours de l'année moyenne (2002/2003).

Pour l'année moyenne (2002/2003), on note deux périodes aussi, sauf que l'évolution chronologique des débits n'est pas la même que celle de l'année humide.

La saison pluvieuse est la plus longue, peut-être découper en quatre phases, dont chacune a débuté avec un débit maximum caractéristique, le plus important est enregistré à la fin de novembre 122 m³/s. Les crues ont les mêmes caractéristiques, toujours la remontée est brutale contre une décroissance progressive et qui sont rattachées aux mêmes facteurs déjà évoqués.

La saison sèche, quant à elle, est moins longue et n'a connu aucune crue remarquable.

6 ANALYSE FREQUENTIELLE DES DEBITS JOURNALIERS MAXIMAUX :

Cette méthode est basée sur l'analyse statistique des débits maxima relevés en calculant la probabilité pour qu'un débit supérieur à une valeur fixée survienne un nombre de fois donné pendant une durée donnée. Cette méthode est conditionnée par la vérification de certaines conditions à savoir l'homogénéité, l'indépendance et la stationnarité des événements, La variable aléatoire, dans cette analyse statistique ou fréquentielle, est donc le débit maximal de crue. Sa distribution est étudiée en l'ajustant sur une des lois théoriques de probabilité connu de façon à interpréter aussi fidèlement que possible l'observation disponible. Après avoir extraire les débits maximums annuels de la série des débits disponibles, nous devons s'assurer que cette série ainsi extraite, respecte certaines hypothèses de base, afin que l'analyse de fréquence soit théoriquement acceptable. Bien que parfois, les données ne représentent pas des lacunes de mesures, il est important de contrôler leur fiabilité, du fait que les mesures de débits disponibles peuvent être affectées par certaines erreurs de différentes origines.

Ces hypothèses concernent :

- L'homogénéité de l'échantillon, c'est-à-dire que toutes les observations proviennent de la même population statistique et que les caractères du phénomène étudié ne varient pas dans le temps en raison d'une intervention humaine ou des conditions particulières telle que la variation climatique est importante.
- L'indépendance des observations de l'échantillon, c'est-à-dire qu'aucun débit de la série n'est conditionné par les valeurs précédentes ou n'influence les débits suivants. Généralement les valeurs maximums annuelles de débit ne sont pas auto-corrélées, ce qui n'est pas le cas pour un échantillon de valeurs journalières ou hebdomadaires où chaque observation dépend des précédentes et elle est reliée aux observations suivantes.
- La stationnarité de la série, une série de donnée est dite stationnaire, si en dépit des fluctuations aléatoires dans les valeurs classées chronologiquement, on ne retrouve pas de valeurs significatives dans le temps. La stationnarité s'agit de vérifier l'indépendance temporelle des propriétés statistiques (moyen, variance, ...) de la loi qui régit le phénomène.

Donnés et méthode :

Les séries étudiées représentent les débits maximums annuels mesurés au niveau de la station de Bab Echhoub. Nous avons soumis ces données à une analyse fréquentielle moyennant le logiciel HYFRAN «Hydrology Frequency Analysis». Ce logiciel est conçu spatialement pour le traitement des données hydrologiques extrêmes. Il est un logiciel d'ajustement de loi statistique comprenant un ensemble d'outils mathématiques puissants, conviviaux et flexibles permettant en particulière

l'analyse statistique d'événement extrêmes et de manière plus générale l'analyse statistique de série de données (INRS-EAU, 1998). HYFRAN a été développé par l'équipe Pr. Bernard Bobée et son groupe de recherche à l'institut National de la recherche scientifique-Eau, Terre-Environnement de l'université du Québec avec le parrainage d'hydro-Québec (1992-2004). L'échantillon est soumis à un ajustement selon un ensemble de loi statistique et à partir d'une analyse comparative des résultats, nous choisissons la meilleure adéquation. L'ajustement statistique est fait grâce au logiciel HYFRAN ; ce dernier propose 14 lois d'ajustement statistique et détermine un modèle ou plus qui ajustent au mieux l'ensemble des données. Cependant l'analyse fréquentielle consiste en la recherche du modèle ou de la loi probabiliste qui ajuste le mieux les données de débits maximaux. Dans ce cas, il est souvent recommandé d'utiliser la loi Gumbel et la loi Normal, (Gumbel. E. J, (1958).). Notre travail a consisté en la recherche d'autres lois probabilistes qui peuvent mieux ajuster ces données et donc de donner de meilleurs résultats.

6.1 Ajustement à la loi de Gumbel (méthode du maximum de vraisemblance) :

La distribution statistique de Gumbel est une loi double exponentielle qui dépend de 2 paramètres : u (paramètre de position) et α (paramètre de distribution). Soient : X est une variable aléatoire appartenant à $]-\infty ; +\infty$ [et suivant une loi de Gumbel. La fonction de densité de probabilité $f(x)$:

$$F(x) = \exp\left[-\exp\left(-\frac{x-u}{\alpha}\right)\right]$$

La série des débits adoptés dans ce cas représente les quantités maximales des écoulements superficiels journaliers de l'Oued Lahdar au niveau de la station de Bab Echhoub allant 1987/1988 à 2010/2011. L'ajustement graphique de cette série est illustré dans le graphique suivant :

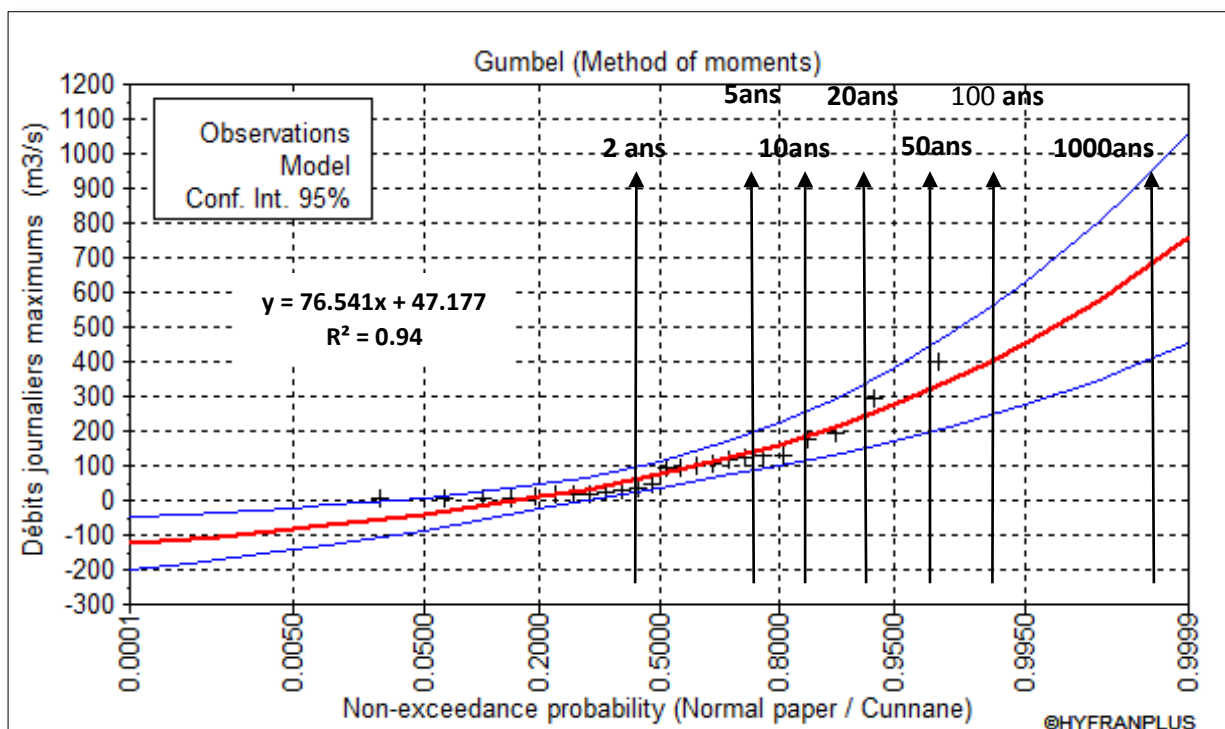


Fig.3. 15 - Ajustement des débits journaliers maximums d'Oued Lahdar par la loi de Gumbel.

Le graphique d'ajustement par la loi de Gumbel permet de tirer le Gradex qui correspond à la pente de la droite d'ajustement et d'identifier graphiquement les crues de projet, (Fig. 3.15). Ainsi

les résultats de l'ajustement graphique viennent compatibles avec les résultats de l'ajustement par la méthode du moment qui apparaissent dans le tableau suivant :

Tabl. 3. 1 - Débits journalière maximums de l'Oued Lahdar selon la différente période de retour.

	Gradex	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans	1000 ans
D.J.max (m ³ /s)	76.54	77.79	161.98	219.42	274.51	345.83	399.2	575.86

6.2 Ajustement à la loi de Gamma (méthode du maximum de vraisemblance) :

En théorie des probabilités et en statistiques, une distribution Gamma ou la loi Gamma est un type de loi de probabilité de variables aléatoires réelles positives, dont la distribution est paramétrée à l'aide d'un paramètre de forme α et un paramètre d'intensité λ . La fonction de densité de probabilité est exprimée par la formule suivante :

$$f(x) = \frac{\alpha^\lambda}{\Gamma(\lambda)} x^{\lambda-1} e^{-x}$$

Avec : $X > 0$ $\tau(\lambda)$:

Donc l'ajustement à la loi de Gamma est satisfaisant (Fig. 3.16).

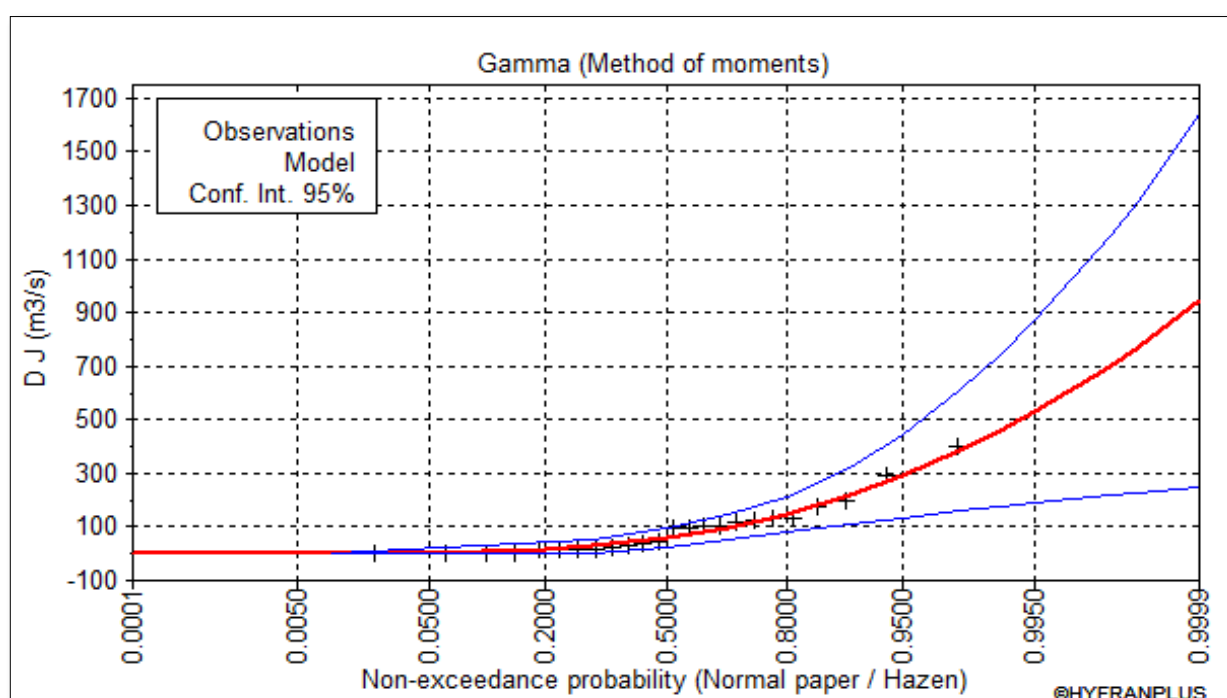


Fig.3. 16 - Ajustement graphique de la série des débits maxima à la loi de Gamma.

Nous pouvons remarquer une répartition de tous les points autour de la courbe, et constater la variabilité de l'échantillon de la période d'observation. Les années extrêmes de la chronique se positionnent dans les deux extrémités de la courbe, (Fig. 3-16). Pour les années humides, 1990/1991, 1995/1996, 1997/1998, 2000/2001 et 2009/2010 elles se trouvent au-dessus de la courbe ; alors que pour, les années sèches (2002 à 2008 et aussi la période de 1992 à 1994), elles sont situées en dessous de la droite.

Malgré la faible variabilité entre les durées de retour, sur les 23 années (1988/89-2010/11) qui composent l'échantillon, nous n'avons enregistré aucun débit de fréquences 1/1000. Ce qui atteste que les moyens des débits de Bab Echhoub restent quand même en dessous de la normale pour un climat réputé par des précipitations abondantes. Il est sûr que ces moyennes masquent une certaine vérité mensuelle. Bien que, ces résultats de débits fréquentiels sont ceux qui définissent les aménagements du cours d'eau.

7 CORRELATION PRECIPITATIONS/DEBITS, PRECIPITATIONS /COEFFICIENT D'ECOULEMENT ET PRECIPITATIONS /DEFICIT :

La corrélation a pour but de mettre en évidence et évaluer la liaison entre deux variables aléatoires. Pour notre cas, nous allons étudier la relation existante entre les débits et les précipitations à différentes échelles de temps.

7.1 Corrélation pluies –débits annuels :

La relation annuelle pluies / débits est déterminée par la méthode de corrélation. Cette méthode a été testée avec succès dans des domaines océanique par (Coutagne, 1948).

Après avoir étudié la répartition pluviométrique et la variation hydrométrique, il reste à établir la relation entre les débits et les pluies dans le bassin versant de l'Oued Lahdar. L'analyse de la relation annuelle est loin d'être explicative, mais elle donnera des informations générales. C'est à l'échelle mensuelle que cette relation est très significative, à travers le bilan hydrologique. Elle permet de quantifier la part des précipitations dont bénéficie l'écoulement mais également d'approcher l'ETR par le biais du déficit d'écoulement. Nous calculons ainsi, le quotient d'écoulement annuel Q/P et le déficit d'écoulement.

Cette corrélation nous renseignera sur le degré de liaison entre pluies et débits pour une période de temps de 23 ans. Cette liaison est représentée par un graphique où sont portés les débits annuels et les précipitations correspondantes, (Fig. 3.17).

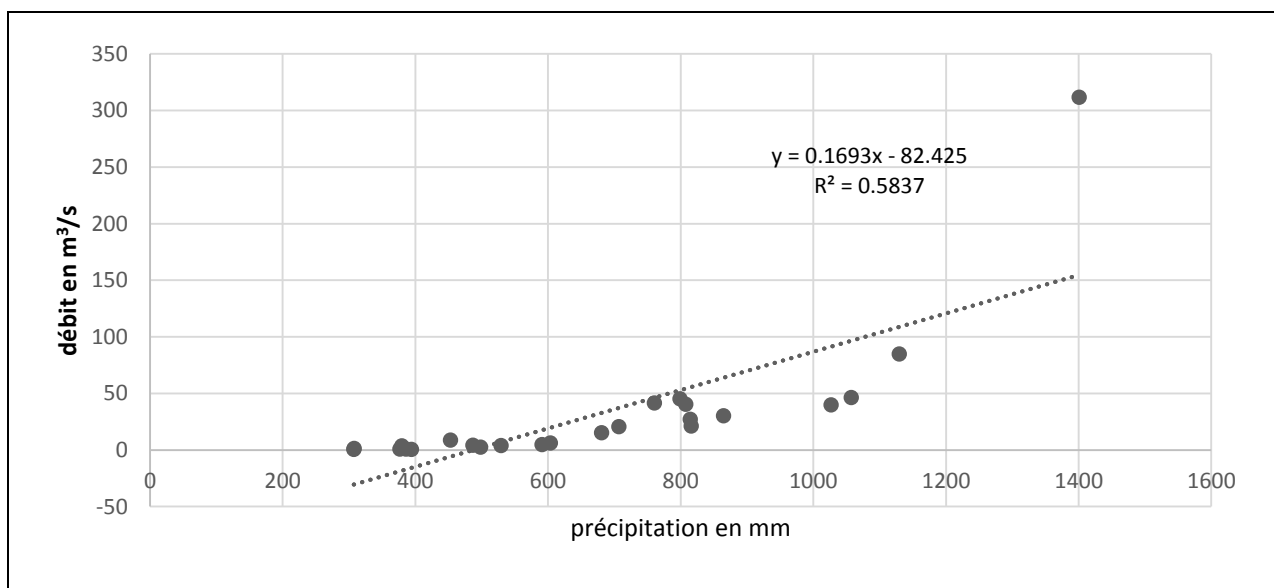


Fig.3. 17 - Corrélation précipitations – débits à la station Bab Echhoub.

D'après le graphe, le nuage de points prend une forme d'ellipse inclinée par rapport aux axes, ce qui permet de déduire que la relation entre les deux paramètres est linéaire, avec un coefficient de corrélation de l'ordre de 0.76, qui confirmera le résultat obtenu graphiquement. La valeur du coefficient de corrélation montre qu'il y a une étroite liaison entre les débits et les précipitations dans le BV de Lahdar. Ce qui permettant de déduire que le bassin reçoit des précipitations sous forme de pluie qui ne sont pas perturbées ni par une infiltration importante, ni par des évaporations, ni encore par les rétentions souterraines au cours de l'année hydrologique. En effet, le substratum du BV est constitué de formations tendres qui ne peuvent pas retenir l'eau pour une longue durée. A ceci s'ajoute la composante de neige qui étant très faibles et rare, elle ne perturbe pas les corrélations annuelles pluies/débits car les précipitations nivales d'hiver commencent à fondre dès le début du printemps.

7.2 Corrélation pluies/débits saisonniers :

A l'instar des échelles annuelles et mensuelles, les résultats des données saisonnières montrent qu'il y a toujours une étroite relation et liaison entre les débits et les précipitations (0.94) qui sont sous forme de pluies qui conditionnent les régimes hydrologiques (Fig. 3.18).

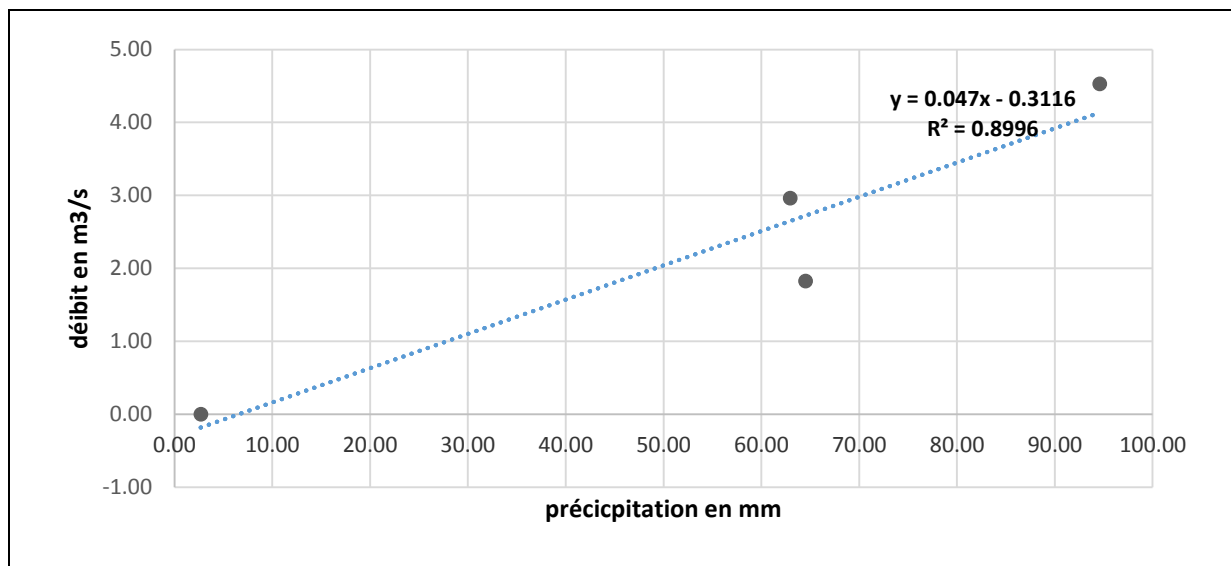


Fig.3. 18 - Corrélation précipitations – débits saisonniers à la station Bab Echhouh.

7.3 Corrélation pluies/ coefficient d'écoulement :

Le coefficient de ruissellement (Cr) est le rapport entre la hauteur d'eau ruisselée à la sortie d'une surface considérée (dite "pluie nette") et la hauteur d'eau précipitée (dite "pluie brute"), (Chocat, 1978). Mais la notion du coefficient de ruissellement reste néanmoins assez délicate d'emploi ; car, il est loin d'être constant, pour un même site, avec la nature, le volume et l'intensité de la pluie, ainsi qu'avec les divers types de surface (Pratt et al, 1984 ; Schaake et al, 1967). La détermination précise de la valeur de Cr et de ces variations reste donc difficile et passe par des mesures sur site. En effet, nous adoptons la méthode la plus simple pour déterminer le Cr , qui consiste à utiliser le rapport de la lame d'eau écoulée (H en mm) sur la lame précipitée (P en mm).

$$Cr = \frac{H}{P}$$

Il constitue le troisième terme du bilan hydrologique après les pluies et le déficit. Il s'exprime en pourcentages de tranche d'eau précipitée qui ruisselle jusqu'à l'exutoire du bassin versant. Il dépend de plusieurs facteurs :

- 1- La pluie qui intervient par son intensité, sa répartition et sa durée.
- 2- Les caractéristiques physiques du bassin versant :
 - sa superficie,
 - sa forme,
 - la nature géologique,
 - la perméabilité de son substratum,
 - le degré de pente.
- 3- La température qui régit l'évaporation.
- 4- L'état d'humidité des sols et le niveau d'eau dans les réserves souterraines au moment de la pluie.

Le calcul du coefficient d'écoulement pour la série d'années que nous avons confirmée les résultats précédents de la contribution de la composante de fonte de neige, qui est pour ce bassin très négligeable puisque nous n'avons aucune année dont le coefficient dépasse le 100 %.

Le graphe suivant montre le degré de liaison entre les pluies et les coefficients d'écoulement.

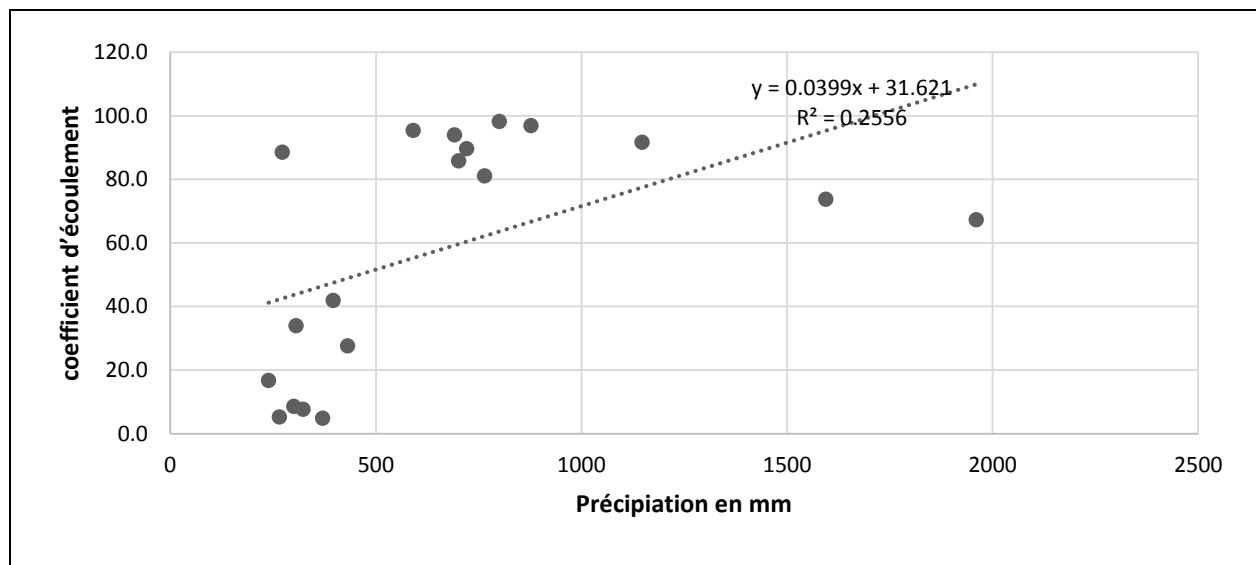


Fig.3. 19 - Corrélation pluies- coefficient d'écoulement à la station Bab Echhoub.

Ces résultats dégagent des tendances générales sur la relation H/P. Pour l'ensemble du bassin de l'Oued Lahdar, le coefficient de corrélation est de 0,5, ce qui permet de conclure que cette relation est inacceptable et donc que presque toutes les précipitations qui tombent dans le bassin ne sortent pas dans la même année. Le coefficient de corrélation qui est faible par rapport à la norme ($R^2 < 1$), il montre que la relation entre les précipitations et le coefficient d'écoulement n'est pas très, attestant que le coefficient d'écoulement ne dépend pas que des précipitations, mais d'autres facteurs, tel que :

- L'intensité des précipitations,
- Le déficit d'écoulement, qui dépend de la réduction de la lame d'eau écoulee peut être due à la présence des activités humaines qui exploite les eaux écoule.

8 LES DIFFERENTS TYPES DE MODELES ET LOI D'AJUSTEMENT :

L'estimation de débits passe par l'utilisation des modèles hydrologiques globaux permettant de simuler la transformation de la pluie en débit sur des bassins naturels, De nombreuses applications pratiques dans le domaine de la gestion des ressources en eau (notamment pour la prévision de débits, la gestion d'ouvrages de retenue, le dimensionnement d'ouvrages hydrauliques, etc.). Par conséquent, depuis plus d'un siècle, de nombreuses études se sont attachées à tenter de comprendre le processus d'écoulement de l'eau et la fonction des bassins versants. Entité hydrologique de production et de concentration des écoulements.

Il y a plusieurs types de modèles d'estimation qui peuvent simuler un débit à l'exutoire du bassin. Les principales méthodes utilisées pour l'estimation des crues de projet au Maroc. Deux grandes familles sont distinguées.

Les méthodes hydrométéorologiques : Ils sont basés sur des paramètres régionaux calculés sur la base des informations fournies par les précipitations. Deux méthodes les plus courantes au Maroc, La méthode du Gradex et la méthode rationnelle.

- **La méthode du Gradex :** Le GRADEX est une méthode qui permet d'estimer des débits de fréquence rare allant de 0.01% à 1%. Elle est développée par EDF (Electricité De France) depuis 1966, et est applicable aux bassins versants dont la superficie peut aller jusqu'à 5000 km² et le temps de concentration, de ruissellement ou d'écoulement est de 1 h à 4 jours, (Brochard, et al. 2008). Cette méthode suppose que le sol est saturé lorsque le débit dépasse une certaine valeur. Cette valeur est appelée débit seuil (ou point pivot), et peut varier d'un débit sur décennale à un débit sur cinquantennale, selon les caractéristiques du sol et du bassin versant. Ainsi, pendant le temps de base de ruissellement (assimilé à la durée caractéristique), tout accroissement de pluie induit le même accroissement en débit, (Guillot, et al. 1967).
- **la méthode rationnelle :** Cette méthode annonce le débit maximal en fonction de la superficie, de l'intensité des précipitations et du temps de concentration du bassin. Elle utilise les hypothèses suivantes :
 - ✓ L'intensité des précipitations est constante et est répandue dans tout le bassin
 - ✓ La durée de l'averse excède le temps de concentration

Les méthodes empiriques : Les méthodes empiriques ont été utilisées lorsqu'il y a peu ou pas de données disponibles sur le débit des crues dans une zone. Elles permettent d'estimer soit des débits maximums de crues soit des débits fréquentiels à partir de certaines caractéristiques du bassin versant en les complétant parfois par certaines données météorologiques en particulier la pluviométrie, (Gray, et al., 1972). Nous nous sommes intéressés à celles les plus utilisées au Maroc, (Serhir, 2010 ; Ouarda, et al, 2001), à savoir :

- ✓ formule de Myer
- ✓ Formule de Mallet-Gauthier
- ✓ Formule de Mac-Math
- ✓ Débits par Fuller 2

9 LES PARAMETRES ET DONNEES CLIMATIQUES DISPONIBLES :

Pour mener à bien cette étude, Nous sommes basés sur L'analyse fréquentielle des pluies journalières maximales, enregistrées dans les stations pluviométriques de Had Msila, Bab Echhoub. Et sur les courbes Intensité-Durée-Fréquence (IDF) de la station météorologique de la ville de Taza.

9.1 Pluies journalières maximales annuelles :

L'ajustement des séries des pluies journalières maximales annuelles à la loi qui les ajuste le mieux. Ce travail a été réalisé par la loi de Gumbel, Malheureusement, la taille d'échantillon est généralement trop petite pour estimer les moments d'ordre supérieur.

9.2 Courbes Intensité-Durée-Fréquence :

Le calcul des paramètres de Montana (liées à la méthode du Gradex.) se fait par l'application de la méthode des moindres carrés aux points expérimentaux définissant les courbes IDF pour chaque période de retour (Fig. 3.20). De même, les courbes IDF sont également utilisées dans l'application de méthode rationnelle.

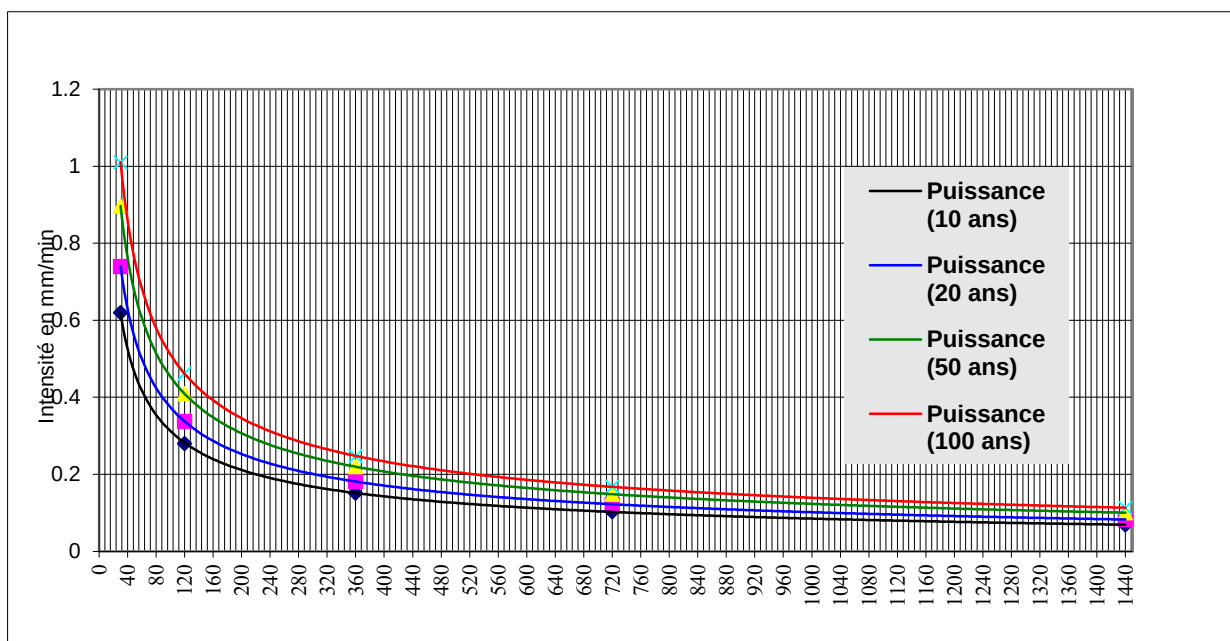


Fig.3. 20 - Courbes IDF pour la station de Taza.

9.3 Les paramètres de Montana relatifs à la station de Taza :

Le Service météorologique national a modélisé les précipitations réelles afin de pouvoir calculer l'intensité des précipitations. Le modèle Montana est considéré comme la formule la plus adaptée au cas marocain et permet d'obtenir une bonne prévision des débits de période de retour donnée.

Les paramètres a et b du modèle sont nécessaires pour les calculs à effectuer ultérieurement, et sont déterminés par l'analyse statistique d'une série de précipitations enregistrées des pluviographes. Les données suivantes montrent les valeurs des paramètres a et b par récurrence de la ville de Taza fournie par le service météorologique nationale :

Tabl. 3. 2 - Valeurs de a et b paramètres de Montana par récurrence de la ville de Taza.

T (ans)	a	b
10	4.285	- 0.558
20	5.096	-0.567
50	$a = 6.147$	-0.566
100	$a = 6.934$	$b = 0.566$

10 PRESENTATION ET APPLICATION DES METHODES ADOPTEE POUR LA PRODUCTION DES DONNEES :

10.1 Méthodes hydrométéorologiques :

Les méthodes Gradex et rationnelle sont des méthodes d'estimation des crues les plus utilisées au Maroc. Ils sont initialement utilisés pour déterminer la taille des ouvrages hydrauliques. Ces méthodes sont basées sur des paramètres régionaux calculés à partir des informations fournies par les précipitations.

10.1.1 Méthode de Gradex :

Le Gradex est une méthode simplifiée qui permet d'estimer les débits de crues extrêmes, elle est applicable aux bassins versants dont la superficie peut aller jusqu'à 5000 km² dont le temps de concentration, de ruissellement ou d'écoulement rapide est de 1 heure à 4 jours. (Brochard, et al., 2008).

Cette méthode est basée sur les informations fournies par la loi de probabilité des séries chronologiques de précipitations de haute valeur observées chaque année ($P_{\max-jour}$).

La méthode de Gradex est composée d'un ensemble d'étapes enchaînées qu'il faut suivre pour calculer les débits de pointe des différentes périodes de retour. Pour l'application nous avons effectué les étapes suivantes :

- Déterminer les Caractéristiques des sous-bassins versants ;
- Calcul du temps de concentration des sous-bassins versants ;
- Ajuster les pluies journalières maximales selon la loi de Gumbel et déterminer le P_{jmax} (T) de 2 à 1000 ans ;
- Détermination quotidienne du Gradex (G_p (24)). Compte tenu du glissement de la pluie, le passage de la valeur journalière à la valeur dans les 24 heures est réalisé en augmentant la valeur journalière de 15% ;
- Choix d'un hydrogramme unitaire.
- Calculez le Gradex des précipitations au temps de concentration G_p (T_c) sur la base des précipitations de Gradex en 24 heures.
- Utilisez la formule empirique de Caquot pour calculer le débit de pointe de référence Q_p ($T = 10$)
- Calcul des débits de pointe et des lames d'eau ruisselées pour chaque période de retour par la méthode du Gradex classique.

10.1.1.1 Caractéristiques des sous-bassins versants :

Le bassin versant intéressé dans cette recherche est délimité sur la carte topographique au 1: 25 000 de Had Msila, Meknassa El Gharbiya, Bni lente et Bab El Mrouj. Le tableau suivant présente les caractéristiques géométriques des sous bassins versants de l'Oued Lahdar.

Tabl. 3. 3 - Caractéristiques géométriques des sous-bassins versants de l'Oued Lahdar.

BV	Surface (km ²)	L du Talweg(m)	Hmax(m)	Hmin(m)	Dmax(m)	Périmètre (km)	Indice de forme	Pente (m/m)
Oued Lahdar (au niveau de Had Msila)	236.8	39310	1711	522	1189	92.5	1.70	3.02
Oued Lema (au niveau Bni Ftah)	43.03	6970	1433	720	713	31.24	1.34	10.23
Oued Rhnalla (au niveau de Had Msila)	22.52	11360	1340	528	812	22.48	1.34	7.15
Oued Dira (au niveau Bni Ftah)	14.38	9580	1443	766	677	19.18	1.43	7.07
Oued Bni Ftah	26.42	7530	1344	766	578	24.31	1.33	7.68
Oued Mized (au niveau Bni Ftah)	12.13	6920	1233	775	458	18.28	1.48	6.62
Oued Assamer (au niveau Bni Ftah)	13.43	5150	1344	775	569	16.37	1.26	11.05

10.1.1.2 Calcul du temps de concentration :

Le temps de concentration (T_c) des eaux sur un bassin versant se définit comme le maximum de durée nécessaire à une goutte d'eau pour parcourir le chemin hydrologique entre un point du bassin et l'exutoire de ce bassin, Pratiquement le temps de concentration peut être déduit de mesures sur le terrain ou estimé à l'aide de formules, le plus souvent empiriques (Musy. A et Soutter. M, 1991). Dans cette étude, nous avons calculé le temps de concentration à l'aide de trois formules empirique, le plus couramment utilisé :

- La formule de Giordotti :

$$T_c = \frac{(4 \times \sqrt{S_{bv}}) + 1.5 \times L}{0.8 \times \sqrt{H}}$$

T_c : est le temps de concentration en heure.

S_{bv} : est la surface du bassin versant en km².

L : est la longueur du talweg en Km.

H : est la dénivelée maximale du bassin versant.

- La formule de Kirplich :

$$T_c = 0.01947 \times L^{0.77} \times I^{-0.385}$$

T_c : est le temps de concentration en min.

L : est longueur du Talweg en m.

I : est la pente moyenne du talweg en m/m.

- La formule de Turrazza :

$$T_c = 1.662 \times S_{bv}^{0.5}$$

T_c : est le temps de concentration en min.

S_{bv} : est surface du bassin versant en Ha.

La valeur utilisée par la méthode Gradex est la moyenne des résultats obtenus par les trois formules (Tabl. 3.4).

Tabl. 3. 4 - Temps de concentration en heures par les trois formules.

BV	Giondotti(h)	Turrazza(h)	Kirplich(h)	Tc utilisée
Oued Lahdar (au niveau de Had Msila)	4.37	4.25	4.30	4.30
Oued Lema (au niveau Bni Ftah)	1.72	1.81	0.71	1.41
Oued Rhnalla (au niveau de Had Msila)	1.582	1.30	1.19	1.35
Oued Dira (au niveau Bni Ftah)	1.42	1.03	1.04	1.17
O.Bni Ftah	1.66	1.42	0.84	1.30
Oued Mized (au niveau Bni Ftah)	1.42	0.96	0.83	1.07
Oued Assamer (au niveau Bni Ftah)	1.17	1	0.55	0.90

10.1.1.3 Notion de loi de probabilité :

Si la variable aléatoire (X) est une variable numérique, on peut considérer comme événement (e) favorable, le fait que X soit inférieure ou égal à une valeur x de E. La probabilité de voir arriver cet événement est une fonction numérique de x, comprise entre 0 et 1 et que l'on appelle fonction de répartition F (x) (Laborde. J.P, 2000):

$$F(x) = \text{Prob}(X \leq x) = \text{Prob}(e/E)$$

Cette loi de probabilité doit être monotone, non décroissante et varier de 0 à 1 lorsque x décrit de x_a à x_b l'intervalle de définition de la variante X.

D'une part, la méthode des probabilités est définie par une formule mathématique qui distingue différents types de lois ; d'autre part, les valeurs du paramètres entrent dans la formule mathématique et est estimée à partir de l'échantillon observé.

En hydrologie, la probabilité des valeurs d'un échantillon observé est donnée par la formule suivante (Laborde. J.P, 2000):

$$F_i = \frac{i - 0.5}{n} \quad (4.5)$$

Dans l'étude des crues, nous choisissons ce type de loi de probabilité pour ajuster les paramètres de précipitations de l'échantillon. (Bab Chhoub = 20 ans, Had Msila=17 ans). Cet ajustement nous permet d'estimer la valeur maximale des précipitations en fonction de la fréquence calculée.

10.1.1.4 Notion de période de retour :

Il est de coutume d'associer à chaque risque d'un événement donné une possibilité d'apparition de cet événement en tenant compte de la vulnérabilité du terrain à ce risque.

Une crue de débit maximum Q_T et de période de retour T ans signifie qu'on a une probabilité P égale à $1 - \frac{1}{T}$ que le débit ne dépasse pas la valeur de Q_T .

Soit une variable aléatoire « i » (pluies, débit...), alors la fréquence de non dépassement est $F(x_i) = P(i \leq x_i)$ et la fréquence d'apparition est $1 - F(x_i) = 1 - P(i \leq x_i)$.

Donc $(x_i) = 1 - \frac{1}{T}$.

Cependant une crue de période de retour $T=100$ ans ne veut pas dire qu'elle survient 1 fois tous les 100 ans mais que cette crue a 1% de chance d'arriver chaque année pendant 100 ans.

10.1.1.5 Ajustement des pluies max journalières par la loi de Gumbel :

La première étape à faire est de compter les précipitations quotidiennes de la station de Bab chhoub à la loi de Gumbel. Le but de cette opération est de dériver des valeurs de précipitations à des fréquences rares.

La loi de Gumbel est généralement utilisée pour ajuster la séquence des précipitations maximales et le débit correspondant. Dans ce cas et seulement dans ce cas, le caractère exponentiel de la distribution est décrit par la pente de la ligne d'ajustement de la pluie observée. A noter que, La pente de cette droite est le Gradient de cette distribution Exponentielle, d'où le nom de la méthode GRADEX, (Comité Français des grands Barrages, 1994).

Les pluies quotidiennes la plus fréquente est un événement de pluies extrêmes de haute intensité qui se produit sur une courte période de temps, qui se produit rarement dans le temps et dans l'espace. Ces événements extrêmes peuvent générer des inondations et des débits importants, et la structure doit être protégée.

L'analyse de fréquence est une méthode statistique utilisée à des fins de prévision en hydrologie. Sur la base de calculs de probabilité utilisant l'historique des événements, nous pouvons prédire la fréquence future de certains phénomènes hydrologiques, comme les précipitations et les inondations. Cette analyse permettra d'estimer les quantiles correspondant aux périodes de retour déterminées en visant d'accorder une signification physique aux caractéristiques naturelles étudiées.

L'ajustement des pluies max journalières peut se faire par plusieurs lois d'ajustement. La loi de Gumbel est une loi très utilisée en hydrologie et en climatologie (Makhlouf, 1994, Miquel, 1984).

On signale ici que la fonction de répartition de la loi de Gumbel s'exprime de la manière suivante :

$$F(x) = \exp\left[-\exp\left(-\frac{x-a}{b}\right)\right]$$

$$u = \frac{x-a}{b}$$

$$u = -\ln[-\ln(f(x))]$$

U : étant la variable de Gumbel

Il s'agit donc principalement d'estimer la probabilité de non dépassement $F_i(x)$ qu'il convient d'attribuer à chaque valeur x. Il existe plusieurs formules d'estimation de la fonction de répartition $F(x)$. Dans le travail actuel, on a utilisé la distribution empirique de Hazen définie par $F_i = \frac{r-0.5}{n}$ où r est le rang et n la taille de l'échantillon.

Les données et les résultats de l'application de la loi de Gumbel sur la série des précipitations qui s'étale de l'année 1980/1981 à 1995/1996 (17 ans d'enregistrement) pour la

station de jaugeage de Had Msila et de 1993 à 2012 (20 ans d'enregistrement) pour la station de Bab Echhoub, est regroupé dans les tableaux suivantes:

Tabl. 3. 5 - Pluies maximales journalières annuelles (P_{jmax}) de la station de Had Msila.

les années d'observation	P_{jmax}	rang des années	Probabilité des pluies	Variable de Gumbel
1995 - 1996	37	1	0.03	-1.26
1994 - 1995	40	2	0.09	-0.89
1992 - 1993	42	3	0.15	-0.65
1991 - 1992	49	4	0.21	-0.46
1990 - 1991	52	5	0.26	-0.28
1989 - 1990	56	6	0.32	-0.12
1988 - 1989	58	7	0.38	0.04
1987 - 1988	62	8	0.44	0.20
1985 - 1986	65	9	0.50	0.37
1993 - 1994	67	10	0.56	0.54
1984 - 1985	69	11	0.62	0.73
1981 - 1982	80	12	0.68	0.94
1982 - 1983	82	13	0.74	1.18
1983 - 1984	84	14	0.79	1.47
1980 - 1981	87	15	0.85	1.84
1979 - 1980	92	16	0.91	2.38
1986 - 1987	101	17	0.97	3.51

Tabl. 3. 6 - Pluies maximales journalières annuelles (p_{jmax}) de la station de Bab Echhoub.

les années d'observation	P_{jmax}	rang des années	Probabilité des pluies	Variable de Gumbel
1999/2000	31	1	0.025	-1.31
1993/1994	35	2	0.075	-0.95
1994/1995	39	3	0.125	-0.73
2005/2006	39	4	0.175	-0.56
1998/1999	41	5	0.225	-0.40
2006/1007	46	6	0.275	-0.26
1995/1996	49	7	0.325	-0.12
2004/2005	49	8	0.375	0.02
2001/2002	54	9	0.425	0.16
1996/1997	55	10	0.475	0.30
2012/2013	55	11	0.525	0.44
2008/2009	63	12	0.575	0.59
1997/1998	64	13	0.625	0.76
2003/2004	65	14	0.675	0.93
2009/2010	70	15	0.725	1.13
2007/2008	80	16	0.775	1.37
2000/2001	81	17	0.825	1.65
2011/2012	85	18	0.875	2.01
2002/2003	86	19	0.925	2.55
2010/2011	100	20	0.975	3.68

L'ajustement graphique des précipitations journalières maximales annuelles selon la loi de Gumbel est représenté sur le graphique suivant :

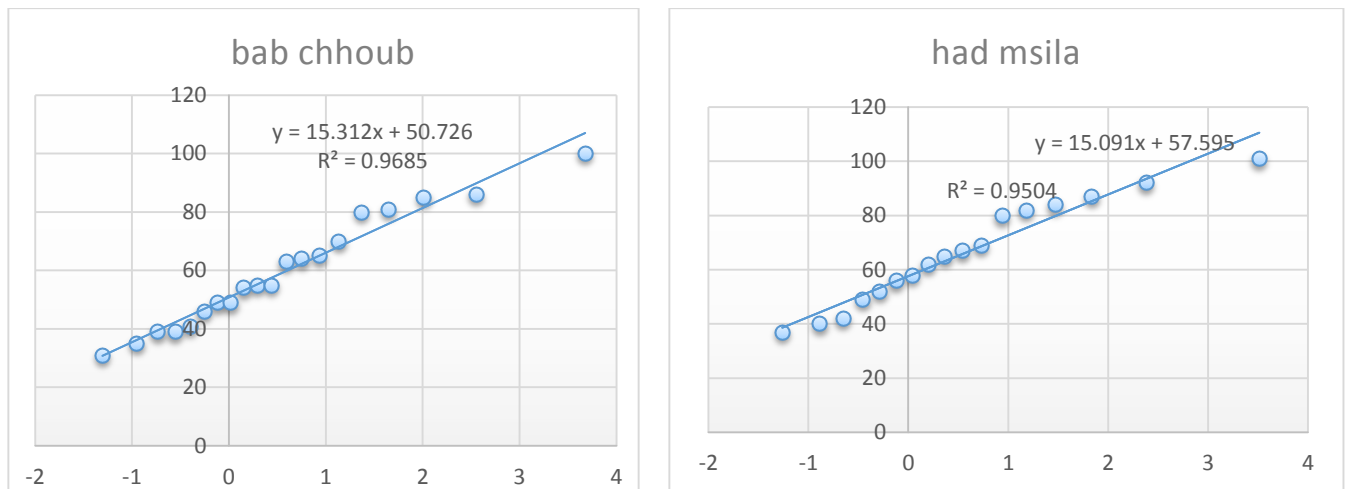


Fig.3. 21 - Ajustement des pluies journalières maximales par la loi de Gumbel.

Selon l'ajustement graphique des précipitations journalières maximales par la loi de Gumbel, nous pouvons obtenir le Gradex et les précipitations journalières maximales pour différentes périodes de retour. Les valeurs indiquées dans le tableau suivant correspondent aux valeurs journalières. Le changement de pluie en 24 heures est complété en multipliant la valeur par un coefficient égal à 1,15 (ABHS, Ehmhvb. 2005).

Tabl. 3. 7 - Pluies journalières maximales et Pluies en 24 heures par période de retour.

		Gradex	P2	P5	P10	P20	P50	P100	P1000
Station Had Msila	Pjmax	15.1	63.1	80.2	91.6	102.4	116.5	127.0	161.8
	P24	17.4	72.6	92.3	105.3	117.8	134.0	146.1	186.1
Station Bab Echhoub	Pjmax	15.3	56.34	73.69	85.18	96.21	110.47	121.16	156.49
	P24	17.6	64.79	84.75	97.96	110.64	127.04	139.34	179.96

10.1.1.6 Débit de référence :

L'utilisation de la méthode Gradex est basée sur le principe que les précipitations et le ruissellement sont égaux au-dessus d'une certaine fréquence de référence. Dans notre cas, nous utiliserons une fréquence décennale.

Pour la méthode Gradex, il faut déterminer le débit de référence, à savoir Pour cela, nous utiliserons le modèle de Caquot pour calculer Débit de fréquence de sur modulation F. la fréquence qui sera prise est la fréquence décennale.

La formule empirique de Caquot prend la forme suivante :

$$Q_f(T=10\text{ans}) = K \frac{I}{U} \frac{V}{U} C \frac{1}{U} A \frac{W}{U}$$

$Q_f(T=10)$: débit de référence de la fréquence décennale.

I : est la pente moyenne du Talweg.

C : coefficient du ruissellent pris égal à 20%.

A : la superficie du bassin versant (en hectares).

Les coefficients d'expressions K, U, V et W sont calculés par les formules suivantes :

$$K = 0.5^{b(T)} \frac{a(T)}{6.6}$$

$$U = 1 + 0.287b(T)$$

$$V = -0.41b(T)$$

$$W = 0.95 + 0.507b(T)$$

Utilisez la formule de Montana pour déterminer les valeurs des paramètres de a (T) et b (T) à partir de la courbe (IDF): $i(t, T) = a(T)t^{b(T)}$

Ensuite, la formule devient la période de retour (T = 10 ans) comme suit :

$$Q_f(T=10\text{ans}) = 0.9987 I^{0.2783} C^{1.195} A^{0.791}$$

Le tableau suivant représente le débit de référence obtenu par la formule empirique (Caquot) :

Tabl. 3. 8 - Débits (Q T 10 ans m³/s) calculés par la méthode du Gradex.

Cours d'eau	Q T 10 ans m³/s
Oued Lahdar (au niveau de Had Msila)	152.36
Oued Lema (au niveau Bni Ftah)	49.25
Oued Rhnalla (au niveau de Had Msila)	3.27
Oued Dira (au niveau Bni Ftah)	2.79
O. Bni Ftah	35.79
Oued Mized (au niveau Bni Ftah)	19.67
Oued Assamer (au niveau Bni Ftah)	22.91

Enfin, il indique que le débit obtenu par la méthode Caquot doit être corrigé par Le coefficient d'influence "m", pour différents bassins versants, tout d'abord, nous calculons l'allongement "M":

10.1.1.7 Coefficient d'allongement (M) :

$$M = \frac{L}{\sqrt{A}}$$

L : longueur du talweg en hm.

A : surface du bassin versant en ha.

- Coefficient d'influence (m) :

$$m = \left(\frac{M}{2} \right)^{0.7.b} \quad b : \text{est le coefficient de Montana pris égale à } 0.568$$

Le débit décennal corrigé est :

Tabl. 3. 9 - Débits corrigés (Q T 10 ans m^3/s) par le coefficient d'influence m .

Oueds	$Q_f (T = 10ans)$ m^3/s	Corrigé $Q_{f_c} (T = 10ans) m^3/s$
Oued lahdar (au niveau de Had Msila)	152.36	168.54
Oued Lema (au niveau Bni Ftah)	49.25	51.84
Oued Rhnalla (au niveau de Had Msila)	3.27	3.34
Oued Dira (au niveau Bni Ftah)	2.79	2.59
O.Bni Ftah	35.79	41.56
Oued Mized (au niveau Bni Ftah)	19.67	19.76
Oued Assamer (au niveau Bni Ftah)	22.91	26.50

10.1.1.8 Forme de l'hydrogramme unitaire :

Afin de déterminer la crue de projet (Tabl. 3.10), nous avons adopté une méthode empirique pour déterminer une hydrogramme de niveau d'eau unitaire triangulaire simplifiée (Fig. 3.22), avec un temps de base est égal au double du temps de concentration du bassin versant.

Tabl. 3. 10 - Débits (Q T 10 ans m^3/s) et temps de concentration pour différents cours d'eau du bassin versant de l'Oued Lahdar.

Cours d'eau	T_c (h)	Q_p T 10 ans en m^3/s
Oued Lahdar (au niveau de Had Msila)	4.30	168.54
Oued Lema (au niveau Bni Ftah)	1.41	51.84
Oued Rhnalla (au niveau de Had Msila)	1.35	3.34
Oued Dira (au niveau Bni Ftah)	1.16	2.59
O.Bni Ftah	1.30	41.56
Oued Mized (au niveau Bni Ftah)	1.07	19.76
Oued Assamer (au niveau Bni Ftah)	0.90	26.50

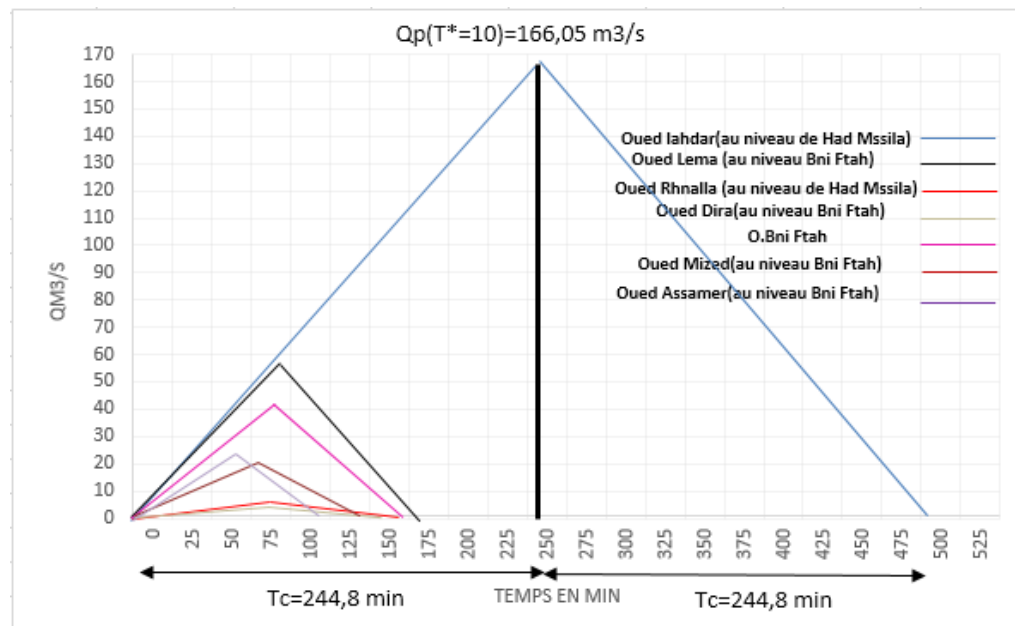


Fig.3. 22 - Hydrogramme de crue simplifié.

10.1.1.9 Calcul de la lame d'eau ruisselée et du volume pour la fréquence 10 ans :

Déduire le volume V ($T = 10$ ans) correspondant au débit de référence ($T = 10$ ans) à partir de hydrogramme de niveau d'eau unitaire sélectionnée pour les bassins d'étude.

$$V (T = 10 \text{ ans}) = \frac{Q \times 2T_c}{2}$$

La lame d'eau ruisselée de référence L_r ($T=10$ ans), a été déduite du volume de référence V ($T=10$ ans) en divisant ce dernier par la superficie du bassin versant (Tabl. 3.11).

$$L_r (T = 10 \text{ ans}) = \frac{V}{S_{bv}}$$

Tabl. 3. 11 - Débits, lames d'eau ruisselées et volumes d'eau pour ($T=10$ ans).

Bassin versant	Surface (km ²)	Qp (T=10ans) en m ³ /s	V(T=10ans) en Mm ³	Lr (T=10ans) en mm
Oued Lahdar (au niveau de Had Msila)	236.8	168.54	2.44	11.24
Oued Lema (au niveau Bni Ftah)	43.03	51.84	0.30	7.07
Oued Rhnalla (au niveau de Had Msila)	22.52	3.34	0.02	4.97
Oued Dira (au niveau Bni Ftah)	14.38	2.59	0.01	0.75
O.Bni Ftah	26.42	41.56	0.19	7.36
Oued Mized (au niveau Bni Ftah)	12.13	19.76	0.08	6.27
Oued Assamer (au niveau Bni Ftah)	13.43	26.50	0.09	6.39

10.1.1.10 Calcul des lames d'eau ruisselées et des débits de pointe pour différentes fréquences :

La formule suivante peut être utilisée pour compléter le passage des précipitations de 24 heures aux précipitations de temps de concentration pour chaque fréquence.

$$P(T_c) = P(24) \times \left(\frac{T_c}{24} \right)^{(1-b)}$$

Par conséquent, l'équation suivante peut être utilisée pour obtenir les lames d'eau ruisselées $L_r (T / T_c)$ du bassin étudié pendant le temps de concentration et pour différentes périodes de retour.

$$Gp(T_c) = Gp(24) \times \left(\frac{T_c}{24} \right)^{(1-b)}$$

Nous pouvons obtenir le volume de crue en multipliant la lame d'eau ruisselée par la superficie totale du bassin versant. Par conséquent, le débit de pointe peut être déduit en injectant ce volume dans l'hydrogramme type choisi.

La méthode Gradex nous permet de déterminer le niveau de ruissellement, le volume d'eau et le débit de pointe à différentes périodes de retours (Tabl. 3.12).

$$L_r(T / T_c) = L_r(T_r / T_c) + G_p(T_c) \times [U(T) - U(T_r)]$$

$U(T) = -\ln(-\ln(1 - 1/T))$: est la variable de Gumbel.

$L_r(T/T_c)$: est la lame d'eau ruisselée de référence.

$Gp(T_c)$: est le Gradex sur le temps de concentration calculé à partir du Gradex en 24 heures par la formule suivante :

Tabl. 3. 12 - Débits, lames d'eau ruisselées et volumes d'eau pour différentes période de retour.

Bassin versant	Lr en mm					Volumes d'eau en Mm ³					Q en m3/s				
	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans	1000 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans	1000 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans	1000 ans
Oued Lahdar (au niveau de Had Msila)	11.24	17.05	24.56	30.21	48.77	2.44	3.70	5.33	6.55	10.58	168.54	255.67	368.22	452.94	731.29
Oued Lema (au niveau Bni Ftah)	7.07	10.94	19.82	32.46	57.48	0.30	0.47	0.85	1.40	2.47	51.84	80.25	145.34	238.04	421.48
Oued Rhnalla (au niveau de Had Msila)	0.97	4.97	14.13	27.18	53	0.02	0.11	0.32	0.61	1.19	3.33	17.08	48.57	93.42	182.18
Oued Dira (au niveau Bni Ftah)	0.75	6.56	14.07	19.72	86.56	0.01	0.09	0.20	0.28	0.55	2.59	22.59	48.44	67.90	131.82
Oued Bni Ftah	7.36	13.17	20.68	26.33	44.89	0.19	0.35	0.55	0.7	1.19	41.55	74.36	116.73	148.62	253.42
Oued Mized (au niveau Bni Ftah)	6.27	12.08	19.59	25.24	43.80	0.08	0.15	0.24	0.31	0.53	19.73	38.04	61.68	79.47	137.93
Oued Assamer (au niveau Bni Ftah)	6.39	12.20	19.71	25.36	43.92	0.09	0.16	0.26	0.34	0.59	26.49	50.57	81.69	105.11	182.05

Les résultats varient d'un bassin à l'autre en raison des paramètres hydrologiques liée aux paramètres géométriques du bassin et les caractéristiques de son réseau hydrologique (superficie, forme, pente, longueur du talweg, dénivelée maximale, etc.).

10.1.2 Méthode rationnelle :

C'est la méthode la plus ancienne, l'une des méthodes permettant d'estimer le débit de pointe à différentes fréquences. Elle utilise un modèle clair de changement de la pluie de projet, supposée une cohérence et une constance dans le temps, elle basé sur le principe de débit à l'exutoire d'un bassin soumis à une averse homogène dans le temps et dans l'espace d'intensité I ,

Les bases de la méthode rationnelle remontent au milieu du 19e siècle (Mulvaney.T.J, 1851). En Amérique du Nord, c'est à Emil Kuichling (Kuichling. E, 1889) qu'est généralement attribuée la paternité du concept, qui a survécu jusqu'à maintenant à peu près dans sa forme originale.

Le concept de la méthode rationnelle doit son origine à un ingénieur irlandais Mulvaney responsable de drainage agricole au siècle dernier (1850). Malgré de nombreuses hypothèses simplifiées, c'est peut-être la formule la plus connue et la plus couramment utilisée à ce jour, principalement en raison de sa simplicité et aussi parce que la séquence des précipitations est généralement plus longue que le débit.

En fonction des caractéristiques physiologiques du bassin et de l'intensité des précipitations (estimée à partir de la courbe IDF), le débit de pointe est calculé selon l'expression suivante :

$$Q = C \cdot I \cdot A$$

Q : débit en m^3/s .
 C : coefficient de ruissellement en %.
 I : intensité de l'averse en m/s de durée égale au temps de concentration du bassin et de fréquence égale de celle du débit cherché.
 A : surface du bassin versant en m^2 .

L'application de cette méthode nécessite de déterminer les différents coefficients qui la caractérisent, à savoir, le coefficient de ruissellement C_r , l'intensité moyenne maximale de la pluie i , le temps de concentration t_c .

Estimation de l'intensité moyenne maximale des précipitations :

Il existe de nombreuses méthodes et formules mathématiques qui peuvent être utilisées pour estimer l'intensité critique pour un temps de retour T donné. Rappelons qu'une hypothèse de méthode rationnelle est que la durée des précipitations est égale au temps de concentration, dans notre étude on a estimé l'intensité critique de pluie pour T et de durée $t=t_c$ d'après les courbes IDF préétablies à la station météorologie de Taza (Tabl. 3.13).

L'estimation des débits de projet par les deux méthodes (Rationnelle, Gradex) dans le BV de Lahdar montre des valeurs différentes selon la méthode d'étude adoptée d'une part et d'autre part d'un bassin à l'autre en raison des paramètres hydrologiques liée aux paramètres géométriques du bassin et les caractéristiques de son réseau hydrologique (superficie, forme, pente, longueur du talweg, dénivelée maximale, etc.).

Les résultats de Gradex indiquent que la superficie du bassin versant détermine en grande partie le débit de pointe. En effet, le débit le plus fort correspond au bassin versant ayant la plus grande surface : la zone de réception des eaux pluviales. Par conséquent, le débit de chaque sous bassin est proportionnel à sa surface.

Tabl. 3. 13 - Intensités, Coefficients de ruissellement et débits pour différentes période de retour.

Bassin versant	surface	Intensité en mm/mn				Cr en %				Q en m³/s			
		10 ans	20 ans	50 ans	100 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
Oued Lahdar (au niveau de Had Msila)	236.8	0.18	0.21	0.29	0.36	22.95	31.13	39.42	44.46	163.05	257.97	451.13	631.72
Oued Lema (au niveau Bni Ftah)	43.03	0.33	0.4	0.48	0.58	21.66	29.97	47.73	71.69	51.26	85.97	164.30	298.18
Oued Rhnalla (au niveau de Had Msila)	22.52	0.35	0.41	0.51	0.58	2.88	13.18	32.97	58.15	3.78	20.28	63.10	126.59
Oued Dira (au niveau Bni Ftah)	14.38	0.40	0.48	0.47	0.60	15.03	11.98	22.58	29.02	14.41	13.78	25.43	41.73
Oued Bni Ftah	26.42	0.36	0.418	0.57	0.59	12.80	24.04	33.19	38.75	20.30	44.25	83.30	100.67
Oued Mized (au niveau Bni Ftah)	12.13	0.41	0.5	0.61	0.38	12.80	22.05	31.44	37.15	10.61	22.29	38.77	28.54
Oued Assamer (au niveau Bni Ftah)	13.43	0.46	0.52	0.70	0.40	13.05	22.27	31.63	37.32	13.43	25.92	49.56	33.42

Pour les résultats d'application de la méthode rationnelle, on observe que le débit de pointe augmente avec sa surface. De plus, nous avons constaté qu'il existe une relation entre l'intensité et le coefficient de ruissellement, car nous avons constaté que le coefficient de ruissellement augmente avec l'augmentation de l'intensité des précipitations c'est-à-dire que plus le Cr est élevé, plus l'intensité est grande. Avec l'augmentation de ces paramètres (I et Cr), le débit de pointe lui-même Augmentera.

En effet, les débits obtenus par la méthode Rationnelle est plus important que les débits déterminé par la méthode Gradex concernant (O. Lahdar au niveau de Had Msila, O Lema au niveau de Bni Ftah et O. Rhnalla au niveau de Had Msila), par contre les débits obtenus par la méthode Gradex est plus important que les débits déterminé par la méthode Rationnelle concernant les autres bassins versants.

10.2 Méthodes empiriques :

10.2.1 La formule de Myer : Débits par Hazan Lazareviç :

La formule de Meyer peut calculer le débit de crue pour un bassin urbain ou rural donné. Le débit de la crue de projet pour la période de retour T se calcule par la formule suivante :

$$Q_{\max} = K * A^n$$

$Q_{\max}(T)$: le débit de la crue de projet de période de retour T en m³/s ;
 K : la cote de Myer fonction des caractéristiques du bassin ;
 A : la surface du bassin versant en Km² ;
 n : le nombre compris entre 0,4 et 0,8.

Hazan et al. (1969) ont utilisé cette formule dans leur étude pour calculer le débit de crue du projet du millénaire (T = 1000) pour les bassins du Nord et du Sud- Est du Maroc connaissant la

superficie du bassin versant A en Km² (Tabl. 3.14), sa pluviométrie moyenne et la localisation de la zone à étudier. Les résultats sont présentés dans le Tabl. 3.15.

Tabl. 3. 14 - Formules de Hazan-Lazarevic selon les régions du Maroc.

Zone géographique	Relation (Qmax en m3/s)	Pluviométrie mm
Rif central	$Q_{\max}=15.55A^{0.776}$	1000-1300
Rif occidental	$Q_{\max}=9.78A^{0.793}$	800-1000
Rif oriental	$Q_{\max}=7.58A^{0.808}$	600-800
Haut Atlas saharien	$Q_{\max}=9.38A^{0.742}$	200-400
Moyen atlas	$Q_{\max}=14.9A^{0.636}$	700-900
Moyen atlas	$Q_{\max}=13.5A^{0.613}$	500-700
Moyen atlas (Karst)	$Q_{\max}=13.41A^{0.587}$	400-700

Tabl. 3. 15 - débit (T=1000 ans) pour différentes bassins versants par la méthode de Mallet-Gauthier.

Bassin versant	Q ₁₀₀₀ (Hazan Lazareviç)
Oued Lahdar (au niveau de Had Msila)	628.30
Oued Lema (au niveau Bni Ftah)	158.40
Oued Rhnalla (au niveau de Had Msila)	93.87
Oued Dira (au niveau Bni Ftah)	65.33
Oued Bni Ftah	106.80
Oued Mized (au niveau Bni Ftah)	56.94
Oued Assamer (au niveau Bni Ftah)	61.82

10.2.2 Formule de Mallet-Gauthier :

$$Q_{\max} = 2. K. \log(1 + \alpha H) \cdot \frac{A}{\sqrt{L}} \cdot \sqrt{1 + 4. \log(T) - \log(A)}$$

Avec :

- Q_{max}(T) : le débit maximal en m3/s ;
- K : coefficient variant de 0,5 pour les grands bassins versants à faible pente à 5 pour les petits bassins versants à forte pente ;
- a : coefficient géographique variable entre 20 et 30 (au Maroc est pris égal à 20)
- H : le module pluviométrique annuel moyen dans le bassin versant en m calculé à partir des hauteurs de précipitations annuelles aux différents postes pluviométriques internes et externes du bassin versant (polygone de Thiessen ou moyenne arithmétique).
- A : la superficie du bassin versant en Km² ;
- L : la longueur du Talweg principal en Km ;
- T : la période de retour en années.

On note que les valeurs qui vont être affectées aux deux paramètres régionaux (a et K) qui interviennent dans la relation peuvent donner des résultats assez contrastés si elles ne sont pas fixées avec une bonne connaissance de la nature du bassin (les caractéristiques topographiques, climatologiques et géologiques des bassins), Les résultats sont présentés dans le Tabl. 3.16.

K	Période de retour
1.05	10
1.5	20
1.7	50
1.9	100
2	1000

Tabl. 3. 16 - débits pour différentes période de retour par la méthode de Mallet-Gauthier.

Bassin versant	Q _{max} (Mallet-Gauthier)				
	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans	1000 ans
Oued Lahdar (au niveau de Had Msila)	149.26	257.52	347.25	429.04	571.92
Oued Lema (au niveau Bni Ftah)	72.93	121.40	159.76	195.22	255.27
Oued Rhnalla (au niveau de Had Msila)	31.12	51.28	66.97	81.54	105.93
Oued Dira (au niveau Bni Ftah)	22.21	36.36	47.27	57.42	74.27
Bni Ftah sous bv2	44.42	73.36	95.98	116.97	152.19
Oued Mized (au niveau Bni Ftah)	22.25	36.35	47.17	57.26	73.94
Oued Assamer (au niveau Bni Ftah)	28.40	46.45	60.34	73.28	94.72

10.2.3 Formule de Mac-Math :

$$Q_{\max}(T) = K * P(24h, T) * S^{0.58} * I^{0.42}$$

Avec :

- Q_{max}(T) : le débit de la crue de projet pour la période de retour T en m³/s ;
- S : la superficie du bassin versant en km²;
- I : la pente moyenne du bassin versant en m/m ;
- P (24h, T) : la précipitation maximale moyenne de durée 24h de période de retour T en

- mm. Elle est calculée par ajustement statistique sur la base des Pmaxj aux différents postes de pluie disponibles ;
- K : coefficient dépendant du couvert végétal et de la topographie pouvant être estimé à partir du Tabl. 3.17.

Tabl. 3. 17 - Valeurs du paramètre régional K de la formule de Mac-Math, (Serhir,2010 ;Ouarda et al., 2001).

valeurs du coefficient K	
0.11	Bassin versant de grande dimension
0.22	Terre cultivée et terrain vague des zones suburbaines
0.32	Terrain non aménagé, non rocheux à pente moyenne
0.42	Terrain non aménagé, non rocheux à pente forte

Cette formule permet de calculer le débit de crue de projet pour une période de retour donnée. Il est utilisé dans les bassins versants (urbains ou ruraux) des régions arides à semi-arides, de tailles allant de petites à grandes.

Le coefficient régional K a une sensibilité élevée. Une description et connaissance détaillée de la zone d'étude est cruciale. En effet, selon les travaux d'Ouarda et al. (2001), la différence entre deux valeurs consécutives fixées pour K entraînera une différence absolue de débit de pointe, qui peut varier entre 40% et 100%. Les résultats sont présentés dans le Tabl. 3.18.

Tabl. 3. 18 - débits pour différentes période de retour par la méthode de Mac-Math.

Bassin versant	Qmax(Mac-Math)				
	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans	1000 ans
Oued Lahdar (au niveau de Had Msila)	213.62	277.71	359.90	424.50	602.08
Oued Lema (au niveau Bni Ftah)	132.54	172.30	223.30	263.38	373.56
Oued Rhnalla (au niveau de Had Msila)	78.32	101.81	131.95	155.63	220.74
Oued Dira (au niveau Bni Ftah)	60.09	78.12	101.24	119.41	169.36
Oued Bni Ftah	88.53	115.09	149.15	175.92	249.52
Oued Mized (au niveau Bni Ftah)	52.96	68.85	89.23	105.25	149.27
Oued Assamer (au niveau Bni Ftah)	69.68	90.58	117.39	138.46	196.38

10.2.4 Débits par Fuller 2 :

La description de la formule Fuller 2 est la suivante :

$$Q_T = \frac{4N}{300} S^{0.8} \cdot (1 + 2.667 \cdot S^{-0.3}) \cdot (1 + c \cdot \log(T))$$

- Q_T = débit de pointe de période de retour T en m^3/s .
- T = période de retours en ans.
- S = superficie du bassin versant en km^2 .
- C = paramètre régional variant tabulé, ici $c=2$

Régions	Valeur de C
Régions humides	0,7 à 0,8
Régions arides	0,8 à 2
Oueds Sahariens	3 à 3,5

N est Paramètres de zone variable tabulaire, ici $N = 85$

Régions	Valeur de N
plaines	80
Relief accidenté	85
Montagne	100

Les résultats sont présentés dans le Tableau suivant.

Tabl. 3. 19 - débits pour différentes période de retour par la méthode de Fuller 2.

Bassin versant	Qmax (Fuller 2)				
	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans	1000 ans
Oued Lahdar (au niveau de Had Msila)	245.58	278.44	321.87	354.73	463.88
Oued Lema (au niveau Bni Ftah)	77.06	87.37	100.99	111.30	145.55
oued Rhnalla (au niveau de Had Msila)	50.46	57.21	66.14	72.89	95.32
Oued Dira (au niveau Bni Ftah)	37.84	42.91	49.60	54.66	71.48
O. Bni Ftah	55.97	63.45	73.35	80.84	105.71
Oued Mized (au niveau Bni Ftah)	33.97	38.52	44.52	49.07	64.17
Oued Assamer (au niveau Bni Ftah)	36.23	41.08	47.49	52.34	68.44

Les méthodes empiriques sont gérées en recalculant les paramètres régionaux impliqués dans les quatre méthodes sélectionnées. Les valeurs attribuées à ces paramètres régionaux sont très importantes, car elles peuvent donner des résultats assez contrastés si elles ne sont pas fixées avec une bonne connaissance de la nature du bassin (climatologique et géologique des bassins, les caractéristiques topographique...). Par conséquent, ces travaux permettent de mieux comprendre l'ampleur de ces paramètres régionaux en fonction des précipitations, de l'altitude et de la période de retour. Ces débits donnent une idée de l'importance hydrologique du bassin versant de l'Oued Lahdar, qui se développe sur des terrains de faible pente, favorisant ainsi l'écoulement fluvial.

Plusieurs facteurs (climat, physique du bassin, disponibilité des données, fiabilité des données, etc.) doivent être pris en compte lors du choix de la méthode d'estimation du débit de pointe. En effet, Les débits retenus sont le fruit de l'analyse et de la comparaison des débits calculés par les différentes méthodes ci-dessus. Les débits calculés par les formules empiriques sont plus faibles que ceux déterminés par la méthode de Gradex, mais restent comparables à ceux calculés par la méthode rationnelle.

CONCLUSION :

Le régime hydrologique peut être considéré comme un régime méditerranéen - type, caractérisé par l'abondance pluviale et à très forts débits hivernaux, donc des fortes crues, d'une part et d'autre part par une saison sèche fortement prononcée, donc les étiages estivales. Le module annuel, ainsi que les différents coefficients, mettent en évidence des fluctuations hydroclimatiques. La répartition fréquentielle des crues est régie par des dissymétries, basées sur les méthodes des moments et de maximums de vraisemblance en l'occurrence les lois de Gumbel et de Gamma.

A travers cette étude portant sur l'analyse des données hydrométriques du bassin versant de l'Oued Lahdar, nous pouvons retenir les résultats suivants :

A ordre journalier, la valeur du débit varie considérablement, en raison des types des années hydrologiques (sèche, humide, moyenne) ; et au cours de cette variation, des crues éclairs de degrés différents, provoquant des inondations, ont été formées ; bien que l'étiage de l'Oued soit la règle l'année.

A ordre mensuel et saisonnier, la situation hydrologique de l'Oued Lahdar montre deux saisons : la première est humide et englobe les mois de décembre, janvier, février, mars et avril, où l'abondance hydrologique est importante avec des moyennes assez fortes ; tandis que la deuxième saison, englobe le reste de l'année, elle se distingue par une forte indigence hydrologique, voire des étiages de base ($0 \text{ m}^3/\text{s}$). A noter que la périodicité de cette saisonnalité hydrologique n'est pas régulière, car les dates d'occurrence et les valeurs de débit sont très différentes d'une année à l'autre.

Au niveau interannuel, les débits annuels varient considérablement d'une année à autre, où il existe une succession des périodes, cycles humides durant lesquels les débits sont supérieurs au module de la série, et les coefficients d'hydraulicité sont importantes et dépassent 1, et les écart-types sont positifs, et cycle des années sèches, où l'indigence hydrologique est importante surgit avec des écarts-types négatifs et des hydraulicités inférieures à 1.

Les corrélations débits/pluies annuelles, saisonnières et mensuelles ont été assez bonnes avec des coefficients de corrélation respectivement de 0,76, 0,94 et 0,5 ; ce qui montre revient à dire que les débits dépendent essentiellement des pluies dans le BV de l'Oued Lahdar.

Nous avons appliqué plusieurs méthodes pour estimer les débits de pointe des différentes périodes de retour des crues de l'Oued Lahdar. Les débits retenus sont le résultat d'une analyse comparative des différentes valeurs des débits calculés par les différentes méthodes utilisées.

Pour les méthodes hydrométéorologiques (Gradex et rationnelle) : Le premier travail de réadaptation de ces méthodes a été le calcul du Gradex de pluie de 24h et des coefficients de Montana au niveau de toutes les stations pluviométriques. Le calcul de ces paramètres climatiques a montré une grande variabilité d'une région à un autre.

Les méthodes empiriques ont été traitées en recalculant les paramètres régionaux intervenant dans les quatre méthodes retenues à savoir : la formule de Fuller 2, la formule de Myer, la formule de Mac-Math et la formule de Mallet- Gauthier. Les valeurs affectées à ces paramètres régionaux sont d'une grande importance car elles peuvent donner des résultats assez contrastés si elles ne sont pas fixées avec une bonne connaissance de la nature du bassin (les caractéristiques topographique, climatologique et géologique des bassins).

Chapitre 4 :

MODELISATION HYDRAULIQUE ET CARTOGRAPHIE DES ZONES INONDABLES DANS LE BASSIN VERSANT DE L'OUED LAHDAR.

Introduction,

- 1– Sélection des sections de modélisation hydraulique,
- 2– Description des logiciels utilisés et du matériel expérimental,
- 3– Physique d'un modèle hydraulique : les équations à résoudre,
- 4– Réalisation du modèle hydraulique de la zone d'étude,
- 5– Simulation hydraulique au niveau des secteurs modélisés,

Conclusion.

INTRODUCTION :

La modélisation numérique est devenue ces dernières décennies, indispensable pour la compréhension des phénomènes physiques puisqu'elle permet de les étudier à partir d'un laboratoire de recherche, elle permet même de modéliser différents scénarios d'une rivière en crue, toutefois ces outils restent intimement liés à la mesure sur terrain et nécessitent en continu des mises à jour par des calages qui permettent de les renforcer afin de mieux approcher les événements réels. Dans le cas des écoulements à surface libre dont la connaissance des caractéristiques hydrauliques est un enjeu majeur dans la conception et la projection d'aménagements des cours d'eaux.

Actuellement, cette connaissance par la modélisation des écoulements en rivière se fait par le logiciel libre Hec-RAS. Toutefois, ce dernier est basé sur un processus de calcul unidimensionnel qui comporte un certain nombre de simplifications et engendre une certaine incertitude, ce qui motive alors notre démarche est le décalage perçu entre les résultats donnés par simulation et les observations sur terrain. Ce travail s'intéresse à un aspect de simulation qui est la confrontation du système expérimental au système modélisé. Afin de parvenir à une adéquation assez proche entre les deux, et ainsi déceler à quel degré on peut avoir confiance dans le logiciel et aussi définir sur quels paramètres doit-on jouer. Cette étude a été faite sur deux travaux parallèles, de telle façon à parachever les expérimentations au laboratoire par un lancement de simulations sur logiciel, cas par cas et de voir en temps réel les ressemblances dans la modélisation de phénomènes.

La modélisation hydraulique a pour but le calcul des hauteurs d'eau pour la cartographie de l'aléa. Il s'agit d'une étape importante dans l'évaluation des risques liés aux inondations, car les aménagements et les réglementations ultérieures se référeront aux côtes et aux enveloppes de crues issues de la modélisation hydraulique.

Le choix du type de modèle hydraulique et du logiciel qui permet de le mettre en œuvre ainsi l'acquisition et la valorisation des données topographiques sont des étapes très importantes dans l'objectif de cartographie et de délimitation des zones inondables.

La cartographie est définie comme l'ensemble des études et des opérations scientifiques, techniques, et artistiques, intervenant à partir des résultats d'observations directes ou de l'exploitation d'une documentation, en vue de l'élaboration, de l'établissement et de l'utilisation de cartes, plans et autres modes d'expression.

La complexité des problèmes liés à l'abondance des données dans un cadre de cartographie du risque inondation (topographie, hydrologie, hydraulique, occupation des sols), nécessite le développement d'interfaces évoluées pour aider l'utilisateur et rendre son intervention plus efficace afin de résoudre les problèmes issus du risque inondation. C'est pour cela, la progression d'outils de cartographie automatiques couplés avec les outils de modélisation hydraulique est une nécessité pour disposer de cartes actualisables contribuant à la gestion du risque inondation. Des programmes de recherche spécifiques sont nécessaires pour faire progresser ce volet et utiliser les capacités de traitement informatique qu'offrent les matériels modernes (Cheikh sidi khair.2013).

L'objectif principal de ce chapitre est d'exposer les outils et les techniques qui peuvent être utilisés pour cartographier le risque inondation.

1 SÉLECTION DES SECTIONS MODELISATION HYDRAULIQUE :

Les secteurs concernant par la modélisation hydraulique appartiennent au BV de l'Oued Lahdar, Il se compose de différents tronçons des affluents de l'Oued Lahdar traversant le Centre de Had Msila et le Centre de Bni Ftah. On trouve d'une part le premier secteur qui représente la zone de Had Msila et il se caractérise par une plaine alluviale très large et un affluent Rhnalla de la rive gauche de l'Oued Lahdar (Fig. 4.1). Et d'autre part on trouve le deuxième site de Bni Ftah marqué par un réseau hydrographique dense représenté par un groupe des cours d'eau (Oued Assamer, Oued Mized, O. Bni Ftah, Oued Dira, Oued Lema), Cette présence du réseau hydrographique a naturellement un grand effet sur le comportement des écoulements et spécialement sur le déroulement des crues dans le Centre de Bni Ftah, (Fig. 4.1).

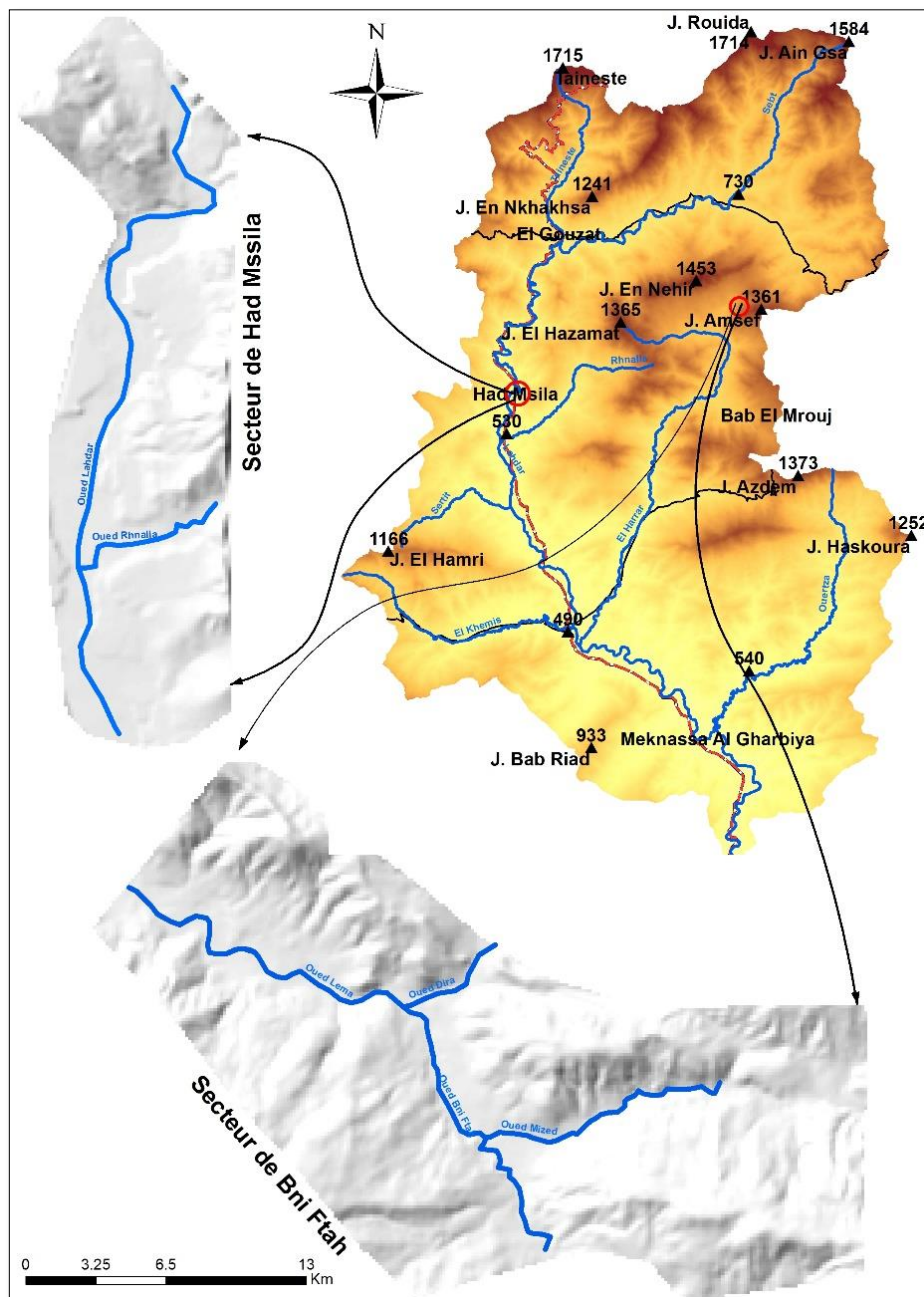


Fig. 4. 1 - Localisation des secteurs à modéliser.

1.1 Secteur de Had Msila :

Le secteur de Had Msila prend naissance dans la partie nord du BV s'étend sur une longueur de 3.3 km en passant du long de Centre territoriale de Had Msila à partir de pont de mosquée jusqu'au le nouveau Souk, La vallée de l'Oued constitue un lieu de villégiature des agriculteurs.

Le premier tronçon du secteur 1 caractérisé par un pont (x : 612.5, y : 427) situé à l'amont de tronçon près à la mosquée, Il s'étend sur une longueur de 60 m, il représente une construction qui permet de franchir le chenal de l'Oued Lahdar. Ce pont supporte le passage d'hommes et des véhicules, Pour éviter toute forme de débordement d'eau lors de crues particulières, Grâce à ce pont, la population peuvent se déplacer vers les Centres territoriaux qui se situent à côté de la région, comme le Centre de Taineste, ce pont joue le rôle de la route P 5414 et facilite aussi l'accès au nord du BV, car il représente un lien déterminant entre la population qui se situe loin de la route et le nord du BV(Fig. 4.2). La simulation hydraulique nous permet de distinguer si le pont devra connaître des problèmes pendant les différentes crues. Ces derniers ont été estimés à la partie antérieure.

Le cours d'eau forme dans ce tronçon un méandre à cote de la route R508, qui présente un grand problème au moment de l'inondation et donc impose un grand défi à la population à travers l'apparition du danger pour traverser aux régions du nord et la limitation des mouvements de la population vers le nord du BV.

Ainsi le tronçon caractérisé par des constructions dans la plaine alluviale, On observe sur le terrain que l'urbanisation a atteint les berges du cours d'eau. Cet espace réduit à cause de nouvelles habitations et des constructions à savoir l'hôpital et une partie de la direction provinciale de l'agriculture de Taza commune rurale de Had Msila.

En plus, au sein de ce tronçon il avait un grand Souk ancien qui occupe une vaste partie de la plaine alluviale. Ce dernier a été déplacé vers le tronçonne suivant en 2016.

Le second tronçon se situe de nouveau Souk jusqu'à la confluence d'Oued Lahdar et de l'Oued Rhnalla (Fig. 4.3), ce tronçon représente une grande plain alluviale. Dans la rive droite de l'Oued Lahdar on trouve la route P5414 qui lie le Centre territoriale Rbàa El Fouki qui se situe au BV de Ouargha et le Centre territoriale Taineste qui se trouve au nord du BV de l'Oued Lahdar en passant par Had Msila. Et dans la rive gauche on trouve le nouveau Souk qui se situe près de la cour d'eau. Ce Souk a été construit cette dernière décennie et plus précisément en 2016, il constitue un lieu de rencontre entre les offreurs et les demandeurs et donc une source financement et de satisfaction des besoins de la population de Had Msila et la population des régions voisines.

Ce Souk représente un moyen compétitif de la région ce qui engendre des avantages comparatifs sur le plan économique et sociale. Au contrario, de placement du Souk dans un replat inondable présente plusieurs défis sur plan économique et social. D'une part, il affecte négativement la stabilité du Souk et donc la détérioration du pouvoir d'achat du peuple. D'autre part, il constitue un vrai danger pour les visiteurs ce qui freine la survie du Souk.



Fig. 4. 2 - Image Satellitaire de secteur de Had Msila, tronçon 1.



Fig. 4. 3 - Image Satellitaire de secteur du Had Msila, tronçon 2.

A ce stade-là, et toujours dans la même rive à la moyenne de tronçon les champs et la majorité des arbres d'olives sont en danger, car ils sont situés dans un replat inondable ce qui limite leur continuités.

A la section aval de ce secteur on constate une confluence de l'Oued Lahdar avec oued Rhnalla, sur ce dernier il y a un pont(x : 612, y : 424.5) qui représente le seul accès du sud de BV avec le nord. Ce pont est caractérisé par des dimensions qui ne respectent pas les normes, ce qui engendre l'apparition des problèmes d'inondations et donc l'isolation de la population de Had Msila.

1.2 Secteur de Bni Ftah :

Lorsqu'on était sur le terrain, le premier caractère qui attire notre attention, le Centre est composé de plusieurs oueds (Oued Assamer, Oued Mized, O. Bni Ftah, Oued Dira, Oued Lema). Sur les abords des deux rives des oueds se présentent des zones d'extension d'espaces agricoles et des constructions, en plus des ponts qui coupent les cours d'eaux. Les caractères morphologiques de ce secteur permettent de différencier trois zones : Amont, intermédiaire et l'aval du C.R de Bni Ftah (Fig. 4.4).



Fig. 4. 4 - Image Satellitaire de secteur de Bni Ftah.

La partie amont du secteur est caractérisé par une confluence de l'Oued Assamer et de l'Oued Mized, ce dernier couvert par un pont (x : 625, y : 433.6) se situe à l'entrée de Centre de l'est, ce pont qui est construit depuis longtemps ne respecte pas les normes en vigueur à savoir la largeur, la hauteur et l'ensemble des dimensions souhaitables ce qui justifie par des jugements négatifs de la part de la population qui affirme que ce pont est encore traditionnel. Pour faire face à ces problèmes les autorités ont favorisé la construction d'un nouveau pont qui n'est pas encore achevé, comme il montre l'image suivante.

Dans la zone intermédiaire du secteur du Bni Ftah, et après une sortie du terrain on a observé d'un point de vue topographique que cette zone se caractérise par des versants contenant une pente forte, à la partie basale de ces versants on a distingué la concentration des habitants et des parcelles. A la rive gauche de la cour d'eau s'apparait un établissement scolaire (collège Jaber Ibn Hayan) qui se situe auprès de l'Oued, à côté de cet établissement il y a un ouvrage d'art (x : 624.9, y : 434)

(photo a) qui donne le seul accès des habitants de douar Labbouiba. L'emplacement de ces constructions peut génère des menaces d'inondations.

En ce qui concerne la section inferieure du secteur, on note l'installation du Souk hebdomadaire sur plaine alluviale de l'Oued Dira, ce dernier est protégé par un mur de soutènement contre les débordements de l'eau (photo b). Ce mur a une longueur de 150m et une hauteur de 180cm, ces dimensions n'arrivent pas certainement à échapper ces débordements, sur le long de ce mur il y a un trou de 2 mètres de longueur qui facilite l'écoulement de l'eau des crues vers le Souk. Juste à côté de confluence de l'Oued Dira et de l'Oued Bni Ftah on a ouvrage hydraulique (x : 624.7, y : 434.2) qui supporte le passage d'hommes et de véhicules vers les douars voisins avant l'avenue du Centre territoriale de Taineste (photo a). La confluence de l'Oued Dira et de l'Oued Bni Ftah donne naissance de Oued Lema, tout au long de ce Oued se forme une route qui est par un mur de soutènement (photo c), malgré les confortements répétés de ce mur, le sapement des berges de l'Oued Lema lors des crues rares menacent sa stabilité.

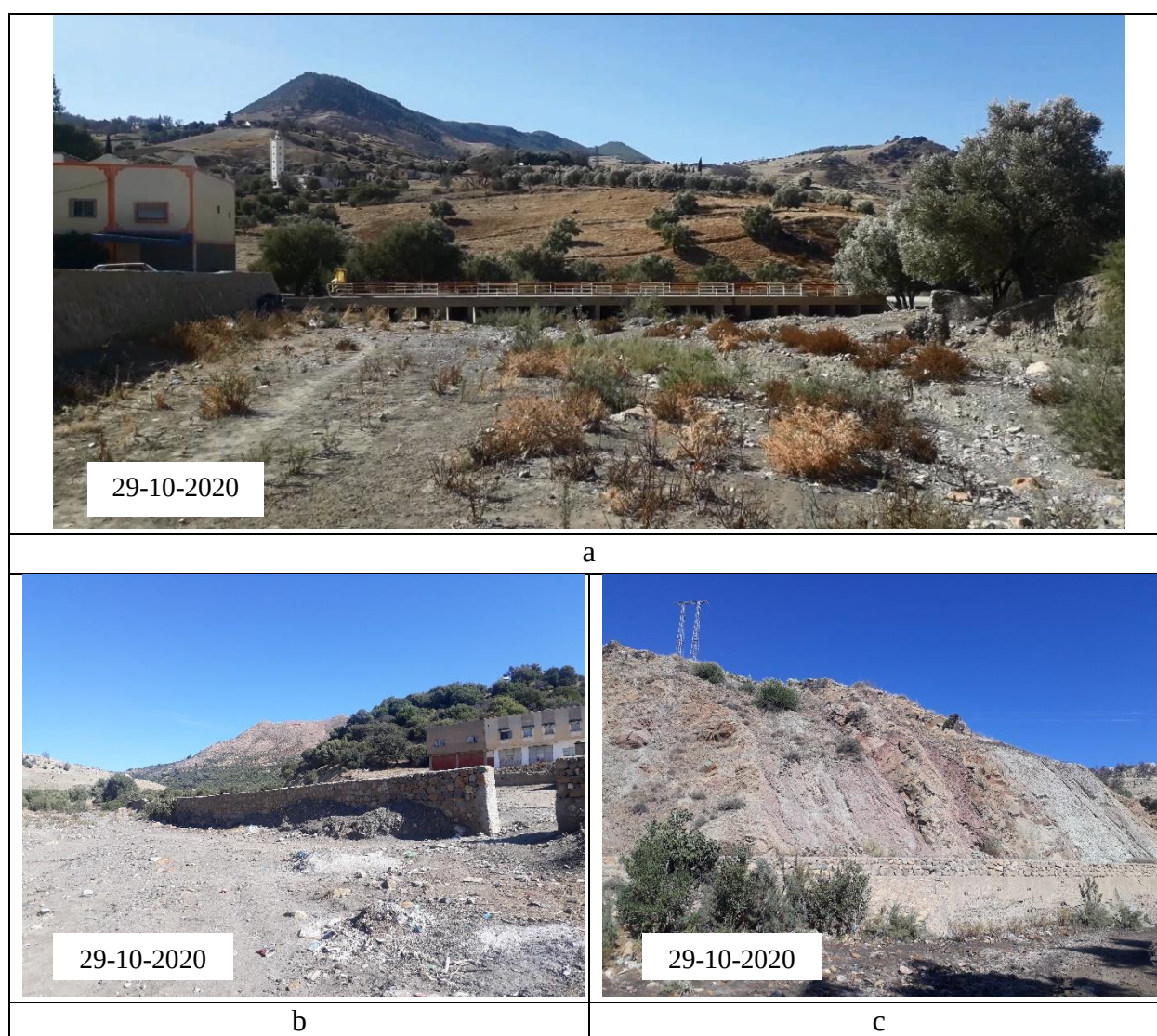


Planche 4. 1 - Photos montrant la situation de quelques sites au secteur de Bni Ftah.

a : situation du pont situé au voisinage de Souk.

b : situation de mur protège le Souk.

c : situation de mur protège la route (R508).

2 DESCRIPTION DES LOGICIELS UTILISES ET DU MATERIEL EXPERIMENTAL :

La connaissance des matériels de travail et des outils informatiques utilisés est extrêmement importante. Elle permet de collecter le maximum d'informations sur ces moyens et ainsi d'en développer une assez bonne maîtrise, afin de mener à bien le travail expérimental et l'ensemble des simulations. Dans ce présent travail il sera présenté le matériel, et présenté le mode de calcul des logiciels Arc-GIS et Hec-RAS, ses capacités et ses limites.

Il faut tout d'abord signalé que nous avons choisi de se servir d'un code informatique unidimensionnel qui a prouvé son efficacité dans ce genre de calcul hydraulique. Il s'agit bien du code Hec-RAS (Hydrologic Engineering Center, River Analysis System ou système d'analyse des rivières du Centre d'ingénierie hydrologique) élaboré par l'US Army Corps of Engineers, et publié en freeware depuis 1995. Ce logiciel s'est déjà montré très performant pour ce type d'étude, et bon nombre d'entreprises et de laboratoires le considèrent comme l'outil idéal de première approche (Debiane 2000 et Champredonde.2006). Ce système permet d'analyser les débits et le niveau d'eau dans le lit des rivières et de déterminer les zones inondables. Il intègre de nombreux moyens de saisie de données, de composants d'analyse hydraulique, de stockage de données, de restitution sous forme de tableaux et de graphiques.

Nous disposons de la version (Hec-RAS) disponible gratuitement sur le site officiel HecRAS.

En plus du code HEC-RAS, nous nous sommes servis du fameux logiciel ArcGIS, le leader en matière des systèmes d'information géographique.

Les échanges entre les deux programmes étant assurés par une extension développée aussi par HEC, le corps des ingénieurs de l'armée américaine : Hec-GEORAS, Le tout forme donc un dispositif informatique cohérent qui permet dans un premier temps de préparer les données géométriques requises (preprocessing), de faire ensuite les calculs nécessaires (simulation), et d'exploiter enfin les résultats (postprocessing).

5.2.4. Hec-GéoRAS :

Afin de rendre possible les échanges entre Hec-RAS et les systèmes d'information géographique, le corps des ingénieurs de l'armée américaine a développé cet extension qui s'intègre après installation avec ArcGIS. La dernière version de Hec-GEORAS disponible sur le site officiel de Hec-RAS, est Hec-GéoRAS qui est compatible avec ArcGIS et qui nécessite au moins la licence ArcView en plus des deux extensions **Spatial Analyst** et **3D Analyst**.

Hec-GéoRAS est un ensemble de procédures, d'outils et d'utilitaires pour le traitement des données géo-spatiales dans ArcGIS en utilisant une interface utilisateur graphique. Il permet d'une part, la préparation des données géométriques à exporter vers HEC-RAS, et la récupération des résultats de simulation effectuée par Hec-RAS. L'élaboration du fichier de la géométrie à exporter, est basée sur un modèle numérique de terrain qui doit être de préférence sous forme de TIN.

Les données résultantes de la simulation par Hec-RAS, peuvent être exploitées par Hec-GéoRAS sous ArcGIS pour analyser et cartographier les zones inondables, en plus d'autres possibilités.

5.2.5. ArcGIS :

Arc GIS est un logiciel permettant d'exploiter un Système d'Information Géographique (SIG). Un logiciel SIG permet l'acquisition, le stockage, la mise à jour, la manipulation, et le traitement de données géographiques. De plus, il permet de faire de la cartographie et de l'analyse spatiale de façon précise en fonction de l'échelle désirée.

Le principe directeur d'un SIG est le suivant : nous avons d'un côté les données géométriques et de l'autre les données attributaires. Ces données sont stockées sous format numérique et organisées par couches (appelées aussi « shapefiles » dans Arc GIS).

Petit point de détail : Arc GIS est en réalité une suite, qui se décline en trois versions (Arc View, Arc Editor et Arc Info). La différence entre ces versions est le nombre d'options supplémentaires disponibles, ArcView en possédant le moins. Ceci est indépendant des extensions (Spatial Analyst, 3D Analyst... que l'on peut acheter en supplément de chaque série).

Chacune de ces trois versions de la suite Arc Gis est constitué d'une interface Arc Map et d'une interface Arc Catalog. La version 10.3 apporte la possibilité de gérer Arc Catalog et ArcToolBox directement depuis l'interface d'Arc Map (Guerbi et Abdelkebir.2017).

5.2.6. Hec-RAS :

Hec-RAS, Hydrologic Engineering Centers River Analysis System (Système d'analyse des rivières du Centre d'ingénierie hydrologique) est un logiciel de modélisation hydraulique destiné à simuler l'écoulement dans les cours d'eau et les canaux. Le modèle utilisé est unidimensionnel, ce qui signifie qu'il n'existe pas de modélisation directe des variations hydrauliques dues aux changements de forme de la section transversale, à la présence de coudes ou autres aspects d'un écoulement 2D ou 3D.

Le programme a été élaboré par le ministère américain de la Défense (corps des ingénieurs de l'armée des Etats-Unis) dans le but de gérer les rivières, les ports et autres travaux publics relevant de leur compétence, il a été largement diffusé de par le monde depuis sa publication en 1995. Développé par Hydrologic Engineering Center (HEC) en Californie, ce système permet aux ingénieurs en hydraulique d'analyser les débits dans le lit des rivières et de déterminer les zones inondables. Il intègre de nombreux moyens de saisie de données, de composants d'analyse hydraulique, de stockage de données, d'édition de rapports sous forme de tables et de graphiques.

3 PHYSIQUE D'UN MODELE HYDRAULIQUE : LES EQUATIONS A RESOUDRE :

3.1 Régime permanent :

Le régime permanent désigne un écoulement dont les caractéristiques ne varient pas dans le temps. Cela se traduit mathématiquement par la nullité de toutes les dérivées partielles des grandeurs par rapport au temps. De plus, en régime stationnaire, les modèles hydrauliques utilisés pour l'étude des inondations de plaine sont pour la plupart basés sur la résolution des équations de Barré de Saint-Venant (équations tridimensionnelles de Navier-Stokes intégrées sur la verticale) (Roux. 2004). Le logiciel Hec-RAS utilise ces équations pour relier les hauteurs d'eau et les débits.

3.1.1 Équation de conservation de l'énergie :

Le logiciel Hec-RAS est utilisé pour calculer les niveaux d'eau, les niveaux d'énergie, les débits maximaux atteints dans les rivières et d'autres variables de sortie (Fig. 4.5).

Les profils des niveaux d'eau sont calculés d'un profil en travers au suivant en résolvant l'équation d'énergie avec une procédure itérative appelée la méthode de pas standard (the standard step method). L'équation d'énergie s'écrit comme suit :

$$Y_2 + Z_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} = Y_1 + Z_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + h_e$$

Y_1, Y_2 : hauteur d'eau au niveau des profils en travers

Z_1, Z_2 : cote du fond

V_1, V_2 : vitesse moyenne

α_1, α_2 : coefficients de pondération

g : accélération de la pesanteur

h_e : perte de charge

La perte de charge entre deux positions 1 et 2 est composée par les pertes dues à la friction et à la contraction. L'équation de la perte de charge « h_e » est définie par l'équation suivante :

$$h_e = L\bar{S}_f + C \left| \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \right|$$

L : La longueur pondérée du tronçon

$\bar{S}_f$: La pente représentative de frottements ;

C : Coefficient de contraction ou d'expansion.

Selon les équations, la hauteur d'eau est déterminée en utilisant une hauteur d'eau connue à l'aval lorsque l'écoulement est fluvial ou à l'amont pour un écoulement torrentiel.

On voit donc que le débit sur chaque section est calculé à partir du niveau d'eau. En effet, le rayon hydraulique, la section mouillée et les pertes de charge dépendent du niveau d'eau. Nous pouvons visualiser cette rétention de charge à l'aide de la figure suivante :

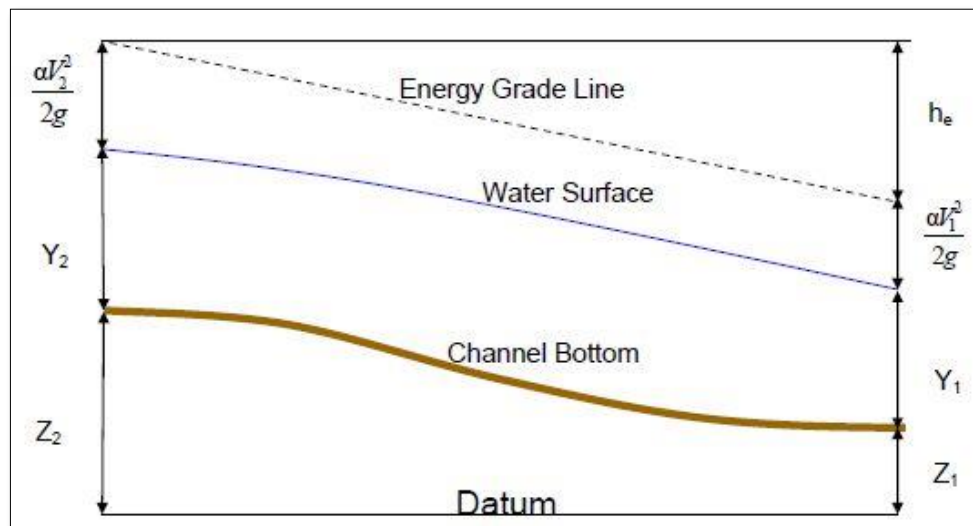


Fig. 4. 5 - Conservation de la charge entre deux sections (USACE, b, 2010).

3.1.2 Subdivision du profil en travers pour le calcul de transport :

La détermination du transport total et du coefficient de vitesse pour une section transversale nécessite que le débit soit subdivisé en unités auxquelles la vitesse est uniformément répartie.

L'approche utilisée dans la plupart des logiciels de modélisation y compris Hec-RAS est de subdiviser le flux dans des secteurs compartimentés en utilisant les points de subdivision de « n »

valeur(s) comme la base pour la subdivision (Fig. 4.6). Le transport est calculé dans chaque subdivision en utilisant la forme suivante de l'équation de Manning :

$$Q = K \times \sqrt{S_f} \text{ avec } K = \frac{1.486}{n} AR^{\frac{2}{3}}$$

K : le transport de subdivision

n : Coefficient de rugosité de Manning

A : surface d'écoulement

R : rayon hydraulique du compartiment

Le transport total pour le profil est obtenu en additionnant les trois transports de subdivision (gauche, le canal et le droit).

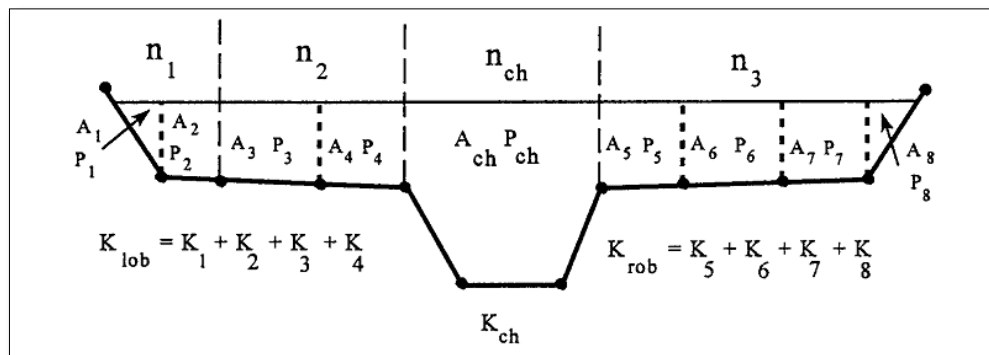


Fig. 4. 6 - Découpage de la section pour le calcul du frottement (USACE, b, 2010).

3.2 Régime transitoire :

Les lois physiques qui dirigent l'écoulement dans un cours d'eau sont : (1) le principe de conservation de masse (continuité) et (2) le principe de conservation d'Elan ou de vitesse. Ces lois sont exprimées mathématiquement en forme d'équations différentielles partielles.

3.2.1 Équation de Continuité :

Considérons le volume de contrôle élémentaire montré dans la Fig. 4.7. Sur cette figure, la distance x est mesurée le long du canal, comme indiquée. Au milieu du volume de contrôle, le flux et le secteur de flux total sont dénotés Q (x, t) et $\hat{A}$, respectivement.

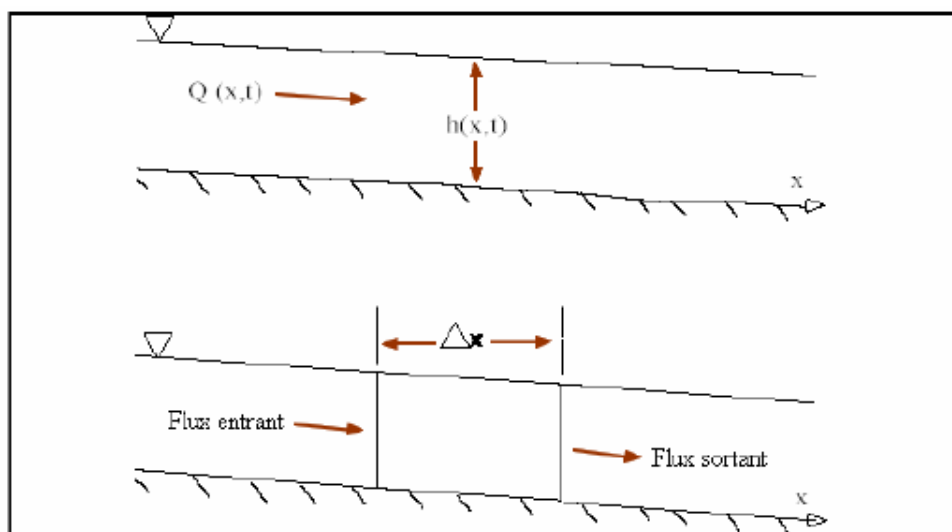


Fig. 4. 7 - Volume de contrôle élémentaire pour la dérivation des équations.

La loi de conservation de masse pour un volume de contrôle stipule que le débit moyen net dans le volume doit être égal au taux de changement de stockage à l'intérieur du volume. En assumant que Δx est petit, le changement de la masse dans le volume de contrôle est égal :

$$\rho \frac{\partial A_r}{\partial t} \Delta x = \rho \left[\left(Q - \frac{\partial Q}{\partial c} \frac{\Delta x}{2} \right) - \left(Q + \frac{\partial Q}{\partial c} \frac{\Delta x}{2} \right) + Q_t \right]$$

Où Q_t est le flux latéral entrant au volume de contrôle et ρ est la densité du fluide.

Simplifions l'équation en divisant par $\rho \Delta x$, on aura la forme finale de l'équation de continuité :

$$\frac{\partial A_x}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} - q_t = 0$$

3.2.2 Équation de la dynamique (conservation de la quantité de mouvement)

Lorsque la hauteur d'eau passe en dessous de la hauteur critique (ex. au niveau des ponts, des seuils, etc.) l'équation d'énergie n'est plus valable. Les calculs se basent alors sur l'équation de conservation de la quantité de mouvement afin qu'il y ait convergence des calculs :

$$\frac{\partial V}{\partial t} + (\mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{V} + g \left(\nabla Z + \frac{\mathbf{V} \|\mathbf{V}\|}{K_S^2 H^{4/3}} \right) = 0$$

Dans les équations () et (), H est la hauteur d'eau (m), V le vecteur vitesse (m.s-1) de composantes V_x et V_y (vitesses moyennes sur la verticale dans les directions x et y), q les éventuels apports ($q \geq 0$) ou pertes ($q < 0$) au m^2 (m.s-1), Z la cote de la surface libre (m) et K_s le coefficient de Strickler ($m^{1/3}.s^{-1}$), qui traduit le freinage à l'écoulement.

3.2.3 Schéma implicite des Différences Finies :

La procédure numérique la plus couronnée de succès et acceptée pour résoudre les équations d'écoulement transitoire unidimensionnel est le schéma implicite à quatre points. La stabilité des résultats finaux dépend de plusieurs facteurs qui influencent la solution du système. A cause de ces facteurs, n'importe quelle application du modèle devrait être accompagnée par une étude de sensibilité, où l'exactitude et la stabilité de la solution sont évaluées avec divers pas de temps et de distance.

La forme générale du schéma implicite est définie comme suit (Fig. 4.8) :

Dérivation par rapport au temps

$$\frac{\partial f}{\partial t} \approx \frac{\Delta f}{\Delta t} = \frac{0.5(\Delta f_{j+1} + \Delta f_j)}{\Delta t}$$

Dérivation par rapport à x

$$\frac{\partial f}{\partial x} \approx \frac{\Delta f}{\Delta x} = \frac{(f_{j+1} - f_j) + \theta(\Delta f_{j+1} - \Delta f_j)}{\Delta x}$$

La valeur de la fonction f est alors :

$$f \approx \bar{f} = 0.5(f_j + f_{j+1}) + 0.5\theta(\Delta f_j + \Delta f_{j+1})$$

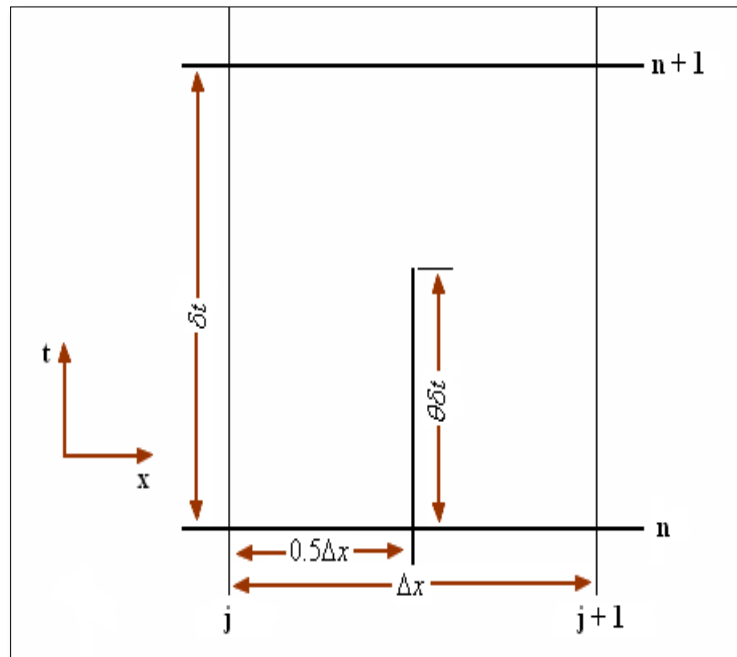


Fig. 4. 8 - Cellule typique de calcul par la méthode des différences finies.

4 Réalisation du modèle hydraulique de la zone d'étude :

4.1 Etude topographique :

La qualité de modélisation hydraulique dépend étroitement de la qualité des données topographiques, la résolution et la précision sont les deux facteurs qui régissent la qualité des données topographiques ; la résolution présente la finesse de maillage des levés sur le terrain tandis que la précision correspond à l'erreur absolue sur ces mesures.

Lorsqu'on utilise un modèle monodimensionnel pour une étude hydraulique à grande échelle, on doit fournir des données topographiques très étendues, de résolution fine et de bonne précision. Le modèle numérique de terrain MNT TIN (Terrain Irregular Network) est le meilleur fond topographique pour les modèles hydrauliques afin de bien représenter le terrain à grande échelle. Il exige un nombre beaucoup plus petit de points, représente le terrain extérieur avec exactitude et peut être aisément adapté à la complexité variable du terrain.

Néanmoins, Il a une taille beaucoup plus volumineuse que le fichier raster.

Afin de créer un MNT TIN, on a adopté une méthode qui intègre les données topographiques de provenances différentes à savoir :

- Des courbes de niveau ;
- Des points topographiques au lit mineur d'Oued Lahdar ;

4.2 Création et extraction des données topographiques pour l' Hec-RAS :

Sur la base des données retenues, le modèle de la vallée de l'Oued Lahdar a été monté. Nous nous sommes basés principalement sur un Modèle Numérique de Terrain (MNT) à grande précision altimétrique (1m). Ce MNT a été généré à partir de la digitalisation des courbes de niveau, à partir du fond topographique à grande échelle, (Plans de Restitution au 1/2000).

D'après Kreis (2004), les profils en travers doivent respecter cinq règles principales, pour qu'il soit représentatif :

- être perpendiculaires à la direction d'écoulement des eaux ;
- ne doivent pas se croiser ;
- doivent recouper toute la plaine d'inondation ;

- doivent décrire le profil en long du cours d'eau. Cela n'est pas toujours facile à réaliser dans le cas des cours méandriformes avec de larges plaines d'inondation ; et
- doivent prendre en compte les modifications géomorphologiques des lits mineurs et majeurs (élargissement, méandres, contraction, diffluence, etc.).

L'élaboration de cette base de données géométrique a été effectuée à l'aide de l'outil Hec-Géo-Ras, intégré avec le programme de l'ArcMap. Les couches élaborées sont importées vers le logiciel Hec-Ras, pour continuer le montage de cette base de données. Cette étape représente

L'assemblage de la base géométrique préliminaire vise à déterminer toutes les couches qui constituent l'ossature de la vallée au niveau des communes Had Msila et Bni Ftah, tel que la rivière (River), et les rives ou les berges (Banks), les trajets d'écoulement (Flow path), etc., (Fig. 4.9 et Fig. 4.10).

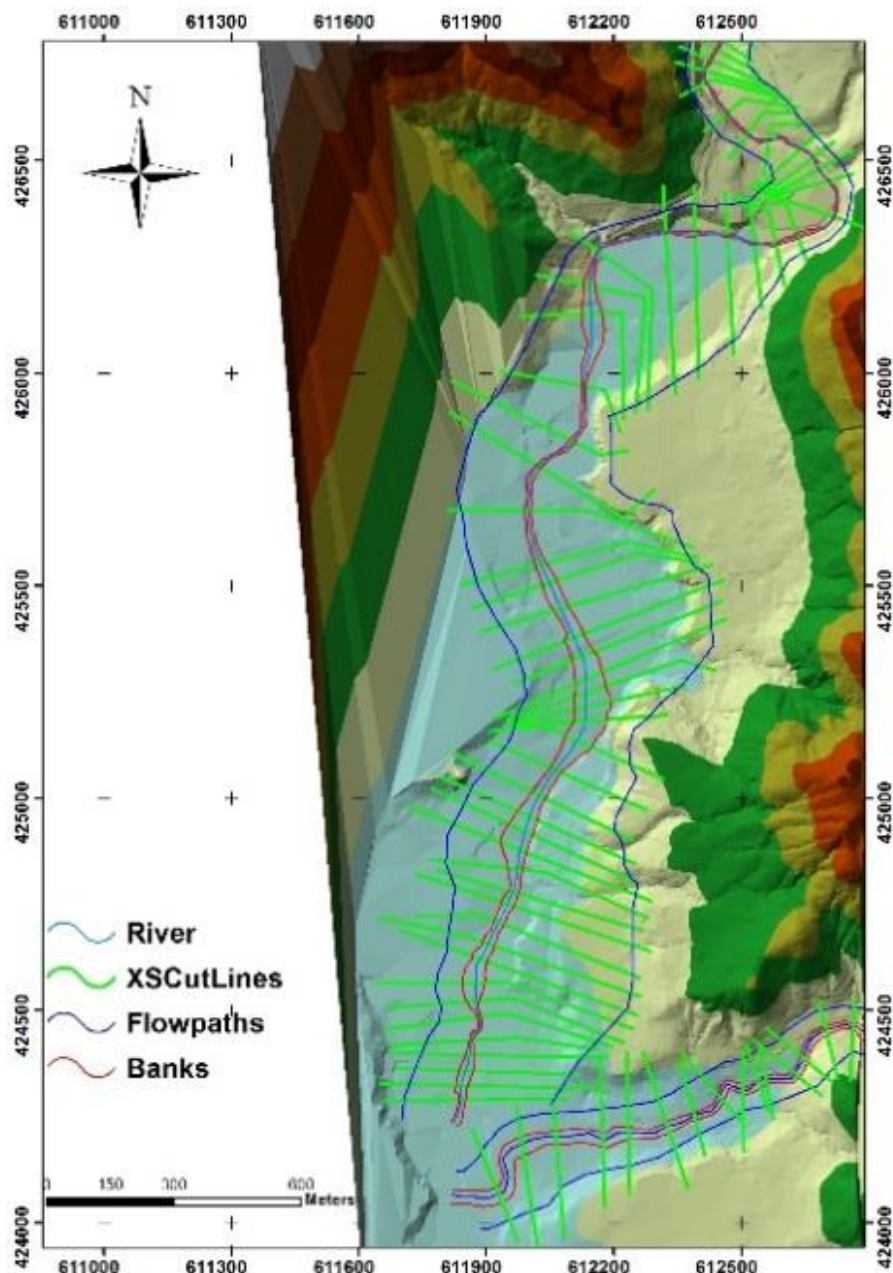


Fig. 4. 9 - la géométrie de la zone d'étude développée par Hec-GEORAS sous ArcGIS. niveau du Centre Had Msila.

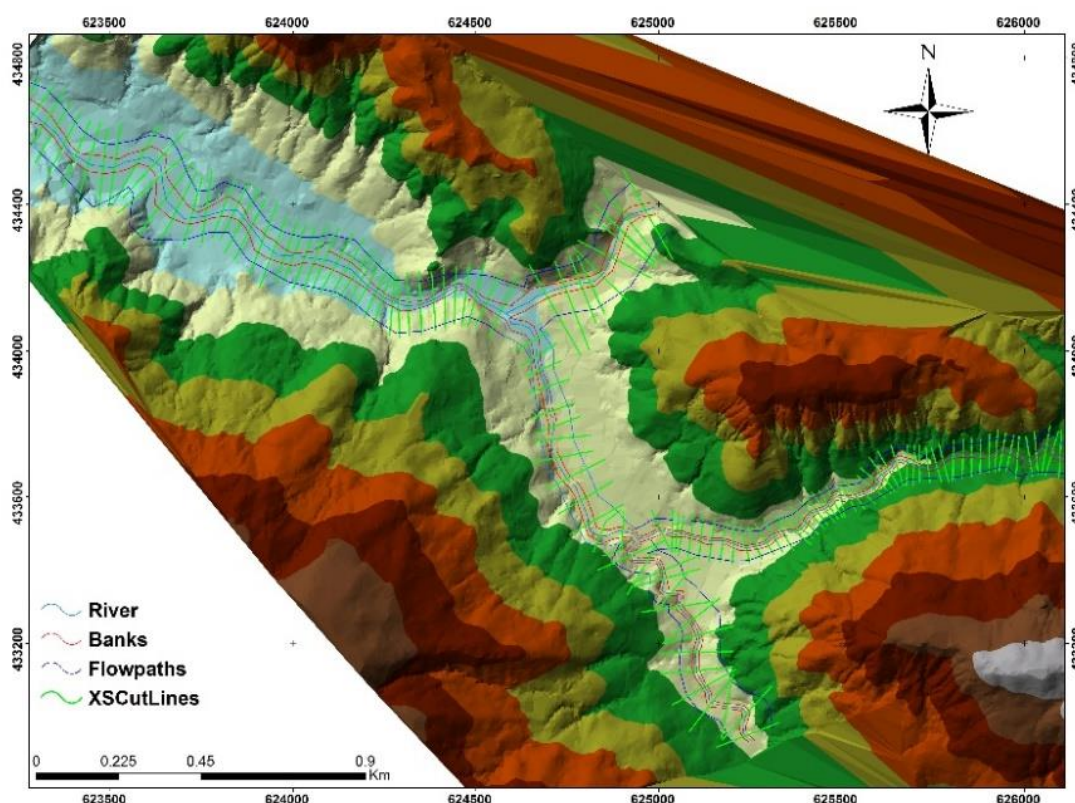


Fig. 4. 10 - Géométrie de la zone d'étude développée par Hec-GEORAS sous ArcGIS au niveau du Centre Bni Ftah

Nous allons intégrer les résultats de la géométrie du tronçon dans le logiciel Hec-RAS pour intégrer les débits extrêmes prédéterminés, en plus des paramètres physiographiques, notamment la pente et la rugosité du lit. Ceci pour pouvoir calculer la distribution du débit le long du profil de l'Oued, ce qui a permis de réaliser une simulation de l'extension hydrologique.

Les résultats des calculs réalisés avec le logiciel Hec-RAS sont transférés à l'outil du Système d'Information Géographique géoréférencé ArcGis, pour l'élaboration des cartes de l'étendue des crues et des zones inondables.

4.2.1. L'interpolation entre les profils transversaux :

Afin d'améliorer la stabilité du modèle pour le calcul du niveau d'eau, nous avons choisi une distance égale à 10 m, entre deux sections transversales, où la pente et les propriétés des sections varient de façon linéaire entre les sections consécutives, (Fig. 4.11).

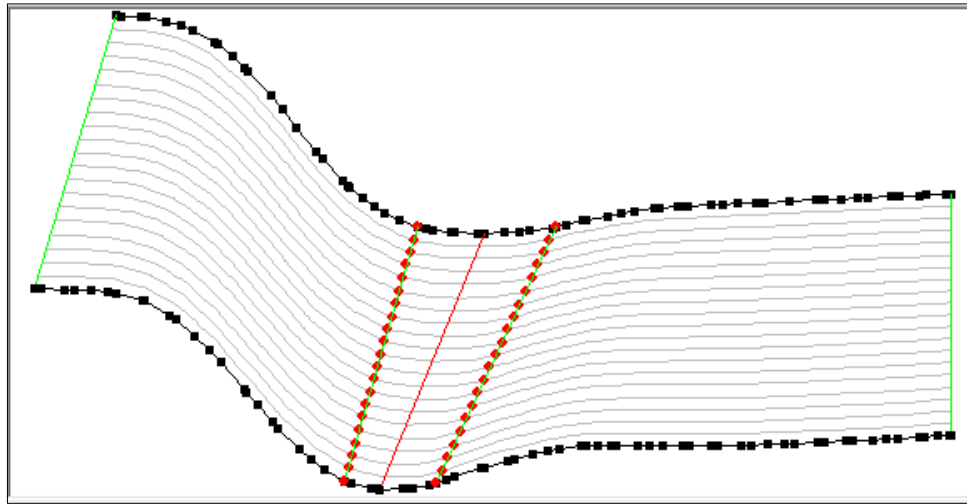


Fig. 4. 11 - Exemple d'interpolation entre deux profils consécutifs, à Had Msila.

4.2.2. Coefficients de rugosité :

Les valeurs des coefficients de rugosité ont été déterminées sur la base des observations de terrain, en se reportant aux tableaux de références données dans la littérature, (White, Colebrook, Bazin et Strickler). La connaissance du terrain, particulièrement les données géologiques, géotechniques, et l'expérience des travaux d'ingénierie aident à choisir les valeurs adéquates. Le coefficient ainsi choisi dans le cas de l'Oued Lahdar est de 0,030 pour le lit de l'Oued large avec une granulométrie assez fine sablo limoneuse et de 0,035 sur les lits exploités en terrasses agricoles. Ces coefficients ont été adoptés pour l'intégralité des tronçons des Oueds modélisés.

4.2.3. Problèmes rencontrés lors de la construction géométrique

4.2.3.1. Problème des levées :

Le problème des levées expose un grand défaut pour la modélisation hydraulique sur Hec-RAS, car pour un cours d'eau à style anastomosé ou en tresse on s'attend à avoir deux chenaux ou plus, chacun avec ses propres levées. Par contre le logiciel n'autorise qu'un point de levée par rive et par profil. Ce qui pose un problème au niveau des résultats de la simulation. Mais, pour remédier au problème et diminuer la marge d'erreur, nous avons pris en considération le chenal le plus profond.

4.2.3.2. Problème d'un lit mineur à méandres très marqués :

Il devient difficile de tracer des profils en travers lorsque le lit mineur dessine des méandres très marqués (Fig. 4.12) et que la direction d'écoulement à pleins bords peut être perpendiculaire voire opposée à la direction de l'écoulement débordant. Dans ce cas, nous avons tracé des profils transversaux non-rectilignes, perpendiculaires juste au lit mineur, essentiellement pour éviter leurs croisement.

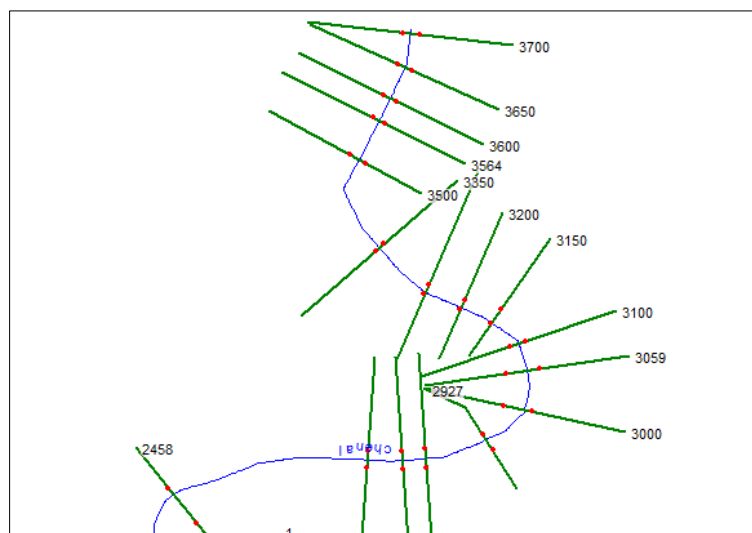


Fig. 4. 12 - Situation des profils en travers dans les méandres.

4.2.4. Débits et conditions limites :

Après avoir introduit la géométrie du cours d'eau, l'étape suivante est de spécifier les débits utilisés pour calculer les profils d'écoulement. Pour cela, on a engagé la simulation hydraulique en régime permanent avec les cinq valeurs des débits qui sont obtenus dans la partie hydrologique et qui correspondents aux périodes de retours 10, 20, 50, 100 et 1000 ans (Tabl. 4.1)

La modélisation hydraulique avec Hec-RAS nécessite la spécification des débits pour calculer les profils d'écoulement.

Tabl. 4. 1 - Débits adoptés pour la simulation hydraulique.

Cours d'eau	Q en m ³ /s pour différentes fréquences (Q _{PT})				
	T=10 ans	T=20 ans	T=50 ans	T=100 ans	T=1000 ans
Oued Lahdar (au niveau de Had Msila)	229.05	265.46	369.67	458.58	599.49
Oued Lema (au niveau Bni Ftah)	96.83	108.91	156.93	217.62	263.70
Oued Rhnalla (au niveau de Had Msila)	43.48	49.53	75.35	106.01	139.61
Oued Dira (au niveau Bni Ftah)	27.43	37.07	50.55	62.74	91.61
O. Bni Ftah	50.15	74.10	103.70	124.61	173.53
Oued Mized (au niveau Bni Ftah)	27.91	39.20	54.57	65.18	89.55
Oued Assamer (au niveau Bni Ftah)	34.85	48.49	65.71	72.57	120.69

Les valeurs des débits qui sont entrées aux cases correspondantes sont représentatives de la section amont et sont considérés valides sur tout le tronçon de la rivière.

4.2.5. Calage et validation :

Pour ajuster le modèle, nous avons procédé en le calage. Il comprend la comparaison des résultats obtenus avec les résultats d'autres régions similaires (BV de l'Oued Larbaâ) et avec les archives des événements historiques. Dans cette simulation hydraulique, le modèle a été calé à partir de la crue de l'Oued Lahdar du 29-11-2010. A défaut, nous considérons que cette crue est significative de ce cours d'eau. Afin d'obtenir les mêmes cotes d'eau, les coefficients de Strickler ont été ajustés.

5 Simulation hydraulique au niveau des secteurs modélisés :

5.1 Visualisation et discussion des résultats :

La simulation de la situation actuelle du cours d'eau moyennant Hec-RAS a été faite, en se basant sur les résultats de l'étude hydrologique.

Selon le débit de crue de chaque rivière, le niveau d'eau et la répartition des débits dans chaque section élémentaire sont variés. Ceci dépend des débits dans chacune des rivières et des capacités d'écoulement de chacune d'elles.

La saisie des données géométriques concernant les profils des sections transversales et les débits de projets de différentes périodes de retour, ainsi que les conditions limites dans le logiciel Hec-RAS a permis d'effectuer les calculs et d'extraire des résultats comme la vue en profil du tronçon simulé, le niveau d'eau de chaque période de retour sur les profils, une vue de trois dimensions du niveau d'eau dans le tronçon d'étude des tables descriptives (Annexe), et la courbe de tarage.

Dans notre étude nous avons modélisé le cours d'eau qui traverse les Centres territoriaux Had Msila et Bni Ftah. Lors des crues on observe alors sur presque tous les tronçons modélisés un énorme débordement.

5.1.1. Analyse des Vitesses d'écoulement :

Les résultats obtenus représentent la variation de la vitesse d'écoulement d'eaux pour chaque période de retour en fonction de la distance à partir de l'exutoire sur la bordure gauche, au centre et la bordure droite de la rivière.

En générale, d'après les graphes on observe presque la même allure pour tous les niveaux d'eau, il y a une alternance de la variation de vitesse ; parfois la vitesse d'écoulement augmente et d'autre diminue, on se déplaçant de l'amont vers l'aval du tronçon, on observe que la vitesse devient plus importante à l'exutoire celle-ci provient à la variation de la topographie de la zone étudiée. On observe aussi que la vitesse varie entre la droite et la gauche de tronçon ; elle est plus importante au niveau de la gauche toute en long de la rivière.

En général, La vitesse d'écoulement influence directement sur l'importance de l'érosion et la quantité du volume transporté par les eaux de crue.

A titre exemple le tronçon de Had Msila, d'après la Fig. 4.13 on remarque que l'allure de la vitesse augmente et diminue en fonction de la variation de la distance, cette variation est due à la topographie du terrain.

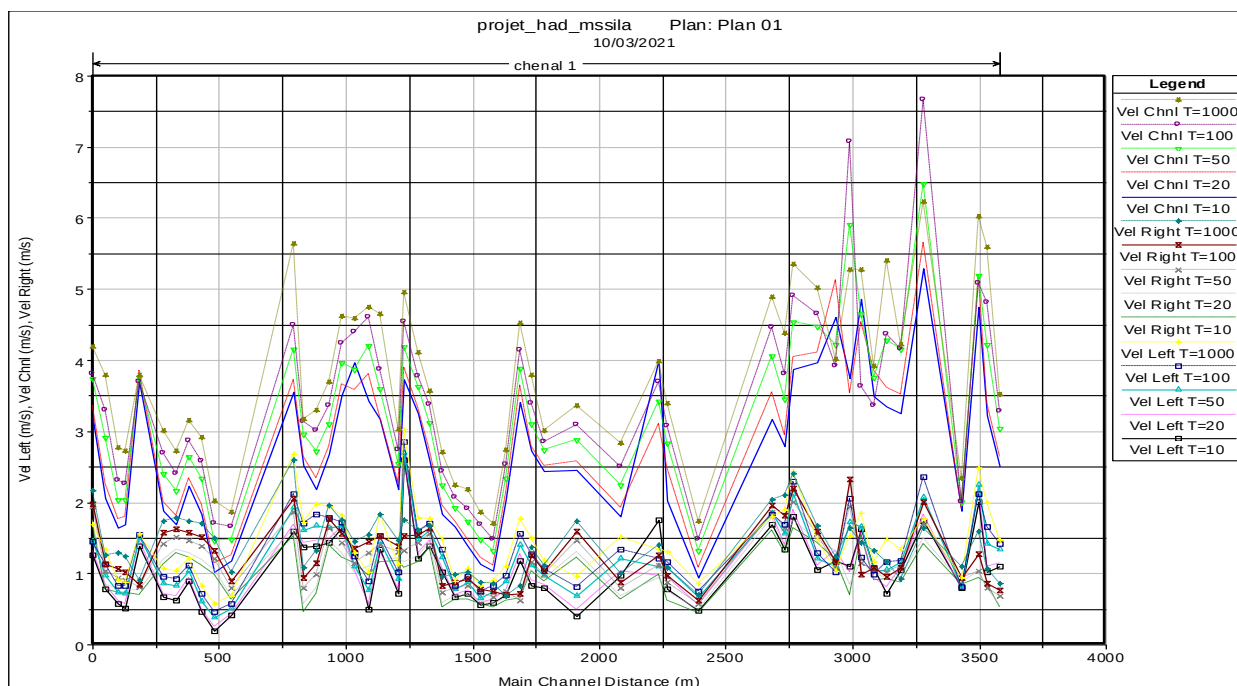


Fig. 4. 13 - Vitesse d'écoulement en fonction de la distance pour chaque période de retour (tronçon de Had Msila).

En aval et à partir de l'exutoire la vitesse est moyennement faible avec une valeur de 3.5 m/s à une distance de 3280 m et commence à augmenter jusqu'à une valeur de 6.2 m/s à une distance de 3600 m, cette augmentation de vitesse est due à la présence d'une forte pente. Pour la vitesse qui se situe au centre de la rivière est plus importante que les vitesses à la rive droite et gauche.

En général, La vitesse d'écoulement influence directement sur l'importance d'écoulement et la violence d'eaux de crue.

5.1.2. Ligne d'eau :

La ligne d'eau représente une vue en profil du tronçon d'étude avec le niveau et la surface d'eau de l'Oued et le niveau d'eau de chaque période de retour.

Le programme de Hec-RAS utilise ces profils dans la clarification des niveaux atteints par les eaux des crues de différentes périodes de retour. Les résultats de cette simulation permettent de comparer les hauteurs de chaque tronçon durant les différentes crues.

On va prendre un exemple du Oued dira, la figure Fig. 4.14 montre le profil en long du cours d'eau de la situation existante, On remarque que le niveau d'eau pour la crue de 10 ans varie de 1 m à 3m avec une distance allant de 0 à 100m, et à partir de cette distance (x=100m) on remarque que la hauteur d'eau augmente progressivement pour le débit de 50 ans à 100 ans donc cette zone est potentiellement inondable,

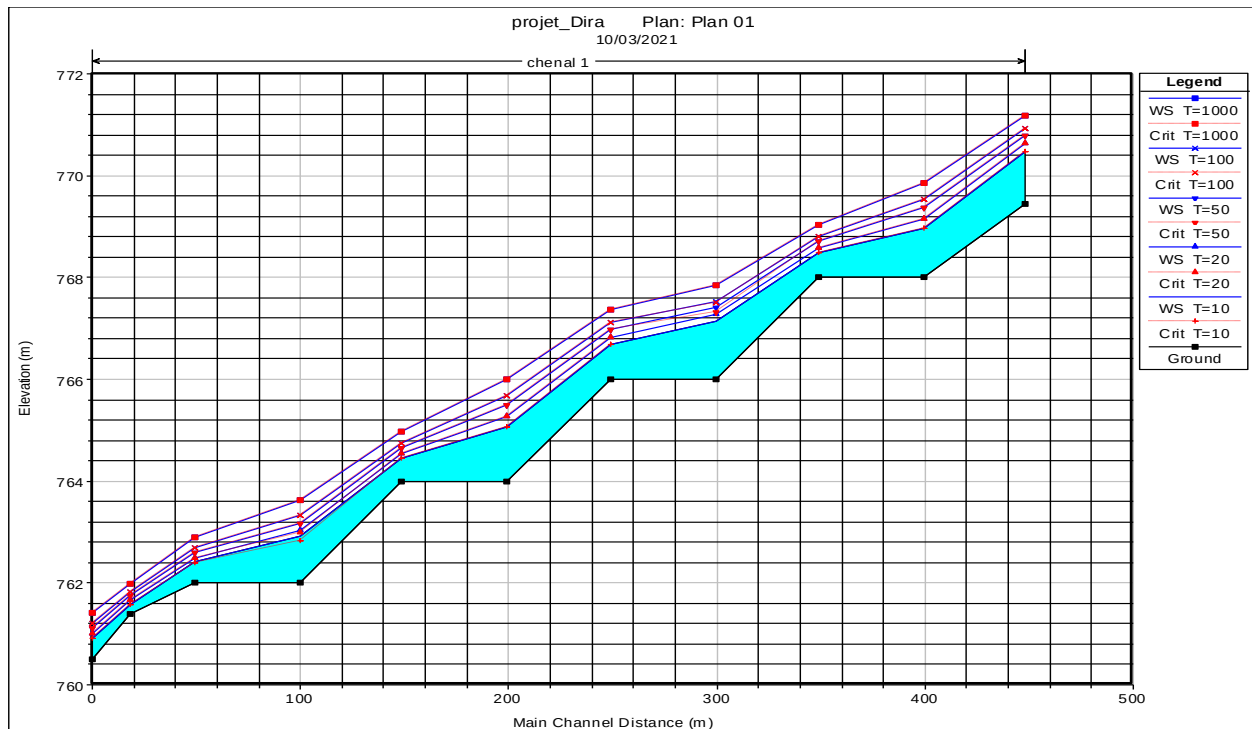


Fig. 4. 14 - Ligne d'eau du tronçon modélisé de l'Oued Dira.

Dans le cas de cette étude, la différence entre les niveaux des périodes de retour est bien visible. Le comportement des crues est sensible aux irrégularités de la topographie.

5.1.3. Restitution de la courbe de tarage :

Le logiciel Hec-RAS a permis de fournir une représentation de la variation de la hauteur d'eau en (m) en fonction de débit m^3/s dans les Sept tronçons modélisé aux niveaux du Centre Had Msila et Bni Ftah.

La courbe de tarage décrivant la relation expérimentale entre les hauteurs d'eau et les débits correspondants d'un cours d'eau. La courbe reliant les points expérimentaux apparaît généralement linéaire pour les hauteurs fortes et moyennes ; en absence d'équation mathématique la représentant fidèlement, la relation est utilisée sous sa forme graphique.

Chaque tronçon étudié a ses propres caractéristiques. Les courbes de tarages soulignent la différence entre les sept tronçons d'une part et entre l'amont et l'aval du même tronçon d'autre part (Annexe.). A titre d'exemple, un débit de $250 m^3/s$ correspond à 1.5 mètres en amont et 3.5 mètres en aval du tronçon de l'Oued Lema qui représente le cours d'eau principal du Centre Bni Ftah (Fig. 4.15).

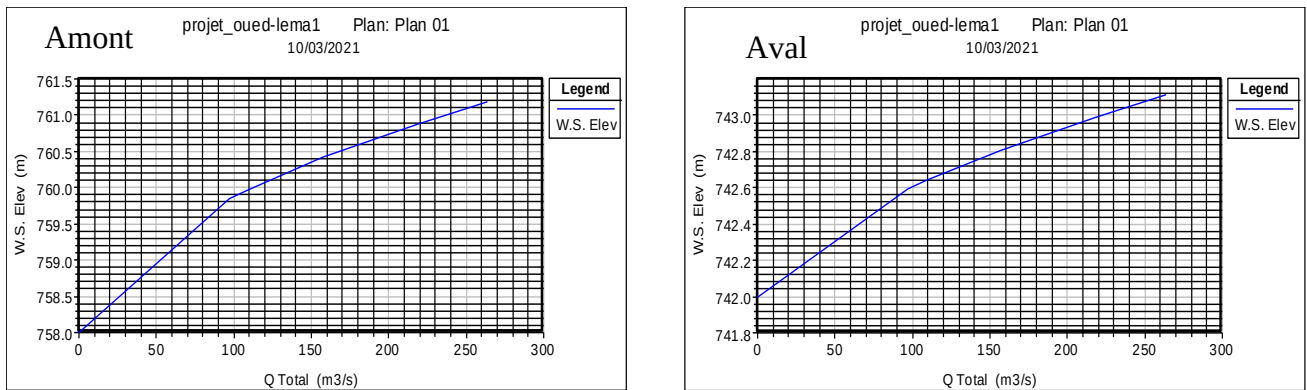


Fig. 4. 15 - Courbes de tarage obtenu à partir de Hec-RAS d'Oued Lema

Les causes d'instabilité de la relation hauteur-débit sont multiples : évolution du fond meuble, développement de la végétation aquatique, couche de glace en amont ou en aval de la section de mesure, accumulation de débris.

5.2 Détermination des sites en danger par les crues de projet :

L'objectif de cette modélisation est de simuler les crues de l'Oued Lahdar pour différentes périodes de retour et de générer par la suite la cartographie des hauteurs d'eau et des vitesses d'écoulement pour la crue de référence. Ces deux paramètres serviront après pour établir les cartes des zones inondables.

La simulation hydraulique du passage des crues décennales, vingtennales, cinquantenales et centennales et millénaires à l'état actuel de l'Oued nécessite une analyse approfondie de la topographie du terrain naturel et la nature des écoulements de l'Oued Lahdar dans la zone d'étude.

Les résultats obtenus se rapportant aux différentes crues sont encourageants. Toutefois, la mise en œuvre de ces modèles numériques est un travail fastidieux car il nécessite la collecte d'une énorme base de données spatio-temporelle, multisources et multidisciplinaires. D'un autre côté, la zone d'étude considérée présente une multitude de contraintes de modélisation, car le réseau hydrographique présente plusieurs méandres.

L'option d'affichage des résultats par profil transversal, permet d'acquérir le maximum de détail à chaque point choisi du tracé du cours d'eau.

5.2.1. Crue décennale :

Le débit de la crue décennale de l'Oued Lahdar au niveau de Centre Had Msila est de $229.05 \text{ m}^3/\text{s}$. Ce débit traversant la plaine alluviale au niveau de Centres. La section mouillée dont la largeur varie en fonction des caractéristiques morphologiques de la plaine fluviale. La crue décennale ne provoquerait pas des inondations, seuls quelques débordements s'observent au niveau de la route R 508 qui relie le Centre de Had Msila et Centre de Taineste. Qui se trouve déjà dans la zone inondable sur la rive gauche de l'Oued. La hauteur maximale de débordement par rapport au bord supérieur de la rive gauche est de 3m, (Fig. 4.16), par contre la route surplombe le chenal de 2 à 2.5 m (Photo 4.1).

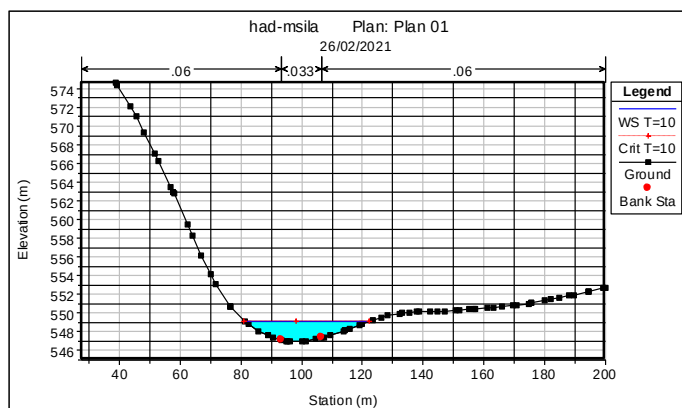


Fig. 4. 16 - Cote atteinte et la largeur mouillée par la crue décennale de l'Oued Lahdar.

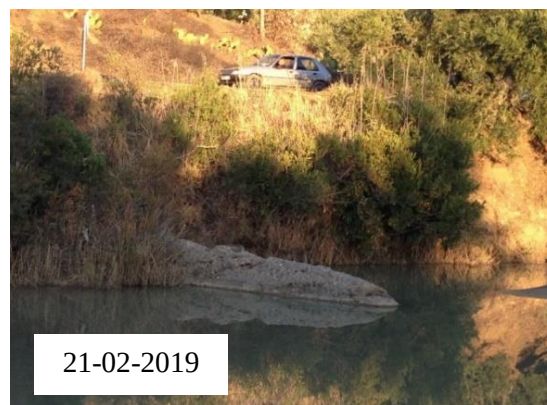


Photo 4. 1 - Situation de route RR508 au niveau de méandre.

En effet cette route est habituellement menacée par les inondations, l'interruption du trafic routier et l'isolement des habitants du Centre Msila et Douars avoisinants, (Photo 4.1). Ce tronçon de la route est d'autant plus vulnérable que le sapement de la berge concave très active s'ajoute à la fréquence des submersions.

Au niveau de Centre Had Msila, l'inondation du 04-11-2011, illustre cet événement de crue décennale. En effet, la station Msila a enregistré 85 mm de pluie journalière. Cette valeur est équivalut à la période de retour 10 ans.

Au niveau de Centre de Bni Ftah l'exemple des précipitations du 21-septembre 2008 étant le témoin le plus important pour cette période de routeur.

La simulation des crues décennales de l'O. Lahdar au niveau du Centre Bni Ftah détermine plusieurs sites menacent à l'intérieur de Centre, la hauteur de la crue décennale diffère selon les différents tronçons modélisés. L'importance des enjeux varie d'une zone à l'autre.

Malheureusement, ces zones sont caractérisées par un pont ($x : 626, y : 433$), situé à l'entrée de Centre de Bni Ftah, (Photo 4.2). Ces submersions risquent d'interrompre le trafic important de piétons et de véhicules.

La figure 4.17 montre l'extension de la zone touchée par la crue décennale. La hauteur d'eau atteint la cote 772.6 m,

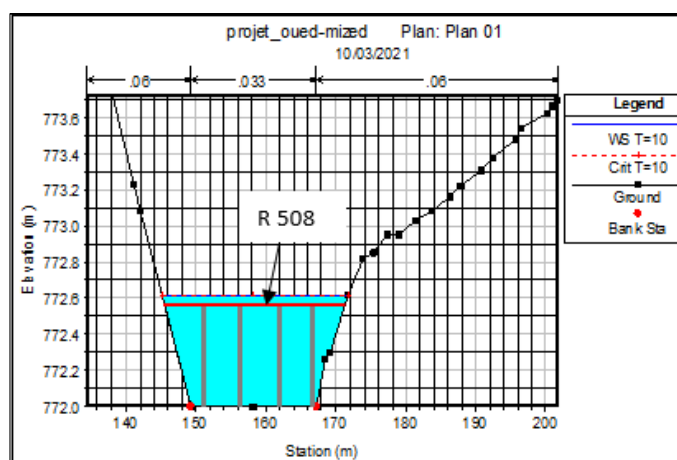


Fig. 4. 17 - Cote atteinte et la largeur mouillée par la crue décennale de l'Oued Mized.



Photo 4. 2 - Situation du pont ($x : 626, y : 433$), à l'entrée de Centre de Bni Ftah.

Cette crue (décennale) n'entraînera aucun risque d'inondation pour les installations locales. Parce que la surface d'installation humaine est élevée que le niveau atteint par la crue décennale.

5.2.2. Crue vingtennale :

La BV de Lahdar a connu le 29-11-2010 des précipitations importantes qui ont dépassé la valeur de 110 mm et ont duré pendant quelques jours et ont engendré des crues de l'Oued Lahdar. Ont persistées quelques jours et ont provoqués des dégâts.

Les précipitations de 29 novembre représentent 102.4 mm. Les sols étant déjà saturés par les précipitations des jours précédents 29, ne peuvent plus éponger la moindre quantité d'eau. Ces inondations ont provoquées des dégâts au niveau des habitations et des infrastructures. L'ajustement de cette valeur par la loi de Gumbel, a donné des résultats de débit $265.46\text{m}^3/\text{s}$ qui correspondent le cure vingtennale :

La crue vingtennale produit quelques débordements qui s'observent sur la route P5414 à la rive droite de l'Oued Lahdar (Photo 4.3). La figure. 4.18 montre la hauteur maximale de débordement par rapport au bord supérieur de la rive droite est de 2.5m. Pour la rive gauche, cette crue affecte des zones aménagées et des zones occupées par un couvert végétal non hydrophile tel que les champs d'oliviers.

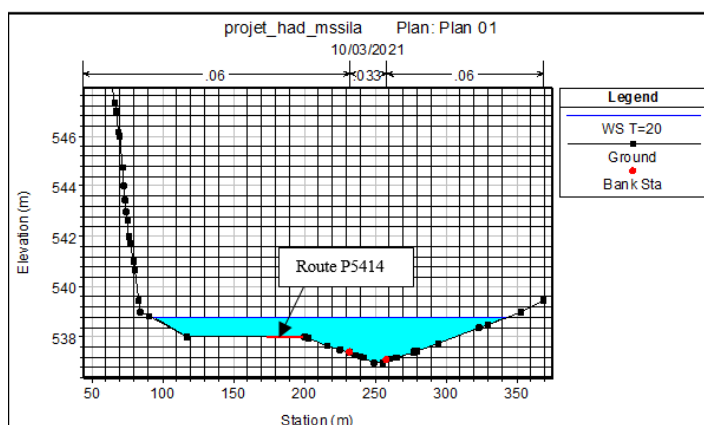


Fig. 4. 18 - Cote atteinte et la largeur mouillée par la crue vingtennale de l'Oued Lahdar.



Photo 4. 3 - Situation de route RP5414.

Le long de l'Oued Lahdar, un certain nombre d'installations humaines ont posé dans la plaine alluviale. Ce type d'occupation du sol renforce la vulnérabilité d'implantation face au risque d'inondation tel que les crues vingtennales.

D'après les résultats de la simulation hydraulique au niveau de Centre Bni Ftah, nous constatons que la crue vingtennale submerge les zones déjà inondées par la crue décennale, et que le débordement est plus fort que la crue décennale sur ces zones.

5.2.3. Crue cinquanteennale :

Le temps de retour de cette crue étant de 50 ans, le risque d'inondation de ces terrains de la plaine alluviale de l'Oued Lahdar étant moyen. Les résultats de l'estimation des crues de projets pour la période de 50 ans donnent des valeurs de débits de $369.67\text{m}^3/\text{s}$ pour Oued Lahdar et 75.35

m³/s pour Oued Rhnalla (affluent rive droite de l'Oued Lahdar). Ces débits peuvent être atteints lorsque les pluies dans le BV de Lahdar dépassent 116.5 mm / jour.

Certaines crues ont été enregistrées dans le bassin versant de l'ordre cinquantennale ont exposé des installations humaines et de plusieurs infrastructures hydro-agricoles ont été endommagées et un grand nombre de têtes de cheptel a été emporté par les eaux. On note principalement celles du 23 décembre 2010.

La simulation hydraulique montre que la hauteur d'eau produite par la crue cinquantennale de l'Oued Rhnalla atteint la cote 559.5 m, et correspond à un débordement de 1 m sur le pont reliant Had Msila à la ville de Taza.

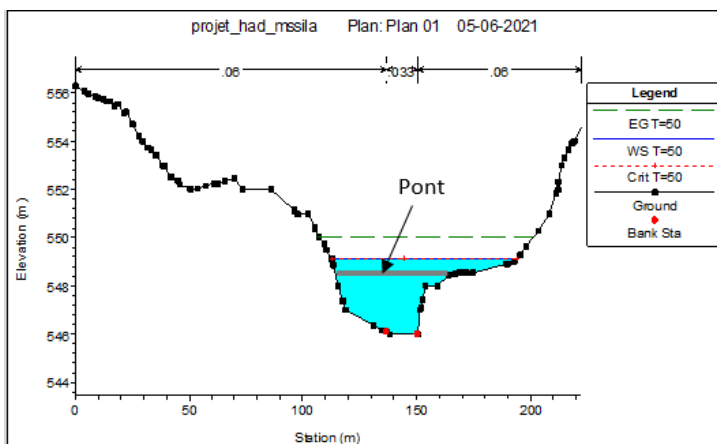


Fig. 4. 19 - Cote atteinte et la largeur mouillée par la crue cinquantennale de l'Oued Rhnalla.



Photo 4. 4 - Situation du Pont reliant Had Msila et la ville de Taza (RR508).

Au niveau du Souk de Bni Ftah et exactement à la section de l'Oued Dira, la figure 4.20 nous constatons les positions de la ligne de surface de l'eau pour la fréquence cinquantennale, la surface inondée est très importante et le débordement grave.

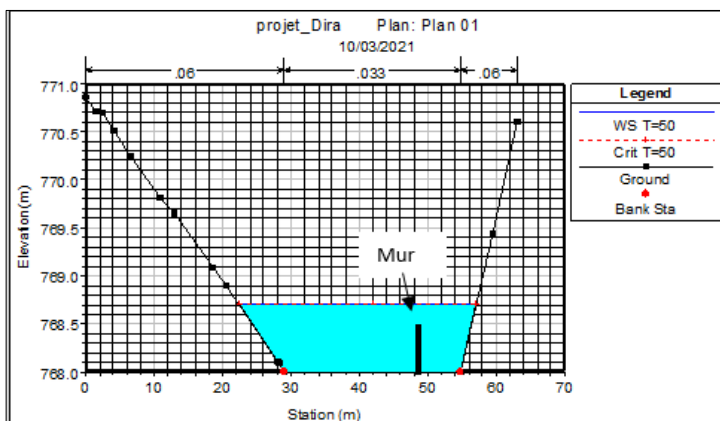


Fig. 4. 20 - Cote atteinte et largeur mouillée par la crue cinquantennale de l'Oued Dira.



Photo 4. 5 - Situation du mur de soutènement de Souk Bni Ftah.

Nous remarquons que même pour la fréquence moyenne cinquantennale, la lame d'eau atteint la hauteur du mur qui protège le Souk situé sur la rive gauche de l'Oued Dira (Photo 4.5). Cela explique qu'au niveau du Souk, l'aménagement actuel (murs en maçonnerie, etc...) ne peut suffire

plus à évacuer le débit de crue cinquantennale, par contre, ces aménagements accentue les zones inondables.

Sur le plan des conséquences géographiques de la crue, nous avons assisté au débordement de l'Oued sur plusieurs tronçons qui traversent les Centres de Had Msila et Bni Ftah, inondant plusieurs rues et habitations. L'importance des écoulements et des hauteurs des eaux ont détruit le pont (x : 624.7, y : 434.2) au niveau du Centre Bni Ftah, et ont envahi les voies de circulation et les maisons au bord de l'Oued.

5.2.7. Crues centennale et millénaire :

L'estimation des crues centennales et millénaires par les modèles hydrologiques dans la plaine alluviale de Lahdar a permis d'obtenir des valeurs des débits élevés.

Ces débits sont rares, mais elles restent possibles et dangereux. Ces débits causeraient des inondations plus larges et la submersion de l'un vastes surfaces des Centres Had Msila et Bni Ftah (habitation, établissements publics, mosquée, nouveau souk hebdomadaire, etc...).

Les résultats obtenus de l'ajustement statistique de la loi Gumbel permet d'obtenir la quantité de pluie propice à la crue centennale dépassant 146.1mm/jour et 186.1mm/jour correspondent les cures millénaire, au niveau de l'Oued Lahdar.

Les habitants convoitent les terrains de la plaine inondables proches de l'Oued. En effet lors d'une éventuelle crue centennale, les inondations seraient redoutables et les dégâts seraient conséquents. La zone sinistrée serait plus larges et les dégâts engloberaient en plus des habitations des infrastructures récemment construits (routes, établissements publics : Centre agricole, nouveau souk hebdomadaire, etc.).

Le passage de la crue centennale engendre les débordements dans le tronçon canalisé juste en amont du pont de la mosquée au mont de secteur de Had Msila (Photo 4.6). La modélisation de la crue centennale de l'Oued Lahdar au niveau de Centre Had Msila (Fig.4.21) montre la hauteur maximale de débordement par rapport aux bords supérieur des rives De l'Oued Lahdar est de 4.5 m.

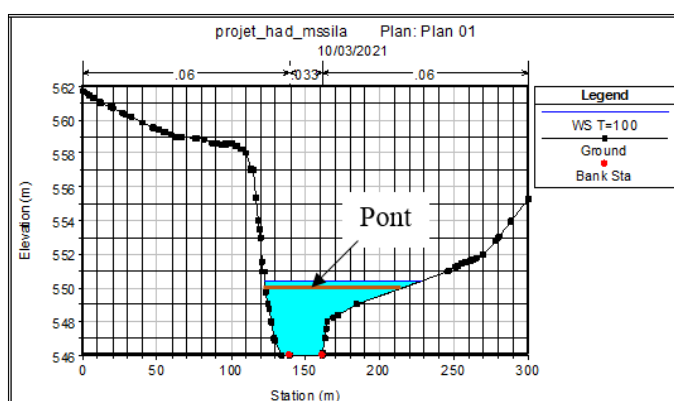


Fig. 4. 21 - Cote atteinte et la largeur mouillée par la crue centennale de l'Oued Lahdar.



Photo 4. 6 - Situation du pont de mosquée (RR508).

Concernant la section aval du Centre Had Msila, au niveau du passage de la route P5414, nous constatons un débordement des crues millénaires et une inondation très importante au niveau

de ce dernier. La figure 4.22 illustre bien l'inondation de la route et la remontée rapide des eaux allant jusqu'à 2.5m au droit des murs de soutènement (Photo 4.7).

Plusieurs sites au niveau des secteurs modélisés, ont été inondés par les eaux de cette crue. Le réseau routier de la Centre a également été perturbé suite aux fortes précipitations qui se sont abattues dans la région. De plus, il y a des dégâts infrastructurels ont été enregistrés, notamment la destruction de plusieurs murs de soutènement, la submersion de certains ponts et l'affouillement des berges et de leurs digues de protection.

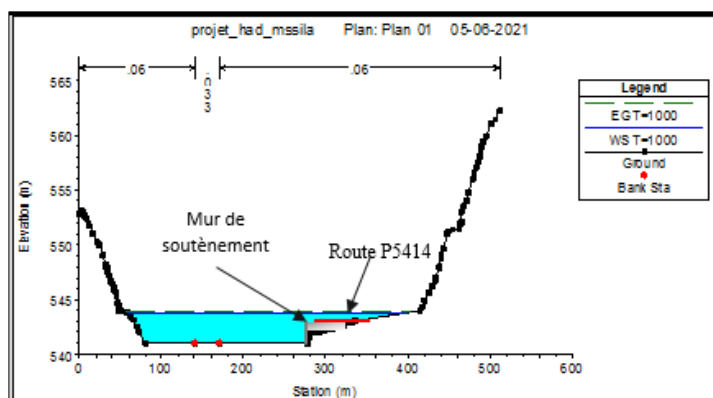


Fig. 4. 22 - Cote atteinte et la largeur mouillée par la crue millénaire de l'Oued Lahdar.



Photo 4. 7 - Situation du mur de soutènement qui protège la route RP5414.

Suite aux inondations, plusieurs établissements publics ont été affectés. Il s'agit notamment de l'hôpital du Centre Had Msila a été aussi endommagé par les inondations.

Les crues millénaire de l'Oued Bni Ftah au niveau de Centre Bni Ftah, provoquent des débordements dans les lits de la plaine alluviale, et la hauteur des eaux peuvent atteindre 2.5 m (Fig. 4.23) menaçant le collège de Jabir Bno hayan sur la rive gauche (Photo 4.8). En aval, la hauteur des eaux lors des crues de ce période de retour, peut atteindre 4m, provoquant la submersion des terrains agricoles (champs d'olivier) situés sur la rive droite de l'Oued, de profondeur de quelque centimètre à 1 mètre.

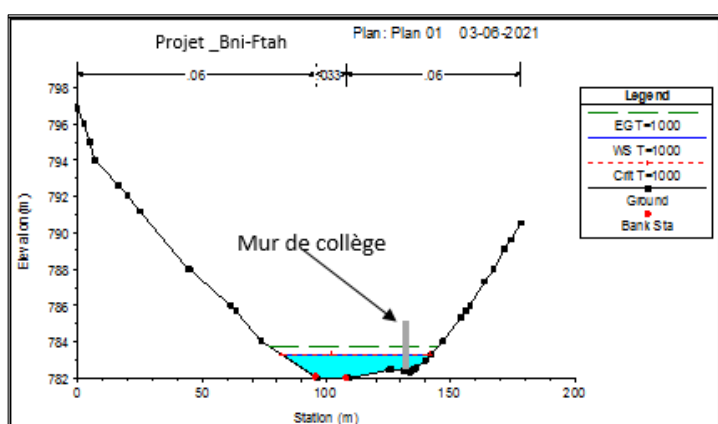


Fig. 4. 23 - Cote atteinte et la largeur mouillée par la crue millénaire d'Oued Bni Ftah.



Photo 4. 8 - Situation du collège qui se situait près de la rive gauche d'Oued Bni Ftah.

5.3 Cartographies des zones inondables dans les secteurs modélisés :

Lorsque la simulation est bien effectuée, on peut exporter les résultats vers l'ArcGIS grâce à l'extension de HecGéo-RAS dont l'objectif de délimiter les zones inondables.

La détermination des zones touchées lors des crues a été réalisée par la cartographie de ces zones après extrapolations de logiciel SIG. Pour la mise en évidence de ce risque dans les Centres territoriaux nous avons rétablie les lits de tronçon d'eau qui traverse des zones sur la base de la carte topographique, et rectifie à partir d'un navigateur satellitaire qui permet la visualisation des zones touchées. la modélisation hydraulique permet d'obtenir des cartes permettant de visualiser et la comparer les expansions des crues de différentes périodes de retour.

La superposition des cartes des crues avec l'image satellitaire des Centres territoriaux de Had Msila et Bni Ftah nous a permis d'apprécier et de délimiter les zones inondables dans ces Centres, et ceux pour les différentes périodes de retour recherchées, 10, 20, 50, 100, 1000 ans.

La détermination des zones à risque au niveau de communes rurales qui appartient le BV d'Oued Lahdar se base sur les résultats de la modélisation hydraulique et l'observation du terrain, le BV est constituée de nombreuses surfaces agricoles. Ces superficies agricoles sont considérées comme les premières composantes de la commune qui sont menacées par les débordements des eaux. Les zones qui sont moins menacées par rapport aux zones précédentes sont des zones à risque faible. Ce sont des étendues qui regroupent un nombre très important des habitats et des constructions et de l'infrastructure.

5.3.1. Secteur de Had Msila :

L'analyse des cartes obtenues a révélé la vulnérabilité de plusieurs infrastructures par les submersions des crues de l'Oued. Ces zones sont menacées lors de certaines crues dont le débit de pointe dépend de la période de retour correspondante. Ce zonage du risque de submersion permet de cartographier les zones exposées au risque d'inondation de l'Oued Lahdar, par l'approche hydraulique, (Fig. 4.24).

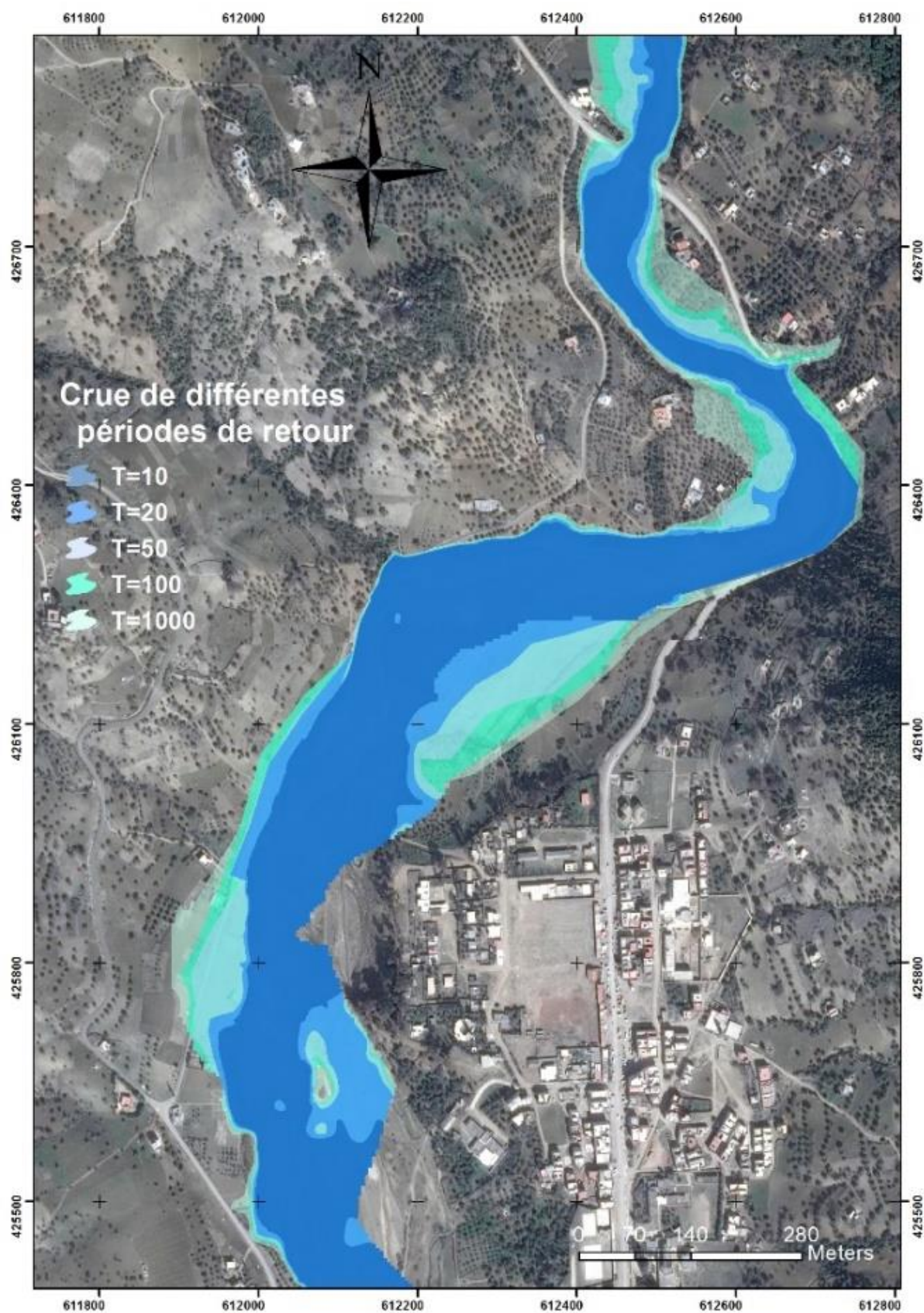


Fig. 4. 24 - Carte des zones inondables de l'Oued Lahdar au niveau de l'amont de Centre Had Msila, pour différentes périodes de retour.

L'effet de débordement s'accroît en allant de l'amont vers l'aval du Centre de Had Msila, c'est-à-dire du pont de mosquée vers la confluence d'Oued Rhnalla. Les résultats obtenus montrent que le débordement commence à partir d'un débit de 229.05 m³/s de cours d'eau d'Oued Lahdar pour la période de retour 10ans, et le débit 75.35 m³/s de cours d'eau d'Oued Rhnalla pour la période de retour cinquantennale. Tandis que pour les débits rares et exceptionnels on observe plusieurs sections débordantes. Ces sections se concentrent dans le Centre, au niveau du pont de mosquée et du méandre au voisinage de la route R 508. Ceci revient à l'impact du développement de l'habitation anarchique dans la plaine alluviale qui cause le rétrécissement de la section de l'Oued, et par suite la réduction de la capacité de transit du débit. D'autre part, les ponts qui coupent le tronçon d'étude, sont inéligibles, causant ainsi une surélévation de la hauteur de l'eau.

La présente étude a permis de réaliser des modélisations et des simulations, conduisant à une première visualisation de l'étendue de la crue, et du comportement de la ligne d'eau au niveau des zones d'études

Le pont de mosquée (x : 612.5, y : 427) est le seul ouvrage de franchissement dans ce secteur ; Il relie le Centre de Had Msila au Centre de Taineste. Ce pont devrait connaître des submersions répétées pour des périodes retour à partir de 100 ans. Ce risque qualifié de fréquent engendre en plus l'arrêt du trafic des véhicules et des personnes, l'isolement des agglomérations de part et d'autre de l'Oued Lahdar.

L'analyse du croquis de la CZERI de l'Oued Lahdar au niveau du Centre Had Msila (Fig. 4.25), montre que plusieurs sites se trouvent dans la zone à risque d'inondations ; dont les principaux sont le souk, des habitats, des tronçons routier, le pont, etc.

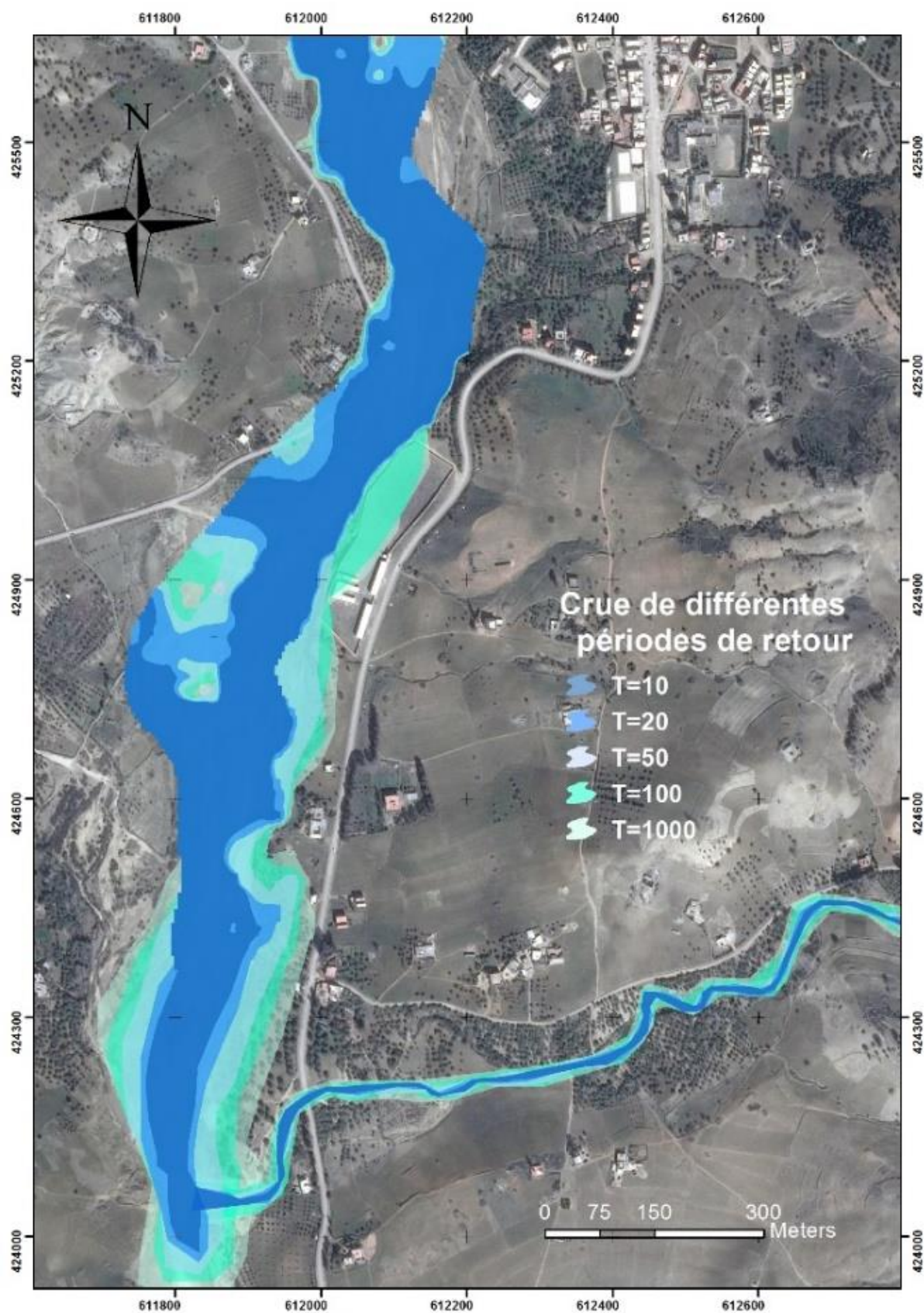


Fig. 4. 25 - Carte des zones inondables de l'Oued Lahdar au niveau de l'aval de Centre Had Msila, pour différentes périodes de retour.

Le Souk de Had Msila est un site d'intérêt socioéconomique important. En plus qu'il le principal établissement générateur de revenue pour la Commune. Il permet l'approvisionnement des habitants du village et des douars avoisinants. Ce souk s'étend, à la faveur d'un replat, de la route en direction de l'axe du chenal de l'Oued Lahdar. Malgré les confortements répétés de sa muraille externe, le sapement des berges de l'Oued Lahdar lors des crues rares menacent sa stabilité. La CZERI de l'Oued Lahdar au niveau du Centre Had Msila montre que le souk se situe sur un replat inondable pour les crues de retour de 50 ans.

La figure 4.25 montre que le tronçon de la route R508 sur la rive gauche de l'Oued Lahdar est inondé en partie par les crues d'une période de retour de 10 ans ; la submersion des terrains de la rive droite n'est que partiellement inondé par les crues décennales. En revanche, ce tronçon risque d'être inondé en totalité lors des crues dont la période de retour dépassant les 10 ans.

La CZI de Had Msila montre que la situation du pont lors des crues de l'Oued Lahdar dépend de la période de retour. En effet, le pont n'est pas submersible par les crues de débits de fréquence 10 ans, 20ans et 50ans ; par contre, il est submergé par les crues de période de retour 100ans et 1000ans.

La même carte présente les degrés du risque d'inondation du tronçon de la route RP5412 en rive droite. En effet, environ 1km est submergé par la crue cinquantennale. En effet, la crue de 29/11/2010 a provoqué de lourds dégâts à la chaussée, dont les fréquents travaux de confortement et de protection n'ont pas réussi à protéger ce tronçon contre le risque d'inondation.

La Fig. 4.25 montre aussi la submersion d'une partie du Souk, lors des crues centennales de l'Oued Lahdar et la submersion du pont (x : 612, y : 424.5) par les crues de l'Oued Rhnalla, avant la confluence avec l'Oued Lahdar. Ce pont est situé à l'entrée du Centre Had Msila et assure un trafic important de piétons et de véhicules.

5.3.2. Secteur de Bni Ftah :

La CZI de l'Oued Lema et ses affluents au niveau de Centre Bni Ftah montre que les crues peuvent submerger des superficies variées selon les débits de différente période de retour, (Fig. 4.26).

Le Souk du Centre Bni Ftah est situé sur la rive gauche de l'Oued Dira. Il montre que environ 1600m² du Souk est inondable, dès un débit de périodes de retour cinquantennale. Les hauteurs des eaux peuvent atteindre 2.5 m dans l'axe de le l'Oued Dira ; en revanche la hauteur du mur de protection du Souk ne dépasse pas 2m.



Fig. 4. 26 - Carte des zones inondables de l'Oued Lahdar au niveau de Centre de Bni Ftah (tronçon 1), pour différentes périodes de retour.

En aval de l'Oued Dira, juste avant la confluence avec l'Oued Lema, les inondations de la période de retour de 50 ans menacent le pont (x : 624.7, y : 434.2) au niveau du Centre. En effet, la profondeur des eaux peuvent dépasser 3 mètres au niveau du chenal, par contre la hauteur du pont ne dépasse pas 2 mètres.

La simulation hydraulique des crues de l'oued Mized montre que la crue décennale déborde sur le pont (x : 626, y : 433), situé à l'entrée de Centre de Bni Ftah, (Fig. 4.27). Ces submersions risquent d'interrompre le trafic important de piétons et de véhicules.

Les crues de l'Oued Assamer provoquent des débordements dans les lits de la PA et la hauteur des eaux peuvent atteindre 1,20 m menaçant une construction sur la rive gauche, (Fig. 4.28). En aval, la hauteur des eaux lors des crues de période de retour 100 ans peut atteindre 4m, provoquant la submersion des terrains agricoles (champs d'olivier) situés sur la rive droite de l'Oued, de profondeur de quelque centimètre à 1 mètre.

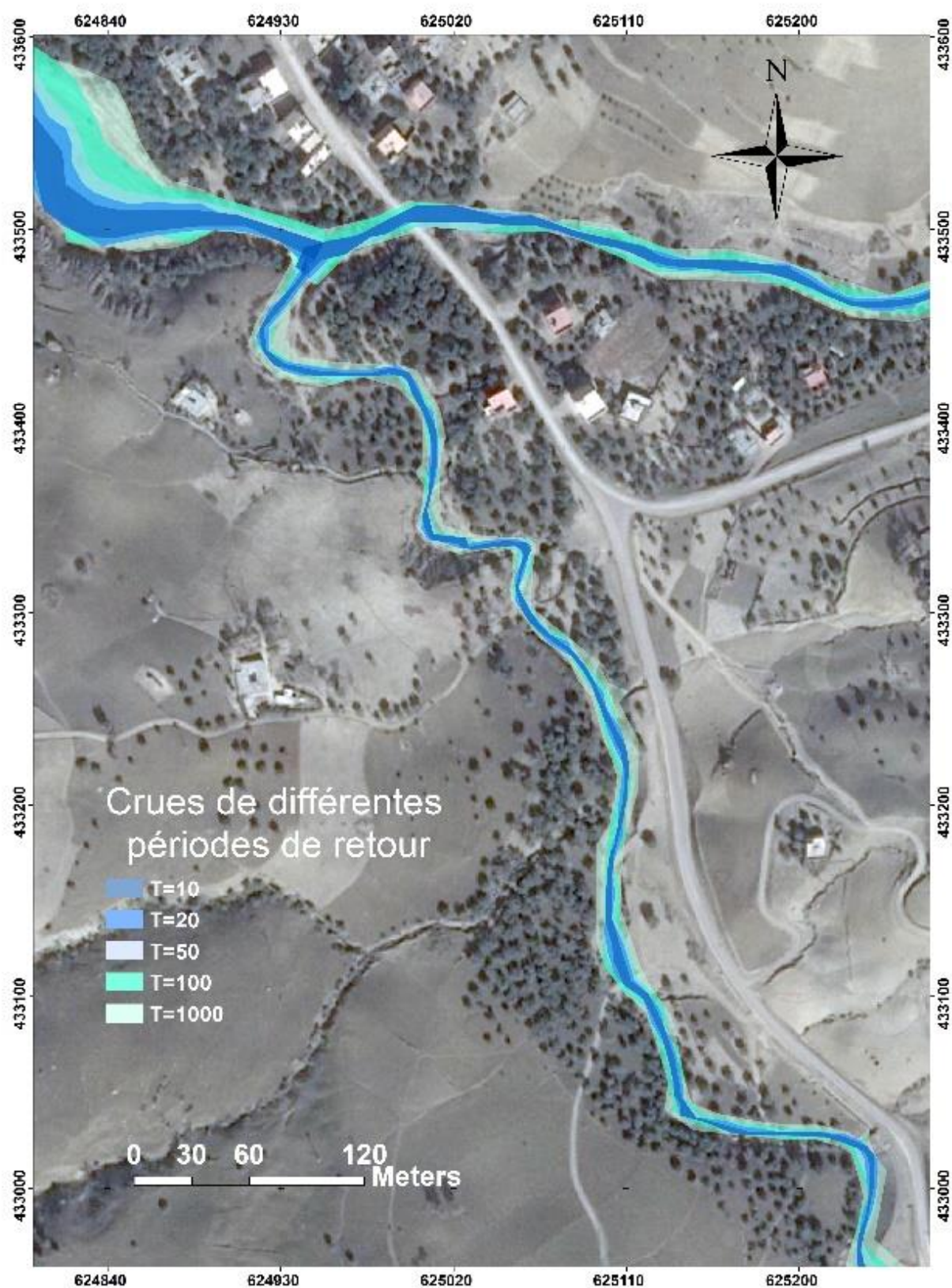


Fig. 4. 27 - Carte des zones inondables de l'Oued Lahdar au niveau de Centre de Bni Ftah (tronçon 2), pour différentes périodes de retour.

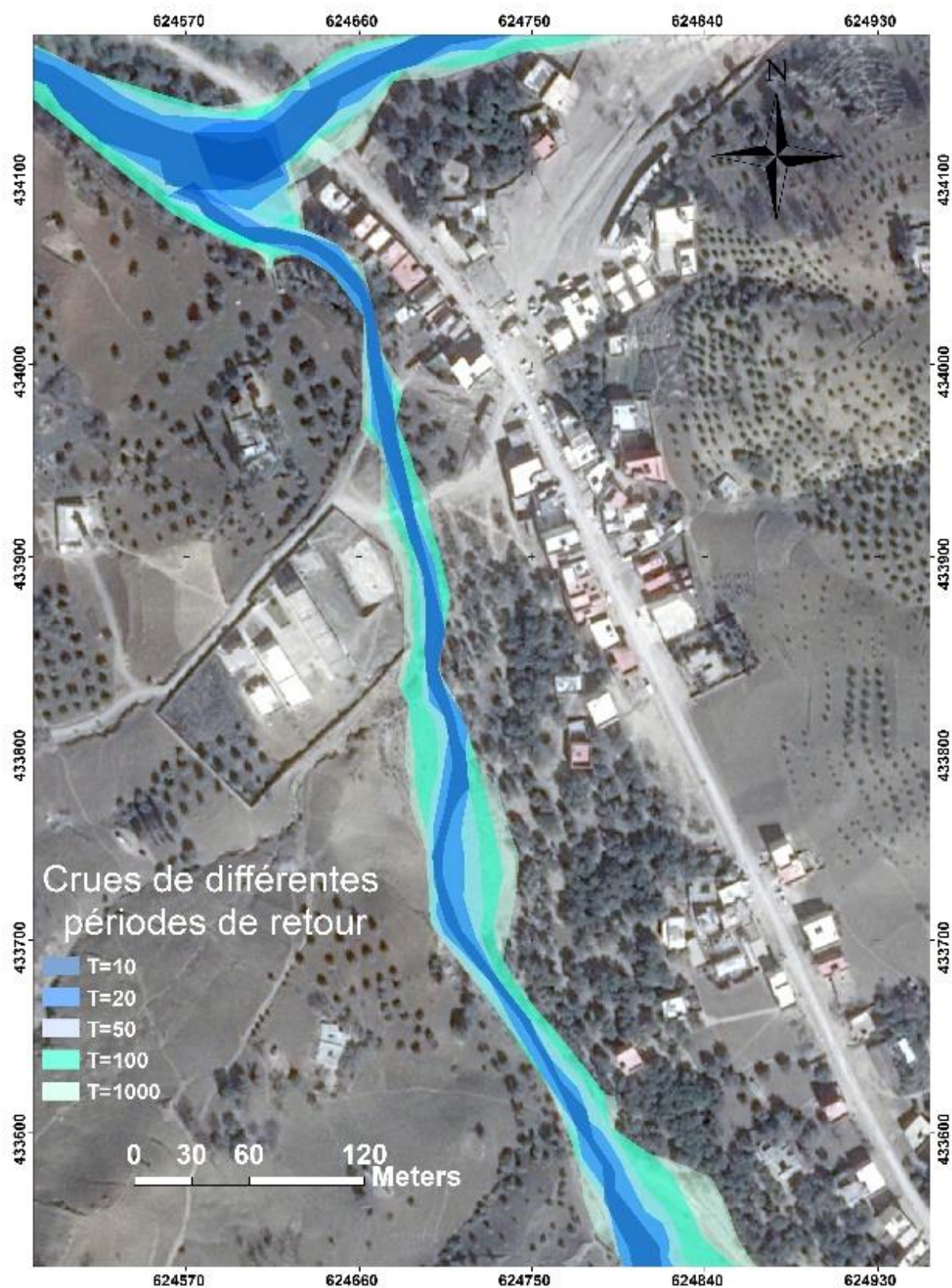


Fig. 4. 28- Carte des zones inondables de l'Oued Lahdar au niveau de Centre de Bni Ftah (tronçon 3), pour différentes périodes de retour.

CONCLUSION :

Dans ce travail, nous avons étudié le phénomène de l'inondation de l'Oued Lahdar et ces affluents et les types des dégâts engendrés au niveau des Centres Had Msila et Beni Ftah, particulièrement sur les axes routiers et les ponts de franchissement.

La simulation des crues de l'Oued Lahdar montre que cette approche a permis d'une part de calculer les débits de pointe et d'autre part de prévoir les zones inondables pour différentes périodes de retour, de 10 ans jusqu'à 1000ans.

Ces résultats obtenus constituent une base de données utile et nécessaire aux éventuelles modélisations hydrauliques des crues de l'Oued Lahdar et ses affluents aux niveaux des Centres Had Msila et Bni Ftah. Ces paramètres hydrologiques servent de base à la simulation de la propagation des crues dans la vallée de l'Oued Lahdar.

La modélisation hydraulique des crues de l'Oued Lahdar au niveau des tronçons étudiés permet de prédire le risque des inondations et leurs impacts sur les constructions et les équipements des Centres de Had Msila et Bni Ftah.

Le modèle hydraulique permet de comprendre l'importance du risque d'inondation dans la section étudiée et de déterminer l'impact des inondations sur différentes périodes de retour 10 ans, 20 ans, 50 ans, 100 ans et 1000 ans. Ce modèle hydraulique permet également de déterminer la vulnérabilité des ouvrages hydrauliques (ponts) face aux crues et aux inondations passées et futures.

Les résultats obtenus de la modélisation hydraulique contribuent à l'établissement de la carte des zones à risque d'inondation dans la vallée de l'Oued Lahdar, particulièrement au niveau des agglomérations et des infrastructures. Ces résultats permettent de spatialiser le risque d'inondation dans le bassin versant de l'Oued Lahdar. Ces résultats peuvent être utiles aux décideurs lors du choix des sites et des types d'aménagement hydraulique, à travers la caractérisation de son régime hydrologique : Q de projet ou Q pointes pour les différentes périodes de retour.

CONCLUSION DE DEUXIEME PARTIE :

Les analyses fréquentielles des débits maximum permettent l'extraction des débits de pointes de différentes périodes de retour afin d'estimer les risques extrêmes lié aux évènements hydrologiques. Pour réaliser cette étude on a eu le recours à des lois statistiques de probabilités basées sur les méthodes des moments et de maximum de vraisemblance. En l'occurrence les lois de Gumbel et de Gamma.

L'utilisation des méthodes d'estimation des débits de projet employées pour le dimensionnement des ouvrages hydrauliques s'est imposée face aux dégâts provoqués par les récents événements extrêmes. Une nouvelle adaptation de ces méthodes au contexte et aux données hydrologiques récentes était nécessaire. Ceci définit l'objectif de cette partie.

En effet, les évaluations hydrologiques accomplies, s'est fondées sur une procédure complète qui examine les caractéristiques géomorphologiques du bassin, ainsi que les données météorologiques locales et régionales.

Cette étude se révèle concluante dans la mesure où les objectifs principaux ont été atteints. En effet, la modélisation hydraulique à l'aide du logiciel Hec-RAS nous a permis de reproduire numériquement le comportement du cours d'eau de l'Oued Lahdar. Cependant l'exploitation du modèle ne se limite pas à la reproduction de l'état actuel de l'Oued mais il peut servir comme un moyen de prévention et de gestion des actions futures par la réalisation de différents scénarios. Ces actions peuvent être des travaux d'aménagement qui, le plus souvent, influencent la dynamique du cours d'eau et entraînent des effets secondaires indésirables ou imprévus.

Troisième partie :

**DYNAMIQUE FLUVIALE ET ZONATION DU RISQUE D'INONDATION
DE L'OUED LAHDAR**

Introduction de la troisième partie,

Chapitre 5 : Dynamique des chenaux et des lits fluviaux de l'Oued Lahdar,

Chapitre 6 : Cartographie hydrogéomorphologique des zones inondables de l'Oued Lahdar et zonation du risque d'inondation,

Conclusion de la troisième partie.

INTRODUCTION DE LA TROISIEME PARTIE :

La présente partie traitera en premier temps, la géomorphologie fluviale de l'Oued Lahdar et ses changements spatio-temporels, par l'utilisation des variables morphométriques spécifiques pour but de les quantifier. Dans les Centres territoriaux Had Msila, Bni Ftah et Meknassa El Gharbiya. Il s'agit principalement d'identifier les formes fluviales et les unités hydromorphologiques du fond de vallée de l'Oued Lahdar dans les secteurs concernant. L'approche se base sur les observations de terrain, de cartes topographiques, de photos aériennes et d'images satellitaires. L'objectif est d'établir une typologie des styles fluviaux à partir de la morphologie du cours d'eau qui regroupe l'ensemble des paramètres le caractérisant (pente, largeur, granulométrie, forme des berges). Pour cela, nous avons élaboré dans un premier temps, des indicateurs permettant de mettre en avant les différentes caractéristiques des styles et, ensuite, nous avons déterminé la typologie de ces styles à l'aide d'une classification.

Cette partie consiste aussi la cartographie hydrogéomorphologique, l'approche permet de la détermination de l'enveloppe maximale de la zone inondable sur l'ensemble des cours d'eau au niveau de Centres territoriaux Had Msila et Bni Ftah et Meknassa El Gharbiya. Elle constitue un des outils disponibles pour diagnostiquer le risque inondation, complémentaire des autres méthodes hydrologiques et hydrauliques. En tant que telle, elle est différente, et possède ses propres atouts et limites qui sont aujourd'hui bien connus.

Alors cette partie à quatre objectifs principaux. Le premier est l'identification des styles fluviaux actuels de l'Oued Lahdar et l'explication de leur formation en relation avec les conditions morpho-structurales le long de la vallée. Le second est la reconnaissance des différentes unités morpho-sédimentaires présentes dans les différents types des tronçons distingués en fonction de la typologie des styles fluviaux. Le troisième est l'examen des zones inondables à partir de l'application de la méthode hydrogéomorphologique. En fin, le quatrième objectif est la délimitation du degré de risque d'inondation par le croisement de la méthode hydraulique et la méthode hydrogéomorphologique.

Chapitre 5 :

DYNAMIQUE DES CHENAUX ET DES LITS FLUVIAUX DE L'OUED LAHDAR

Introduction,

1-Les styles du réseau hydrographique dans le bassin versant de l'Oued Lahdar,

2-Morphologie du fond de vallée de l'Oued Lahdar,

3-Environnement et alluvions actuels dans la plaine d'Oued Lahdar,

4-Dynamique fluviale actuelle de l'Oued Lahdar,

Conclusion.

INTRODUCTION :

La dynamique fluviale est une discipline qui se propose d'étudier le fonctionnement morphodynamique actuel des milieux fluviaux et de retracer leur histoire géomorphologique. De plus la géomorphodynamique fluviale peut concerner aussi des échelles temporelles très différentes, allant de l'échelle instantanée (phénomène se déroulant sur quelques jours, résultats géomorphologiques des crues) à l'échelle des dizaines et centaines de milliers d'années (comme par exemple les phénomènes d'ajustements des plaines alluviales ou de la formation des vallées et des terrasses fluviales au cours du Quaternaire) (Taous.2005).

Cette dynamique contribue au changement géomorphologique de l'Oued Lahdar et au sapement de ces berges et au dépôt dans l'environnement sédimentaires par plusieurs facteurs, le transport, le débit et la vitesse d'écoulements, la capacité de transport des sédiments, la pente, ...

Ce chapitre traite la morphodynamique actuelle du système fluvial de l'O. Lahdar et retrace les paléochenaux, à partir de documents anciens et du travail de terrain pour objectif d'une part de fournir une description interprétative du domaine géographique, et d'une autre part l'analyser les processus et les mécanismes complexes qui s'interfèrent et aboutissent à modeler la surface de cet espace géographique.

Dans ce chapitre nous allons distinguer les caractéristiques géomorphologiques de la vallée de l'Oued Lahdar. Il s'agit avant tout d'identifier les formes fluviales et les unités hydromorphologiques de fond de la vallée de l'Oued dans les secteurs concernées. La méthode est basée sur les observations de terrain, les cartes topographiques, les photographies aériennes et des images satellites.

1 LES STYLES DU RESEAU HYDROGRAPHIQUE DANS LE BASSIN DE L'OUED LAHDAR :

1.1 Profil longitudinal :

Le profil longitudinal du cours d'eau est un graphique montrant les différentes élévations du fond du cours d'eau en fonction de la distance à l'exutoire, donc le profil longitudinal permet d'établir la relation entre l'altitude d'un cours d'eau et la distance parcourue depuis la source. La valorisation de cette caractéristique est très intéressante, elle permet d'une part de donner une idée sur la vitesse de l'eau dans le chenal, d'autre part permet de mettre en évidence les zones de grande et de faible pente et par conséquence les zones de grande ou de faible vitesse d'eau.

La vitesse de l'eau agit directement sur la vitesse de transport et d'arrachement, cette pente est exprimée en (m/km ou %). Il permet aussi de discerner les modifications de valeurs de pente. Le profil en long d'une rivière est souvent approché pour déterminer l'équilibre entre la capacité de transport d'une part, le volume et le calibre de la charge solide en transit d'autre part, (Bravard et Petit, 1997). Nous avons réalisé le profil longitudinal (Fig. 5.1), pour le cours d'eau principal à partir des cartes topographiques à 1/25 000. La détermination du profil longitudinal de l'Oued Lahdar, permet de subdiviser le réseau hydrographique de l'amont à l'aval de la vallée en trois parties. Cette distinction est basée sur les valeurs de pente.

D'après le profil, nous remarquons que l'amont est caractérisé par une pente raide avec des irrégularités supérieures à 31 m/km, donc la vitesse de l'eau dans cette partie sera rapide. Dans la partie médiane les dénivellations n'ont pas très évidentes, et le changement peut atteindre 6,43 m/Km. A ce niveau, l'écoulement de l'eau est ralenti par des barrières géographiques, favorisant la

sédimentation de la charge de transportée. En ce qui concerne la partie aval, elle reçoit ce qui reste de la charge transportée vu sa pente qui ne dépasse pas les 2.5 m/Km.

Mais généralement la vitesse de l'eau varie en fonction des tronçons de chaque partie, ce qui exige une décomposition le profil en long en des pentes constantes et faire un moyenne arithmétique.

La section amont :

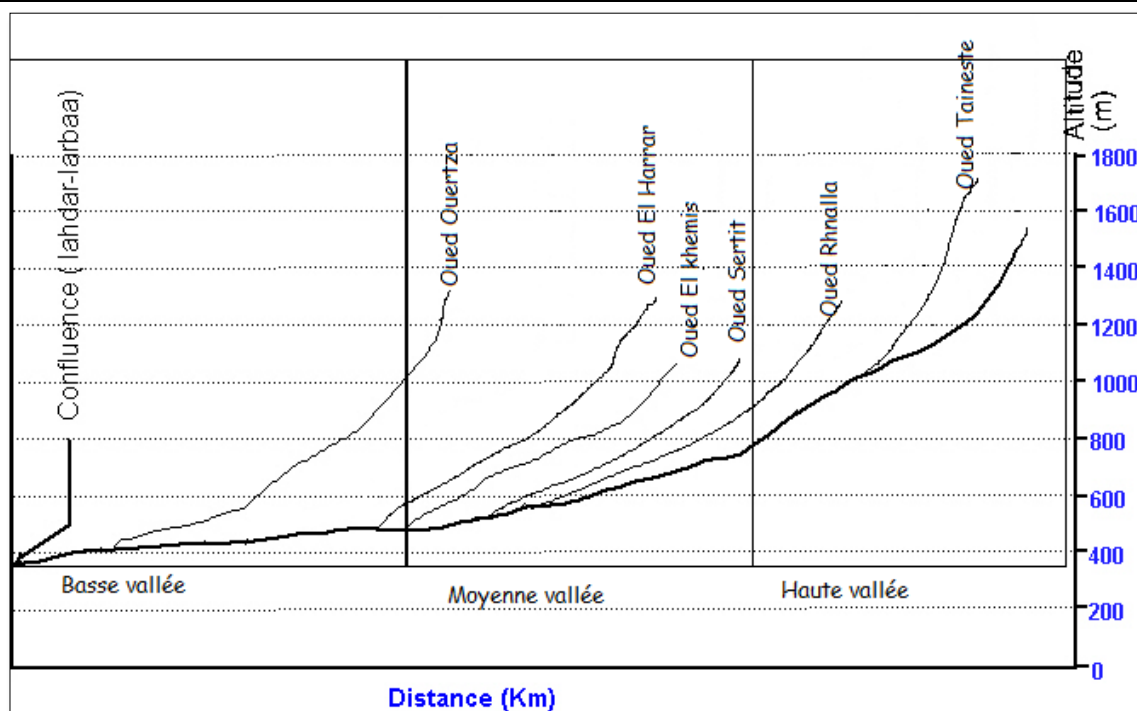
La partie amont s'inscrit dans des roches imperméables à forte pente, l'abaissement de pente se fait de façon régulière vers l'aval. Elle se situe dans la partie amont en montagne, elle correspond aussi aux affluents rifains de Lahdar. Dans cette section, la vallée est relativement étroite sur les versants La pente moyenne y est forte (31.32‰). Celle-ci joue un rôle particulier pendant les orages, dans le déplacement rapide des eaux de l'amont vers l'aval et la genèse des crues instantanées pouvant causer des dégâts importants.

La section médiane :

La pente longitudinale dans la partie moyenne fluctue entre 5.02 ‰ et 8.77‰ sur une distance de 22 km, la pente moyenne dans cette section médiane est de l'ordre de 6,43‰. Localement des anomalies de pente ont été enregistrées, et sont d'origine anthropique. Enfin, la longueur du talweg est de 22,5 kilomètres. Cette section est située dans une zone du BV où les altitudes sont modérées et la vallée de l'Oued Lahdar présente de larges sections et des fonds plats.

La section aval :

Elle s'étend sur 60 km à l'aval du cours principal de l'Oued Lahdar, depuis sa confluence avec l'Oued El Harrar jusqu' à son exutoire, au niveau de sa confluence avec Oued Larbaâ. Le chenal représente une pente très faible (2.98 ‰), et une vallée très large. Dans cette section, l'accumulation des matériaux est grossièrement fine, en raison des faibles pentes qui diminuent la capacité de transporter des alluvions grossières.



	-----Bab Echhoub-----	-----Meknassa El Gharbiya-----	-----Ouled Moussa-----	-----Bni M'koura-----	-----Had Mssila-----	-----Marticha-----	-----Ain Iamae-----	-----El Gouzzat-----	-----El Methetar-----	-----Bni Ftah-----	
Cotes (m)	408	431	464	496	541	586	609	637	678	810	1584
Distance cumulée (km)	4.123	11.60	19.07	25.44	32.97	37.45	41.61	48.22	55.42	60.84	72.74
Pente partielle (‰)	1.94	3.08	3.35	5.02	5.97	10.05	5.54	8.77	5.70	24.35	65.05
Pente par section(‰)	2.98			6.43			31.32				

Fig. 5. 1 - Evolution et anomalie de pente de le long de l'Oued Lahdar.

1.2 Typologie des styles fluviaux :

À fin de caractériser les styles fluviaux de l'Oued Lahdar, nous avons adopté la méthode proposée pour le calcul du taux de sinuosité et du taux de multiplicité, (Miall, 1977). Les styles fluviaux constituent une classification des cours d'eau à partir des caractéristiques dominantes du chenal et des formes qui s'y trouvent, dont notamment la sinuosité, le tressage et les bancs d'accumulation, (Rust, 1978).

Le concept de style fluvial permet de classer rapidement et facilement la diversité des cours d'eau en fonction de l'appréciation visuelle de leur apparence. Le style fluvial est cependant l'expression du mode de transport sédimentaire dominant et la charge sédimentaire en transit contrôlent en partie les processus concourant à l'évolution morphologique du cours d'eau.

La notion de style fluvial a été adoptée en géomorphologie fluviale par divers auteurs : Léopold et al. 1964 ; Tricart, 1977 ; Miall, 1977 ; Schumm, 1977 ; Rust, 1978. Le style fluvial (ou style morphologique) d'un cours d'eau est défini comme l'aspect géométrique en plan d'un chenal (ou des chenaux), en se basant essentiellement sur des critères de multiplicité et de sinuosité des chenaux.

Nous distinguons classiquement quatre grands types de styles fluviaux différentes : rectilignes, à méandres, à tresses (ou en tresses) et anastomosés, (Fig.2). Chacun de ces styles se caractérise par des aspects morphologiques et sédimentologiques particuliers. Ils apparaissent dans des conditions différentes selon plusieurs variables : la pente longitudinale, l'importance des apports solides, leurs aspects granulométriques,

Il existe multiple classifications de cours d'eau, pouvant avoir des noms différents ; mais elles s'accordent sur l'idée que l'identification des modèles de rivières peut fournir une évaluation qualitative des types de transport et des processus qui ont dominé l'évolution de ces cours d'eau. De même la délimitation du type fluvial dépend principalement des estimations de la sinuosité et de la multiplicité fluviaux.

Plusieurs critères sont adoptés en matière de classification et de détermination des styles fluviaux (Taous, 2005), les plus utilisés sont : la multiplicité des chenaux au sein de la bande active et l'indice de sinuosité (Tabl. 5.1).

Tabl. 5. 1 - Classification des chenaux par leurs caractéristiques géométriques (RUST., 1978, in, TAOUS, 2005).

Sinuosité	Chenal unique Indice de tressage <1)	Chenaux multiples (Indice de tressage >1)
Faible sinuosité (IS <1,5)	Rectiligne	En tresse
Forte sinuosité (IS >1,5)	A méandre	Anastomosé

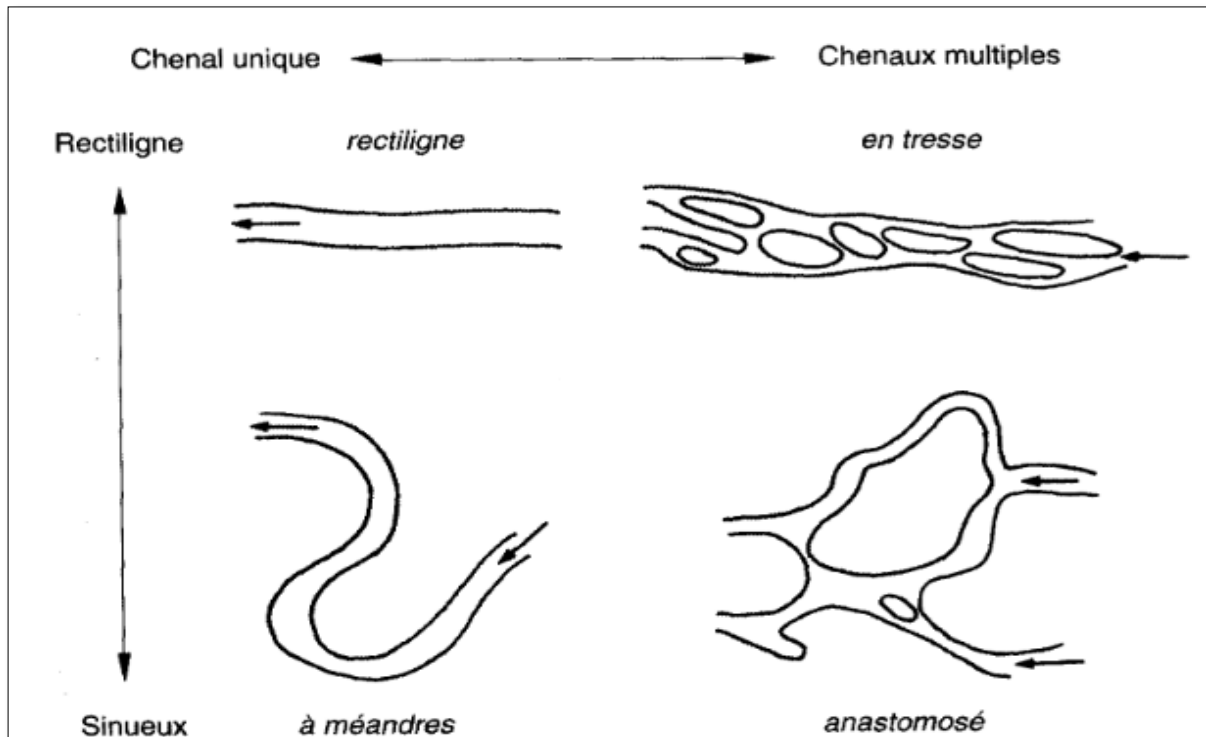


Fig. 5. 2 - Les principaux types de styles fluviaux (Miall, 1977).

- L'indice de sinuosité d'un chenal est défini par la relation suivante :

$$Is = L/I = L/\lambda \text{ avec}$$

L = longueur du talweg

λ = longueur d'onde

Etant donné que Is est le rapport de la longueur réelle suivant l'axe du chenal (L) à la distance parcourue en ligne droite entre deux points d'inflexion de même sens ; (λ) correspond donc à la longueur d'onde à du méandre (Fig. 5.3).

Selon Leopold et Wolman (1957), le taux de sinuosité est défini comme le ratio de la longueur du talweg sur la longueur de la vallée.

Brice (1964) définit un indice de sinuosité qui est le ratio de la longueur du chenal sur la longueur de l'axe de la bande de méandrage.

Brice (1984) et Schumm (1985) calculent l'indice de sinuosité en tant que rapport entre la longueur du chenal et la longueur de la vallée.

Ces trois indices étant valables dans le cas d'un chenal unique.

Pour l'indice de tressage, il s'agit d'un paramètre qui exprime le nombre de barres alluviales (ou îles) par longueur d'onde du méandre d'un cours d'eau. Ce dernier paramètre est fonction du niveau des eaux de la rivière considérée : lors des périodes de crues, la plupart des élévations topographiques dans la bande active (barres alluviales) se trouvent noyées par l'eau ; dans ce cas l'indice de tressage prend une valeur proche de 0. Dès le calcul de l'indice de tressage au moment des basses eaux.

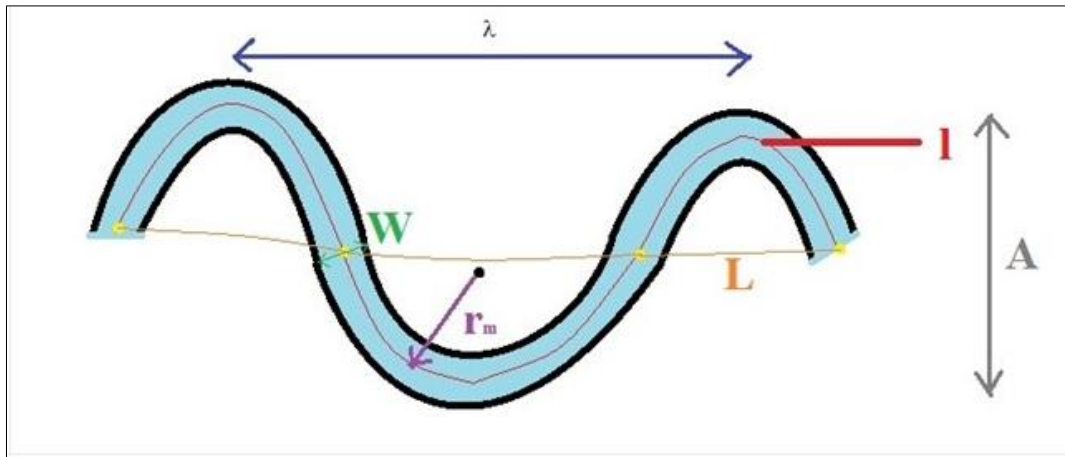


Fig. 5. 3 - Principaux paramètres utilisés dans la caractérisation et le calcul de la sinuosité d'un cours d'eau, λ = longueur d'onde, A = amplitude, r_m = rayon de courbure moyen, L = longueur du talweg, I_s indice de sinuosité ($= L/\lambda$).

En se basant sur la nature de la charge solide transportée, Schumm (1981) établit une classification des styles fluviaux qui résume les principales tendances des styles fluviaux en fonction de la charge et la stabilité relative. Par exemple, il montre que les rivières transportant de fortes charges grossières présentent généralement des faibles sinuosités de multiples chenaux et sont plus instables par comparaison aux rivières à charge fine en suspension dominante (Fig. 5.4).

En se basant sur des études expérimentales ont mis en relation la sinuosité avec la pente (Schumm et Khan. 1972,) (Fig. 5.5). Ils montrent que les styles droits apparaissent avec de faibles sinuosités pour des pentes très faibles ne dépassant pas 0.2 % ; alors que le méandrage se développe pour des pentes allant de 0,2 à 1,4 et pour des indices de sinuosité supérieurs à 1,05 ; tandis que le tressage n'apparaît que pour des pentes fortes supérieures à 1,6 % et avec des indices de sinuosité faibles (<1.04).

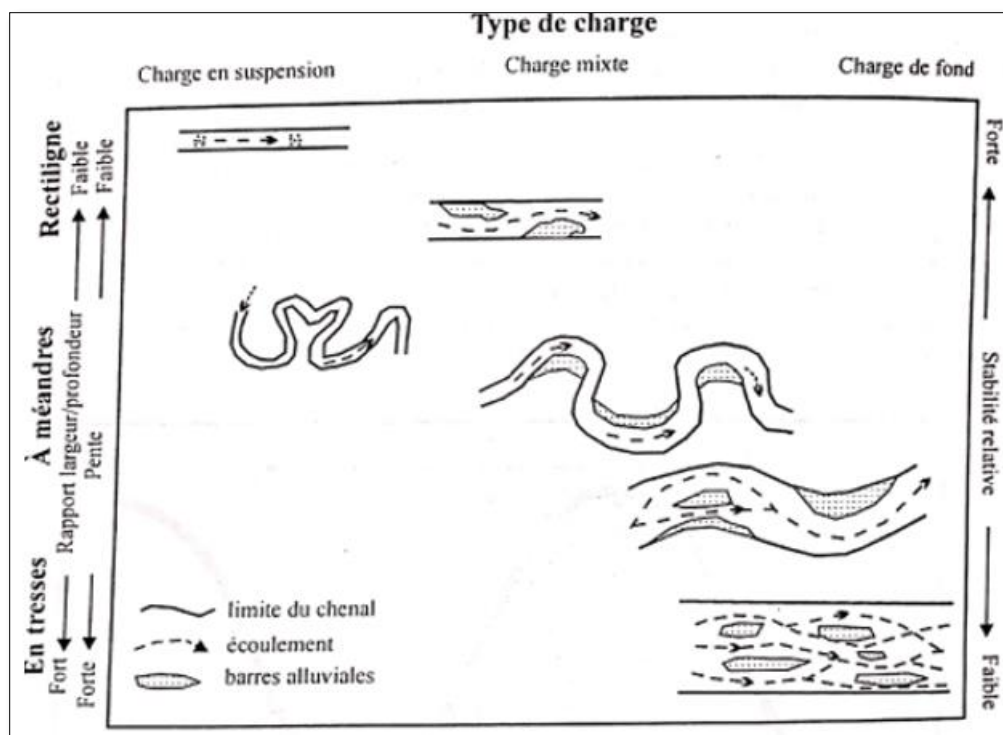


Fig. 5. 4 - Classification et caractérisation essentielles des styles fluviaux selon S.A Schumm(1981).

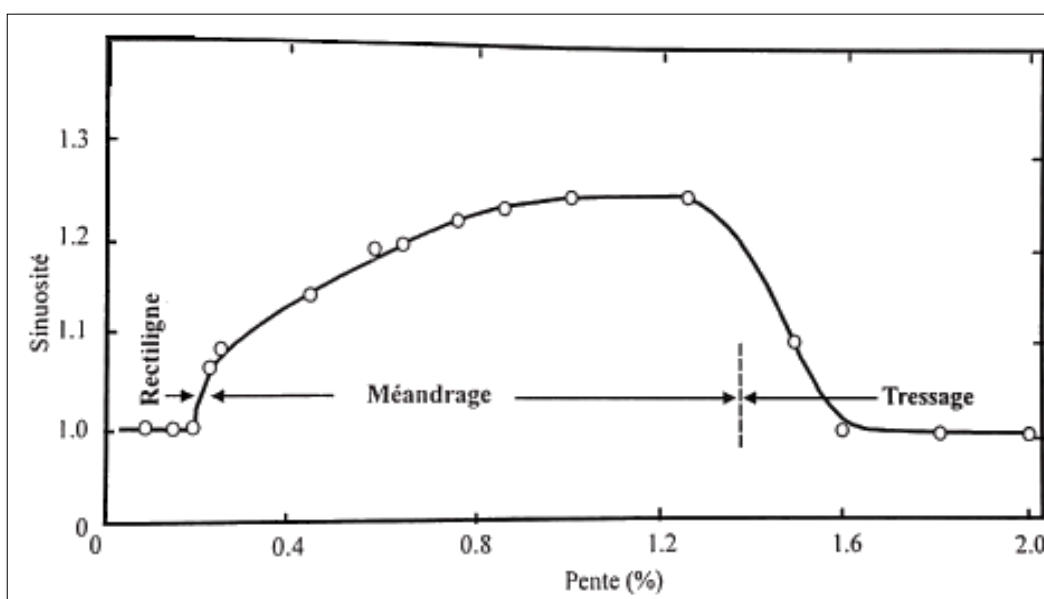


Fig. 5. 5 - Relation entre pente, sinuosité et types de chenaux (Schumm et Khan, 1972).

En plus des critères de classification ci-dessus, les auteurs ont également proposé d'autres critères de classification, tels que la morphologie des chenaux, le degré de leur mobilité au sein de la bande active, les caractéristiques structurales et texturales des corps sédimentaires, la nature l'importance du chargement solide, le rapport largeur/profondeur du chenal, etc.

Le Tableau 5.2 résume les principales caractéristiques associées aux différents types de styles fluviaux selon ces différents critères.

Tabl. 5. 2 - Caractéristiques principales des différents styles fluviaux (inspiré de Selby 19985 ; simplifié). I_s = indice de sinuosité, $Ch.f/Ch.t$ =rapport charge de fond /charge totale ; w/d rapport largeur/profondeur.

Style	Morphologie	I_s	Charge solide dominante	$Ch.f/Ch.t(\%)$	w/d	Erosion	Dépôt
Rectiligne	Un seul chenal avec seuils et moulles	<1.5	Suspension, mixte ou charge de fond	<11	40	Incision, lent déplacement latéral du chenal	Marge du chenal, barres latérales
A méandres	Un seul chenal, avec seuils et moulles	>1.5	Suspension ou mixte	<11	40	Incision dans le chenal et déplacement latéral rapide	Point - bars, barres latérales
En tresse	2 ou plusieurs chenaux Paragraphe avec des barres	<1.3	Charge de fond	>11	40	Déplacement des chenaux rapide	Remplissage de chenaux, barres alluviales diverses
Anastomosé	2 ou plusieurs chenaux avec de larges îles stables	>2	Suspension	<3	10	Lent déplacement latéral du chenal	Accrétion dans le chenal

Il convient de noter que le passage d'un style à l'autre est toujours possible en fonction de la texture dominante du lit fluvial, de la sinuosité et de la stabilité des chenaux et du rapport charge de fond/charge solide totale. Ainsi le cours d'eau peut évoluer, dans le temps, d'un type en un autre peut changer de style d'amont en aval. De plus, plusieurs formes intermédiaires entre celles décrites ci-dessus existent dans la nature. D'autre part, à partir d'autres critères, comme la morphologie et la texture des formes élémentaires des lits fluviaux actifs, on peut comprendre les modalités de leur mise en place et leur vitesse d'évolution, phénomènes caractéristiques de chaque style. La description topographique détaillée et l'étude granulométrique permettent d'illustrer l'extrême diversité géomorphologique de ces différents styles à l'aide de plusieurs modèles de base, combinant à la fois l'architecture et les lithofaciès (Miall, 1977 ; Reineck ; 1996 et Singh, 1986).

1.3 Types des styles fluviaux de l'Oued Lahdar :

Le chenal fluvial représente la composante d'un cours d'eau, constituée d'un lit et délimitée par des berges, qui peuvent être constituées d'alluvions ou/et de la roche en place. De point de vue hydrologique, le chenal fluvial est soumis au régime hydrologique du cours d'eau, en situation de basses eaux, l'eau s'écoule par le talweg ou la ligne des plus grandes profondeurs, qui appartiennent au chenal fluvial. En situation de moyennes eaux et jusqu'à l'atteinte du niveau à pleins bords, l'eau occupe le chenal fluvial proprement dit. En situation de hautes eaux et de crue, dont le niveau est supérieur à celui à pleins bords, l'eau déborde dans le lit d'inondation. Dans le chenal fluvial se manifestent des processus d'érosion et d'accumulation qui affectent son lit ou et ses berges, dont l'intensité varie dans l'espace et dans le temps. Le style fluvial représente la forme en plan des chenaux fluviaux. Il est le résultat des apports combinés d'eau et de sédiments. En conséquence il dépend d'une part, des caractéristiques naturelles du bassin versant (géologie relief, climat, végétation, sol) et, d'autre part, de l'occupation du sol. Le style fluvial est considéré comme caractéristique de la physionomie d'un cours d'eau et, en général, il est démonstratif de sa dynamique.

La reconstitution du chenal fluvial de l'Oued Lahdar s'appuie principalement sur les éléments représentés sur les documents cartographiques utilisés. Les détails sont fournis par les références bibliographiques analysées et les observations de terrain récentes.

Le cours d'eau de l'Oued Lahdar draine sur une partie du Prérif oriental du nord vers le sud, traverse des zones très divers (les rides, les plaines, les dépressions), le RH de Lahdar prend de l'amont à l'aval une multitude de formes, celles-ci sont variables selon la nature géologique traversée, le climat, la pente des terrains et l'intervention humaine. Par conséquent l'Oued Lahdar montre des différences nettes de son tracé entre la haute, la moyenne et la basse vallée. Ces différences spatiales sont liées au contexte morphostructural qui caractérise le BV et la morphologie de la plaine alluviale actuelle.

Les spécificités géologiques et géomorphologiques permettent de distinguer trois tronçons (Fig. 5.6, 5.7 et 5.8) : la section amont (au niveau du Centre Bni Ftah), la section moyenne (au niveau de Centre Had Msila), la section aval (au niveau du Centre Meknassa El Gharbiya).

L'analyse effectuée sur les images satellitaires plus l'observation de terrain, selon le critère de la multiplicité et de la sinuosité des chenaux alluviaux, montre quatre styles fluviaux du lit de Lahdar, qui se succèdent d'amont en aval. Les caractéristiques de la sinuosité de Lahdar présente une grande variabilité (Fig.5.6).

La figure. 5.6 montre que la section amont située dans la partie nord du BV, il correspond aux affluents rifains de Lahdar. Dans cette section, la vallée est relativement étroite, l'érosion apparaît clairement (prolifération des ravinements). La pente moyenne y est forte. Celle-ci joue un rôle principal pendant les orages pour le déplacement rapide de l'eau ruisselant de l'amont vers l'aval et dans l'apparition des crues instantanées.

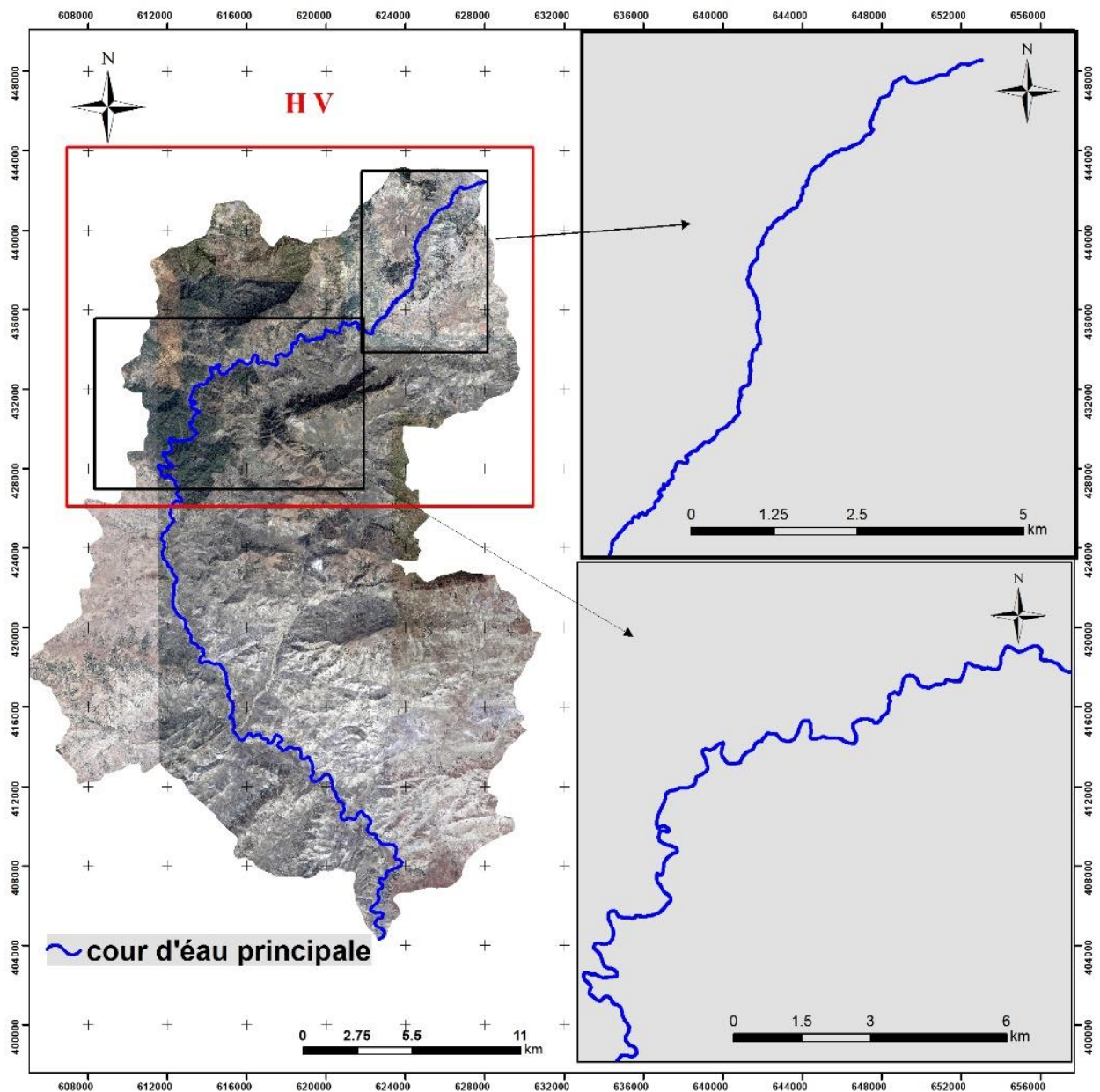


Fig. 5. 6 - Types des styles fluviaux à partie médiane de bassin versant de l'Oued Lahdar.

Dans le premier tronçon, Lahdar s'écoule dans le substrat de type marne et calcaire-marneux et grès le cours d'eau dans cette partie est nommé par Oued Lema. Il s'écoule par un chenal rectiligne, car l'indice de sinuosité (IS) est compris entre 1 et 1,05 et l'indice d'anastomosé (IA) étant inférieur à 1,5, en présence de méandre situé près de la route avec un indice de sinuosité de 2.31, dont sa longueur de Talweg est de 555m, et sa longueur d'onde de 240 m, ainsi une amplitude de 181m, le rapport de la sinuosité est supérieure à 1.5, Il décrit des chéneaux de largeurs

relativement uniformes et de faibles charges sédimentaires. Au niveau du deuxième tronçon l'étude morphométrique d'un cours d'eau montre Lahdar décrire un certain nombre de méandres.

La moyenne vallée correspond au tronçon du Centre Had Msila, la pente est modérée ou faible. Cette section est localisée dans les plaines et les vallées à chenaux très larges avec des fonds plats (Fig. 5.7).

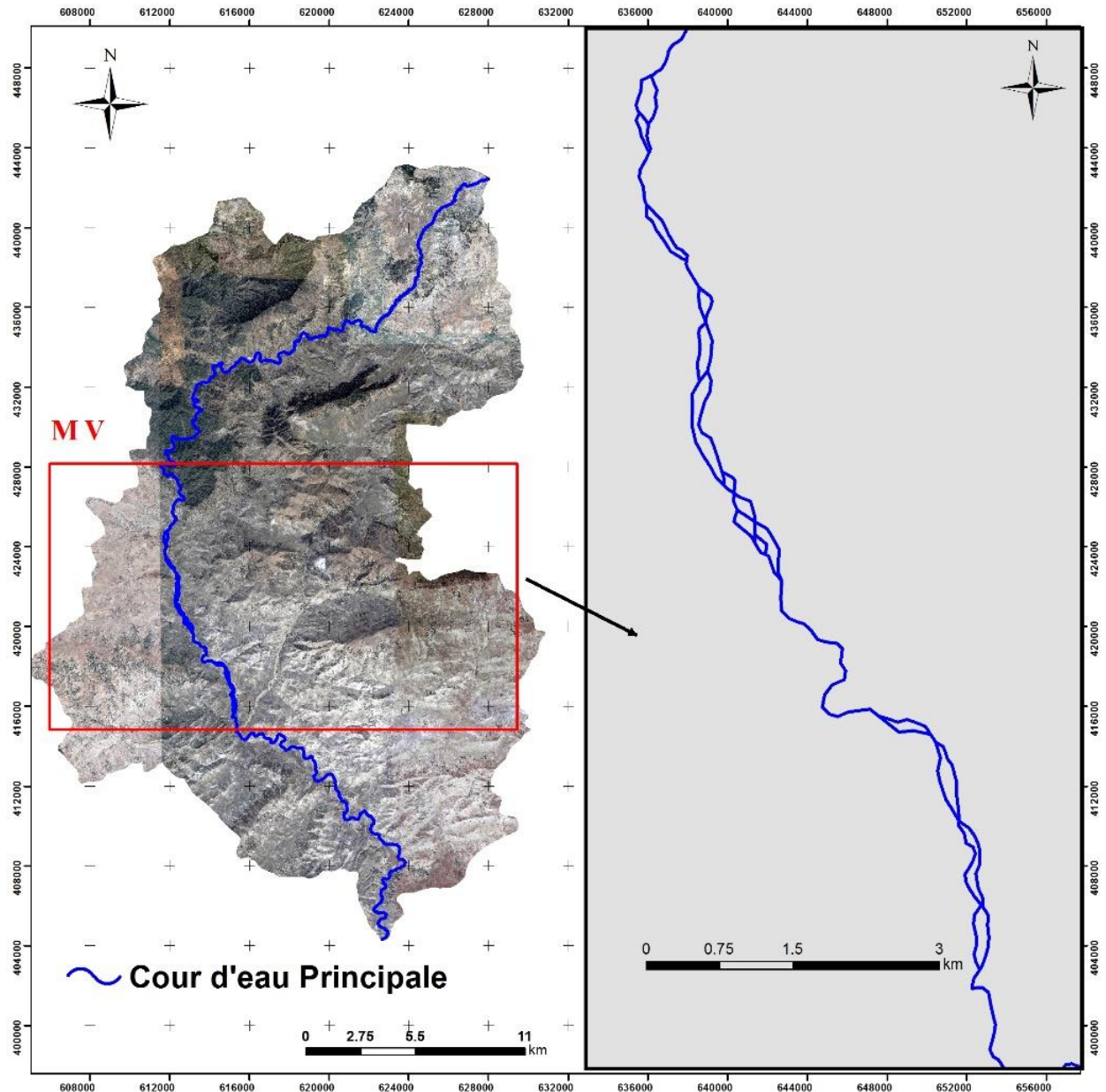


Fig. 5. 7 - Types des styles fluviaux à la moyenne de bassin versant de l'Oued Lahdar.

Au niveau de cette section, le tracé rectiligne est le type le plus fréquent actuellement dans la vallée de Lahdar, mais il est possible de devenir un chenal à méandres par l'accentuation de la sinuosité. Par contre la cour d'eau montre localement des chenaux multiples, avec un chenal principal en cours d'incision toujours en eau, et des chenaux secondaires immergés lors des crues qui serpentent entre des îlots végétalisés. D'après l'observation de terrain d'intérêt pour ce tronçon, Lahdar qui montre un véritable lit anastomosé, à plusieurs chenaux. Se produisant couramment dans les cas des rivières dont la charge sédimentaire est significative, il crée des chéneaux

renfermant des barres alluvions, La plupart de ces barres ont une disposition longitudinale : des barres d'alluvions à distribution non-uniforme. À partir d'observation de terrain, nous remarquons l'élargissement du lit de l'Oued suite à l'érosion latérale. Par conséquent en remarque un méandre au de partie centrale du tronçon, avec un indice de sinuosité de 1.51, la longueur de Talweg 890 m, longueur d'onde 590 m, et de amplitude de 350m.

La basse vallée situe depuis la confluence de l'Oued Lahdar avec oued El Harrar, jusqu' à la confluence avec oued Larbaâ. Où le chenal représente une pente très faible, et une vallée très large. Dans cette section, l'accumulation des matériaux est essentiellement fine, en fonction de la faiblesse de la pente qui diminue la capacité de transporter des matériaux grossiers. Ce tronçon se trouve en aval de bassin versant de l'Oued Lahdar, le cours d'eau présente une configuration à chenaux multiples caractérisée par des îles végétalisées, de nombreux chenaux et des barres sédimentaires. Au sein de ce tronçon, plusieurs styles fluviaux se succèdent, (d'après la Fig. 5.8). Le cours d'eau de l'Oued Lahdar dans cette partie présente une configuration à chenaux multiples caractérisée par des îles végétalisées, de nombreux chenaux et des barres sédimentaires. Le plus souvent le coure d'eau crée des barres longitudinales, ces barres sont parallèles aux chenaux et rarement perpendiculaire (barres transversales) ou oblique (barres diagonales).

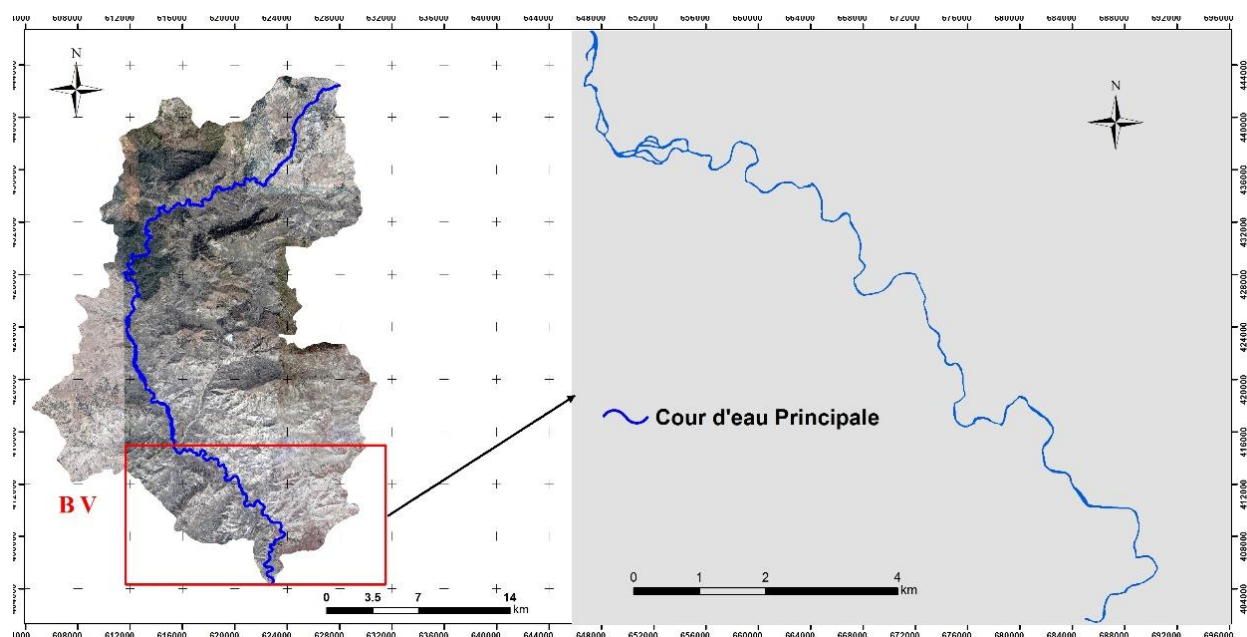


Fig. 5. 8 - Types des styles fluviaux à l'aval de bassin versant de l'Oued Lahdar.

De plus en aval du BV au niveau de Meknassa El Gharbiya, le cours d'eau de l'Oued Lahdar forme un réseau à méandre. Le cours d'eau est lent et se caractérise par une pente faible et transporte principalement des sédiments fins. La largeur de bande active est relativement élevée par rapport à la profondeur. Les bars couramment développés au sein de la bande active, qui jouent un rôle important dans la localisation de l'érosion des berges.

Le style fluvial de l'Oued Lahdar change de l'amont vers l'aval d'un système fluvial à un autre. Il s'ajuste aux apports sédimentaires, aux changements de pente et aux changements de traitement des matériaux. Il est possible d'identifier les changements de styles fluviaux et, par conséquent,

de segmenter du cours d'eau de l'amont vers l'aval. Une telle segmentation permet de cerner le fonctionnement et la sensibilité du cours d'eau aux ajustements amont-aval (Demers et Buffin-Bélanger, 2011). Généralement le cours d'eau de Lahdar se caractérise par un tracé rectiligne bien dominant de l'amont à l'aval, par contre le type méandre devient plus fréquent dans la partie amont.

1.4 Caractérisation des styles du réseau hydrographique de l'Oued Lahdar :

L'établissement de la carte hydrographique de l'Oued Lahdar est basé sur les cartes topographiques au 1 / 25 000. La classification (typologie) des réseaux hydrographiques est connue depuis le dernier quart du vingtième siècle. Elle a d'abord été proposée par Howard (1967) et Gregory et Walling (1973), puis elle a été développée par O'Callaghan et Mark (1984), Argialas et al. (1988), Hadipriono et al. (1990), Chorowicz and Fabre (1997), Bilal et Ammar (2002 ; 2003) et d'autres. Cette typologie est basée sur des critères d'hydro-morphométrie, de la morphologie et de la densité du RH (Howard, 1967 : Moussa et Bocquillon, 1993).

Dans ce travail, nous avons utilisé la classification de Howard., 1967, la plus fréquemment adoptée. Elle distingue huit types de réseaux hydrographiques : dendritique, parallèle, rectangulaire, en treillis, radial, annulaire, multi-bassins, et contracté (Fig. 5.9).

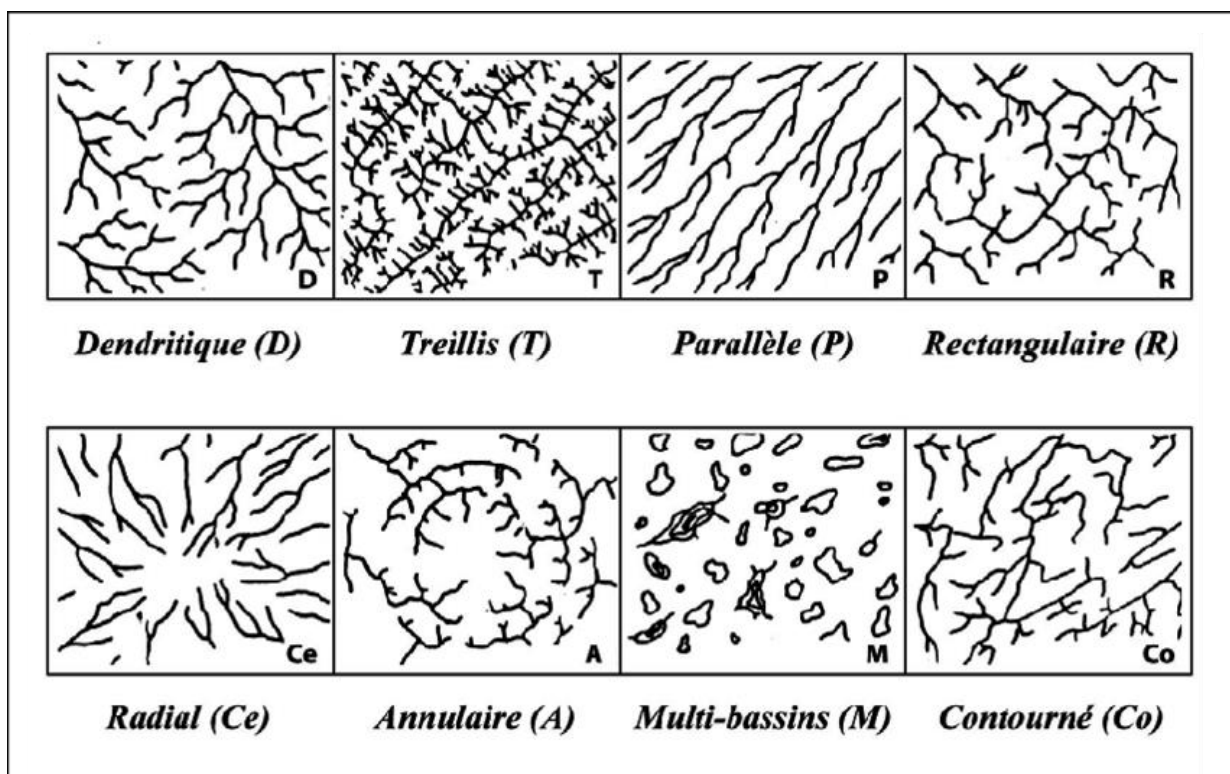


Fig. 5. 9 - Principaux types de réseaux hydrographiques (Howard, 1967 ; in Selby, 1985).

En fonction des 8 types de RH, les aspects des réseaux hydrographiques sont très divers, les plus dominants sont :

Le réseau dendritique (D) se met en place sur un substratum à lithologie homogène ; il s'agit d'une disposition irrégulière où les ramifications donnent un réseau arborescent ou encore penné ; ses branches se développent dans toutes les directions.

Le réseau en treillis (T) caractérise les régions de relief plissé ; les types orthogonaux comptent parmi les plus caractéristiques ; ils s'installent sur des structures plissées alpines et appalachiennes, où ils combinent des sections longitudinales et transversales.

Le réseau parallèle (P) se développe sur des surfaces homogènes inclinées de façon modérée à forte ; les branches y sont parallèles et généralement peu hiérarchisées ; il s'agit essentiellement d'un réseau de type cataclinal des revers de cuestas.

Le réseau rectangulaire (R) (l'allure rectangulaire de l'hydrographie) se rencontre notamment sur les plates - formes cristallines fracturées où les ramifications prennent des directions sensiblement orthogonales.

Le réseau radial (Ce) ce type se développe généralement sur les cônes volcaniques et sur les dômes rocheux résistants. Dans le cas où les éléments hydrographiques convergent globalement vers un point, indiquant des cuvettes de subsidence ou d'érosion différentielle, on parle de réseau centripète (il s'agit d'une disposition hydrographique rayonnante, à éléments divergents)

Le réseau annulaire (A) montre des éléments hydrographiques sont calqués sur des affleurements plus ou moins circulaires de roches de résistances contrastées (cas des combes annulaires, par exemple).

Réseau à multiples bassins (multibasinal) (M) montre d'un réseau lâche engendré par la présence de nombreuses petites dépressions pouvant avoir diverses origines : soutirages karstiques, dépressions volcaniques, dépressions tectoniques, etc.

Le réseau contracté (Co) présente un aspect crispé ; ce type est souvent associé à des bandes de roches résistantes, comme par exemple les roches métamorphiques ou les roches filoniennes.

La typologie des réseaux hydrographiques a été définie dans le bassin versant de l'Oued Lahdar en tenant compte des conditions géologiques, géomorphologiques et climatologiques. Nous avons extrapolé la carte de zonation hydrographique à l'ensemble du BV. La carte de drainage a été établie à partir de la carte topographique au 1/25000, (Fig. 2.9). Les réseaux hydrographiques développés dans le BV ainsi décrits et classés en comparaison avec la classification de Howard, 1967. Dans la plupart du BV de l'Oued Lahdar se développent le type de drainage de réseau dendritique.

2 MORPHOLOGIE DE FOND DE LA VALLÉE DE L'OUED LAHDAR :

La morphologie du fond de la vallée s'organise autour d'un espace au sein duquel l'écoulement de l'eau joue un rôle fondamental en connectant les différentes composantes du milieu (Junk et al. 1989 ; Ward 1998). La diversification des environnements fluviaux dans le BV de l'Oued Lahdar se distingue dans le moyen et la base vallée. Est caractérisée par de faibles pentes. Plus en détail, l'environnement fluvial revêt un caractère polymorphe. En effet, dans des conditions de mobilité préservée, les cours d'eau de plaine créent une mosaïque paysagère complexe composée d'éléments fossiles (paléochenaux, paléobancs, paléosols, ...) et de chenaux actifs donnant lieux à différents milieux fluviaux.

La fonction hydrodynamique de tout cours d'eau est contrôlée par son environnement morphoclimatique, qui est étroitement lié aux changements des débits (liquide QL et solide QS). Par conséquent, le contexte morphologique (plaine, piémont) traduit les styles fluviaux, (Sebly, 1985). De plus, la lithologie, la couverture végétale et la topographie du bassin versant contrôlent également les changements du débit de l'Oued. L'anthropisation ou l'intervention humaine dans le bassin fluvial est devenu un facteur qui affecte son fonctionnement hydrodynamique. D'une

manière générale, la fluctuation de l'ensemble de ces facteurs conduira à un ajustement permanent de la morphologie du cours d'eau, autour de conditions moyennes, par le processus d'érosion-dépôt (Bravard et Malavoi, 2010).

Le cours d'eau de l'Oued Lahdar et sa plaine alluviale, occupent un fond de vallée, de largeur variable (Fig.5.10 ;5.11 et 5.12), qui serait contrôlée par des facteurs morphodynamiques intervenant dans sa morphogenèse. La plaine alluviale de l'Oued Lahdar montre des différences nettes de son tracé entre la haute, la moyenne et la basse vallée. Ces différences spatiales sont liées particulièrement au contexte morphostructural qui caractérise le BV. Les caractères morphologiques, traduit par la variation de l'extension des replats et la hauteur des talus, de la plaine alluviale de l'Oued Lahdar permettent de différencier trois zones : amont, intermédiaire et aval, (Fig. 5.10, Fig. 5.11 et Fig. 5.12).

La plaine alluviale de l'Oued Lahdar est caractérisée par des barres alluviales peu ou pas végétalisées, plus ou moins instables et plus ou moins larges. Ces barres sont constituées par des alluvions grossières où dominent les galets et les graviers, témoins de la forte compétence de l'Oued Lahdar lors des crues.

2.1 Morphologie de la plaine alluviale dans la haute vallée de l'O Lahdar :

La section amont, située en montagne et correspond à la section amont du cours principal du réseau hydrographique de l'O Lahdar, à partir de Bni Ftah, (Fig. 5.10). Cette section se caractérise par une vallée relativement étroite (750m - 952 m), une pente forte (24.35‰ - 65.05‰). L'Oued y a taillé profondément son lit dans les marnes et bancs de calcaires marneux de la nappe de Bouhadoud, (Fig. 1.12).

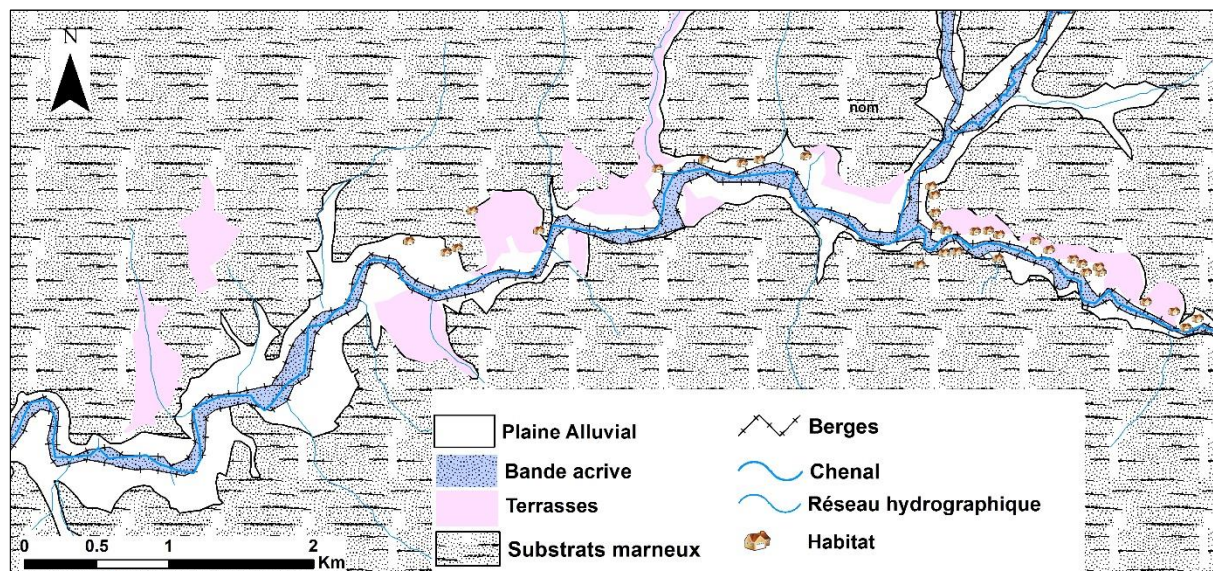


Fig. 5. 10 - Configuration des unités géomorphologiques de fond de vallée de l'Oued Lahdar à l'amont du BV au niveau du Centre Bni Ftah (source de données : cartes géologique, cartes topographique, images Google Earth 2021 et travaux de terrain).

Dans cette section amont, le fond de vallée est étroit en comparaison à celui des parties médiane et aval. La barre alluviale présente une surface plus ou moins plane, d'épaisseur importante, constituée d'éléments grossiers accumulés sur la rive convexe des méandres. La

migration latérale du chenal se fait au niveau de la rive concave marquée par le sapement des berges au niveau des formations holocènes (T1, L4 ou L3), d'altitude relative pouvant atteindre 10 m. Ces formations affleurent sur les deux rives et montrent l'ensemble inférieur grossier surmontant le substrat marno-gréseux.

2.2 Morphologie de la plaine alluviale dans la moyenne vallée de l'O. Lahdar :

Dans la section moyenne, au niveau du Centre de Had Msila, la pente y est modérée faible (5.97%), La plaine alluviale dans cette section (Fig. 5.11), se caractérise par des surfaces topographiques planes et des pentes douces. Cette section montre une plaine et une vallée à chenaux très larges avec des fonds plats.

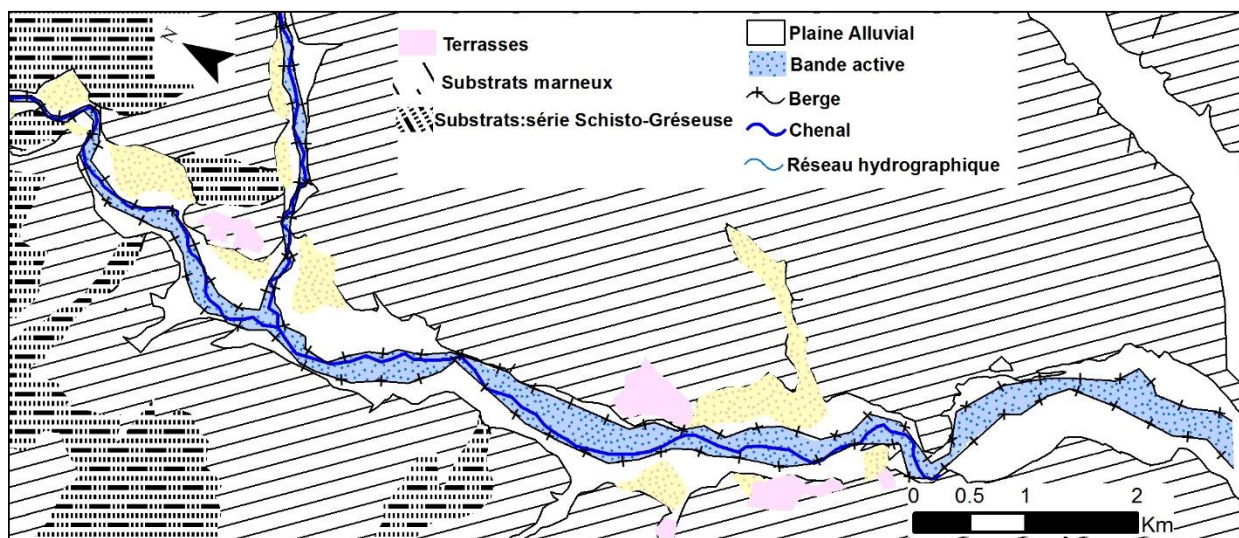


Fig. 5. 11 - Configuration des unités géomorphologiques de fond de vallée de l'Oued Lahdar à la section moyenne de Centre Had Msila.

(source de données : cartes géologique, cartes topographique, images Google Earth 2021 et travaux de terrain).

Sur la rive gauche de l'Oued Lahdar, la morphologie de la plaine alluviale dans cette section est caractérisée par la présence d'un bas replat de grande extension, séparé des chenaux par un talus de faible hauteur, ne dépassant pas 2 m. Ce replat est encours de protection par mur et des digues de protection contre les inondations de l'Oued Lahdar. Ce replat abrite en sa surface le nouveau souk hebdomadaire et de nombres habitations, (Photo 5.1).



Photo 5. 1 - Construction du nouveau souk hebdomadaire à la surface du lit 3 de l'Oued Lahdar (rive gauche).

Dans cette section, le fond de vallée est large avec des unités morphosédimentaires bien développées, notamment sur la rive droite ; il s'agit d'une barre de méandre située sur la rive convexe constituée par des dépôts grossiers de galets, graviers à matrice sableuse (Fig. 5.12).

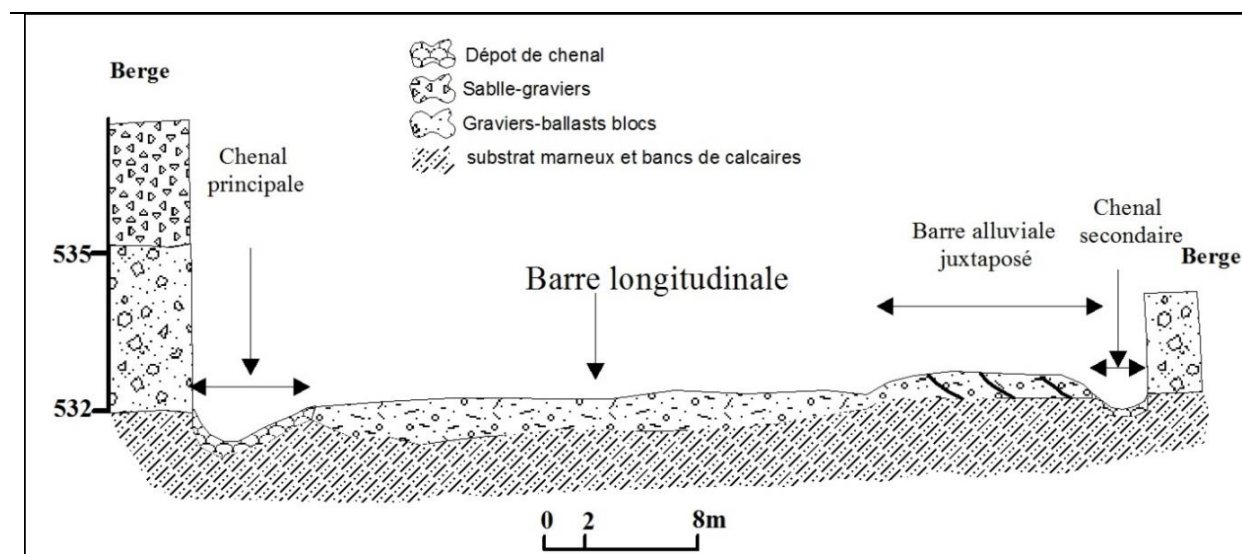


Fig. 5. 12 - Coupe transversale du remplissage alluviale de la bande active dans vallée de l'Oued Lahdar (section inférieure, au niveau du Centre de Had Msila).

La dynamique de milieu fluvial dans ce tronçon est importante. Une variation locale de la largeur des lits entre Had Msila et Meknassa El Gharbiya a été observée, de l'aval du pont de mosquée jusqu'au Souk. Oued Lahdar présente un lit mineur (L1) de 20m largeur, bien individualisé, se caractérisant par une granulométrie grossière de son fond et des limites par de berges souvent sub-verticales et bien marquées (talus net). Ce lit se distingue à la fois de la bande active, caractérisée principalement par l'absence de végétation, et du chenal, qui regroupe, le plus

souvent le lit mineur et le lit moyen, il peut comprendre un chenal d'étiage qui reste seul en eau pendant la saison sèche, (Ballais et al., 2007). Les berges qui limitent le lit mineur plus haut (supérieures à 1,5 m pouvant atteindre jusqu'à 4 m), à vif en raison de sapements liés directement à l'action fluviale ou combinés au glissement gravitaire de matériaux peu cohérents. Le tracé se modifie en quelques années. Fourniture de sédiments, formation de barre et déviation du courant incitent au final à l'élargissement et au déplacement latéral du lit. Mais dans d'autres cas, le lit mineur étroit et les berges sont trop hautes et le débordement, retardé en période de crue, favorise l'incision du cours d'eau et la fixation du tracé, (Photo 5.2). Le lit majeur, moins fréquemment sollicité, présente une topographie contrastée entre les anciens bras remblayés et les chenaux écoulant l'eau des crues débordantes les plus puissantes ; certains sont aménagés pour guider ces flux et limiter l'érosion des éléments naturels et des constructions d'hôpital et de commune rural de Had Msila.



Photo 5. 2 – Impacte des remblais sur le changement du tracé de chenal de l'Oued Lahdar au niveau de C. Had Msila.

2.3 Morphologie de la plaine alluviale dans la basse vallée l'O. Lahdar :

Les plaines d'inondation, convenablement larges pour accueillir la migration des chenaux et l'alluvionnement, ont gardé les traces de ces anciens bras préservés au niveau de Centre Meknassa El Gharbiya. La plaine alluviale est caractérisée par une surface topographique plane et des faibles pentes (1.94 - 3.35‰). Elle est située à basses altitudes de 415 à 445 m. Elle est dominée par des reliefs collinaires, et constituée d'alluvions meubles de nature (pédrographiques) diverse. La structure hydrogéomorphologique de la vallée est développée dans le temps en fonction des conditions hydrométéorologiques (débits), des processus fluviaux (incision, aggradation, élargissement du chenal, formation de sinuosités ou de méandres, etc.), des contraintes lithologiques (confinement par la vallée et les affleurements rocheux, etc.) et des infrastructures statiques présentes dans le lit mineur (Fig. 5.13).

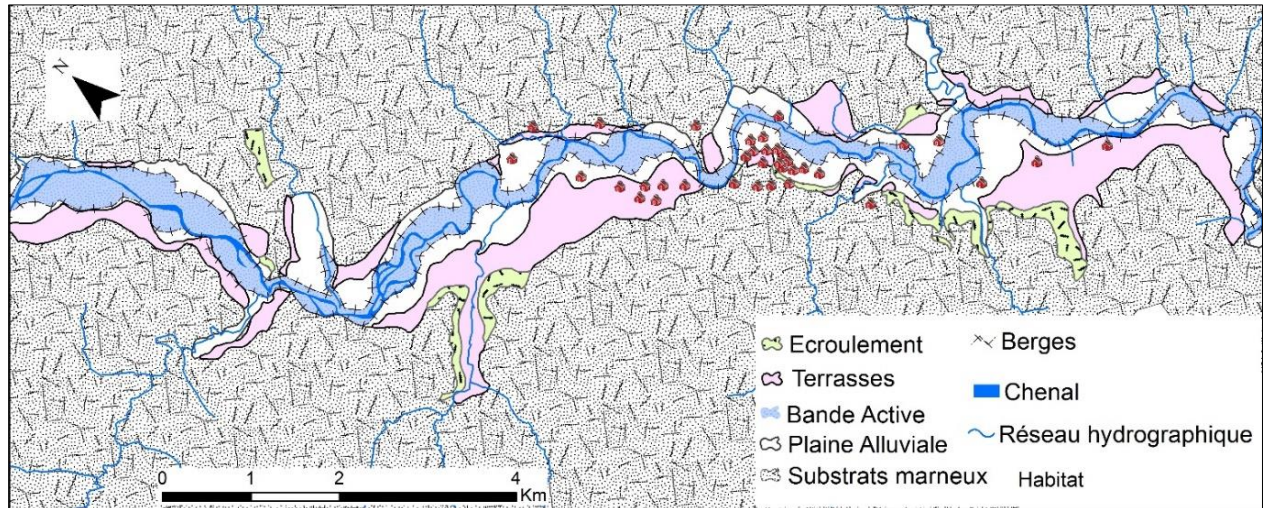


Fig. 5. 13 - Configuration des unités géomorphologique du fond vallée d'Oued Lahdar à la section inférieure au niveau du Centre Meknassa Al Gharbiya, (source : cartes géologique, cartes topographique, images Google Earth 2021 et travaux de terrain).

La plaine alluviale d'Oued Lahdar au-dessus de Centre Meknassa El Gharbiya est caractérisée par une surface topographique plane avec très faibles pentes aux bords du lit majeur et du lit mineur en particulier. Au sein de ce tronçon, les chenaux actifs sont associés à des thalwegs concentrant tout ou une partie des écoulements. Les chenaux secondaires se distinguent des chenaux principaux par des largeurs et des profondeurs plus faibles. Les chenaux actifs se présentent sous diverses morphologies classées en styles fluviaux (chenal unique rectiligne ou méandre, chenaux multiples en tresses ou en anastomose). L'instabilité plus ou moins prononcée des chenaux actifs s'exprime à travers des migrations verticales et/ou latérales, qui sont à l'origine de l'abandon des anciennes structures d'écoulement (recoupement de méandres, avulsion, exhaussement et abandon d'un bras secondaire, ...).

Généralement la plaine alluviale de l'Oued Lahdar est constituée par des alluvions déposées lors des crues ; ces alluvions contiennent des sédiments anciens remaniés et incluant divers débris et d'éléments récents. En surface, les replats présentent généralement un sol plus ou moins bien développé et riche en matière organique. La richesse de ces formations explique l'installation d'une population importante et d'une activité agricole intense dans le bassin versant de l'Oued Lahdar.

Pour mieux illustrer les unités morfo-sédimentaires du fond de vallée de l'O Lahdar, nous avons effectué une coupe transversales, permettant de faire un levé dans ses alluvions, réparties le long du tronçon étudié (Fig. 5.14). Le choix de cette coupe est justifié par la richesse de la structure sédimentaire entre la rive droite et gauche.

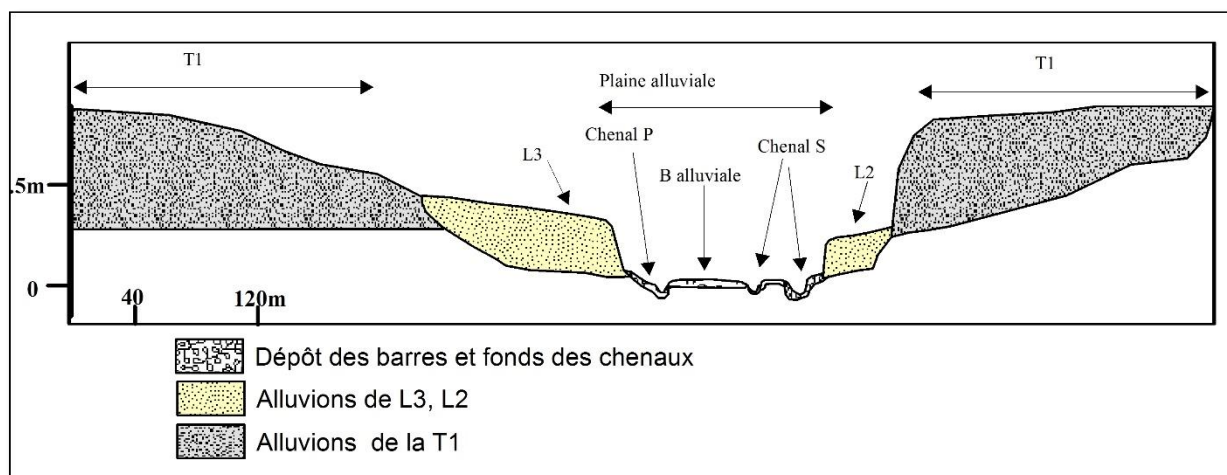


Fig. 5. 14 - Coupe transversale du remplissage alluviale de la bande active dans vallée dans l'Oued Lahdar (section inférieure au niveau du Centre Meknassa El Gharbiya).

Dans la section aval, le fond de vallée est plus large que la partie moyenne, les alluvions de la barre alluviale sont plus ou moins épaisses et sont souvent grossières. La terrasse affleure au niveau des deux rives, elle est formée d'une alternance d'alluvions grossières (galets, graviers et sables) et des alluvions fines généralement sablo-limoneuses.

La plaine alluviale de l'Oued Lahdar au niveau du Centre Meknassa montre des talus marquant la limite entre diverses formations fluviales. Ces talus présentent une pente très variable, les talus qui se caractérisent par une pente moyenne font la délimitation des éléments qui constituent la plaine alluviale, par contre les talus qui ont une pente forte font la séparation de la zone du chenal et de la zone non inondable.

Généralement dans la moyenne et basse vallée de l'Oued Lahdar, où dominent les substrats marneux, sa forme change de façon radicale. Les lits s'élargissent à plusieurs centaines de mètres laissant apparaître d'importantes terrasses alluviales, plus développées sur la rive droite. Le cours d'eau dessine de multiples méandres dont certains heurtent directement les flancs des collines marneuses.

La plaine alluviale de l'Oued Lahdar est composée de plusieurs replats topographiques, que la rivière a façonné dans le fond de vallée au fur et à mesure des crues successives. Selon la méthode hydro-géomorphologique (Ballais et al, 2011), un cours d'eau présente en plus du chenal, quatre grands éléments morphologiques correspondant à autant de lits. La délimitation des différents lits (mineur, moyen, majeur et majeur exceptionnel) permet de reconnaître les éléments de la plaine alluviale de l'Oued Lahdar.

3 ENVIRONNEMENTS ET ALLUVIONS ACTUELS DANS LA PLAINE D'OUED LAHDAR :

Dans la plaine alluviale de l'O. Lahdar, les dépôts sédimentaires se caractérisent par une différenciation dans la granulométrie, dans la structure, et dans la texture entre les lits de l'Oued Lahdar. Ces derniers critères nous permettent de distinguer facilement les types des alluvions qui correspondent à chaque lit.

3-1- Dépôts des fonds des chenaux :

Les dépôts des fonds des chenaux principaux sont constitués de galets et graviers à blocs plus au moins abondants (Photo 5.3 et Photo 5.4). Ceux-ci, de diamètre décimétrique, sont abondants dans les dépôts des fonds de chenaux du lit mineur du moyen et base vallée où la torrentialité des écoulements est importante en périodes des crues. Par contre, ils sont rares dans la haute vallée. Ces éléments grossiers, qui constituent la charge de fond transportée par roulement et/ou par charriage, se présentent sous forme de pavages (cailloutis hétérométriques). Cette hétérométrie, beaucoup plus importante dans les chenaux des lits réctiligne et des méandres encaissés, est liée à une mise en place par des courants turbulents de type torrentiel et à turbulence bien contrastée au cours de leur alluvionnement. Les chenaux secondaires, qui se présentent à sec ou qui ne drainent que des filets d'eau de très faible vitesse en périodes des basses eaux, selon leur position dans le lit mineur et leur altitude par rapport au chenal principal, et qui suit les zones les plus basses, présentent localement des remplissages fins composés de sables et de silts argileux.

Généralement, la base des chenaux des cours d'eaux est constituée de matériaux grossiers, déposés lors du maximum de crue. Ces dépôts grossiers sont parfois recouverts par des dépôts de fin de crues, c'est-à-dire de limons et l'argile.

L'orientation des éléments grossiers nous renseigne sur l'orientation locale du sens du courant, et sur le mode de transport qui est par charriage sur le fond des chenaux.

Les éléments grossiers de fond du chenal de la vallée Lahdar au niveau des Centres Msila et Meknassa sont formés essentiellement par des galets, cailloux et graviers et sont caractérisés par la rareté des blocs. Ces éléments sont anguleux à sub-anguleux (Photo 5.3 et 5.4) et atteste d'un faible degré de transport longitudinal.



Photo 5. 3 - Aspect du faciès de chenal et des barres de l'oud Lahdar au niveau du C Meknassa.

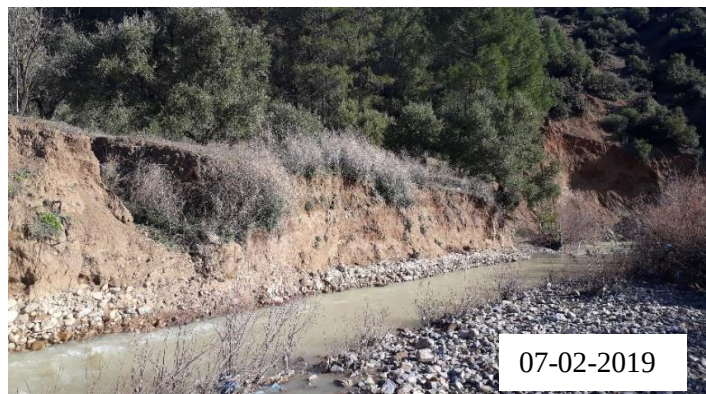


Photo 5. 4 - Aspect du faciès de chenal et des barres de l'oud Lahdar au niveau du C Had Msila.

Ces dépôts constituent des concentrations résiduelles en transit. Ils ont été déposés lorsque le cours d'eaux perd son potentiel de transport à cause de la diminution brutal de son débit liquide (phase de la décrue). Ils seraient pris en charge et transportés à nouveau lors des prochaines crues.

L'orientation des galets témoigne sur le sens local du courant et le mode de transport. L'observation du terrain montre des petits galets déposés dans les nappes alluviale plus anciennes : ce qui renseigne sur le sens local du courant, et sur le mode de transport, notamment par le charriage.

3-2- Dépôts des Barres de méandre :

Une barre de méandre est une accumulation de dépôt d'alluvions sur le coude intérieur d'un méandre de cours d'eau le long de la berge convexe. Les barres de méandres se trouvent en abondance dans les rivières à méandres et sinueuses. Elles prennent la forme d'un croissant et sont situées à l'intérieur des virages de l'écoulement. Les barres de méandres sont très similaires dans leur formation et composition aux îles fluviales bien que souvent plus petites.

Les barres des méandres libres les plus développées qui se répartissent le long de vallée de l'Oued. Ces barres sont caractérisées par leur forme hémisphérique ou en croissant et leur position aux niveaux des rives convexes des méandres (Photo 5.5).



Photo 5. 5 - Aspect des faciès d'une barre de méandre proche de la station de Bab Echhoub.

Rarement, ces unités morpho-sédimentaires peuvent être de forme lenticulaire allongée et présentant un grand axe longitudinal et un grand axe transversal, elles ont des longueurs qui ne présentent pas de grande différence comme dans le cas des vraies barres longitudinales et linguoides, où cette différence est grande. Ces barres de méandre de forme lenticulaire sont bordées par deux chenaux curvilignes de configurations opposées : un chenal principal et un autre secondaire en voie d'abandon. Ceci montre que cette forme est liée à la juxtaposition de deux barres en partie superposées et dont les progradations se sont faites dans deux sens opposés. La zone d'emboîtement ou de superposition de ces deux barres se présente en dôme et correspond à l'endroit où le dépôt est le plus épais.

Ces barres sont très sollicitées par les carrières pour l'extraction des sables, la carrière de Meknassa El Gharbiya. L'observation et l'analyse sédimentologique des petits fronts de carrières et d'excavation d'extraction des sables montrent que ces dépôts sont formés d'un mélange de sables et de cailloutis qui s'organisent en couches obliques et progradantes. Ces dépôts s'enrichissent en sables vers le haut des barres et présentent des figures de chenalisation et des surfaces de ravinement fréquentes limitant des séquences sédimentaires. Les dépôts de sables, allant des sables graveleux aux sables fins, s'organisent en couches obliques de 10 à 40 cm d'épaisseur. Ces couches présentent une nette stratification, continue, plane ou oblique et montrent des discordances liées aux différences de pentes sédimentaires des couches qui diminuent vers le haut simultanément à une décroissance du diamètre des grains et des épaisseurs des couches. Dans certains niveaux, le litage sédimentaire ou la stratification devient diffuse ou disparaît complètement à cause de sa bio-perturbation par des réseaux racinaires.

3-3- Dépôts de barres des chenaux :

Les "barres" sont des accumulations de galets, de graviers, de cailloux et de sables. Elles se composent d'alluvions hétérométriques, fines et grossières, en fonction de la morphologie de la plaine inondable. Ce sont les accumulations qui forment les barres aux milieux du chenal actuel de la basse vallée de l'Oued Lahdar.

Le matériel déposé au niveau des barres des chenaux forme un stock sédimentaire temporaire évacué lors des crues. Le profil de ces barres joue un rôle hydrodynamique dans le changement de la direction locale du sens du courant (Gartet, 2001).

3-3-1. Dépôts des barres latérales :

Ce sont des accumulations de galets, de graviers, de cailloux et de sables en bordure du chenal actuel de l'Oued Lahdar. Elles sont abondantes dans la zone d'étude et sont de grande extension. Ces dépôts forment les dépôts les plus abondantes dans le lit mineur et sont ainsi un stock sédimentaire temporaire, en transit (Photo 5.6).



Photo 5. 6- Aspect de la barre latérale au niveau du Centre de Msila.

3-3-2. Dépôts des barres longitudinales :

Elles se font sous forme de barres longitudinales qui séparent les chenaux. Elles s'accroissent dans le sens du courant ("accrétion longitudinale"). Leur forme dépend de la charge solide et du débit. Elles sont constituées de galets imbriqués, de graviers et de sables. Elles sont parfois ravinées par le déplacement des chenaux, (Photo 5.7).



Photo 5. 7- Barre longitudinale stabilisé par la végétation au niveau du Centre Meknassa EL Gharbiya.

3-4- Dépôts de plaine d'inondation :

La délimitation des limites de la plaine alluviale dans la vallée de l'O. Lahdar montre la multiplication des formes sédimentaire modelées majoritairement lors les périodes des grandes crues. Les surfaces de ces ensembles connaissent actuellement une sédimentation horizontale et finement litée avec ça et des galets épars en surface. (Photo 5.8 et Photo 5.9).



Photo 5. 8- Dépôt des plaines d'inondation dans la basse vallée du BV.

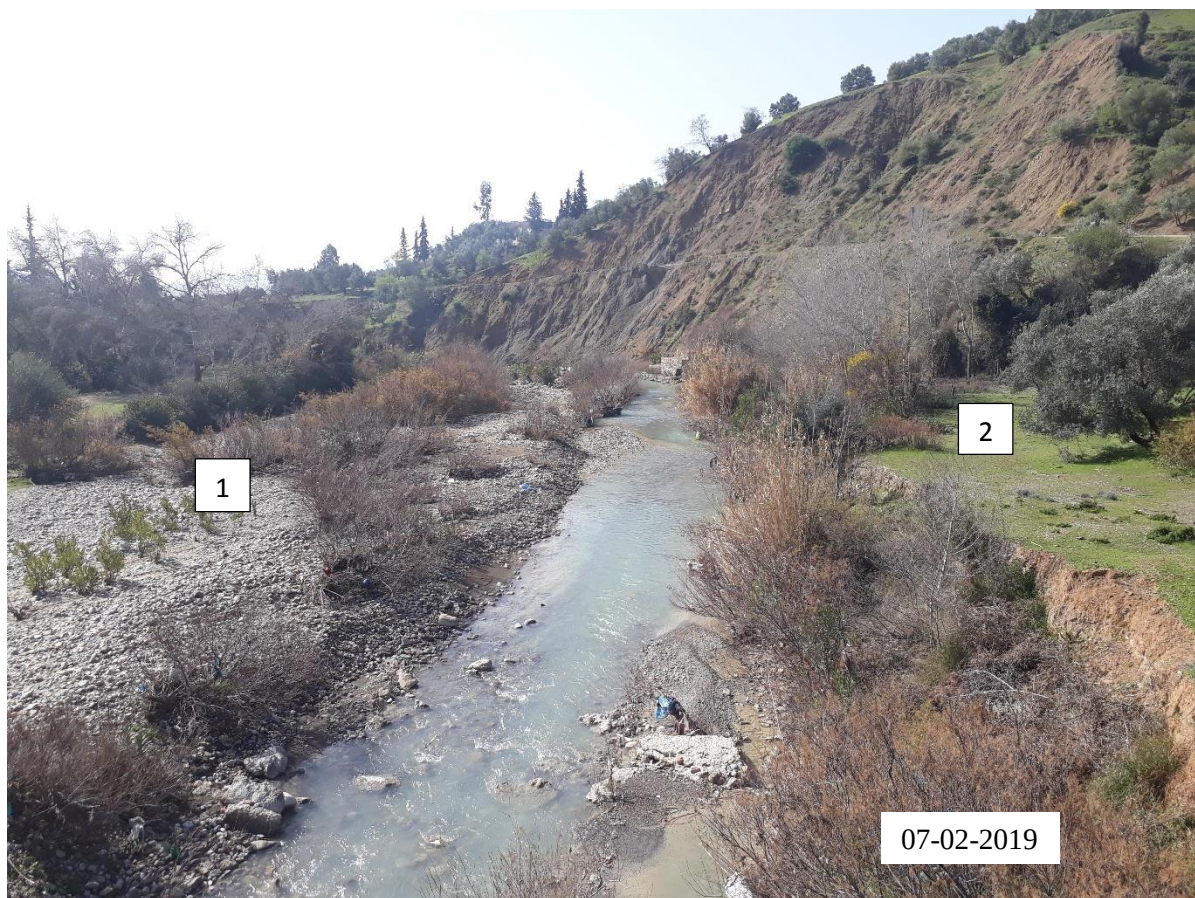


Photo 5. 9- Dépôt de chenal et de plaine d'inondation de la moyenne vallée du bassin versant
1 : Dépôts des barres 2 : Dépôts de plaine d'inondation.

Les faciès des éléments de la plaine alluviale d'Oued Lahdar au niveau des Centres Had Msila et Meknassa El Gharbiya se caractérisent par la différenciation de la granulométrie, de la texture et des structures entre les lits.

Les dépôts des bas niveaux (chenal, bande active) de la plaine alluviale se caractérisent généralement par des éléments grossiers et par des couleurs sombres. Par contre, les dépôts des hauts niveaux de la plaine alluviale, c.-à-d. le replat des lits majeurs, les replats de ce lit sont souvent cultivés, ou colonisés par la végétation non hydrophile, ce qui rend la connaissance des faciès de la surface de ce lit.

Dans le terrain étudié, nous avons considéré que le lit majeur (L3 et L4) correspond parfaitement à la plaine d'inondation, ou la partie de la vallée fluviatile est occupée par l'eau pendant la période de la crue exceptionnelle.

Dans le lit majeur, l'écoulement est calme quand il n'y a pas de perturbations, avec une vitesse inférieure que dans les autres lits de la vallée. Ces conditions permettent de déposer des matériaux fins (sables, limons, argiles) sous forme de sédiments horizontaux. Après les crues, le processus de dessèchement commence, ce qui permet l'apparition des fentes de dessiccation au-dessus de la surface de la plaine d'inondation.

3-5- Dépôts de Bras mort :

Ces milieux morpho-sédimentaires se répartissent principalement dans la base vallée qui disposent d'une large plaine alluviale et de méandres bien développés. Les méandres abandonnés sont reconnaissables sur le terrain par leurs tracés en forme de pédoncules ou de boucles déprimées, étroites, allongées. Ces boucles peuvent être matérialisées par le développement d'une ceinture végétale de tamarix. L'observation, de près de ces méandres abandonnés, montre que les dépôts de surface sont composés de silts argileux affectés par un réseau de fentes de dessiccation bien développées et de forme polygonale. La formation de ces polygones de grande dimension est l'indice d'une importante sédimentation fine qui s'est produite dans des plans d'eau temporaires ayant subi une intense évaporation. Des observations complémentaires ont montré que ces polygones, délimités par des fentes de dessiccation profondes, se transforment en boules juxtaposées. Ces boules résultent d'un affouillement et d'une altération par les écoulements drainés par des chenaux en périodes des crues. Dans ces méandres, qui ne sont pas complètement abandonnés, peuvent stagner des eaux sous forme de flaques d'étendue variée en fin des crues.

Les bras mort sont des formes géomorphologiques très abondantes dans la basse vallée. Ils sont des parties du chenal abandonnées par suite de coupures des méandres très sinueux, ou par les interventions humaines pour protéger les aménagements qui sont près du cours d'eau ; comme le cas de l'Oued Lahdar dans la partie aval accoté de la station hydrologique de Bâb Echhoub (Fig. 5.15).



Fig. 5. 15 - Bras mort de l'Oued Lahdar ou niveau de la station hydrologique de Bâb Echhoub (extrait de l'image Google Earth pro 2021).

Lorsque ces bras mort deviennent non fonctionnels, ils sont colonisés par une végétation de type hydrophile. Ces milieux sont submergés seulement pendant des crues moyennes.

Dans cette section, les dépôts se caractérisent par la présence des sédiments grossiers et des sédiments fins (limons, sable...).

3-6- Dépôts de cônes de déjection :

La morphologie du cône, souvent régulière, présente un apex et des dépôts constitués de cailloutis hétérométriques. Ils viennent s'imbriquer dans les alluvions de la plaine alluviale, le long de la vallée du BV. L'édification de ces unités morpho-sédimentaires est assurée par des artères hydrographiques, de type torrent, qui débouchent directement au fond de la vallée et qui proviennent des versants directs ou des bassins versants torrentiels affluents, les épandages des cônes de déjection, édifiés par les artères hydrographiques latérales importantes, se raccordent latéralement à des dépôts de types morphologiques divers composant la plaine alluviale de Lahdar: chenaux, barres de type varié et plaine d'inondation. Différents types ont été distingués : les cônes édifiés dans le lit mineur, les cônes édifiés aux pieds des versants et les cônes édifiés sur les replats de la plaine d'inondation. Ces cônes y viennent s'emboîter par l'intermédiaire d'une surface de ravinement importante.

Les observations de terrain effectuées, au fond de la vallée et le long des berges du lit mineur, ont montré que les épandages des cônes de déjection, édifiés par les artères hydrographiques latérales, aux niveaux de leurs confluences avec le lit mineur de l'Oued Lahdar. Les cônes de la génération la plus ancienne, sont les plus étendus, s'emboîtent dans les dépôts de la plaine d'inondation par l'intermédiaire d'une surface de ravinement importante.

Les dépôts sont organisés en couches sensiblement parallèles et à limite diffuses (peu nettes). Ces dépôts, ont été mis en place lors des périodes des débordements des eaux ou par l'activité du cours d'eau : système de chenaux en tresse, incisés en surface des cônes, et donnant occasionnellement des dépôts de débordement de crues.

3-7- Dépôts de bas versants :

Ce sont des accumulations de pente qui se mettent en place au pied des versants. Ce sont des sédiments formés par l'accumulation de sédiments grossiers (blocs, galets), de sable, de limon et d'argile en bas de pente (Photo 5.10).



Photo 5. 10- Dépôts de bas versant dans la HV de l'O Lahdar

La structure interne de ces dépôts montre rarement l'organisation des dépôts dans litage peu net à diffus. Le caractère régulier et cyclique du dépôt évoque l'implication de la pente dans la mise en place.

Les sédiments ne sont pas évolués et sont très mal triés ; leur granulométrie dépend des affleurements locaux des roches. La taille des éléments diminue du bas vers le haut des versants et la proportion en éléments fins augmente vers le haut.

4 DYNAMIQUE FLUVIALE ACTUELLE DE L'OUED LAHDAR :

4-1- L'évolution des styles fluviaux :

De façon générale, le style fluvial (ou style morphologique) d'un cours d'eau représente l'aspect géométrique en plan d'un chenal (ou des chenaux), en se basant essentiellement sur des critères de multiplicité et de sinuosité des chenaux (ex : Léopold et al.1964 ; Tricart, 1977 ; Miall, 1977 ; Schumm, 1977 ; Rust, 1978. In Taous). De l'amont vers l'aval, nous distinguons généralement quatre styles fluviaux qui forment le réseau du cours principal de l'Oued Lahdar : le style à méandres, le style à chenaux anastomosés, le style à chenaux en tresse, et le style à chenal rectiligne. Cette évolution traduit l'action de l'eau sur le relief, en fonction de la structure, de la lithologie et des aménagements locaux.

Chacun de ces styles se caractérise par des aspects morphologiques et sédimentologiques particuliers. Ils apparaissent dans des conditions différentes selon plusieurs variables : la pente longitudinale, l'importance des apports solides, la granulométrie des alluvions,

L'analyse effectuée lors des visites de terrain et des documents cartographique met en évidence plusieurs styles fluviaux, qui se succèdent de l'amont vers l'aval du cours principal de l'Oued Lahdar.

- Un secteur à méandre
- Un secteur anastomosé
- Un secteur en tresse dans la partie moyenne du BV
- Un secteur à chenal rectiligne dans la partie amont du BV au niveau de Centre de Bni Ftah.

Le cours d'eau de l'Oued Lahdar dans la haute vallée présente un chenal unique avec des méandres successifs qui acquièrent des caractéristiques ondulatoires (longueur d'onde, amplitude, etc.), dont les paramètres dépendent de la pente, de l'énergie hydraulique de l'écoulement, de la morphogène et de la nature des roches traversés.

Le chenal de l'O. Lahdar montre des chenaux à méandres (Fig. 5.16), dont l'organisation diffère en fonction du type de charge. Le type méandres, qui se caractérise par une charge mixte et la présence de barres alluviales latérales, est moins stable ; il est favorable à la migration latérale.

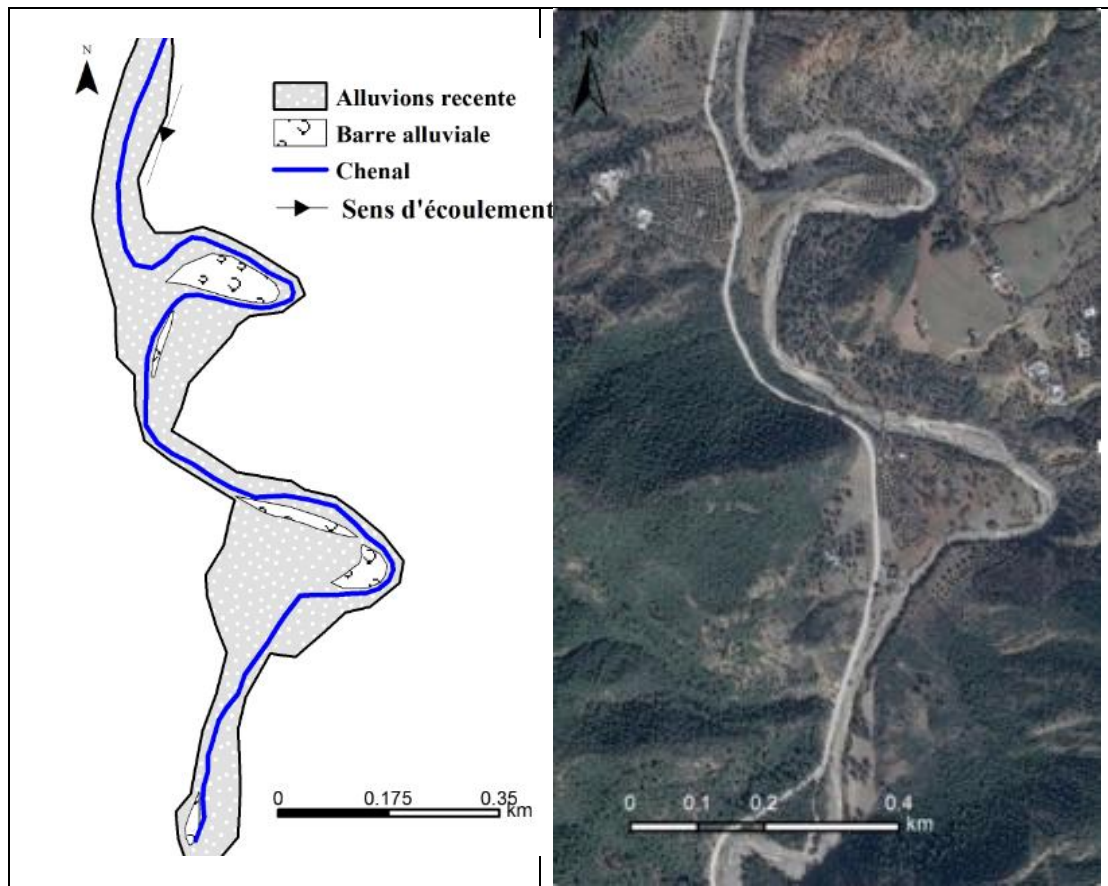


Fig. 5. 16 - Morphologie des barres alluviales du style à méandres de l'Oued Lahdar au Nord du BV. (à droite extrait d'une image Google Earth pro de 2021, à gauche un schéma simplifié des unités présentes sur l'image).

Ce type est moins stable que les chéneaux, en raison de la charge solide mélangée avec l'augmentation du contenu en sédiments trainés. Les cours d'eau à méandres présentent des formations très diverses, régulières ou avec des sinuosités secondaires. Mais de manière générale, les méandres se caractérisent par la présence d'un seul chenal d'écoulement décrivant des courbures alternées, plus ou moins régulières et qui s'organisent en trains (Taous. 2005)

Selon la sinuosité et la multiplicité des chenaux, le style présenté par la Fig. 5.17 est un style anastomosé. Il définit des chenaux anastomosés en forme de chenaux multiples et sinueux, qui représentent des chenaux, séparés par des îles stables et végétalisées.

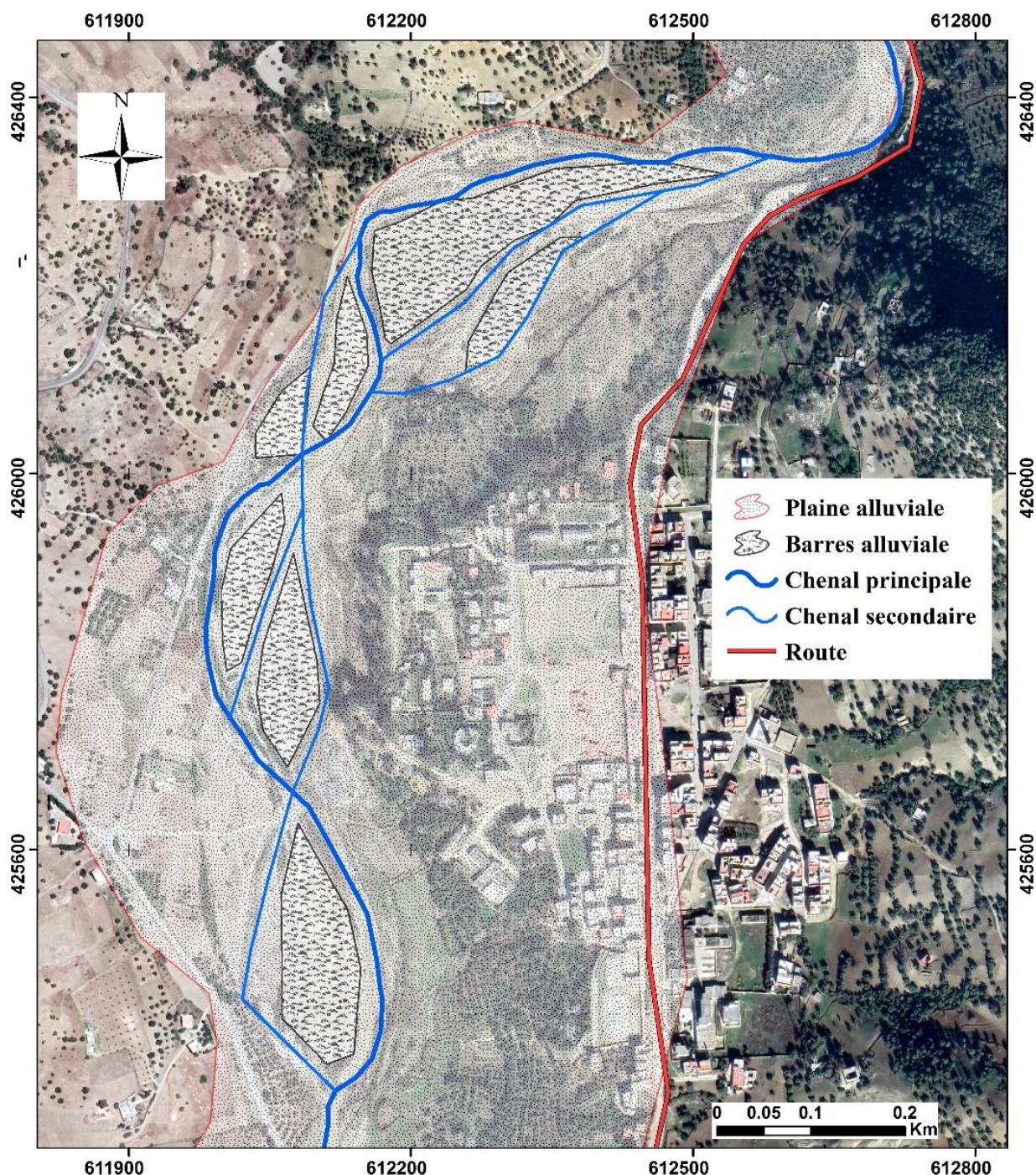


Fig. 5. 17 - Morphologie des barres alluviales du style anastomosé de l'Oued Lahdar au niveau de Centre Had Msila.

Quant à la nature des sédiments de la plaine alluviale, les cours d'eau anastomoses se forment dans des sédiments cohésifs et une énergie faible. Ils se caractérisent par plusieurs chenaux séparés par des îles couvertes par la végétation. Ils sont très mobiles latéralement, érodent leurs bancs rendant mobiles les sédiments de la plaine alluviale. Ce style s'est surtout développé dans la moyenne vallée au niveau de Centre Had Msila.

L'analyse de la figure précédente, permet de relever les remarques du style suivantes :

- ✓ Les chenaux anastomosés sont plus sinueux et fréquemment accompagnés de levées naturelles en arrière desquels se développent des zones péri-fluviales humides. Les chenaux enserrant des îles végétalisées (boisées) et bien stabilisées.

- ✓ Par rapport aux styles tressés, ils se caractérisent souvent par des chenaux relativement stables, avec la présence de multiples chenaux. La stabilité du canal peut s'expliquer par la faible pente, une charge solide relativement réduite et préférentiellement fine (sables et limons).
- ✓ Les zones péri-fluviales sont souvent alimentées par des brèches et des épandages actifs.
- ✓ Comme dans le cas des rivières tressées, l'écoulement dans les cours d'eau anastomosés peut envahir l'ensemble du lit lors des crues, en submergeant les îles stabilisées.

Le travail de terrain montre que le cours d'eau de l'Oued Lahdar se caractérise par des chenaux fluviaux multiples, séparés par des barres alluviales peu stables et constitués d'alluvions grossières, caractérisant le style en tresse. Souvent, les barres alluviales ne sont pas couvertes de végétation, ce qui montre qu'ils peuvent être submergés plusieurs fois durant l'année. Ce style se développe surtout dans la partie moyenne du BV (Fig. 5.18). Les conditions de base du tressage sont (selon Leopold et al. 1964 ; Knighton, 1984 ; Morisawa, 1985) :

- 1) une charge de fond abondante du cours d'eau ; mais il faut également que la taille du matériau puisse, au moins localement, dépasser la compétence de façon à amorcer un dépôt ; ceci peut résulter d'une rupture de pente ou être fonction du matériau de recharge ;
- 2) une pente prononcée, donnant au cours d'eau la puissance nécessaire pour transporter sa charge de fond ;
- 3) des variations hydrologiques, qui favorisent l'instabilité des chenaux et le remaniement des bancs alluviaux ;
- 4) l'érodibilité des berges, qui permet l'extension en largeur du système de tresses.

Les tresses sont un thème de recherches important (Best et al, 1993, Klingeman et al. 1998 Sambrook Smith et al. 2006).

Le travail de terrain permet de reconnaître le type de chenaux en tresses dans le chenal de l'Oued Lahdar. Ils se caractérisent par une charge de fond qui favorise l'apparition de barres peu stables et l'érosion des berges. L'ensemble de ces chenaux est favorable à l'évolution latérale. En conséquence le rapport largeur/profondeur est important. Les chenaux en tresses sont les moins stables. Dans le cas des cours d'eau en tresses, la bande active du tressage se définit comme étant l'emprise des chenaux en eaux et des bancs alluviaux non végétalisés (galets et graviers), (Tricart, 1977). Cette bande est large et marquée par une grande instabilité des barres alluviales et des chenaux d'écoulement : ce qui explique que la physionomie du lit fluvial change en effet après chaque crue :

- ✓ Au moment des crues, les barres alluviales (longitudinales, transversales et obliques) sont submergées. L'élargissement du lit fluvial entraîne des divergences de flux qui sont favorables à des accumulations de sédiments, (Coque, 1993).
- ✓ Au moment des basses eaux, les barres sont émergées ; les chenaux se multiplient favorisant la concentration de l'écoulement et l'augmentation de vitesse. Cela fait alors augmenter la capacité de transport et d'évacuation détritique au niveau de la bande active, (Coque, 1993).

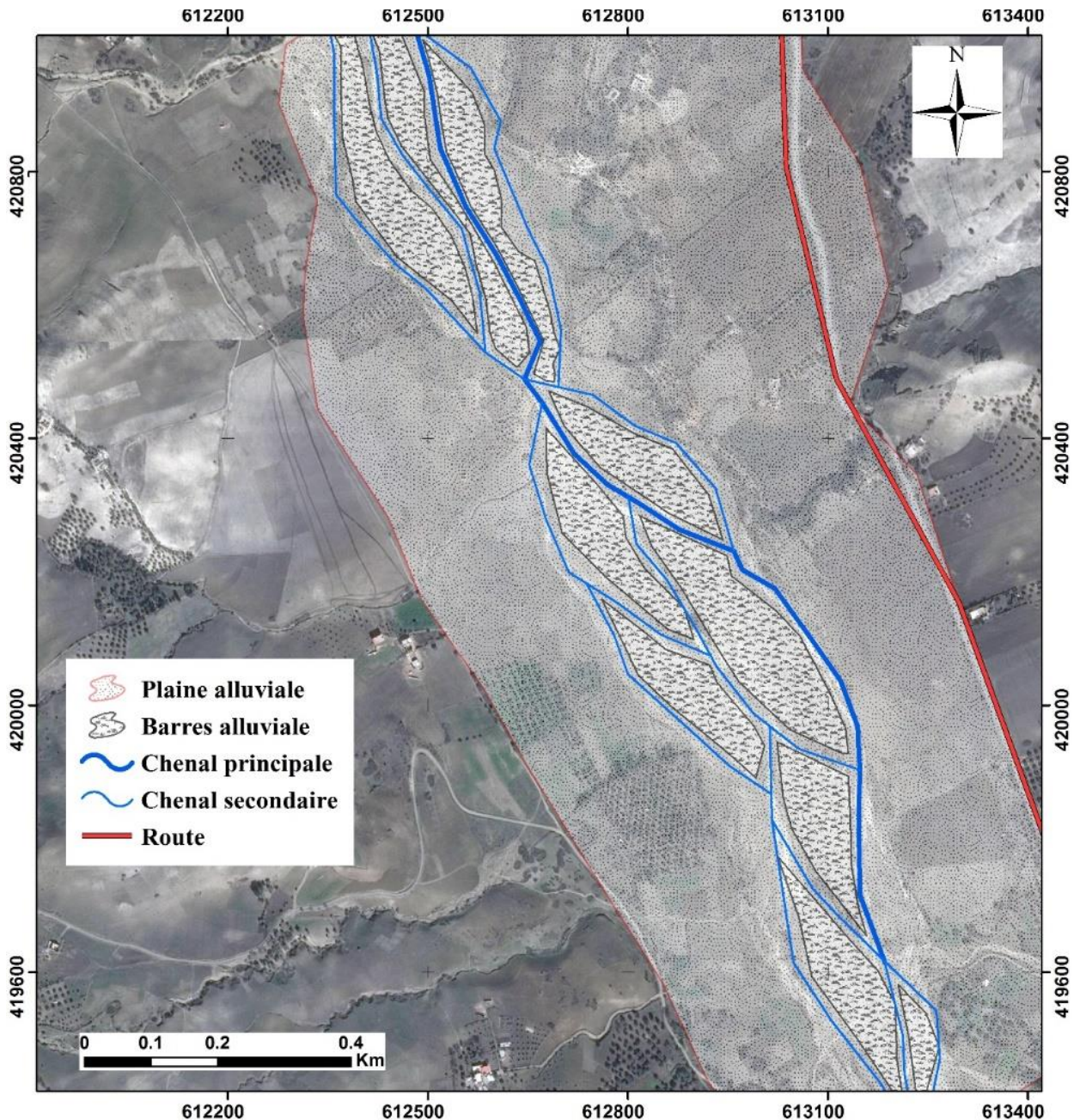


Fig. 5. 18 - Morphologie des barres alluviales du style en tresse de l'oued Lahdar dans la moyenne vallée, En dessous de Centre de Had Msila.

Le chenal rectiligne montre une largeur presque uniforme. Ce type se trouve presque souvent le long du cours d'eau de l'Oued Lahdar, il présente un chenal unique (Fig. 5.19). En effet, des fois parfaitement droit, le plus fréquent sub-rectiligne, présentant une faible sinuosité (inférieure à 1.5) qui préfigure en quelque sorte la méandration. Le style rectiligne se caractérise par l'importance de la charge en suspension. Le rapport largeur/profondeur est faible. Les barres d'alluvions créées se déplacent à l'intérieur du chenal sans créer d'instabilités latérales ; ce sont les chenaux les plus stables. Le chenal de Lahdar peut montrer un chenal rectiligne dont le talweg est sinueux.

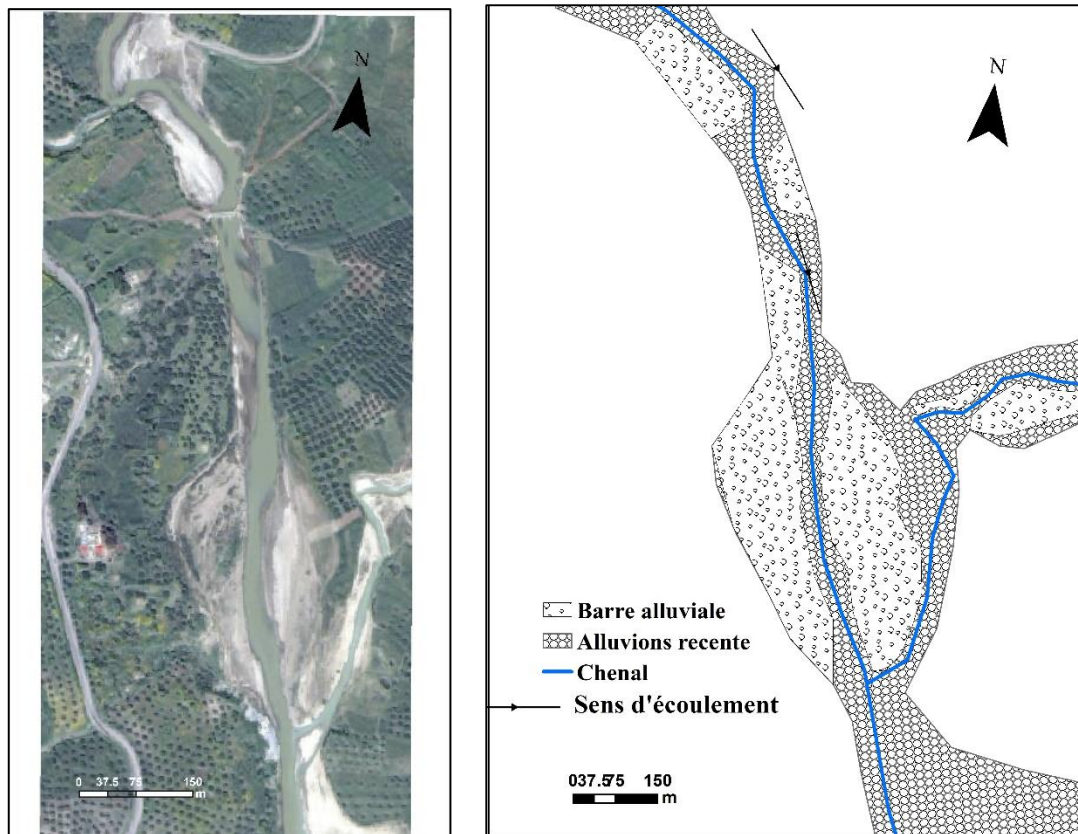


Fig. 5. 19 - Morphologie des barres alluviales du style rectiligne d'Oued Lahdar au niveau de la confluence avec l'Oued El Harrar, à gauche extrait d'une image Google Earth pro de 2020, à droite un schéma simplifié des unités présentes sur l'image.

Les cours d'eau de type rectiligne se caractérisent par une charge mixte qui favorise la formation de barres latérale, dont le déplacement peut déterminer l'instabilité latérale du chenal. La bande active de ces cours d'eau se caractérise par une alternance régulière de seuils, et de mouilles (dépressions creusées lors des fortes crues). L'espacement entre seuils et mouilles (riffle-pool séquence) dépend principalement de l'importance du cours d'eau (largeur, profondeur, compétence, etc.) et de la nature de la charge solide (caillouteuse, sableuse, etc.).

4-2- Les principales unités géomorphologiques de l'Oued Lahdar :

Les unités géomorphologiques se caractérisent donc en général par l'existence de trois (parfois quatre) lits : le lit mineur, le lit moyen et le lit majeur (ordinaire et exceptionnel) (Ballais et al., 2010). La plaine alluviale se compose des barres, le bras mort, les cônes de déjection, les colluvions, qui identifient dans l'axe 3, plus le chenal et les lits.

4.2.1. Le chenal :

La différenciation entre lit d'étiage et lit mineur pose un problème, pour déterminer les caractéristiques de chaque lit (d'étiage et mineur) de l'Oued Lahdar. Nous aurons à comparer les définitions relatives à la question de ces formes géomorphologiques :

- Le lit d'étiage ou chenal d'étiage, souvent étroit, est compris à l'intérieur du lit mineur, dans lequel il forme souvent des sinuosités. Il est occupé par les très faibles débits, en

zone sèche, comme les chenaux des cours d'eau méditerranéens. Le lit d'étiage est utilisé par l'écoulement des basses eaux et peut sécher totalement. (Ballais, 2010).

- Le chenal d'étiage (appelé chenal d'étiage les basses eaux les plus marquées) n'occupe souvent qu'une petite partie du lit apparent. Il n'est pas limité par des berges nettes. Même dans un lit apparent rectiligne, il sinue à l'intérieur de ce lit apparent et va d'une berge à l'autre. Il peut aussi subdiviser en bras plus ou moins nombreux (Derruau, 1986). Comme le cas de l'Oued Lahdar au niveau des Centres de Had Msila et Meknassa El Gharbiya, dans cette section la période d'étiage se prolonge du mois de juin jusqu'à septembre et se caractérise par une nette individualisation du chenal.

Des définitions précédentes, nous pouvons déduire que le chenal représente le parcours de l'écoulement pendant la phase d'étiage. Il se caractérise par une largeur étroite par rapport à l'autre unité. Les dépôts sont essentiellement composés par les blocs, les galets et les éléments grossiers, en forme chenalisée.

Le chenal d'étiage ou le lit d'étiage de l'Oued Lahdar se divise en de multiples chenaux, séparés par des barres entre lesquelles l'eau s'écoule. Le tracé de ces chenaux, leurs emplacements et leurs morphologies changent après chaque crue.

4.2.2. Les lits :

Le lit désigne tout l'espace occupé, en permanence ou temporairement, par un cours d'eau. Leurs aspects constituent une sorte de synthèse de l'évolution géomorphologique régionale. Leur étude devrait être à la base de toute tentative d'aménagement, que ce soit, pour la régularisation des débits, pour la lutte contre les crues. De ce fait, ils offrent un intérêt primordial. Nous distinguons habituellement, le lit majeur (ordinaire et exceptionnelle), le lit moyen du lit mineur (Ballais et al., 2010). Il importe, tout d'abord de souligner que l'étude des lits fluviaux peut et doit se faire de deux points de vue différents, le point de vue hydrologique et le point de vue géomorphologique, (Ballais et al., 2010).

4.2.2.1. Le lit mineur (L1) :

Avant de déterminer les caractéristiques du lit mineur de l'Oued Lahdar, il faut d'abord comparer les définitions de cette forme géomorphologique.

- Le lit mineur, bien individualisé, se caractérise par une granulométrie grossière de son fond et ses limites des berges souvent subverticales et bien marquées. Le lit mineur se distingue ainsi à la fois de la bande active, caractérisée principalement par l'absence de végétation (Bravard et Petit, 1997), Ainsi le courant est-il relativement rapide et sa compétence élevée, ce qui permet le transport de particules grossières, comme les galets, qui bien souvent ne sont remuées et déplacées qu'en période de crue, pour des débits légèrement inférieurs au débit à pleins bords (Tricart, 1960).
- Le lit ordinaire, ou mieux le lit apparent, est bien déterminé entre des berges. Il est habituellement occupé par des matériaux roulés par les eaux et peu masqués, à l'inverse de lit majeur, par la végétation ou l'occupation humaine. Le lit ordinaire n'est pas toujours occupé puisque des bancs de sable ou de gravier y apparaissent (Derruau, 1986).

- Le lit mineur est un espace fluviale bien individualisé, caractérisé par la granulométrie grossière de son fond et sa limite sous formes de berges souvent sub-verticale et bien marquées (Masson et al. 1996).

La comparaison de ces définitions permet de retenir que le lit mineur est un espace fluvial qui forme un chenal unique ou des chenaux multiples et de bancs de sables ou de galets ; il est recouvert par les eaux coulants à pleines bords avant débordement. Généralement, Il est généralement constitué d'un chenal d'étiage et d'atterrissements. Il contient les crues annuelles à fréquentes. La largeur du lit mineur est très variable dans le temps et dans l'espace (10 à 30m), car les sections mouillées sont plus étroites ou plus larges selon la nature de la surface qui couvre la vallée.

4.2.2.2. Le lit moyen (L2) :

Le lit moyen est un espace fluviale situé à proximité du lit mineur, il est fréquemment occupé par les moyennes et les hautes eaux. Il s'agit d'un replat discontinu, puisqu'on ne peut pas le suivre le long de tous le cours d'eau. Leur surface est très étroite et dégradée suite à chaque crue.

4.2.2.3. Le lit majeur (L3) :

Le lit majeur ou le lit d'inondation, est toute la zone que le cours d'eau inonde et qu'il peut recouvrir des (alluvions modernes) des cartes géologiques. Il est occupé après les inondations par des sédiments exclusivement fins. Ces matériaux constituent le limon de débordement (M. Derruau. 1986).

Le lit majeur, en profil transversal, est une surface horizontale séparée du lit moyen par un talus. Il est constitué d'éléments fins dus au dépôt des matières en suspension en fin de crue, et n'est recouvert que par les crues les moins fréquentes (Ballais et al. 2007).

Le lit majeur de l'Oued Lahdar est un vaste replat très large, sa largeur peut dépasser 200 m. Sa surface est constituée par des matériaux fins et séparée de celle du lit moyen par un talus dont la hauteur varie de 1 à 3m. Les observations du terrain basées sur la hauteur des talus, Nous pouvons distinguer dans le lit majeur en deux unités : Lit majeur ordinaire et lit majeur exceptionnel.

4.2.2.3.1. Lit majeur ordinaire (L3) :

Ce lit présente une surface horizontale ou sub-horizontale séparée des autres lits de la plaine inondable par un talus. Le lit majeur ordinaire est inondé par les crues les moins fréquentes. La lame d'eau est moins importante que lors de l'inondation du lit moyen et le lit mineur (Ballais, 2007) ; ce qui explique les dépôts des éléments (limons, argiles) et la présence des sols légers et fertiles sur leurs replats.

L'occupation du sol se caractérise par la présence de végétation non hydrophile et souvent marquée la présence humaine.

4.2.2.3.2. Lit majeur exceptionnel (L4) :

Le lit majeur exceptionnel est une forme qui a été reconnue et décrite très récemment pour la première fois (Chave, 2002). Le lit majeur exceptionnel (L4) est moins inondé que lit majeur ordinaire. Il s'agit d'une forme discontinue, il est rarement préservé le long de l'Oued Lahdar. La différence d'altitude entre L3 et L4 est marquée par un talus de hauteur allant de 0,5 à 1m ; en revanche, ils sont caractérisés par les mêmes caractéristiques (granulométrie, couleur).

Le lit majeur exceptionnel de l'Oued Lahdar n'est inondé que par des lames d'eau plus importantes, en comparaison avec la submersion de ces autres lits en contrebas, ce qui explique l'abondance des dépôts d'éléments les plus fins. L'occupation du sol se caractérise par une exploitation humaine intense.

Le L4 est submergé à intervalles irréguliers, mais en tout état de cause. Par définition, jamais tous les ans (plus de 50 ans), aussi la végétation y rencontre-t-elle des conditions qui favorisent le développement des plantes résistant mal à la submersion les formations végétales y sont peu différentes de celles des interfluves (Tricart).

4.2.2.4. Terrasses fluviales :

Les terrasses fluviales constituent des formes héritées de conditions hydrodynamiques différentes de celles régissant actuellement les cours d'eau. Présentes sous toutes les latitudes et sous tous les types de climat, les terrasses fluviales sont des formes azonales qui sont cependant plus volontiers conservées sur les rives convexes des lits fluviaux s'écoulant dans des méandres encaissés. Si la définition d'une terrasse fluviale est acquise, le processus de sa formation ne fait pas l'unanimité des chercheurs. Plusieurs travaux ont traité le terme de terrasses fluviales. Elles permettent d'expliquer la genèse et la signification des terrasses d'une manière scientifique. Ces travaux ont essayé de définir la terrasse alluviale chacun de son point de vue ; mais dans le cadre général, on dit que la terrasse alluviale est souvent associée aux dépôts fluviaux :

Chaput (1924) in Gartet (2001) : considère une terrasse comme une accumulation alluviale. Il était le premier à donner une définition précise de la terrasse : « surface sensiblement horizontale, comparable à une plaine alluviale du lit majeur, d'une nappe d'alluvions anciennes... ». Il ajoute qu'une terrasse apparaît en pente douce, recouverte d'alluvions et par des talus à pente forte permettant l'affleurement de son substratum, (In Gartet, 2001).

Tricart (1947) in Gartet (2001) : ajoute que « la surface d'une terrasse doit être plane et ses dépôts épais pour éviter toute confusion avec replat d'érosion ».

Derruau (1956) in Gartet (2001) : « une terrasse alluviale présente un sommet plat – un témoin de lit d'inondation – et un rebord abrupt ». Il ajoute que « le sommet plat est plus souvent une surface de remblaiement, mais il peut parfois être une surface d'érosion taillée dans l'épaisseur d'une nappe alluviale ».

Viers (1967) in Gartet (2001) : une terrasse fluviale est un lit abandonné, non par divagation mais par incision : le cours d'eau coule en contrebas de la terrasse qui reste, contrairement au lit majeur, hors de portée des crues... ».

Texier (1979) in Gartet (2001) : « un replat topographique d'origine fluviale qui domine, rocheux ou alluvial, à surface plane ou peu incliné, abandonné et perché au – dessus du lit majeur actuel ».

Gartet (2001) : « la terrasse fluviale est un lambeau d'une ancienne plaine d'inondation (lit majeur abandonné) ; la nappe alluviale présente des structures internes et des lithofaciès similaires aux plaines fluviales actuelles. Il ajoute que la terrasse présente une surface sensiblement horizontale et un rebord escarpé ou en pente forte ; la planéité de cette surface pourrait être modifiée par des apports latéraux postérieurs ».

Au Maroc et en Afrique du Nord, la basse terrasse correspond à la terrasse soltanienne et la très las conclusions remettent en cause la signification climatique des étages Soltanien et Rharbien de la chronologie du quaternaire continental marocain (Beaudet et al, 1971 ; Choubert et al, 1956

; Texier et al., 1986 ; In Gartet, 2001). La terrasse Rharbienne (T1) correspond à la forme La plus généralisée des fonds des vallées. Son début d'accumulation daterait de l'Holocène inférieur. En revanche, le début de son accumulation n'est pas synchrone d'une région à l'autre et même à l'échelle du bassin versant (Gartet et al. 2001)

Nous proposons, en synthèse, la définition d'une terrasse suivante : la terrasse alluviale représente un ancien lit majeur, qui est devenu abandonné par l'enfoncement du cours d'eau.

La terrasse la plus récente et par conséquent la plus basse se trouve de quelques mètres au-dessus du cours d'eau, elle ne peut être inondée lors des grandes crues, elle est alors lit majeur abandonné. Les autres terrasses les plus anciennes sont situées parfois à plus de 100m au-dessus du chenal actuel. De toute façon elles ne sont pas inondables comme le cas de notre zone d'étude, elle existe des terrasses hors atteinte des crues.

4-3- Variation de la largeur des lits de l'Oued Lahdar :

Les investigations du terrain ont permis de constater que la largeur de la plaine alluviale de l'Oued Lahdar varie de l'amont à l'aval. La prise en compte de cette variation est fondamentale pour la compréhension l'écoulement des eaux des crues et de leurs charges en transit.

Cette analyse est réalisée à grande échelle spatiale, elle permet d'effectuer un suivi détaillé de la variation des lits de l'Oued Lahdar (lit mineur, lit moyen, lit majeur ordinaire et lit majeur exceptionnel). Les points de mesure des profils transversaux sont perpendiculaires au sens de l'écoulement. Afin d'analyser les variations d'un site à l'autre, nous avons reconstitué à partir de ces mesures des profils transversaux (dans les secteurs où les points de mesures sont distancés selon la variation de la largeur observée sur l'image satellitaire). Ce travail est complété par des visites de terrain.

Les lits de l'Oued Lahdar et particulièrement les lits majeurs (L3 et L4) subissent une dynamique très importante de leurs berges qui s'intensifie dans les cours moyen et inférieur. Cette dynamique dépend des caractéristiques morphologiques et hydrodynamiques du cours d'eau et se manifeste essentiellement par un sapement des bordures et des accumulations au pied de leurs talus.

Le long des cours d'eau les modalités de la variation de la largeur des lits varient et changent d'intensité d'un secteur à l'autre en fonction de style fluvial et de la disposition du réseau hydrographique et la nature du matériel (substrats, accumulations quaternaires).

La variation de la largeur des lits de l'Oued Lahdar varie d'une section à l'autre, à cause de la variation de la pente, selon la torrentialité du régime de l'écoulement dans la vallée et le tressage de chenal. Vers l'aval, la plaine alluviale tend à s'élargir avec l'augmentation, des apports latéraux. L'élargissement de la plaine alluviale atteint son maximum dans la vallée de Meknassa.

À l'amont, la vallée de l'Oued Lahdar façonnée dans les séries schisto - gréseuses reste encaissée et très étroite. Les accumulations quaternaires, représentées par des lambeaux de terrasses, sont rares. En fait sur tout dans la vallée de l'Oued Bni Ftah, il y a nombreux affluents, alors chaque cour d'eau il a une certaine capacité de transport, et chaque unité morphologique, mais généralement les lits dans la haute vallée restent étroits. En général, la largeur des lits mineurs dans notre zone se caractérise par une variabilité, puisqu'elle varie globalement entre 6 m à 67 m, (Tabl. 5.3).

D'après les visites de terrain et à l'aide de l'image satellitaire, nous remarquons que le lit moyen a été conservé de faible variabilité de mesure, notamment on observe ainsi un élargissement

du lit mineur ; cet élargissement est marqué au niveau des tronçons à méandres. La largeur de lit moyen varie de 10 m à 50 m, par contre le lit majeur (L3 et L4) est souvent très variable de rive gauche à la rive droite.

Tabl. 5. 3 - Variation (m) de l'extension latérale des lits dans la haute vallée de l'Oued Lahdar (Secteur de Bni Ftah).

Profils en travers	Variation de la largeur des lits en mètre							
	L1		L2		L3		L4	
	R. Gauche	R. Droite	R. Gauche	R. Droite	R. Gauche	R. Droite	R. Gauche	R. Droite
1_au niveau de l'Oued Dira	35	-	-	-	40	-	56	-
2_au niveau de l'Oued Dira	20	10	-	-	62	20	40	-
3_au niveau de l'Oued Dira	13	12	-	-	40	-	47	-
4_au niveau de l'Oued Bni Ftah	6	-	-	10	-	38	-	-
5_au niveau de l'Oued Bni Ftah	-	57	-	52	-	19	-	-
6_au niveau de l'Oued Bni Ftah	13	40	-	11	-	76	-	50
7_au niveau de l'Oued Lema	30	19	-	19	-	22	-	-
8_au niveau de l'Oued Lema	53	-	-	-	-	33	-	-
9_au niveau de l'Oued Lema	67	-	-	-	-	17	-	36

À l'amont de l'Oued Lahdar, la largeur de la plaine alluviale est variable, Nous avons constaté des rétrécissements de la plaine, le cas de la confluence avec de l'Oued Assamer et des élargissements relativement important, au niveau du Centre de Bni Ftah. Ces variations de largeur n'ont apparemment pas de relation directe avec les formations géologiques rencontrées, car le réseau hydrographique la même formation géologique, Cela peut être attribué aux variations de débits de chaque cours d'eau.

Dans le cours moyen de L'Oued Lahdar au niveau de secteur de Had Msila, le lit mineur se caractérise par des largeurs variables (Tabl. 5.4), allant de 31 m à 218 m, soit une largeur moyenne de 51 m. On note aussi des rétrécissements de ce lit près au niveau du Souk Had Msila, et un élargissement relativement important après le Souk. Ces variations de largeur n'ont apparemment pas de relation directe avec les formations géologiques rencontrées, parce que Lahdar coule dans le même substrat dans cette zone (marnes bleues et bancs gréseux, d'après la carte lithologie du BV).

Tabl. 5. 4 - Variation (m) de l'extension latérale des lits dans la moyenne vallée de l'Oued Lahdar (Secteur de Had Msila).

Profils en travers	Variation de la largeur des lits en mètre							
	L1		L2		L3		L4	
	R. Gauche	R. Droite	R. Gauche	R. Droite	R. Gauche	R. Droite	R. Gauche	R. Droite
1	19	31	-	31	15	-	-	-
2	46	10	22	-				
3	-	-	170	-	93	31	43	-
4	113	8	-	-	130	30	172	-
5	50	87	10		23	44	270	-
6	-	60	50	31	77	30	230	-
7	60	50	-	-	129	68	170	
8	57	70	-	-	90	52	32	-
9	218	-	-		68	-	72	-

Les largeurs mesurés du lit moyen varient entre 31 m et 170 m. Les valeurs les plus importantes sont enregistrées au niveau du vieux Souk, correspondant à un élargissement d'une valeur d'environ 170 m, en revanche la largeur du lit moyen diminue en amont du pont de la mosquée, où la valeur dans ce secteur ne dépasse pas 22 m.

Le secteur aval se caractérise par les confluences de l'Oued Ouertza à proximité de Meknassa et des oueds El Harrar et El Khemis à quelques kilomètres à l'Est de Béni Lent. En amont de cette dernière confluence, un élargissement de la vallée laisse voir une zone d'alluvionnement d'une cinquantaine de mètres de large, et de quelques 4 km de long. Plusieurs vagues de méandres se succèdent, d'amplitudes variant d'un tronçon à l'autre de coefficient de sinuosité est de l'ordre de 2,27. Les courbures et les sinuosités secondaires sont dues au jeu de l'ensemble des conditions hydro-géomorphologiques régionales et à l'évolution confuse de l'Oued dans laquelle intervient une série de facteurs locaux et variables.

En aval de Meknassa, l'augmentation de la largeur de lit majeur exceptionnelle est expliquée par la forte énergie qui caractérise l'écoulement de l'Oued, sur la majeure partie de Meknassa. L'extension de ce lit est de 262 m (Tabl. 5.5). Pendant les périodes de crues, les oueds dont les débits augmentent considérablement favorisent une érosion latérale très intense. Cette intense activité dynamique de l'Oued Lahdar dans ce secteur est soutenue par les perturbations que subit l'écoulement à cause des arrivées importantes d'eau et de charges solides provenant de ses affluents et des versants limitrophes.

L'analyse de la variation des lits, depuis Meknassa jusqu'à la confluence de l'O. Ouertza, montre une modification dans le tracé du lit moyen. Dans la partie amont de ce tronçon, le lit semble se déplacer vers la droite, ce déplacement s'est accompagné de rétrécissement de la largeur du lit moyen, atteignant 55 m à Meknassa et 184 m dans la partie aval de ce tronçon. Dans la partie aval de ce tronçon, le lit majeur conserve son tracé, mais il est nettement rétréci où sa largeur varie de 27 m à 34 m en moyenne.

Le lit majeur exceptionnel de l'Oued Lahdar dans sa moyenne et basse vallée se caractérise par des surfaces topographiques planes et de très faibles pentes. Il est marqué par une intense présence humaine.

Tabl. 5. 5 - Variation(m) de l'extension latérale des lits dans la basse vallée de l'Oued Lahdar (Secteur de Meknassa El Gharbiya).

Profils en travers	Variation de la largeur des lits en mètre							
	L1		L2		L3		L4	
	R. Gauche	R. Droite	R. Gauche	R. Droite	R. Gauche	R. Droite	R. Gauche	R. Droite
1	29	40	49	-	-	-	171	-
2	122	-	-	55	-	118	83	-
3	-	80	55	60	264	45	262	127
4	10	167	184	-	260	117	110	66
5	-	75	-	72	22	500		96
6	100	15	-	-	-	217	-	190
7	12	118			127	244		
8	89	-	-	101	190	240	-	45
9	-	74	-	34	-	270	-	174
10	57	-	73	28	27	56	171	51

La variation d'altitude entre le lit majeur ordinaire et le lit majeur exceptionnel est signalée par une pente de hauteur variée entre 0,5 et 1m. Ces lits sont dotés des mêmes caractéristiques (granulométrie, couleur).la largeur de le lit majeur exceptionnel est très variable et peut dépasser 250 m au niveau de Meknassa.

L'étude de la variation de la largeur des lits de l'O. Lahdar a permis de conclure en la forte variabilité des largeurs des lits sont liées au contexte morphostructural qui caractérise le BV et la morphologie de la plaine alluviale actuelle.

CONCLUSION :

L'oued Lahdar est caractérisé par une activité très importante des processus fluviaux en raison de la variabilité de pente, de la lithologie et de l'irrégularité du régime climatique et hydrologique. Es processus produisent des formes et des dépôts variables avec une prédominance des sédiments de petite taille.

La situation de l'organisation spatiale des réseaux hydrographiques du BV, a naturellement une grande influence sur le comportement des écoulements, en particulier le processus des crues des grandes artères hydrologiques Aussi, la pente du profil du réseau hydrographique joue un rôle important en provoquant les processus de chasse d'eau.

La dynamique fluviale est à la base de la variation de ces milieux ; elle est dirigée par le régime hydrologique. L'instabilité des milieux de dépôt est à la base de l'aggradation et des changements de lithofaciès qui se superposent pour constituer des couches alluviales.

Nous retenons que le cours d'eau de l'Oued Lahdar, n'est pas un cours d'eau tranquille... Par endroits, il érode, il accélère, ailleurs il ralentit et dépose. Il évolue aussi avec le temps. La dynamique fluviale qui régit ces phénomènes peut localement contraindre l'occupation des sols et les usagers...

L'évolution des styles fluviaux de l'Oued Lahdar sont régis par plusieurs facteurs de l'amont à l'aval : physique et anthropiques. L'interférence entre ces différents facteurs contrôle la dynamique d'alluvionnement ou de creusement et donc les bilans sédimentation - érosion dans les systèmes fluviaux.

En vue de ces interférences, l'évolution géomorphologique des plaines alluviales de l'Oued Lahdar est alternée par des périodes d'équilibre dynamique où les processus sont relativement simples, et des périodes de rupture d'équilibre et déséquilibre, plus ou moins intenses et brutales pendant lesquelles les modifications sont plus rapides et complexes : on passe ainsi de paroxysmes hydro-géomorphologiques (crises), déclenchés par des changements environnementaux à de nouveaux équilibres morphodynamiques, où des phénomènes opèrent un réaménagement progressif du modelé fluvial, en attendant bien sûr de nouvelles crises (nouvelles ruptures d'équilibre).

Enfin, la variation qui affecte la largeur des lits peut résulter de l'interaction de nombreux facteurs majeurs et secondaires dont les données ne sont pas toujours disponibles.

Chapitre 6

CARTOGRAPHIE DES ZONES INONDABLES (CZI) PAR L'APPROCHE HYDROGEOMORPHOLOGIE

Introduction :

- 1- L'approche hydrogéomorphologique, une méthode de cartographie des zones inondables,
- 2- Les principes de la méthode hydrogéomorphologique,
- 3- Les approches cartographiques de l'inondation des PA,
- 4- La cartographie des données : la carte hydrogéomorphologique ou carte d'inondabilité hydrogéomorphologique,
- 5-Croisement des approches pour la délimitation des zones inondables,

Conclusion :

INTRODUCTION :

Après avoir analysé le fonctionnement et la morphologie de la plaine alluviale du bassin versant de l'Oued Lahdar (chapitre 5) et étudié le risque d'inondation menaçant les sites situés dans la plaine alluviale (chapitre 4), ce chapitre vise à cartographier les zones inondables à partir de l'approche hydrogéomorphologique. Pour cela, nous avons adopté et adapté les approches et les méthodes les plus adéquates afin d'élaborer la carte des zones inondables de l'Oued Lahdar.

Les méthodes classiques de lutte contre les inondations, qui peuvent être approchées par des méthodes statistiques, présentent certaines limites dues à la forte variabilité interannuelle du fonctionnement du bassin versant (précipitation, température, écoulement, etc.). Elles ne donnent pas entière satisfaction tant du point de vue de la sécurité que de la réduction des impacts sur les milieux naturels.

Aujourd'hui, en réponse aux demandes des autorités gouvernementales, l'approche hydrogéomorphologique se présente comme un nouvel outil technique pour la gestion du risque d'inondation qui permet d'identifier les secteurs inondables et facilite l'aide à la décision. Cette méthode est fondée sur deux principes primordiaux : la précaution et la protection.

Dans ce chapitre, nous présentons les principes de l'approche hydrogéomorphologique et les bases de son fonctionnement d'une part, et d'autre part nous délivrons son aspect appliqué par une mise en pratique sur le bassin versant de l'Oued Lahdar.

Cette approche permet de fournir des informations qualitatives. Elle ne permet pas d'obtenir d'indication directe sur les hauteurs d'eau et les vitesses de l'écoulement. Elle permet par contre de disposer rapidement d'une cartographie précise en plan et homogène sur l'ensemble du secteur traité, prenant en compte la dynamique naturelle des écoulements et l'histoire du secteur. Le seul inconvénient de cette approche est que les limites fournies ne prennent en compte que les inondations par débordement et excluent les inondations par remontée de nappe, (Garry, 1997 ; Ballais, 2010, etc.).

Notre but étant de dresser une carte hydrogéomorphologique de la plaine alluviale de la vallée de l'Oued Lahdar. Pour cela nous nous sommes basés sur les documents disponibles :

- Les photos aériennes du BV,
- Les imageries satellitaires du BV,
- Les plans de restitution des Centres Had Msila, Meknassa El Gharbiya et Bni Ftah,
- Les cartes géologiques de Bab Mrouj, Aknoul et Taineste au 1/50000,
- Les cartes topographiques de Had Msila (1/25000), Meknassa El Gharbiya (1/25000) et Bab El Mrouj (1/50000)
- Des archives des crues précédentes, et
- Le travail de terrain.

1 L'APPROCHE HYDROGEOMORPHOLOGIQUE, UNE METHODE DE CARTOGRAPHIE DES ZONES INONDABLES :

L'analyse hydrogéomorphologique s'appuie sur la géomorphologie, « science ayant pour objet la description et l'explication du relief terrestre, continental et sous-marin » (Coque, 1993). En étudiant les reliefs aux échelles de temps géologiques, les effets du changement climatique et les processus de la morphogénèse actuelle.

En étudiant à la fois la mise en place des reliefs à l'échelle des temps géologiques, les effets des variations climatiques et les processus morphogéniques actuels (qui façonnent les modelés du relief), La géomorphologie fournit les bases d'une compréhension globale de l'évolution des reliefs à différentes échelles temporelles et spatiales, ce qui permet de tracer le modèle évolutif de chaque secteur étudié, en tenant compte de son histoire géologique et climatique.

1.1 Définition de l'approche hydrogéomorphologique :

La méthode hydrogéomorphologique est une méthode géomorphologique, appliquée aux vallées et plaines alluviales. C'est une méthode naturaliste qui s'inscrit dans l'évolution récente de la géomorphologie fluviale (Ballais et al. 2010). Validée depuis 1996 par les ministères responsables de la prévention des dangers d'inondation, (Masson et al., 1996).

Elle se situe dans la grande tradition de l'étude des hydrosystèmes fluviaux initiée par Davis (1899), puis reprise par Leopold et al. (1964), (in Ballais et al. 2010) ; cependant, elle se distingue de ces derniers par la problématique du risque qui conditionne son application. Son but n'est pas une connaissance théorique du fonctionnement des cours d'eau, mais plutôt la délimitation de l'enveloppe maximale de la zone inondable sur l'ensemble des cours d'eau.

Cette approche ne tient pas compte des effets des travaux et des divers aménagements réalisés dans les différents lits des rivières. Les seuls éléments permettant la quantification des hauteurs d'eau restent les données historiques, les suivis réalisés à l'aide des appareils de mesure et les modélisations hydrauliques.

La cartographie hydrogéomorphologique est un des outils permettant de diagnostiquer le risque inondation, en complément d'autres méthodes historiques, hydrologiques et hydrauliques. En tant que telle, elle est différente, et possède ses propres atouts et limites qui sont aujourd'hui bien connus.

L'analyse naturaliste est basée sur une science d'observation ; elle permet uniquement d'obtenir des informations qualitatives : La quantification se limite à distinguer les zones concernées par toutes les crues, y compris les plus fréquentes et les zones uniquement submergées par les crues rares. En particulier, elle ne fournit pas de preuve directe des hauteurs d'eau et des vitesses d'écoulement.

L'approche hydrogéomorphologique permet, par contre, de disposer rapidement d'une cartographie précise en plan et homogène sur l'ensemble du secteur traité. Elle prend en compte la dynamique naturelle des écoulements et l'histoire du secteur. Ceci permet notamment de pallier les insuffisances des séries statistiques hydrologiques et de mettre en évidence les tendances évolutives des cours d'eau et de la plaine alluviale qui lui est associée avec par exemple la sur-sédimentation exhaussant le niveau du plancher alluvial et entraînant par conséquent une tendance à l'extension de la zone inondable, ou au contraire la tendance à l'encaissement du cours d'eau.

1.2 La mise en œuvre de la méthode hydrogéomorphologique pour la spatialisation du risque d'inondation :

L'analyse hydrogéomorphologique est effectuée par la photo-interprétation des photographies aériennes et des images satellitaires. Les observations de terrain permettent de vérifier et de compléter les données issues de l'interprétation précédente.

1.2.1 La photo-interprétation :

La première étape consiste en un travail de photo-interprétation, qui donne un aperçu du secteur étudié ; ce qui est souvent primordial pour apprendre son fonctionnement. La seconde comprenait la validation sur le terrain de la cartographie réalisée et permet de compléter les résultats de cette première phase. Les visites de terrain permettent, outre la validation de la carte, d'observer l'ensemble des éléments marqueurs laissés par les crues récentes de la rivière, et notamment :

- La nature des formations superficielles des différents lits,
- La végétation, dépendante de la nature des sols et des caractéristiques hydrologiques,
- Les traces d'inondation : laisses de crue, érosions, atterrissements, sédimentation dans les unités hydrogéomorphologie, etc.

La complémentarité de ces deux étapes permet de distinguer les différentes unités géomorphologiques composant la plaine alluviale. De plus, elles permettent d'apporter des informations sur l'extension et le développement des activités humaines. Ces deux étapes complémentaires sont indissociables.

L'analyse des images satellitaire et des restitutions des tronçons étudiés permettent une reconstitution de la sensation de relief. On obtient une vision globale plus efficace que celle résultant du terrain, en mettant en relation des indices appartenant à un même paramètre mais souvent partiellement effacés. L'analyse de tous les clichés par les systèmes d'information géographique, permet la restitution graphique des différents éléments du paysage sur un fond de plan.

1.2.2. Les observations de terrain :

L'analyse de terrain systématique vient compléter le travail de la photo-interprétation. Indispensables, ces observations de terrain permettent de valider et d'affiner (dans le cas d'un couvert végétal important par exemple ou d'une limite faiblement marquée) les informations obtenues par photo-interprétation.

Les photographies aériennes et les images satellitaires acquises lors de crue sont très pertinentes pour la cartographie du risque inondation. D'une part, elles fournissent des informations qualitatives concernant les conditions d'inondation dans les zones touchées, et peuvent être très utiles pour la gestion des crises. D'autre part, ces données permettent d'accéder à des informations instantanées mais réparties dans l'espace concernant les surfaces inondées, et les niveaux d'eau propagées par croisement avec des données topographiques.

En effet, l'exploitation des données d'observation de terrain pour la cartographie du risque d'inondation constitue un outil important des travaux d'élaboration des cartes indicatives du risque d'inondation.

En outre, les données d'observation de terrain, présentent une aide très utile aux modélisations spatiales du risque d'inondation, notamment pour la définition des conditions initiales de l'aléa, mais aussi pour le calage et la validation des modèles. Cependant, elles ne représentent qu'une partie des informations nécessaires à la mise en place de ces modèles. A titre d'exemple, dans une modélisation hydraulique, les informations concernant la topographie de la plaine alluviale sont indispensables grâce à la télédétection spatiale ; de plus, elles sont très utiles

pour des estimations locales de niveaux d'eau à partir de données de laisses de crues ou de limites d'inondation issues d'images de télédétection, cependant l'élaboration des documents cartographiques présentant le risque d'inondation demande la mobilisation d'autres outils et méthodes.

Sur le terrain, la validation des cartes passe par la reconnaissance des structures topographiques identifiées sur les photographies. Les géomorphologues ayant réalisé les cartes parcourent les cours d'eau accessibles en vérifiant la réalité des reliefs, morphologie repérée sur les photographies. Ils s'assurent du bon positionnement des objets sur le fond de plan et valident l'interprétation des unités hydrogéomorphologique, privilégiant les secteurs où la photo-interprétation a rencontré des difficultés afin de lever les incertitudes.

1.2.3 Données historiques :

Les témoins historiques des inondations sont très pertinents pour cartographier les zones inondables. Ces données historiques peuvent être recueillies soit par les enquêtes de terrain en interrogeant les riverains qui ont vécu des événements antérieurs, soit en revenant aux archives et aux textes historiques. Ces données peuvent fournir des indices très précieux pour la spatialisation des zones inondées, en appui aux traces des inondations passées. Tout cela permet de relier le passé avec le présent lors de l'observation des déformations actuelles d'un territoire qui témoignent de la violence des événements passés.

Ces données sont analysées afin de vérifier la validité de l'information et ceci grâce à des recoupements de différentes sources. Ces repères peuvent être complétés par de nouveaux relevés effectués lors des visites de terrain et des enquêtes menées auprès de la mairie et des riverains. Ce travail permet d'affiner la cartographie hydrogéomorphologique tout en réalisant une synthèse des événements passés.

L'approche historique offre des opportunités de plus en plus demandées chez les chercheurs en matière de la cartographie des zones inondables ; en effet, les événements antérieurs peuvent donner des indices très précieux pour la connaissance du comportement global du cours d'eau en question, à savoir :

- ***L'ampleur du phénomène ou sa magnitude*** exprime l'importance des inondations passées à travers une interprétation des débits maximums bruts (m^3/s), des débits spécifiques maximums (l/s/km^2), ainsi que les volumes d'eau écoulés pendant les événements historiques ;
- ***L'extension spatiale*** permet de délimiter l'espace effectivement concerné par les inondations ;
- ***La fréquence*** traduit l'occurrence du phénomène ;
- ***Le rythme temporel*** complète la notion de fréquence en mesurant l'espacement (aléatoire, cyclique, saisonnier, ...) entre deux événements de même type ;
- ***La durée*** témoigne de la persistance de l'inondation sur une période donnée ;
- ***La vitesse de propagation*** relate la rapidité des phénomènes passés,

Ces indicateurs fournissent des clés pour mettre en œuvre une gestion de la crise comme le calage des systèmes d'alerte des inondations.

Malgré les difficultés d'intégrer les connaissances historiques dans la cartographie des zones inondables (problèmes des sources de données, précision qualitative et spatiale, etc.). Cette approche est très pertinente et de plus en plus utilisée, surtout pour le calage de certains modèles.

2 LES PRINCIPES DE L'APPROCHE HYDROGEOMORPHOLOGIQUE :

L'analyse hydrogéomorphologique de la vallée est destinée à mieux comprendre l'espace alluvial et le fonctionnement du cours d'eau. Cette méthode permet de préciser l'enveloppe maximale de la zone inondable d'un cours d'eau en s'appuyant sur l'analyse de la morphologie de la plaine alluviale. Cette méthode fait appel à des connaissances géographiques et géologiques du secteur, ainsi qu'à des techniques de lecture de paysage et d'interprétation de document.

Cette approche permet de délimiter, au sein des plaines alluviales, les zones qui sont exposées à des crues fréquentes, rares et exceptionnelles (lit mineur, moyen, majeur et majeur exceptionnelle) et celles qui ne sont jamais submergées, comme les terrasses.

La méthode hydrogéomorphologique repose sur l'analyse des différentes unités morphologiques constituant le plancher alluvial. Les critères d'identification et de délimitation de ces unités sont la topographie, la morphologie, la sédimentologie et les données relatives aux crues historiques, souvent corrélées avec l'occupation du sol.

La clé d'une interprétation hydrogéomorphologique fructueuse réside dans la combinaison de critères d'identification appartenant aux domaines de la morphologie, de la sédimentologie, de l'occupation du sol ou encore des données historiques.

2.1 La géomorphologie :

L'observation de la morphologie de la plaine alluviale a constitué souvent la porte d'entrée de l'interprétation. Le regard du géomorphologue intéresse l'identification des replats et des ruptures de pente ; ces derniers sont synonymes de changement d'unités, ainsi que vers les surfaces horizontales et subhorizontales, caractéristiques des formations alluviales (Derruau, 1974 ; Masson et al. 1996 ; Nanson et Croke, 1992).

Les cours d'eau d'ordre 3 à 4 minimum (Strahler, 1952, in B Ballais. et al. 2010), dans la zone de transfert (Shumm, 1977, in Ballais. et al. 2010) se caractérisent donc en général par l'existence de trois (parfois quatre) lits : le lit mineur, le lit moyen et le lit majeur (ordinaire et exceptionnel) (Fig. 1). L'ordination de Strahler est la plus communément utilisée et, nous servira de base, bien que son utilisation soit parfois difficile.

2.1.1. Les lits :

Les lits sont des unités spatiales comprises entre deux talus continus et qui constituent les surfaces d'écoulement des eaux. Ils sont hiérarchisés en fonction des débits à écouler, depuis l'étiage jusqu'à la crue exceptionnelle (Ballais et al. 2010), (Fig. 6.1).

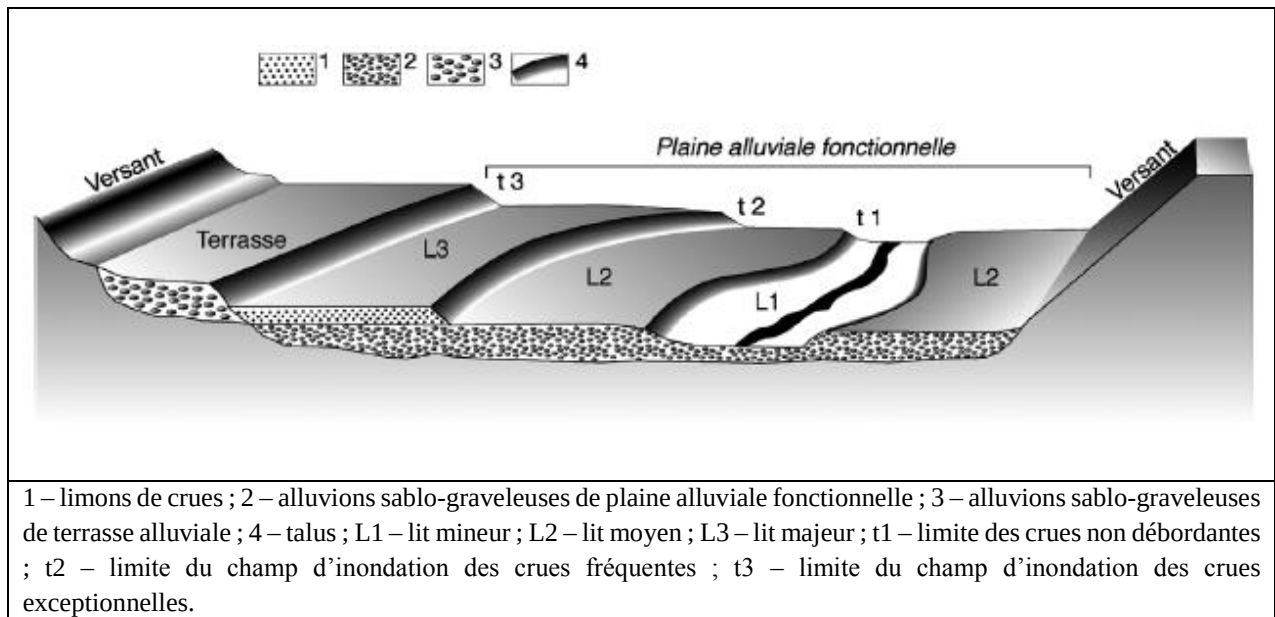


Fig. 6. 1 – Disposition relative des lits d'une plaine alluviale. [Ballais et al. 1997]

Chaque lit représente une unité morphologique et manifesté globalement à un plan sensiblement horizontal en section transversale et faiblement incliné de l'amont vers l'aval.

2.1.1.1. Lit mineur (L1) :

Le lit mineur, lit le plus facilement identifiable sur le terrain est constamment occupé par les écoulements (Bravard et Petit, 1997), sauf exception, comme dans le cas des oueds (Ballais, 1995 ; Veyret, 1998). Il est en général bien délimité entre des berges souvent abruptes. La largeur du lit mineur est très variable dans le temps et dans l'espace (10 à 30m), car les sections mouillées sont plus étroites ou plus larges selon la nature de la surface qui couvre la vallée. Sur certaines berges, après le lit mineur le passage à la terrasse fluviale (sapements de berges actif). Dans certaines sections, les talus qui séparent le lit mineur et le lit moyen n'apparaissent pas en fonction de l'effet d'une dégradation progressive de la pente sur la plaine alluviale.

2.1.1.2. Lit moyen (L2) :

Il est situé à proximité du lit mineur et submergé par les crues les plus fréquentes, avec des périodes de retour de un à cinq ans, voire 10 ans selon Masson et al. (1996). Il est constitué d'une surface bosselée formée de creux et de monticules. Les lits moyens possèdent une topographie irrégulière composée de chenaux et de zones de dépôts de sédiments grossiers expliqués par les courants puissants qui peuvent parcourir cette surface. Cette topographie irrégulière est liée aux dynamiques très fortes qui l'affectent lors des crues : les courants violents creusent des chenaux tandis qu'ailleurs les écoulements plus faibles accumulent des galets ou des limons.

2.1.1.3. Lit majeur ordinaire (L3) :

Il est inondé uniquement par les grandes crues, au contraire des lits mineur et moyen. Le lit majeur est formé d'un niveau topographique plan, constitué généralement de sédiments très fins : les limons (environ 0.05 mm de diamètre) déposés par les crues passées. Les lits majeurs sont des espaces très prisés des sociétés humaines en raison de la fertilité des sols et des surfaces planes

faciles à aménager. Ils concentrent la grande majorité des enjeux en zone inondable. (Ballais et al. 2011 ; Masson et al. 1996). L'eau écoulée sur le lit majeur peut toucher la végétation non hydrophile et plusieurs quartiers situés sur le lit majeur. Ce dernier est séparé du lit moyen par un talus caractérisé souvent par une altitude entre 0,5 et 1,5 m, et par une pente obliquée vers le lit moyen.

2.1.1.4. Le lit majeur exceptionnel (L4) :

Sa forme a été reconnue et décrite pour la première fois (Chave, 2002). Il est situé un peu plus haut que le lit majeur ordinaire et inondable exceptionnellement. Lorsque le lit majeur est constitué de plusieurs niveaux alluviaux, le niveau le plus haut est alors nommé lit majeur exceptionnel, moins fréquemment inondable. Ces lits majeurs exceptionnels sont liés à une évolution morphodynamique spécifique et récente du cours d'eau, qui a successivement privilégié des dynamiques de sédimentation puis d'incision dans la plaine. Le lit majeur exceptionnel, tout comme le lit majeur ordinaire, est une surface horizontale ou subhorizontale constituée d'une formation fine, en général limono-argileuse. Comme il se situe en position topographique supérieure, les courants qui l'affectent sont très faibles et les crues qui peuvent le submerger sont très rares.

La limite externe du lit majeur permet de définir la courbe enveloppe des plus grandes crues passées, c'est-à-dire la limite de l'extension maximale des crues, que nous avons définie comme la limite de la zone inondable. En d'autres termes, la limite externe du lit majeur constitue également la limite entre la plaine alluviale fonctionnelle et l'encaissant, terme proposé par R. Lambert (in Delorme-Laurent, 2007), et qui désigne l'ensemble des terrains, des formations, des roches, quelles que soient leur genèse et leur nature lithologique, dans lesquels s'entaille cette plaine alluviale fonctionnelle.

2.1.2 Les talus :

Les talus correspondent à une forme géomorphologique, caractérisée par une pente faisant la séparation entre les différents lits de la plaine alluviale. Le talus marque la limite d'extension des crues, il sépare les différents lits de la plaine inondable. L'identification des talus est nécessaire à l'observation des terrains. En revanche les relations entre chenal, lit mineur, lit moyen et lit majeur varient d'un cours d'eau à l'autre, et pour le même cours d'eau, d'un point à un autre, en fonction du régime de ce cours d'eau.

La limite la plus nette est celle qui se place entre le lit mineur et le lit moyen, sous forme de talus, hautes de plusieurs centimètre ou plus. Ces talus sont façonnés quand l'eau s'écoule à pleins bords dans le lit mineur, avant de déborder dans le lit moyen. Elles sont donc d'autant plus nettes qu'elles sont plus souvent soumises à ces débits et que ces débits sont plus durables. Le talus est élément morphologique particulièrement important, car il marque la limite d'extension des crues. Très visible dans certaines configurations (Photo 6.1), il peut aussi s'effacer entièrement. Il est donc indispensable de préciser les conditions de son identification pour le cartographe.



Photo 6. 1 - Morphologie et aspect des talus et des lits en rive gauche de l'Oued Lahdar au niveau de Meknassa El Gharbiya.

Les talus de grandes hauteurs font la séparation entre la zone des chenaux et la zone inondable, et les talus de faibles hauteurs font la séparation entre les différents éléments de la plaine inondable. Dans notre zone d'étude elle existe plusieurs types de talus mais les plus abondants se caractérisent par de faible hauteur surtout la partie là où le cours d'eau est très large comme la présente dans la base vallée du BV. La pente des talus est très variable, en fonction de la nature des matériaux qui le constitue (Fig. 6.2).

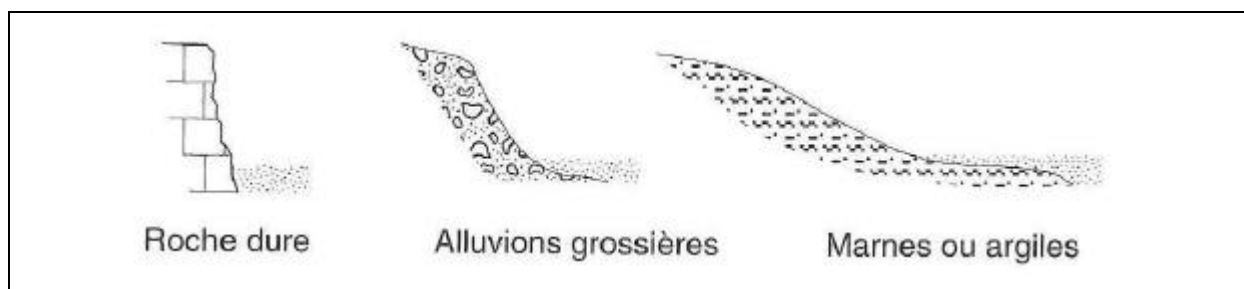


Fig. 6. 2 - Types des limites externes de plaine alluviale moderne constituées par un talus d'érosion (Jean-Louis Ballais ; 2017).

2.2 La sédimentologie :

Les unités de la zone inondable sont constituées des matériaux déposés par le cours d'eau tels que des limons, des sables, ou des matériaux plus grossiers, tels que des galets arrondis par le transport fluvial. A contrario, les unités de l'encaissant sont constituées de matériaux anguleux, ou surdimensionnés en comparaison de la capacité de transport du cours d'eau. L'étude de la sédimentologie est particulièrement intéressante lorsqu'il subsiste des doutes sur la localisation de la limite de la zone inondable, par exemple entre le lit majeur et des colluvions qui adoucissent le talus externe du lit majeur par ruissellement diffus (Ballais et al., 2011; Delorme-Laurent, 2007; Diren, 2007; Dupont et al., 2005; Masson et al., 1996). La limite de zone inondable bien que peu

nette morphologiquement est délimitée par la différence de couleur des sols. De gauche à droite, on observe un dégradé de brun, (Nejjari ; EL Ghachi.2016). Ce dégradé met en lumière la présence de limons plus importante en lit majeur et une pédogénèse plus développée sur le versant.

2.2.1. Lit mineur :

Le lit mineur est un espace fluviale bien individualisé, caractérisé par la granulométrie grossière de son fond et ses limite sous formes de berges souvent sub-verticale et bien marquées (Masson et al ., 1996).Le courant est relativement rapide et la capacité est forte, ce qui peut transporter des particules grossières telles que des galets (Photo 6.2).



Photo 6. 2 - Dépôts du lit mineur de l'O Lahdar à Bni Ftah.

En générale, le fond du lit mineur est le plus souvent recouvert de galets dont la taille varie en fonction de la capacité de transport du cours d'eau et de la localisation au sein du bassin versant, d'amont vers l'aval. Il peut aussi être constitué d'éléments fins en fonction de la nature géologique dans lequel passe le cours d'eau. En effet, le lit mineur de l'Oued Lahdar a l'amont, se caractérise par l'absence de galets, sauf localement sous forme de galets de quelques centimètres de long (fraction supérieur à 2mm), et par la prédominance des argiles et des limons.

2.2.2. Lit moyen :

Le lit moyen est dû à sa topographie irrégulière et à son fonctionnement intermittent de ses chenaux de crue, présentant souvent de fortes variations de la granulométriques, (Photo 6.3). De même, cette topographie irrégulière est liée aux dynamiques très fortes qui l'affectent lors des crues : les courants violents creusent des chenaux tandis qu'ailleurs les écoulements plus faibles accumulent des galets ou des limons.



Photo 6. 3 - Dépôts de lit moyen au niveau de Meknassa El Gharbiya.

Cependant, il est à noter que la granulométrie qui constitue cette unité est aussi largement fonction de ce que peut fournir le substrat.

2.2.3. Lit majeur ordinaire :

Les courants y sont aussi moins forts, il n'y a pas de perturbations, ce qui n'empêche pas que les hauteurs d'eau et les vitesses puissent y être importantes, Ces conditions permettent de déposer des matériaux fins (sables, limons, argiles) sous forme de dépôts horizontaux, (Photo 6.4). Immédiatement après les crues exceptionnelles, il est parfois mobilisé par des crues plus fréquentes, mais reste en général moins souvent submergé que le lit moyen.



Photo 6. 4 - Dépôts fins d'une crue dans la plaine d'inondations au niveau de Meknassa El Gharbiya.

Par ailleurs, de point de vue lithologique, il existe une différence fondamentale entre les lits qui incisent des matériaux meubles, et ceux qui incisent des matériaux cohérents. En effet, dans la mesure où les particules des matériaux meubles ne sont pas trop grossières, les cours d'eau peuvent aisément adapter leur lit aux contraintes hydrodynamiques. (Masson, Garry, Ballais, 1996)

Enfin, ces dépôts fins de lit majeur ont des couleurs souvent sombres, dues à la richesse en matière organique et aux phénomènes de réduction alors que l'encaissant, mieux oxygéné, se caractérise par des dépôts ocres, plus clairs.

2.2.4. Lit majeur exceptionnelle :

Les alluvions qui constituent le sommet des lits majeurs exceptionnels ressemblent beaucoup à celles qui occupent la même position dans les lits majeurs ordinaires. Malgré leur découverte récente et leur petit nombre, elles commencent à être bien connues (AIMON, 2003 ; CHAVE 2003 ; DELORME-LAURENT, 2007 ; BALLAIS., 2009 ; A. ZAGHDOUD).

Vers l'aval, les cours d'eau principaux présentent souvent une morphologie différente de celle du cours moyen, la diminution de la pente provoque une diminution de la granulométrie, de sorte que le lit moyen lui-même est constitué de dépôts fins qui s'accumulent immédiatement sur les bords du lit mineur. Il s'en suit la disparition progressive du lit moyen, puis, plus à l'aval, la formation de bourrelets de berges caractéristiques des lits en toit. Le lit majeur, toujours localisé à l'extérieur du lit moyen. Les dépôts du lit majeur se distinguent plus difficilement de ceux du lit moyen, mais toujours nettement de l'encaissant.

2.3 Les critères complémentaires :

L'indentification des unités hydrogéomorphologique peut s'appuyer sur des critères autre que la topographie et la sédimentologie telles que l'occupation du sol ou l'organisation du parcellaire et la couverture végétale naturelle.

2.3.1. La couverture végétale naturelle :

Lorsque la végétation est bien représentée dans la plaine alluviale, elle reflète très fidèlement les conditions des unités géomorphologiques. En effet, la répartition des espèces végétales de la vallée alluviale reflète la relation entre ces espèces et l'étagement de la plaine alluviale. On observe ainsi un étagement de la végétation en fonction de l'attitude de celle-ci.

2.3.1.1. Le lit mineur :

L'occupation du sol se caractérise par une végétation de type hydrophile très évoluée en raison de la fréquence de l'écoulement des eaux. Le lit mineur et présent des plages de galets souvent colonisées, de façon sporadique, par des espèces herbacées. La flore de type immergé ou semi-immergé est principalement développée dans le lit toujours en eau, dit lit vif, correspondant au lit mineur en zone tempérée, et au lit d'étiage dans le domaine méditerranéen, (Ballais. et al, 2010). Alors les lits mineurs de l'Oued Lahdar (Photo 6.5) sont peu ou pas colonisés par la végétation aérienne en raison de la fréquence de l'écoulement des eaux. La principale rugosité est constituée par celle des alluvions du fond du lit, d'une part, et par celle des berges, d'autre part.



Photo 6. 5 - Aspect de végétation dans le lit mineur au niveau de la C. de Meknassa El Gharbiya.

2.3.1.2. Le lit moyen

Est souvent colonisé par une ripisylve (Piégay, 1995), constituées d'associations végétales variables selon les conditions climatiques régionales. Le développement de cette végétation est en fonction de la fréquence et de la force des crues : faible, et limitée aux berges des anciens chenaux pour des conditions hydrogéomorphologique très dures, elle peut occuper la totalité de l'espace de lit moyen dans certains cas favorables. La photo 6.6 présente le lit moyen par une rugosité considérable, due à la végétation. Les buissons, les herbacées peignent le courant et le ralentissent considérablement.



Photo 6. 6 - Aspecte de végétation au niveau de lit moyen au milieu du BV.

Il permet l'implantation d'espèces végétales constitutives du groupement des forêts riveraines des cours d'eau, constituées d'associations végétales variables selon les paramètres régionales, l'évolution de cette végétation est en fonction de la fréquence et de la compétence des crues.

2.3.1.3. Le lit majeur (exceptionnel et/ou ordinaire) :

est naturellement occupé par une ripisylve de composition floristique différente. Cette occupation fait depuis très longtemps l'objet d'une mise en culture systématique, éradiquant pratiquement la végétation spontanée, (Photo 6.7).



Photo 6. 7 - Aspecte de l'exploitation intensive en agriculture des lit majeur à l'aval du la plaine alluviale de l'Oued Lahdar.

2.3.2. L'occupation humaine :

Dans un chapitre précédent, nous avons traité l'importance de l'occupation humaine dans le BV de l'Oued Lahdar, l'ancienneté de cette occupation est démontrée par l'importance de la dégradation des sols sur les versants. Les installations humaines et les activités anthropiques sont développées sur la plaine alluviale de l'Oued Lahdar au moins depuis les années soixante.

La PA de l'O Lahdar se caractérise actuellement par une concentration humaine et des activités socio-économiques relativement importantes. En effet, plusieurs infrastructures, activités économiques et exploitations agricoles sont exposés aux effets de la dynamique de l'Oued Lahdar et particulièrement au risque d'inondation, liés aux débordements des oueds Lahdar et ses affluents.

De manière générale, l'aspect traditionnel de l'utilisation du PA, associant cultures herbacées, persiste toujours. Au niveau des cultures, on assiste à une dominance très nette des cultures irriguées vu que les plaines alluviales se caractérisent généralement par la présence d'une nappe peu profonde, et de sols profonds et fertiles, favorables à l'agriculture.

Depuis longtemps l'urbanisation accélérée dans la plaine de l'Oued Lahdar a engendré de nouveaux problèmes, dus principalement à l'occupation des terres inondables. L'implantation de l'habitation et l'existence des exploitations agricoles sur le lit majeur de l'Oued Lahdar,

provoquent l'instabilité de leurs berges et accentue le risque d'inondation. Lors des crues intenses, plusieurs champs agricoles ont été submergés totalement ou partiellement.

Un certain nombre d'éléments d'occupation du sol affectent le fonctionnement de l'Oued, notamment en faisant obstacle aux écoulements. Pour cette raison, les modes d'utilisation de la PA sont influencés par de nombreux facteurs, dont les structures agraires, les caractéristiques du milieu physique, ainsi que les interventions anthropiques sur la PA. Ces dernières restent les plus importants, et dans lesquelles nous pouvons distinguer :

Les éléments naturels d'occupation du sol : la ripisylve

La ripisylve constitue un corridor boisé qui borde le lit mineur des cours d'eau et occupe des surfaces plus ou moins importantes au sein des plaines alluviales, (Mathieu et AL.2007). Cette végétation des berges joue un rôle majeur dans le fonctionnement hydraulique de l'Oued.

Par effet mécanique (obstacle à l'écoulement), elle favorise le ralentissement des crues (dispersion des lignes de courant, diminution de la force érosive) ainsi que le stockage temporaire des eaux, (Mathieu et AL.2007). Certains éléments arrachés par le courant deviennent des corps flottants charriés par les flots qui peuvent s'accumuler (par exemple sous les ponts) et former des embâcles (bouchons). Dans plusieurs cas, ces ponts favorisent l'obstruction, et l'engorgement du lit du cours d'eau. Au moment des crues, les ponts se comportent comme des barrages, ils retiennent une grande quantité d'eau en amont des ponts, ceux-ci deviennent colmatés partiellement ou totalement par les sédiments qui sont transportés par l'écoulement (le cas du pont Mosquée, (Photo 6.8) qui engendre un débordement fort et large sur les côtés des ponts colmatés.



Photo 6. 8 - Aspect de ripisylve au bord d'une barre longitudinale a l'amont de C. Had Msila.

La ripisylve est essentiellement limitée aux lits moyens, auxquels elle est étroitement associée. Sa composition et son développement sont fonction des conditions climatiques régionales, de la nature des sols, de la fréquence et de la force des crues.

L'activité agricole :

L'activité agricole est très intensifiée dans la zone aval du BV que dans les portions amont et moyen du BV, Quant aux types de production agricole, elles sont importantes dans la zone aval, au niveau des méandres ; où abondent les oliviers, les produits hydratés, le blé et l'orge, etc.

L'activité agricole était également adaptée, avant la période contemporaine, à l'existence de l'aléa inondation : le lit majeur était réservé aux cultures annuelles, le lit moyen ne serait pas cultivé et serait parfois utilisé en prairie.

Les digues :

Les aménagements anthropiques, ainsi que certains éléments du milieu naturel, ont des incidences directes sur l'hydrodynamisme des cours d'eau. Il ne s'agit pas ici de faire un relevé exhaustif de l'occupation des sols en zone inondable, mais de faire apparaître les facteurs déterminants influençant le comportement des crues.

Les digues sont des barrières construites volontairement pour essayer d'influencer le fonctionnement naturel d'un cours d'eau, (Mathieu et al.2007). Elles peuvent être de plusieurs types : merlons en terre, digues maçonnées, ou de composition hétérogène du fait des nombreux travaux de réparation, d'élargissement ou de rehaussement dont elles ont fait l'objet. Des digues anarchiques ont été construites par les débris de matériaux de construction et les boues extraites du chenal de l'Oued Lahdar, (Photo 6.9).



Photo 6. 9 - Aspect de digue influençant le fonctionnement naturel de l'O Lahdar à Had Msila.

Les digues ont été mises en place progressivement après les fortes crues pour canaliser le cours d'eau, et afin de gagner des terrains qu'on peut préserver à l'agriculture et l'installation des routes. Les matériaux des digues ont été déposés et remblayés aux limites des unités morphologiques de la PA. Ils ont constitué des obstacles aux écoulements lors des crues, déviant le courant de l'Oued et des fois réduisant la section submersible, pouvant ainsi entraînant des débordements des eaux sur des zones jusqu'alors non menacées.

La vocation essentielle des digues étant de détourner les écoulements de leur lit naturel, de forcer la sédimentation à des fins agricoles. De plus il y a des digues sous forme des murs de soutènement, le cas de la digue de Had Msila (Photo 6.10 et Photo 6.11).



Photo 6. 10 - Situation de rive droite de l'Oued Lahdar avant la construction de la digue.

Source : Commune rural, Had Msila



Photo 6. 11- Situation de rive droite de l'Oued Lahdar après la construction de la digue.

Ces digues ont été créées pour orienter le cours d'eau et limiter les débordements latéraux pour protéger la route provinciale RP 5414.

Le placement des digues identifie les plus importantes sans pouvoir prendre en compte leur effet de protection qui est tributaire de l'état des ouvrages et de leur dimensionnement.

Les carrières :

Les carrières alluvionnaires sont installées dans la plaine alluviale au niveau de Centre de Meknassa par des entreprises d'exploitation, profitant des épandages des alluvions frais et lessivés au niveau de la plaine alluviale, d'une barre latérale ou d'une barre de chenaux (Photo 14). Normalement l'exploitation des alluvions anciennes répond parfaitement aux normes du cahier des charges pour l'exploitation des alluvions. Ces types d'exploitation, est prévaut dans la vallée de l'Oued Lahdar, sur la rive droite entre le village de Meknassa et la confluence de l'Oued Quartza, mais il y a des implantations des carrières alluvionnaires dans le lit mineur. Ce sont les entreprises d'exploitation clandestines, qui à la hâte, profitent des épandages des alluvions frais et lessivés au niveau d'un méandre, d'une barre latérale ou d'une barre de chenaux (Photo 6.12).



Photo 6. 12 – Exploitation d’une carrière alluviaux dans la PA de l’Oued Lahdar à l’aval de C. Meknassa El Gharbiya.

Ne disposant pas de chiffres exacts des tonnages prélevés dans les sablières et les gravières de l’Oued Lahdar, l’étude se limite à l’analyse des caractéristiques des carrières et l’impact de leur utilisation et aux transformations morphodynamiques dans le système vallée. Durant les différentes phases de l’exploitation, nous observons les impacts directs de l’activité d’extraction sur les eaux superficielles, en raison de l’existence de la zone d’exploitation de la carrière près de courant de l’Oued Lahdar ; ce qui conduit à un risque de contamination des eaux par les hydrocarbures et les huiles des engins. Ainsi l’impact de l’extraction provoque une modification des conditions de surface de la plaine alluviale. Ces modifications sont aussi provoquées par les mouvements des engins sur les pistes voisines des champs cultivés, ou par l’extraction à côté des rives de l’Oued ce que engendre des impacts directs sur le sol et indirects sur l’agriculture irrigué. L’enquête faite avec quelques agriculteurs des douars de village de Meknassa montre que les carrières installées au long du cours d’eau de l’Oued Lahdar affectent les activités agricoles sur plusieurs plans :

- La circulation des camions nuit au fonctionnement des canaux d’irrigation traditionnel obligeant les agriculteurs à les entretenir à l’occasion de chaque utilisation,
- L’approfondissement du cours d’eau, au niveau des zones d’extraction, a pour conséquence, les agriculteurs recourent alors au pompage en installant des motopompes à moteurs thermiques, fonctionnant au gasoil, sur les berges de l’Oued.

Les ponts :

Un pont est un ouvrage d’art qui permet de franchir un obstacle naturel ou artificiel (dépression, cours d’eau, voie de communication, vallée, ravin, canyon) en passant par-dessus. Le franchissement supporte le passage d’humains et de véhicules dans le cas du pont au sien du BV d’oud Lahdar, elles peuvent représenter potentiellement une contrainte forte pour les écoulements en crue.

Les ponts et radiers à buses le long des routes sont abondants dans le BV et jouent un rôle important dans l’aggravation de phénomène d’inondation. Ce constat a été clairement mis en évidence dans l’Oued Lahdar et ses principaux affluents : le pont situé à Nord du BV et les ponts reliant les Douars périphériques et Had Msila, (Photo 6.13).



Photo 6. 13 - Situation et état du pont de l'Oued Rhnalla (près de confluence de L'Oued Lahdar) reliant le sud et ouest du BV.

Souvent ces ouvrages d'art ne prennent pas en considération les caractéristiques hydrologiques des cours d'eaux. À titre d'exemple, nous citons la construction de certains ouvrages hydrauliques (pont de l'Oued Rhnalla) non adaptés aux débits liquides et solides lors des crues (Photo 6.13). En effet, le rôle des ponts apparaît nettement dans l'aggravation des phénomènes d'inondation. Dans plusieurs des cas, notamment en période de crues, ces ponts se colmatent partiellement ou totalement par les sédiments et les matériaux charriés (troncs d'arbres, carcasses de voitures, rejets issus de la décharge publique, etc.).

Le lit rectifié et les protections de berges :

Des aménagements de protection ont été réalisés dans le but de limiter les débordements dans un secteur en évacuant plus rapidement des débits importants, ces aménagements (Photo 6.14) ont souvent pour effet pervers d'aggraver l'aléa d'inondation en aval du secteur concerné. Sur un même bassin versant, la multiplication de ces ouvrages peut engendrer une réelle péjoration pour les secteurs situés en aval plus fréquemment inondés.



Photo 6. 14 - Protection de berge sur Oued El Khemis.

Aujourd'hui, la plaine alluviale de l'Oued Lahdar, est totalement anthropisée et plusieurs activités se sont installées dans la plaine alluviale. Ces activités humaines influencent les écoulements et jouent un rôle dans le risque de débordement de l'Oued vers les installations situés à ses abords.

En générale, l'impact de l'exploitation est positif de point de vue de nombre d'emplois créés, alors que les impacts négatifs sur la main d'œuvre est presque du même ordre que celui décrit pour le milieu naturel.

La modification du régime de crue en zone inondable est toujours présente à forte probabilité à cause de non-respect par fois de la limite ou la profondeur de la zone d'extraction. Aussi nous avons observé des dangers que présente la carrière sur le personnel qui sont liés aux contacts directs avec les poussières qui peuvent causer des maladies respiratoires, ainsi que les accidents de travail liées aux circulations d'engins ou aux différents dangers liés à l'unité de concassage.

3 LES APPROCHES CARTOGRAPHIQUES DE L'INONDATION DES PLAINES ALLUVIALES :

Dans le contexte des inondations, la cartographie hydrogéomorphologique s'intéresse aux événements de crues passés susceptibles de se reproduire dans le futur. La cartographie hydrogéomorphologique repose sur l'identification d'unités spatiales homogènes formées par différents types de crues au sein de la plaine alluviale. Les critères d'identification et de délimitation de ces unités comme mentionné, sont la topographie, la morphologie et la sédimentologie, souvent corrélées avec l'occupation du sol.

3.1. Reconstitution de chenal fluvial à partir des documents utilisés :

Le chenal fluvial est souvent représenté sous différentes formes selon le document analysé. La reconstitution du chenal fluvial se base essentiellement sur les éléments représentés sur les documents cartographiques utilisés. Des précisions sont apportées par les références bibliographiques analysées et par les observations actuelles de terrain.

Le chenal fluvial est représenté par un trait bleu, dont l'épaisseur varie en fonction de la largeur du chenal ; ses limites ont une nuance de bleu plus foncée. Quand les berges du chenal ont plus de 1 m de hauteur, elles sont représentées en tant que talus. En effet, l'analyse de l'aspect du chenal de l'O Lahdar montre qu'il existe trois chenaux principaux sur les documents.

Réseau à chenal rectiligne :

Le tracé est rectiligne ou à faible sinuosité, le rapport de sinuosité est inférieur à 1.5. La pente est modérée, elle est de l'ordre de 0,154 % est le type le plus fréquent actuellement dans la vallée de Lahdar. Le tracé actuel montre que ce système est éphémère : en effet, il aurait tendance à évoluer vers un chenal à méandres, par l'accentuation de la sinuosité.

Réseau à méandres : (sinueux)

Le cours d'eau est lent et se caractérise par une pente faible (0.172 %). Le chenal dessine des méandres dont le rapport est > 1.5 . Dans cette section le cours d'eau transporte essentiellement des sédiments fins (sables, limons, argiles). Les accumulations des rives convexes des chenaux forment des barres de méandres.

Réseau anastomosé :

Comprend des chenaux comprenant des branches divisées par les îles couvertes avec végétation faible pentes et cohésion banques, et sont généralement plus stables en raison de la prévalence de la charge solide en suspension.

3.2. Cartographie des talus fluviaux :

Le talus correspond à une forme géomorphologique, caractérisée par une pente raide faisant la séparation entre les différents lits de la plaine alluviale. Le talus marque la limite d'allongement des crues. Il répartit les différents lits de la plaine inondable. L'identification des talus est essentielle à l'observation des terrains. Les talus de grandes hauteurs font la séparation entre la zone des chenaux et les lits, et les talus de faibles hauteurs font la séparation entre les différents éléments de la plaine inondable.

Le rôle des talus dans l'établissement des cartographies hydrogéomorphologique est primordial, car ils permettent de fixer avec la plus grande exactitude les limites des différents lits et donc les limites des zones inondables, avec un aléa plus ou moins fort. La compréhension de leur présence ou de leur absence est donc indispensable pour justifier les bases de la méthode.

La pente des talus est très variable, en fonction de la nature des matériaux qui le constitue (Fig. 6.2). Dans notre zone d'étude, il existe plusieurs types de talus, dont les plus abondants se caractérisent par de faibles hauteurs, surtout dans les sections larges de la vallée, le cas de Meknassa El Gharbiya.

Les classes des talus sont ici obtenues par l'observation des terrains et sont pris en considération l'étalement des unités. Nous avons identifié quatre classes pour simplifier l'analyse

morphologique soit les talus (20-50cm), les talus (50cm-1m), les talus (1-1.50m) et les talus (2.5-5m).

L'amont de la C. Had Msila, la rive droite de l'Oued Lahdar se caractérise par l'existence d'un talus de (+3m), (Photo 6.16). Il sépare le chenal et le L3 ; par contre, la rive gauche se caractérise par des talus 0.5 m et 1 m et de pentes variées, (Photo 6.15). Ces talus séparent L1 du L2 et le L2 du L4. Ce dernier replat montre l'extension des habitations dans la plaine alluviale.



Photo 6. 15 - Morphologie et aspect des talus et des lits en rive gauche de l'Oued à l'amont de C. Had Msila.



Photo 6. 16 - Morphologie et aspect des talus et des lits en rive droite de l'Oued à l'amont de C. Had Msila.

Sur la rive droite de l'Oued Lahdar, la morphologie de la plaine alluviale est définie par l'existence d'un large bas replat. Ce dernier se distingue des chenaux par un talus de hauteur dépassant 2 m, (Photo 6.18). Ce replat est encours de confortement par des murs et des digues de protection contre les crues de l'Oued Lahdar ; d'autant plus que ce replat supporte la route RP 5414 (photo 20). De son côté, la rive gauche montre plusieurs talus plus que la rive droite, dépassant 2m. Au-dessus de ce talus, nous observons des replats abritant la construction du nouveau souk hebdomadaire (Photo 6.17).



Photo 6. 17 - Morphologie et aspect des talus et des lits en rive gauche de l'Oued à l'intermédiaire de C.R de Had Msila.



Photo 6. 18 - Morphologie et aspect des talus et des lits en rive droite de l'Oued à l'intermédiaire de C.R de Had Msila.

A l'aval du C. Had Msila, la plaine alluviale de l'Oued Lahdar montre des talus sur les deux rives de la vallée. La rive gauche montre un talus haut de plus de 2 m, décroissant vers l'amont. Ce talus se caractérise par une pente verticale et se raccorde du chenal au L3 (photo 6.19). Sur la rive droite la plaine apparaissent des petits talus de hauteurs variées entre 0,30 m et 1 m séparé du chenal, de L1, de L2 et de L3 de L4. Cette rive montre aussi un replat présentant un sol riche et humide (L4), (photo 6.20), ce qui comprend l'étendue des activités agricole dans ce L4.



Photo 6. 19 - Morphologie et aspect des talus et des lits en rive gauche de l'Oued à l'aval de C R de Had Msila.

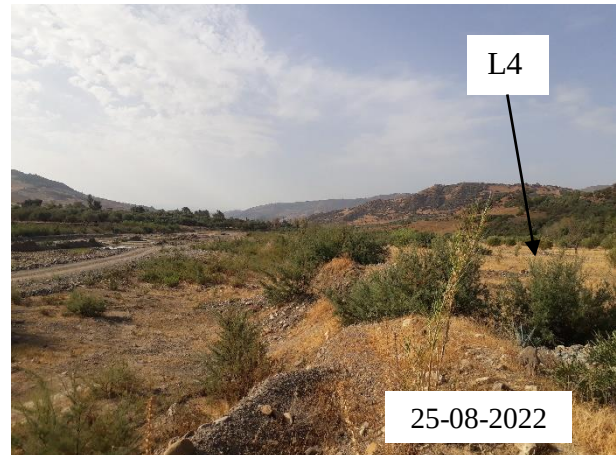


Photo 6. 20 - Morphologie et aspect des talus et des lits en rive droite de l'Oued à l'aval de C R de Had Msila.

La plaine alluviale de l'Oued Lahdar en amont de Centre Meknassa El Gharbiya est caractérisée par une surface topographique plane avec de très faibles pentes aux bords du lit majeur en particulier. Cette surface est située à basse altitude, environ de 415 mètre.

La plaine alluviale de l'Oued Lahdar est constituée par des alluvions déposées lors des crues de Lahdar. En surface, les replats présentent généralement un sol riche et bien alimenté en eau. Ce qui explique l'installation d'une population importante et d'une activité agricole intense le long de l'Oued.

La plaine alluviale de l'Oued Lahdar au niveau du Centre Meknassa montre des talus qui marquent la limite d'extension des crues. Ces formes sont facilement visibles dans certaines configurations (Photo 6.21). Ces talus présentent une pente très variable, les talus qui se caractérisent par une pente faible à moyenne font la délimitation des éléments qui constituent la plaine alluviale, par contre les talus qui ont une pente forte font la séparation de la zone du chenal et de la zone non inondable (Photo 6.22).

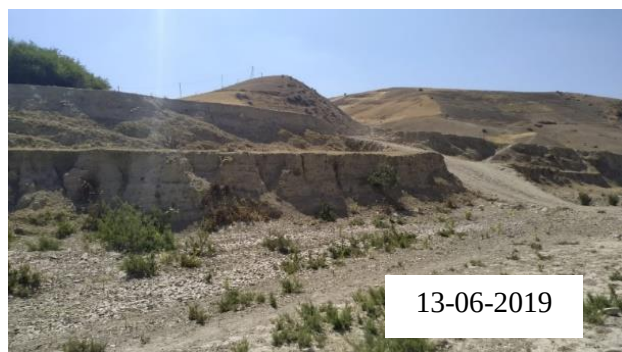


Photo 6. 21 - Morphologie et aspect des talus et des lits en rive gauche de l'Oued au niveau de Meknassa El Gharbiya.



Photo 6. 22 - Morphologie et aspect des talus et des lits en rive gauche de l'Oued au niveau de Meknassa El Gharbiya.

La zone d'étude présente plusieurs types de talus, mais les plus importants et abondants se caractérisent par de forte hauteur. Ce type de talus est très nette, et identifiable tant sur le terrain que sur les photographies aériennes. Le talus présente en principe une pente assez raide, bien que variable en fonction de la nature des matériaux qui le constituent. Son report cartographique peut donc s'effectuer avec une grande précision en plan, en fonction de l'échelle adoptée.

D'un point de vue cartographique, dans le cas d'un talus net, la limite externe de la zone inondable est figurée par un trait plein auquel on peut ajouter des barbules afin de donner des renseignements sur le commandement du talus, (Fig. 6.3).

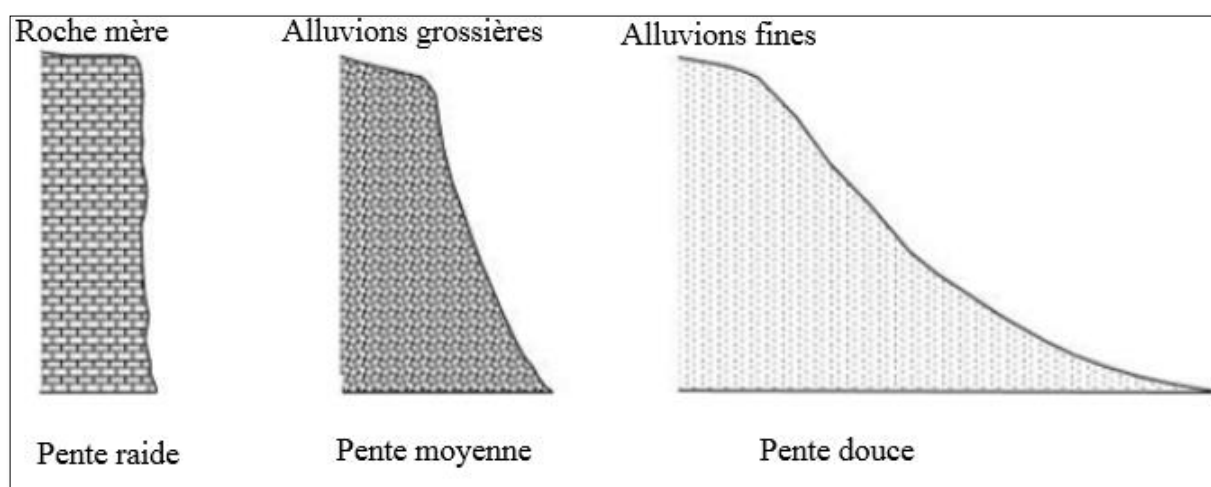


Fig. 6. 3 - Types de talus adoptés.

Dans le cas des talus adoucis par ruissellement diffus, la limite est fixée à la rupture de pente concave et représentée par des tirets qui permettent d'indiquer pour lui, en fonction de la hauteur atteinte par l'eau lors de l'inondation, (Fig. 6.3). La zone inondable peut dépasser la limite fixée en tirets mais sans jamais dépasser le sommet de la concavité.

3.3. Cartographie des unités morpho sédimentaire de la plaine alluviale :

Pour cartographier les unités morphosédimentaires de la plaine alluviale de l'Oued Lahdar (lit 1 et 2 et lit 3 et lit 4) nous nous sommes basés sur les images satellitaires, les cartes géologiques

1/50000 et les cartes topographiques 1/25 000 (fond de carte le plus précis actuellement disponible sur l'ensemble de la région de la zone d'étude). Les talus présentés sur les cartes et l'identification des anciennes terrasses sur la carte géologique, plus le travail de terrain, manifesté dans l'occupation des sols et les données historique, permettent d'identifier le lit mineur, lit moyen et lit majeur, voire lit majeur exceptionnel. Ces derniers sièges respectivement des crues les plus fréquentes aux crues les plus exceptionnelles. Il s'agit donc d'une approche essentiellement qualitative, qui permet d'identifier en outre, de façon qualitative également, les principales modifications anthropiques.

L'approche hydrogéomorphologique est basée sur l'observation précise des champs d'inondation résultant du fonctionnement des cours d'eau. Après avoir restitué le tronçon de la vallée étudié dans son contexte de bassin versant, afin de bien comprendre les facteurs déterminants de son fonctionnement (climat, lithologie, pente, ...). Il s'agit d'établir la délimitation précise des unités géomorphologiques significatives du fonctionnement hydrologique du système alluvial, alors pour bien identifier les unités il s'agit principalement d'obtenir le maximum d'informations sur les caractéristiques physiques contrôlant le ruissellement et l'infiltration dans le bassin versant concerné (lithologie, pédologie, pentes, couvert végétal, etc.), (Ballais et al. 2010). Les caractéristiques climatiques, en particulier les caractéristiques pluviométriques et la situation des stations de mesure, les données hydrologiques, les fréquences des débits, l'occupation des sols, l'aménagement des plaines alluviales, l'état de la couverture végétale, agriculture, techniques culturales, défrichements, incendies, reforestations, urbanisation, ouvrages, etc.

D'une manière générale, cette méthode offre la possibilité de découvrir les unités de toute la superficie de la plaine alluviale. En fin la méthode hydrogéomorphologique repose sur l'analyse des différentes unités constituant le plancher alluvial. Les critères d'identification et de délimitation de ces unités sont la topographie, la morphologie, la sédimentologie et les données relatives aux crues historiques, souvent corrélées avec l'occupation du sol, (Ballais et al, 2010). Le fonctionnement des cours d'eau génère des stigmates morphologiques identifiables au sein des vallées, (Rhone-Alpes.2010). Ces zones actives se présentent suivant une hiérarchie graduelle, susceptible d'accueillir des crues d'intensité et de récurrence variables. Il s'agit dans le détail du :

Lit mineur (L1), représenté en rouge, incluant le lit d'étiage, est le lit des crues très fréquentes (annuelles). Il correspond au lit intra-berges et aux secteurs d'alluvionnement immédiats (plages de galets). Il apparaît, sur le support cartographique, sous forme de polygone sans trame lorsque ce dernier est assez large.

Lit moyen (L2), représenté en rouge foncé, accueille les crues fréquentes (en principe période de retour allant de 2 à 20 ans). Dans ce lit, les mises en vitesse et les transferts de charge solides sont importants et induisent une dynamique morphogénique complexe. Ces berges sont souvent remaniées par les crues qui s'y développent. Lorsque l'espacement des crues le permet, une végétation de ripisylve se développe dessus. Dans notre secteur, cette unité est peu présente compte tenu du système de fonctionnement des cours d'eau. Sa représentation est plus le fait d'une fréquence de débordement que des caractéristiques morphologiques décrites ci-dessus.

Lit majeur ordinaire (L3), représenté en jaune, est fonctionnel lors des crues rares. Il présente un modelé plus plat et est emboîté dans des terrains formant l'encaissant. Les hauteurs d'eau et les

vitesses plus faibles que dans le lit moyen favorisent les processus de décantation. Ces dépôts de sédiments fins rendent ces terrains très attractifs pour les cultures. Toutefois, les dynamiques affectant ce lit peuvent être soutenues. Les lames d'eau et les vitesses sont parfois importantes, elles dépendent de la topographie et du contexte physique de certains secteurs.

Lit majeur exceptionnel (L4), (Ballais et al, 2010). A partir des observations réalisées, nous avons évoqué les premiers éléments qui concernent leur morphogenèse en particulier au moyenne est basse vallée de l'Oued Lahdar. Les lits majeurs exceptionnels sont des formes d'accumulation constituées de dépôts alluviaux fins (comme le sont les lits majeurs ordinaires). Cependant, l'épaisseur d'alluvions fines est variable. Des dépôts alluviaux grossiers (il s'agit de terrasses pléistocènes devenues inondables par exhaussement du lit majeur ordinaire) servent de support aux dépôts actuels, déposés en conditions de faible hydrodynamisme. Ces formes ont un lien étroit avec l'existence de grands trains de méandres, dans ces plaines alluviales. Les lits majeurs exceptionnels constitués de plusieurs mètres de dépôts fins se sont mis en place lorsque ces grands méandres fonctionnaient alors que les lits majeurs exceptionnels incipients sont plus récents. Des précisions seront apportées grâce à l'étude de la chronologie des terrasses holocènes. Alors le Lit majeur exceptionnel qui correspond au secteur le plus externe du lit majeur où les colluvions viennent se raccorder progressivement à la plaine alluviale, il représenté en vert clair.

La limite externe du lit majeur constitue l'enveloppe de la zone inondable matérialisée par un trait orange. Le contact entre plancher alluvial et encaissant reste tributaire des formations constituant ce dernier.

La plupart des lits majeurs exceptionnels sont situés en rive convexe (ce qui s'observe très nettement sur le tronçon de Meknassa El Gharbiya. Le style méandriforme est donc propice au développement des lits majeurs exceptionnels.

Les **terrasses alluviales**, dépôts fluviatiles anciens, sont des témoins de l'hydrodynamique passée. Elles sont cartographiées avec leur talus qui peut lui-même former la limite de l'encaissant.

Les **versants**, plus ou moins raides, sont taillés dans le substratum dans lequel la vallée s'incise.

Les **colluvions**, des dépôts de pentes, sont constituées d'éléments fins et de petits éboulis situés en pied de versant. Ils viennent parfois recouvrir les terrasses ou le talus externe du lit majeur (figure ci-dessous).

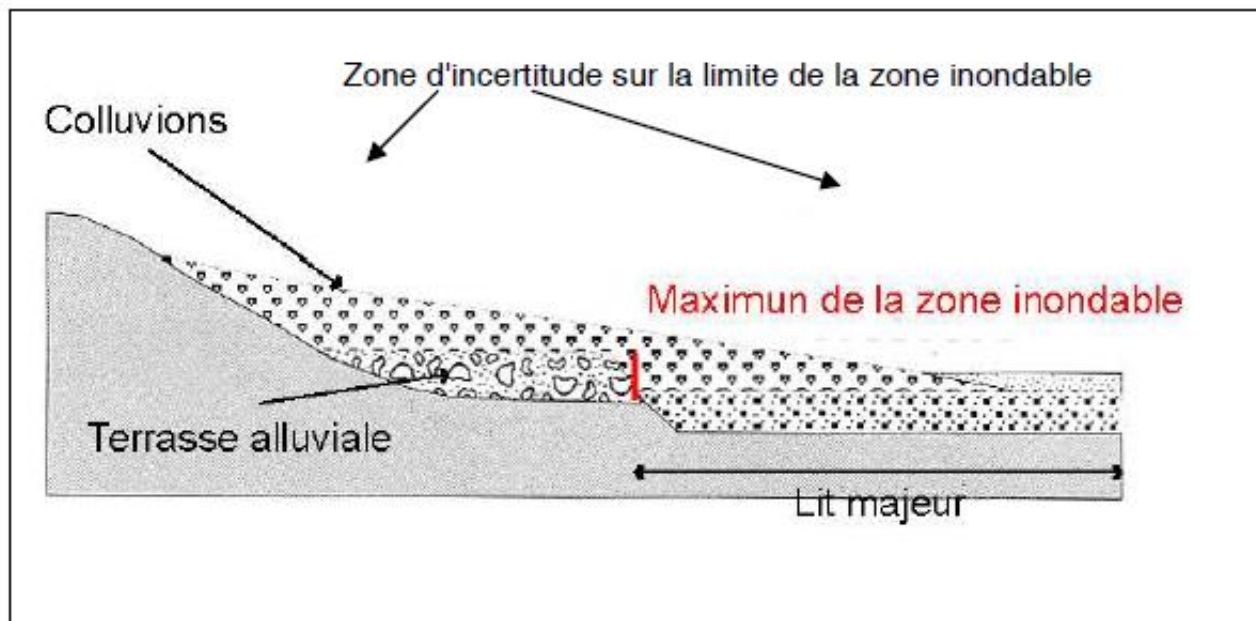


Fig. 6. 4 - Colluvions sur lit majeur (Masson, Garry, Ballais, 1996).

Les cônes de déjections sont particulièrement abondants et bien développés dans des contextes de forte production détritique. Ils abondent dans les pays montagneux semi-arides tempérés froids, là où les versants sont peu protégés par le couvert végétal (Taous, 2005). Dans la zone d'étude, les bassins d'alimentation constitués essentiellement par des formations tendres, essentiellement la marne et le calcaire marneux. Ces roches tendres favorisent la naissance des cônes de déjections.

Pour cartographier les cônes de déjections, il est nécessaire de connaître la forme d'accumulation et les caractères sédimentologiques des terrains :

- Les cônes de déjections sont des formes d'accumulation présentant une morphologie en cône,
- Les parties fines constituant la matrice du dépôt sont abondantes,
- Les cônes de déjection se caractérisent par une forte hétérométrie,
- Les grains de sable sont anguleux et mal classés,
- l'immaturation sédimentaire des dépôts,
- Grande variation de l'épaisseur des bancs sédimentaires et de leur organisation à l'échelle d'un seul cône,
- Les dépôts torrentiels sont émoussés ; ce sont des blocs anguleux d'éboulis qui ont été usés pendant le transport. Ils sont inclinés par rapport au sens du courant et se recouvrent en formant des imbrications,
- Les matériaux sont granoclassés d'amont en aval, les éléments fins sont emportés le plus loin.

Application de l'approche hydrogéomorphologique à l'amont du BV :

L'application de l'approche hydrogéomorphologique dans la vallée de l'Oued Bni Ftah à l'amont du BV comporte cependant quelques difficultés susceptibles de se reproduire dans d'autres vallées de la Had Msila et du Meknassa El Gharbiya.

D'abord, les marques sur le terrain nous renseignent sur les possibles délimitations de zones inondées dans le passé ; en revanche, la réponse du cours d'eau peut varier pour deux événements d'ampleur similaire. Ensuite, l'identification des terrasses peut être difficile au Centre de Bni Ftah étant donné les modifications du terrain, il devient par exemple délicat d'identifier le lit moyen. Aussi, et cela est particulièrement important pour les vallées des affluents de l'Oued Bni Ftah. Nous distinguons les traces provenant et mise en place lorsque le niveau de base était plus élevé, de celles associées à l'intervention humaine. L'analyse hydrogéomorphologique permet assez simplement de délimiter l'enveloppe maximale des crues mais définir les étages des unités morphologiques à l'intérieur de cette zone est plus ardu, (Ballais et al, (2010).

La vallée de Bni Ftah est moins large que les autres vallées existantes au sud du BV. L'analyse sédimentologique dans la vallée de Bni Ftah serait importante pour caractériser les dynamiques de mise en place des dépôts, afin de préciser s'il s'agit bien d'apports alluviaux et / ou colluviaux.

Il s'agit alors de préciser le type de transport et d'évaluer l'énergie nécessaire à la mise en mouvement des sédiments accumulés, afin de définir localement la compétence du cours d'eau. Du fait de la variation des processus de transports d'amont en aval mais aussi tout le long du tronçon ; surtout que dans la vallée de l'Oued Bni Ftah, il y a nombreux affluents, et que chaque cour d'eau a une certaine capacité de transport, et que chaque unité morphologique est constituée de dépôts différents qui permettent de la caractériser. Nous utilisons donc ce paramètre d'une manière différente, afin de déterminer puis de caractériser les unités de la plaine alluviale et plus particulièrement les lits majeurs.

Lors de la visite de terrain au sein de la vallée de Bni Ftah, nous avons remarqué que le lit mineur est colonisé par une végétation aérienne, en raison de la fréquence de l'écoulement des eaux (Photo 6.23 et Photo 6.24).



Photo 6. 23 - Morphologie et aspect des talus et des lits en rive gauche dans la plaine alluviale au niveau du C. Bni Ftah.



Photo 6. 24 - Aspects de la morphologie de la plaine Alluviale à l'amont du C. Bni Ftah.

La principale rugosité est donc constituée d'une part, par celle des alluvions du fond du lit, et par celle des berges, d'autre part. Ainsi le courant permettant le transport des particules grossières, comme les galets, qui bien souvent ne sont remuées et déplacées qu'en période de crue, pour des débits légèrement inférieurs au débit à pleins bords (Tricart, 1960).

Lors d'une cartographie hydrogéomorphologique, les différentes générations de terrasses ne sont pas distinguées, puisqu'elles font partie de l'encaissant.

Dans la vallée de Bni Ftah, les cours d'eau montrent un régime très contrasté et de fréquentes variations de débit selon le cours d'eau (O. Assamer, O. Mezid, O. Dira, O. Bni Ftah et O. Lema). En effet, le débit à pleins bords de O. Lema, est plus fréquemment réalisé et les efforts auxquels les berges sont soumises sont maximaux et les berges sont donc d'autant plus nettes qu'elles sont plus souvent soumises à ces débits et que ces débits sont plus durables (Photo 6.23).

La limite externe de la plaine alluviale est l'élément clef de la cartographie hydrogéomorphologique, par ce que la définition de cette limite est primordiale notamment lors de l'élaboration de documents réglementaires comme les plans national de protection contre les inondations (PNPI). Cette limite est assez facile à déterminer puisqu'elle correspond à la limite externe du lit majeur. Mais les premières difficultés apparaissent, puisque nous avons vu qu'il existe des lits majeurs ordinaires et des lits majeurs exceptionnels. Il existe donc de nombreux cas où cette limite est plus difficile à définir avec la présence de nombreux affluents dans la vallée de Bni Ftah.

La réalisation de la carte hydrogéomorphologie dans la vallée de Bni Ftah a pris en compte les travaux et ouvrages hydrauliques et les murs de soutènement qui existent à l'intérieur de Centre (Photo 6.25). Ces ouvrages ont été employés depuis très longtemps dans le but de protéger les lits majeurs mis en culture des crues les plus fréquentes (annuelles à décennales). Ces aménagements permettent le recalibrage, le rescindement et la rectification affectent essentiellement le lit mineur et, lorsqu'il existe, tout ou partie du lit moyen.

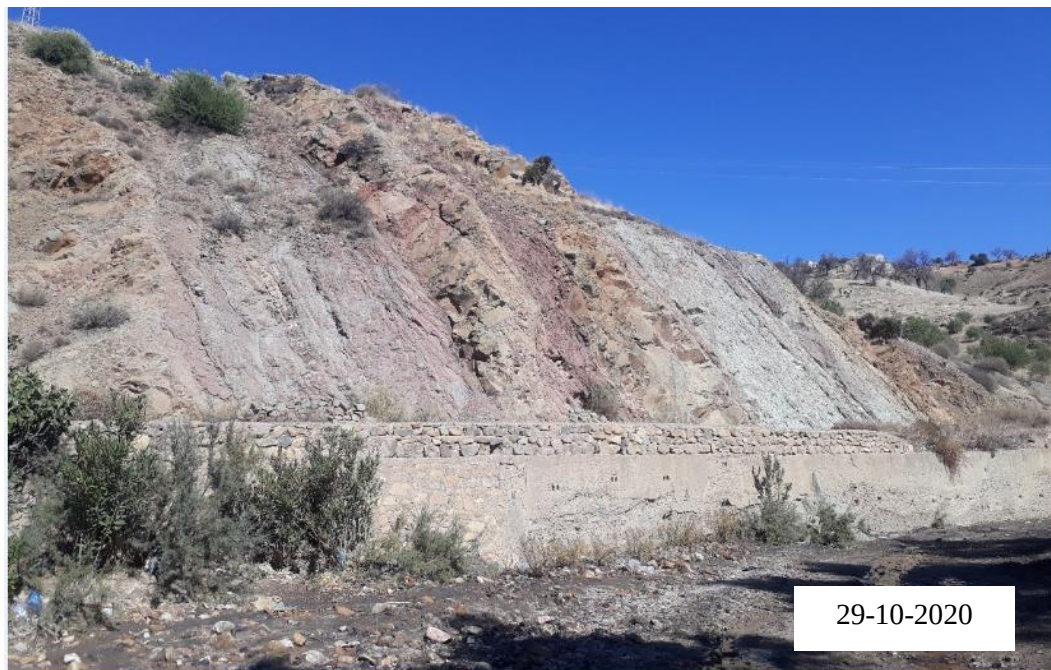


Photo 6. 25 - Mur de soutènement protège le route qui existant à l'intérieur de plaine alluviale au niveau de C.R Bni Ftah.

Application de l'approche hydrogéomorphologique au milieu du bassin :

Cette section correspond à l'amont de Had Msila. Elle se situe dans la portion anastomosée avec un méandre de moyennes longueurs d'onde. L'extension latérale du lit mineur y est fortement limitée. La délimitation du lit moyen est plus délicate. L'aménagement significatif de ce secteur a modifié les formes naturelles. Par conséquent, en plusieurs endroits, l'extension spatiale du lit moyen se borne aux remblais des fondations et aux remblais routiers, ce qui explique ses frontières plutôt rugueuses. Pour ce qui est l'extension du lit majeur, sa limite se retrouve soit sur le pied de talus de terrasses bien définies, soit aux pieds des versants qui bornent la vallée. Ce lit submersible par des crues rares à exceptionnelles cinquantennale à centennale et comme par exemple celles enregistrées l'année de 1987 dans la station de Had Msila. Nous pouvons être amenés à distinguer un lit majeur ordinaire et un lit majeur exceptionnel sur certains endroits. Les résultats produits dans la cartographie montrent que l'étendue des zones touchées par ces inondations rares est importante et que ces phénomènes peuvent toucher les installations humaines.

Les relations entre chenal, lit mineur, lit moyen et lit majeur dans la vallée de Had Msila varient d'un point à un autre, en fonction du régime de ce cours d'eau et d'autres facteurs que nous développons plus loin. La limite la plus nette est celle qui se place entre le lit mineur et le lit moyen, sous forme de berges, hautes de plusieurs décimètres ou plus, (Photo 6.26).



Photo 6. 26 - Morphologie des talus de la plaine Alluviale à l'aval C. Had Msila.

La photo 6.26 illustre l'exemple de plusieurs sites dans la vallée de l'O. Lahdar, montrant le lit moyen à surface horizontale ou subhorizontale, mais offrant, dans son détail, une topographie très irrégulière. Cette irrégularité est due à la présence de chenaux de crue formés par les courants qui débordent du lit mineur. Les dynamiques alluviales possibles sur cette surface sont donc multiples. Des courants très rapides peuvent circuler dans les chenaux et d'autres, beaucoup plus lents en dehors de ces chenaux sont fréquents dans ces milieux (Delorme-Laurent, 2007). Lors des montées des eaux, des écoulements préférentiels peuvent ré-utiliser ces chenaux.

Les unités hydrogéomorphologique de la zone inondable, dans la vallée de l'Oued Lahdar au niveau de Had Msila, sont constituées de matériaux déposés par le cours d'eau tels que des limons, des sables, ou des matériaux plus grossiers, tels que des galets arrondis par le transport fluvial. A contrario, les unités de l'encaissant sont constituées de matériaux anguleux, ou surdimensionnés en comparaison à la capacité de transport du cours d'eau. L'étude de la sédimentologie est particulièrement intéressante lorsqu'il subsiste des doutes sur la localisation de la limite de la zone inondable : par exemple entre le lit majeur et des colluvions qui adoucissent le talus externe du lit majeur par ruissellement diffus (Ballais *et al.* 2011 ; Delorme-Laurent, 2007 ; Diren, 2007 ; Dupont *et al.* 2005 ; Masson *et al.* 1996).

Application de l'approche hydrogéomorphologique en aval du bassin :

Cette section est caractérisée par une plaine alluviale plate et large. Elle est et délimitée par un talus à pente douce sur la rive droite et par des berges verticales sur la rive gauche, (Photo 6.4). La pente est faible et le chenal est sinueux à méandrique. Cependant, les zones inondables s'étendent sur toute la largeur de la rive droite.

La géologie plutôt marneuse dans ce secteur et la présence des activités anthropiques qui gêne le passage d'oued et ferme en quelque sorte le paysage de la vallée, sont responsables d'un fond toujours en eau et en relation avec l'Oued dont les eaux de crues peuvent venir s'y étendre. Des ouvrages de génie civil et industriels (canal, routes, ouvrages de franchissement multiples, ...) favorisent sans aucun doute la rétention des eaux, par conséquent les activités anthropiques modifient de manière considérable la nature et l'intensité des réponses des systèmes fluviaux. Leur localisation est une étape indispensable pour une délimitation rigoureuse des différents niveaux d'aléas (fort, moyen, faible et très faible) intégrant ainsi les effets des aménagements.

La vallée de l'Oued Lahdar dans cette partie est large et l'extension des zones inondées est donc relativement étendue. Sur la partie du méandre de cour d'eau, là où la morphologie n'est pas ou peu visible, nous nous appuyons sur la cartographie de la crue historique ainsi que sur celle de la discussion des habitats pour déterminer l'extension des lits majeurs. Les informations issues de l'analyse hydrogéomorphologique (photo-interprétation + travail de terrain) sont retranscrites sur le fond de la carte topographique au 1 / 25 000.

La délimitation du lit moyen au sien de cette section est sensible. Le lit moyen résultant du débordement des crues relativement fréquentes, décennales à vingtennales, voire moins fréquentes encore, lorsque des aménagements hydrauliques conséquents : modification des écoulements naturels par les recalibrages. En termes hydrodynamique, cet espace correspond généralement à la zone de mobilité historique du cours d'eau, c'est-à-dire à l'espace de divagation du lit mineur. Le risque érosif dû aux écoulements en crue y est élevé.

Enfin, la manière dont les sociétés humaines ont aménagé leur territoire est source de nombreuses indications utiles. Par exemple l'ancienneté des bâtiments est à prendre en compte. En effet, d'un point de vue schématique toutes les constructions anciennes se trouvent hors de la zone inondable ; tandis que de nombreuses constructions récentes occupent fréquemment les zones inondables.

Les analyses granulométriques et morphologiques ont démontré que cette surface représente le lit majeur exceptionnel. D'une manière transversale, ce lit majeur exceptionnel n'est pas précédé par un lit majeur ordinaire. Cependant, de manière longitudinale, en amont comme en aval, il est

effectivement séparé d'un lit majeur ordinaire par un talus de moins de un mètre, ce qui justifie que cette surface doit être attribuée au lit majeur exceptionnel.

Du fait que les limites externes de la zone inondable sont peu nettes, il est difficile d'identifier finement l'emprise du plancher alluvial. Les largeurs respectives des lits mineur, moyen et majeur varient visiblement le long d'une vallée du BV. De façon générale, l'ensemble lit moyen-lit majeur s'étend beaucoup plus largement que le lit mineur. Par ailleurs, l'emboîtement des différents lits peut s'effectuer de plusieurs manières. En règle générale, le basculement du cours d'eau d'une rive à l'autre par formation de méandre produit une dissymétrie de la plaine alluviale, avec alternance des extensions de lit majeur d'une rive à l'autre. Cette organisation de plaine alluviale est fortement conditionnée par la lithologie et la structure du substratum.

4 LA CARTE HYDROGEOMORPHOLOGIQUE : LA CARTE D'INONDABILITE HYDROGEOMORPHOLOGIQUE :

L'apport de l'approche hydrogéomorphologique tient avant tout à la délimitation de la plaine alluviale active couvrant les limites maximales d'expansion des inondations, (Nejjari et EL Ghachi. 2016). En raison de l'extension de la plaine alluviale de l'Oued Lahdar, nous ne présenterons que la cartographie de trois sections de la vallée, représentant 3 planches représentatives de l'ensemble du bassin : en amont, au milieu et en aval du bassin versant, (Fig. 6.5, Fig. 6.6, Fig. 6.7, Fig. 6.8, Fig. 6.9, Fig. 6.10).

Les cartes des zones inondables présentent, ont été réalisées suivant la méthode hydrogéomorphologique. Les enveloppes ainsi définies ont été confortées par les témoignages recueillis sur le terrain et les résultats des enquêtes sur les crues historiques.

Les zones inondables ainsi restituées sont le résultat de la synthèse des investigations historiques, hydrogéomorphologiques et des témoignages de riverains. Ces cartes sont dressées sur le fond de carte topographique (1/25 000) et complétées par les données de l'image satellitaire pour la partie amont du BV. L'ensemble des investigations de terrain a été réalisé sur le même support plus le plan de restitution à équidistance de 1 mètre. Les cartes topographique à l'échelle du 1/25 000 couvrent l'ensemble du bassin de risque sauf une partie de la C. Bni Ftah.

4.1 Cartographie hydrogéomorphologique en amont du bassin versant :

En amont du BV et sur la majeure partie du cours d'eau, les formations superficielles sont confinées au fond alluvial de l'O. Lahdar et se mêlent aux formations peu épaisses des versants, à cause de l'étroitesse de la plaine alluviale et du raccord aux versants, (Fig. 6.5 et Fig. 6.6).

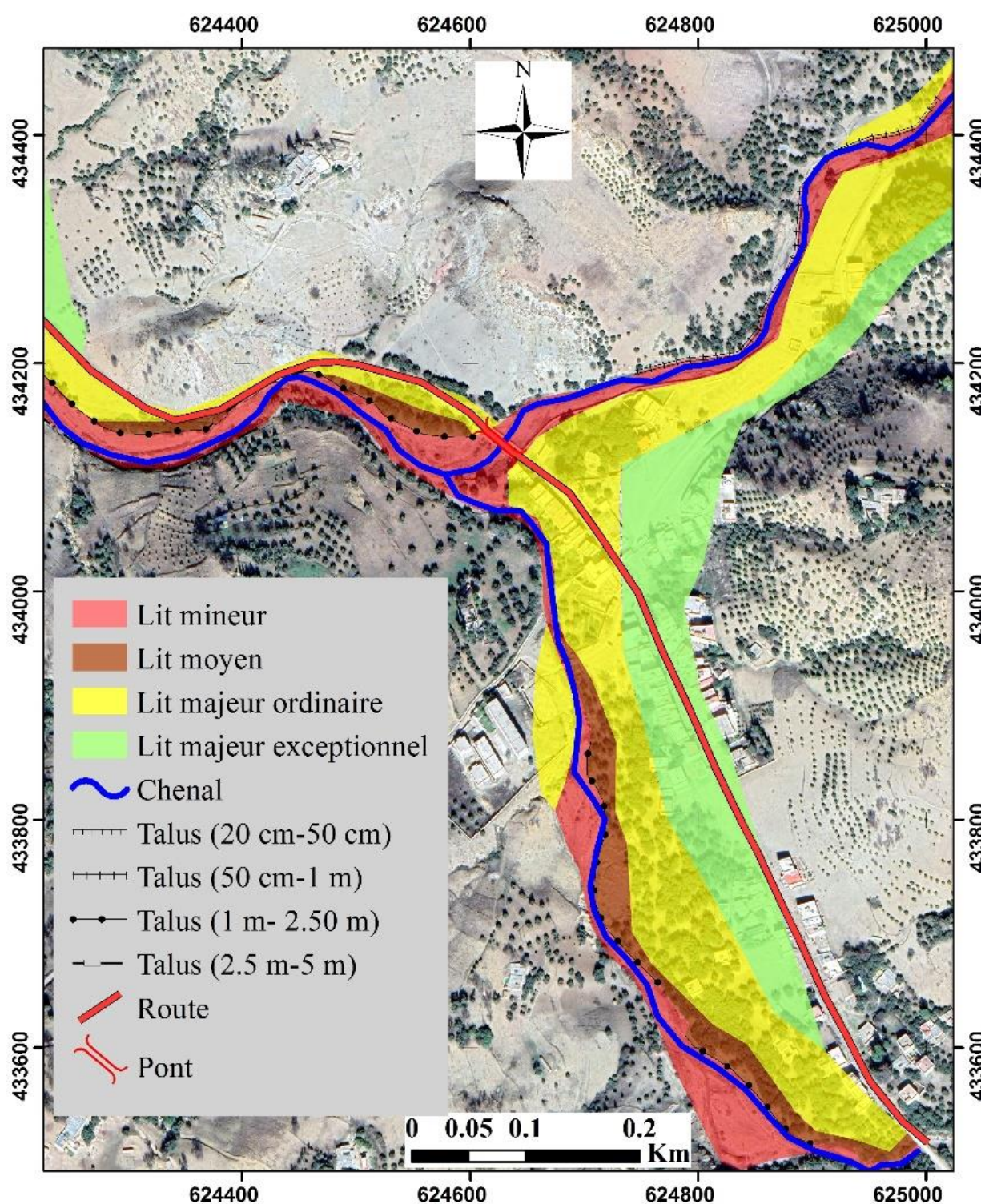


Fig. 6. 5 Cartographie hydrogéomorphologique des lits de la plaine alluviale de l'Oued Lahdar (tronçon 1, C. Bni Ftah amont du BV).

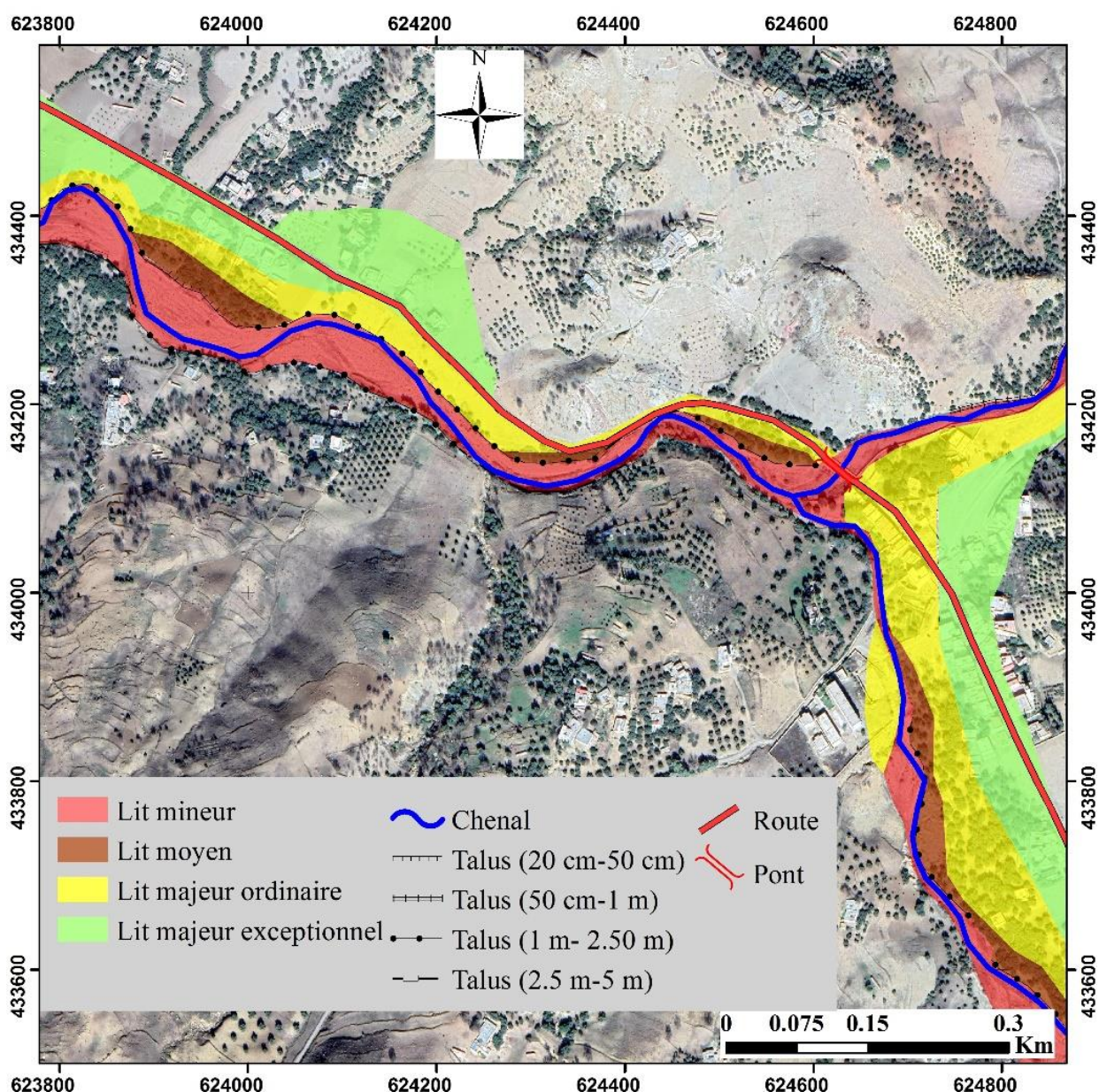


Fig. 6. 6 - Cartographie hydrogéomorphologique des lits de la plaine alluviale de l'Oued Lahdar (tronçon 2, C. Bni Ftah amont du BV).

Au niveau de la C. Bni Ftah, les zones d'aléa fort couvrent le lit mineur, et les zones ayant une pente faible. Nous avons délimité le lit mineur en suivant les traces que laissent les crues fréquentes et la première rupture de pente. Quant au lit majeur, en considérant la pente abrupte similaire à celle des gorges, ses limites sont confondues avec les limites de l'aléa faible.

4.2 Cartographie hydrogéomorphologique au centre du bassin :

Les cartes hydrogéomorphologiques des zones inondables de l'O Lahdar dans la section médiane ont été effectuées sur le tronçon proche de la C. Had Msila, (Fig. 6.7 et 6.8). Les enveloppes ainsi définies ont été confortées aux témoignages recueillis sur le terrain et les enquêtes sur les crues historiques. Les Fig. 6.7 et Fig. 6.8 synthétisent la cartographie hydrogéomorphologique à la cartographie de l'utilisation du sol pour produire une cartographie du risque d'inondation. L'évaluation des différents degrés du risque mène à une analyse du risque acceptable ; ce dernier tient compte de l'espace à protéger, en fonction de son utilisation.

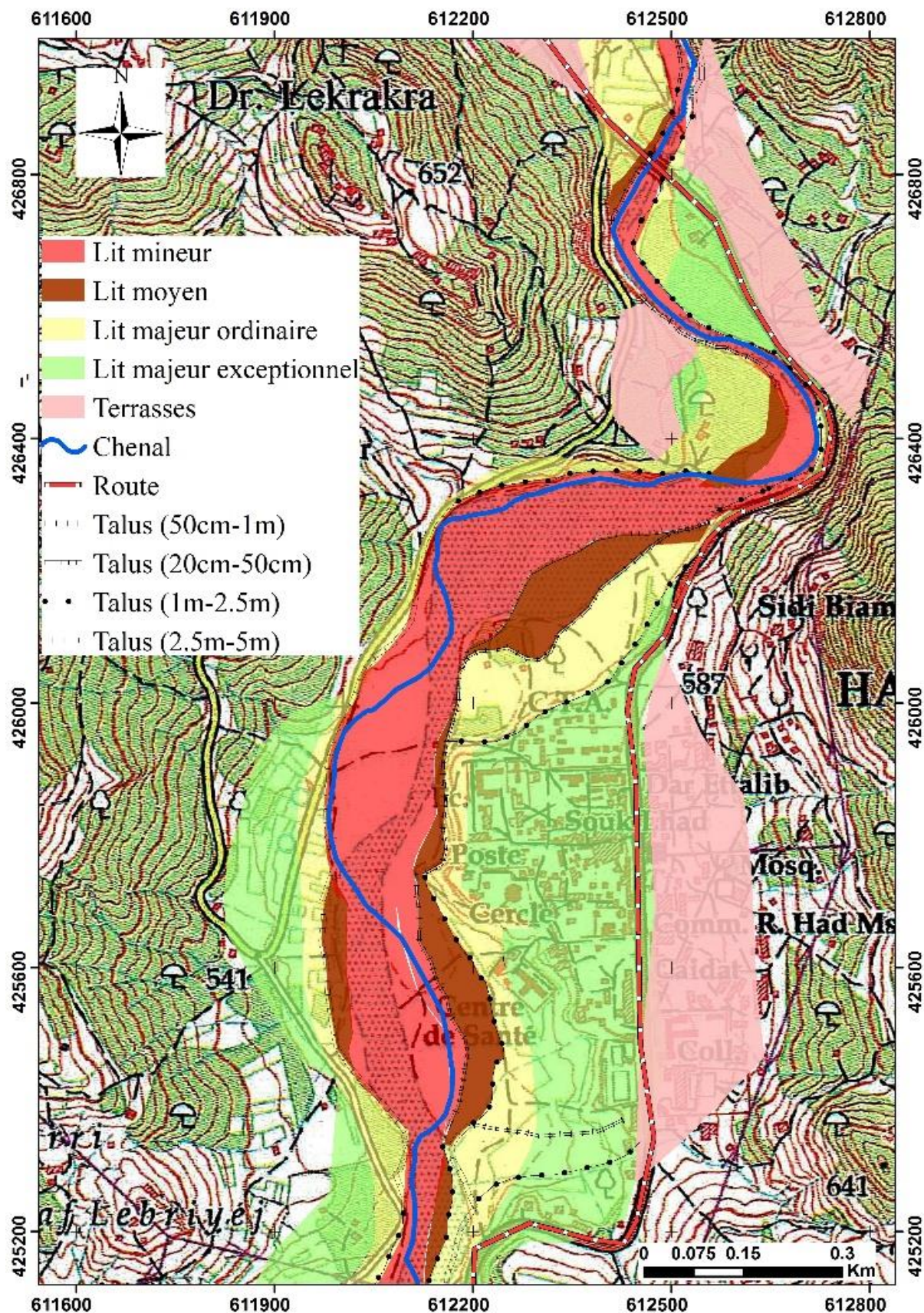


Fig. 6. 7 - Cartographie hydrogéomorphologique des lits de la plaine alluviale de l'Oued Lahdar (tronçon 1, C. Had Msila au centre du BV).

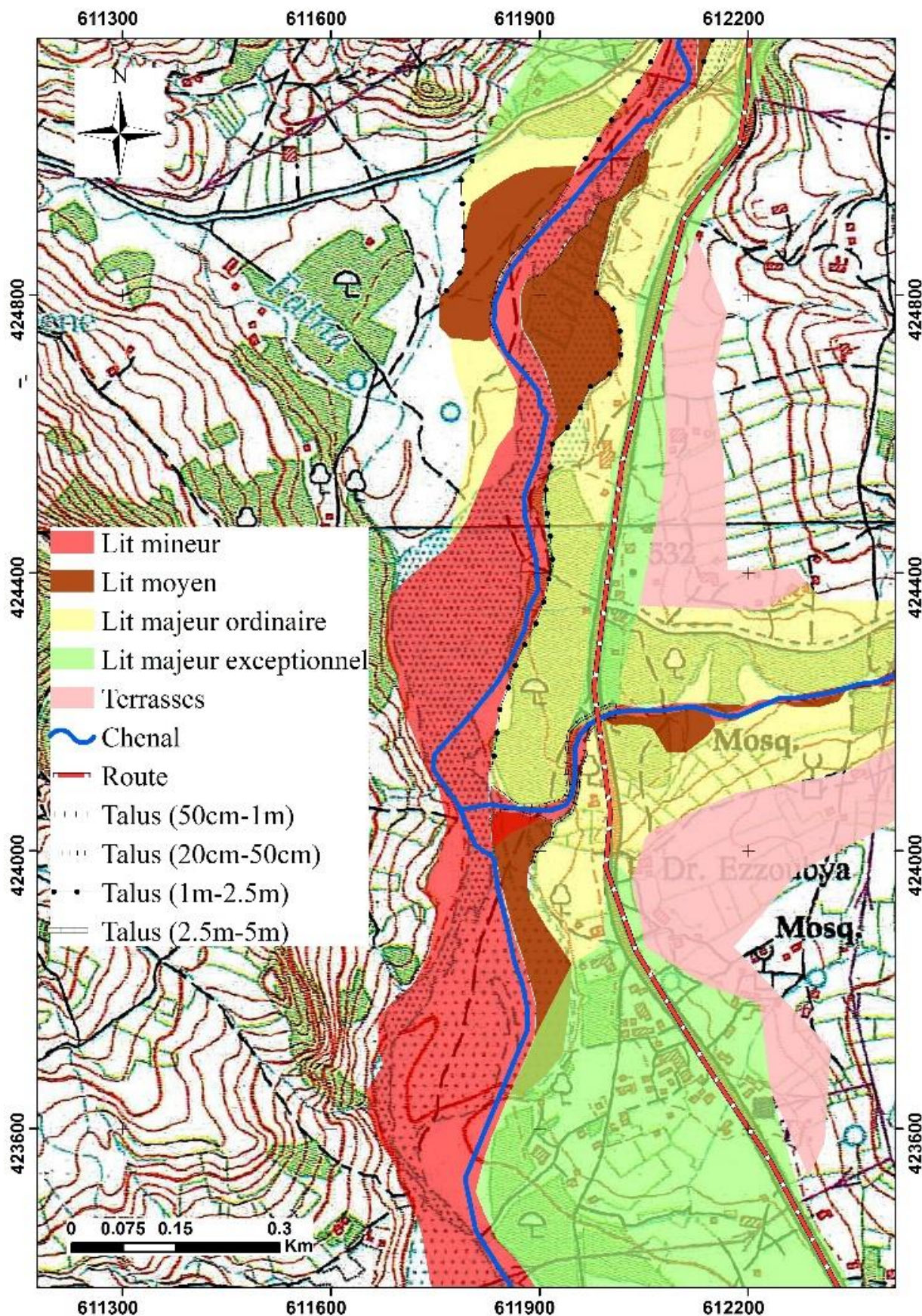


Fig. 6. 8 - Cartographie hydrogéomorphologique des lits de la plaine alluviale de l'Oued Lahdar (tronçon 2, C. Had Msila au centre du BV).

Ces cartes (Fig. 6.7 et Fig. 6.8) montrent que les zones correspondant au lit mineur sont assez larges, cela est dû à la morphologie de la plaine alluviale, avec une pente est très douce, et que pendant les crues, les eaux de l'Oued inondent tout le lit mineur. Concernant les zones correspondant au lit moyen, elles sont moins larges et voir même parfois absentes. Par contre, dans certains endroits où la pente est faible, le lit majeur est assez important. Les ruptures de pente dans cette zone sont faiblement marquées.

4.3 Cartographie hydrogéomorphologique à l'aval du bassin :

Les cartes hydrogéomorphologiques des zones inondables de l'O. Lahdar dans la section avale ont été effectuées sur le tronçon proche du Centre Meknassa El Gharbiya, (Fig. 6.9 et Fig. 6.10). Ce Centre, bien qu'il soit loin du chenal de l'Oued, il est relativement menacé par les inondations. Le lit majeur exceptionnel dans la rive droite présente une ouverture qui permet aux eaux débordantes d'arriver jusqu'aux extrémités du Centre.

Les résultats produits dans la cartographie montrent que l'étendue des zones touchées par ces inondations rares est importante et que ces phénomènes peuvent toucher des milieux aménagés. Sont aussi mis en évidence les zones du lit mineur qui comprennent à la fois des dépressions naturelles, qui permettent l'écêtement des crues en aval, mais aussi des zones à enjeux. Ces zones se situent le long de la rive droite de l'Oued.

Les résultats produites par l'analyse hydrogéomorphologique permet de disposer d'une vision globale et homogène des champs d'inondation sur l'ensemble du tronçon de Meknassa El Gharbiya, afficher en pointant à un premier niveau les zones les plus vulnérables au regard du bâti et des équipements existants. L'information fournie reste cependant essentiellement qualitative, même si elle est complétée, là où elles existent par des données historiques.

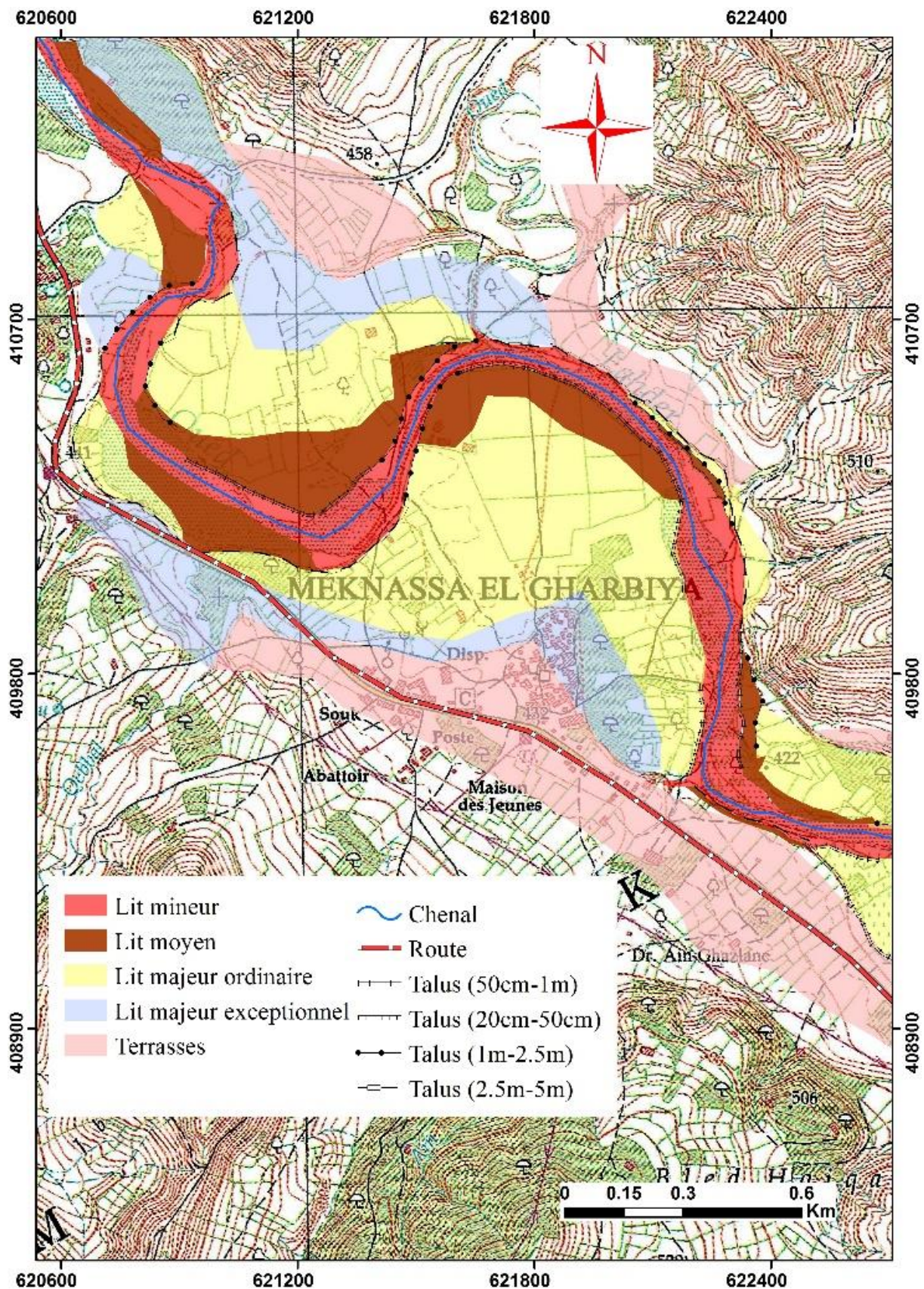


Fig. 6. 9 - Cartographie hydrogéomorphologique des lits de la plaine alluviale de l'Oued Lahdar (tronçon I, C. Meknassa El Gharbiya a l'aval du BV).

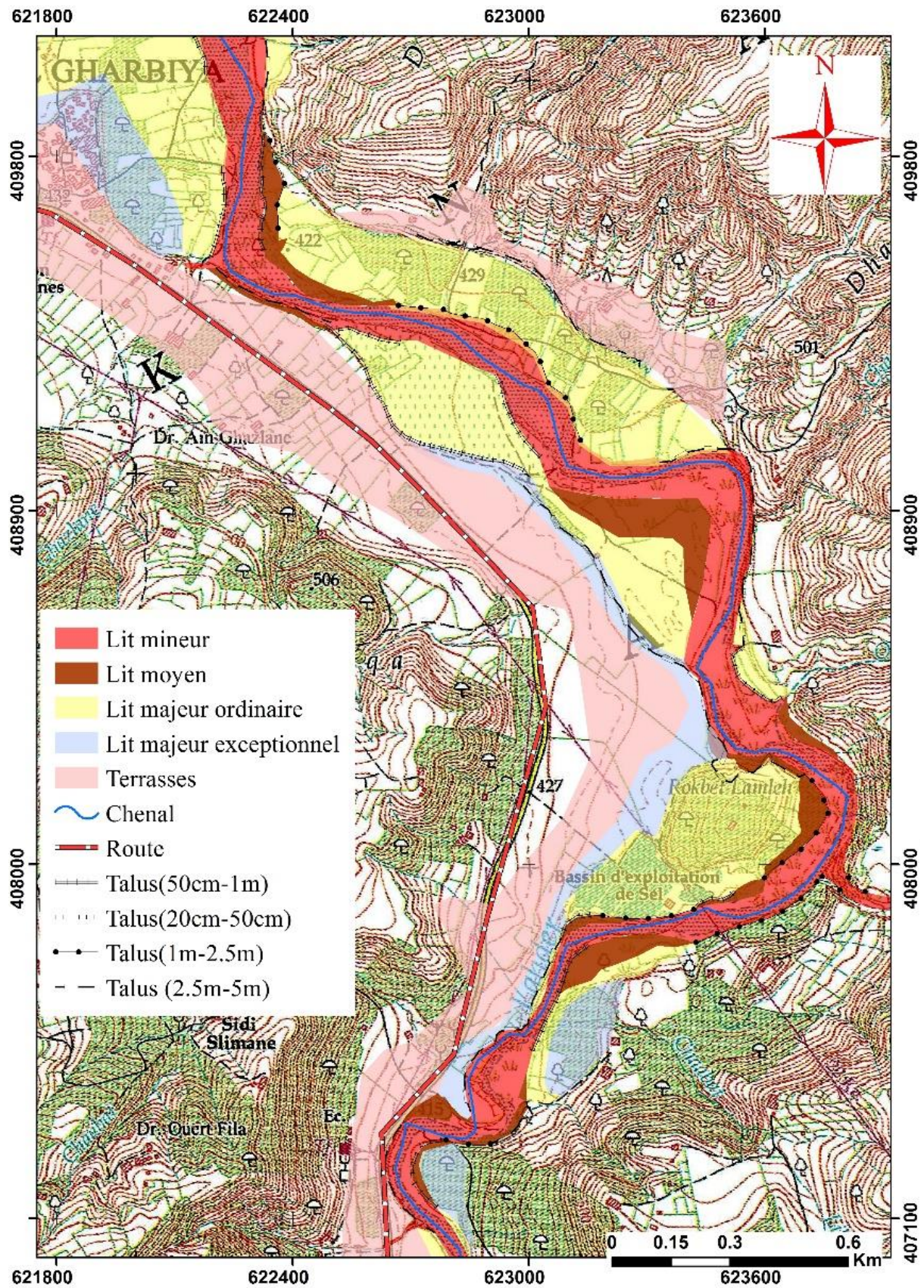


Fig. 6. 10 - Cartographie hydrogéomorphologique des lits de la plaine alluviale de l'Oued Lahdar (tronçon 2, C. Meknassa El Gharbiya a l'aval du BV).

5 CROISEMENT DES RESULTATS D'APPROCHES DIFFERENT ET VALIDATION DE LA DELIMITATION DES ZONES INONDABLES :

L'intersection des informations issues de l'analyse hydrogéomorphologique avec les données de témoignages historiques et la modélisation hydraulique permet de conforter le plus souvent les limites de la zone inondable. Les informations historiques recueillies sur le bassin versant ne sont que partielles. Elles décrivent les lieux où les dommages les plus importants se sont produits avec notamment des routes coupées, des maisons inondées, ou des événements climatiques violents. En observant les événements historiques à une échelle plus grande. La zone inondable définie suivant la méthode hydrogéomorphologique peut se trouver hors zone inondée pour les crues reconnues.

Le champ d'expansion des crues, délimité par la modélisation hydraulique, était plus limité que la zone délimité par la méthode hydrogéomorphologique, sur la C. Had Msila notamment. En revanche, les informations recueillies pour les rives de C. Bni Ftah (amont) sont assez cohérentes avec la cartographie de la méthode hydrogéomorphologique. Par contre les résultats obtenus par la modélisation hydraulique riches en indices traducteur du risque, c'est-à-dire hauteurs d'eau, vitesses d'écoulement, débits et durées de submersion.

Le but obtenu par la simulation hydraulique des crues est très importants, en particulier au niveau des C. Bni Ftah et Had Msila ; cependant, ils exigent un contrôle et d'éventuelles corrections sur terrain. Dans ce sens, la cartographie des zones inondables dans ce chapitre, nous a beaucoup aidés, parce qu'elle nous a permis de confronter et valider les résultats modélisés avec les données recueillis directement sur le terrain. A titre d'exemple, en comparant les résultats de modélisations hydrauliques avec la cartographie hydrogéomorphologique, on remarque que la marge d'erreur entre les deux résultats se limite à quelques mètres. Cette petite incertitude n'est pas due à des erreurs dans la simulation hydraulique, mais simplement à l'écart entre le débit de pointe simulé et le débit de pointe de l'événement cartographié sur le terrain.

Néanmoins, la comparaison entre les résultats de la modélisation hydraulique avec les limites des unités hydrogéomorphologique (Fig. 6.11 et Fig. 6.12) démontre une certaine similitude. Cette dernière peut valider les résultats de la modélisation hydraulique dans certains tronçons ; tandis que pour d'autres tronçons (notamment au niveau des tronçons complètement dénaturalisés), au niveau des C. Bni Ftah et Had Msila.

A partir des capacités d'analyse spatiale des données intégrées sur le Système d'Information Géographique ArcGis, nous avons réalisé la carte finale à partir de la superposition des résultats de la modélisation hydraulique et les résultats de la méthode hydrogéomorphologique. Grâce à cette opération, nous avons produit une carte indicative des aléas dans le bassin versant de l'Oued Lahdar.

La délimitation de l'aléa inondation dans le BV de l'Oued Lahdar est réalisée sur un support de l'image satellitaire. Elle est basée sur le croisement de l'approche hydrogéomorphologique et modélisation hydraulique, et par conséquent elle est qualitative.

Les niveaux de risque sont généralement conformes à ceux définis pour la superposition des résultats de l'approche hydrogéomorphologique et modélisation hydraulique, à savoir en particulier la qualification :

- Risque faible = degré faible et occurrence faible à moyenne,
- Risque moyen = degré moyenne et occurrence faible à moyenne,
- Risque fort = degré forte (ou occurrence forte),
- Risque très fort = degré très fort,

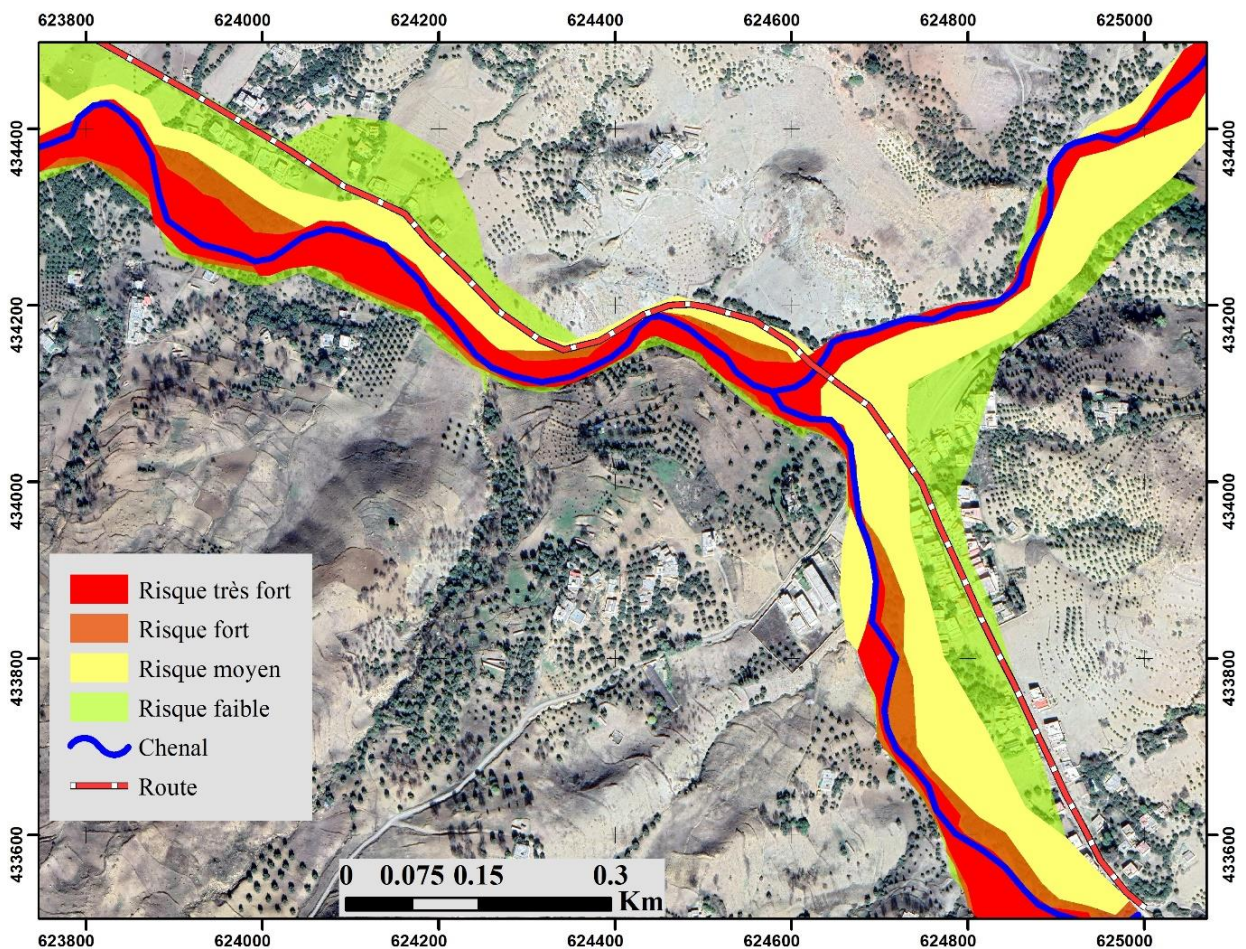


Fig. 6. 11 - Carte de zonage de risque d'inondation de l'Oued Lahdar dans le secteur amont du BV.

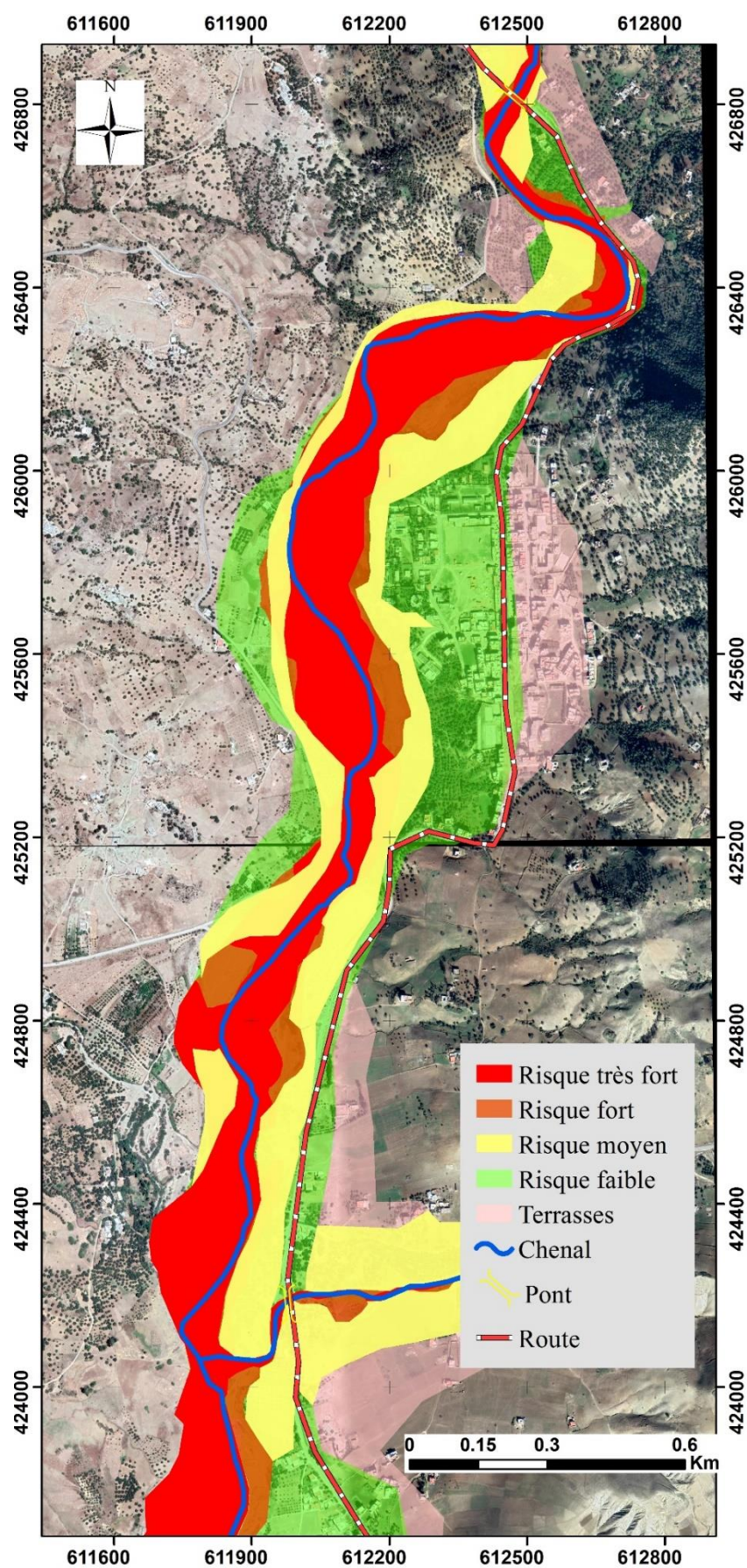


Fig. 6. 12 - Carte de zonage de risque d'inondation de l'Oued Lahdar dans le secteur moyen du BV

Après le contrôle et la validation des résultats de la modélisation hydraulique, cette dernière phase consiste à cartographier les différents degrés de danger d'inondation (très fort, fort, moyen et faible) dans le BV de l'Oued Lahdar. Les cartes obtenues couvrent les deux planches représentatives de l'ensemble du bassin : en amont, au milieu du bassin, qui sera orientée par les prochains plans d'aménagement.

Les trois degrés de dangers d'inondation (forte, moyen et faible) sont présentés pour les couleurs rouge, orange et jaune. Chaque couleur recommande un type particulier de mesures à prendre afin de diminuer la vulnérabilité.

La couleur rouge représente des zones où des événements d'intensité forte risquent de causer des pertes de vies humaines et de produire d'importantes destructions de biens. Dans ces zones, une interdiction formelle de construire est à édicter et des mesures protectives de type structurel sont à prendre pour les constructions déjà existantes. Il concerne les bâtis et toutes infrastructures socio-économiques situées dans des zones d'aléa fort et ayant une vulnérabilité élevée.

La couleur orange représente des zones touchées par des événements d'intensité moyenne mais dont la probabilité d'occurrence est élevée ou moyenne. Des pertes de vies humaines ne sont pas à attendre, mais d'importants dégâts matériels sont possibles. Dans ces zones, les nouvelles constructions doivent être soumises à diverses mesures de diminution de la vulnérabilité. Un travail de sensibilisation et d'information des riverains doit aussi être prévu dans ces zones.

La couleur jaune représente des zones où des événements d'intensité et probabilité d'occurrence faible peuvent produire des dégâts légers. La sensibilisation des riverains est la principale mesure à prendre dans cette zone. Ce degré a été donné aux terres agricoles et champs développés le long de l'Oued et des arbres fruitiers (Olivier, amandier et caroubier).

En générale la cartographie hydrogéomorphologique représente une approche complémentaire à modélisation hydraulique pour la cartographie des zones inondables. Cette approche se base sur les marques que laissent les crues dans le paysage fluvial. L'enveloppe maximale des crues rares à exceptionnelles doit être intégrée de façon réfléchie dans les schémas d'aménagement. Pour cela, l'adoption d'une vision multidisciplinaire dans l'évaluation de la récurrence des crues et dans la détermination des zones inondables au BV de l'Oued Lahdar est nécessaire. Les événements extrêmes ont été nombreux dans les dernières années. Dans le contexte des changements climatiques, ces événements sont amenés à se produire beaucoup plus souvent. De plus, les systèmes fluviaux répondent fortement à l'anthropisation du territoire et l'évaluation de leur réponse d'un point de vue uniquement statistique peut s'avérer inadéquate. L'analyse de la vallée de l'Oued Lahdar à l'aide de la cartographie hydrogéomorphologique permet de mieux comprendre l'inondation survenue et peut guider le développement de ces municipalités dans une perspective de gestion du risque d'inondation.

CONCLUSION :

La morphologie de la plaine inondable montre que les rives de l'Oued Lahdar sont castralisées par des replats de forte extension caractérisée par la présence de l'homme et leurs biens. Les plus hauts replats c.-à-d. les lits L3 et L4. Sont caractérisés par la même fraction granulométrie, l'élévation et le taux des éléments fins ce qui explique l'extension des activités humaines.

L'analyse de la vallée de l'Oued Lahdar à l'aide de la cartographie hydrogéomorphologique permet de mieux comprendre l'inondation survenue au mois octobre 2010 et peut guider le

développement de la municipalité Had Msila dans une perspective de gestion du risque d'inondation.

La reconnaissance de l'extension des éléments de la plaine alluviale (chenal, lits L1, L2, L3 et L4) permet de cartographier les zones inondables. L'installation des habitations dans ces zones à risque d'inondation au niveau des C. Bni Ftah, Had Msila et Meknassa El Gharbiya ou son exploitation par l'homme soumet les vies et les biens au risque.

Dans le terrain, nous avons bien remarqué, les modifications d'origine anthropiques affectant les conditions d'écoulement. Ces dernières ont rendu difficile la distinction des lits qui constituent la plaine alluviale, car certains éléments topographiques dus à l'homme peuvent apparaître comme naturels en première analyse de terrain (ex : les remblais, les digues, les carrières et l'activité agricole ...).

Finalement, l'analyse hydrogéomorphologique permet de délimiter l'enveloppe maximale des crues mais définir le risque acceptable à l'intérieur de cette zone est plus ardu. La modélisation hydraulique permet de rapidement tracer une ligne où des crues fréquentes se produisent, pouvant être intégré dans la délimitation de la zone à risque. La complémentarité des deux méthodes mène à une meilleure gestion des risques d'inondation sur territoire.

L'étude et les résultats obtenus ont permis de déterminer l'emprise des zones inondables sur l'ensemble de la vallée du BV pour une crue exceptionnelle, et d'identifier la dynamique s'exerçant sur les différents lits d'inondation reconnus. C'est dire qu'une meilleure connaissance des processus propres à l'évolution de la plaine alluviale contribue à une meilleure évaluation des risques d'inondation sur un territoire. Dans ce sens, les approches hydrogéomorphologique et la modélisation ne doivent pas être perçues en termes de concurrence mais en termes de complémentarité, surtout lorsqu'un premier travail de modélisation a été engagé dans un secteur, l'objectif, in fine, étant une meilleure évaluation des risques d'inondation sur un territoire.

CONCLUSION DE LA TROISIEME PARTIE :

La dynamique fluviale dans la basse vallée de l'Oued Lahdar se caractérise par différentes caractéristiques selon les agents contrôlés par ex : les l'agent de transport des sédiments, les pentes, en plus les formations fragiles qui forment les berges de la vallée, ce qui explique l'élargissement horizontal de cet oued et notamment l'absence certain des lits surtout le lit 4 apparaît seulement dans quelques zones et sa apparaît à travers les profile topographiques.

Les formes sédimentaires varient dans le même environnement en fonction des types des chenaux fluviaux et des différents facteurs contrôlant le transport des sédiments. Au fil du temps, ces sédiments déposés forment des lits fluviaux constitués de différents dépôts dans la structure minérale et physiologie.

Le cours d'eau, de notre zone d'étude est caractérisé par une activité très importante des processus fluviaux à cause de la faible pente, de la lithologie friable, et de l'irrégularité du régime climatique et hydrologique...

Les dépôts dans la zone de l'exutoire de l'oued Lahdar et très différents avec les dépôts au niveau de l'Oued Lahdar soit sur la granulométrie ou la structure physiologique des minéraux.

En fin on peut dire que la dynamique fluviale entre la haute vallée et la basse vallée et la moyenne vallée est différente selon la différence entre les indicateurs contrôlé (topographique, géologique,).

Les résultats obtenus à partir de la méthode hydrogéomorphologique ont permis de déterminer l'emprise des zones inondables sur l'ensemble de la vallée de l'Oued des Centres territoriaux Had Msila et Bni Ftah et Meknassa El Gharbiya, et d'identifier la dynamique s'exerçant sur les différents lits d'inondation reconnus. C'est dire qu'une meilleure connaissance des processus propres à l'évolution de la plaine alluviale contribue à une meilleure évaluation des risques d'inondation sur un territoire.

Le degré de risque d'inondations dans la plaine alluviale de l'Oued Lahdar différents selon la différence entre les unités géomorphologique de la plaine alluviale.

CONCLUSION GENERALE

Le bassin versant de l'Oued Lahdar se localise dans la chaîne rifaine, fait partie de système des chaînes alpines de la Méditerranée occidentale, et qui se prolonge vers l'Est par le tell algérien avec lequel elle forme les maghrébines.

Le substratum rocheux du bassin versant de l'Oued Lahdar est caractérisé par la prédominance des roches tendres, essentiellement marneuses et marneux-calcaires ; celles-ci, favorisent, pendant les phases pluvieuses.

Le facteur topographique (montagnes de basses altitudes et pentes fortes) du bassin versant de l'Oued Lahdar crée des conditions très favorables au déplacement rapide des eaux de surface, amont - l'aval. Ce type d'écoulement correspond à une dynamique des crues à charge solide importante.

Le climat au niveau du périmètre du bassin versant de l'Oued Lahdar est de type méditerranéen. Il appartient à l'étage semi-aride. L'analyse des précipitations montre que le BV est marqué par une grande irrégularité temporelle quelque soit le pas envisagé, de la journée à l'année jusqu'à l'alternance de période sèche et humide se déroulant sur plusieurs décennies. Les valeurs de précipitations max sur 24h présentent des valeurs fortes, y compris pour des temps de retour faible. Ces fortes précipitations peuvent avoir lieu quasiment tous les mois de l'année. Ceci démontre que le BV de l'Oued Lahdar est particulièrement propice à la genèse de crues de fort volume sur des temps courts. Si la variabilité spatiale dans les valeurs annuelles des précipitations dans le BV est causée par l'orographie, elle ne se traduit pas dans la valeur sur les bassins, dans la mesure où ils sont orientés de la même manière vis - à - vis des flux à l'origine des précipitations.

La situation de l'organisation spatiale des réseaux hydrographiques, dans le BV, a naturellement un grand effet sur le comportement des écoulements et spécialement sur la la genèse des crues dans les artères hydrographiques principales. De plus, la pente du profil du réseau hydrographique joue un rôle important en provoquant les processus de chasse d'eau.

Le couvert végétal se caractérise par une densité important au niveau de la zone nord du BV, par contre elle est moyenne et nulle vers la partie centrale et la zone sud de ce bassin. Une telle répartition confirme l'impact du facteur orographique sur la répartition climatique dans le BV de O. Lahdar.

La plaine alluviale de l'oued Lahdar, au niveau des Centres, a été marquée par la présence d'installation humaine importante ; ce qui amplifie les conditions de risque, notamment celui engendré par les inondations. Divers aménagements hydrauliques ont été réalisés depuis le siècle dernier. Parmi les impacts de ces travaux, la concentration des flux d'eau et d'énergie dans un lit étroit et rétrécit. Ceci provoque des effets sur la morphodynamique de l'oued Lahdar : accélération des sapements des berges par augmentation de la force de cisaillement, augmentation des effets des petits oueds (torrents latéraux) et l'augmentation de remblaiement dans certains endroits. Globalement, la morphodynamique actuelle de l'Oued Lahdar a été depuis, bouleversée par ces interventions humaines.

La dynamique fluviale dans la basse vallée de l'Oued Lahdar se caractérise par différents types d'agents contrôlant la dynamique : agents de transport des sédiments, la pente, en plus les formations fragiles des berges de la vallée. Cette dynamique explique l'élargissement horizontal de cet Oued et notamment l'absence de certains lambeaux des lits entre la rive droite et gauche et de l'amont vers l'aval, et particulièrement ceux du lit 4 qui apparaît seulement dans quelques endroits de la plaine alluviale.

La simulation des crues de l'Oued Lahdar montre que cette approche a permis d'une part de calculer les débits de pointe et d'autre part de prévoir les zones inondables pour différentes périodes de retour, de 10 ans jusqu'à 1000 ans. Les résultats obtenus constituent une base de données utile et nécessaire aux éventuelles modélisations hydrauliques des crues de l'Oued Lahdar et de ses affluents, particulièrement aux niveaux des Centres Had Msila et Bni Ftah. Ces paramètres hydrologiques servent de base à la simulation de la propagation des crues dans la vallée de l'Oued Lahdar.

La modélisation hydraulique nous a permis de reproduire numériquement le comportement de l'Oued Lahdar, de connaître l'importance du risque d'inondation le long du tronçon étudié et éventuellement de prévenir l'impact des aménagements dans le futur. Cependant l'exploitation du modèle ne se limite pas à la reproduction de l'état actuel de l'Oued, mais elle peut servir comme moyen de prévention et de gestion des actions futures par la réalisation de différents scénarios. Ces actions peuvent être des travaux d'aménagement qui, le plus souvent, influencent la dynamique fluviale et entraînent des effets secondaires indésirables ou imprévus. Enfin, on peut exploiter les résultats fournis de l'Hec-RAC comme des données de base d'aménagement pour éviter les impacts des aménagements inadéquats.

Les cartes que nous avons obtenues sont très riches en indices traducteurs du risque d'inondation. La modélisation hydraulique permet de caractériser l'aléa dans l'espace et le temps. Les hauteurs d'eau, les vitesses d'écoulement, les débits et les durées de submersion. Grâce à un croisement avec les limites hydrogéomorphologiques, la cartographie de l'inondabilité des terrains de la plaine alluviale de l'Oued Lahdar sera plus précise. D'autant plus que la cartographie des zones inondables offre des informations ponctuelles de la nature du risque probable dans les sections de la vallée étudiées.

L'approche hydrogéomorphologique a permis de comprendre les éléments morphologiques constituant la plaine alluviale de l'Oued Lahdar. Ces derniers sont le chenal, le lit mineur, le lit moyen, le lit majeur et le lit majeur exceptionnelle. Chacun de ces éléments est différent de l'autre ; cette distinction est basée sur la morphologie de la topographie de la surface de la plaine alluviale et sur la sédimentologie des alluvions qui colmatent ce fond.

Les résultats de la méthode hydrogéomorphologique nous a permis de cartographier, de manière homogène sur tout les tronçons de l'Oued Lahdar concerné par l'étude, les limites externes inondables ainsi que tous les éléments naturels ou artificiels, qui peuvent jouer un rôle sur l'écoulement des crues. Ces résultats figurent également les limites atteintes par les grandes inondations historiques connues. Elles peuvent servir de moyens de prévention et de gestion de risque d'inondation dans la plaine alluviale de Lahdar.

Finalement, l'Oued Lahdar est située dans un contexte qui oblige les responsables à prendre en compte l'importance socio-économique du site et ses enjeux, et l'importance des risques de dégradation de l'écosystème et ses dangers. L'aménagement du site doit passer par l'installation des infrastructures adaptées à la nature du site, auxquelles ce travail a tenté de contribuer, et à l'exigence environnementale et démographique. A notre avis, l'adaptation d'une politique de partenariat avec les différents intervenants y compris les citoyens, peut conduire à une bonne valorisation de ce territoire, afin de pouvoir assurer un bon aménagement et une bonne gestion du site durable et efficace.

Les résultats de cette étude confirment la grande corrélation entre l'aléa naturel et la vulnérabilité du milieu, dont l'homme et ses activités accélèrent la fragilité (notamment l'extension

des activités humaines dans les zones inondables). La création de certains ouvrages sous-dimensionnés par rapport aux débits naturels des oueds, et surtout par rapport aux matériaux détritiques en transit, qui peuvent se transformer à tout instant en un obstacle augmentant la probabilité de risque d'inondation.

La lutte contre les inondations dans le BV de l'Oued Lahdar devrait passer par la prise en compte de toutes les composantes, naturelles et humaines de son BV. Il faudra en effet, dans le cadre d'une approche globale, tenter d'atténuer les crues en protégeant le bassin versant contre l'action des eaux de pluie et de ruissellement, mais aussi prévoir d'améliorer les conditions d'écoulement de l'Oued au niveau des Centres et agglomérations, afin d'éviter que les eaux puissent facilement déborder. Un meilleur contrôle de la croissance démographique ou de l'augmentation de l'impact humain dans la plaine alluviale devra en outre être mis en place, afin de tenir compte des relations entre l'extension humaine et les risques hydrologiques.

Par conséquent, cette recherche se voulait, grâce à l'étude des phénomènes de débordements de l'Oued Lahdar, à partir des plus grandes crues connues, une cartographie des zones concernées permettant d'obtenir « les atlas des zones inondables » ; ce qui permettra de déterminer les zones à risque qui vise la responsabilisation de l'ensemble des acteurs concernés : services de l'Etat, communes et particuliers.

Ce travail a permis de constater que de nombreux aménagements de cours d'eau ont été réalisés : canalisation (bétonnage des berges), endiguement (augmentation de la hauteur des berges pour éviter le débordement des eaux), mais aussi recalibrage (augmentation de la capacité du lit en modifiant sa profondeur et sa largeur). Ces aménagements ont modifié de façon significative les composantes physiques de l'Oued Lahdar. Ils ont donc des répercussions sur le fonctionnement de la morphodynamique actuelle de système fluvial de ce cours d'eau. Les gestionnaires sont appelés à prendre en compte les éventuelles effets secondaires de chaque modification dans les paramètres physiques de l'Oued. Pour cela, des aménagements, basés sur les résultats obtenus par la modélisation et la méthode hydrogéomorphologique devraient être préconisés.

Les méthodes de lutte contre l'inondation dans les plaines alluviales sont généralement coûteuses et délicates. Il s'agit souvent d'éviter que les eaux des crues ne débordent pas sur des zones aménagées ou urbanisées. Face aux problèmes d'inondation, une première solution consiste à :

- l'arrêt de construction dans les zones inondables qui déjà déterminer dans le chapitre 5.
- exporter ou à déplacer les objets menacés (habitations, tracé de route, infrastructure, etc.) en dehors des zones à risque.
- reconstruire des ponts sur la base des résultats de la modélisation hydraulique.

Lorsque ces solutions ne peuvent être applicables (pour des raisons sociales, techniques ou financières), il devient nécessaire d'adopter une ou plusieurs techniques de confortement de ces zones à risque. Pour cela, il est nécessaire de s'appuyer sur des solutions plus efficaces, comme des constructions des barrages en amont de BV.

Les mesures de gestion des plaines alluviales doivent viser la réduction de la probabilité d'inondation et de l'ampleur de ses conséquences potentielles. Elles doivent porter également sur la prévention, la protection et la préparation aux situations d'inondation. Ces mesures doivent tenir compte des aspects pertinents, tels que l'orientation de l'exploitation dans les zones fluviales, la gestion des eaux, des sols, et une bonne gouvernance pour l'aménagement du territoire.

REFERENCES DES BIBLIOGRAPHIQUES EN FRANCAIS :

- ABHS., (2005)**, Etude d'exécution de l'aménagement des cours d'eau pour la protection de la ville de Fès contre les inondations. Sous-mission 1-1 : Validation des aménagements retenus. Marché N° : 37/2005, Fès.
- ABHS, (2009)**, Atlas des zones inondables, Région de Fès-Boulmane. Fès, 49p.
- AFKIRE., (1985)**, Le bassin versant de l'Inaouène : caractéristiques climatiques et comportement hydrologique. Thèse Doct. Troisième Cycle. Univ. Toulouse-le-Mirail (Toulouse II), Toulouse, France. 286 p.
- AFOUDA A., (1980)**, Etude théorique de modèles de transformation pluie-débit en milieu semi-urbain. Cahiers ORSTOM. Série Hydrologie, 1980, 17 (2), p. 71-90.
- AIMON H., (2003)**, Détermination d'un niveau intermédiaire dans la plaine alluviale du Gardon (St Geniès-de-Malgoirès, Gard). Mémoire de DEA, Université de Provence, 91 p.
- AGHZAF A., (1985)**, Le bassin versant de Tigrigra : étude hydrologique. Th. Doct. Troisième Cycle. Univ. Toulouse, France. 185p.
- AKDIM B., LAAOUANE M., TAOUS A., OBDA Kh., (2003)**, Risque hydrologique dans la Région de Taza (Maroc). Genèse, conséquences et problème d'aménagement. Geomaghreb, n° 1, pp 47-60.
- AKDIM B., LAAOUANE M., (2007)**, Fès : ressources, patrimoine et développement local, Imprimerie Info-Print, 237p.
- ALARD R., KIENERT G., (1985)**, Les travaux publics, Edition, Eyrolles, 442p.
- ANAELLE V., (2018)**, Trajectoires et processus fluviaux dans la moyenne vallée du Cher du Tardiglaciaire à la période actuelle. Métamorphose fluviale, réponses aux forçages sociétaux et ajustements des chenaux et des bras morts. Thèse de l'université Panthéon sorbonne. 500p.
- ANDRIEUX J. (1971)**, La structure du Rif central. Etude des relations entre la tectonique de compression et les nappes de glissement dans un tronçon de la chaîne alpine. Notes et Memo. Serv. Geol. Maroc, 235, 155p.
- ANTONIN M., (2014)**, L'approche hydrogéomorphologique : pratiques, valorisations et développement d'une méthode de cartographie des zones inondables. Thèse de l'université Paul Valéry-Montpellier 3. 279p.
- ASTRADE L., (2000)**, Les crues de la Saône. In : Les régions françaises face aux extrêmes hydrologiques. Gestion des excès et de la pénurie, sous la direction de J.P. BRAVARD, Édit. SEDES, Paris, pp. 54-69.
- BALLAIS J.L. (1973)** - Les inondations de 1969 en Tunisie méridionale. Bull. Soc. Hist. Nat. Afr. Nord, t. 64, fasc. 3 et 4, pp. 99-128.
- BALLAIS J.L., BONTÉ P., MASSON M., GARRY G., BEN KEHIA H., EYRAUD C., GHARAM A., (2004)**, L'évolution du risque d'inondation par les cours d'eau méditerranéens français : le rôle de l'accumulation dans le lit majeur. BAGF – Géographies, n° 1, pp. 64-74.

- BALLAIS J.L., CHAVE S., (2005)**, Rapport sur la cartographie hydrogéomorphologique de communes du Gard en vue de leur PPR Inondation. Édit. BRLI, Nîmes, 4 p.
- BALLAIS J.L., GARRY G., MASSON M., (2005)**, Contribution de l'hydrogéomorphologie à l'évaluation du risque d'inondation : le cas du Midi méditerranéen français. Comptes Rendus Géoscience, n° 337, pp. 1120-1130.
- BALLAIS. J.L., DELORME-LAURENT V., AIMON H., DELORME F., FEHRI N., GARTET J., (2005)**, L'apport de l'archéologie des matériaux aux problèmes de chronologie des inondations du 20^{ème} siècle autour de la méditerranée. Archeoscience, revue d'archéométries, 29, pp.163-166.
- BALLAIS J.L., (2006)**, La cartographie hydrogéomorphologique. BAGF – Géographies, n° 4, pp 461-468.
- BALAIS. J.L., CHAVE S, DELORME-LAURENT V., ESPOITO Ch., (2007)**, Hydrogéomorphologie et inondabilité, géographie physique et quaternaire, vol.61, n°1, pp.75-84.
- BALLAIS J.L., (2008)**, Paysages méditerranéens. In : Les formations superficielles, Y. DEWOLF et G. BOURRIÉ coordinateurs, Édit. Ellipses, Paris, pp. 565-578.
- BALLAIS J.L., (2009)**, L'érosion hydrique dans les oliveraies de la Sierra Mágina. Perspectives pour un développement durable. In : El Olivar : Paisaje, Patrimonio y Desarrollo Sostenible, E. ARAQUE JIMENÉZ édit., Édit. Asociación para el Desarrollo Rural de la Sierra Mágina, Cambil, pp 117-139.
- BALLAIS J.L., CHAVE S., DELORME-LAURENT V. et ESPOSITO C., (2009)**, Hydrogéomorphologie et inondabilité. Géographie physique et Quaternaire, vol. 61, n° 1, 2007, pp 75-84.
- BALLAIS. J.L CHAVE S., DUPONT N., MASSON E., PENVEN MJ., (2011)**, La méthode hydrogéomorphologique de détermination des zones inondables. Physio-Géo (www.physio-geo.fr), collection "Ouvrages", 168 p.
- BCEOM., (2004)**, Méthode intégrée. Application de la méthode intégrée à l'Ouvèze : secteur de Vaison-la-Romaine à Violès. Rapport final au CÉTE Méditerranée, Aix-en-Provence, 111 p.
- BCEOM., (2005)**, Méthode intégrée. Application de la méthode intégrée à la Meuse : secteur de Vilosnes-Haraumont à Pouilly sur Meuse. Rapport d'étude au 1er septembre 2005 au CÉTE Méditerranée, Aix-en-Provence, 47 p.
- BOUANANI A., (2005)**, Hydrologie, transport solide et modélisation, étude de quelques sous bassins de la Tafna (NW - Algérie). Thèse doctorat d'état ; université Abou Bekr Belkaid Tlemcen, Algérie.248p.
- BRAVAD J.P., (1987)**, Le Rhône du Léman à Lyon. La Manufacture éd., Lyon, 452p.
- BRAVAD J.P., (1989)**, La métamorphose des rivières des Alpes françaises à la fin du Moyen âge et à l'époque moderne. Bulletin de la Société géographique de Liège. 25, pp.145-157.
- BRAVAD J.P., (1992)**, Basse vallée de l'Ain Etude de définition d'un schéma global d'aménagement. Conseil Général de l'Ain.34p.
- BRAVARD J.P., (1994)**, L'incision des lits fluviaux : du phénomène morpho dynamique naturel et réversible

aux impacts irréversibles. *Revue de Géographie de Lyon*, 69, 1, pp. 5 - 10.

-BRAVARD J.P. et PETIT F., (1997), Les cours d'eau. Dynamique du système fluvial. Édit. A. COLIN, Paris, 222 p.

-BRAVARD J.P., (2000), Les extrêmes hydrologiques : handicaps réductibles ou composantes patrimoniales à sauvegarder ? In : Bravard. J.P. (Ed). Les régions françaises face aux extrêmes hydrologiques. Gestion des excès et de la pénurie. Sedes, pp. 5 - 14.

-BRAVARD J.P., PIEGAY H., (2000), L'interface Nature - Sociétés dans les hydrosystèmes fluviaux. *Géocarrefour*, 75,4, pp.273-274.

-BRAVARD J.P., (2002), La morphodynamique fluviale entre la géoarchéologie et la gestion des hydrosystèmes contemporains. *Bull. Ass. Des Géographes Français*, 1 : p. 29-41.

-BRANKA A., (2002), Étude des zones inondables du bassin versant du Gardon entre Vers et Dions. Mémoire de D.E.A., Université de Provence, 88 p.

-BROCHARD F., MONFORT M., (2008), Evaluation des débits caractéristiques sur les bassins versants non jaugés en Guyane [Rapport]. - Cayenne : Direction régionale de l'environnement de Guyane.76p.

-BRYAN.A.B., (1987), Processes and significance of rill development. *CATENA*. Sup 8.pp 1-5.

-CAREX., (2004), Application de la méthode intégrée à un tronçon de l'Ouvèze. Rapport de synthèse au CÉTÉ Méditerranée, Aix-en-Provence, 70 p.

CAMPY.M., MACAIRE.J., (1989), Géologie des formations superficielles. Édit. MASSON, Paris, 433 p.

-CÉTÉ Méditerranée., (1997), Environnement et aménagement d'un cours d'eau méditerranéen ; étude de cas : les Gardons. Aix-en-Provence, 89 p.

-CÉTÉ Méditerranée., (2001), Aménagement hydraulique du secteur de Salèles d'Aude et Cuxac d'Aude ; modélisation 2D ; rapport d'avancement ; modélisation numérique de terrain et calculs en lit mineur. Rapport, Aix-en-Provence, 54 p. -(cédérom).

-CHAVE S., (2002), Pertinence de la cartographie hydrogéomorphologique dans l'approche des inondations rares à exceptionnelles : exemples de sept bassins fluviaux dans les Corbières et le Minervois. *Géomorphologie*, n° 4, pp. 297-306.

-CHAVE S., (2003), Élaboration d'une méthode intégrée de diagnostic du risque Hydrologique. Thèse de l'Université de Provence, 284 p.

-CHAVE S. et BALLAIS J.L., (2006), From hydrogeomorphology to hydraulics computations : a multidisciplinary approach of the flood hazard diagnosis in the Mediterranean zone. *Zeitschrift für Geomorphologie*, N.F., vol. 50, n° 4, pp. 523-540.

-CHAVE S., DELORME-LAURENT V. et ESPOSITO C., (2009), Hydrogéomorphologie et inondabilité. *Géographie physique et Quaternaire*, vol. 61, n° 1, 2007, pp. 75-84.

- CHEIKH SIDI EL KHAIR F., (2013)**, Délimitation des zones inondables par l'utilisation combiné du logiciel Hec-RAS et Hec-GEORAS cas du Centre « Ain Jemaa » ; Université Sidi Mohammed Ben Abdellah. Mémoire du Master. 93p.
- CHOCAT B., (1978)**, Un modèle de simulation des écoulements dans les réseaux d'assainissement pluvial ; thèse Docteur ingénieur ; INSA Lyon ; 304p.
- CHOCAT B., THIBAUT S., SEGUIN D., (1982)**, Hydrologie urbaine et assainissement. Tome 1. Cours photocopié de l'INSA de Lyon, 142 p.
- CHRISTIAN CHRISIAN L et JEAN. L. S., (2002)**, Les risques naturels majeurs, éditions scientifiques, pp 155-193.
- COMITE FRANÇAIS DES GRANDS BARRAGES –FRCOLD., (1994)**. Les crues de projet des barrages : Méthode de GRADEX [Conference] // Barrages et réservoirs ; 18ème congrès CIGB/ICOLD-N°2.pp.21-28.
- COQUE R., (1977)**, Géomorphologie. Édit. A. COLIN, Paris, 430 p.
- COQUE R., (1993)**, Géomorphologie. A. Colin, Paris, 452 p.
- COQUE, R., (2002)**, Géomorphologie. Armand Colin, Collection U, 503 p.
- CRAUSAZ P. A., (2000)**, Du rôle intégrateur des systèmes d'information à référence spatiale dans la gestion institutionnelle des eaux : analyse, méthode, limites et perspectives. Thèse de Doctorat de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne. 284p.
- CTGREF., (1972)**, L'application de la méthode du Gradex à l'estimation des crues de faible fréquence. Division hydrologie, France.199-203pp.
- DAGUIN F., (1927)**, Contribution à l'étude géologique de la région Prérifaine (Maroc occidental). Notes et Mém. Serv. Des Mines et de la Carte géol. du Maroc, pp. 1-415.
- DAVIS W.M. (1899)**, The geographical cycle. Geographical Journal, n° 14, pp. 481-50.
- DAWDY. D. R., LETTENMAIER. D. P., (1987)**, Initiative for risk-based flood design. J. Hydraul. EngngASCE 113, pp.1041-1051.
- DELORME F., (2004)**, La sédimentation en lit majeur : mise en évidence, caractérisation, origines et impacts sur l'inondabilité. Mémoire de DEA, Université de Provence, 68 p.
- DELORME-LAURENT V., (2007)**, Contribution à la méthode hydrogéomorphologique de détermination des zones inondables. Thèse de l'Université de Provence, 830 p.
- DELORME F., DELORME-LAURENT V., BALLAIS J.L., BONTÉ P., (2009)**, L'évolution de la basse vallée de l'Argent-Double pendant l'époque historique. In: "OL' MAN RIVER" Geoarchaeological aspects of rivers and river plains, M. DE DAPPER, F. VERMEULEN, S. DEPREZ et D. TAELEMAN édit, Argu-series 5, Édit. Academia Press, Gand, pp. 281-296.

- DE PLOEY.J., (1973)**, Ruissellement diffus, ravinement et badlands dans le bassin de kasserine (Tunisie steppique). Ann, mines et Géol, Tunis.26, pp. 583-593.
- DE PLOEY.J., (1974)**, Mechanical properties of hillslopes and their reation to gullyng in central semi-arid. Tunisia. Z.Geomorph.NF Suppl.Bd.21 pp177-190.
- DERRUAU M., (1986)**, Les formes des reliefs terrestres. Edition. Paris, 119p.
- DERRUAU M., (1956)**, Précis de Géomorphologie. Masson, 7 éd., Paris, 533p.
- DERRUAU M., (1962)**, Précis de géomorphologie. Édit. MASSON, Paris, 411 p.
- DERRUAU M., (1974)**, Les formes du relief terrestre. Édit. MASSON, Paris, 120 p.
- DERRUAU M., (1988)**, Précis de Géomorphologie. Édit. Masson., Paris, 393p.
- DIREN PACA., (2004)**, Cartographie hydrogéomorphologique des zones inondables en région PACA. Département du Var. Rapport technique, 47 p.
- DIREN PACA., (2007)**, L’approche hydrogéomorphologique en milieux méditerranéens. Une méthode de détermination des zones inondables. Guide méthodologique, 66 p.
- DPA TAZA., (1996)**, Etude pédologique de reconnaissance au 1/100 000 dans les cercles d’Aknoul et de Taineste (Province de Taza).76p.
- DUCHAUFFOUR. Ph. et SOUCHIER. B., (1977)**, Pédologie : pédogénèse et classification. Edit. Masson Paris. .490p
- DUCHAUFFOUR PH ., (1988)**, Pédologie . Abregé . Edit. Masson. Paris - Milan - Barcelone - Mexico. .513p.
- DUCHAUFFOUR. H , LEBERTON M , BIZIMANA M., LECUYER J., (1993)**, Aménagement d'une ravine en association avec les agriculteurs cas de la ravine de Sagara (Munirma central , BURUNDI) Bull , Réseau , Erosion 13 pp : 84-111.
- DUPONT N., PENVEN M.J., (2005)**, Définition des indicateurs pour une cartographie de la courbe enveloppe des inondations dans le cadre de l'utilisation de la méthode hydrogéomorphologique. Rapport définitif à la DIREN Bretagne, 35 p.
- DURAND DELGA M. HOTTINGER L. MARCAIS M., (1962)**, Données actuelles sur la structure du Rif. Mém. h.s. Soc. Géol. France, t.l, 3 fig., 1 pl. h-t., pp. 399-442.
- EL HAFID, D GILILE, E – AKDIM, B., (2004)**, Echelle spatiale et genèse des risque hydrologiques en milieu urbain et péri-urbain : Cas de la ville de Oujda (Maroc), Géomagreb N°2, pp. 1-10.
- EL ALAMI H (2012)**, La vallée de l’Inaouène à Oued Amlil : occupation de l’espace fluvial, contexte physique et risque d’inondation, Faculté des Lettres et des Sciences Humaines Saïs- Fès. Mémoire du Master. 114p.

- EL KHALKI.Y., (1990)**, Etude hydrogeomorphologique du haut-Sbou : cas du synclinal de skoura et de ses bourdures (Moyen Atlas) ; Th. Doct. Univ. Aix-Marseille, Aix-en-provence, France. 251p.
- ENNADIFI Y., (1974)**, Etude géologique du Prérif oriental et son avant pays (région comprise entre Mezquitem et Ain Aora et Tizroutine). Notes et mem. Serv. Geol. Maroc, n° 253, 66p.
- FATTASSE H., GARTET J., LAHRICHI K., EL BOUTE S., BENAÏSSA M., EL MANSOURI S., (2017)**, Détermination des crues de projet au niveau du Centre de Had Msila, bassin versant de l'Oued Lahdar (haut Inaouène, Maroc). Publications de la Faculté des Lettres et Sciences humaines – Oujda, pp.13-21.
- FATTASSE H., GARTET J., LAHRICHI K., EL BOUTE S., BENAÏSSA M., EL MANSOURI S., (2022)**, Simulation et spatialisation du risque d'inondation basé sur le calcul hydrologique et la modélisation hydraulique : cas de Had Msila (haut Inaouène, Maroc). Actes de colloque « Les zones fragiles : Histoire, dynamiques et formes de gestion spatiale Cas du bassin versant d'Inaouène », Faculté Polydisciplinaire de TAZA, pp. 12-25.
- FORTIN V., BOBEE B., DUCKSTEIN L. et BARGAOUI Z., (1995)**, Détermination floue des zones hydrologiques homogènes [Article] // Modelling and Management of Sustainable Basin-scale Water Resource Systems.. - July 1995. Vol. IAHS. .231p.
- FRANCOU, J., RODIER A., (1969)**, Essai de classification des crues maximales [Section] // Les crues et leur évaluation. - [s.l.] : AIHS., - Vol. I. .14p.
- FRIZON DE LA MOTTE D., (1985)**, La structure du Rif oriental (Maroc), le rôle de la tectonique longitudinale et importance des fluides. Thèse d'état sciences. Paris 6.436p.
- FULLER, W. E., (1914)**, Flood flows [Section] // Trans.Soc.Civ.Eng.. - Vol. LXXVII. .pp. 564–617.
- GARTET A., (1994)**, Morphogenèse et hydrologie dans le bassin versant de l'Oued Lebène (Rif méridional et Prérif central et oriental, Maroc). Thèse, Aix - Marseille 1, 337 p.
- GARTET A., (1996)**, Violence des crues de l'Oued Lebène et évolution des lits fluviaux (Prérif central, Maroc), 121 ° Congr. nat. Soc. hist. Scient., Aix - en - Provence, 1995, Risques naturels, pp. 67-85.
- GARTET J., BALLAIS J. L., GARTET A., FONTUGNE M., (2001)**, Polémique autour de la datation de la terrasse rharbienne du Maroc. Apport de la très basse terrasse de l'Ouerrha, (Rif - Maroc), pp. 361-369. «Colloque Datation» (XXI^e Rencontre internationale d'archéologie et d'histoire d'Antibes, Juan les Pins 19-21 Octobre 2000). Publications du Centre d'Études Préhistorique, Antiquité, Moyen âge villes d'Antibes et Ministère de la culture et de la communication. Édit. APDCA, 437 p.
- GARTET J., (2001)**, Contribution à la connaissance de la dynamique fluviale au Pléistocène supérieur et à l'Holocène dans la vallée de l'Ouerrha. Etude des dépôts des basses et très basses terrasses de l'Ouerrha (Rif - Maroc), Thèse de l'université d'Aix-Marseille I, 545 p, édit. Septentrion.
- GARTET J, (2001)**, Etude des dépôts des basses et très basses terrasses de l'Ouerrha, (Rif Maroc). Thèse Aix Marseille. I, PP (33-70), P 484.
- GARTET.A ET GARTET.J., (2003)**, Crues et inondations de l'Oued Lebène (prérif centrale). Revue AL Misbahia n°6, publications FLSH. Sais Fès, pp : 37-63.

- GARTET J. GARTET A., (2010)**, Mouvement de terrain et inondations au nord du périmètre urbain de Taza : Risque géomorphologiques et contraintes d'aménagement. Rencontre des géomorphologues Marocains, Bni Mellal.pp.156-227.
- **GARTET J., GARTET A., (2013)**, Signification des formes et des formations fluviatiles du Quaternaire supérieur dans la vallée de l'Ouerrha, Ri-méridional, Maroc septentrional. Rivesta de Geomorfologie, Vol. 15, pp. 97-105.
- GARTET J., GARTET A., (2016)**, Méthodologie de recherche et outils d'analyse des formes et des formations quaternaires des plaines alluviales. Cas de l'Ouerrha. Actes de la 19^{ème} Rencontre des Géomorphologues du Maroc, « Les plaines marocaines entre l'héritage naturel et la réhabilitation de l'espace » Faculté des Lettres et des Sciences Humaines-El Jadida, pp67-88.
- GENDREAU. N., LONGHINI M., COMBE P., (1998)**, Gestion du risque d'inondation et méthode inondabilité : une perspective socio-économique. Cemagref3, bis Quai Chauveau CP 22069336 Lyon Cedex 09, Ingénieries – EAT – N° 14 Juin 1998 pp. 3-15.
- GIREL J., MANNEVILLE O., (2007)**, L'origine de la turfigenèse dans la plaine alluviale de l'Isère (Alpes du Nord), Publications de l'Université de Saint-Etienne (Publications du CRENAM), Saint-Etienne, 2007, pp. 183-199.
- GILRD O., GENDREAU N., (1998)**, Inondabilité : une méthode de prévention raisonnable du risque d'inondation pour une gestion mieux intégrée des bassins versants, Revue Sciences de l'Eau, Vol. 11 (3), pp. 429-444.
- GOUSSENS C., PRINCIPAL. (1985)**, component analysis of Mediterranean rainfall [Journal]. - [s.l.] : Journal of Climatology,. - 5. pp. 379-388.
- GRAY WIGHAM J., (1972)**, Précipitation à l'origine des débits de pointe [Section] //Manuel des principes d'hydrologie. - Ottawa, Canada : Comité national canadien de la décennie hydrologique internationale, - Vol. 8. pp.363-375.
- GREGORY, K.J. AND WALLING, D.E., (1973)**, Drainage Basin. Form and Process: A Geomorphological Approach. Edward Arnold, London. 458 p.
- GRESILLON, J., PUECH, M., (1996)**, Analyse de données et suggestions pour le dimensionnement [Section] // Estimation des débits des crues sur les petits bassins versants en zones sahéliennes et tropicales. - Paris : IAHS Publ, .325p.
- GUERBI M. A., ABDELKEBIR B., (2017)**, Protection contre les inondations par l'utilisation d'ARC GIS, Hec-EO RAS et Hec-RAS. Cas de la ville d'El Kseur W. Bejaia. Université Mohamed Boudiaf - M'sila. Anné universitaire ; .94p.
- GUILLOT P., DUBAND D., (1967)**, La méthode du Gradex pour le calcul de la probabilité des crues à partir des pluies, in Floods and Their Computation. Proceedings of the Leningrad Symposium, IASH Publ. 84.pp. 560–569.

- GUMBEL E.J., (1935).** Les valeurs extrêmes des distributions statistiques. Ann.Inst. H. Poincaré 5(2). Retrieved 2009-04-01. Pp.115–158.
- GUMBEL I, E. J., (1956),** Méthode graphique pour l'analyse des débits de crue [Conférence]. - New-York : La Houille Blanche, - pp. 709-717.
- G.T.Z.im TZ-Verlag., (1996),** L'aménagement des zones marneuses dans les bassins versants des montagnes de l'Atlas.Tellien semi-aride. TZ Robdorf.142p.
- HARAJ TOUZANI.M., (1993),** L'érosion dans le Prérif et sa bordure rifaine (ravinement : étude quantitative). Thèse. Doc. Univ. Denis Diderot (Paris 2), Paris, 161p.
- HAZAN, R., LAZAREVIC, D., (1969),** Détermination des débits maximum et hydrogramme de crues [Rapport]. - Rabat : Office National des Irrigations, - pp. 354-361.
- HEUSCH.B., (1970),** L'érosion dans le Prérif. Une étude quantitative de l'érosion hydrique dans les collines marneuses du Prérif occidental.Thèse.Ann.Rech.Forest.Maroc.12. pp. 9-176.
- HILLEL D., (1974),** L'eau et le sol : principes et processus physique (Soil and water physical principales and processus). Dépt of soil science the Hebrew university of Jérusalem. Rehovot. Israël (traduit par Louis. W de Backer. U.C.L. Belgique. 390p.
- HORTON, R.E., (1932),** Drainage-Basin Characteristics. Transactions: American Geophysical Union, 13, pp. 348-352.
- HORTON, R.E., (1945),** Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology. Bulletin of the Geological Society of America 56, pp275-370.
- IMESON.A.C., (1983),** Studies of erosion Thresholds.In semi-arid areas. Field measurement of soil loss and infiltration in northern Morocco. CATENA.Supplemnet.4 pp79-88.
- IMESON.A.C., VERSTRATEN.JM. (1988),** Rills on badlands slopes: a physico-chemically controlled phenomenon. CATENA. Supplement 12 pp139-150.
- IMESON.A.C., VERSTRATEN.JM. (1989),** The microaggregation and erodibility of some semi-aride and mediterranean soils. CATENA. Supplemnet.14 pp 11-25.
- JOERIN F., (1998),** Décider sur le territoire : Proposition d'une approche par utilisation de SIG et de méthode d'analyse multicritère. Thèse de Doctorat de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne. 221 p.
- KOWALSKI PH. , TAOUS A., WEISROCK A., (1990),** Etude morphosédimentaire du remblaiement de fond de vallée de la Meurthe à Sainte - Marguerite (Vosges) : comparaison avec la Moselle à Chavelot (Vosges) et premiers enseignements. Rev. Géogr. Est. XXX, 1, p. 19-36.
- KREIS. N., (2004),** Modélisation des crues des rivières de moyenne montagne pour la gestion intégrée du risque inondation : Application à la vallée de Thur (Haut-Rhin), Thèse de doctorat, spécialité Science de l'eau, ENGREF, CEVH/ENGES, 268 p. + annexes.
- KUENEN H., (1956),** Experimental abrasion of pebbles. 2: rolling by current. J. Geol., LXIV, pp 336-368.

- KUICHLING E., (1889)**, The relation between the rainfall and the discharge of sewers in populous districts, ASCE, 20, pp 1-60.
- KUKLA G., (1977)**, Pleistocene land - Sea correlations. I. Europe. Earth Science Reviews, 13 14, pp 307-374.
- LABORDE J P., (1982)**, Eléments d'hydrologie de surface. T II : critique et analyse statistique des données hydrologiques. Inst . Nat. polytechnique de Lorraine, 223 p.
- LABORDE .J.P. (2000)**, Elément l'hydrologie de surface. . Equipe "Gestion et Valorisation de l'Environnement"Université de Nice - Sophia Antipolis. Édition 2000, pp 66-82.
- LAMA S., (1993)**, Hidrología General. Edición espanola, Servicio Editorial Universidad del País Vasco, 635 p.
- LASRI M., (2015)**, Les inondations menaçant l'agglomération de Fès : De l'étude hydrologique et du risque à la cartographie des dangers d'inondation, 268p.
- LAYAN B., (2008)**, Hydrologie, Modélisation hydraulique et gestion du risque d'inondation dans le bassin versant de l'Oued Larbaâ, Cas de Sebt Boukellal (Maroc, Taza) Faculté des Sciences Dhar El Mahrez. Mémoire du Master. 88p.
- LAYAN B., (2014)**, Délimitation des crues de projet, modélisation hydraulique et gestion du risque d'inondation dans le bassin versant de l'Oued Larbaâ.cas de la ville de TAZA (MAROC).Faculté des Sciences Dhar El Mahrez. Thèse Doct. 170p.
- LEBLANC D. L.B., WOLMAN. M. G., (1957)**, River channel patterns-braided, meandering and straight. U.S. Geological Survey Professional paper, 282B, pp. 39 - 85.
- LEBLANC D., (1975-1979)**, Étude géologique du Rif externe oriental au Nord de Taza (Maroc). Thèse de Doctorat. Université Paul Sabatier, Toulouse ; Note et Mém. Serv. Géol. Maroc, N° 281, 160 pp.
- LEOPOLD. L.B., WOLMAN. M.C., MILLER. J.P., (1964)**, Fluvial processes in geomorphology. San Francisco, W.H. Freeman and Co., 522 p.
- LOUKILIL., (2006)**, Intérêt de la carte D'aptitude des terres dans la lutte anti-erosive.Par La drsfruitiere. "Cas de l'amandier Dans Le Cercle D'Aknoul. MAROC, Rif Oriental". Revue HTE N°133. Pp.50-54.
- MAIAL A.D., (1977)**, A review of the braided river depositionnal environment.Earth Sc.Rev, Amsterdam, 13, p.1-62.
- MAIAL A.D., (1982)**, Analysis of fluvial depositional systems. Amer. Assoc. Petroleum Geol. Educ. Course, 20, 75 p.
- MAIAL A.D., (1985)**, Archetectural element analysis: a new method of facies analysis applied to fluvial deposits. Earth Sci. Rev, 22, pp. 261-308.

- MAIAL A.D., (1996)**, The geology of fluvial deposits: sedimentary facies, basin analysis and petroleum geology. Springer - Verlag, Berlin, Heidelberg, New York .582 p. Ministère de l'environnement canadien, 2002. Htt: //www.gemswater.org/atlas-gwa/solids f.html.
- MAKHLOUF Z ., (1994)**, compléments sur le modèle pluie-débit GR4J et essai d'estimation de ses paramètre. Thèse de doctorat, Université paris sud, laboratoire d'hydrologie et de géochimie isotopique orsay.434p.
- MARCAIS. J., SUTER.G.,(1957)**, La région rifaine.Instroductio géologique sur la chaine du Rif et son Avant-pays. Notes marocaines. (Soc. Géogr. Maroc) n° 9-10 pp5-12.
- MASSON M., (1983)**, Essai de cartographie des champs d'inondation par photointerprétation. Rapport CETE Aix en Provence – STU, 47 p.
- MASSON M., GARRY G., BALLAIS J.-L., (1996)**, Cartographie des zones inondables. Approche hydrogéomorphologique. Ministère de l'Equipement, Ministère de l'Environnement, Editions Villes et Territoires, Paris, 100 p.
- MATHIEU J., MICHELS L., BACOU M., GARRY G., RENNE M, (2007)**, l'approche hydrogéomorphologique en milieux méditerranées, une méthode de détermination des zones inondables. L'initiative de la DIREN.66p.
- MICHEL P., (1973)**, Les bassins des fleuves Sénégal et Gambie : étude géomorphologique. 3, 383 + 571 p. + 1 vol. De cartes. (Mémoires ORSTOM ; 63). Th. : Géomorphol. : Strasbourg : 1969, 571p.
- MIRAMONT C., GUILBET X., (1997)**, Variations historiques de la fréquence des crues et évolution de la morphogenèse fluviale en Moyenne Durance (France du sud - est). Géomorphologie : reliefs, processus et environnement, 4, pp. 235-338.
- MIRAMONT C. JORDA M. et PICHARD G., (1998)**, Evolution historique de la morphogenèse et de la dynamique fluviale d'une rivière méditerranéenne : l'exemple de la Moyenne Durance (France du sud - est). Géographie physique et Quaternaire, 52, 3, pp. 1-13.
- MONTANE A., (2014)**, L'approche hydrogéomorphologie : pratique, valorisation et développement d'une méthode de cartographie des zones inondables. 283p.
- MOSLEY MP., (1987)**, The classification and characterization of rivers. River channels, environment and process. K. Richards ed, Basil Blackwell. , Oxford, p. 295-320.
- MULVANEY. T. J, (1851)**. On the Use of self-registering rain and flood gauges in making observations on the relation on rainfall and of flood discharges in a given catchment, Institution of Civil Engineers, Ireland, 4(2), 18-31.
- MUSSOT P., (1982)**, Perte de poids de galets par usure mécanique au cours d'un transport : l'exemple de la Lentilla, rivière torrentielle (Pyrénées orientales, France). Physio - Géol. 4, p. 49-59.
- MUSY, A. AND SOUTTER M., (1991)**, Physique du sol. CH-1015 Lausanne, collection META. 120p.

- MUSY, A., (2005)**, Cours d'hydrologie générale. Laboratoire d'hydrologie et Aménagements (HYDRAM), Institut des Sciences et Technologies de l'Environnement (ISTE), Ecole Polytechnique Fédérale (EPFL).
- NANSON G.C., CROKE J.C., (1992)**, A genetic classification of floodplains. *Geomorphology*, n° 4, pp. 459-486.
- NANSON G.C., TOOTH S., KNIGHTON A.D., (2002)**, A Global Perspective on Dryland Rivers: Perceptions, Misconceptions and Distinctions. In: *Dryland Rivers. Hydrology and Geomorphology of Semi-Arid Channels*, L.J. BULL et M.J. KIRKBY Edit. Édit. John WILEY and Sons, Chichester, pp. 17-54.
- NEJJARI A., EL GHACHI M., (2016)**, Cartographie des limites inondables par l'approche hydrogéomorphologique : Cas de la vallée du Sânon (Lorraine, France). *Géomorphologie*, n° 1 pp 16-30.
- OBDA. K, et AL., (2006)**, Pressions et Equilibres des Hydrosystèmes de vallées en Milieux semi-arides Pré-Rifains et Moyen Atlasiques (Maroc) : cas dans le bassin du Sebou, Faculté des Lettres et des Sciences Humaines Saïs, Laboratoire LAGEA, FES, Maroc.
- ORSTROM., (1971)**, La planification du réseau hydrométrique minimal [Revue]. - [s.l.]: ORSTROM., - 2 : Vol. VIII.
- ORSTOM., (1976)**, Hydrologie du bassin de Tensift [Report]. - Rabat : ORSTOM Fanas Documentaire, - 240p.
- OUARDA T.BM, GINGRAS H. BOBEE B, LEMONIER, M., (2001)**, synthèse des méthodes simples de régionalisation [Rapport] : rapport de recherche. - Québec : INRS-Eau, 70p.
- PIÉGAY H., (1995)**, Dynamiques et gestion de la ripisylve de cinq cours d'eau à charge grossière du bassin du Rhône (l'Ain, l'Ardèche, le Giffre, l'Ouvèze et l'Ubaye). XIXe-XXe siècles. Thèse de l'Université Paris IV, 529 p.
- PIÉGAY H., STROFFEK S., (2000)**, La gestion physique des rivières dans le bassin Rhône- Méditerranée-Corse : des extrêmes... au milieu. In : *Les régions françaises face aux extrêmes hydrologique. Gestion des excès et de la pénurie*, sous la direction de J.P. BRAVARD, Édit. SEDES, Paris, pp. 247-274.
- PIÉGAY H., ARNAUD D., SOUCHON Y., (2003)**, Effets de la végétation riveraine sur la géométrie des lits fluviaux : études de cas dans le Massif Central (France). *Géomorphologie*, n° 2, pp. 111-128.
- RAYNAL R., (1961)**, Plaine et piémonts du bassin de la Moulouya (Maroc oriental). Etude géomorphologique. Thèse Doct. Etat, Paris, 617 p.
- RAYNAL J.P., TEXIER J.P., LEFEVRE D., (1986)**, Essai de corrélation de l'océan au continent pour le Quaternaire du Maroc. *Rev. Géol. Dyn. Géogr. Phy.*, 2, pp. 141-157.
- REINECK H.E., SINGH I.B., (1986)**, Depositional sedimentary environments. 2e Ed, 551p.

- REMENIERAS G., (1986)**, L'hydrologie de l'ingénieur. Collection de la direction des études et recherches d'électricité de France, Eyrolles, 2e éd, 456 p.
- RISER J., (1999)**, Géographie physique de l'Afrique occidentale et centrale. Ellipses éd. Paris, 160p.
- RITTER D.F., KOCHER R.C., MILLER J.R., (1995)**, Process Geomorphology 3e ed. Brown communications, USA, 546 p.
- RITTER Jb, et al., (1993)**, Quaternary evolution of Cedar Creek alluvial fan, Montana. Geomorphology, 8, pp. 287-304.
- RIVIERE A., (1977)**, Méthodes granulométriques. Techniques et interprétations .Masson éd. Paris, 170 p.
- ROGNON P., (1984)**, Signification dynamique et climatique des formations et terrasses fluviales en Afrique du Nord et au proche orient. Bull. Ass. Fr. Et. Quat. , 1-2-3, pp. 161-169.
- ROCHE. M., (1963)**, Hydrologie de surface, Gauthier - Villars Editeur, Paris. 430p.
- ROOSE. E., (1971)**, Notes techniques concernant l'érosion hydrique au Maroc. Bull. liaison. Ing . Forest. Maroc 6, pp 47-52.
- ROOSE. E., (1977)**, **Erosion** et ruissellement en Afrique de l'Ouest : vingt années de mesures en petites parcelles expérimentales. Paris. ORSTOM 1977.108 p.
- ROOSE. E., (1981)**, La dynamique actuelle des sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux d'Afrique occidentale. Etude expérimentale des transferts hydrologiques et biologiques de matière, sous végétations naturelles ou cultivées. Trav . Et Doc. De l'ORSTOM. N ° 130. Paris. 568p.
- ROUX A.L., (1982)**, Cartographie polythématique appliquée à la gestion écologique des eaux. Etude d'un hydrosystème fluvial : le Haut - Rhône français. CNRS éd, Centre Régional. Publ. Lyon, 116 p.
- ROUX. H., (2004)**, Estimation de paramètres en hydraulique fluviale, à partir de données caractéristiques de l'imagerie aérienne, Thèse de doctorat, spécialité Science de la terre et environnement, INP Toulouse, IMFT.300p.
- RUELLAN A., (1971)**, Contribution à la connaissance des sols des régions méditerranéennes les sols à profil calcaire différencié des plaines de la basse Moulouya (Maroc oriental). Trav. Doc. ORSTOM, Paris, 54, 302 p.
- RUST B.R. , (1972)**, Structure and process in a braided river. Sedimentology, 18, p. 221-245.
- RUST B.R., (1978)**, Depositional models for braided alluvium. In: Miall A.D. ed: Fluvial sedimentology. Mem. Canad. Soc. Petroleum Geol, 5, pp. 605-625.
- SCHIRMER W., (1980)**, Sedimentological aspects of the valley fill. Bull. Ass. Fr. Et. Quat. , 3. pp. 101-405.
- SCHELMANN.G., (1993)**, La structure géomorphologique et géologique des fonds de vallées dans les domaines subalpin et hercynien d'Allemagne. Rev. Géogr. Est, 4.pp. 235-259.

- SCHIRMER W., (1990)**, Rheingeschichte zwischen Mosel und Maas. Deutsche Quartärvereinigung , Hannover , 295 p .
- **SCHMITT. L., MAIRE.G, HUMBERT.J., (2001)**, La puissance fluviale : définition, intérêt et limites pour une typologie hydrogéomorphologique de rivières. Zeitschrift für Geomorphologie, 45, 2, pp. 201 - 224.
- SCHNOBB.J., (2010)**, Hydraulique, dynamique et morphologie fluviale, Université du Québec à Chicoutim, n°38P.146p.
- SCHREVE RI., (1967)**, Infinite topologically random channel networks. Journal of geology, 75, pp.178-186.
- SCHUMM S A., (1968)**, River adjustment to altered hydrologic regimen - Murrumbidgee River and paleochannels, Australia. US Geol. Surv. Prof. 72p.
- SCHUMM S. A., (1969)**, River metamorphosis. J. Hydr. Div. Am. Soc. Civil Eng, 95, pp.255-273.
- SCHUMM S A., KHAN H.R., (1972)**, Experimental study of channel patterns. Geol. Soc. Am. Bull. , 83, pp. 1755-1770.
- SCHUMM.S A., (1977)**, The fluvial system. Édit. John WILEY and Sons, New York, 338 p.
- SCHUMM S A., (1977)**, The fluvial system. J. Wiley edit, 338 p.
- SCHUMM S A., (1981)**, Evolution and response of the fluvial system, sedimentologic implications. Soc. Econ. Paleontol. Spec. Pub. , 31, pp.19-29.
- SCHUMM S A., (1993)**, River response to baselevel change implications for sequence stratigraphy. J. Geol, 101. pp. 279-294.
- SEBLY M.J., (1985)**, Earth's changing surface. Clarendon press, Oxford, 607p.
- SERHIR N., (2010)**, Cours Hydrologie de L'ingénieur [Rapport]. - Casablanca : EHTP,
- STRAHLER, A. N., (1952)**, Quantitative analyses of watershed geomorphology. American geophysical union transaction, 38, pp. 913-920.
- STRAHLER, A. N., (1964)**, Quantitative geomorphology of drainage basins and channel networks. In Chow, V.T. (ed.) Handbook of Applied Hydrology, McGraw-Hill, New York. pp 439-476.
- SUTER.G., (1965)**, La région du moyen Ouerrha (Rif, Maroc) : étude préliminaire sur la stratigraphie et la tectonique. Notes,serv. Géol.Maroc, t24, n°183 pp7 -17.
- TAOUS A., (1988)**, Contribution à l'étude des nappes alluviales de la Moselle Pérographie et altération des galets de la nappe de Vincey DEA. LGP. Univ. Nancy II, 56 p.
- TAOUS A., (1989)**, La moyenne terrasse de la Moselle à Golbey : Essai de reconstitution du palcoenvironnement. Rapport ser le chantier de prespection archéologique N.S.J. DAHPL, Metz, 30p.

- TAOUS.A., (1994)**, Le système de la «moyenne terrasse» de la Moselle en Lorraine méridionale (Approche morphosédimentaire et pétrographique), Thèse de doctorat, Nancy, n° 201p.
- TAOUS A, AMYAY M., (2000)**, Alluvionnement et paléoc environnement fluvial tensiftien du Sebou dans le Sais oriental. Almisbahya, Série sciences humaines. 5. pp. 56-74.
- TAOUS A, TRI BAK A, LAAOUANE, M, AKDIM B., (2004)**, Impacte des cônes sur le fonctionnement hydrodynamique et morpho sédimentaire actuel des fonts de vallées prérifaines : Cas de l'Oued Larbaâ (Maroc), pp 17-28.
- TAOUS.A., (2005)**. Géomorphodynamique fluviale. Série Thèse et Monographies, Faculté des Lettres et de Sciences Humaine, Sais Fès, 425p.
- TAOUS A., ET AL., (2010)**, Cartographie et zonage de l'aléa d'inondation à Taza (Maroc). Application de la méthode de la « méthode géomorphologique intégrée ». Geomaghreb n°6, pp 1-19.
- TAOUS A., (2011)**, Inondation dans le bassin du Haut Inaouène (région de Taza) : présentation, genèse, et approche cartographique, séminaire international, université de Rouen, France.
- TEXIER J. P., (1979)**, Recherche sur les formations superficielles du bassin de l'Isle, Thèse d'état Bordeaux I.T1 447, T.2 Illustrations. 312p.
- TEXIER J.P., RAYNAL J.P., (1984)**, Les dépôts et terrasses d'Aquitaine et du bassin de l'Allier. Bull. Ass. Fr. Et. Quat, 1-2-3, pp. 67-71.
- TEXIER J.P., RAYNAL J.P., LEFEVRE D., (1985)**, Nouvelles propositions pour un cadre chronologique raisonné du Quaternaire marocain. C.R. Acad. Sci. Paris, 3. pp. 183-188.
- TEXIER J.P., RAYNAL J.P., LEFEVRE D., (1986)**, Essai de chronologie du Quaternaire marocain. Bull. Archéol . Marocaine, Rabat, XVI, pp. 11-26.
- TEXIER J.P., RAYNAL J.P., LEFEVRE D., (1994)**, Contribution pour un nouveau cadre stratigraphique des formations littorales quaternaires de la région de Casablanca, Maroc, C.R. Acad. Sci. , Paris, 318, II, p.1247-1253.
- TRIBAK A. (2000)**, L'érosion hydrique en moyenne montagne du Prérif oriental (Maroc) étude des agents et des processus d'érosion dans une zone de mares tertiaires. Thèse Doct. Etat, El Jadida, 351p.
- TRICAT J., (1949)**, Méthodes d'étude des terrasses. Bull. Soc. Géol. Fr., XVII, pp. 559-575.
- TRICAT J., (1952)**, La partie orientale du Bassin de Paris. Sedes éd., Paris, 474p.
- TRICAT J., (1958)**, Etude sur quelques cailloutis fluviaux actuels des Pyrénées orientales et du Massif central. Zeitschr. f. Geomorph. , II. pp. 278-304.
- TRICAT J., (1961)**, Observations sur le charriage des matériaux grossiers par les eaux. Courantes. Rev. Géom. Dyn. 12, pp. 3-15.

- TRICAT J., CAILLEUX A., (1963)**, Initiation à l'étude des sables et des galets. C.D.U. éd. Paris, 376p.
- **TRICART J, (1965)**, Principe et méthode de la géomorphologie. Masson & Cie éd. Paris. 496p.
- TSSIER D., (1994)**, Rôle de l'eau sur les propriétés physiques des sols. Sécheresse Vol 5 N ° 3 pp 143-150.
- UMRIKAR, B.N., MAGGIRWAR B.C., (2013)**, Characterisation of the Aquifers for Resource Management and Protection. International Journal of Multidisciplinary and Current Research, ISSN (print/online): 2321-3124, URL/DOI.pp.244-249.
- UMRIKAR, B. N., (2016)**, Morphometric analysis of Andhale watershed, Taluka Mulshi, District Pune, India. Applied Water Science, 7, pp. 231-243.
- UNESCO-OMM., (1992)**, Glossaire international d'hydrologie [En ligne]. - L'école des mines de Paris, - www.webworld.unesco.org, 244-249.
- VIDAL J.C., (1971)**, une interprétation nouvelle des nappes du Prérif central (Maroc) et ses conséquences sur la structure de leur substratum autochtone.C.R.Acad.Sc, Paris, t.272, série D. pp24-27.
- VIRGINEi DELORME-LAURENT., (2007)**, Contribution à la méthode hydrogéomorphologique de détermination des zones inondables, 437p.
- WILDI W., (1981)**, Le Ferrysch: Cône de sédimentation détritique en eau profonde à la bordure Nord-Ouest de l'Afrique au Jurassique moyen à supérieur (Rif externe, Maroc). Eelegae geol.Helv, n°74/2, 12 fig., pp. 481-527.
- WILDI W., (1983)**, La chaîne tello-rifaine (Algérie, Maroc, Tunisie): structure, stratigraphie et évolution du Trias au Miocène. Revue de géologie dynamique et de géographie physique 24, vol. 3, Paris, France, pp. 201-297.
- ZEBIRI.A., (1994)**, Evaluation du risque d'inondation à Constantine : méthodologie d'approche. Méditerranée, 3.4, p. 23-30.

REFERENCES DES BIBLIOGRAPHIQUES EN ARABES :

- الحافظ إدريس (2006): نشأة وتدبير الأخطار الهيدرولوجية داخل المدارات الحضرية: حالة وجدة وبركان والسعيدية (المغرب الشرقي)، أطروحة لنيل الدكتوراه، كلية الآداب سايس فاس، 315ص.
- فطاس حميد (2014): الفيضانات بحوض واد لحضر-إقليم تازة-النمذجة الهيدروليكية لحد امسيلة، بحث لنيل شهادة الماستر، كلية الاداب والعلوم الإنسانية الجديدة، 115ص.

REFERENCES DES ADMINISTRATIONS :

- Agence urbaine de TAZA,
- Agence du bassin hydraulique de Sebou,
- Agence Nationale des Eaux et forêts, TAZA,
- Directions Régionales de l'Agriculture - Fès-Meknès, TAZA,
- Les communes rurales de Had Msila et Meknassa El Gharbiya,

REFERENCES DES CARTES :

- Les cartes topographiques de Had Msila (1/25000), Meknassa El Gharbiya (1/25000) et Bab El Mrouj (1/50000).
- Les cartes topographique de Aknoul (1/50 000), Ain Boukellal (1/50 000), Taineste (1/50 000), Bni Frassene (1/50 000), Taza (1/50 000),
- Les cartes géologique (1/50 000),
- Les imageries satellitaires du BV (Google Earth Pro),

REFERENCES DES SITES WEB :

- <https://www.geojamal.com/2014/04/cartes-topographiques-maroc-50000.html>.
- <https://www.geojamal.com/2014/11/telecharger-les-cartes-geologiques-du-maroc.html>.
- <https://sites.google.com/site/pastoraldz/cartographie-gps/telecharger-des-images-satellites-haute-resolution>.

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE 1 :

Fig. 1. 1-Localisation du bassin versant de l'Oued Lahdar.	14
Fig. 1. 2- Répartition des précipitations annuelles dans la station de Bab Echhoub (1992/1993-2013/2014).	16
Fig. 1. 3 - Répartition des précipitations annuelles dans la station de Had Msila (1975/1976-2017/2018).	17
Fig. 1. 4 - L'écart à la moyenne des précipitations annuelle dans la station de Bab Echhoub (1992-2014).	17
Fig. 1. 5 - L'écart à la moyenne des précipitations annuelle dans la station de Had Msila (1975/1976-2017/2018).	18
Fig. 1. 6 - Moyenne mensuelles des précipitations à la station de Bab Echhoub (1992/1993-2013/2014).	19
Fig. 1. 7 - Moyenne mensuelles des précipitations à la station de Had Msila (1975/1976-2017/2018).	19
Fig. 1. 8 - Répartition saisonnière des précipitations annuelles.....	20
Fig. 1. 9 - Répartition saisonnière des précipitations annuelles.....	21
Fig. 1. 10 - Diagramme ombrothermique Gaussen de la station de Taza période 1990 – 2013.	23
Fig. 1. 11 - Répartition du couvert végétal et l'occupation du sol dans le bassin versant de Lahdar (D'après la carte du couvert végétal et l'occupation de sol de Taza.1/250000)...	25
Fig. 1. 12 - Carte des unités structurales de bassin versant de l'Oued Lahdar.....	27
Fig. 1. 13 - Coupes dans des unités de type « Tsoul » (d'après Leblanc : 1975).....	28
Fig. 1. 14 - Coupe dans des unités de type « Nappe de Bou-Haddoud ».....	30
Fig. 1. 15 - Carte lithologique du bassin versant de l'Oued Lahdar.....	31
Fig. 1. 16 - Répartition de la lithologie dans le BV de l'Oued Lahdar en (%).....	32
Fig. 1. 17 - Carte des sols dans le bassin versant.....	33
Fig. 1. 18 - répartition des types de sols en (%) dans la zone d'étude.	34
Fig. 1. 19 - Carte des densités de la population	39
Fig. 1. 20 - Carte des densités de la population	39
Fig. 1. 21 - Carte des densités de la population	39
Fig. 1. 22 - Carte des densités de la population	39
Fig. 1. 23- Répartition de la croissance annuelle des populations.....	40
Fig. 1. 24- Carte d'occupation du sol dans le BV de l'Oued Lahdar.	42
Fig. 1. 25- Répartition des différentes variables d'occupation dans le BV de l'Oued Lahdar.	43

CHAPITRE 2 :

Fig. 2. 1 - Carte des sous-bassins versants de l'Oued Lahdar.....	50
Fig. 2. 2 - Rectangle équivalent du bassin versant de l'Oued Lahdar.....	53
Fig. 2. 3 - Modèle numérique du terrain du bassin versant de de l'Oued Lahdar.	54
Fig. 2. 4 - Tranches d'altitudes du bassin versant de l'Oued Lahdar.....	55
Fig. 2. 5 - Courbe hypsométrique du bassin versant d'Oued Lahdar.....	57
Fig. 2. 6 - Etat de maturité du relief du bassin versant.	57
Fig. 2. 7 - Carte de pente du bassin versant de l'Oued Lahdar.	61
Fig. 2. 8 - Profil en long de l'Oued Lahdar et différents sous bassins versants de l'Oued Lahdar.	63
Fig. 2. 9 - Hiérarchisation du réseau hydrographique du bassin versant de l'Oued Lahdar.	64

CHAPITRE 3

Fig.3. 1 - Variabilité interannuelle des débits moyens annuels de l'Oued Lahdar.....	73
Fig.3. 2 - Variations des écarts des débits moyens annuels au débit moyen interannuel dans la station de Bab Echhoub (Période 1987/1988-2010/2011).	74
Fig.3. 3 - Variabilité interannuelle des coefficients d'hydraulicité de l'Oued Lahdar.....	75
Fig.3. 4 - Coefficient annuelle des débits à l'O. Lahdar à Bab Echhoub.	76
Fig.3. 5 - Années caractéristiques de l'O. Lahdar à Bab Echhoub.	77
Fig.3. 6 - Régime saisonnier de l'année humide (2009-20010) de l'O. Lahdar à Bab Echhoub.	78
Fig.3. 7 - Régime saisonnier de l'année sèche (1999/2000) de l'O. Lahdar à Bab Echhoub.	79
Fig.3. 8 - Régime saisonnier de l'année médiane (2002/2003) de l'O. Lahdar à Bab Echhoub.	80
Fig.3. 9 - Variabilité interannuelle des Débits saisonniers de l'O. Lahdar à Bab Echhoub.	80
Fig.3. 10 - Débits mensuels de l'O. Lahdar à Bab Echhoub.	81
Fig.3. 11 - Variations interannuelles des débits mensuels de l'Oued. Lahdar.....	82
Fig.3. 12 - Répartition des débits journaliers de l'Oued Lahdar au cours de l'année humide (2009-10).	83
Fig.3. 13 - Répartition des débits journaliers de l'O. Lahdar au cours de l'année sèche (1999/2000).	84
Fig.3. 14 - Répartition des débits journaliers de l'O. Lahdar au cours de l'année moyenne (2002/2003).	84

Fig.3. 15 - Ajustement des débits journaliers maximums d'Oued Lahdar par la loi de Gumbel.	86
Fig.3. 16 - Ajustement graphiquement de la série des débits maxima à la loi de Gamma.	87
Fig.3. 17 - Corrélation précipitations – débits à la station Bab Echhoub.....	88
Fig.3. 18 - Corrélation précipitations – débits saisonniers à la station Bab Echhoub.	89
Fig.3. 19 - Corrélation pluies- coefficient d'écoulement à la station Bab Echhoub.	90
Fig.3. 20 - Courbes IDF pour la station de Taza.	92
Fig.3. 21 - Ajustement des pluies journalières maximales par la loi de Gumbel.	98
Fig.3. 22 - Hydrogramme de crue simplifié.....	101
CHAPITRE 4 :	
Fig. 4. 1 - Localisation des secteurs à modéliser.	113
Fig. 4. 2 - Image Satellitaire de secteur de Had Msila, tronçon 1.	115
Fig. 4. 3 - Image Satellitaire de secteur du Had Msila, tronçon 2.	115
Fig. 4. 4 - Image Satellitaire de secteur de Bni Ftah.....	116
Fig. 4. 5 - Conservation de la charge entre deux sections (USACE, b, 2010).....	120
Fig. 4. 6 - Découpage de la section pour le calcul du frottement (USACE, b, 2010).	121
Fig. 4. 7 - Volume de contrôle élémentaire pour la dérivation des équations.....	122
Fig. 4. 8 - Cellule typique de calcul par la méthode des différences finies.....	123
Fig. 4. 9 - la géométrie de la zone d'étude développée par Hec-GEORAS sous ArcGIS. niveau du Centre Had Msila.	124
Fig. 4. 10 - Géométrie de la zone d'étude développée par Hec-GEORAS sous ArcGIS au niveau du Centre Bni Ftah.....	125
Fig. 4. 11 - Exemple d'interpolation entre deux profils consécutifs, à Had Msila.	126
Fig. 4. 12 - Situation des profils en travers dans les méandres.....	127
Fig. 4. 13 - Vitesse d'écoulement en fonction de la distance pour chaque période de retour (tronçon de Had Msila).	129
Fig. 4. 14 - Ligne d'eau du tronçon modélisé de l'Oued Dira.	130
Fig. 4. 15 - Courbes de tarage obtenu à partir de Hec-RAS d'Oued Lema.....	131
Fig. 4. 16 - Cote atteinte et la largeur mouillée par la crue décennale de l'Oued Lahdar.	132
Fig. 4. 17 - Cote atteinte et la largeur mouillée par la crue décennale de l'Oued Mized.	132
Fig. 4. 18 - Cote atteinte et la largeur mouillée par la crue vingtennale de l'Oued Lahdar.	133
Fig. 4. 19 - Cote atteinte et la largeur mouillée par la crue cinquantenale de l'Oued Rhnalla.	134

Fig. 4. 20 - Cote atteinte et largeur mouillée par la crue cinquantennale de l'Oued Dira.	134
Fig. 4. 21 - Cote atteinte et la largeur mouillée par la crue centennale de l'Oued Lahdar.	135
Fig. 4. 22 - Cote atteinte et la largeur mouillée par la crue millénaire de l'Oued Lahdar.	136
Fig. 4. 23 - Cote atteinte et la largeur mouillée par la crue millénaire d'Oued Bni Ftah.	136
Fig. 4. 24 - Carte des zones inondables de l'Oued Lahdar au niveau de l'amont de Centre Had Msila, pour différentes périodes de retour.	138
Fig. 4. 25 - Carte des zones inondables de l'Oued Lahdar au niveau de l'aval de Centre Had Msila, pour différentes périodes de retour.	139
Fig. 4. 26 - Carte des zones inondables de l'Oued Lahdar au niveau de Centre de Bni Ftah	140
Fig. 4. 27 - Carte des zones inondables de l'Oued Lahdar au niveau de Centre de Bni Ftah (tronçon 2), pour différentes périodes de retour.	141
Fig. 4. 28- Carte des zones inondables de l'Oued Lahdar au niveau de Centre de Bni Ftah (tronçon 3), pour différentes périodes de retour.	141
CHAPITRE 5 :	
Fig. 5. 1 - Evolution et anomalie de pente de le long de l'Oued Lahdar.	149
Fig. 5. 2 - Les principaux types de styles fluviaux (Miall, 1977).	151
Fig. 5. 3 - Principaux paramètres utilisés dans la caractérisation et le calcul de la sinuosité d'un cours d'eau, λ = longueur d'onde, A = amplitude, rm = rayon de courbure moyen, L = longueur du talweg, Is indice de sinuosité ($= L/\lambda$).	152
Fig. 5. 4 - Classification et caractérisation essentielles des styles fluviaux selon S.A Schumm(1981).	152
Fig. 5. 5 - Relation entre pente, sinuosité et types de chenaux (Schumm et Khan, 1972).	153
Fig. 5. 6 - Types des styles fluviaux à l'amont de bassin versant de l'Oued Lahdar.	155
Fig. 5. 7 - Types des styles fluviaux à la moyenne de bassin versant de l'Oued Lahdar.	156
Fig. 5. 8 - Types des styles fluviaux à l'aval de bassin versant de l'Oued Lahdar.	157
Fig. 5. 9 - Principaux types de réseaux hydrographiques (Howard, 1967 ; in Selby, 1985).	158
Fig. 5. 10 - Configuration des unités géomorphologiques de fond de vallée de l'Oued Lahdar section supérieure au niveau du Centre Bni Ftah (source de données : cartes géologique, cartes topographique, images Google Earth 2021 et travaux de terrain).	160
Fig. 5. 11 - Configuration des unités géomorphologiques de fond de vallée de l'Oued Lahdar à la section moyenne de Centre Had Msila.	161
Fig. 5. 12 - Coupe transversale du remplissage alluviale de la bande active dans vallée de l'Oued Lahdar (section inférieure, au niveau du Centre de Had Msila).	162

<i>Fig. 5. 13 - Configuration des unités géomorphologique du fond vallée d'Oued Lahdar à la section inférieure au niveau du Centre Meknassa Al Gharbiya, (source : cartes géologique, cartes topographique, images Google Earth 2021 et travaux de terrain).</i>	164
<i>Fig. 5. 14 - Coupe transversale du remplissage alluviale de la bande active dans vallée dans l'Oued Lahdar (section inférieure au niveau du Centre Meknassa El Gharbiya).....</i>	165
<i>Fig. 5. 15 - Bras mort de l'Oued Lahdar ou niveau de la station hydrologique de Bâb Echhoub (extrait de l'image Google Earth pro 2021).....</i>	171
<i>Fig. 5. 16 - Morphologie des barres alluviales du style à méandres de l'Oued Lahdar au Nord du BV. (à droite extrait d'une image Google Earth pro de 2021, à gauche un schéma simplifié des unités présentes sur l'image).</i>	174
<i>Fig. 5. 17 - Morphologie des barres alluviales du style anastomosé de l'Oued Lahdar au niveau de Centre Had Msila.</i>	175
<i>Fig. 5. 18 - Morphologie des barres alluviales du style en tresse de l'oued Lahdar dans la moyenne vallée, En dessous de Centre de Had Msila.</i>	177
<i>Fig. 5. 19 - Morphologie des barres alluviales du style rectiligne d'Oued Lahdar au niveau de la confluence avec l'Oued El Harrar, à gauche extrait d'une image Google Earth pro de 2020, à droite un schéma simplifié des unités présentes sur l'image.....</i>	178

CHAPITRE 6 :

<i>Fig. 6. 1 – Disposition relative des lits d'une plaine alluviale. [Ballais et al. 1997]</i>	193
<i>Fig. 6. 2 - Types des limites externes de plaine alluviale moderne constituées par un talus d'érosion (Jean-Louis Ballais ; 2017).</i>	195
<i>Fig. 6. 3 - Types de talus adoptés.</i>	210
<i>Fig. 6. 4 - Colluvions sur lit majeur (Masson, Garry, Ballais, 1996).</i>	212
<i>Fig. 6. 5 Cartographie hydrogéomorphologique des lits de la plaine alluviale de l'Oued Lahdar (tronçon 1, C. Bni Ftah amont du BV).</i>	218
<i>Fig. 6. 6 - Cartographie hydrogéomorphologique des lits de la plaine alluviale de l'Oued Lahdar (tronçon 2, C. Bni Ftah amont du BV).</i>	219
<i>Fig. 6. 7 - Cartographie hydrogéomorphologique des lits de la plaine alluviale de l'Oued Lahdar (tronçon 1, C. Had Msila au centre du BV).</i>	220
<i>Fig. 6. 8 - Cartographie hydrogéomorphologique des lits de la plaine alluviale de l'Oued Lahdar (tronçon 2, C. Had Msila au centre du BV).</i>	221
<i>Fig. 6. 9 - Cartographie hydrogéomorphologique des lits de la plaine alluviale de l'Oued Lahdar (tronçon 1, C. Meknassa El Gharbiya a l'aval du BV).</i>	223
<i>Fig. 6. 10 - Cartographie hydrogéomorphologique des lits de la plaine alluviale de l'Oued Lahdar (tronçon 2, C. Meknassa El Gharbiya a l'aval du BV).</i>	224
<i>Fig. 6. 11 - Carte de zonage de risque d'inondation de l'Oued Lahdar dans le secteur amont du BV.</i>	226
<i>Fig. 6. 12 - Carte de zonage de risque d'inondation de l'Oued Lahdar dans le secteur moyen du BV.....</i>	227

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE 1 :

Tabl. 1. 1 - Coordonnées et données annuelles des stations choisies.	15
Tabl. 1. 2 - Variations mensuelles des températures dans la station de Taza (1990-2013).	22
Tabl. 1. 3 - Variations mensuelles des températures dans la station de Taza (1990-2013).Composition granulométrique et minéralogique de la formation marneuse Source : Tribak.A (2000).	36
Tabl. 1. 4 - Evolution de la population et la densité démographique des communes dans le BV entre 1982 et 2014.	38

CHAPITRE 2 :

Tabl. 2. 1 - Indices de compacité pour sous-bassins versants du BV de l'Oued Lahdar.	51
Tabl. 2. 2 - Indice de circularité du bassin pour différents bassins versants de l'Oued Lahdar.	52
Tabl. 2. 3 - Indice de forme de Horton pour différents bassins versants de l'Oued Lahdar.	52
Tabl. 2. 4 - Répartition des surfaces en fonction des altitudes de bassins versants de l'Oued Lahdar.	56
Tabl. 2. 5 - Altitude moyenne de bassins versants de l'Oued Lahdar.....	58
Tabl. 2. 6 - Pentés moyennes des sous-bassins versants d'oued Lahdar.....	59
Tabl. 2. 7 - Classification ORSTOM du	60
Tabl. 2. 8 - Longueur du cours d'eau Principal des sous-bassins versants d'Oued Lahdar.	62
Tabl. 2. 9 - La densité du drainage des sous-bassins versants de l'Oued Lahdar....	65
Tabl. 2. 10 - La densité du hydrographiques des sous-bassins versants de l'Oued Lahdar.	66

CHAPITRE 3 :

Tabl. 3. 1 - Débits journalière maximums de l'Oued Lahdar selon la différente	87
Tabl. 3. 2 - Valeurs de a et b paramètres de Montana par récurrence de la ville de Taza.	93
Tabl. 3. 3 - Caractéristiques géométriques des sous-bassins versants de l'Oued Lahdar.	94
Tabl. 3. 4 - Temps de concentration en heures par les trois formules.....	95
Tabl. 3. 5 - Pluies maximales journalières annuelles (Pjmax) de la station de Had Msila.	97
Tabl. 3. 6 - Pluies maximales journalières annuelles (pjmax) de la station de Bab Echhoub.	97
Tabl. 3. 7 - Pluies journalières maximales et Pluies en 24 heures par période de retour.	98

Tabl. 3. 8 - Débits (Q T 10 ans m^3/s) calculés par la méthode du Gradex.....	99
Tabl. 3. 9 - Débits corrigés (Q T 10 ans m^3/s) par le coefficient d'influence m	100
Tabl. 3. 10 - Débits (Q T 10 ans m^3/s) et temps de concentration pour différents cours d'eau du bassin versant de l'Oued Lahdar.	100
Tabl. 3. 11 - Débits, lames d'eau ruisselées et volumes d'eau pour ($T=10$ ans).....	101
Tabl. 3. 12 - Débits, lames d'eau ruisselées et volumes d'eau pour différentes période de routeur.	102
Tabl. 3. 13 - Intensités, Coefficients de ruissellement et débits pour différentes période de retour.	104
Tabl. 3. 14 - Formules de Hazan-Lazarevic selon les régions du Maroc.	105
Tabl. 3. 15 - débit ($T=1000$ ans) pour différentes bassins versants par la méthode de Mallet-Gauthier.	105
Tabl. 3. 16 - débits pour différentes période de retour par la méthode de Mallet-Gauthier.	106
Tabl. 3. 17 - Valeurs du paramètre régional K de la formule de Mac-Math, (Serhir,2010 ;Ouarda et al., 2001).....	107
Tabl. 3. 18 - débits pour différentes période de retour par la méthode de Mac-Math.	107
Tabl. 3. 19 - débits pour différentes période de retour par la méthode de Fuller 2.	108
CHAPITRE 4 :	
Tabl. 4. 1 - Débits adoptés pour la simulation hydraulique.	127
CHAPITRE 5 :	
Tabl. 5. 1 - Classification des chenaux par leurs caractéristiques géométriques (RUST., 1978, in, TAOUS, 2005).	150
Tabl. 5. 2 - Caractéristiques principales des différents styles fluviaux (inspiré de Selby 19985 ; simplifie). I_s = indice de sinuosité, $Ch.f/Ch.t$ =rapport charge de fond /charge totale ; w/d rapport largeur/profondeur.	153
Tabl. 5. 3 - Variation (m) de l'extension latérale des lits dans la haute vallée de l'Oued Lahdar (Secteur de Bni Ftah).	183
Tabl. 5. 4 - Variation (m) de l'extension latérale des lits dans la moyenne vallée de l'Oued Lahdar (Secteur de Had Msila).	184
Tabl. 5. 5 - Variation(m) de l'extension latérale des lits dans la basse vallée de l'Oued Lahdar (Secteur de Meknassa El Gharbiya).	185

LISTE DES PHOTOS

CHAPITRE 4 :

<i>Photo 4. 1 - Situation de route R508 au niveau de méandre.</i>	132
<i>Photo 4. 2 - Situation du pont (x : 626, y : 433), à l'entrée de Centre de Bni Ftah.</i>	132
<i>Photo 4. 3 - Situation de route P5414.</i>	133
<i>Photo 4. 4 - Situation du Pont reliant Had Msila et la ville de Taza.</i>	134
<i>Photo 4. 5 - Situation du mur de soutènement de Souk Bni Ftah.</i>	134
<i>Photo 4. 6 - Situation du pont de mosquée.</i>	135
<i>Photo 4. 7 - Situation du mur de soutènement qui protège la route P5414.</i>	136
<i>Photo 4. 8 - Situation du collège qui situait près de la rive gauche d'Oued Bni Ftah.</i>	136

CHAPITRE 5 :

<i>Photo 5. 1 - Construction du nouveau souk hebdomadaire à la surface du lit 3 de l'Oued Lahdar</i>	162
<i>Photo 5. 2 – Impacte des remblais sur le changement du tracé de chenal de l'Oued Lahdar au niveau de C. Had Msila.</i>	163
<i>Photo 5. 3 - Aspect du faciès de chenal et des barres de l'oud Lahdar au niveau du C Meknassa.</i>	166
<i>Photo 5. 4 - Aspect du faciès de chenal et des barres de l'oud Lahdar au niveau du C Had Msila.</i>	166
<i>Photo 5. 5 - Aspect des faciès d'une barre de méandre proche de la station de Bab Echhoub.</i>	167
<i>Photo 5. 6- Aspect de la barre latérale au niveau du Centre de Msila.</i>	168
<i>Photo 5. 7- Barre longitudinale stabilisé par la végétation au niveau du Centre Meknassa EL Gharbiya.</i>	169
<i>Photo 5. 8- Dépôt des plaines d'inondation dans la basse vallée du BV.</i>	169
<i>Photo 5. 9- Dépôt de chenal et de plaine d'inondation de la moyenne vallée du bassin versant</i>	170
<i>Photo 5. 10- Dépôts de bas versant dans la HV de l'O Lahdar.</i>	172

CHAPITRE 6 :

<i>Photo 6. 1 - Morphologie et aspect des talus et des lits en rive gauche de l'Oued Lahdar au niveau de Meknassa El Gharbiya.</i>	195
<i>Photo 6. 2 - Dépôts du lit mineur de l'O Lahdar à Bni Ftah.</i>	196
<i>Photo 6. 3 - Dépôts de lit moyen au niveau de Meknassa El Gharbiya.</i>	197
<i>Photo 6. 4 - Dépôts fins d'une crue dans la plaine d'inondations au niveau de Meknassa El Gharbiya.</i>	197

Photo 6. 5 - Aspect de végétation dans le lit mineur au niveau de la C. de Meknassa El Gharbiya.	199
Photo 6. 6 - Aspect de végétation au niveau de lit moyen au milieu du BV.....	199
Photo 6. 7 - Aspect de l'exploitation intensive en agriculture des lit majeur à l'aval de la plaine alluviale de l'Oued Lahdar.	200
Photo 6. 8 - Aspect de ripisylve au bord d'une barre longitudinale a l'amont de C. Had Msila.	201
Photo 6. 9 - Aspect de digue influençant le fonctionnement naturel de l'O Lahdar à Had Msila.	202
Photo 6. 10 - Situation de rive droite de l'Oued Lahdar avant la construction de la digue.	203
Photo 6. 11- Situation de rive droite de l'Oued Lahdar après la construction de la digue.	203
Photo 6. 12 – Exploitation d'une carrière alluviaux dans la PA de l'Oued Lahdar à l'aval de C. Meknassa El Gharbiya.	204
Photo 6. 13 - Situation et état du pont de l'Oued Rhnalla (près de confluence de L'Oued Lahdar) reliant le sud et ouest du BV.	205
Photo 6. 14 - Protection de berge sur Oued El Khemis.	206
Photo 6. 15 - Morphologie et aspect des talus et des lits en rive gauche de l'Oued à l'amont de C. Had Msila.	208
Photo 6. 16 - Morphologie et aspect des talus et des lits en rive droite de l'Oued à l'amont de C. Had Msila.	208
Photo 6. 17 - Morphologie et aspect des talus et des lits en rive gauche de l'Oued à l'intermédiaire de C.R de Had Msila.	208
Photo 6. 18 - Morphologie et aspect des talus et des lits en rive droite de l'Oued à l'intermédiaire de C.R de Had Msila.	208
Photo 6. 19 - Morphologie et aspect des talus et des lits en rive gauche de l'Oued à l'aval de C R de Had Msila.....	209
Photo 6. 20 - Morphologie et aspect des talus et des lits en rive droite de l'Oued à l'aval de C R de Had Msila.	209
Photo 6. 21 - Morphologie et aspect des talus et des lits en rive gauche de l'Oued au niveau de Meknassa El Gharbiya.	209
Photo 6. 22 - Morphologie et aspect des talus et des lits en rive gauche de l'Oued au niveau de Meknassa El Gharbiya.	209
Photo 6. 23 - Morphologie et aspect des talus et des lits en rive gauche dans la plaine alluviale au niveau du C. Bni Ftah.	214
Photo 6. 24 - Aspects de la morphologie de la plaine Alluviale à l'amont du C. Bni Ftah.	214

<i>Photo 6. 25 - Mur de soutènement protège le route qui existant à l'intérieur de plaine alluviale au niveau de C.R Bni Ftah.....</i>	215
<i>Photo 6. 26 - Morphologie des talus de la plaine Alluviale à l'aval C. Had Msila.</i>	216

LISTE DE PLANCHE

CHAPITRE 4 :

<i>Planche 4. 1 - Photos montrant la situation de quelques sites au secteur de Bni Ftah.</i>	117
--	-----

Introduction générale	1
Première partie : Caractéristiques du bassin versant de l'O Lahdar	10
Introduction de la Première partie	11
CHAPITRE 1 : ANALYSE DES COMPOSANTES NATURELLES ET HUMAINES DU BASSIN VERSANT DE L'O LAHDAR	12
Introduction :	13
1 Localisation du bassin versant de l'Oued Lahdar :	13
2 Les facteurs climatiques du bassin versant de l'Oued Lahdar :	14
2.1 Les précipitations :	14
2.2 La température :	22
2.3 Le diagramme ombrothermique :	23
3 Le couvert végétal dans le Bassin versant de l'Oued lahdar :	24
4 Le contexte structural :	26
5 Les substrats :	31
6 Les sols :	34
6.1 La répartition des sols dans le BV de l'Oued Lahdar :	36
6.2 La capacité d'infiltration des sols :	37
7 Les caractéristiques humaines et l'occupation des sols dans le BV de l'Oued Lahdar :	39
7.1 L'impact du développement démographique et l'expansion de la population sur la dynamique de la zone :	40
7.2 L'occupation du sol :	46
7.2.3. Forêt	50
Conclusion :	51
CHAPITRE 2 : CARACTERISTIQUES MORPHOMETRIQUES DU BASSIN VERSANT DE L'O LAHDAR	52
Introduction	53
1 Les caractéristiques morphométriques du bassin versant de l'oued Lahdar :	54
1.1. Caractéristiques des formes :	54
1.1.1. Surface et périmètre du BV de l'Oued Lahdar :	54
2- Caractéristiques topographiques (Relief) :	59
2.1. Modèle Numérique de Terrain (MNT) :	59
2.2. Carte hypsométrique :	61

2-3- Courbe hypsométrique :	62
2-4- Les Altitudes	64
Altitude moyenne	64
2-5- Pente du bassin versant :	65
3 Caractéristiques du réseau hydrographique :	69
Conclusion :	75
Conclusion de la première partie	76
Deuxième partie : Hydrologie et modélisation hydraulique de l'Oued Lahdar	77
Introduction de la Deuxième partie :	78
CHAPITRE 3 : ETUDE DU REGIME HYDROLOGIQUE DE L'OUED LAHDAR ET L'ESTIMATION DES CRUES DE PROJET	79
Introduction :	80
1 Les variations temporelles des débits annuels :	80
2- Variabilité saisonnière des débits :	85
2.1 L'analyse du régime saisonnier de l'année humide (2009-2010) :	86
2.2 L'analyse du régime saisonnier d'une année sèche (1999/2000) :	87
2.3 L'analyse du régime saisonnier d'une année médiane (2002/2003) :	87
3 La variabilité interannuelle des débits saisonniers :	88
4 Variabilité mensuelle des débits :	89
4.1 La variabilité interannuelle des débits mensuels :	89
5 Variation naturelle des débits journaliers :	90
5.1 Année humide (2009-2010) :	90
5.2 L'année sèche (1999/2000) :	91
5.3 L'année moyenne (2002/2003) :	92
6 Analyse fréquentielle des débits journaliers maximaux :	93
6.1 Ajustement à la loi de Gumbel (méthode du maximum de vraisemblance) :	94
6.2 Ajustement à la loi de Gamma (méthode du maximum de vraisemblance) :	95
7 Corrélation précipitations/débits, précipitations /coefficient d'écoulement et précipitations /déficit :	96
7.1 Corrélation pluies –débits annuels :	96
7.2 Corrélation pluies/débits saisonniers :	97
7.3 Corrélation pluies/ coefficient d'écoulement :	97
8 Les différents types de modèles et loi d'ajustement :	99

9	<i>les parametres et Données climatiques disponibles :</i>	100
9.1	<i>Pluies journalières maximales annuelles :</i>	100
9.2	<i>Courbes Intensité-Durée-Fréquence :</i>	100
9.3	<i>Les paramètres de Montana relatifs à la station de Taza :</i>	100
10	<i>Présentation et application des méthodes adoptée pour la production des données :</i>	101
10.1	<i>Méthodes hydrométéorologiques :</i>	101
10.2	<i>Méthodes empiriques :</i>	112
	<i>Conclusion :</i>	117
CHAPITRE 4 : MODELISATION HYDRAULIQUE ET CARTOGRAPHIE DES ZONES INONDABLES		119
	<i>Introduction :</i>	120
1	<i>Selection des sections modélisation hydraulique :</i>	121
1.1	<i>Secteur de Had Msila :</i>	122
1.2	<i>Secteur de Bni Ftah :</i>	123
2	<i>Description des logiciels utilisés et du matériel expérimental :</i>	126
5.2.4.	<i>Hec-GéoRAS :</i>	126
5.2.5.	<i>ArcGIS :</i>	127
5.2.6.	<i>Hec-RAS :</i>	127
3	<i>Physique d'un modèle hydraulique : les équations à résoudre :</i>	127
3.1	<i>Régime permanent :</i>	127
3.2	<i>Régime transitoire :</i>	129
4	<i>Réalisation du modèle hydraulique de la zone d'étude :</i>	131
4.1	<i>Etude topographique :</i>	131
4.2	<i>Création et extraction des données topographiques pour l' Hec-RAS :</i>	131
4.2.1.	<i>L'interpolation entre les profils transversaux :</i>	133
4.2.2.	<i>Coefficients de rugosité :</i>	134
4.2.3.	<i>Problèmes rencontrés lors de la construction géométrique.....</i>	134
4.2.4.	<i>Débits et conditions limites :</i>	135
5	<i>Simulation hydraulique au niveau des secteurs modélisés :</i>	136
5.1	<i>Visualisation et discussion des résultats :</i>	136
5.1.1.	<i>Analyse des Vitesses d'écoulement :</i>	136
5.1.2.	<i>Ligne d'eau :</i>	137
5.1.3.	<i>Restitution de la courbe de tarage :</i>	138

5.2	Détermination des sites en danger par les crues de projet :	139
5.2.1.	Crue décennale :	139
5.2.2.	Crue vingtennale :	141
5.2.3.	Crue cinquantennale :	141
5.2.7.	Crues centennale et millénaire :	143
5.3	Cartographies des zones inondables dans les secteurs modélisés :	145
5.3.1.	Secteur de Had Msila :	145
5.3.2.	Secteur de Bni Ftah :	149
	Conclusion	153
	Conclusion de deuxième partie :	154
	Troisième partie : Dynamique fluviale et zonation du risque d'inondation de l'Oued Lahdar	155
	Introduction de la troisième partie	156
	CHAPITRE 5 : DYNAMIQUE DES CHENAUX ET DES LITS FLUVIAUX DE L'OUED LAHDAR	157
	Introduction :	158
1	Les styles du réseau hydrographique dans le bassin de l'Oued Lahdar :	158
1.1	Profil longitudinal :	158
1.2	Typologie des styles fluviaux :	161
1.3	Types des styles fluviaux de l'Oued Lahdar :	165
1.4	Caractérisation des styles du réseau hydrographique de l'Oued Lahdar :	169
2	Morphologie de fond de la vallée de l'Oued Lahdar :	170
2.1	Morphologie de la plaine alluviale dans la haute vallée de l'O Lahdar :	171
2.2	Morphologie de la plaine alluviale dans la moyenne vallée de l'O. Lahdar :	172
2.3	Morphologie de la plaine alluviale dans la basse vallée l'O. Lahdar :	174
3	Environnements et alluvions actuels dans la plaine d'Oued Lahdar :	176
3-1-	Dépôts des fonds des chenaux :	177
3-2-	Dépôts des Barres de méandre :	178
3-3-	Dépôts de barres des chenaux :	179
3-3-1.	Dépôts des barres latérales :	179
3-3-2.	Dépôts des barres longitudinales :	180
3-4-	Dépôts de plaine d'inondation :	180
3-5-	Dépôts de Bras mort :	182
3-6-	Dépôts de cônes de déjection :	183

3-7- Dépôts de bas versants :	183
4 Dynamique fluviale actuelle de l'Oued Lahdar :	184
4-1- L'évolution des styles fluviaux :	184
4-2- Les principales unités géomorphologiques de l'Oued Lahdar :	189
4-3- Variation de la largeur des lits de l'Oued Lahdar :	193
Conclusion :	196
CHAPITRE 6 : CARTOGRAPHIE HYDROGEOMORPHOLOGIQUE DES ZONES INONDABLES DE L'OUED LAHDAR ET ZONATION DU RISQUE D'INONDATION	
Introduction :	199
1 L'approche hydrogéomorphologique, une méthode de cartographie des zones inondables :	199
1.1 Définition de l'approche hydrogéomorphologique :	200
1.2 La mise en œuvre de la méthode hydrogéomorphologique pour la spatialisation du risque d'inondation :	200
1.2.1 La photo-interprétation :	201
1.2.2. Les observations de terrain :	201
1.2.3 Données historiques :	202
2 Les principes de l'approche hydrogéomorphologique :	203
2.1 La géomorphologie :	203
2.1.1. Les lits :	203
2.1.2 Les talus :	205
2.2 La sédimentologie :	206
2.3 Les critères complémentaires :	209
2.3.1. La couverture végétale naturelle :	209
2.3.2. L'occupation humaine :	211
3 Les approches cartographiques de l'inondation des plaines alluviales :	218
3.1. Reconstitution de chenal fluvial à partir des documents utilisés :	219
3.2. Cartographie des talus fluviaux :	219
3.3. Cartographie des unités morpho sédimentaire de la plaine alluviale :	222
4 La carte hydrogéomorphologique : La carte d'inondabilité hydrogéomorphologique :	230
4.1 Cartographie hydrogéomorphologique en amont du bassin versant :	230
4.2 Cartographie hydrogéomorphologique au centre du bassin :	232
4.3 Cartographie hydrogéomorphologique à l'aval du bassin :	235

5	<i>Croisement des résultats d'approches différent et validation de la délimitation des zones inondables :</i>	238
	<i>Conclusion :</i>	241
	<i>Conclusion de la troisième partie :</i>	243
	<i>Conclusion générale :</i>	244
	<i>Liste bibliographique :</i>	247