



Année Universitaire : 2014-2015



Master Sciences et Techniques : Hydrologie de Surface et Qualité des Eaux

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'Obtention du Diplôme de Master Sciences et Techniques

Utilisation du SIG pour la cartographie et l'évaluation de l'érosion hydrique dans le bassin de l'Oued Larbaa (Taza, Maroc)

Présenté par:

El Hamzaoui Lamyae

Encadré par:

-Le Pr.Lahrach.A,
-Le Pr.Tabyaoui.H

Soutenu le 24 juin 2015 devant le jury composé de:

- Pr. A. Lahrach
- Pr. H. Tabyaoui
- Pr. F. Hammichi
- Pr. L. Benaabidate
- Pr. A. Dridri

Stage effectué au : Laboratoire Géo-ressources et environnement,

FSTF



Mémoire de fin d'études pour l'obtention du Diplôme de Master Sciences et Techniques

Nom et prénom: El Hamzaoui Lamyae

Année Universitaire : 2014/2015

Titre: Utilisation du système d'information géographique pour la cartographie et l'évaluation de l'érosion hydrique dans le bassin de l'Oued Larbaa (Taza, Maroc)

Résumé

Le bassin versant de l'Oued Larbaa, à climat semi-aride, se situe à l'extrémité orientale du bassin versant d'Inaouène, il couvre en partie le préif au nord, le moyen Atlas plissé au sud et le couloir de Fès-Taza au centre.

Du point de vue hydrologique, l'Oued Larbaa contribue en grande partie à l'alimentation de l'Oued Inaouène.

L'application de la méthode dite RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation), montre que le niveau de risque d'érosion qualifiant notre bassin est de type moyen.

Mots clés:

Bassin versant de l'Oued Larbaa- Moyen Atlas plissé- Préif- Couloir sud Rifain- Maroc-

Climatologie- Hydrologie- Erosion Hydrique

Remerciements

Au terme de cette modeste contribution, je voudrais présenter mes remerciements les plus vifs à Messieurs les professeurs Abderrahim LAHRACH de la Faculté des Sciences et Technique de Fès et Hassan TABYAOUI de la Faculté Polydisciplinaire de Taza qui, depuis qu'ils ont bien voulu accepter de me proposer ce sujet d'étude jusqu'à sa phase d'élaboration finale, ils n'ont pas lésiné leur temps et leurs efforts pour un encadrement meilleur en bonne et due forme ; leur aide moral et matériel ainsi que leurs remarques et suggestions m'ont toujours été d'un grand secours. Qu'ils trouvent ici l'expression de toute ma reconnaissance, ma gratitude et mon respect.

Mes vifs remerciements sont exprimés de la même à mes chers professeurs Lahcen BENABIDATE de la Faculté des Sciences et Technique de Fès, Abdellah DRIDRI de la faculté des sciences Dhar el Mahrez de Fès, et Fatima EL HAMMICHCHI de la Faculté Polydisciplinaire de Taza, qui ont bien voulu siéger à mon jury d'examen. Qu'ils trouvent dans ces quelques lignes toute ma reconnaissance et tout mon respect.

Ce travail ne pouvait être mis sur pieds sans l'aide de plusieurs personnes ; parmi eux, je voudrais manifester un signe de reconnaissance tout particulier à Monsieur Haytam Mesrar Doctorant à la faculté des sciences Dhar El Mahraz de Fès. Qu'ils acceptent, tous, l'expression de mes sentiments les plus amicaux.

Enfin, ce mémoire est dédié à tous mes enseignants du Master « hydrologie de surface et qualité des eaux », à tous mes camarades de promotion, à ma famille et à mes amis.

Résumé

Le bassin versant de l'Oued Larbaa, à climat semi-aride, se situe à l'extrémité orientale du bassin versant d'Inaouène, il couvre en partie le prérief au nord, le moyen Atlas plissé au sud et le couloir de Fès-Taza au centre.

Du point de vue hydrologique, l'Oued Larbaa contribue en grande partie à l'alimentation de l'Oued Inaouène.

L'application de la méthode dite RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation), montre que le niveau de risque d'érosion qualifiant notre bassin est de type moyen.

Mots clés :

Bassin versant de l'Oued Larbaa- Moyen Atlas plissé- Prérif- Couloir sud Rifain- Maroc- Climatologie- Hydrologie- Erosion Hydrique

Abstract

The watershed of Oued Larbaa, semi-arid climate, is located at the eastern end of the watershed of Inaouène it partly covers the Prerif north, the pleated Middle Atlas to the south and the corridor of Fes Taza center.

The hydrological perspective, the Oued Larbaa largely contributes to the Oued Inaouène diet.

The application of the method called RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation), shows that the erosion risk level calling our pool is medium type.

Keywords:

Watershed of Oued Larbaa- Middle Atlas- Prérif- South Corridor Rifain- Morocco- climatology - hydrology- water erosion

Introduction :

L'érosion hydrique, sous l'effet des pluies et des ruissèlements, constitue l'un des grands problèmes environnementaux au Maroc et à l'échelle mondiale. Par ailleurs, les conséquences environnementales et socio-économiques de celle-ci sont multiples et variées. A titre indicatif, elle génère la dégradation des sols, des milieux naturels et du patrimoine pédologique d'une part et, d'autre part des ressources en eau sur le plan quantitatif et qualitatif. Elle est aussi à l'origine de l'envasement des barrages et à la vulnérabilité de toutes les infrastructures (routes, ponts et diverses constructions entre autres). A long terme, l'appauvrissement des sols causés par celle-ci entraîne une baisse de la production agricole, ce qui entraîne pour un pays ayant une telle vocation l'exode rural.

L'objectif du travail est d'évaluer le taux d'érosion hydrique dans le bassin de l'Oued Larbaa (région de Taza, Maroc septentrional). Pour atteindre ceci, on a utilisé la méthode dite *RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation)*. Cette approche, est basée sur la relation suivante : **$A=R*K*LS*C*P$**

Sur la base de données recueillies sur le bassin versant de l'Oued Larbaa, on a procédé à réaliser dans le présent travail :

- Le calcul de l'érosivité de la pluie (R) ;
- La cartographie utilisant le SIG, de l'érodibilité du sol (K) ;
- La cartographie utilisant le SIG, de la longueur et de l'inclinaison de la pente (LS) ;
- La cartographie, sur la base d'images aériennes, du couvert végétal (C).

Parallèlement à cette contribution une digitalisation du réseau hydrographique et des formations géologiques et pédologiques du secteur d'étude ont été établies.

Le présent mémoire est composé de cinq chapitres :

- Le premier chapitre traite des généralités ;
- Le deuxième chapitre, concerne le cadre général du bassin versant de l'Oued Larbaa ;
- Le troisième chapitre traite des paramètres physico-chimiques du bassin versant de l'Oued Larbaa

- Le quatrième chapitre constitue une étude hydrologique du bassin versant de l'Oued Larbaa
- Le cinquième chapitre traite le calcul et la cartographie de l'érosion hydrique dans le bassin versant de l'Oued Larbaa.
- Une conclusion générale

Chapitre 1 : Aspects théoriques de l'érosion hydrique

En géomorphologie, l'érosion est le processus de dégradation et de transformation du relief, et donc des roches, qui est causé par tout agent externe (donc autre que la tectonique), elle peut être définie de deux manières : l'érosion géologique ou naturelle et l'érosion du sol (Wikipedia).

L'érosion géologique ou naturelle est l'ensemble des processus de la dynamique de la surface de la terre dont l'homme n'intervient que d'une façon minime. Lentement sur plusieurs millions d'années, elle est responsable du modelage des reliefs par la transformation des roches cohérentes en matériaux meubles facilement détachables par les agents météoriques.

L'érosion du sol est un phénomène plus localisé dans le temps et dans l'espace, il est lié aux sols support des végétaux des terrains agricoles, forestiers et de pâturage. Le sol est, par définition, constitué de matériaux meubles, minéraux ou organiques, non consolidés, possédant une structuration en agrégats agglomérée par les minéraux argileux et/ou la matière organique.

L'érosion du sol est la destruction de ces agrégats, l'arrachage des particules qui les constituent et leur évacuation par l'impact des gouttes de pluie, le ruissellement ou le vent.

Les facteurs de l'érosion hydrique sont l'agressivité climatique, la pente, la nature physicochimique du substrat (fracturation, dureté, solubilité..), la densité et la nature du couvert végétal, l'action de l'homme. L'agissement de ces différents facteurs est variable et interdépendant et la combinaison de deux ou plusieurs degrés d'influences élevés de ces facteurs peut rendre les conséquences du processus érosif très graves.

1- Problématique de l'érosion des sols au Maroc :

L'érosion des sols est un problème très sérieux à l'échelle mondiale, mais il est bien plus préoccupant dans certaines régions du monde comme le Maghreb où la combinaison de l'agressivité climatique avec des pratiques humaines non adéquates a abouti à une dégradation importante parfois irréversible des sols. Elle menace de ce fait, de grandes régions de désertification.

Au cours des dernières décennies, pour la satisfaction des besoins domestiques et l'accroissement des terrains agricoles, une pression intense s'est exercée sur les milieux

naturels. Une comparaison entre les anciennes cartes du couvert végétal (eaux et forêts 1958 ;in Sadiki A.2005) et leur état actuel montre que de grandes surfaces de terre qui étaient relativement protégées, se sont retrouvées dépouillées de leurs couvertures végétales, fragilisées par les labours et le travail des sols et exposées à l'agressivité des agents climatiques.

La conséquence de cette exploitation anarchique est une dégradation grandissante des paysages environnementaux marocains et de ses ressources naturelles.

L'érosion hydrique accélérée, sous différentes formes, affecte de grandes surfaces et devient responsable de l'appauvrissement du sol et de la dégradation de sa productivité, elle peut même causer par endroit une perte complète du sol et sa stérilité totale, une grande partie des matériaux arrachés aux sols se retrouvent dans les réseaux hydrologiques et envasent les retenus d'eau.

A l'échelle du Maroc, l'envasement des barrages par les sédiments provoque la diminution de leur capacité de l'ordre de 75 millions m³/an. Sur une capacité totale de 14,3 milliards de m³ d'eau en année de précipitations moyennes, la capacité totale perdue actuellement par les barrages est près de un milliard de m³, elle est équivalente à la retenue de 5 grands barrages existants, elle est aussi équivalente à la quantité d'eau nécessaire pour irriguer 5000 à 6000 ha/an (Eaux et Forêts. 1999; in Sadiki A.2005).

L'érosion hydrique est plus accentuée sur la chaîne du Rif par rapport au reste du Maroc, cette zone caractérisée par la prédominance de formations géologiques friables (marnes, marno-calcaire, flysh...). Le défrichement de leur couverture végétale protectrice a rendu leurs sols très vulnérables à l'érosion hydrique, l'ampleur du phénomène est plus importante dans les collines du Prérif qui ne couvrent que 6% du territoire national mais qui produisent 60% de sédiments selon Heush(1970). Dans la chaîne du Rif, la quantité de sol perdu atteint une moyenne de 20 t/h/an alors qu'elle n'est que de 5 à 10 t/ha/an dans le moyen et le haut Atlas (Eaux et Forêts. 1999; in Sadiki A.2005; Layan B.2013).

1-1 Les causes principales de l'érosion hydrique:

Les taux d'érosion au Maroc sont les plus élevés à l'échelle mondiale. Ceci est dû au fait que sur de grandes parties du territoire, toutes les conditions sont réunies pour le développement de ce phénomène. Les causes de l'aggravation de l'érosion hydrique sont multiples et interdépendantes.

-Des causes naturelles liées à :

- La prédominance des roches tendres combinée avec les fortes pentes liées à l'encaissement des vallées ;
- L'action irrégulière des précipitations (orages violents après une période plus ou moins longue de sécheresse) ;
- La nature du réseau de drainage (relief, pente, densité, forme) ;
- La torrencialité des écoulements dans le réseau hydrographique en zones montagneuses ;
- La faible densité du couvert végétal.

-Des causes anthropiques, liées à la croissance démographique et aux actions qui l'accompagnent comme :

- L'exploitation abusive et anarchique des bois de forêts, ce qui enlève progressivement au sol sa seule protection contre l'agressivité climatique,
- Le défrichement et la déforestation à la marge des terres cultivées ;
- Le surpâturage : une exploitation abusive des ressources végétales pour l'alimentation du bétail
- L'exploitation des terres marginales comme les terres en pente forte très exposées à l'érosion hydrique ;
- Le défoncement des croutes calcaires fragilise les sols et les rend plus vulnérables à l'érosion
- Les incendies qui détruisent près de 3000 ha/an de forêts.

1-2 Les dommages liés à l'érosion hydrique:

L'érosion hydrique constitue une des contraintes majeures au développement durable surtout dans le Rif. Parmi les répercussions négatives de l'érosion hydrique on trouve :

- L'appauvrissement et l'amincissement du sol et surtout de la couche arable ;
- La diminution de la fertilité des sols par la perte en terre et l'appauvrissement en éléments nutritifs et en matière organique ce qui conduit à la régression de la production ;

- La diminution de la valeur foncière des terres agricoles à cause de la diminution de la fertilité ;
- La régression du patrimoine végétal et de sa biodiversité ;
- L'envasement des barrages et des lacs collinaires
- L'altération de la qualité de l'eau potable par la turbidité et l'eutrophisation ;
- Les risques d'instabilité des versants et la menace qu'ils engendrent pour l'infrastructure routière ;
- Le rehaussement des lits de cours d'eau et l'augmentation des risques d'inondations.

2- Processus et formes de l'érosion hydrique :

L'érosion commence par le battage des gouttes de pluies pour mobiliser les particules qui seront arrachées par le ruissèlement. A la surface du sol le déplacement de l'eau sous l'effet de la gravité est diffus ou concentré, à travers le sol, il s'effectue par écoulement subsurfacique: infiltration ou percolation. Les déplacements des matériaux du sol par l'eau sont liés à ces différents itinéraires de l'eau, ainsi l'érosion a lieu en nappe, par ravinement, par lessivage ou par des mouvements de masse.

2-1 La mobilisation des particules :

Les sols sont généralement structurés en agrégats de particules soudées par des argiles ou de la matière organique. On parle de mottes ou de grumeaux.

Sur une surface dénudée de végétation e exposée à l'action des pluies et du ruissèlement, les agrégats sont soumis à différents mécanismes de désagrégation par l'eau, le mécanisme principal de destruction de ces agrégats est l'impact des gouttes de pluie qui brise les mottes et éjecte les particules du sol sur de courtes distances.

2-1-1. Impact des gouttes de pluie :

L'action érosive de l'eau débute par l'impact des gouttes de pluies sur la surface du sol qu'on appelle (effet splash), celui-ci provoque le premier mouvement des particules du sol.

L'impact des pluies brise les agrégats, détache et disperse les particules par le rejaillissement des gouttes en les éjectant sur de courtes distances pouvant atteindre plusieurs dizaines de centimètres.

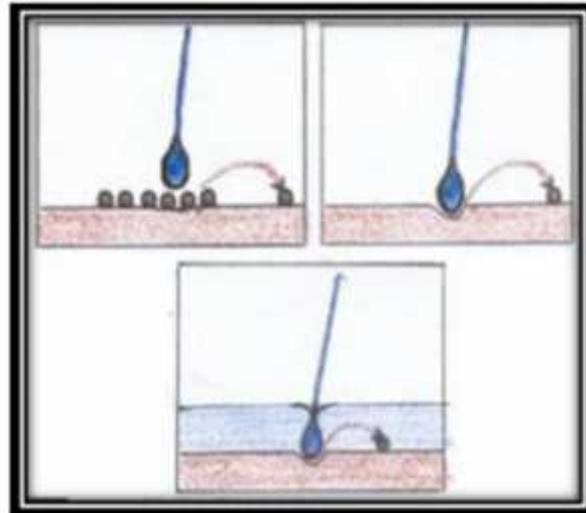


Figure 1 : Impact de gouttes de pluies sur le sol(Extrait Arouzoud H.1994)

Figure 1

2-1-2. Formation des croûtes de battance :

La battance se traduit par le colmatage, souvent visible à l'œil nu, de la porosité de la partie superficielle du sol, qui s'oppose à l'infiltration de l'eau, à la circulation de l'air, et favorise l'érosion hydrique, ce processus permet le passage progressif d'une surface rugueuse à la formation d'une croûte lisse et régulière qu'on appelle croûte de battance.



Figure 2 : Développement d'une croûte de battance à la surface du sol sous l'effet de la pluie. (Extrait de Cosandey, 1990, d'après les travaux de J. Boiffin ; in ; Arouzoud H.1994)

Figure 2

2-2 Les formes d'érosion :

2-2-1 Erosion en nappe ou érosion diffuse (sheet flood) :

Le ruissèlement en surface se déclenche quand le pouvoir d'infiltration des sols est inférieur à l'intensité des précipitations (Horton, 1945) ou lorsque le milieu interstitiel des sols est saturé en eau ou bien après le colmatage des pores de surface par les croutes de battance.

Selon la pente, les gouttes d'agglomèrent d'abord en petits filets qui s'écoulent d'une façon linéaire, si la pente le permet, les petits écoulements linéaires s'anastomosent, se rejoignent latéralement, se fusionnent et forment une pellicule puis une nappe.

Le ruissèlement en nappe transporte les particules d'une façon sélective, la capacité de l'eau à transporter des fragments de roches et des particules du sol dépend à la fois de la pente, de l'intensité-durée de la pluie, de la stabilité structurale du sol et de la résistance des particules du sol à l'érosion.



Figure3 : Erosion en nappe(Extrait d'Arouzoud N.2014)

Figure 3

2-2-2. Erosion en sub-surface :

Les mouvements de l'eau dans le sol connus sont l'écoulement hypodermique, l'infiltration et la percolation, ces mouvements dépendent de la texture et de la structure du sol.

L'arrangement géométrique des particules grossières qui forment le squelette du sol, détermine la connexion des pores et par conséquent, contrôle les mouvements de l'eau dans le sol. L'entraînement par l'eau des particules fines s'effectuant dans les pores constitue le lessivage pédologique, les particules fines sont entraînées de l'horizon de surface vers un

horizon plus profond, par ces mouvements l'eau peut aussi transporter de la matière sous forme de solutés et contribuer ainsi à la dégradation et à l'appauvrissement des sols.

2-2-3 Erosion en rigoles :

L'érosion en rigoles est la première forme d'incision linéaire qui affecte les sols, l'action érosive de l'eau augmente avec la longueur de la pente lorsque le ruissèlement s'intensifie, il commence à se concentrer et à creuser la surface du sol formant des petites incisions de quelques centimètres de profondeur appelées rigoles. Le déclenchement de l'incision est d'autant plus rapide que la pente est forte, que la pluie est intense et que la surface du sol est irrégulière notamment pas les pratiques culturales, le seuil est atteint lorsque les forces de cisaillement exercées par l'écoulement dépassent le seuil de résistance de la surface du sol (Bryan, 1987 in Sogon, 1999 ; in Arouzoud.N.2014).

2-2-4 Erosion en ravines :

Sous les pentes moyennes à fortes et sous l'effet de la succession d'évènements pluvieux peuvent naître les ravines, soit simplement par l'évolution des rigoles.

2-2-5 Erosion en ravins :

Les ravines peuvent évoluées en ravins, si elles ne sont pas stabilisées, les écoulements saisonniers vont les agrandir et les faire évoluer en profondeur, en longueur et en largeur. Les formes et l'évolution des ravins sont diverses et sont surtout liées à la lithologie (Roose et al, 2000 ; in Arouzoud.N.2014).

Formes	Tracé	Longueur	Largeur	Profondeur
Griffe	Sinueux	< 1 m	< 10 cm	5-6 cm
Rill	Rectiligne	Centaine de m	10-20 cm	5-10 cm
Rigole	Sinueux	Dizaine de m	5-70 cm	10- 30 cm
Ravine	Peu sinueux	Centaine de m	50cm à 1 m	30-50 cm
Petit ravin	Peu signeux	Centaine de m	50 cm à 1m	50-200 cm

Figure 4: Les formes d'incision dues à l'érosion linéaire(Wikipédia)

Figure 4

2-2-6. Erosion en masse :

Alors que l'érosion en nappe s'attaque à la surface du sol, le ravinement aux lignes de drainage du versant, les mouvements de masse concernent un volume à l'intérieur de la couverture pédologique. On attribue à l'érosion en masse tout déplacement de terre selon des formes non définies, comme les mouvements de masse, les coulées de boue et les glissements de terrain.

Ces mouvements sont liés à la perte de cohésion entre les particules du sol et/ou du substratum à la suite de l'humectation et de l'imbibition par l'eau.

3-Les facteurs de l'érosion hydrique :

D'après Arouzoud.N.2014, les travaux de Wischmeier et Smith (1978) à l'échelle de la parcelle ont permis de dégager les principaux facteurs de l'érosion des sols : La nature des pluies en particulier, leurs intensités liées au climat, la plus ou moins forte vulnérabilité des terrains à l'érosion fonction de la nature des sols et de l'existence d'un couvert végétal, la pente du terrain (topographie) et enfin l'impact des activités humaines (pratiques agricoles, aménagements antiérosifs, etc....). On déduit donc des travaux de Wischmeier et Smith (1978), les cinq facteurs de l'érosion.

3-1 La pluie et son intensité :

La pluie est l'élément moteur de l'érosion. En fait, sans précipitation atmosphérique il n'y a pas d'érosion hydrique. Selon Roose 1994 (in ; Arouzoud H.1994), l'érosion en nappe dépend à la fois de : - l'intensité maximale des pluies qui déclenchent le ruissellement (I_{max} en 15 min sur les pentes fortes ou I_{max} en 30 min sur les pentes moyennes), - l'énergie des pluies (EC) qui détachent les particules susceptibles de migrer - et la durée des pluies et/ou de l'humidité avant les pluies. Selon Wischmeier et Smith (1978), à chaque intensité correspond une énergie cinétique d'après l'équation :

$$E_c = 210 + 89 \log_{10} I$$

E_c : énergie cinétique de la pluie exprimée en tonne métrique * Mètre/ha/cm de pluie.

I : intensité exprimée en cm/h. Plus l'intensité de la pluie est grande, plus l'effet de battage du sol est prononcé, ce qui conduit à une augmentation du ruissellement et par voie de conséquence à un accroissement de l'érosion des sols.

3-2 le sol

L'érodibilité d'un sol représente sa sensibilité à l'arrachement et au transport des particules qui le composent. Elle est définie par 2 caractéristiques :

- La résistance au splash (battance)
- La résistance au cisaillement (lié au ruissellement)

L'érodibilité du sol peut être caractérisée par sa stabilité structurale (Le Bissonnais, 1996 ; in ; Arouzoud H.1994), fonction de plusieurs paramètres :

- La texture du sol,
- La teneur en matière organique
- Et la teneur en calcium.

La capacité d'infiltration du sol dépend aussi de ces paramètres.

3-3 La végétation

Il s'agit du facteur primordial de protection du sol contre l'érosion. Son action est multiple :

- La végétation intercepte les gouttes de pluie, permet la dissipation de l'énergie cinétique, ce qui diminue dans une large mesure l'effet "splash" ;
- Le système racinaire maintient le sol en place et y favorise l'infiltration, il assèche le sol par l'évapotranspiration, augmente sa porosité et accroît ainsi la capacité d'infiltration du sol ;
- Le développement de la végétation en surface freine le ruissellement
- Et l'enrichissement de la surface du sol en matière organique améliore sa structure et sa cohésion.

En général, on peut classer par ordre décroissant les principaux types de végétation en fonction de la protection qu'ils assurent à la surface du sol. Forêts naturelles avec une strate herbacée bien conservée > Steppes et Savanes non dégradées > jachères > cultures.

3-4 La topographie du terrain

D'après Wischmeier et Smith (1978), deux paramètres topographiques influencent l'érosion à l'échelle de la parcelle:

- L'inclinaison de la pente (S), le ruissellement commence sur des pentes faibles (1 à 2 %) et l'érosion augmente avec la pente ;
- La longueur de la pente (L), en principe plus la pente est longue, plus le ruissellement s'accumule, prend de la vitesse et de l'énergie et plus l'érosion s'intensifie. La relation proposée par Wischmeier et Smith(1978):

$$E = L^{1/2}/100*(0,76 + 0,53 S + 0,076 S^2)$$

Où E, l'érosion, s'exprime en t/ha, S en % et L en pieds.

3-5 L'action de l'Homme :

L'homme peut être à l'origine du déclenchement et de l'accélération de l'érosion par les actions suivantes :

- Le défrichement de la forêt,
- Les incendies et surpâturages,
- Et les façons culturales.

Le couvert végétal qui assure la meilleure protection du sol contre l'érosion. - Le défrichement, lorsqu'il est pratiqué pour une mise en culture, a le même effet qu'un labour. - L'incendie a un effet temporaire sur la disparition du couvert végétal qui réapparaît progressivement et totalement après 2 ou 3 saisons pluvieuses.

- Pour le surpâturage, la disparition du couvert végétal se manifeste par l'apparition de plages de sols nus compactés qui favorisent la formation de ruissellement et la création des ravines d'érosion.
- Les façons culturales, l'état de la surface du sol présente une importance majeure lorsque le sol est nu.

4 Les pratiques antiérosives :

Les stratégies de lutte antiérosive s'y exercent en fonction de deux types : traditionnelles, menées par la population locale, et étatiques, réalisés par les services techniques. Les observations de terrain ont permis de recenser les aménagements réalisés et d'évaluer leur rôle en matière de lutte contre l'érosion et de la gestion conservatoire de ressources.

4-1 Les stratégies traditionnelles de lutte anti-érosive :

4-1-1 La culture itinérante sur brûlis

Est un système agraire dans lequel les champs sont défrichés par le feu qui permet un transfert de fertilité puis sont cultivés pendant une période brève pour être ensuite mis en jachère. Est probablement la plus ancienne stratégie utilisée sur tous les continents pour maintenir la productivité de la terre. Cette stratégie ne s'applique que sur des terres peu peuplées (moins de 20 à 40 habitants au kilomètre carré).

4-1-2 Les terrasses en gradins et les terrasses méditerranéennes sur murettes en pierres

Ce sont des constructions qui arrivent à casser la pente. Ces terrasses tirent leur nom de la forme qu'elles donnent au versant lorsque celui-ci est totalement aménagé. Les successions de terrasses prennent en effet la forme d'un escalier ou de gradins. Ces terrasses, accrochées au versant, doivent s'adapter à la pente de celui-ci : lorsque la pente augmente les terrasses rétrécissent tandis que le mur (ou le talus) de soutènement prend de la hauteur.



Figure 5 : Une vue de versants aménagés par des terrasses soutenues par a/ des talus et par b/ des murs en pierre. (Extrait de Arouzoud H.1994)

Figure 5

4-1-3 les billons

Les billons sont des petits cordons en terre selon les courbes de niveau, Ils ont une hauteur comprise entre 0,2 et 0,4 m. Leur largeur à la base est variable, et peut parfois atteindre 0,9 m. Ils sont utilisés sur des pentes faibles. Ils sont généralement construits avec une pente très légère (2 à 3 %), qui permet l'écoulement d'une cuvette à l'autre. L'objectif est augmenté l'infiltration de l'eau, et diminuer la vitesse du ruissellement grâce à la rugosité apportée par ces éléments (et donc une diminution de la quantité de sol arrachée).



Figure 6 : Vue sur des billons, (Extrait d' Arouzoud H.1994)

Figure 6

4-1-4 Alignements de pierre et les murettes

Les murettes sont des petits murs construits en pierres sèches (sans ciment ni enduit) selon les courbes de niveau. Elles permettent à la fois de débarrasser les parcelles des pierres qui handicapent leur valorisation, de réduire le ruissellement et sa vitesse et de piéger les sédiments transportés. Sur les pentes moyennes à fortes, Cette pratique est plus fréquente dans la zone nord.

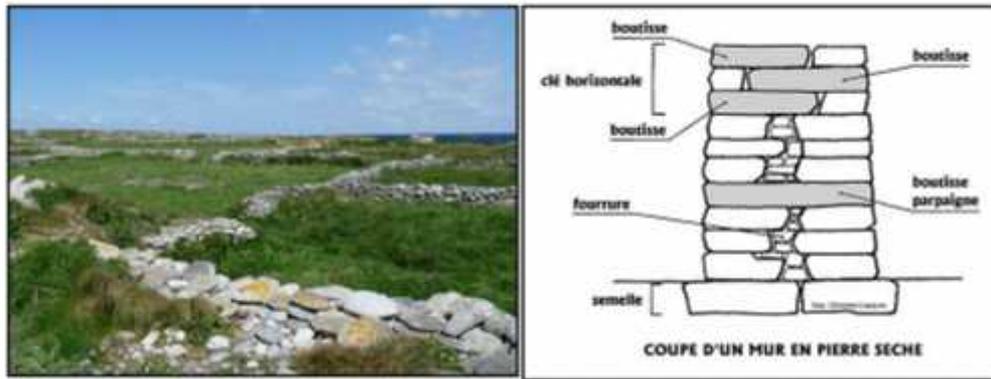


Figure 7 : murets en pierres sèches.(Extrait d' Arouzoud H.1994)

Figure 7

4-2 Les stratégies modernes d'équipement hydraulique :

4-2-1 La restauration des terrains en montagne (RTM)

Pour but de reboiser les terres dégradées de montagne et de corriger les torrents, de protéger les vallées et les voies de communication des masses de terre mobilisées par l'érosion et des crues dévastatrices.

4-2-2 La conservation de l'eau et des sols (CES)

La CES vise à maintenir en plus de la capacité de production des terres, aussi la protection de la qualité des eaux si indispensable aux citoyens. Les nuisances à l'aval coûtent bien plus cher et forcent l'Etat à réagir. Cela justifie les efforts considérables de l'Etat pour aider techniquement et financièrement les paysans (plus ou moins volontaires selon les régions) à aménager leurs terres.

4-2-3 La défense et restauration des sols (DRS)

Cette stratégie a été développée par les forestiers dans les années 1940-1980 autour du bassin méditerranéen pour faire face à de graves pénuries d'eau, à l'envasement rapide des barrages (en 30 à 50 ans) et à la dégradation des équipements et des terres. Elle combine la RTM des forestiers (reboisement des hautes vallées, correction torrentielle) et la CES des agronomes (banquettes plantées d'arbres fruitiers).



Figure 8 : DRS en pente sur bassin versant. (Extrait d' Arouzoud H.1994)

Figure 8

4-2-4 La gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES)

Est une stratégie participative visant à mieux gérer les ressources en eau, en biomasse et en nutriments. Elle tient comme principe que les aménagements antiérosifs ne peuvent être durables sans la participation paysanne.

4-3 Les mesures de lutte contre le ruissellement et l'érosion des sols :

Les méthodes antiérosives sont des techniques qui agissent en modifiant le trajet de l'agent d'érosion et en réduisant sa force. En voici quelques exemples de mesures de lutte les plus utilisées au nord du Maroc :

4-3-1 Création d'obstacles au ruissellement

Couverture permanente du sol

En zone montagneuse, on peut procéder à la végétalisation des badlands pour les sols sensibles à l'érosion par ravinement généralisé. L'installation d'une végétation à croissance rapide tels qu'Eucalyptus, cactus, etc. Assure une amélioration de la couverture du sol et son enrichissement en matière organique.



Figure 9 : Végétalisation de badlands par *Eucalyptus camaldulensis* et pin d'Alep sur banquettes au Maroc (Extrait d' Arouzoud H.1994)

Figure 9

Rideaux et Banquettes

Un rideau se forme à la limite d'un champ en pente quand le labour est fait parallèlement à cette limite. Puis des arbres y poussent et s'opposent au ruissellement et à l'entraînement du sol. Ce sont des levées de terre de faible hauteur (0.50 m) établies selon les courbes de niveau; elles sont généralement plantées par des arbres permettant de valoriser les surfaces marginales, de fixer les ouvrages et améliorer l'infiltration. Elles sont des petites terrasses horizontales, perpendiculaires à la ligne de la plus grande pente.

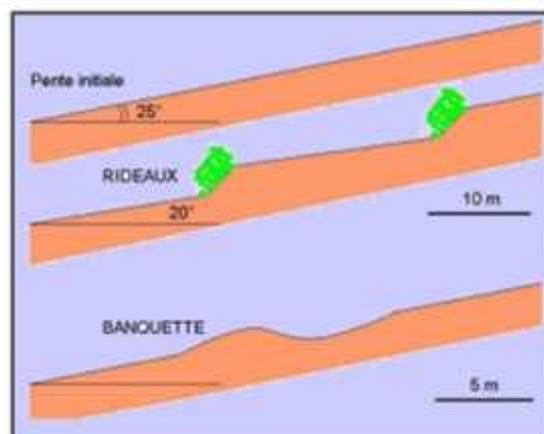


Figure 10 : Des coupes transversales de Rideaux et de banquettes. .(Extrait d' Arouzoud H.1994)

Figure 10

Fossés de protection

Ces fossés sont creusés en amont du terrain à protéger pour intercepter les eaux de ruissellement. Ils sont enherbés. Ils débouchent dans un exutoire adéquat.

Terrasses : On les trouve sur les versants et dans les fonds des vallées, entre les lits des oueds et le début des fortes pentes.



Figure 11 : Une vue sur des terrasses soutenues par des talus dans la zone de culture du safran (Siroua au sud du Maroc ; Extrait d' Arouzoud H.1994).

Figure 11

Il y a deux types de terrasses :

Terrasses soutenues par des murs en pierres sèches :

Cette technique s'applique aux pentes moyennes à fortes, où la charge caillouteuse est importante. Les murs sont alignés suivant les courbes de niveau et dont l'espacement augmente quand la pente diminue.

Terrasses soutenues par des talus :

Elles sont confectionnées selon les courbes de niveau. Ces talus ont généralement une hauteur comprise entre 1 et 2,5 m suivant la pente du versant

4-4 Captation des eaux de ruissellement

4-4-1 Les haies vives

Constituées de deux à trois lignes d'herbes ou d'arbustes plantés en quinconce et qui fonctionnent également comme des micro-barrages perméables très efficaces.



Figure 12 : Haies vives renforçant le cordon de pierre. (Extrait d' Arouzoud H.1994)

Figure 12

4-4-2 Les cordons de pierres (stone bonds)

Il s'agit de deux à trois niveaux de pierres rangées en courbe de niveau de façon à se renforcer l'une l'autre. Ces cordons de pierres ralentissent le ruissellement

4-5 Protection des pentes contre l'érosion

4-5-1 travaux selon courbes de niveau

On utilisant des Culture en courbes de niveaux En ce faisant, on oriente la rugosité du sol due aux mottes et aux petits creux, on les oriente perpendiculairement à la pente de telle sorte que l'on ralentit au maximum la nappe d'eau qui pourrait ruisseler. Ce procédé utilisé comme moyen de conservation des sols et de l'eau, n'est efficace que sur les pentes faibles ne dépassant pas 4%. Sur ces pentes, les travaux selon les courbes de niveau utilisées contre l'érosion en nappe (sheet erosion).

4-5-2 Cultures en bandes alternantes

Action d'alterner en bandes étroites des cultures labourées, perpendiculairement à une longue pente. C'est un procédé de culture en bandes parallèles (le plus souvent parallèles aux courbes de niveau) qui est utilisé lorsque la pente augmente et que le labour selon les courbes de niveau ne suffit pas pour arrêter l'érosion. On peut distinguer deux types de bandes alternantes : les bandes alternantes selon les courbes de niveau et les bandes alternantes transversales continues. La largeur des bandes dépend de la pente, de la perméabilité du sol et de son érodibilité.

Chapitre 2 : Etude du cadre général du bassin versant de l'Oued Larbaa

1-Situation géographique du bassin versant de l'Oued Larbaa :

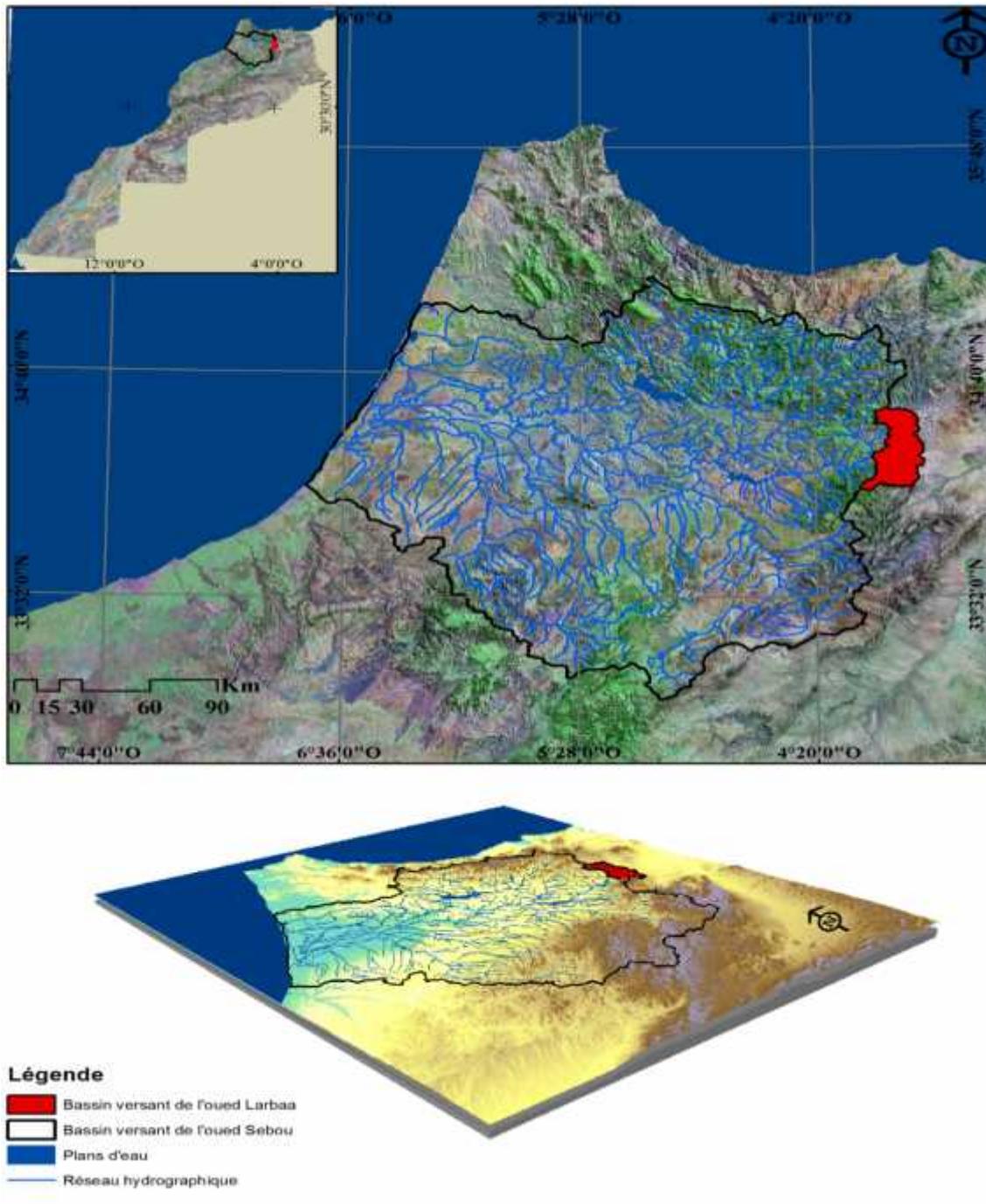


Figure 13 : Carte de situation géographique du bassin versant de l'Oued Larbaa

Figure 13

Il est situé à l'extrémité tout à fait orientale du grand bassin d'Innaouène (affluent de l'Oued Sebou ;Lahrach A.,1994 ; Benabidate L.2000 ; Dridri A.et Fedan B., 2001, Tabyaoui H et al.2015). De forme en croissant allongé presque nord-sud, il épouse le méridien de Taza et se trouve à cheval entre le Prérif dans sa majeure partie septentrionale et le moyen Atlas plissé dans sa partie méridionale ; alors que sa région centrale, aux environs de la ville de Taza, fait partie du couloir sud-Rifain (*Figure 13*). A l'échelle régionale, le Rif au Nord et le Moyen Atlas au Sud ; tous les deux forment les chaines alpinotypes du Maroc septentrional. Par ailleurs, ici le couloir sud rifain se trouve rétrécit jusqu'au point de disparaître au col de Touaher à l'Ouest de Taza.

Du point de vue morphologique, le couloir sud rifain dans cette région de Taza présente une dissymétrie de ses bordures. En effet le versant méridional (moyen Atlas) est beaucoup plus abrupt et massif que le versant rifain constitué de collines marneuses.

Du point de vue hydrogéologique, la partie méridionale du secteur d'étude constitue une unité qui offre une grande parenté avec le bassin de Meknès-Fès plus loin à l'Ouest, car la présence en profondeur d'importantes assises de calcaires et de dolomies liasiques (extension vers le nord des assises jurassiques plissées, faillées et karstifiées) rend possible l'existence d'une puissante nappe profonde artésienne ; mais contrairement au bassin lacustre de Meknès-Fès qui dispose de ressources en eau d'une importante nappe phréatique, le couloir de Fès Taza dont les recouvrements superficiels sont imperméables, se trouve être moins riche en eau (Combe M ., 1975). Ce déficit hydrique, lié aux faciès marneux imperméables, est noté aussi dans la majeure partie septentrionale de notre secteur d'étude (Combe M ., 1975).Par ailleurs, l'eau est rare en dehors des vallées des affluents de l'Oued Larbaa (là où on note la concentration de la population de cette région : Ain bou Kellal, Bab el Mrouj et Taza,...). Enfin, les collines et plateaux qui modèlent la région d'étude sont couverts de cultures céréalières et plantés d'oliveraies ; l'élevage y est important. Dans les vallées existe de petits périmètres irrigués voués à la culture maraichère et quelques plantations d'arbres fruitiers. La métropole de Taza, principal centre urbain du Maroc oriental constitue un centre d'attraction pour les échanges commerciaux.

2. Réseau hydrographique :

2-1. Caractéristiques du réseau hydrographique

Le réseau hydrographique se définit comme l'ensemble des cours d'eau naturels ou artificiels, permanents ou temporaires qui participent à l'écoulement. Ainsi Le réseau hydrographique peut prendre une multitude de formes selon la nature géologique, le climat, la pente du terrain, et l'intervention humaine. (Bravard, J.P et Petit F, 1997., in Wikipedia)

2-2. Affluents de l'Oued Larbaâ

Oued Larbaâ (70 Km de long) est considéré comme le deuxième affluent principal de l'Oued Inaouene après l'Oued Lahdar (91 Km de long). Ses principaux affluents sont issus du Prérif et du Moyen Atlas. La carte de réseau hydrographique du bassin versant de Larbaâ montre une dissymétrie du réseau entre les deux rives ; cette dissymétrie est liée à la présence d'une ligne de crête dans la partie droite du B.V. les principaux affluents sont situés à l'aval de l'Oued Larbaâ, ces principaux affluents sont de l'amont vers l'aval O. Tarmast, Traïba, Bouljraf, Jouana, Rhauireg, Dfali, Taza appelé aussi O. Elhaddar (*Figure 14*)

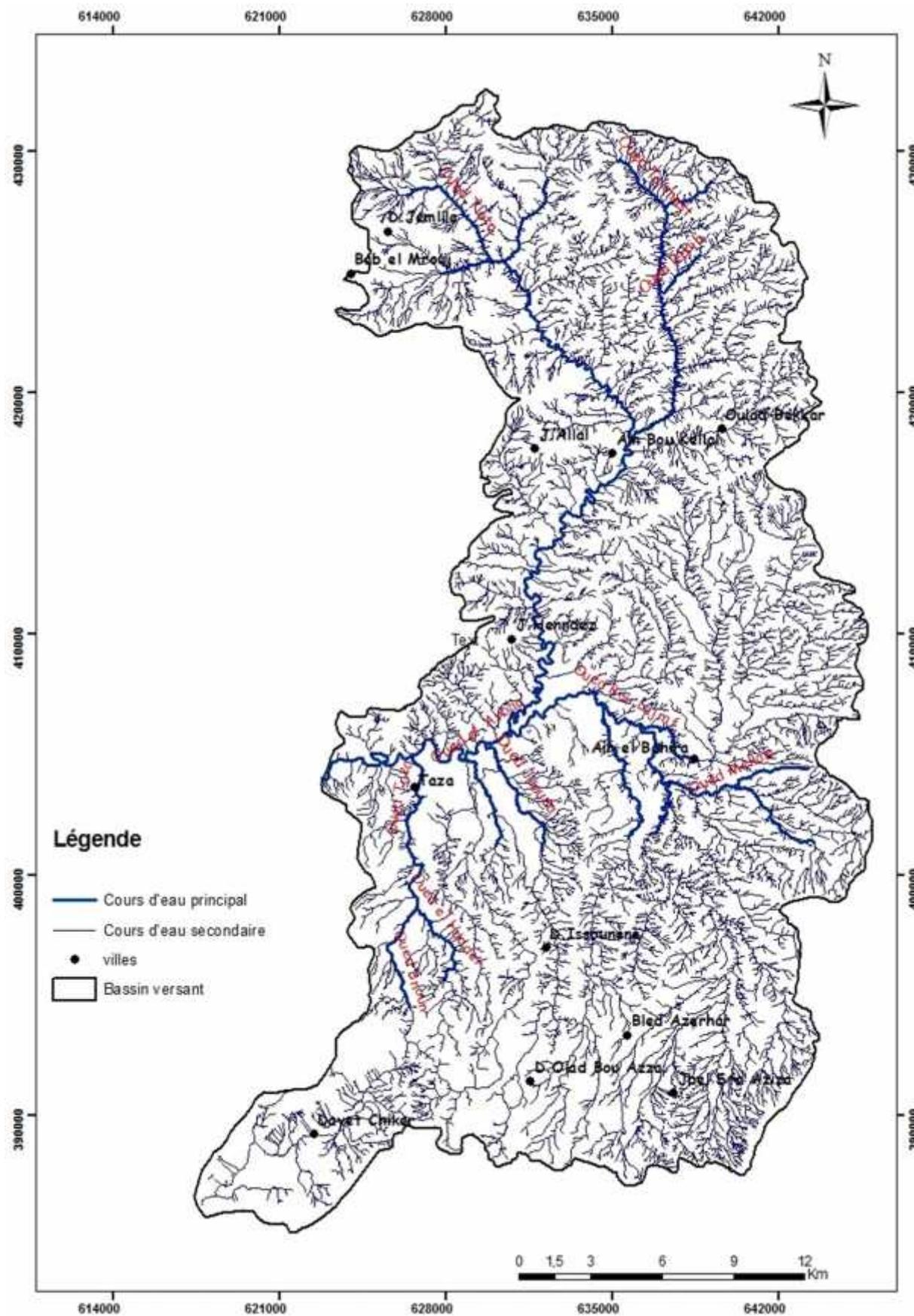


Figure 14 : Carte du réseau hydrographique du bassin versant de l'Oued Larbaa

Figure 14

3. Cadre climatique :

3-1. Précipitation

La répartition des pluies au cours de l'année se caractérise par de fortes pluies en automne, une légère baisse en hiver avec un maximum relatif au début du printemps. La saison de l'été est généralement sèche. La période de pluie la plus importante s'étale d'Octobre à Mai.

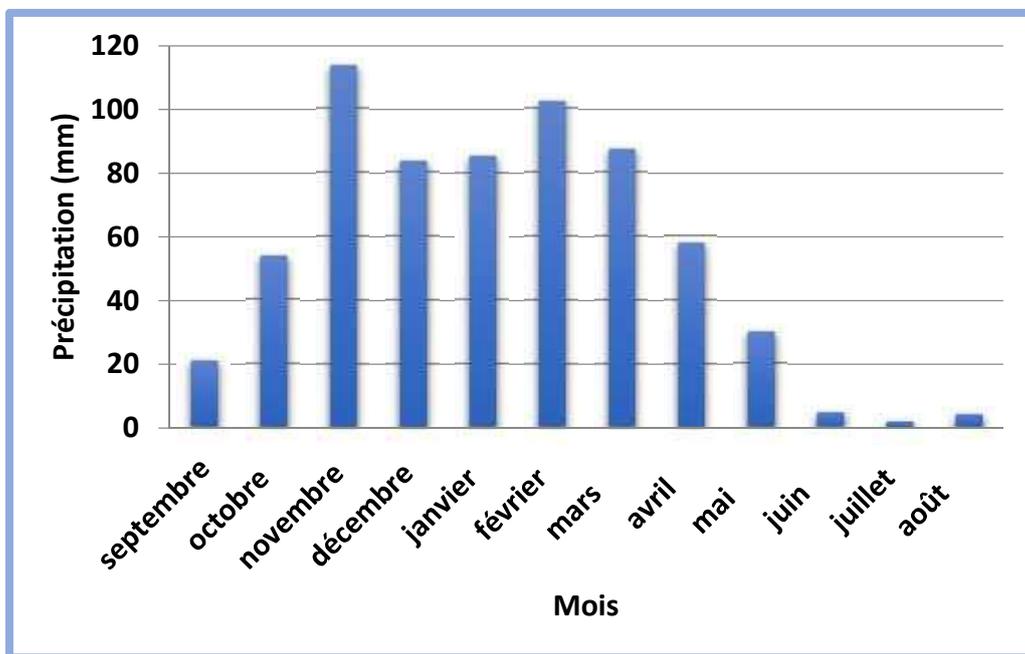


Figure 15 : Précipitations moyennes mensuelles de la station de Taza : 2004-2013 (d'après la direction régionale météorologique de Nord-est).

Figure 15

3-2. Température

Les températures moyennes mensuelles sont comprises entre 10°C et 29°C. Août est le mois le plus chaud de l'année. Janvier est le mois le plus froid de l'année.

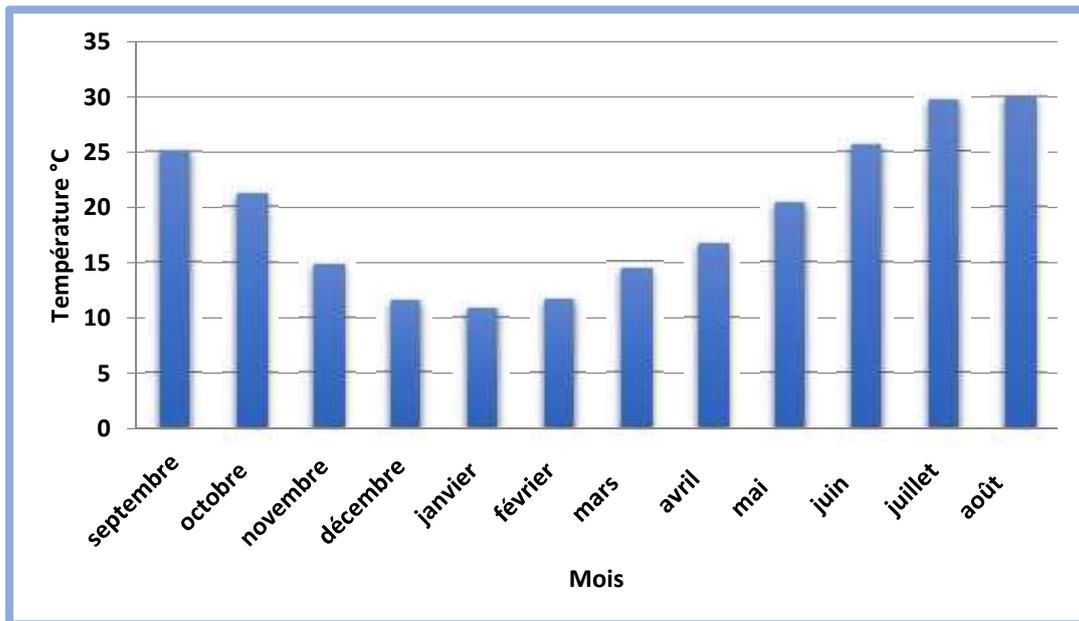


Figure 16 : Les températures moyennes mensuelles pour la station de Taza : 2004-2013 (d'après la direction régionale météorologique de Nord-est).

Figure 16

3-3. Evaporation

Les évaporations moyennes mensuelles sont comprises entre 46 et 222 mm, avec une évaporation maximal au mois de juillet et une évaporation minimal au mois de janvier.

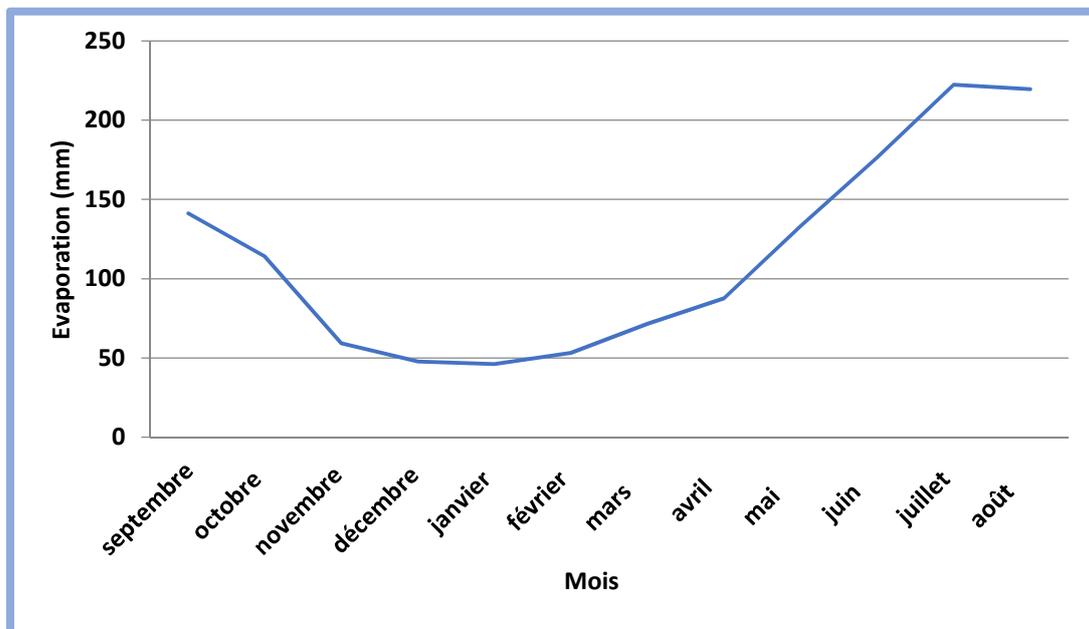


Figure 17 : Les évaporation moyennes mensuelles pour la station de Taza :2004-2013 (d'après la direction régionale météorologique de Nord-est).

Figure 17

3-4. Conclusion :

Les informations hydro-climatologiques sur la zone d'étude ont montré qu'elle se caractérise par un climat semi-aride, avec un été chaud et sec et un hiver tempéré et humide.

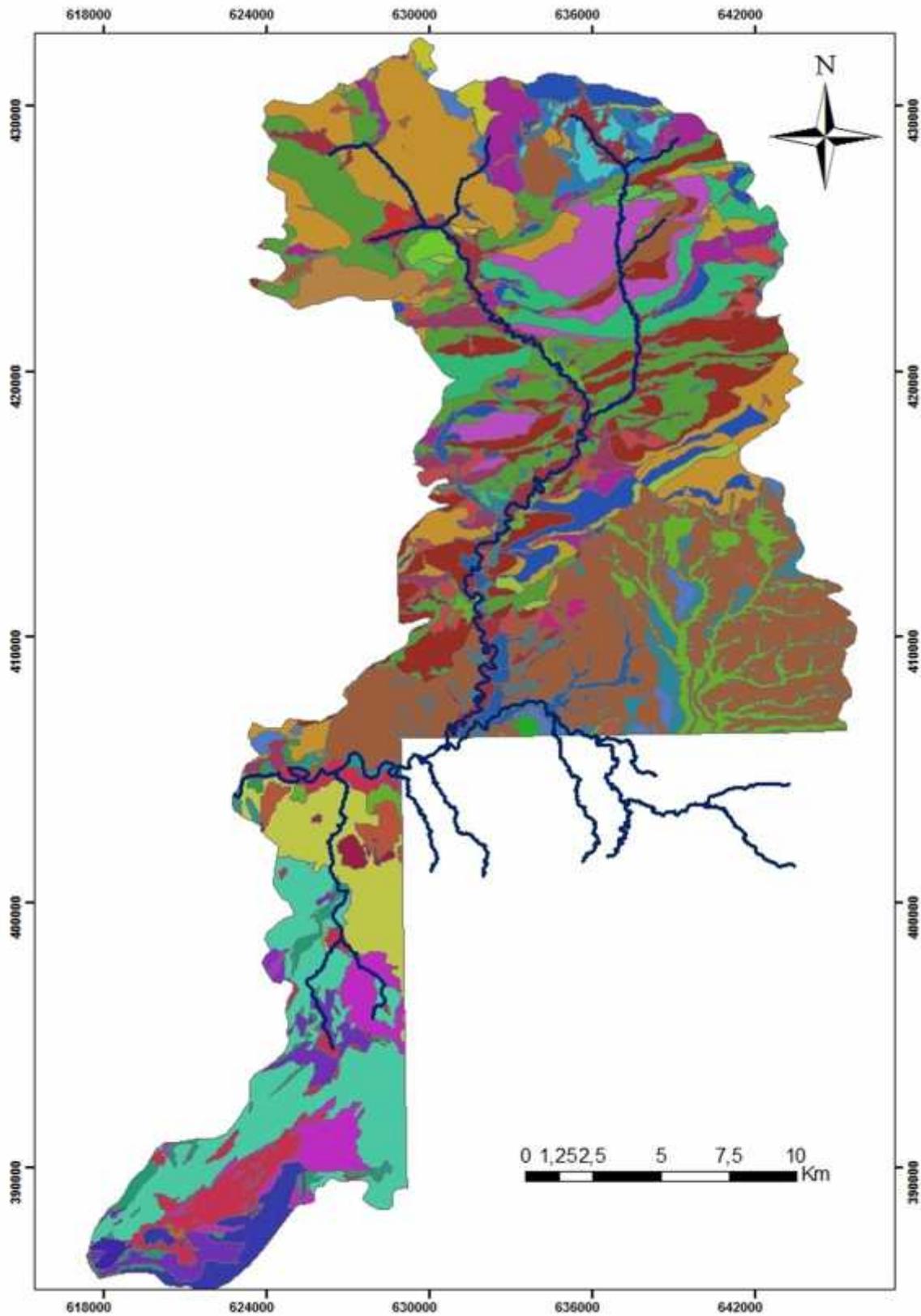


Figure 18 : Carte géologique du bassin versant de l'Oued Larbaa

Figure 18

Légende

Géologie



Lithologie, Age

-  , Rharbien et actuel
-  , Soltanien
-  , Amirien
-  , Rharbien et actuel
-  , Régréguien
-  , Salésien
-  , Soltanien
-  , Tersitien
-  , Villafranchien
-  Alternances de calcaires argileux et de marnes, Domérien
-  Alternances de calcaires dolomitiques et marnes à la base dolomie massive et bréchiforme, Sinémurien
-  Alternance de marnes et de calcaires riches en céphalopodes, Aalénien-Bajocien
-  Basaltes doléritiques, Niveau d'argile au sommet, Rhétien-Hettangien
-  Calcaires et dolomies,
-  Calcaires oolitiques à la base et calcaires micritiques avec rognons de silex, Sinémurien supérieur-Carixien
-  Cones de déjection: Blocs, galets et sédiments fins, Rharbien
-  Eboulis récents,
-  Glissement,
-  Glissement: Blocs, galets et sédiments fins, Actuel
-  Marnes bleues parfois très sableuses: A la base calcarénites et grès grossiers et conglomérats, Tortonien-Messinien
-  Marnes grises et brunes avec petits niveaux calcaires, Domérien supérieur - Toarcien
-  Marnes grises et brunes avec petits niveaux calcaires, Omérien supérieur - Toarcien
-  Pâtes et argiles rouges, Carnien-Rhétien
-  Schistes noirs, Albo-Aptien
-  Schistes tachetés, Ordovicien
-  Travertins, Tufs calcaires avec restes végétaux, Gelasien-villafranchien
-  Tufs rhyolitiques ignimbritiques, à xénolithes, Viséen supérieur
-  a: calcaires détritiques et grès grossiers; b: marnes bleues, Tortonien
-  calcaires lacustres,
-  grès et conglomérats avec calcaires à algues, Oligocène
-  grès friables à dents de poissons, marnes noires, bancs gréseux, Paléocène inférieur et moyen
-  gypses, marnes rouges salifères, Trias
-  marnes blanches à silex, bancs calcaires, Paléocène supérieur et Eocène inférieur
-  marnes blanches à silex, Paléocène et Eocène inférieur
-  marnes blanches à silex, Paléocène et Eocène inférieur
-  marnes blanches à silex, bancs calcaires, Paléocène moyen et supérieur et Eocène inférieur
-  marnes bleues remaniant intensément toutes les formations antérieures, Complexe préifain: sommet du Mioène moyen et Tortonien
-  marnes bleues, bancs gréseux au sommet, Tortonien (post-nappe)
-  marnes calcaires et grès, Eocène moyen et supérieur
-  marnes claires, Eocène moyen
-  marnes et grès, Mioène inférieur
-  marnes et grès, Mioène inférieur
-  marnes et marno-calcaires à inocérames, Crétacé supérieur
-  marnes à ammonites pyriteuses, Crétacé inférieur (Berriasien - Barémien)
-  marnes à ammonites pyriteuses, crétacé inférieur
-  marnes, Campanien-Maestrichtien
-  marnes, Cénomanién
-  marnes, Sénonien supérieur
-  marno-calcaires blancs avec bancs de grès, Mioène moyen
-  marno-calcaires, bancs calcaires, Paléocène inférieur
-  zones à orbulines: grès, Mioène inférieur et moyen
-  Réseau hydrographique

La zone d'étude est à cheval sur trois domaines structuraux : le domaine rifain, le sillon sud-rifain et enfin le moyen Atlas central septentrional (Michard A., 1976).

4-1. Le Rif externe :

Le domaine pré-rifain constitue un paysage dominé par des collines argilo-marneuses à relief généralement mou. Sa morphologie est caractérisée par une succession de montagnes rocheuses séparées par de larges dépressions orientées Est-Ouest. Ces reliefs formant des structures anticlinales, correspondent à des affleurements du substratum Jurassique et/ou crétacé suivi de dépôts marno-sableuses du miocène moyen. Au sein des dépôts du miocène moyen ont été identifiés des éléments de l'éocène de l'oligocène et du miocène inférieur.

Dans notre zone d'étude, la zone pré-rifaine est subdivisée en un pré-rif interne et un pré-rif externe (Le Blanc D. 1975 ; Chalouan et al., 2001)

Le pré-rif interne, est constitué par des écaillés enracinées sous le méso-rif et dont la série sédimentaire débute au Lias.

Le pré-rif externe, intéressant notre secteur d'étude, est formé d'une épaisse série marneuse d'âge Miocène (S.L.), recouverte localement et anormalement par des nappes de glissement d'âge paléocène, éocène ou oligocène. Plus au sud, on note enfin l'existence du complexe tectono-sédimentaire du pré-rif. Il s'agit d'un olistostrome ou mélange miocène à klippe sédimentaires de nature et d'âge variés depuis le Trias au Tortonien supérieur (Vidal J.C., 1977)

Le plio-quadernaire constitue l'ensemble des dépôts détritiques continentaux associés soit aux différentes terrasses fluviales, soit aux glissements de terrain et aux dépôts superficiels.

4-2. Le moyen Atlas plissé :

Le primaire est constitué par des schistes et grès, parfois métamorphiques et associés à des volcanites, bien représentés dans le Jbel Tazzeqa (Bennouna A., 2006). Puis vient une série permo-triasique de marnes rouges continentales et lagunaires, discordantes sur le primaire, souvent accompagnées de coulées de basaltes doléritiques (100 à 120 mètres d'épaisseur) ; cette série rouge est salifère, le sel se présentant selon les endroits, en amas ou bien de façon diffuse selon les conditions de sédimentation de l'époque.

Les calcaires et dolomies du Lias viennent pratiquement en concordance sur le Permo-Trias. Le Lias inférieur est constitué d'une série massive épaisse de 100 à 120 mètres ; puis vient le Lias moyen sous forme de calcaires dolomitiques lités et de calcaires à silex et à chailles ou

de calcaires sublithographiques (épaisseur totale de 40 à 50 mètres). La série Jurassique se termine par les marnes du Toarcien et les calcaires de l'Aalénien-début du Bajocien (Robillard D., 1978).

Dans notre région d'étude l'ensemble jurassique constitue la première ride anticlinale, limitée à l'Ouest par l'accident nord moyen atlasique ; cette ride (Jbel Bou Massoud) est reliée à l'Est par le large synclinal à cœur Toarcien (Dayat Chiguer). Il faut noter que l'axe de cette gouttière synclinale montre une légère inclinaison vers le nord (cette structure tectonique à joué et joue encore un rôle important dans la karstification des calcaires et des dolomies de cette région).

Le plio quaternaire est marqué par des dépôts détritiques liés à l'Oued Taza et par des plaquages travertineux au piémont des reliefs carbonatés.

4-3. le couloir de Taza :

Sous les formations jurassiques au sud et à la limite avec le préif au nord, la dépression du couloir sud rifain aux environs de Taza, est comblée par les grès calcaires puis par de puissantes marnes du miocène terminal.

Le quaternaire est représenté par les terrasses fluviales de l'Oued Larbaa

5-La pédologie :

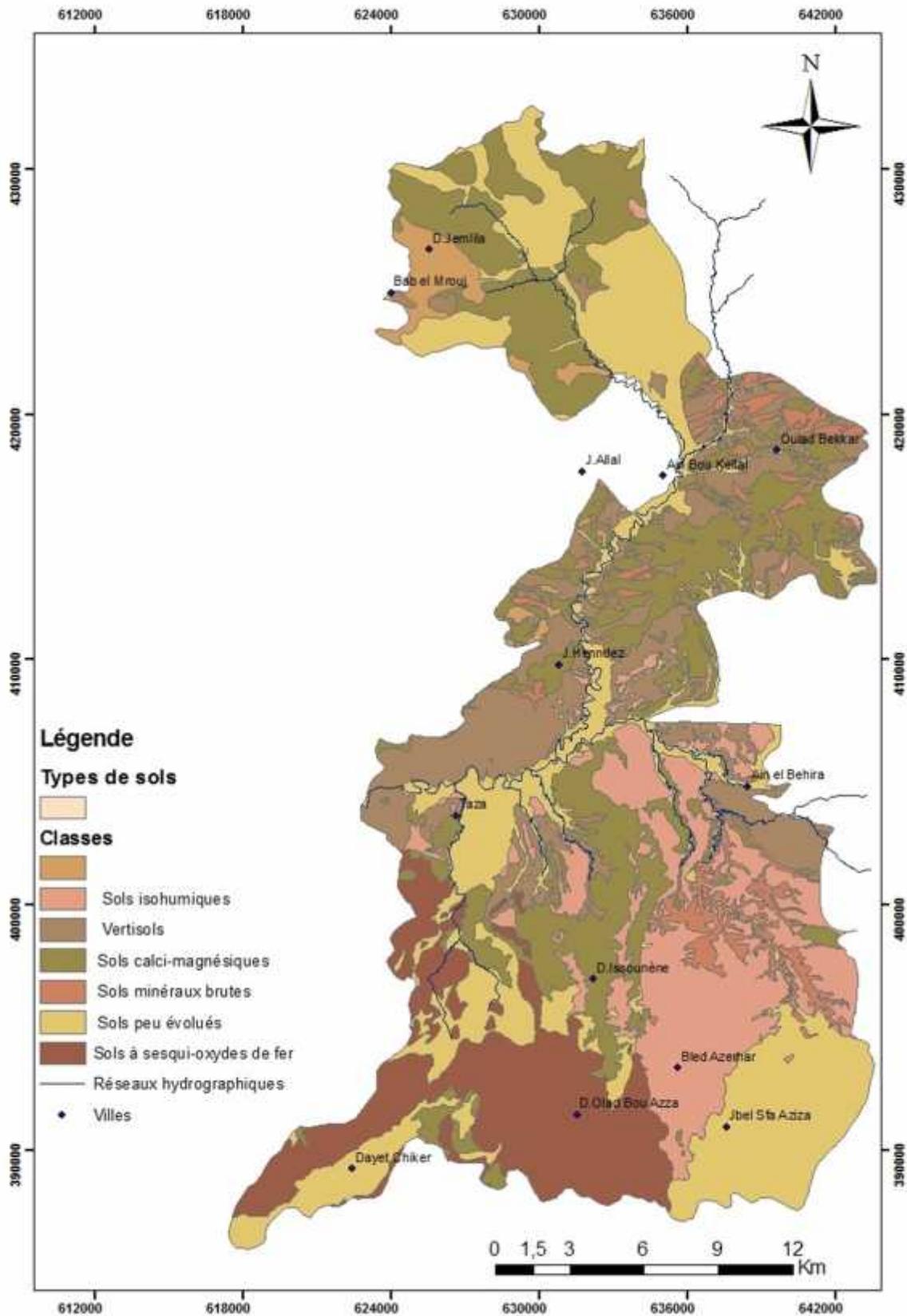


Figure 19 : Carte pédologique du bassin versant de l'Oued Larbaa

Figure 19

Le bassin versant de l'oued Larbaa est caractérisé par les types de sols suivants (*Figure 19*):

- **Les Sols peu évolués** Les sols peu évolués sont des sols jeunes qui se distinguent par une faible altération des minéraux et une faible teneur en matière organique laquelle se superpose généralement au substrat minéral sans former de complexe organo-minéraux. Ces sols ont des origines diverses liées au climat, à l'érosion ou encore aux apports extérieurs.

Dans notre secteur d'étude, ce type de sol est bien représenté en termes d'extension latérale dans le prérief au Nord de Ain Bou Kellal, dans le couloir de Taza, notamment à l'Est de la métropole et enfin dans le moyen Atlas au cœur de Dayet Chiker.

- **Les Vertisols** Les sols vertiques sont ainsi nommés parce qu'ils sont l'objet de mouvements verticaux déterminés par le retrait et le gonflement des argiles qui les constituent. Les sols vertiques sont, en effet, des sols très argileux, constitués d'argiles gonflantes. Ces mouvements vertiques incorporent la matière organique très profondément dans tout le profil du sol sans l'intervention d'une activité biologique. Donc Les vertisols ou (tirs) couvrent des surfaces importantes dans le Maroc atlantique, c'est-à-dire dans un triangle limité au N par la crête dorsale du Rif, à l'E et au S par le Moyen Atlas et le Haut Atlas, à l'W par l'Océan Atlantique. On en trouve également, mais en surfaces beaucoup plus limitées, sur la bordure de la Méditerranée.

Dans le secteur d'étude, ce type de sol est exclusivement cantonné dans le prérief externe et le couloir de Taza.

- **Les Sols isohumiques** Ce sont des sols épais, noirs, très riches en matières organiques qui se forment en région tempérée au climat sec (pluviométrie inférieure à 500 mm par an), sur un pédoclimax de prairie ou de steppe, de fruitées épineuses ou de forêt claire. Ils donnent des terres agricoles très fertiles. Il s'agit, au Maroc, de sols des régions méditerranéennes ou subtropicales. Ces sols sont caractéristiques des plaines, piedmonts et plateaux du Maroc atlantique (à l'exception de sa bordure côtière) et oriental.

Dans notre secteur ce type de sol se trouve presque uniquement dans l'avant pays sud-rifain (au sud de Ain el Bhira)

- **les sols calcimagnésiques** Les sols calcimagnésiques sont essentiellement formés sur des roches calcaires ou dolomitiques en place, à pente plus au moins forte, ou sur des dépôts de

pente recouvrant ces mêmes roches. Suivant leur degré d'évolution ils font partie soit des sols peu évolués d'apport, soit des sols isohumiques. Les sols calcomagnésimorphes se caractérisent, en effet, par une décalcarisation partielle relativement à la roche-mère, ce qui les différencie des sols peu évolués, et par l'absence d'accumulation et d'individualisation du calcaire, ce qui les différencie des sols isohumiques.

Dans notre secteur d'étude, ce type de sol se trouve bien développé dans le pré-rif, notamment à l'extrême nord du secteur où il est bien développé. Par ailleurs on note aussi sa présence au piémont du moyen Atlas plissé.

- **les Sols à minéraux bruts :**

Ils sont situés généralement sur pente assez forte où les couches superficielles sont constamment entraînées empêchant ainsi la formation du sol. Le couvert végétal est très peu significatif.

- Les sols minéraux bruts d'apport alluvial :**

Se localisent au niveau des lits d'oueds, ils présentent une texture sableuse et une forte charge caillouteuse.

- Les sols minéraux bruts d'apport éolien :**

Ils sont constitués de sables plus ou moins mobiles.

Dans notre secteur d'étude, ils sont très peu représentés ; ils se trouvent très localisés dans l'avant pays sud Rifain.

- **Les sols ferrallitiques :**

Ce sont des sols rouges très riches en oxydes de fer et en oxydes d'alumine, ils se forment sous couvert forestier et en climat tropical ou équatorial, ils sont très riches mais extrêmement fragiles.

Dès l'instant où l'on supprime le couvert forestier qui les protège de l'érosion, mais surtout du lessivage, ces sols se transforment rapidement en cuirasses par suite d'une latéritisation. Les oxydes de fer et d'alumine colloïdales précipitent pour former des nodules, qui une fois soudées, forment des cuirasses définitivement stériles.

Ce type de sol est bien développé sur le piémont du moyen Atlas.

Chapitre3 : Paramètres physiographiques du bassin versant de l'Oued Larbaa :

L'hydrologie des cours d'eau ainsi que leur dynamisme dépend vivement des caractéristiques physiographiques du bassin versant correspondant. Le relief, la forme et le réseau hydrographique constituent les principaux paramètres de l'étude physique du bassin versant en vue de caractériser son comportement vis-à-vis des différentes unités géologique qu'il traverse (Musy et Higy, 1998).

1. La forme :

Le bassin versant de L'oued Labaa, en amont du barrage Idriss premier, à la forme d'un croissant à concavité tournée vers l'Ouest, il est évident que cette forme va avoir une influence sur l'écoulement global et surtout sur l'allure de l'hydro gramme résultant.

1-1. Indice de compacité de Gravélius

Les classiques de l'hydrologie proposent, pour caractériser la géométrie d'un bassin versant, différents indices de forme destinés à comparer les bassins voire à estimer certaines de leurs caractéristiques hydrologiques. L'indice auquel il est le plus communément fait référence est l'indice de compacité, dit de Gravelius, on l'établi en comparant le périmètre du bassin versant à celui d'un cercle qui aurait la même surface. Le coefficient KG est égal au rapport de ces deux grandeurs. Si on désigne par A la surface du bassin versant en kilomètres carrés et par P son périmètre en kilomètres on a :

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

Avec :

KG : indice de compacité de Gravélius

A : surface du bassin versant (km²)

P : périmètre du bassin versant (km)

Dans notre étude : $P=183,26\text{Km}$ et $A=768,38\text{ km}^2$, ce qui conduit à un indice de compacité égal à **1,851**. Cette valeur traduit l'allongement du bassin, ainsi qu'un développement probable d'une érosion linéaire.

2. Le Relief :

L'allure de l'hydrogramme est influencée par la nature du relief du bassin versant, car de nombreux paramètres hydrométéorologiques varient avec l'altitude et la morphologie de ce dernier.

2-1.La carte hypsométrique :

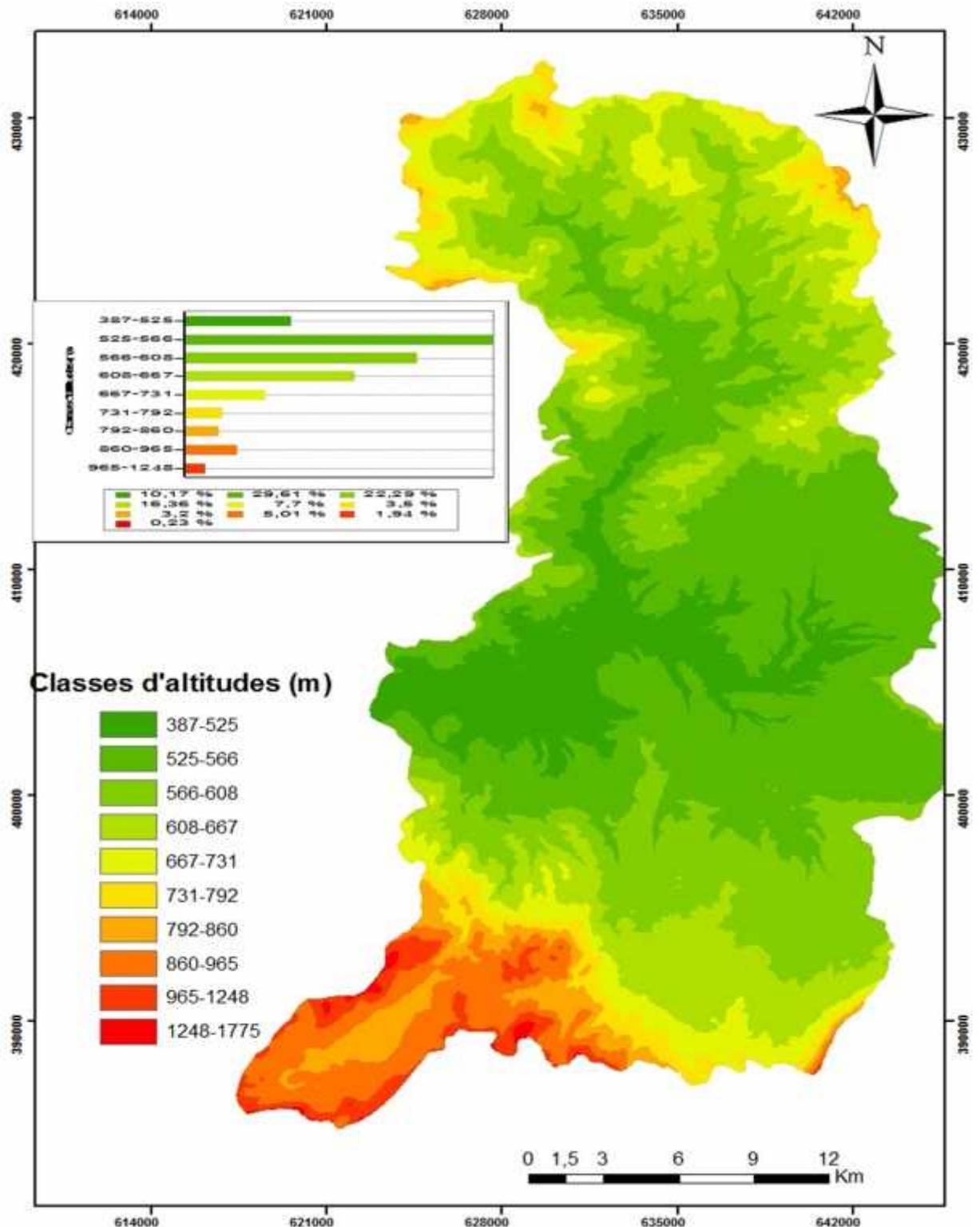


Figure 20 : Carte hypsométrique du bassin versant de l'Oued Larbaa

Figure 20

La carte hypsométrique (*Figure 20*), montre des tranches d'altitudes qui varient entre 387 et 1775m. Les zones de hautes altitudes (entre 860 et 1775) se situent dans le sud du bassin et représentent environ 7,18% de superficie sur le total du bassin versant.

En revanche, les zones de moyennes à basses altitudes (entre 387 et 860) se répartissent sur le milieu et la partie nord du bassin versant et représentent environ 92,83% de superficie sur le total du bassin versant.

2-2. La courbe hypsométrique :

La courbe hypsométrique représente la répartition de la surface du bassin versant en fonction de son altitude. Elle porte en ordonnée le pourcentage de surface du bassin et en abscisse les classes d'altitudes en mètres.

Classes	Surface en Km ²	% de surface	% au dessus de la limite inférieure
387-525	78,14	10,17	100
525-566	227,51	29,61	89,83
566-608	171,27	22,29	60,22
608-667	125,7	16,36	37,93
667-731	59,16	7,7	21,57
731-792	26,89	3,5	13,87
792-860	24,58	3,2	10,37
860-965	38,49	5,01	7,17
965-1248	14,9	1,94	2,16
1248-1775	1,76	0,23	1,93
Total	768,40	100,00	

Tableau 1

Tableau 1 : Répartition de la surface totale (en Km² et en %) du bassin versant de l'Oued Larbaa par tranche d'altitude.

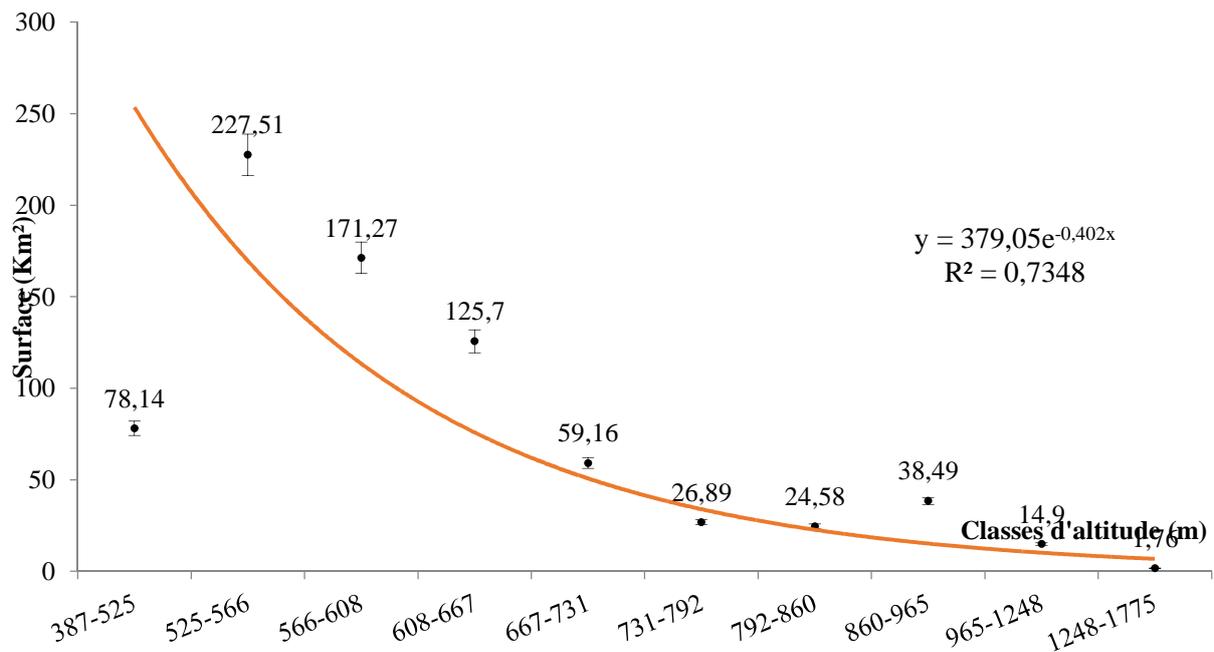


Figure 21 : Courbe hypsométrique du bassin versant l'oued Larbaa

Figure 21

2-3. Le rectangle équivalent :

Le rectangle équivalent est une représentation géométrique du contour du bassin versant transformé en rectangle. Celui-ci est tracé à partir de la longueur et de la largeur du bassin.

Les courbes de niveau y sont parallèles et sont tracées en respectant les répartitions hypsométriques. Ce rectangle est conçu pour pouvoir comparer les bassins versant du point de vue morphologique (Afkir E., 1985).

Soit L et l respectivement la longueur et la largeur du rectangle équivalent, elles sont définies comme suit :

$$L = \frac{K\sqrt{A}}{1,12} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{K}\right)^2} \right] \text{ et } l = \frac{K\sqrt{A}}{1,12} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{K}\right)^2} \right]$$

On obtient :

Classes	Longueur(Km)	Largeur(Km)
387-525	32,08	5,55
525-566	28,82	4,99
566-608	19,32	3,34
608-667	12,17	2,11
667-731	6,92	1,20
731-792	4,45	0,77
792-860	3,33	0,58
860-965	2,30	0,40
965-1248	0,69	0,12
1248-1775	0,69	0,11
Total	32,08	5,55

Tableau 2

Tableau2 : La longueur et la largeur du rectangle équivalent du bassin versant de l'Oued Larbaa.

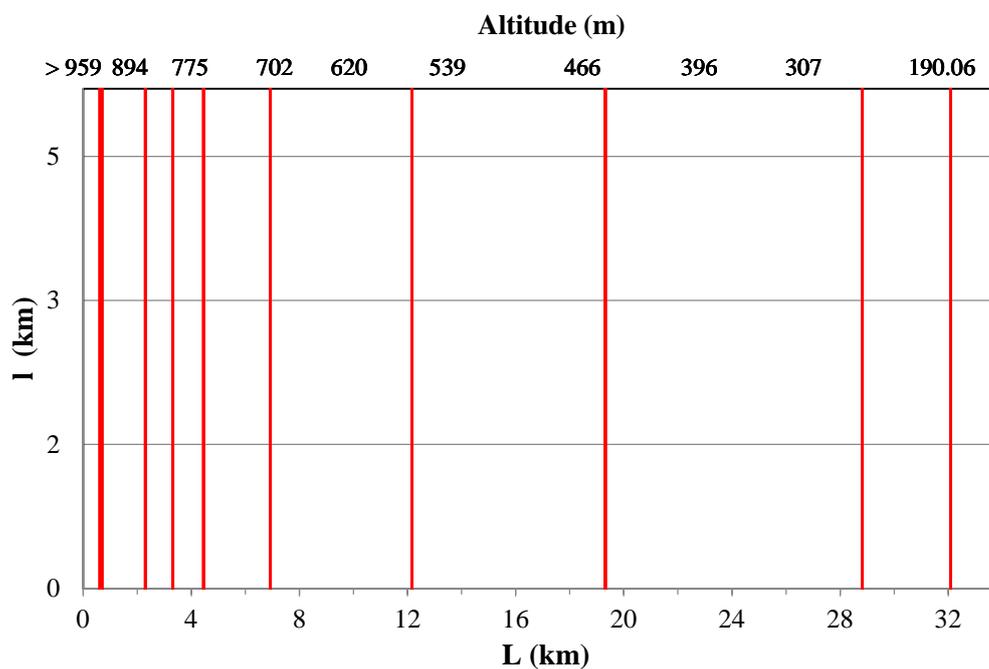


Figure 22 : le rectangle équivalent du bassin versant de l'Oued Larbaa

2-4 La pente :

La pente joue un rôle incontournable dans le cycle hydrologique, elle influence directement l'infiltration et le ruissèlement. Ainsi pour une même averse et à perméabilité équivalente, la dualité des partages entre écoulement superficiel et infiltration sur le bassin sera essentiellement en fonction de la pente (Abdellah R., 1997).

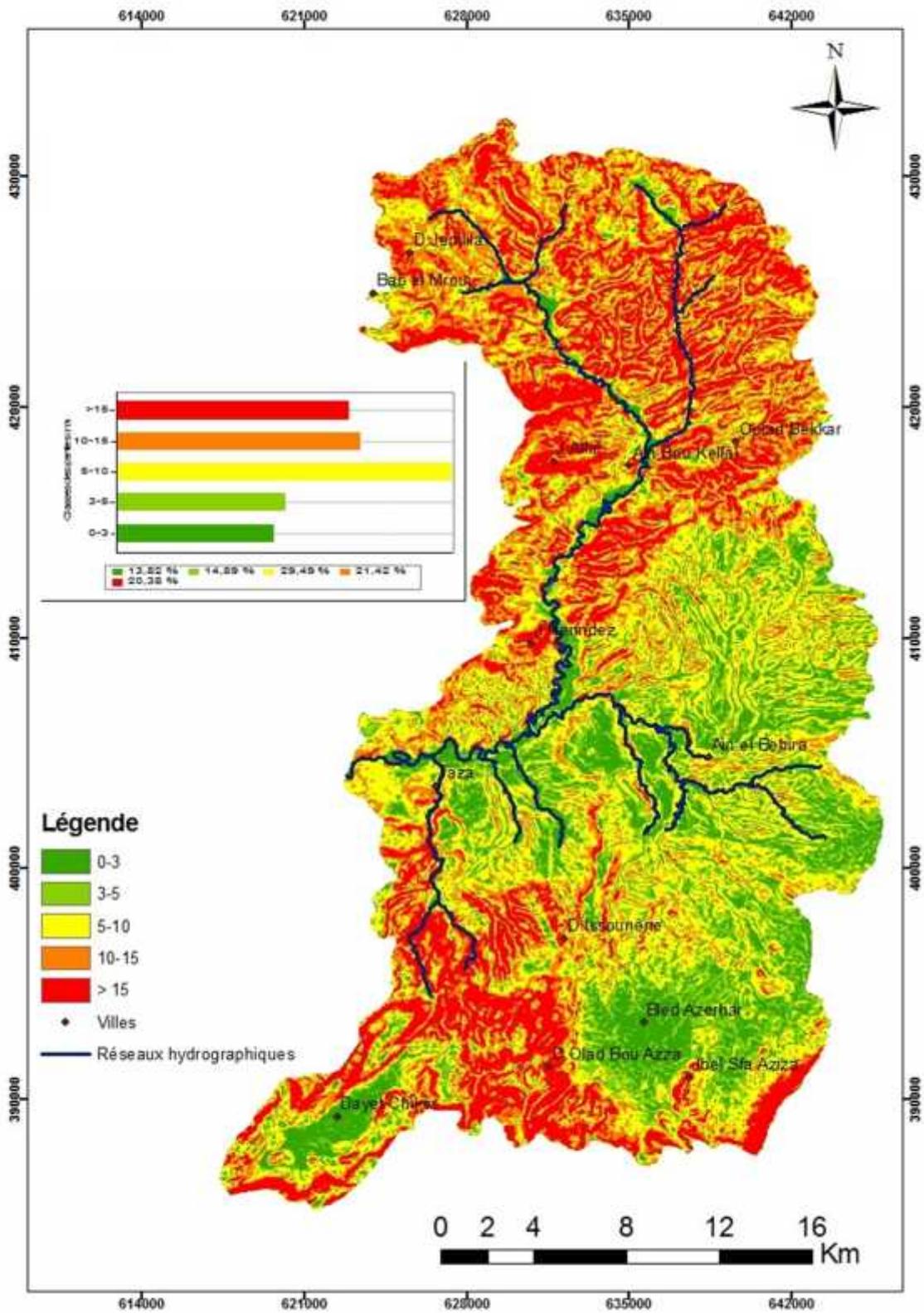


Figure 22 : Carte des pentes du bassin versant de l'Oued Larbaa

Figure 22

La densité des pentes les plus élevées est répartie en deux zones distinctes (*Figure 22*) , il s'agit des parties extrêmes nord et sud du bassin et représente environ 41,8% de superficie sur le total du bassin versant.

Les pentes les moins élevées se trouvent concentrées au milieu du bassin.et représentent environ 58,2% de superficie sur le total du bassin versant.

2-4-1.La pente moyenne :

La pente moyenne du bassin versant est une caractéristique importante qui renseigne sur la topographie du bassin. Elle est considérée comme une variable indépendante. Elle donne une bonne indication sur le temps de parcours du ruissellement direct et influence directement le débit de pointe lors d'une averse (Cosandey C, Robinson M, 2000).

L'estimation de la pente moyenne peut se faire par diverses relations.

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

Avec :

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

P_{moy} : La pente moyenne du bassin versant.

H : L'altitude moyenne(m)

L : la longueur du rectangle équivalent (Km)

D'où :

$$P_{moy} = 43,26$$

Donc la pente moyenne du bassin versant de l'Oued Larbaa est égale à **0,43%**, une valeur qui montre que le relief est assez faible

Chapitre 4 : Etude Hydrologique du bassin versant de l'Oued Larbaa

1. Cartes des précipitations moyennes :

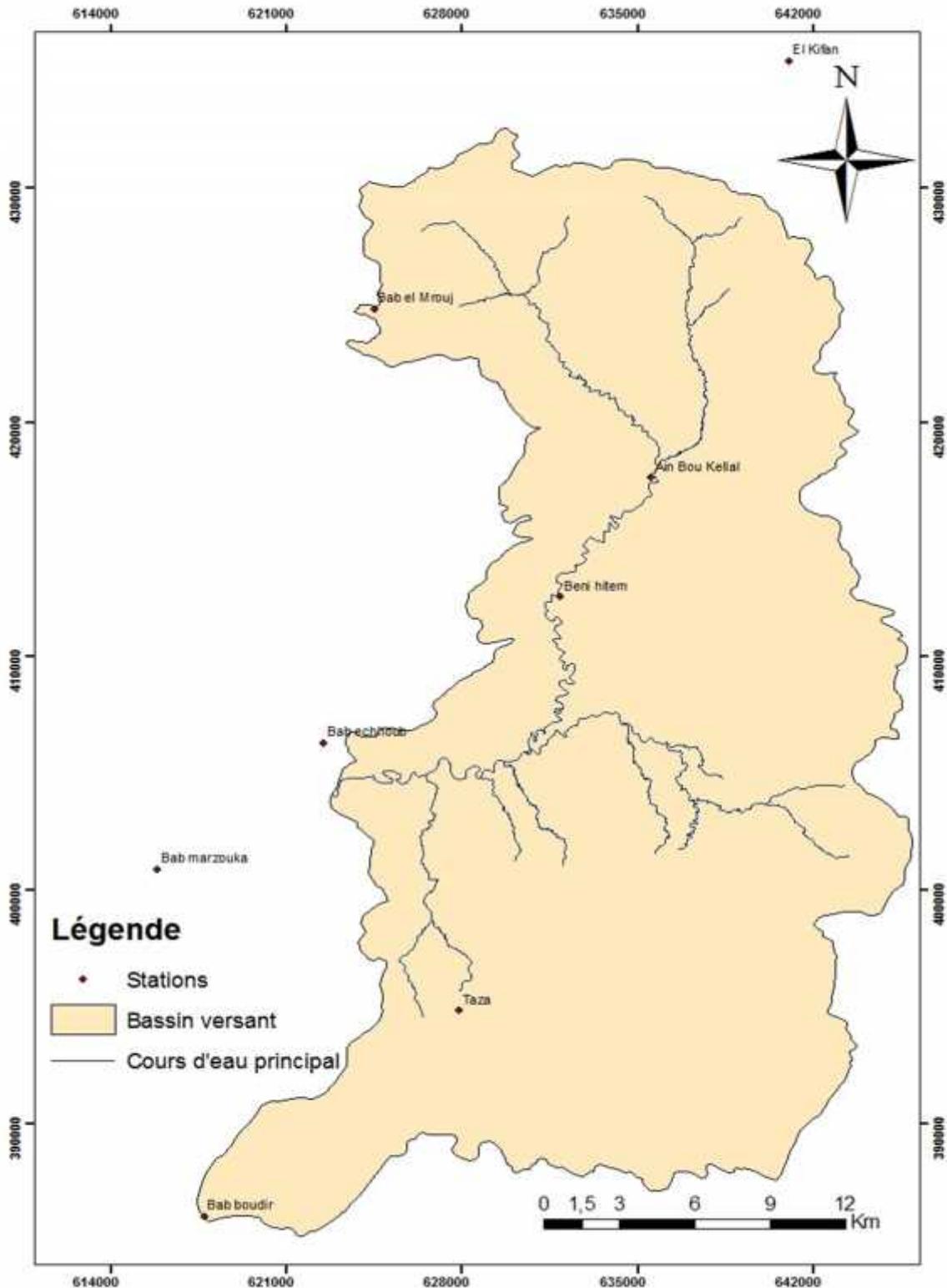


Figure 23 : La localisation des différentes stations à l'intérieur et à proximité du bassin versant de l'Oued Larbaa

Figure 23

1-1.Polygones de Thiessen :

La méthode de Thiessen est une méthode arithmétique dans laquelle on attribue à chaque pluviomètre un poids proportionnel à une zone d'influence présumée telle qu'un point situé dans cette zone soit proche en distance horizontale du pluviomètre correspondant que de tout autre pluviomètre. La méthode ne tient donc compte que de la distribution spatiale en plan des stations.

Cette méthode consiste à tracer autour des stations pluviométriques voisines un polygone formé par les médiatrices des segments de droite reliant ces stations.

Le bassin versant de l'Oued Larbaa dispose de neuf stations pour lesquelles sont tracés sept polygones

La superficie de chaque polygone est déterminée avec le logiciel Arcgis. Elle sert d'élément de pondération pour le calcul de la lame d'eau annuelle en appliquant la formule ci-dessous :

$$P_{moy} = \frac{\sum A_i \cdot P_i}{A}$$

Avec :

P_{moy} : Précipitations moyennes sur le bassin (mm)

P_i : Précipitations enregistrées à la station i (mm)

A_i : Superficie du polygone associée à la station i (km²)

$$\sum A_i$$

A : Aire totale du bassin en (km²)

Colonne1	x	y	z	Pi(mm)	Ai(km2)	Ai*Pi/At
Bab boudir	617700	386000	402	561,9	27,72	20,27
Bab echhoub	622470	406250	563	763,8	37,75	37,53
Bab marzouka	615850	400850	368	561,905882	30,37	22,21
Taza	627875	394800	510	638	258,43	214,58
Beni hitem	631900	412500	790	344,6	167,43	75,09
Ain Bou Kellal	635500	417600	550	619	173,05	139,41
Bab el Mrouj	624500	424800	1050	1135	73,62	108,75
Total					768,37	617,83

Tableau 3

Tableau 3 : Le calcul de la lame d'eau tombée par la méthode de Thiessen

Selon cette méthode la lame d'eau tombée sur le bassin versant de l'Oued Larbaa est égale à **617,83mm**

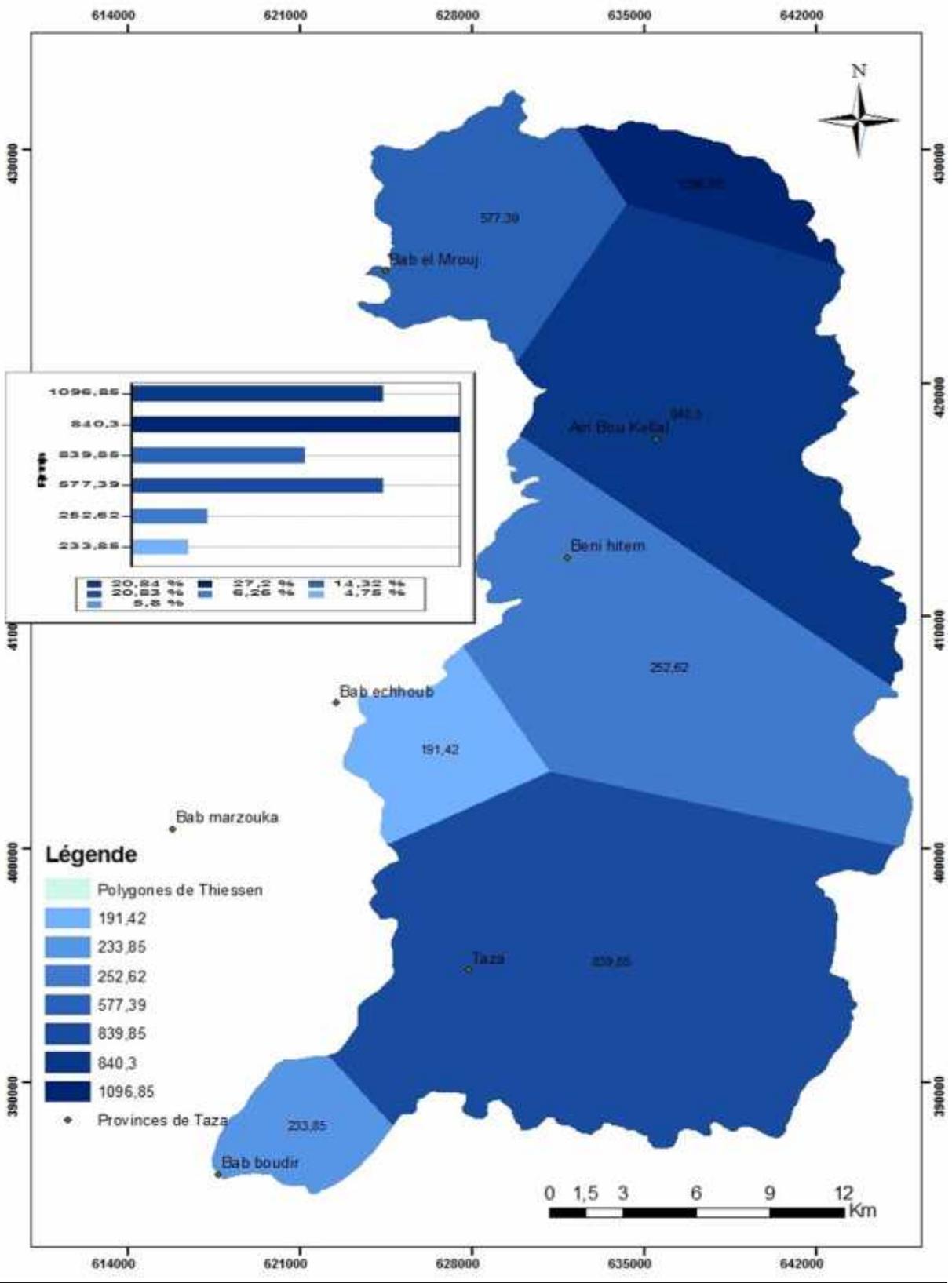


Figure 24 : Carte des polygones de Thiessen relative au bassin versant de l'Oued Larbaa

Figure 24

L'analyse de cette carte des polygones de Thiessen montre que les précipitations les plus fortes (> à 800mm) touchent les secteurs nord et sud du bassin alors que les valeurs minimales (< à 200mm) intéressent surtout la partie médiane du bassin versant.

1-2.Méthode des isohyètes :

Les isohyètes sont des lignes de même pluviosité (isovaleurs de pluies annuelles) tracées grâce aux valeurs pluviométriques acquises aux stations du bassin et aux autres stations avoisinantes si nécessaire.

La superficie comprise entre deux isohyètes est déterminée avec le logiciel Arcgis et la pluie moyenne peut être calculée de la manière suivante :

$$P_{moy} = \frac{\sum_{i=1}^K A_i P_i}{A} \text{ avec } P_i = \frac{h_i + h_{i+1}}{2}$$

Avec :

Pmoy : Précipitations moyennes sur le bassin (mm)

A : Surface totale du bassin (km²)

Ai : Surface entre deux isohyètes hi et hi+1 (km²)

K : nombre total d'isohyètes

Pi : Hauteur moyenne entre deux isohyètes (mm)

Précipitations(mm)					
Min	Max	Pi(mm)	Ai(km ²)		Ai*Pi/At
	367,5	400	383,75	13,43	6,71
	402	450	426	17,27	9,58
	449,5	510	479,75	51,6	32,22
	515	610	562,5	369,87	270,78
	605	730	667,5	251,4	218,41
	729,1	900	814,55	32,44	34,39
	899,9	1100	999,95	32,33	42,08
Total				768,34	614,15

Tableau 4

Tableau 4 :.Le calcul de la lame d'eau tombée par la méthode des isohyètes

Selon cette méthode la lame d'eau tombée sur le bassin versant de l'Oued Larbaa est égale à **614,15 mm**

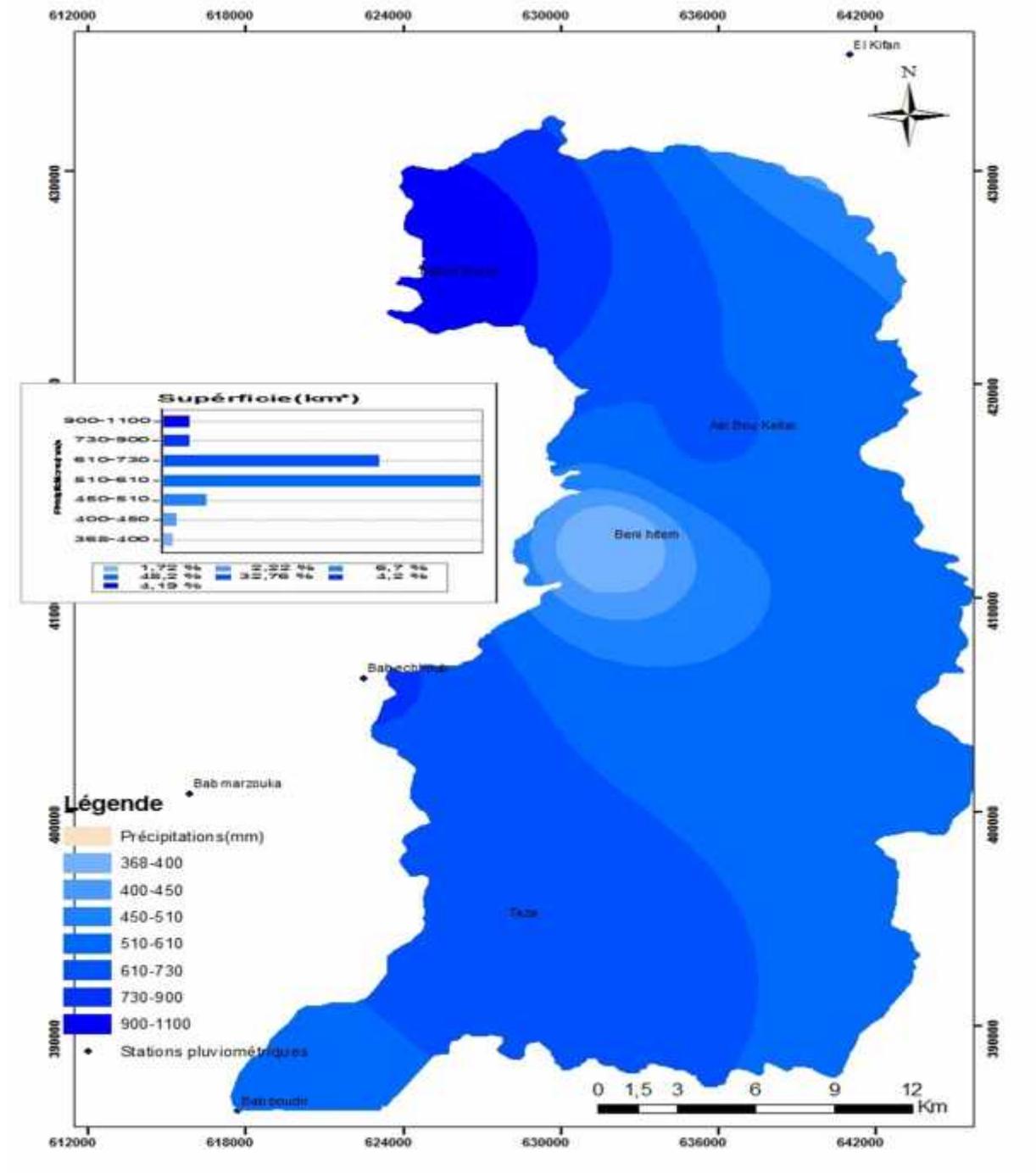


Figure 25 : Carte des isohyètes relatives au bassin versant de l'Oued Larbaa

Figure 25

La méthode des isohyètes, confirme presque parfaitement les résultats obtenus par la méthode de Thiessen

1-3. Conclusion

Le calcul de la lame d'eau précipitée sur le bassin versant de l'Oued Larbaa par ces deux méthodes donne des résultats relativement proches, la moyenne générale est de **616mm**.

2- Le volume :

Le volume d'eau tombé sur le bassin versant de l'Oued Larbaa peut être déterminé par la relation suivante :

$$V = P_{\text{moy}} * S_t$$

$$V = 616 \cdot 10^{-3} * 768,38 \cdot 10^6$$

$$v = 473,3 \cdot 10^6 \text{ m}^3$$

En conclusion le bassin versant de l'oued Larbaa reçoit un volume d'eau estimé à **473,3** million de mètre cube par an.

3- Ajustement des débits de pointe par la méthode de Gumbel :

La loi de Gumbel s'ajuste particulièrement bien à la modélisation des événements extrêmes comme les crues (Meylan et Musy, 1996, in El Morjani, 2003). Elle utilise une fonction double exponentielle avantageuse par l'utilisation de deux paramètres statistiques (paramètres de dispersion α et de position β), ce qui garantit une certaine robustesse à l'ajustement.

Parmi les lois de distribution qui peuvent rendre compte de la statistique des phénomènes extrêmes, c'est la loi de Gumbel qui s'adapte le mieux aux variables pluviométriques

La loi de Gumbel a pour expression :

$$F(x) = \exp\left[-\exp\left(-\frac{x-x_0}{g}\right)\right]$$

Avec :

$$u = \frac{x-x_0}{g}$$

Dans un graphique de Gumbel la distribution s'écrit comme suit :

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

U étant la variable de Gumbel. Le terme g représente la pente de la droite d'ajustement. Bien souvent et surtout pour les pluies, on appelle g "le Gradex" (contraction de gradient de l'exponentielle) (Meylan et Musy, 1999, in El Morjani, 2003) En hydrologie, la Probabilité des valeurs d'un échantillon observé est donnée par la formule de Hasen:

$$F_i = \frac{i-0.5}{n}$$

Les calculs des débits maximums estimés ont été réalisés sur la base de données des débits de la crue du 27/9/2000 (**) (service hydrologique de Taza. 2001 ;in Layane B.,2013)

	Qp max** (m3/s)	rang	Fréquence empirique (F)	Variable réduite de Gumbel (u)	Qp max estimés (m3/s)
O.Taza	129(**)	1	0,125	-0,73	140,68
O.Lahdar	550(**)	2	0,375	0,02	572,32
O.Larbaa	1049(**)	3	0,625	0,76	994,89
O.inaouène	1843(**)	4	0,875	2,01	1717,72

Tableau 5

Tableau 5 : Analyse fréquentielle des débits de pointe, ajustement par la méthode de Gumbel

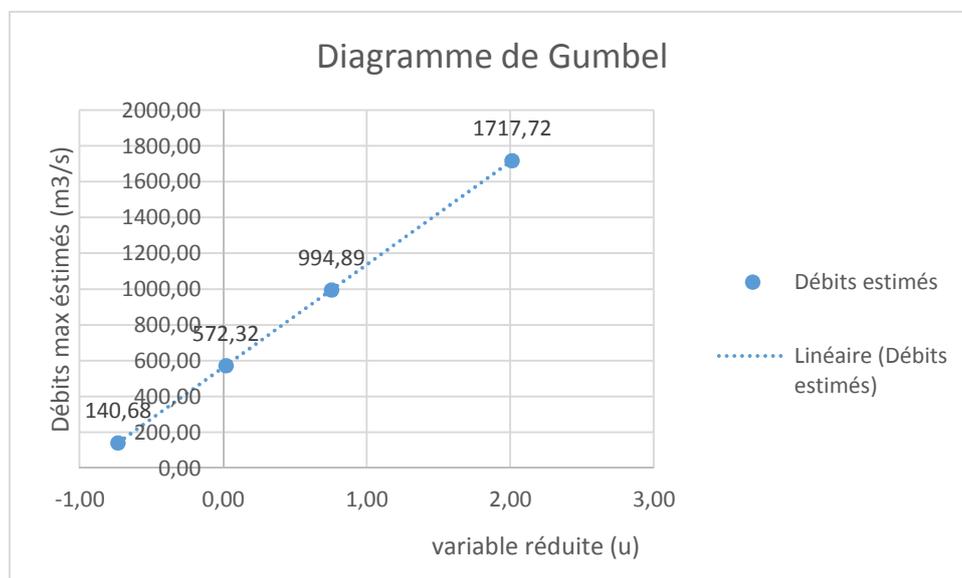


Figure 26: ajustement graphique de la loi de Gumbel sur les données de débits de pointe.

Figure 26

L'analyse de ces deux documents montre une disparité des valeurs des débits maximales estimés, en effet on passe d'une valeur minimale sur l'Oued Taza (140,68m³/s) à une valeur maximale sur l'Oued Inaouène (1717,72 m³/s). Par ailleurs on note des valeurs de débit progressives sur les affluents provenant du Rif externe (Oued Lahdar (572,32m³/s) et Oued Larbaa (994,89m³/s))

On constate que l'Oued Larbaa contribue en grande partie en alimentation l'Oued Inaouène.

4- 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 situé le plus loin possible de l'exutoire pour atteindre ce dernier. Théoriquement on estime que T_c est la durée comprise entre la fin de la pluie nette et la fin du ruissellement.

Pratiquement le temps de concentration peut être déduit de mesures sur le terrain ou s'estimer à l'aide de formules le plus souvent empiriques.

Dans cette étude nous avons calculé le temps de concentration par deux formules empiriques:

- La formule de Giondotti :

$$T_c = \frac{4\sqrt{S} + 1.5L}{0.8\sqrt{\Delta H}}$$

T_c : le temps de concentration en heure.

S : la surface du bassin versant en km².

L : la longueur du talweg en Km.

H : la dénivelée maximale du bassin versant en m.

- La formule de Turrazza :

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

T_c : le temps de concentration en min.

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

La valeur adoptée est la moyenne des résultats des deux formules.

Giondotti	Turrazza	Valeur adoptée
-----------	----------	----------------

Tc en (H)	5,33	7,67	6,5
-----------	------	------	-----

Tableau 6

Tableau 6 : Le temps de concentration des eaux en heures dans le bassin versant de l'Oued Larbaa

D'après la moyenne obtenue à partir des méthodes Giondotti et Turrazza, une goutte d'eau traverse notre bassin versant depuis les altitudes les plus hautes jusqu'à l'exutoire en 6,5 heures.

Chapitre5 : Calcul et cartographie de l'érosion hydrique dans le bassin versant de l'Oued Larbaa

1. Méthodes utilisées pour étudier l'érosion :

Plusieurs méthodes ont été développées pour étudier le phénomène de l'érosion. Les méthodes les plus adaptées au contexte sont :

Méthode « Universal Soil Loss Equation » (Wischmeier et Smith) :

Une des méthodes les plus répandues pour estimer l'érosion hydrique est l'Universal Soil Loss Equation (USLE). Cette équation, développée par Wischmeier et Smith en 1978 pour les milieux cultivés, prend en compte les paramètres suivant : l'érosion pluviale, la topographie, la couverture végétale et la protection du sol (Deumlich et al., 2006). Ce modèle empirique de l'érosion du sol a été révisé (le Revised Universal Soil Loss Equation, RUSLE) (Renard et al., 1997). Cette méthode se base sur les paramètres suivants : l'érosion pluviale, l'érosion du sol, la pente, la couverture du sol et les pratiques qui y sont faites ainsi que les mesures de conservations mises en place (Yue-Qing et al., 2009).

Modèle d'Érosion hydrique en milieu semi-aride de Forte Énergie de Relief (Tidiane et al.) :

Une équipe du CARTEL propose, quant à elle, un modèle d'érosion hydrique adapté aux milieux semi-arides caractérisés par un relief escarpé. Il s'agit du Modèle d'Érosion hydrique en milieu semi-aride de Forte Énergie de Relief (MEH-SAFER) (Tidiane et al., 2003). Il se base sur une méthode d'exploitation d'images satellitaires multisources (RSO de RADARSAT-1, ETM+ de Landsat-7 et HRV de SPOT-4) couplée à un nouveau modèle de cartographie de la vulnérabilité topographique (MNT) et à l'analyse discriminante. Selon les résultats obtenus en Bolivie, ce modèle donne une précision de 80 % (ib.). Ce modèle a été développé pour cartographier les risques d'érosion hydrique. L'approche consiste, en premier

lieu, à réaliser une carte de potentiel de ruissellement en intégrant des données hydropluviométriques et des unités géoécologiques et, par la suite, de combiner cette carte à l'esquisse géomorphologique. Le résultat obtenu est une carte de vulnérabilité topographique (Ouattara et al., 2002).

Modèle évènementiel « KINematic Runoff and EROsion » (Wahlstrom et al.) :

Lors d'une étude réalisée à l'Île de Kaho'olawe à Hawaï, Wahlstrom et al. ont aussi appliqué un modèle dédié à l'étude de l'érosion hydrique. Ils se sont concentrés plus spécifiquement sur le ruissellement et la quantité de sédiments transportés à l'occasion d'un épisode pluvieux. Ce modèle évènementiel se nomme KINEROS (KINematic Runoff and EROsion). Selon celui-ci, le bassin versant est représenté par une cascade de parcelles et de canaux. À partir de cette représentation, il est possible de faire une estimation quantitative de l'infiltration, du ruissellement Hortonien (apparaît lorsque les intensités de pluie dépassent la capacité d'infiltration des sols) et de l'érosion. Trois algorithmes sont utilisés : un algorithme d'infiltration (incluant la conductivité hydraulique à saturation, la quantité de pluie infiltrée cumulée, l'écoulement capillaire net, la porosité et le stock « initial soil water content »), un algorithme de ruissellement (basé sur la hauteur de la lame d'eau ruisselée, des constantes liées à la pente, la rugosité hydraulique et le nombre de Reynolds, la pente de la ligne d'eau et le coefficient de rugosité de Manning) et un algorithme de transport des sédiments (comportant la vitesse de l'écoulement, la vitesse de cisaillement, le diamètre des sédiments, la hauteur de l'eau ainsi que la gravité spécifique du sédiment) (Wahlstrom et al., 1999).

Modèle « Water Prediction Project » (Bhuyan et al.) :

Le ruissellement et les pertes de sol peuvent aussi être évalués à partir d'un modèle nommé Water Erosion Prediction Project (WEPP) (Bhuyan et al. 2002). Ce modèle, développé par Flanagan et Nearing (1995), se base sur de multiples paramètres dont les notions de base de l'infiltration, la surface de ruissellement, la croissance des plantes, les résidus de décomposition, l'hydraulique, le labourage, la consolidation du sol ainsi que les mécanismes d'érosion (Nearing et al., 1989). Afin d'intégrer ce modèle dans les SIG, un outil a été créé. Cet outil, appelé Geospatial Modelling of Soil Erosion (GEMSE), est composé de plusieurs bases de données (le climat, le sol et la topographie ainsi que l'occupation du sol) (Baigorria and Romero, 2007).

Cartographie de l'aléa « érosion des sols » :

Batti (2005) a, quant à lui, tenté de spatialiser les pluies extrêmes et de cartographier l'aléa « érosion des sols » dans les bassins versants en amont du lagon Saint-Gilles à l'île de la Réunion. Ces études se sont concentrées sur la probabilité qu'il y ait arrachement et transport de particules solides. Pour effectuer la spatialisation des pluies extrêmes, une 26 analyse des données climatiques a d'abord été faite. Par la suite, il a caractérisé des distributions d'intensités extrêmes selon l'approche stochastique. Cette approche se base sur la détermination des Intensités-Durées-Fréquences (I-D-F). Afin de représenter la variabilité des pluies extrêmes dans l'espace et dans le temps, Batti (2005) a employé le Gradex des pluies, un paramètre de la loi Gumbel. D'après la méthode AURELHY (Benichou et Le Breton, 1987), une caractérisation de l'environnement topographique de la zone étudiée est préalablement faite en considérant les principales composantes du relief. Cette caractérisation est ensuite mise en relation avec la variable pluviométrique. Pour terminer, la variabilité spatiale du Gradex est déterminée à l'aide d'une régression linéaire multiple entre les composantes principales du relief et le Gradex. Un modèle qualitatif a également été appliqué à la zone d'étude. À partir de la méthodologie élaborée par Le Bissonnais et al. (2001), le processus d'érosion est influencé par divers facteurs dont le sol, l'occupation du sol, la topographie et le climat (Batti, 2005).

Cartographie de la sensibilité des sols à l'érosion (Dumas) :

Pour évaluer la sensibilité des sols à l'érosion des communes de Bouloupari, de Dumbéa et de Paita en Nouvelle-Calédonie, Dumas a réalisé une modélisation qualitative basée sur une analyse multicritère. La pente, la nature du substrat et l'occupation du sol sont les principaux facteurs pris en compte par cet auteur. À partir de l'analyse de ces facteurs, quatre niveaux de sensibilité des terrains sont proposés : faible, moyen, fort et très fort (Dumas, 2004).

Cartographie de l'aléa « érosion hydrique » (Luneau) :

Dans la continuité de cette étude cartographique réalisée par Dumas (2004), Luneau définit l'aléa « érosion hydrique » comme la combinaison de la sensibilité des sols et des précipitations. L'indice de l'érodibilité des sols, le degré de protection de la couverture végétale, la pente, la courbure horizontale, la courbure de profil, les surfaces drainées et les données pluviométriques sont les indicateurs qui ont été extraits. Un modèle statistique par évaluation multicritère a été développé à partir de ces indicateurs qui ont été pondérés lors d'une phase de standardisation (Luneau, 2006).

Trois indices utilisés pour estimer l'érosion des sols (Atherton et al.) :

Lors de recherches réalisées sur le phénomène d'érosion des bassins versants à Fidji, Atherton et al. (2005) ont élaboré un indice « Relative Erosion Prediction » (REP). Cet indice représente une mesure relative de prédiction de l'érosion des sols. Ce modèle est basé sur cinq principaux facteurs environnementaux de l'érosion : la pente, l'occupation du sol, les précipitations absolues ou saisonnières et l'érodibilité des sols. Pour chaque bassin versant à l'étude, des indices statistiques ont été obtenus suite à la combinaison des différentes couches d'information. Un autre indice le Watershed Development Index (WDI) a aussi été développé par ces auteurs pour représenter le degré d'impact des infrastructures sur le bassin versant. Pour ce faire, la densité des routes, le nombre de cours d'eau traversés par les routes par kilomètre carré et le degré de déforestation sont les paramètres qui ont été pris en compte. En combinant le REP et le WDI, on obtient le Composite Threat Index (CTI). Ce nouvel indice représente le risque d'érosion sur le bassin versant (Atherton et al., 2005).

Modèle d'évolution des terrains « SIBERIA » (Willgoose et Riley) :

Dans le but de réhabiliter une mine d'aluminium au nord de l'Australie, Hancock et al. (2008) ont tenté de prédire la stabilité de la surface exploitée en évaluant l'érosion et l'évolution des modèles de terrain. Pour ce faire, Hancock et al. (2008) utilisent le modèle d'évolution des terrains nommé SIBERIA développé par Willgoose et Riley (1993). Ce modèle mathématique simule l'évolution géomorphologique du terrain soumis à l'érosion fluviale, à l'érosion diffuse et aux processus de transport de masse. Ce modèle effectue le lien entre l'hydrologie, l'érosion et la dimension spatio-temporelle (Hancock et al., 2008).

2. L'équation universelle des pertes en terre (RUSLE) :

2-1. Origine du modèle :

Vingt ans après la mise en place des essais d'érosion en parcelles dans une bonne dizaine d'Etats d'Amérique du Nord, il existait une accumulation d'un grand nombre de données sur l'érosion dont il convenait de faire la synthèse. En 1958, Wischmeier, statisticien du Service de Conservation des Sols fut chargé de l'analyse et de la synthèse de plus de 10.000 mesures annuelles de l'érosion sur parcelles et sur petits bassins versants dans 46 stations de la Grande Plaine américaine. L'objectif de Wischmeier et Smith (1960; 1978) était d'établir un modèle empirique Baptisé USLE (Universal Soil Loss Equation) de prévision de l'érosion à l'échelle du champ cultivé pour permettre aux techniciens de la lutte antiérosive de choisir le type

d'aménagement nécessaire pour garder l'érosion en-dessous d'une valeur limite tolérable étant donné le climat, la pente et les facteurs de production.

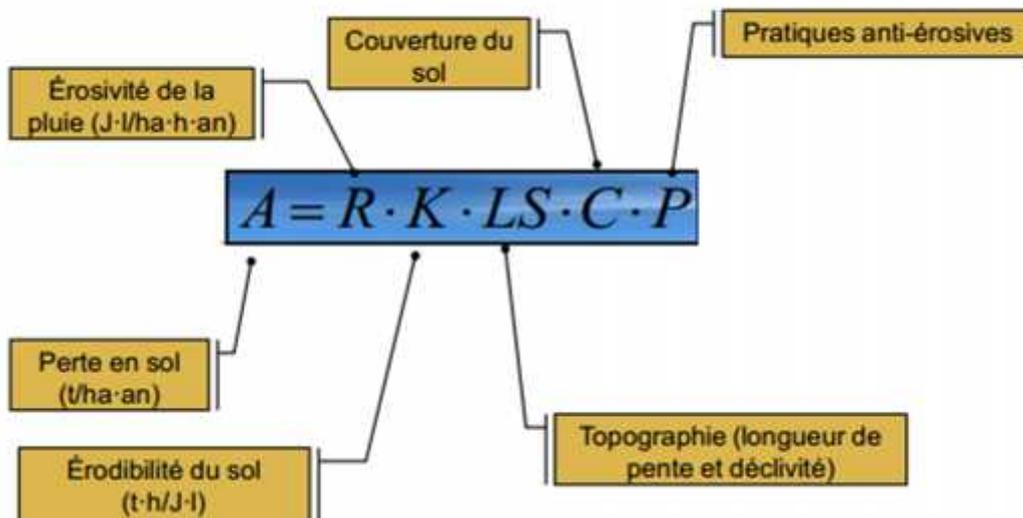
2-2. Définition :

L'équation universelle des pertes en terre (EUPT, mieux connue par son abréviation anglaise, USLE) prévoit le taux annuel moyen d'érosion à long terme sur la pente d'un champ, en fonction de la configuration des pluies, du type de sol, de la topographie, de l'assolement et des pratiques de gestion des cultures. L'USLE prévoit uniquement l'importance des pertes de terre qui résultent des érosions en nappe ou en rigoles sur une pente simple sans toutefois tenir compte des pertes de terre supplémentaires qui peuvent être attribuables aux autres formes d'érosion associées au ravinement, au vent ou au travail du sol. Ce modèle de prévision de l'érosion a été conçu pour mesurer l'influence de l'assolement et du système de gestion des cultures sur l'érosion, mais il peut aussi servir à prévoir l'érosion dans un cadre qui n'est pas agricole, notamment sur des chantiers. L'USLE peut servir à comparer les pertes de terre provenant d'un champ donné soumis à un assolement et à un système de gestion des cultures particuliers, à des taux de « pertes de terre tolérables » ou à un autre type d'assolement ou système de gestion des cultures, afin de déterminer la pertinence des mesures de conservation du sol dans la planification des activités agricoles. Cinq grands facteurs servent à calculer les pertes de terre en un endroit donné. Chaque facteur est une estimation numérique d'une composante précise qui affecte la gravité de l'érosion du sol à un endroit donné. Les valeurs d'érosion obtenues par l'application de ces facteurs peuvent varier considérablement en raison des différentes conditions météorologiques. Par conséquent, les valeurs obtenues par l'USLE représentent avec plus de précision les moyennes à long terme. Toile de fond L'équation universelle des pertes en terre (EUPT, mieux connue par son abréviation anglaise, USLE) prévoit le taux annuel moyen d'érosion à long terme sur la pente d'un champ, en fonction de la configuration des pluies, du type de sol, de la topographie, de l'assolement et des pratiques de gestion des cultures. L'USLE prévoit uniquement l'importance des pertes de terre qui résultent des érosions en nappe ou en rigoles sur une pente simple sans toutefois tenir compte des pertes de terre supplémentaires qui peuvent être attribuables aux autres formes d'érosion associées au ravinement, au vent ou au travail du sol. Ce modèle de prévision de l'érosion a

été conçu pour mesurer l'influence de l'assolement et du système de gestion des cultures sur l'érosion, mais il peut aussi servir à prévoir l'érosion dans un cadre qui n'est pas agricole, notamment sur des chantiers. L'USLE peut servir à comparer les pertes de terre provenant d'un champ donné soumis à un assolement et à un système de gestion des cultures particuliers, à des taux de « pertes de terre tolérables » ou à un autre type d'assolement ou système de gestion des cultures, afin de déterminer la pertinence des mesures de conservation du sol dans la planification des activités agricoles.

Cinq grands facteurs servent à calculer les pertes de terre en un endroit donné. Chaque facteur est une estimation numérique d'une composante précise qui affecte la gravité de l'érosion du sol à un endroit donné. Les valeurs d'érosion obtenues par l'application de ces facteurs peuvent varier considérablement en raison des différentes conditions météorologiques. Par conséquent, les valeurs obtenues par l'USLE représentent avec plus de précision les moyennes à long terme.

2-3. ÉQUATION UNIVERSELLE DES PERTES EN TERRE (EUPT)



2-3-1. Paramètres du modèle :

A : exprime les pertes de terre annuelles moyennes possibles à long terme en tonnes par acre par année. Cette valeur peut ensuite être comparée aux limites de « pertes de terre tolérables »

R : correspond au facteur de pluie et de ruissellement par secteur géographique. Plus les précipitations sont intenses et plus elles durent longtemps, plus grands sont les risques d'érosion. On trouve le facteur R dans le tableau 1 en fonction du comté et de la station météorologique où le calcul a été fait.

$$\log R_b = 1.74 \log \frac{P_i^2}{P} + 1.29$$

Avec :

- P_i : représente les précipitations mensuelles
- P : les précipitations annuelles en mm.

K : représente le facteur d'érodibilité du sol. Il s'agit de la perte de terre moyenne en tonnes/acre par unité de superficie pour un sol particulier, dans un champ travaillé constamment laissé en jachère, qui possède une pente dont les caractéristiques ont été arbitrairement fixées à 72,6 pi pour la longueur et à 9 % pour l'inclinaison. Le facteur K est une mesure de la vulnérabilité des particules de sol au détachement et au transport par la pluie et le ruissellement. La texture est le principal facteur qui influence le facteur K, mais la structure, la teneur en matière organique et la perméabilité du sol ont aussi un rôle à jouer.

$$100K_i = 2.1M^{1.4} \cdot 10^{-4} 12 - a + 3.25 b - 2 + 2.5(c - 3)$$

Avec :

- M : est calculé par la formule $M = (\% \text{ sable fin } + \text{limon}) \cdot (100 - \% \text{ argile})$,
- A : est le pourcentage de matière organique,
- B : est le code de la perméabilité,
- C : est le code de la structure.

Pour pallier à certaines imperfections notamment la réduction de la vitesse du ruissèlement par effet Splash (Dumas J., 1964) et (SADIKI Abdelhamid, 2004) ont effectués un ajustement à l'équation et K devient :

$$K_{ajusté} = K(0,983 - 0,0189 X + 0,0000973 X^2)$$

Avec :

- X : est le pourcentage des éléments grossiers de taille > 2 mm en surface.
- K : est le facteur calculé par l'équation de Wischmeier & Smith.

LS : est le facteur de longueur et d'inclinaison de la pente. Le facteur LS représente un rapport des pertes de terre sous des conditions données, aux pertes de terre en un endroit caractérisé par une inclinaison « standard » de 9 % et une longueur de pente de 72,6 pieds. Plus la pente est forte et longue, plus élevé est le risque d'érosion. On établit le facteur LS à l'aide soit du tableau 3a, Facteur LS, soit de l'équation servant au calcul du facteur LS donnée plus bas.

$$LS_1 = \frac{A_{s,i}^{0.6}}{22.13} \frac{\sin \alpha_1^{1.3}}{0.0896}$$

Avec :

- $A_{s,i}$: Superficies en (m²)
- i : Pente en degré

C : correspond au facteur de culture (végétation) et de gestion. Ce facteur sert à déterminer l'efficacité relative des systèmes de gestion du sol et des cultures en termes de prévention des pertes de terre. Le facteur C est un ratio qui compare les pertes de terre provenant d'une terre faisant l'objet d'une culture et d'un système de gestion spécifiques et les pertes correspondantes dans un champ travaillé constamment laissé en jachère. On établit le facteur C en multipliant les éléments « type de culture » et « méthode de travail du sol » qui sont propres au champ. Le facteur C ainsi obtenu est une valeur généralisée du facteur C pour une culture en particulier, et ne tient pas compte des rotations des cultures, du climat ni de la répartition annuelle des précipitations dans les différentes régions agricoles du pays.

Toutefois, ce facteur C généralisé donne des chiffres relatifs pour différents assolements et systèmes de travail du sol; il aide ainsi à évaluer les avantages respectifs de chaque système.

La détermination du facteur C repose sur la densité de la couverture de la surface du sol par la végétation et sur la hauteur des strates végétales.

P : correspond au facteur de pratique de conservation. Il reflète les effets des pratiques qui réduisent la quantité d'eaux de ruissellement et la vitesse de ruissellement et qui réduisent de ce fait l'importance de l'érosion. Le facteur P représente le ratio des pertes de terre associées à une pratique de conservation aux pertes de terre associées à la culture en lignes dans le sens

de la pente. Les pratiques de conservation les plus couramment utilisées sont le travail du sol à contre-pente, la culture suivant les courbes de niveau et la culture en bandes

2-3-2. MÉTHODE D'UTILISATION DE L'USLE

1. Trouver le facteur R.
2. En fonction de la texture du sol, trouver le facteur K . Si un champ comporte plus de un type de sol et que ceux-ci ne sont pas très différents, utiliser le type de sol qui caractérise la plus grande partie du champ. Répéter cette étape, au besoin, pour les autres types de sol.
3. Diviser le champ en sections d'inclinaison et de longueur de pente uniformes. Attribuer une valeur LS à chaque section.
4. Trouver les éléments type de culture et méthode de travail du sol propres à la culture envisagée. Multiplier ces deux éléments afin d'obtenir le facteur C
5. Trouver le facteur P en fonction des pratiques de conservation utilisées.
6. Multiplier les cinq facteurs afin d'obtenir la perte de terre par acre.

2-3-3 TAUX DE PERTES DE TERRE TOLÉRABLES

On entend par « perte de terre tolérable » la quantité annuelle maximale de terre qui peut être retirée avant que la productivité naturelle du sol à long terme ne soit compromise.

2-3-4. STRATÉGIES DE GESTION POUR RÉDUIRE LES PERTES DE TERRE

Une fois qu'il a établi les pertes de terre annuelles possibles pour un champ, l'agriculteur peut chercher des moyens de ramener ces pertes à un niveau tolérable. Des Stratégies de gestion destinées à réduire les pertes de terre sont envisageables.

Facteur	Stratégies de gestion	Exemple
R	Le facteur R pour un champ ne peut être modifié.	–
K	Le facteur K pour un champ ne peut être modifié.	–
LS	L'aménagement de terrasses permet de réduire la longueur de la pente et du même coup les pertes de terre.	L'aménagement de terrasses exige un investissement supplémentaire et perturbe quelque peu les activités de la ferme. Envisager d'abord la possibilité de recourir à d'autres pratiques de conservation du sol.
C	Le choix de types de culture et de méthodes de travail du sol qui abaissent la valeur du facteur C amène une réduction de l'érosion.	Envisager les systèmes culturaux qui offrent une protection maximale des sols. Recourir le plus souvent possible aux systèmes de travail réduit du sol.
P	Le choix d'une pratique de conservation à laquelle est associé le facteur P le plus faible possible amène une réduction des pertes de terre.	Utiliser des pratiques de conservation, comme la culture à contre-pente, qui font en sorte que les sédiments se déposent près de leur source.

2-3-5. L'USLE révisée :RUSLE

L'équation universelle des pertes en sol révisée (RUSLE), élaborée comme version améliorée provisoire de l'USLE, vise à combler le fossé entre ce qui est maintenant considérée comme une technologie désuète (c.-à-d. l'USLE) et la nouvelle génération de modèles basés sur les processus (comme le modèle WEPP) qui est encore au stade expérimental.

La RUSLE utilise la même équation empirique que l'USLE. Cependant, de nouvelles méthodes sont introduites pour évaluer les valeurs des divers facteurs de l'USLE. Ces nouvelles méthodes tiennent compte des données quantitatives sur la variation saisonnière du facteur d'érosivité des sols (K), les relations entre les pentes irrégulières (LS), la gestion des récoltes (C) et l'incidence sur l'érosion. Contrairement à l'USLE, les calculs présentés dans la RUSLE sont informatisés tout comme les bases de données, qui renferment

L'USLE et la RUSLE prévoient uniquement la quantité de sol perdue attribuable à l'érosion en nappes ou en rigoles sur une pente simple; elles ne prennent pas en compte les pertes de sol supplémentaires susceptibles d'être provoquées par l'érosion en ravins, l'érosion éolienne et l'érosion par le travail du sol. Elles ne calculent pas non plus la production de sédiment. Elles offrent néanmoins des méthodes simples et relativement exactes; il n'en existe pas pour le moment de meilleures.

3. Calcul et cartographie des paramètres du modèle (RUSLE) : Applications sur le bassin versant de l'Oued Larbaa

3-1. Erosivité des pluies (R):

La pluie est à l'origine des processus d'érosion hydrique ; son agressivité peut être caractérisée par sa hauteur, son énergie et son intensité.

Le pouvoir érosif d'une pluie est fonction de son énergie cinétique (E), et de son intensité (I) qui peut être déterminée par rapport à la durée de l'averse, ou seulement par rapport à la durée pendant laquelle elle atteint son maximum (I30, I15....).

Sur la base de corrélations entre l'érosion mesurée en parcelle expérimentales et divers indice climatiques Wischmeir et Smith (1959-1962) ont constaté que, les conditions de sols, pente et végétation étant supposé constantes, l'érosion aréolaire est en étroite corrélation avec l'énergie cinétique totale d'une pluie et son intensité maximale en 30 mn.

Le produit de l'énergie cinétique de la pluie par l'intensité maximale en 30 minutes en mm/heure définit un indice d'érosivité "R" qui s'écrit :

$$\mathbf{R = E_c \text{ totale} \times I_{30}}$$

Où

R: l'érosivité des pluies (en SI)

Ec totale : énergie cinétique totale (tonne métrique x mètre /ha/cm de pluie en SI.

I30: intensité maximale en 30 minutes (mm/h en SI).

3-1-1. Calculs de l'indice R pour le bassin versant de l'Oued

Larbaa

L'Indice d'agressivité tient compte des interactions entre la hauteur, l'intensité et la durée des pluies sur les transports solides.

Pour apporter plus de précisions et une meilleure répartition spatiale de l'agressivité, nous avons calculé la valeur R pour les stations situées au centre et à proximité sud du sous-bassin : stations de Bab Echhoub pour la période de 1993 à 2000, et de Beni Haytem pour la période de 1994 à 2000.

Ces stations n'enregistrent que la moyenne journalière. Les séries de données des précipitations disponibles chez les services concernés sont surtout des moyennes mensuelles et annuelles.

Nous allons appliquer la formule développée et la plus utilisée au Maroc est d'Arnoldus (1980) :

$$\mathbf{R = 1,753 \times 10 (1,5 \log (P_i^2)/P) - 0,8188}$$

Où:

P_i: précipitation mensuelle en mm.

P: précipitation annuelle en mm.

L'application de cette formule pour les données pluviométriques des stations météorologiques situées autour du sous-bassin a permis d'estimer le facteur d'érosivité des pluies **R = 22,60**.

(mm/ha/an) Cette valeur correspond à la moyenne des valeurs calculées par station et présentées sur le (*Tableau 7*):

Stations	Erosivité (mm/ha/an)	Période
Bab Echhoub	21,453	1993-2000
Beni Haytem	23,753	1994-2000

Tableau 7

Tableau 7 : Les valeurs du Facteur R calculé par station par la formule d'Arnoldus (1980)

3-2. Facteur d'érodibilité (K) :

L'érodibilité des sols signifie la susceptibilité au détachement des particules du sol sous l'impact des gouttes de pluies ou du ruissèlement ou les deux à la fois.

Les études pédologiques réalisées dans la zone (Inypsa, 1987) permettent de dégager les unités pédologiques qui entrent dans l'équation de Wischmeier (1978) déjà définie, c'est l'unité pédologique qui est l'unité de base dans la carte synthétique.

	Type de sol	Facteur K
1	sols à sesquioxydes de fer	0,4
2	Vertisols	0,36
3	sols isohumiques	0,32
4	Sols brunes calcaire modaux ou vertiques, bruns calcaire érodes	0,23
5	Lithosol ferrugineux brunifié	0,37
6	sols calcimagnésiques brunes calcaires érodes	0,23
7	sols brunifiés	0,32
8	sols hydromorphes	0,12
9	sols peu évolués	0,22
10	Lithosol brunifié	0,36

Figure 27 : Les types de sols utilisés pour l'estimation du facteur K du modèle RUSLE.

Figure 27

Les valeurs de K pour chaque unité du sol ont été estimées en utilisant les données de la carte pédologique de Taza, élaborée par la Direction régionale de l'agriculture de Taza (1984). Les valeurs de K se situent entre 0,22 et 0,46 (*Tableau 8*).

Statistiques d'érodibilité	
Min	0,22
Max	0,46
Moyenne	0,34
Ecart type	0,8

Ecart (Max – Min)	0,24
-------------------	------

Tableau 8

Tableau 8 : Statistique de l'indice d'érodibilité K

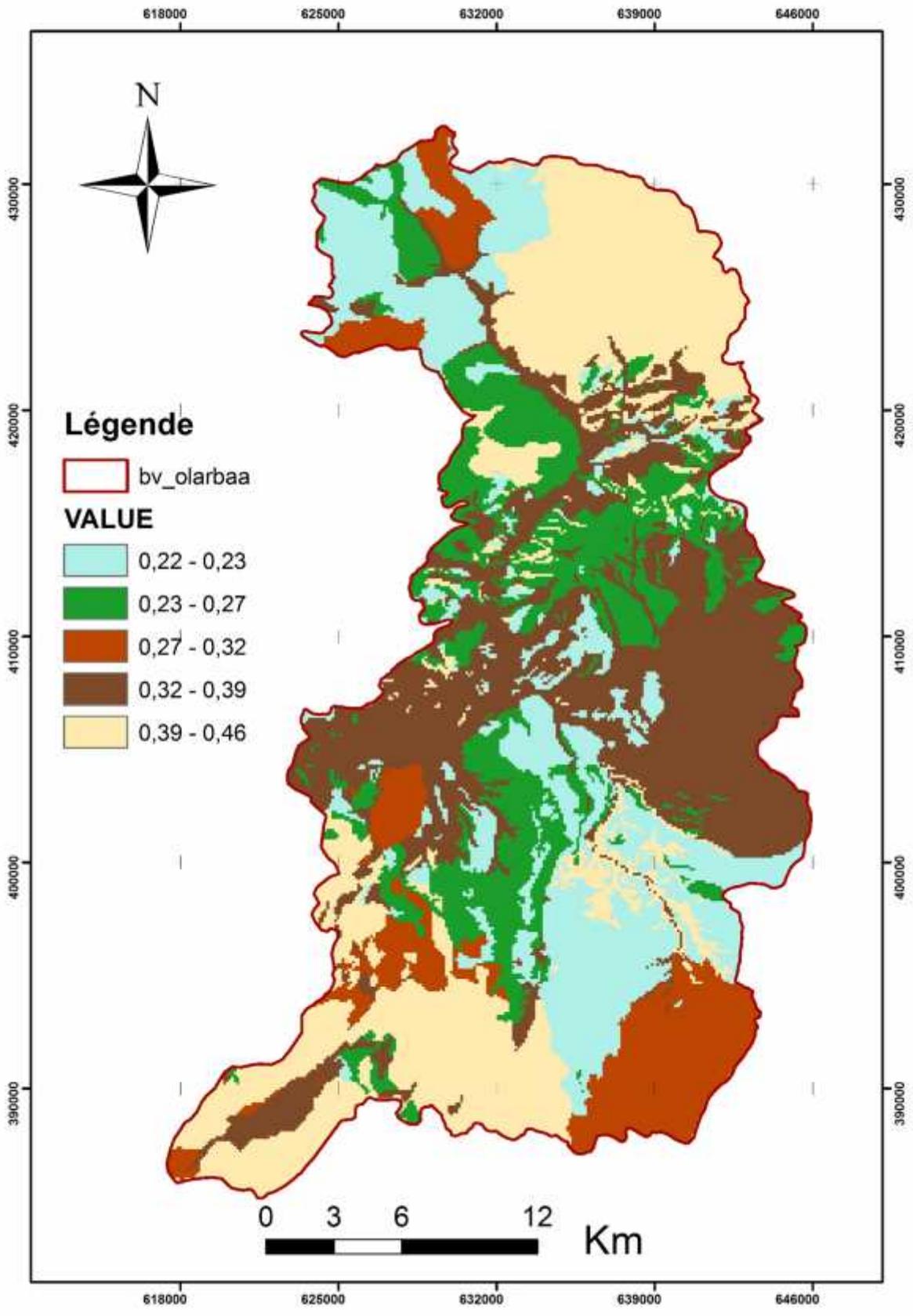


Figure 28 : Carte de répartition des valeurs du facteur K dans le bassin versant de l'Oued Larbaa

Figure 28

D'après la carte (*Figure 28*) on constate que :

- Les Vertisols et les lithosols brunifiés qui sont caractérisés par $K=0.36$, sont localisés au centre du bassin versant ainsi que dans sa partie sud-ouest ;
- Les sols les moins érodables ($K=0.22$), se situent dans la partie nord-ouest et sud Est du bassin versant ;
- Les sols les plus facilement érodables ($K=0.46$), se situent dans la partie nord Est et sud-ouest du bassin versant ;
- Les sols moyennement érodables, sont les sols calcimagnésiques ($K=0.23$, $K=0.27$) et les sols peu évolués ($K=0.32$), ils occupent une grande surface et sont dispersés sur tout le bassin versant.

3-3. Facteur topographique (LS) :

La pente joue un rôle important dans le développement des divers processus de l'érosion hydrique. La pente intervient dans ce phénomène par sa forme, son inclinaison et sa longueur.

3-3-1. Forme des versants :

Il est très délicat d'estimer l'influence de la forme concave, convexe, homogène ou gauchie d'une pente. Au fait, ce sont les segments les plus raides des pentes qui déterminent l'ampleur des pertes en sol. Auzet (1987), rapporte d'après D'souza et Morgan (1976), que l'érosion est plus forte sur profils convexe, minime sur profils concaves et moyenne sur profils rectiligne. Le facteur de la forme de versant est trop souvent négligé.

3-3-2. Inclinaison de la pente

L'inclinaison de la pente comme facteur moteur de l'érosion, a très tôt attiré l'attention et l'intérêt des chercheurs. Zingg, en 1940, a montré que les pertes en terre croissent de façon exponentielle avec l'inclinaison de la pente.

3-3-3. Longueurs de pente

En générale plus la pente est longue, plus le ruissellement s'accumule, prend de la vitesse, acquiert une énergie propre qui se traduit par une érosion en rigoles puis en ravines plus importantes. Wischmier et Smit (1978) ont proposé une équation qui combine l'effet

simultané de l'inclinaison et de la longueur de pente (facteur topographique "LS").l'équation est la suivante :

$$LS = (L/22, 12)^m \times (65, 41 \times \sin^2(S) + 4, 56 \sin(S) + 0,065)$$

Où

L: longueur de pente

S : degré de pente (en pourcentage)

m : 0,5 pour $S > 5\%$

m : 0,4 pour $3,5 < S < 3.5\%$

m: 0.3 pour $1 < S < 3,5\%$

m:0,2 pour $S < 1\%$

3-3-4Détermination et cartographie du facteur (LS):

Carte du MNT (modèle numérique de terrain)

Un Modèle numérique de terrain (MNT) correspond à une représentation sous forme numérique du relief d'une zone géographique. Ce modèle peut être composé d'entités vectorielles ponctuelles (points côtés), linéaires (courbes de niveau), surfaciques (facettes) ou représenté en mode raster (cellules).

Un MNT permet :

- de reconstituer une vue en images de synthèse du terrain
- de déterminer une trajectoire de survol du terrain.
- de calculer des surfaces ou des volumes.
- de tracer des profils topographiques.
- d'une manière générale, de manipuler de façon quantitative le terrain étudié.

On peut distinguer les MNT selon le type de maillage utilisé :

- maillage régulier carré (raster),
- maillage triangulaire régulier,
- maillage triangulaire quelconque (TIN)

Dans notre cas, le MNT est obtenue à partir des courbes de niveau. Un modèle numérique de terrain (MNT) est un fichier altimétrique constitués par un réseau maillé régulier (pixel), chaque maille étant repérer par les cordonnées de son centre (x, y, z) .Ce modèle se traduit

sous forme d'une carte où chaque pixel défini par son altitude et ses coordonnées. Le pixel représente la résolution de la carte qui est pour la présente étude de 30 m (correspond à l'intervalle des courbes de niveau de la carte topographique).

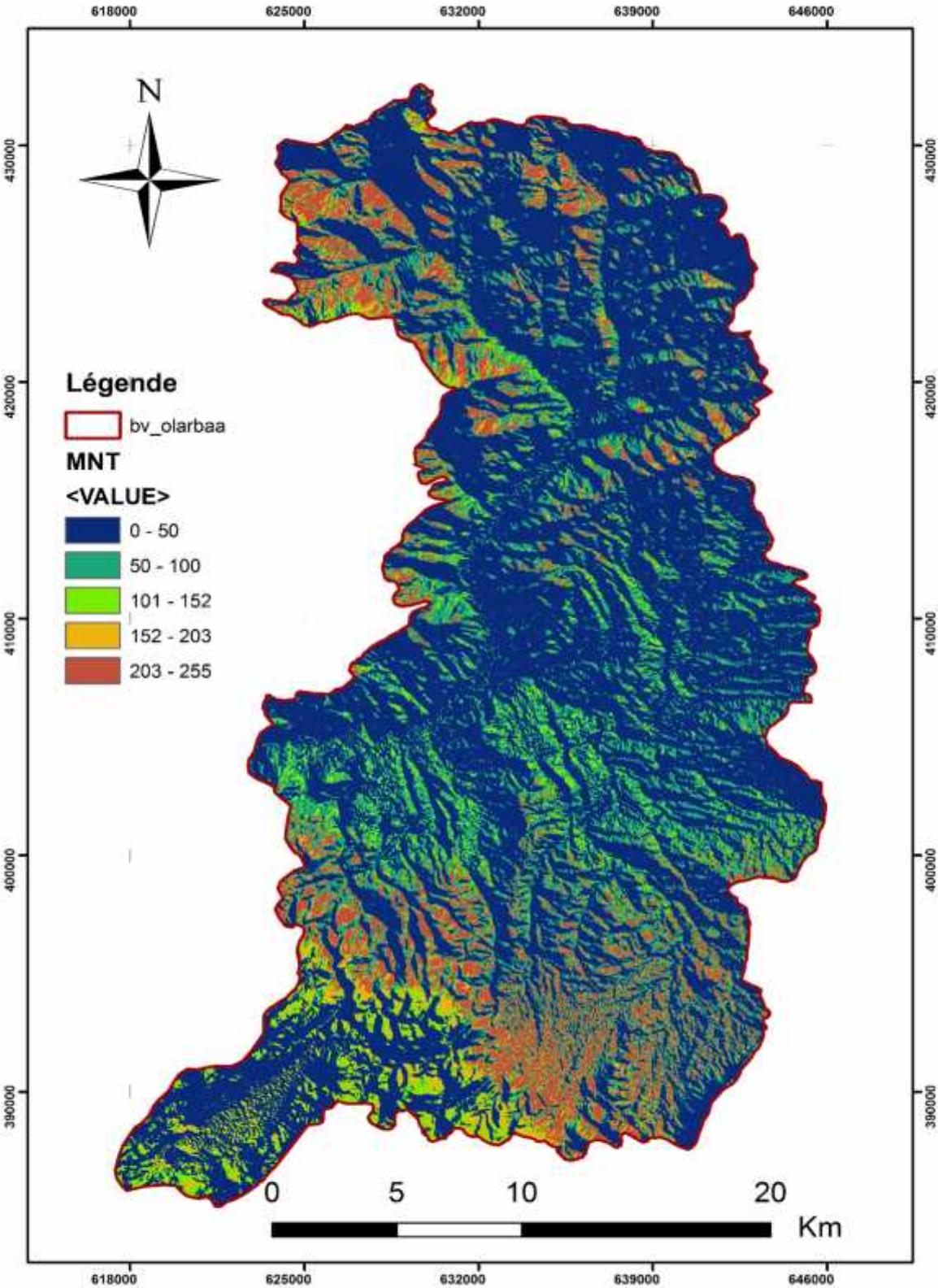


Figure 29: Carte du MNT du bassin versant de l'Oued Larbaa

Figure 29

La Carte de la longueur et l'inclinaison de la pente (LS) :

Le facteur topographique est un indice qui regroupe les effets de la longueur (L) et de l'inclinaison (S) de la pente. L'inclinaison de la longueur de la pente n'est ni constante, ni très élevée. Par contre, l'influence de l'inclinaison de la pente est déterminante. Les transports solides croissent de façon exponentielle avec le pourcentage de pente ou selon une équation du second degré très voisine (Wischmeier et Smith, 1960). Sur les pentes les plus courantes (0,1 à 15%) d'une longueur de 60 m, la variation de LS se situe dans une gamme de 0,1 à 5, et pouvant atteindre 20 en zones de montagnes.

Les résultats du croisement des couches de l'inclinaison et la longueur de la pente est dressé sur le (*Tableau 9*) et la (*Figure 30*).

Statistiques des classes de LS	
Min	0
Max	409
Moyenne	12,94
Ecart type	23,65
Ecart (Max – Min)	409

Tableau 9

Tableau 9 : Superficie et pourcentage des classes du facteur LS

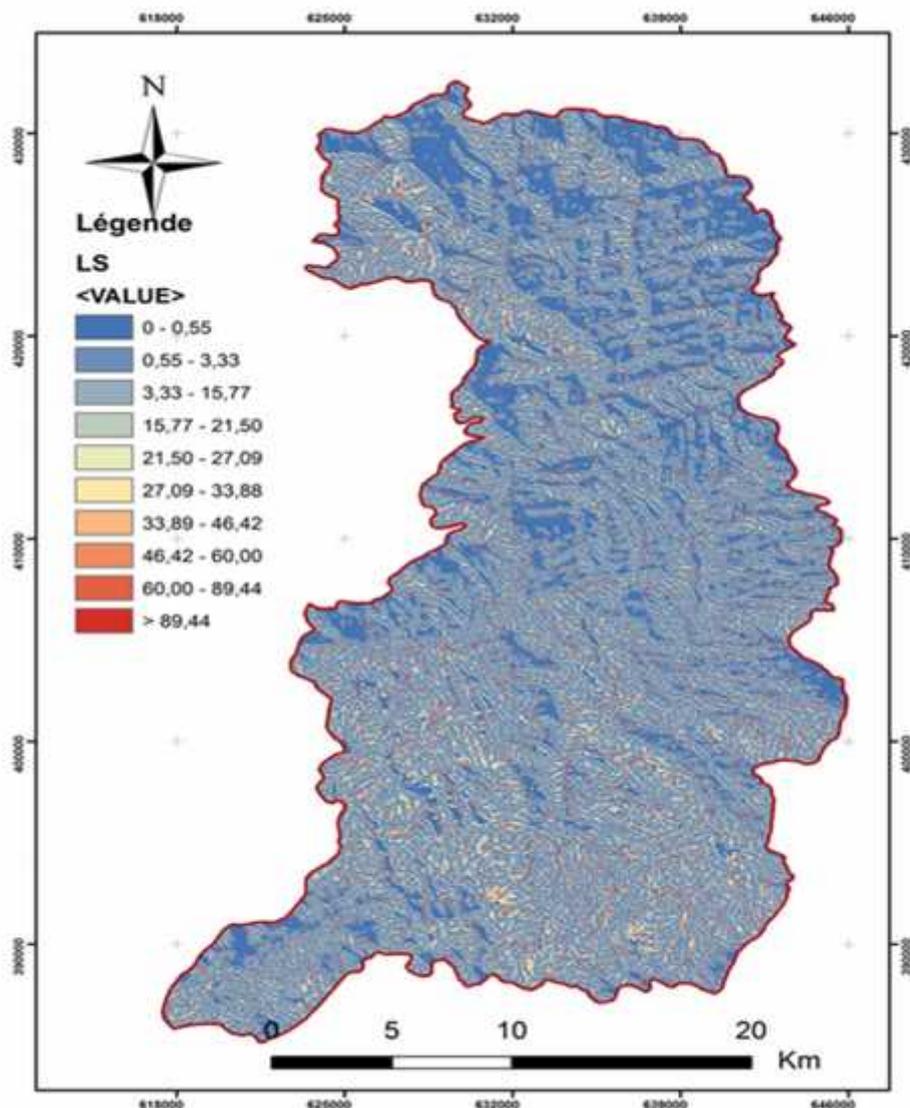


Figure 30 : Carte de la longueur et de l'inclinaison de la pente du bassin versant de l'Oued Larbaa

Figure 30

3-4. Facteur du couvert végétal (C) :

3-4-1. Définition et composante du facteur C

Ce facteur sert à déterminer l'efficacité relative des systèmes de gestion du sol et des cultures en termes de prévention des pertes de terre. Il est un ratio qui compare les pertes de terre provenant d'une terre faisant l'objet d'une culture et d'un système de gestion spécifiques et les pertes correspondantes dans un champ travaillé constamment laissé en jachère. Le couvert végétal est - après la topographie - le second facteur le plus important qui contrôle le risque d'érosion des sols. Dans l'Universal Soil Loss Equation Révisée, l'effet du couvert végétal est incorporé au facteur d'aménagement du couvert (appelé facteur C). La valeur de C dépend

principalement au pourcentage de couverture végétale et de la phase de croissance. Les effets de mulch, des résidus de récolte et des opérations de tillage doivent aussi être pris en compte pour le facteur C. Dans l'équation RUSLE (Renard et al., 1997), le facteur C est subdivisé en 5 sous facteurs, qui prennent en compte respectivement les effets de l'utilisation antérieure du terrain, le couvert de la canopée, le couvert de surface, la rugosité de surface et l'humidité des sols.

3-4-2. Détermination du facteur C

Le facteur couvert végétal (C) est le second facteur le plus important qui contrôle le risque d'érosion des sols (Kalman, 1967). La détermination de ce facteur est élaborée à partir de la cartographie de la densité de la végétation sur les images de google Earth et le contrôle sur le terrain. Les valeurs affectées aux différents modes d'utilisation de sols se situent entre 0.0 et 0.75 (*Tableau 10*). La (*Figure 31*) montre la répartition du facteur C dans le bassin d'Oued Larbaa.

Statistiques d'érosivité	
Min	0
Max	0,75
Moyenne	0,53
Ecart type	0,28
Ecart (Max – Min)	0,75

Tableau 10

Tableau 10 : Statistique de l'indice du couvert végétal

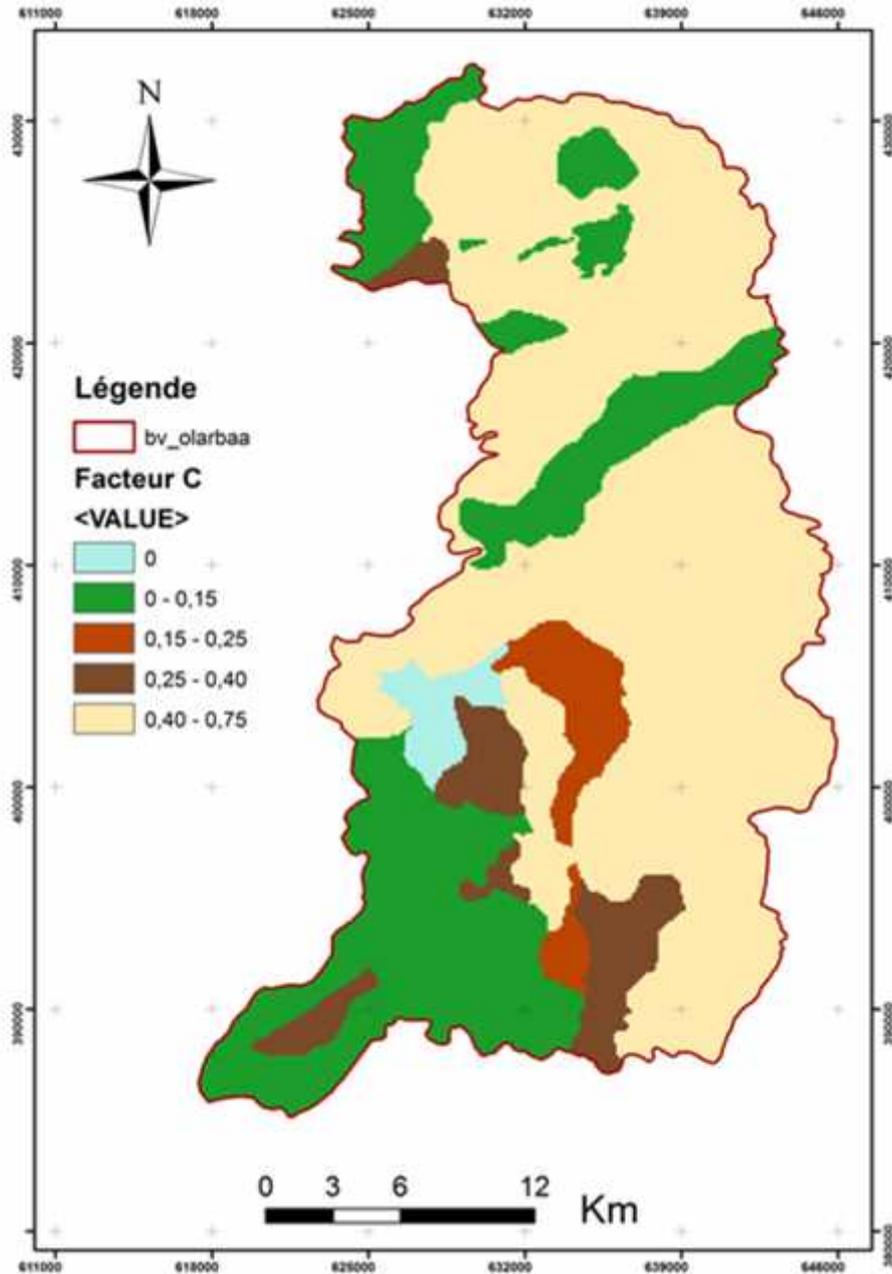


Figure 31: Carte des niveaux de protection du sol du bassin d'Oued Larbaa

Figure 31

A l'aide de la carte d'occupation du sol, il a été possible d'attribuer pour chaque mode d'utilisation une valeur C. Ces valeurs sont extraites à partir des travaux réalisés dans le Rif par EL Gharbaoui (1981).

Occupation du sol	Coefficient C	Niveau de protection
Matorral moyennement dense et forêt claire	0,15	Très bon
Matorral très dégradé	0,25	Bon
Steppes à alfa	0,40	faible
Céréaliculture	0,75	Très faible

Tableau 11

Tableau 11. Facteur C et le niveau de protection pour différentes occupations du sol dans le bassin versant de l'Oued Larbaa

D'après la carte (*Figure 31*) et le (*Tableau 11*) on constate que :

La forêt claire et le matorral moyennement dense ont un très bon niveau de protection et résistent tous les deux à l'érosion ($C=0,15$), le Matorral très dégradé, les steppes à alfa et les céréalicultures ont un facteur C qui varie de 0,25 avec un bon niveau de protection à 0,40 avec un faible niveau de protection pour atteindre 0,75 une valeur très élevée, qui expose le sol à l'action directe des gouttes de pluies.

Les valeurs minimales du facteur C occupent de petites superficies dans le bassin versant de l'Oued Larbaa, elles sont localisées au nord et sud-ouest.

Les grandes valeurs de C, se localisent au centre du bassin et occupent une grande superficie.

Donc les Céréacultures et les steppes à alfa, présents sur de grandes surfaces, ne protègent pas le sol contre l'érosion, ce qui nous mène à dire que l'érosion serait probablement accentuée dans cette partie-là du bassin versant.

3-5. Facteur des pratiques antiérosives

Le facteur P tient compte des pratiques antiérosives adoptées et qui visent à modifier le profil, la pente ou la direction de l'écoulement du ruissellement en surface et à réduire ainsi l'érosion. Il s'exprime par le rapport entre les pertes en sol sur un champ aménagé et celle d'une parcelle de même taille cultivée dans le sens de la pente. Dans le cas du bassin versant de l'Oued Larbaa il y a absence de tout aménagement antiérosif. Ainsi le facteur P a été supposé égal à 1.

4. Intégration des facteurs de l'érosion, résultats et discussion :

Après avoir déterminé et cartographier tous les facteurs d'érosion (R, K, LS, C, P) de l'équation universelle de perte de sol révisé (RUSLE). Les facteurs sont introduits dans le modèle RUSLE dans le logiciel ArcGis pour faire la superposition des cartes de chacun de ces facteurs.

4-1. L'érosion sur les versants : Modèle de Wismeier (RUSLE) :

C'est une fonction multiplicative de cinq facteurs du modèle de Wismeier suivant la formule :

$$A = R.K.LS.C.P$$

Avec

A : Perte de terre annuelle moyenne possible à long terme (t/an)

R : Agressivité des pluies

K : Erodibilité des sols

LS : Indice de pente

C : Facteur couvert végétal

P : Facteur Pratiques conservatrices

L'application du modèle a eu lieu après modélisation des cinq facteurs en cartes thématiques en tenant compte des valeurs numériques de chaque carte. Par le biais d'un SIG, la spatialisation et la quantification ont été réalisées et ont données les résultats présentés sur le tableau (*Tableau 12*).

Statistiques de l'érosion réelle (t/ha/an)	
Nombre d'unités	58642
Min	0

Max	896
Moyenne	49,59
Ecart type	55,60
Ecart (Max – Min)	896

Tableau 12

Tableau 12 : Statistique des classes de l'érosion réelle (t/ha/an)

L'érosion au champ moyenne, ressortie pour l'ensemble du sous-bassin versant de l'oued Larbaa, est de 49,59 t/ha/an présentant un niveau de risque moyen. Elle varie dans un intervalle de 0,0 à 896 t/ha/an avec un écart type de 55,60 t/ha/an.

Ce large champ de variation signifie la forte hétérogénéité des comportements érosifs dans le sous-bassin, et l'importance des effets combinés des facteurs mis en jeu.

Les pertes moyennes, par la méthode de RUSLE pour le sous bassin Oued Larbaa, sont donc estimées à **49,59 t/ha/an**.

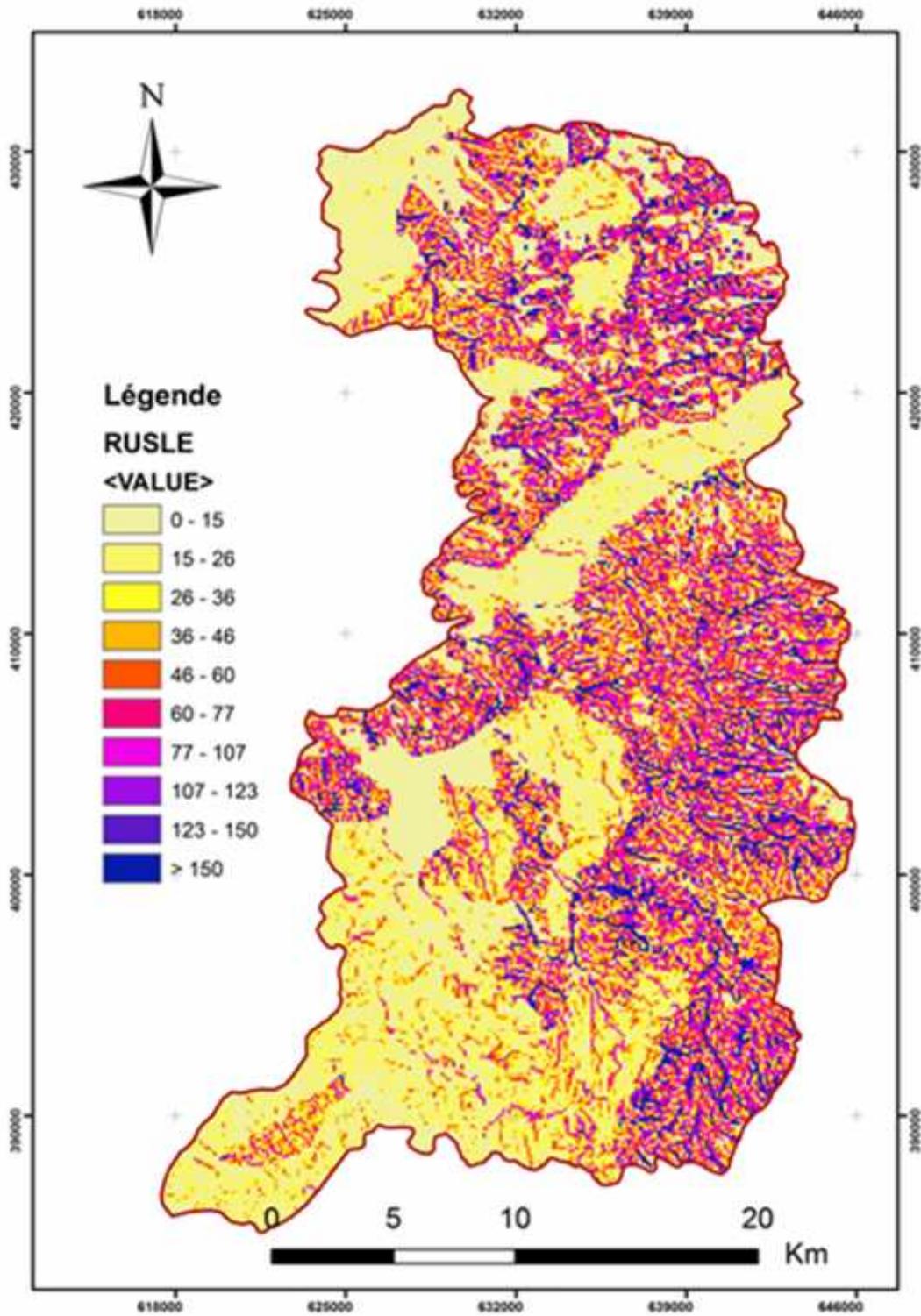


Figure32 : Carte de l'érosion sur les versants du bassin de l'Oued Labraa à partir de l'équation de Wisheier modifiée (RUSLE)

Figure 32

La carte de quantification des pertes en sol au niveau du bassin versant de l'oued Larbaa (*Figure 32*) a été réalisée à l'aide de l'Equation Universelle des Pertes en Sol (RUSLE) intégrée dans un Système d'Information Géographique (SIG), les pertes en terre à l'échelle de ce bassin sont estimées à **49,59** t/ha/an, elles dépassent largement le seuil de tolérance (12t/ha/an) établi par Wischmeier.

L'érosion pour ce secteur varie entre 0 (t/ha/an) comme valeur minimale mesurée dans les Matorrals moyennement denses (forets claires), et 896 (t/ha/an) comme valeur maximale enregistrée au niveau des terrains de culture et céréaliculture, ces derniers ont un niveau de protection très faible et correspondent généralement à des régosols ou à des sols peu évolués.

5. Conclusion

La quantification des pertes en sol au niveau du bassin versant de l'Oued Larbaa a été réalisée à l'aide de l'Equation Universelle des Pertes en Sol (RUSLE) intégrée dans un Système d'Information Géographique (SIG). La méthode utilisée bénéficie d'une relative robustesse par la large base de données qui lui est sous-jacente, elle apporte une aide importante aux décideurs pour simuler des scénarios d'évolution de la région et planifier les interventions de lutte contre l'érosion.

Les résultats obtenus montrent que les sols du bassin versant de l'Oued Larbaa subissent l'effet de plusieurs facteurs favorisant l'érosion, à savoir, le faible couvert végétal et l'érodibilité des sols. Ils indiquent également que le bassin versant de l'Oued Larbaa est soumis à une forte érosion avec des pertes variant de 0,0 à 896 t/ha/an, touchant à peu près 70% du territoire. Les faibles pertes en dessous du seuil de tolérance (12t/ha/an) ne concernent qu'à peu près 30% de la superficie du bassin versant et se trouvent au sud-ouest du secteur d'étude

Cette situation assez grave est favorisée par les différents facteurs d'érosion, qui, en se rassemblant accélèrent l'érosion, des sols relativement érodables (à peu près 50% du bassin versant de l'Oued Larbaa présente un facteur K qui varie entre (0,32 et 0.46)) et une dégradation alarmante du couvert végétal.

Conclusion générale :

Les résultats obtenus de cette contribution sont multiples et diversifiés. Ainsi :

- Sur le plan géologique la digitalisation des cartes géologiques et pédologiques grâce au système d'information géographique (SIG) du bassin versant de l'Oued Larbba nous a permis de dire que ce bassin est entièrement établi sur des formations majoritairement imperméables.
- Du point de vue hydrogéologique, le bassin versant de l'Oued Larbaa, situé à l'extrémité tout à fait orientale du grand bassin d'Innaouène, est constitué dans sa partie méridionale d'importantes assises de calcaires et de dolomies liasiques qui rendent possible l'existence d'une puissante nappe profonde artésienne, celle-ci étant recouverte de formations imperméables néogène, se trouve pauvre en eau. Ce déficit hydrique, lié aux faciès marneux imperméables, est noté aussi dans la majeure partie septentrionale de notre secteur d'étude.
- Sur le plan hydrologique, une carte du réseau hydrographique principal et secondaire a été établie par un SIG. Elle fait ressortir les principaux affluents de Oued Larbaa à savoir, O. Tarmast, Traïba, Bouljraf, Jouana, Rhauireg, Dfali et Taza appelé aussi O. Elhaddar. Par ailleurs, l'analyse fréquentielle des débits de pointe par la méthode de Gumbel sur l'Oued Larbaa (crue exceptionnelle du 27/9/2000) a donné une valeur de débit de pointe estimée à **994,89m³/s** ; cette valeur montre que l'Oued Larbaa contribue de manière considérable en alimentation de l'Oued Innaouène. En outre, la moyenne obtenue à partir des méthodes Giondotti et Turrazza, une goutte d'eau traverse notre bassin versant depuis les altitudes les plus hautes jusqu'à l'exutoire en **6,5 heures**.
- les données climatiques montrent que la zone d'étude se caractérise par un climat semi-aride, avec un été chaud et sec et un hiver tempéré et humide, Le calcul de la lame d'eau précipitée sur le bassin versant de l'Oued Larbaa par la méthode des isohyètes et celle des polygones de Thiessen donne des résultats relativement proches, la moyenne générale étant de **616mm**.
- Les caractéristiques physiques montrent que le bassin versant de l'Oued Larbaa a la forme d'un croissant à concavité tournée vers l'Ouest et que sa longueur fait environ six fois sa largeur. Son hypsométrie est caractérisée par des altitudes qui décroissent progressivement du sud vers le nord. La densité des pentes les plus élevées est concentrée dans la partie extrême nord et sud du bassin, et les moins élevés au milieu

du bassin, avec une moyenne de **0,43%** ; une valeur qui montre que le relief est assez faible.

L'essentiel du travail est une contribution à une meilleure connaissance des risques érosifs; il porte sur l'évaluation qualitative et quantitative de l'érosion hydrique dans le bassin versant de l'Oued Larbaa en utilisant l'Equation Universelle des Pertes en Sol (RUSLE) intégrée dans un Système d'Information Géographique (SIG).

L'application de cette équation a nécessité le calcul et la cartographie des facteurs suivants :

- Le facteur d'érosivité de la pluie ($R=22,60$ mm/ha/an) ;
- D'érodibilité du sol ($K=0,34$) ;
- De la longueur et de l'inclinaison de la pente (LS) qui varie de **0,1** à **5** pouvant atteindre **20** en zone montagneuse ;
- Le couvert végétal dont l'indice varie de **0** à **0,75** ;
- Et enfin les pratiques anti érosives sont d'une valeur supposée égale à **1**, en raison de l'absence de tout aménagement anti-érosif.

Le résultat de cette équation donne une valeur moyenne de **49,59 t/ha/an** ; une valeur qualifiant notre bassin d'un niveau de risque d'érosion moyen.

A partir de ces résultats non exhaustifs on propose les perspectives suivantes :

- Détailler et figurer ce type d'investigation sur la base de nouvelles données de terrain de de laboratoire ;
- - Etablir ces axes de recherches sur les régions voisines ;
- Proposer des mesures de protection et d'aménagement pour les décideurs.

Références bibliographiques :

- Abdellah R (1997)** : les bassins néogènes du sillon sud Rifain et du Rif nord oriental (Maroc) : sédimentologie, paléogéographie et évolution dynamique. *Thèse. Doct. Es. Sciences. Fac. Mohamed Ben abdellah*
- Afkir E (1985)** : Le bassin versant de l'Inaouène : Caractéristiques climatiques et comportement hydrologique. *Thèse 3 ème cycle, univ. Toulouse. le Mirail.*
- Arouzoud N. (2014)** : La modélisation de l'érosion hydrique dans le bassin d'El Hachef. *Rapport Master hydrologie de surface et qualité des eaux ; Fst (Fès).*
- Atherton, J., Olson D., Farley, L. and Qauqau, I. (2005)**: Watershed Assessment for Halthy Reefs and Fishreries, *Final Report to the United States Department of State. In Wildlife Conservation Society-South Pacific*
- Baigorria, G. A. and Romero, C. C. (2007)**: Assessment of erosion hotspots in a watershed: Integrating the WEPP model and GIS in a case study in the Peruvian Andes. *Environnemental Modelling & Software*, vol. 22, p. 1175-1183.
- Batti, A. (2005)** : Spatialisation des pluies extrêmes et cartographie de l'aléa érosion des sols dans les bassins en amont du lagon St-Gilles. *Stage de master, Institut de recherche et développement, Nouméa, 55 p*
- Benabidate L. (2000)** : caractéristiques du bassin versant du Sebou : Hydrologie, qualité des eaux et géochimie des sources thermales, *thèse d'état. Fès.*
- Benichou, P. et Le Breton, O. (1987)** : Prise en compte automatique de la topographie pour la cartographie des champs pluviométriques statistiques. *La Météorologie*, vol. 7, n° 19, p. 23-34.
- Bennouna A. (2006)** : Evolution tectono-sédimentaire et magmatique du dépoentre volcano-sédimentaire carbonifère du massif de Tazekka (moyen-Atlas Maroc), *thèse d'état FSDM. Fès.*
- Bhuyan, S. J., Kalita, P.K., Janssen, K. A. and Barnes, P. L. (2002)**: Soil loss preditions with three erosion simulation models. *Environnemental Modelling & Software*, vol. 17, p. 137-146.
- Chalouan A, Michard A, Feinberg H, Montigny R et Sadiqui O. (2001)** : The Rif mountain building (Morocco): a new tectonic scenario.- *Bull. Soc. Géol. France*, 172, 5, 603-616.
- Combe M. (1975)** : Le couloir de Fès Taza. *Ressources en eau du Maroc. Tome 2. Ed. du ser. Géologie du Maroc* Rabat.
- Coutagne A (1954)** : Quelques considérations sur le pouvoir évaporant de l'atmosphère, le déficit d'écoulement effectif et le déficit d'écoulement maximum. *La houille blanche*, pp : 360-369.

Deumlich, D., Funk, R., Kiesel, J., Thiere, J. and Reuter, H. I. (2006): Application of the Site Comparison Method (SICOM) to assess the potential erosion risk – a basic for the evaluation of spatial equivalence of agri-environmental measures. *Catena*, vol. 68, p. 141-152.

DPA Taza, (1984) : Etude des sols au 1/100 000, zone du projet de développement intégré de Taza, Décembre, Annexe n°2 géologie

Dridri A. et Fedan B. (2001) : Rôle du contrôle structural dans la mise en place du réseau hydrographique de Sebou et d'Inaouène entre Fès et Oued Amlil (Maroc). *Bull. Inst. Sc.* Rabat, n°23, 67-77.

Dumas, P. (2004) : Caractérisation des littoraux insulaires : approche géographique par télédétection et S.I.G. pour une gestion intégrée, Application en Nouvelle-Calédonie. *Thèse de doctorat, Université d'Orléans, Orléans*, 402 p.

El Gharbaoui A (1981) : Le Rif, l'homme et la montagne dans la dorsale calcaire du Rif. *Ed. ROMM*. n°41-42

Gumbel, E.J (1958): statistics of extremes. *Columbia university press*, ISBN 0-483-43604-7.

Hancock, G. R., Lowry, J. B. C., Moliere, D. R. and Evans, K. G. (2008): An evaluation of an enhanced soil erosion and landscape evolution model: a case study assessment of the former Nabarlek uranium mine, Northern Territory, Australia. *Earth Surface Processes and Landforms*, n° 33, p. 2045-2063.

Lahrach A (1994) : Potentialité hydro géothermique du Maroc oriental. *Thèse de doctorat de spécialité*. Ecole nationale d'ingénieurs Sfax Tunisie.

Le Bissonnais, Y., Thorette, J., Bardet, C. et Daroussin, J. (2002) : L'érosion hydrique des sols en France. Orléans, *INRA & IFEN*, 105 p.

Le blanc D. (1975) : Etude géologique dans le Rif extrême oriental au nord de Taza (Maroc), *thèse d'état* Toulouse.

Luneau, G. (2006) : La spatialisation de l'aléa EROSION DES SOLS en NouvelleCalédonie. *Stage de master 2, Université de Toulouse, Toulouse*, 75 p

Michard A (1974) : Eléments de la géologie du Maroc *notes et Mem. Serv. Géol. Maroc*.

Musy A et Higy C (1998) : Hydrologie appliquée, *édition HGA*, Bucarest, 368 p.

Nearing, M. A., Foster, G. R., Lane, L. J. and Finkner, S. C. (1989): A process-based soil erosion model for USDA-Water Erosion Prediction Project technology. *Transactions of the ASAE*, vol. 32, p. 1587-1593.

Ouattara, T. (2002) : Modélisation de l'érosion hydrique en milieu semi-aride de forte énergie de relief à partir de données de télédétection : application à la Bolivie. *Thèse de doctorat, Université de Sherbrooke, Sherbrooke*, 170 p.

- Renard, K. G., Foster, G. R., Weesies, G. A., McCool, D. K. and Yoder, D. C. (1997):** Predicting soil erosion by water-a-guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). Washington, *Handbook*, 404 p
- Robillard D (1978) :** Etude stratigraphique et structurale du moyen Atlas septentrional (région de Taza). *Thèse de 3ème cycle*. F. sc. Rabat.
- Sadiki A (2005) :** Risque d'inondation de la ville de Taza. *Thèse sc. FSDM*. Fès.
- Tabyaoui H, El Hammichi F, Er-Reguieg M. A. et Lahrach A. (2015) :** Hydraulic modelling using HEC-RAS and GIS, application to Oued Inaouène (Taza, Northern Morocco) *academia. Edu*.
- Tidiane, O., Dubois, J.-M. M. et Hugh, Q. (2003) :** MEH-SAFER : Un nouveau modèle d'érosion hydrique pour les milieux semi-arides de forte énergie à partir d'images multisources et de données auxiliaires. *Téledétection*, vol. 3., n° 2-3-4, p. 151-163.
- Vidal J. C. (1977):** Structure actuelle et evolution depuis le Miocène de la chaîne du Rif *B.S.G.Fr (7)*, t XIX
- Wahlstrom, E., Loague, K. and Kyriakidis, P. (1999):** Insular Scale Hydrologic Response : Kaho'olawe, Hawaii. Hydrologic response : Kaho'olawe, Hawaii. *Journal of Environmental Quality*, vol, 28, p. 481-492.
- Yue-Qing, X., Jian, P. and Xiao-mei, S. (2009):** Assessment of soil erosion using RUSLE and GIS : a case study of the Maotiao River watershed, Guizhou Province, China. *Erosion Geology*, vol. 56, p. 1643-1652.

Webgraphie:

Wikipédia : Sol, érosion hydrique, RUSLE.

<http://vertigo.revues.org/12591?lang=en>

[file:///C:/Users/hp/Downloads/632-1924-1-PB%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/hp/Downloads/632-1924-1-PB%20(1).pdf)

<http://www.ma.auf.org/erosion/chapitre1/VI.Lutte.html>

https://www.usherbrooke.ca/environnement/fileadmin/sites/environnement/documents/Essais_2011/Paul-Hus_C__12-07-2011_.pdf

Table des matières

Table des matières

<i>Introduction</i> :	3
<i>Chapitre 1</i> : Aspects théoriques de l'érosion hydrique	5
1- Problématique de l'érosion des sols au Maroc :	5
1-1 Les causes principales de l'érosion hydrique:	6
1-2 Les dommages liés à l'érosion hydrique:	7
2- Processus et formes de l'érosion hydrique :	8
2-1 La mobilisation des particules :	8
2-1-1. Impact des gouttes de pluie :	8
2-1-2. Formation des croutes de battance :	9
2-2 Les formes d'érosion :	10
2-2-1 Erosion en nappe ou érosion diffuse (sheet flood) :	10
2-2-2. Erosion en sub-surface :	10
2-2-3 Erosion en rigoles :	11
2-2-4 Erosion en ravines :	11
2-2-5 Erosion en ravins :	11
2-2-6. Erosion en masse :	12
3- Les facteurs de l'érosion hydrique :	12
3-1 La pluie et son intensité :	12
3-2 le sol	13
3-3 La végétation	13
3-4 La topographie du terrain	14
3-5 L'action de l'Homme :	14
4 Les pratiques antiérosives :	15
4-1 Les stratégies traditionnelles de lutte anti-érosive :	15
4-1-1 La culture itinérante sur brûlis	15
4-1-2 Les terrasses en gradins et les terrasses méditerranéennes sur murettes en pierres	15
4-1-3 les billons	15
4-1-4 Alignements de pierre et les murettes	16
4-2 Les stratégies modernes d'équipement hydraulique :	17
4-2-1 La restauration des terrains en montagne (RTM)	17
4-2-2 La conservation de l'eau et des sols (CES)	17
4-2-3 La défense et restauration des sols (DRS)	17

4-2-4	La gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES)	18
4-3	Les mesures de lutte contre le ruissellement et l'érosion des sols :	18
4-3-1	Création d'obstacles au ruissellement	18
4-4	Captation des eaux de ruissellement	21
4-4-1	Les haies vives	21
4-4-2	Les cordons de pierres (stone bonds).....	21
4-5	Protection des pentes contre l'érosion.....	21
4-5-1	travaux selon courbes de niveau	21
4-5-2	Cultures en bandes alternantes.....	22
<i>Chapitre 2 : Etude du cadre général du bassin versant de l'Oued Larbaa</i>		22
1-	Situation géographique du bassin versant de l'Oued Larbaa :	23
2.	Réseau hydrographique :	25
2-1.	Caractéristiques du réseau hydrographique	25
2-2.	Affluents de l'Oued Larbaâ.....	25
3.	Cadre climatique :	27
3-1.	Précipitation	27
3-2.	Température	27
3-3.	Evaporation	28
3-4.	Conclusion :	29
4-	Cadre géologique (Figure 18) :	30
4-1.	Le Rif externe :	32
4-2.	Le moyen Atlas plissé :	32
4-3.	le couloir de Taza :	33
5-	La pédologie :	34
<i>Chapitre3 : Paramètres physiographiques du bassin versant de l'Oued Larbaa</i> :		37
1.	La forme :	37
1-1.	Indice de compacité de Gravélius	37
2.	Le Relief :	38
2-1.	La carte hypsométrique :	39
2-2.	La courbe hypsométrique :	40
2-3.	Le rectangle équivalent :	41
2-4	La pente :	43
2-4-1.	La pente moyenne :	45
<i>Chapitre4 : Etude Hydrologique du bassin versant de l'Oued Larbaa</i>		46
1.	Cartes des précipitations moyennes :	46
1-1.	Polygones de Thiessen :	47

1-2.Méthode des isohyètes :	50
1-3. Conclusion	52
2- Le volume :	52
3- Ajustement des débits de pointe par la méthode de Gumbel :	52
4- Temps de concentration :	54
<i>Chapitre5 : Calcul et cartographie de l'érosion hydrique dans le bassin versant de l'Oued Larbaa ..</i>	<i>55</i>
1. Méthodes utilisées pour étudier l'érosion :	55
2. L'équation universelle des pertes en terre (RUSLE) :	58
2-1. Origine du modèle :	58
2-2. Définition :	59
2-3. ÉQUATION UNIVERSELLE DES PERTES EN TERRE (EUPT).....	60
2-3-1. Paramètres du modèle :	60
2-3-2. MÉTHODE D'UTILISATION DE L'USLE.....	63
2-3-3.TAUX DE PERTES DE TERRE TOLÉRABLES	63
2-3-4. STRATÉGIES DE GESTION POUR RÉDUIRE LES PERTES DE TERRE.....	63
2-3-5. L'USLE révisée :RUSLE	64
3. Calcul et cartographie des paramètres du modèle (RUSLE) : Applications sur le bassin versant de l'Oued Larbaa.....	64
3-1.Erosivité des pluies (R):	64
3-1-1. Calculs de l'indice R pour le bassin versant de l'Oued Larbaa	65
3-2. Facteur d'érodibilité (K) :	66
3-3. Facteur topographique (LS) :	70
3-3-1.Forme des versants :	70
3-3-2. Inclinaison de la pente	70
3-3-3. Longueurs de pente.....	70
3-3-4Détermination et cartographie du facteur (LS) :	71
3-4. Facteur du couvert végétal (C) :	74
3-4-1. Définition et composante du facteur C	74
3-4-2. Détermination du facteur C.....	75
3-5. Facteur des pratiques antiérosives.....	77
4. Intégration des facteurs de l'érosion, résultats et discussion :	78
4-1. L'érosion sur les versants : Modèle de Wisheier (RUSLE) :	78
5. Conclusion.....	81
Conclusion générale :	82

Liste des figures :

Figure 1.....	9
Figure 2.....	9
Figure 3.....	10
Figure 4.....	11
Figure 5.....	15
Figure 6.....	16
Figure 7.....	17
Figure 8.....	18
Figure 9.....	19
Figure 10.....	19
Figure 11.....	20
Figure 12.....	21
Figure 13.....	23
Figure 14.....	27
Figure 15.....	27
Figure 16.....	28
Figure 17.....	29
Figure 18.....	30
Figure 19.....	35
Figure 20.....	39
Figure 21.....	41
Figure 22.....	44
Figure 23.....	47
Figure 24.....	49
Figure 25.....	51
Figure 26.....	53
Figure 27.....	67
Figure 28.....	70
Figure 29.....	73
Figure 30.....	74
Figure 31.....	76
Figure 32.....	80

Liste des Tableaux

Tableau 1	40
Tableau 2	42
Tableau 3	48
Tableau 4	50
Tableau 5	53
Tableau 6	55
Tableau 7	66
Tableau 8	68
Tableau 9	73
Tableau 10	75
Tableau 11	77
Tableau 12	79