

Royaume du Maroc



Haut Commissariat aux Eaux et Forêts
et à la Lutte Contre la Désertification



Université Cadi Ayyad

Laboratoire de Géo-Sciences et Environnement

Département des Sciences de la Terre
Faculté des Sciences et Techniques Guéliz
Université Cadi Ayyad



Mémoire de projet de fin d'étude

*Master Sciences et Techniques
Eau et Environnement*



APPLICATION DES MODELES USLE ET HEUSCH POUR L'ESTIMATION DE LA PERTE EN SOL ET L'ENVAISEMENT DU BARRAGE DU BASSIN VERSANT DE L'ASSIF EL MAL (TENSIFT ALHAOUZ)

Réalisé par :

GOURFI Abdelali

Encadré par :

- L. DAOUDI

(Faculté des Sciences et Techniques de Marrakech)

Parrainé par :

- H. BOUNITE

(Cadre à la direction régionale des eaux et forêts)

Soutenu le 24 juin 2014, devant le jury composé de :

- **L. DAOUDI** (Faculté des Sciences et Techniques de Marrakech)
- **M. E. SAIDI** (Faculté des Sciences et Techniques de Marrakech)
- **B. IGMOUILLAN** (Faculté des Sciences et Techniques de Marrakech)

2013/2014

RESUME

Cette étude vise à mettre en œuvre les techniques de cartographie numérique, depuis les traitements d'images satellitaires jusqu'aux systèmes d'information géographique (SIG) en se fondant sur le modèle de USLE et de HEUSCH.

Celle-ci a permis, d'une part, de quantifier les pertes annuelles en sols au niveau du bassin versant d'Assif El Mal et, d'autre part, d'identifier et de cartographier zones à risque nécessitant la plus grande priorité d'intervention pour la protection du patrimoine sol afin de réduire les apports solides au niveau de la retenue du barrage de Taskourt. L'analyse des résultats du modèle USLE nous a permis d'évaluer la dégradation spécifique moyenne à 9,38 t/ha/an, avec une quantité de sédiments moyenne délivrée à l'exutoire de 0,7 t/ha/an, valeur qui reste très inférieure aux données révélées par le modèle HEUSCH qui estime la contribution à l'envasement de 9,34 t/ha/an.

Cela prouve que le modèle de Wischmeier seul, n'est pas suffisant pour estimer la dégradation spécifique au bassin versant d'Assif El Mal du fait qu'il ne prend pas en considération un paramètre important, à savoir le sapement des berges les apports des glissements de terrains très fréquents dans le Haut Atlas.

ABSTRACT

This study aims to implementing the techniques of digital cartography, from the treatments of satellite pictures to geographical information system (SIG) while being melted on the model of USLE and HEUSCH.

This allow to quantify the annual losses in grounds on the level of the catchment area of Assif El Mal and, it also allows to identify and to chart the zones at the risk requiring the greatest priorityof intervention for heritage protection ground, in order to reduce the solid contributions to the level of the reserve of the dam Taskourt. The analyze results of model USLE allowed us to evaluate specific degradation average to 9.38 t/ha/year, with an average quantity of sediments delivered in the discharge system of 0.7 t/ha/year, value which remains much lower than the data revealed by model HEUSCH 9.34 t/ha/year.

That proves that the model of Wischmeier alone is not sufficient to consider degradation specific to the catchment area of Assif El Mal of fact that it does not take into account an important parameter, namely undermining of the banks the contributions of the very frequent landslides in the High Atlas.

DÉDICACES

Je dédie ce travail, comme preuve de respect, de gratitude et de reconnaissance à :

Ma chère famille pour son affection, sa patience et ses prières.

Mes meilleurs amis pour leur aide, leur temps, leur encouragements et leur assistance et soutien.

Mon encadrant Mr L. Daouidi qui m'a aidé à améliorer mes connaissances en me donnant informations et conseils.

A tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Merci infiniment.

Remerciement

Avant tout, j'aimerais exprimer ma gratitude et mes sentiments les plus respectueux à mon encadrant Professeur Lahcen Daoudi, pour son soutien, son encadrement de qualité et ses efforts continus pendant toute cette période de stage et sans qui ce travail n'aurait jamais pu voir le jour.

Mes remerciements s'adressent aussi à tous les Professeurs du Département des Sciences de la Terre de la Faculté des Sciences et Techniques, qui ont participé d'une façon ou d'une autre à la réalisation de ce travail. Et particulièrement Monsieur Saidi pour toutes les informations et l'aide qu'il m'a offerts pendant la période de collecte des données.

Il est aussi indispensable aussi de remercier Monsieur le Chef du service d'aménagement des bassins versants de la Direction Régionale des Eaux et Forêts, et Monsieur El Maâtaoui, responsable de la gestion des barrages à l'Agence du Bassin Hydraulique de Tensift, pour leur coopération en me facilitant l'accès aux informations et aux données.

Finalement, je remercie tous mes amis et mes collègues et spécialement Mlle Arrebei Nassima et Mlle Omdy Fatima Ezzahra, étudiante en cycle de Doctorat à la FSTG, pour leur sympathie et leur contribution à l'amélioration et la réussite de ce travail.

SOMMAIRE

SOMMAIRE	1
LISTE DES FIGURES	3
LISTE DES TABLEAUX	5
LISTE DES ABREVIATIONS	6
INTRODUCTION GENERALE	7
CHAPITRE1 : PROBLEMATIQUE DE L'ENVASEMENT DES BARRAGES	9
I- INTRODUCTION.....	9
II- L'ENVASEMENT DANS LES PAYS DE L'AFRIQUE DU NORD	9
III- LA SEDIMENTATION DANS LES BARRAGES AU MAROC	10
III-1- <i>Problématique de perte de sol au Maroc</i>	10
III-2- <i>Problématique de l'envasement au Maroc</i>	14
IV- PROBLEMES POSES PAR L'ENVASEMENT:.....	14
CHAPITRE2 : PROCESSUS D'EROSION HYDRIQUE	15
I- INTRODUCTION.....	15
II- ORIGINE ET MECANISME DE L'EROSION HYDRIQUE	15
II-1- <i>Impacte de la goutte de pluie</i>	15
II-2- <i>Ruissellement</i>	16
III- LES FORMES D'EROSION HYDRIQUE	16
III-1- <i>L'érosion en nappe ou "sheet érosion"</i>	16
III-2- <i>L'érosion linéaire (micro-channel ou Rill érosion)</i>	17
III-3- <i>L'érosion en masse</i>	18
IV- LES FACTEURS DE L'EROSION HYDRIQUE :	19
IV-1- <i>Intensité et agressivité des précipitations</i> :	19
IV-2- <i>Le ruissellement</i> :	19
IV-3- <i>L'état hydrique initial</i>	20
CHAPITRE3 : CADRE GENERAL DE LA REGION D'ETUDE	21
I-SITUATION GEOGRAPHIQUE ET ADMINISTRATIVE	21
II- TOPOGRAPHIE DU BASSIN	24
II-1 <i>Contexte général</i>	24
II-2 <i>Carte des altitudes</i> :.....	26
II-3 <i>Carte des pentes</i> :.....	27
III- CONTEXTE CLIMATIQUE.....	29
III-1 <i>Précipitations</i>	29
III-2 <i>Régime thermique</i>	35
IV- CONTEXTE HYDROLOGIQUE	35
IV-1 <i>Réseau hydrographique du bassin versant</i>	35
IV-2- <i>Caractéristiques du BV</i> :.....	37
IV-2-1 <i>Indice de compacité de Gravellius Kc</i>	37
IV-2-2 <i>Temps de concentration Tc</i>	37
IV-2-3 <i>Densité de drainage Dd</i>	38
IV-3 <i>Ressources en eau</i>	38
IV-3-1 <i>Eaux superficielles</i>	38
IV-3-2 <i>Eaux souterraines</i>	39
IV-3-3 <i>Bilan hydrologique</i>	39
V- CONTEXTE GEOMORPHOLOGIQUE.....	40
VI-FICHE TECHNIQUE DU BV	42
CHAPITRE4 : QUANTIFICATION DE L'EROSION	43
I- QUANTIFICATION DES PERTES EN TERRE	43
I-1- <i>Mesures directes</i>	43

I-1-1-Les méthode topographiques	43
I-1-2-Simulation de pluie :.....	44
I-1-3-Mesures par l'étude du transport solide.....	45
I-2-Mesures indirectes (la modélisation).....	45
II- PROBLEMATIQUE DE L'UTILISATION DES MODELES PHYSIQUES (INDIRECTES)	45
III-ESTIMATIONS DE L'EROSION DES SOLS D'APRES LES MODELES USLE, PESERA, INRA ET HEUSH.	46
III-1-Estimations de l'érosion des sols d'après le modèle INRA	46
III-3-Estimations de l'érosion des sols d'après le modèle USLE.....	48
III-4-Estimations de l'érosion des sols d'après le modèle HEUSH	48
IV- METHODE DE VALIDATION	48
CHAPITRE549 : ESTIMATIONS DE L'EROSION DES SOLS D'APRES LE MODELE USLE.....	50
I- INTRODUCTION.....	50
II- FACTEUR TOPOGRAPHIQUE (LS)	51
III- FACTEUR DE L'ERODABILITE DES SOLS (K).....	54
III-1-Caractérisation des sols de la zone d'étude	54
III-2-Les types de sols caractérisant la région.....	56
IV- LE COUVERT VEGETAL (C)	59
IV-1-occupation des sols.....	59
VI-2-couvert végétal	62
V- PRATIQUES CULTURALES (P).....	64
VI- AGRESSIVITE CLIMATIQUE (R).....	64
VII- CONCLUSION : EROSION POTENTIELLE (A)	66
CHAPITRE6 : ESTIMATIONS DE L'EROSION DES SOLS D'APRES LE MODELE HEUSH	68
I-INTRODUCTION	68
II- LA LAME D'EAU RUISSELEES Q	68
II-1-Sous bassins versants d'Assif El Mal	68
II-2-Précipitation annuelles.....	71
II-3-Relation entre les précipitations et les ruissellements	72
II-4-Ruissellement annuels.....	72
III- LA TURBIDITE	76
IV- CONCLUSION : EROSION POTENTIELLE.....	80
CHAPITRE7 : DISCUSSION ET INTERPRETATIONS	81
I- COMPARAISON DES RESULTATS OBTENUS PAR HEUSCH ET USLE	81
II- AVANTAGES ET INCONVENIENTS DES DEUX MODELES	85
II-1-Avantages	85
II-1-1-Modèles d'USLE.....	85
II-1-2-Le modèle de Heusch	86
II-2-Faiblesses	86
II-2-1-Le modèle de Heush.....	86
II-2-2-Le modèle d'USLE.....	86
III-VALIDITE DES MODELES UTILISEES :	87
IV-ZONES PRIORITAIRES :	90
IV-1-Modèle de Heusch	90
IV-2-Modèle de Wischmeier	90
IV-3-Conclusion des zones prioritaires en combinant les deux modèles.....	90
V-PROGRAMME D'INTERVENTION	90
V-1-programme d'intervention prévu	90
V-1-programme d'intervention proposé :.....	93
VI-DUREE DE VIE DU BARRAGE :.....	95
VI-1-Fiche synoptique du Barrage de Taskourt	95
VI-1-1-SITUATION DE L'OUVRAGE :.....	95
VI-1-2-BUT DE L'OUVRAGE :.....	95
VI-1-3-CARACTERISTIQUES :.....	95
VI-2-Durée de vie du barrage	97
CONCLUSIONS.....	99
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	101

LISTE DES FIGURES

FIG 1 : TAUX D'ENVAISEMENT DANS LES PAYS DU MAGHREB	10
FIG 2 : BASSINS PRIORITAIRES SELON LE PLAN D'AMENAGEMENT DES BASSINS VERSANTS (SECRETARIAT D'ETAT CHARGE DE L'EAU, 2001).....	12
FIG 3 : EFFET SPLASH	16
FIG 4 : L'EROSION EN NAPPE	17
FIG 5 : L'EROSION LINEAIRE.....	18
FIG 6 : SCHEMA DE L'EROSION EN MASSE	18
FIG 7 : POSITION GEOGRAPHIQUE DE LA ZONE D'ETUDE DANS LE BASSIN DE TENSIFT- AL HOUZ.....	21
FIG 8 : IMAGE SATELLITAIRE DE LA ZONE D'ETUDE	22
FIG 9 : SITUATION ADMINISTRATIVE DE LA ZONE D'ETUDE	23
FIG 10 : SITUATION DE LA ZONE D'ETUDE SUR LA CARTE TOPOGRAPHIQUE.....	25
FIG 11 : CARTE DES ALTITUDES	26
FIG 12 : COURBE HYSOMETRIQUE	27
FIG 13 : CARTE DES PENTES	28
FIG 14 : PRECIPITATIONS MOYENNES MENSUELLES	30
FIG 15 : SITUATION DES STATIONS UTILISEES	30
FIG 16 : RELATION ENTRE LES PRECIPITATIONS ET L'ALTITUDE	31
FIG 17 : CARTE DES PRECIPITATIONS ANNUELLES	32
FIG 18 : CORRELATION ENTRE LES PRECIPITATIONS ANNUELLES ET MAXIMALE	33
FIG 19 : CARTE DES ISOHYETES DES PRECIPITATIONS MAXIMALE DE DUREE 24H ET 50ANS DE PERIODE DE RETOUR DU BASSIN VERSANT D'ASSIF EL MAL.....	34
FIG 20 : CARTE DES PRECIPITATIONS ANNUELLES	35
FIG 21 : RESEAU HYDROGRAPHIQUE DE LA REGION D'ETUDE	36
FIG 22: CARTE GEOLOGIQUE DE LA REGION	41
FIG 23: RUGOSIMETRE A BORNES D'ACIER INOXYDABLE.....	43
FIG 24 : MESURE DES DIMENSIONS D'UNE RIGOLE.....	44
FIG 25 : SIMULATION DES PLUIES SUR PARCELLE DE 1 M ²	44
FIG 26 : CONCEPTION DU MODELE INRA.....	47
FIG 27 : CONCEPTS DU MODELE PESERA (GOBIN ET GOVERS, 2003)	47
FIG 28 : EVALUATION DE LA RELATION EXISTANTE ENTRE LES DEPOTS DE SEDIMENTS OBSERVES ET LES DEPOTS DE SEDIMENTS CALCULES (ITALIE).....	49
FIG 29 : CONCEPT DU MODELE DE WISCHMEIER	50
FIG 30 : PRINCIPE DE L'APPROCHE UTILISEE	51
FIG 31 : CARTE DES PENTES (DEGRES)	53
FIG 32 : FORMATION GEOLOGIQUES DU BV.....	54
FIG 33 : IMPORTANCE DE DURETE DE SUBSTRAT.....	55

FIG 34 : CARTE PEDOLOGIQUE DU BV	56
FIG 35 : CARTE DE L'ERODABILITE DES SOLS	58
FIG 36 : REPARTITION DES CLASSES LITHOLOGIQUE DANS LA ZONE D'ETUDE	60
FIG 37 : CARTE D'OCCUPATION DES SOLS	61
FIG 38 : CARTE DU COUVERT VEGETAL	63
FIG 39 : CARTE D'AGRESSIVITE CLIMATIQUE.....	65
FIG 40: CARTE D'EROSION POTENTIELLE.....	67
FIG 41 : CARTE DES SOUS BASSINS VERSANT	70
FIG 42 : CARTE DES PRECIPITATIONS PAR SOUS BASSIN	71
FIG 43 : RELATION PRECIPITATIONS RUISSELLEMENT	72
FIG 44 : CARTE DES RUISSELLEMENTS PAR SOUS BASSIN.....	75
FIG 45 : CARTE LITHOLOGIQUE PAR SOUS BASSINS	75
FIG 46 : CARTE DE TURBIDITE PAR SOUS BASSIN	79
FIG 47 : CARTE D'EROSION PAR SOUS BASSIN	80
FIG 48 : CARTE DES CLASSES DE L'EROSION POTENTIELLE (USLE).....	82
FIG 49 : CARTE DES CLASSES DE L'EROSION POTENTIELLE (HEUSCH).....	84
FIG 50 : CARTE GENERALE DE LA DEGRADATION DU NORD DU MAROC ETABIE SELON LA METHODE DE WISCHMEIER	89
FIG 51: LES DIFFERENTES INTERVENTIONS PREVUES ET LEURS NATURES	92
FIG 52 : CARTE DES AMENAGEMENTS PROPOSES.....	94
FIG 53 : IMAGES DU BARRAGE DE TASKOURT.....	96
FIG 54: CORRELATION ETUDIEE ENTRE LES DEGRADATIONS SPECIFIQUE ET L'ENVASEMENT ANNUEL DES BARRAGES CORRESPONDANTS	98

LISTE DES TABLEAUX

TAB 1 : PERTES ECONOMIQUES DE L'ENVAISEMENT DES BARRAGES (SECE 2001).....	13
TAB 2 : L'IMPORTANCE DES PERTES EN SOLS PAR TYPE D'EROSION	19
TAB 3 : CLASSES D'ALTITUDES ET LEURS SURFACES	27
TAB 4 : CLASSES DE PENTES	27
TAB 5 : PRECIPITATIONS MOYENNES ANNUELLES ET MENSUELLES	29
TAB 6 : LISTE DES STATIONS UTILISEES	31
TAB 7 : PRECIPITATIONS MAXIMALES DE DUREE 24H A DIFFERENTES PERIODES DE RETOUR ET PRECIPITATION MOYENNES ANNUELLES CORRESPONDANTES POUR DIFFERENTES STATIONS.....	33
TAB 8 : DONNEES DE LA STATION D'AMIZMIZ ET D'AGAIOUAR.....	35
TAB 9 : COEFFICIENT DE FORME KC	37
TAB 10 : TEMPS DE CONCENTRATION TC.....	38
TAB 11: DENSITE DE DRAINAGE DD	38
TAB 12 : PARTIE RUISSELEE.....	39
TAB 13 : BILAN HYDROLOGIQUE DE LA ZONE D'ETUDE	39
TAB 14 : FICHE SYNTHETIQUE DU BASSIN VERSANT D'ASSIF EL MAL	42
TAB 15 : RECAPITULATIF DES DIFFERENTS MODELES D'ESTIMATION DE L'EROSION	46
TAB 16 : LES CLASSES DE L'INDICE DE PENTES ET LEURS SURFACES DANS LE BV DE L'ASSIF EL MAL.....	52
TAB 17 : CONCEPTS DU MODELE USLE	54
TAB 18 : LES CLASSES DE DURETE DE SUBSTRAT ET LA SURFACE QUI OCCUPENT	55
TAB 19 : LES UNITES PEDOLOGIQUES DE LA ZONE D'ETUDE ET LES VALEURS K CORRESPONDANT	57
TAB 20 : CLASSES D'OCCUPATIONS DU SOL DAN LA ZONE D'ETUDE	60
TAB 21 : CLASSES D'OCCUPATIONS DU SOL DANS LA ZONE D'ETUDE	62
TAB 22 : LISTE DES SOUS BASSINS VERSANTS ET LEURS CARACTERISTIQUES.....	74
TAB 23 : DIFFERENTES CORRELATIONS ELABOREES PAR HEUSH ENTRE LES APPORTS SOLIDES EN SEDIMENTS ET CEUX LIQUIDES AUX NIVEAUX DES BV	76
TAB 24 : LISTE DES SOUS BASSINS VERSANTS ET LEURS TAUX D'EROSION	78
TAB 25 : REPARTITION DES CLASSES DE L'EROSION POTENTIELLE (USLE).....	81
TAB 26 : REPARTITION DES CLASSES DE L'EROSION POTENTIELLE (HEUSCH)	83
TAB 27 : RECAPITULATION DE LA DIFFERENCE ENTRE LE MODELE DE HEUSCH ET D' USLE.....	85
TAB 28 : LES ACTIONS PREVUES POUR LA PROTECTION DU BASSIN CONTRE LA DEGRADATION DU SOL	91
TAB 29 : BARRAGES UTILISEE AFIN DE SORTIR LA RELATION ENTRE LA DEGRADATION SPECIFIQUE ET L'ENVAISEMENT ANNUEL	97

Liste des abréviations

BV : Bassin versant

MDH : Millions de Dirhams

USLE: Universal Soil-Loss Equation

FAO : Food and Agriculture Organization

MNT : Modèle numérique de terrain

STRM : Shuttle Radar Topographie Mission

RH : Réseau Hydraulique

NGM : Niveau général de la mer

ETP : Évapotranspiration potentielle

ETR : Évapotranspiration réelle

INRA : Institut National de la Recherche Agronomique

PESERA : Pan European Soil Erosion Risk Assesment

SDR : Le ratio de dépôt de sédiment

LS : Indice de pente et de sa longueur

NDVI : Indice de végétation normalisé

TTOBA : Bureau d'études

DREF : Direction Régionale des Eaux et Fôrets

PHE : Plus Haut Eau

ABHT : Agence du Bassin Hydraulique de Tensift

SECE : Secrétariat d'Etat Chargé de l'Eau

INTRODUCTION GENERALE

Le climat marocain comporte des contrastes très marqués dans le temps et dans l'espace et génère, en somme, des ressources rares. La première caractéristique nous oblige à stocker l'eau par temps d'abondance afin de l'utiliser par temps de pénurie, la deuxième nous oblige à transférer les eaux des bassins excédentaires du Nord-Ouest vers les bassins déficitaires du Centre et du Sud et la troisième nous incite à ne laisser aucune goutte d'eau s'écouler vers la mer. La complexité du climat due à ces trois caractéristiques principales est exacerbée par une évaporation excessive, une évapotranspiration extrême, de longues et fréquentes périodes de sécheresse, des pluies précoces, tardives ou violentes et par conséquent stériles...

L'eau au Maroc est donc placée sous le signe de la rareté. Rareté exacerbée, par une disparité spatiale et une irrégularité temporelle importantes. Les précipitations que reçoit le Maroc en année moyenne sont estimées à 140milliards de m³ environ. La pluie dite "efficace" ne représente qu'une faible part des précipitations totales, soit environ 25 milliards de m³, le reste (115milliards de m³) est restitué à l'atmosphère sous forme d'évapotranspiration. Devant l'ampleur de ce phénomène qui croît essentiellement avec les températures élevées mais également avec le degré de nudité du sol, l'homme reste malheureusement impuissant. L'on ne peut guère augmenter sensiblement son lot de pluie efficace, tout juste si on peut tirer meilleur profit de l'évapotranspiration par le reboisement.

On estime à 20 milliards de m³ le potentiel d'eau mobilisable sur les 25 générés par la pluie efficace, dont 16milliards sont des eaux superficielles et 4 milliards des eaux souterraines. Cependant, pour le mobiliser il faut des centaines de milliers de forages et puits pour les eaux souterraines et une capacité de stockage estimée à 30 milliards de m³ pour les eaux de surface. Il y a lieu de faire remarquer que notre capacité actuelle qui avoisine 17milliards de m³, n'a été constituée que grâce à une volonté manifeste et un désir obstiné de vaincre les caprices du temps.

Pour satisfaire la demande en eau estimée à 20 milliards de m³ à l'horizon 2020 (DGH, 1998), la politique du Maroc en matière des ressources en eau s'est orientée depuis la véritable révolution menée pendant le règne du roi Hassan II (1961-1999) vers la politique de construction de barrages.

Jusqu'à présent la mobilisation des ressources en eau de surface est assurée par environ 130 barrages, répartis sur tout le territoire du royaume, à travers une capacité de stockage globale de 17.5 milliards de m³.

Cependant le plus grand risque auquel sont exposés les barrages est celui de l'envasement suite à l'érosion intense des bassins versants situés en amont des retenus. Au Maroc, la perte de capacité de stockage des retenues de barrages par l'envasement est estimée à 75 Millions de m³/an.

Sur une superficie totale des BV de 20 Millions d'hectares 50 % sont exposées au risque d'érosion. On constate ainsi que la majorité des BV du Maroc est caractérisée par de fortes dégradations spécifiques > 20 T/ha/an.

Dans les régions soumises à de fortes érosions, le processus d'envasement est à l'origine d'une réduction drastique de la capacité de stockage. Par ailleurs, ce risque menace également

la performance des barrages par la détérioration de la sécurité de l'ouvrage ainsi que par le blocage des organes de vidange, ce qui réduit considérablement leur durée de vie.

Chaque année l'envasement diminue la capacité totale des infrastructures hydrauliques nationales. Ces pertes de capacité sont estimées à 66 Mm³/an (quantité d'eau nécessaire pour irriguer 6 000 ha/an), soit une diminution de 0,5% par an, diminution qui cause chaque année des pertes économiques estimées en 10084MDH.

Les pertes économiques, liées à l'érosion des sols et à l'envasement des barrages au Maroc, vont de plus en plus augmenter si des actions de conservation des sols et des eaux associées à des actions de développement ne sont pas entreprises. Ainsi, l'importance accordée, ces dernières années, à la stratégie en matière d'aménagement des bassins versants, découle de l'intérêt de la mobilisation des eaux et par conséquent, de la nécessité de réduire l'envasement des retenues de barrages. En effet, les bassins versants à l'amont des barrages présentent des risques importants d'érosion dus essentiellement aux défrichements des forêts, au surpâturage et à la mise en culture des terrains à pente fortes.

Malheureusement pour faire face à ces problèmes, l'expérience marocaine sur le plan technique se montre très limitée et très en retard par rapport à celle de nombreux pays méditerranéens, comme la Tunisie et l'Italie dont l'expérience se développe rapidement. Parmi les facteurs de ce retard, on peut citer le manque de données hydro pluviométrique et d'étude de faisabilité technique adaptées aux systèmes hydrologiques. D'où le recours aux méthodes empiriques, notamment pour l'estimation prévisible des charges solides.

Bien que toutes les cartes d'érosion aient été produites avec les données les plus précises possible disponibles à l'échelle européenne, beaucoup d'auteurs mettent en avant les incertitudes résultant de ce genre d'application. Il est vrai que de telles estimations doivent être utilisées avec précaution. En fait, il est pratiquement impossible d'arriver à la mise en place de politiques cohérentes à partir de carte d'érosion des sols, s'il n'existe pas également d'estimations fiables de la marge d'erreur pour les prédictions.

La validation des estimations d'érosion est vraiment problématique. De plus les processus d'érosion sont caractérisés à la fois par une grande variabilité temporelle et spatiale. A l'heure actuelle il n'a pas été évalué la précision des estimations à grande échelle.

Dans cette étude, deux méthode alternative ont été utilisés afin d'atteindre les objectifs suivants :

- Estimer la fiabilité des estimations des modèles USLE et HEUSCH
- Quantification des taux d'érosion dans la zone d'étude
- Détermination des zones prioritaires qui nécessitent une intervention
- Détermination des taux d'envasement et la durée de vie du barrage Taskourt

CHAPITRE 1

PROBLEMATIQUE DE L'ENVASEMENT DES BARRAGES

I- INTRODUCTION

L'envasement est défini comme étant le dépôt de sédiments dans les retenues des barrages, réduisant ainsi leurs capacités de stockage. La construction d'un barrage change les caractéristiques hydrauliques de l'écoulement et la capacité de transport des sédiments transportée par l'écoulement (Chow, 1964), La matière solide tend à se déposer à l'approche des plans d'eau, car en réduisant sa vitesse, l'écoulement perd petit à petit sa capacité de transport. Quand le cours d'eau s'approche et se jette dans le lac du réservoir, les particules grossières se déposent en premier ensuite les plus fines jusqu'à atteindre la digue. N'ayant pas où s'échapper le dépôt se tasse et se consolide en réduisant ainsi la capacité de stockage du réservoir, sachant qu'en moyenne 90% des sédiments transportés par le cours d'eau sont piégés (Chow, 1964).

Dans de nombreux pays dans le monde, le transport des sédiments dans les réseaux hydrographiques des bassins versants et leurs dépôts dans les retenues posent aux exploitants de barrages des problèmes dont la résolution ne peut qu'être onéreuse. Non seulement la capacité utile est progressivement réduite, mais encore l'enlèvement de la vase est une opération délicate et difficile .

II- L'ENVASEMENT DANS LES PAYS DE L'AFRIQUE DU NORD

La sédimentation dans les barrages des pays de l'Afrique du Nord est très élevée et même spectaculaire. Elle est due directement aux forts taux d'érosion des bassins versants ; ce phénomène entraîne l'envasement rapide de nombreuses retenues d'eau. Les barrages réservoirs s'ensavent et perdent de la capacité utile et le rejet de la vase dans les cours d'eau pose d'énormes problèmes écologiques et environnementales.

Le Maghreb est considéré comme le plus touché par le problème d'érosion et d'envasement en Afrique, surtout si on se réfère aux travaux de Walling (1984) qui a lancé une fourchette de l'érosion spécifique de 10 à 50 t/ha/an. Les trois pays du Maghreb dispose de 230 barrages d'une capacité totale de 23 Milliards de m³ dont 61% reviennent au Maroc, 23 % à l'Algérie et 16% à la Tunisie (Remini, 2003) (**Figure 1**). Ces barrages enregistre une perte annuelle dans la capacité est de 125 Hm³ répartie comme suit :

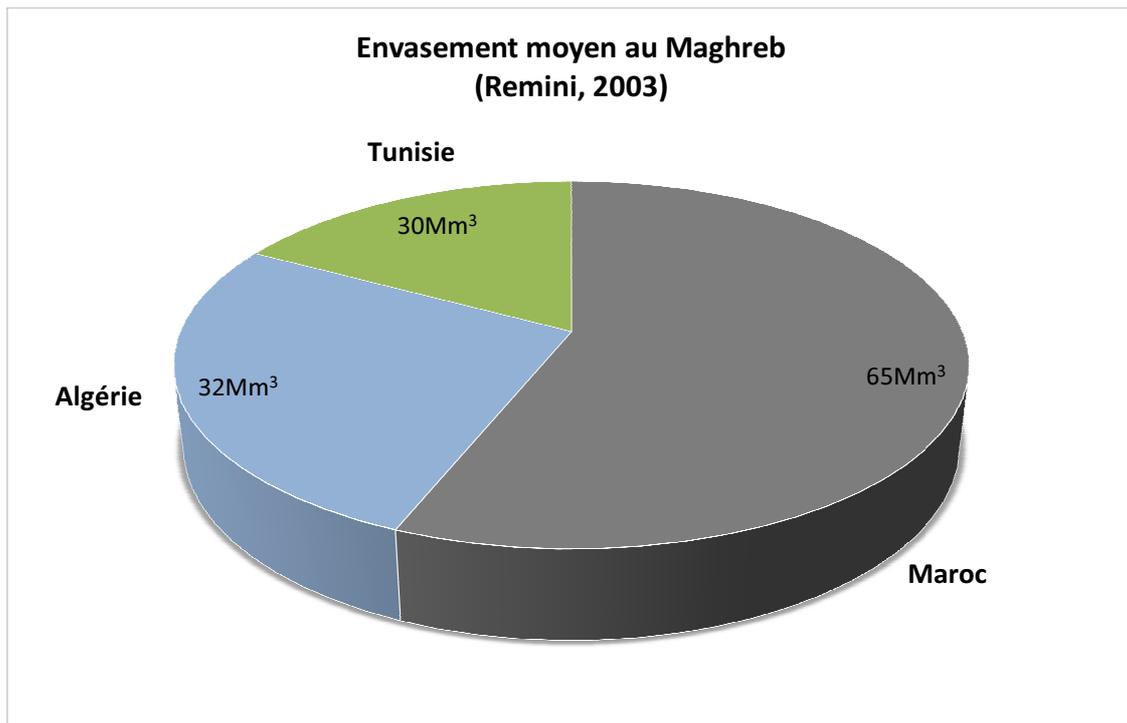


Fig.1 : Taux d'envasement dans les pays du Maghreb

D'après Fox (1997) l'envasement moyen au Maroc varie entre 0,11% à 1,6% par an suivant les régions. En Algérie c'est une moyenne de 0,6% de la capacité de stockage qui disparaît chaque année sous la vase. D'après le rapport des ressources en eau au Maghreb (2009), ces chiffres sont en hausse pour atteindre 45 Hm³/an avec un volume envasé global de 1,1 Milliards de m³, ce qui représente 17% du volume total de stockage. Ces valeurs paraissent assez réduites, mais leurs conséquences économiques et aussi environnementales sont considérables, en plus des risques sur la stabilité de l'ouvrage, et sur le fonctionnement des équipements hydromécaniques surtout que la densité de la vase derrière la digue peut atteindre 1,8 (Fox, 1997).

Malgré l'importance du problème, la plupart des études de faisabilité des barrages se base sur des formules expérimentales pour déterminer le volume de vase de projet considéré comme un volume mort, sans être guidé par des facteurs régionaux, ce qui peut engendrer des écarts d'estimation assez considérable.

III- LA SEDIMENTATION DANS LES BARRAGES AU MAROC

III-1- Problématique de perte de sol au Maroc

Le sol est une ressource naturelle limitée, dont la genèse demande des centaines voir des milliers d'années. Cette ressource est à la base d'activités socio-économiques (agriculture, pastoralisme...), aussi bien qu'elle assure des fonctions écologiques de premier ordre : maintien de la végétation, drainage/infiltration de l'eau, etc.

La dégradation des sols entraîne entre autres, la diminution des rendements agricoles ayant un impact sur la sécurité alimentaire; et l'envasement des barrages qui compromet la gestion des ressources en eau.

La conservation et la gestion rationnelle et écologique du sol, et sa protection contre les facteurs d'érosion, de salinité et de désertification sont à la base du développement durable au Maroc.

Les sols au Maroc subissent une érosion à des taux qui dépassent de loin les normes internationales. La dégradation spécifique moyenne varie entre 2 et plus de 20 t/ha/an. Ces taux sont excessifs surtout pour les bassins du Nord et du Nord-Ouest où ils dépassent les 20 t/ha/an.

Quatre catégories de régions peuvent être distinguées selon l'importance de la dégradation spécifique :

- * une zone à dégradation spécifique supérieure à 20 t/ha/an, comprenant le versant rifain du Sebou (Oued Ouergha).
- * une zone à dégradation spécifique comprise entre 10 et 20 t/ha/an, ce sont les régions pré rifaines du Sebou et du Loukkos.
- * une zone à dégradation spécifique variant entre 5 et 10 t/ha/an, représentée par certains versants de l'oued Oum Er Rabia et du Souss (Tessaout, Issen, et Bine El Ouidane).
- * les autres régions ont une dégradation spécifique inférieure à 5 t/ha/an.

L'érosion hydrique menace presque tout le territoire du pays. La plupart des chiffres avancés au Maroc sont basés essentiellement sur :

- * L'envasement des barrages existants en aval des bassins versants;
- * La mesure de turbidité des eaux de ruissellement;
- * Les indices de risque d'érosion (Boutayeb, 1988, FAO 1975, Arnoldus 1977).

Une étude réalisée à l'échelle de reconnaissance (FAO, 1995) a montré que sur 22,7 millions d'hectares évalués :

- * 8,2 millions d'hectares (36%) seraient cultivables, dont 18% nécessitent des mesures sévères de conservation du sol,
- * 13,4 millions d'hectares (59%) ne devraient être mis en valeur que par le pâturage et la forêt,
- * 1,1 millions d'hectares (5%) subissent une érosion intense et par conséquent doivent être exclus de toute mise en valeur agricole.

Ainsi 62% de la superficie totale des bassins ne doit pas être cultivée.

Par ailleurs, le plan d'Aménagement des Bassins versants a identifié et a classé 22 bassins prioritaires (**Figure 2**) en amont des barrages d'une superficie totale d'environ 15 millions d'hectares dont presque les trois quarts (11 millions) présentent des risques importants d'érosion hydrique (Secrétariat d'Etat chargé de l'Eau, 2001)

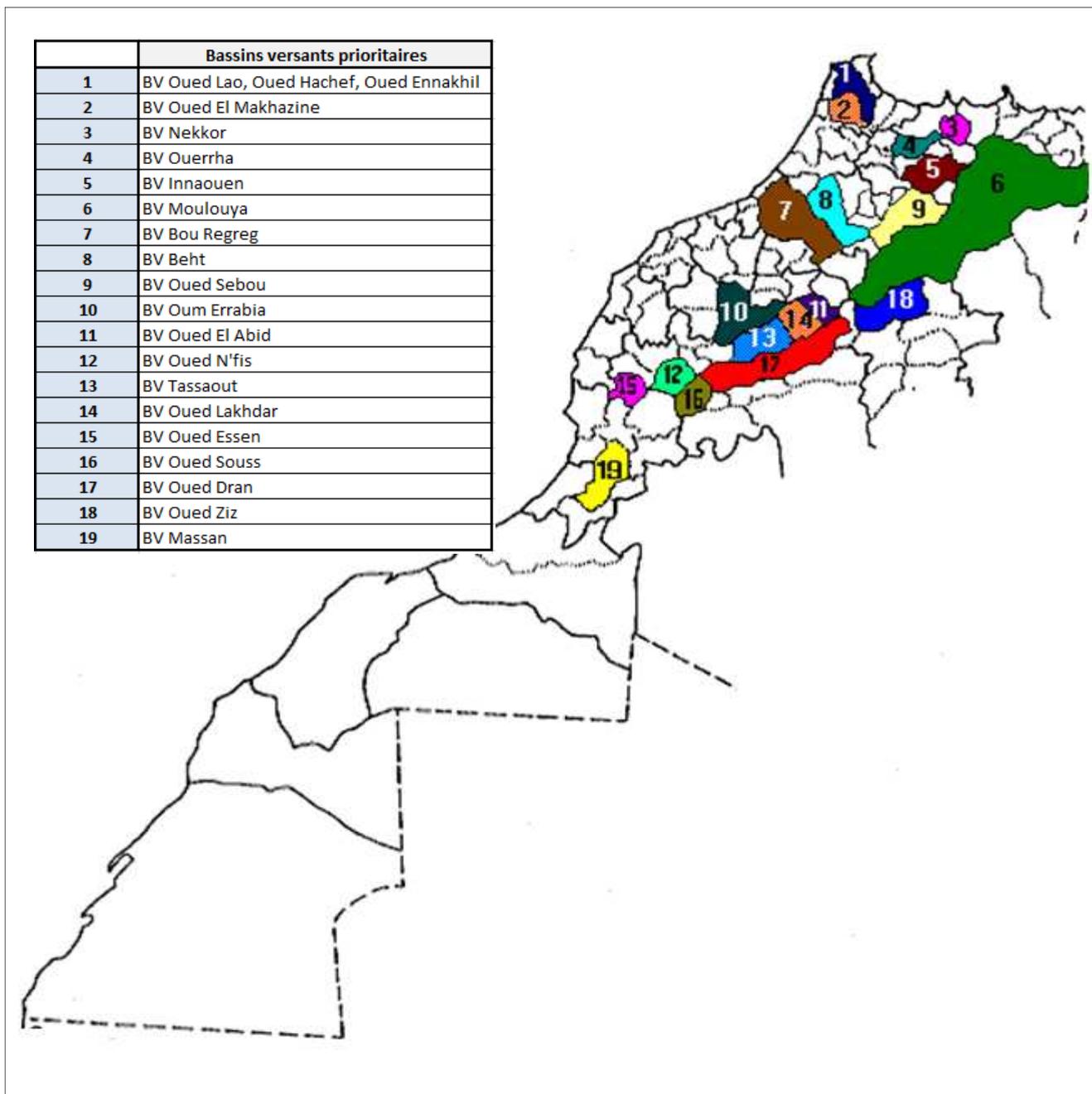


Fig 2.: bassins prioritaires selon le plan d'Aménagement des Bassins versants (Secrétariat d'Etat chargé de l'Eau, 2001)

Le **tableau 1**, montre la contribution de ces bassins versants prioritaires au phénomène de l'envasement ainsi que les pertes économiques résultantes. On remarque que la plus grande valeur d'envasement est enregistré au niveau du barrage Ouahda avec un taux d'envasement de 18.5 Mm³/an avec une dégradation spécifique dans le bassin versant correspondant de 20 t/ha/an.

Ordre de priorité	Barrages des bassins versants prioritaires	Superficie BV (Km ²)	Capacité de la retenue Mm ³	Dégradation spécifique (t/ha/an)	Superficies à risque Total (%)	Envasement annuel (Mm ³ /an)	Pertes amont (MDH)	Pertes aval (MDH)	Total Pertes (MDH)
1	Mohammed V	49920	465	3	83%	10	630	1185	1815
2	Ouahda	6153	3730	20	83%	18.5	1462	0	1462
3	Hassan I	1670	254	26	71%	2.9	607	145	752
4	Moulay Youssef	1441	175	27.06	75%	2.6	454	281	735
5	Oued El Makhazine	1820	772	37.91	76%	4.6	627	103	730
6	Idriss I	3680	1173	8.97	87%	2.2	659	0	659
7	Allal El Fassi	5765	81	20	50%	1.2	629	0	629
8	El Kansera	4540	265	4.63	87%	1.4	478	108	586
9	Bine El Ouidane	6400	1300	11.72	83%	5	549	0	549
10	Mansour Ed Dahbi	15000	505	4.7	85%	4.7	221	169	390
11	Med Ben A Khattabi	780	34	25	80%	1.3	198	118	316
12	Lalla Takerkoust	1707	68	4.39	81%	0.5	254	39	293
13	Sidi M. B. Abdellah	9800	477	2.6	50%	1.7	258	0	258
14	Youssef Ben Tachfine	3784	303	8.32	85%	1.43	147	41	188
15	Aoulouz	4500	100	3.2		2.1	78	49	127
16	Al Massira	28500	2747	1.32	66%	2.5	118	0	118
17	Hassan Eddakhil	4400	343	3.99	85%	1.17	79	34	113
18	Ibn Batouta	178	36	47.19	60%	0.56	33	80	113
19	Nakhla	107	6	42.06	71%	0.3	35	65	100
20	Abdelmoumen	1300	213	2.65	75%	0.23	55	0	55
21	Hachef	220	300	26.5	60%	0.5	55	0	55
22	Melleh	1800	8	0	5%	0.15	0	12	12
SOURCE : Secrétariat d'Etat chargé de l'Eau		TOTAL		331.21		65.54	7619	2429	10048

Tab.1 : Pertes économiques de l'envasement des barrages (SECE 2001)

II-2- Problématique de l'envasement au Maroc

Le problème d'envasement des barrages n'est pas un problème propre au Maroc ; beaucoup de pays dans le monde souffre du problème surtout dans les zones arides et semi-arides, où le manque de ressources hydrique est accentué par l'érosion des sols qui peut atteindre les 50 t/ha/an contre 0.30 à 0.50 t/ha/an en Europe (Abdelli, 2007).

La perte en sol d'un bassin versant donné est un indicateur fiable qui peut renseigner sur l'intensité de l'envasement des barrages, de la dégradation des bassins versants et du taux de mobilisation des ressources en eau

Chaque année l'envasement diminue la capacité totale des infrastructures hydrauliques nationales. Ces pertes de capacité sont estimées à 50 Mm³/an (quantité d'eau nécessaire pour irriguer 6 000 ha/an), soit une diminution de 0,5% par an. Jusqu'à présent Le volume total des barrages envasé est évalué à près de 830 Mm³, ce qui représente près de 8% de la capacité totale des barrages (Test Marocain des Indicateurs de Développement Durable, 2002).

L'analyse des pertes de capacité observées au niveau des vingt cinq grands barrages-réservoirs montre que :

- * Six retenues sont envasées à plus de 40% de leur capacité initiale,
- * Six retenues sont envasées de 20 à 40% de leur capacité initiale,
- * Les autres barrages subissent une perte de capacité inférieure à 20%.

Ces données illustrent l'importance que revêt la lutte contre l'érosion pour permettre une exploitation durable des ouvrages hydrauliques.

IV- PROBLEMES POSES PAR L'ENVASEMENT:

L'envasement pose d'énormes problèmes à savoir :

- * La réduction de la capacité : chaque année le fond vaseux évolue et se consolide avec occupation d'un volume considérable de la retenue.
- * La sécurité de l'ouvrage : l'envasement pose un problème sur la stabilité de l'ouvrage, on sait que pour une variation linéaire de la hauteur de la vase, la poussée progresse au carré de la hauteur.
- * Obturation des organes de vidange : un autre danger présenté par la vase est celui du dysfonctionnement des organes de vidange de fond.
- * Envasement des canaux d'irrigation : l'irrigation se fait généralement par de l'eau chargée en sédiments, c'est ainsi que ces particules fines vont se déposer dans les canaux réduisant leurs sections mouillées ceci pose le problème de comblement du réseau des canaux d'irrigation se trouvant à l'aval du barrage.
- * Dégradation de la qualité de l'eau : les sédiments véhiculent des produits chimiques (nitrates, sulfates) provenant en particulier des apports en éléments fertilisants pour les cultures, et se déposant dans les réservoirs entraînant ainsi une dégradation de la qualité de l'eau (Remini et al, 1997).

CHAPITRE 2

PROCESSUS D'ÉROSION HYDRIQUE

I- INTRODUCTION

Le terme érosion vient du latin « Erodere » qui signifie « Ronger », donc l'érosion est le détachement des particules du sol de leur emplacement initial pour les transportés en aval. Malgré que l'érosion ait un effet néfaste sur les zones amonts, elle enrichit les plaines qui constituent les principaux terrains agricoles.

L'érosion apparaît sous plusieurs formes :

- * L'érosion hydrique.
- * L'érosion aratoire ou mécanique sèche : C'est le travail du sol qui arrache les particules, les transporte et les dépose.
- * L'érosion thermique : la différence de température peut dégrader le sol et effriter les roches.
- * L'érosion chimique : l'attaque chimique est un facteur essentiel d'érosion, comme c'est le cas pour les roches calcaires.
- * L'érosion causée par les êtres vivants : parmi les êtres vivants qui causent le plus de dégâts c'est bien l'homme, en dégradant directement le sol ou en favorisant d'autres facteurs.

L'érosion hydrique est composée d'un ensemble de processus complexes et interdépendants qui provoquent le détachement et le transport des particules du sol. Elle se définit comme la perte de sol due à l'eau qui arrache et transporte la terre vers un lieu de dépôt.

II- ORIGINE ET MECANISME DE L'ÉROSION HYDRIQUE

La pluie et le ruissellement superficiel sont à l'origine de l'arrachage, du transport et du dépôt de la terre enlevée.

L'arrachage est due à la fois aux gouttes d'eau (par rejaillissement) et aux eaux de ruissellement, dont le transport est assuré par elles.

II-1-Impacte de la goutte de pluie

Les sols subissent un martèlement considérable causé par les gouttes de pluie. Les premières gouttes s'infiltrent dans le sol d'autant plus aisément qu'il est meuble et que sa porosité est élevée. Cette première phase s'accompagne d'un déplacement des particules et d'un tassement du sol. Lorsque la couche superficielle s'humidifie, trois processus se développent simultanément :

- * La dégradation de la structure.
- * La formation d'une pellicule de battance.
- * L'érosion par splash ou érosion par rejaillissement.

L'énergie cinétique des gouttes (**Figure 3**) est généralement utilisée comme paramètre pour déterminer le pouvoir érosif des pluies. Cette énergie cinétique peut être très élevée dans les régions humides ou semi-arides. En Afrique, par exemple, elle peut être deux à six fois plus importante que dans les zones tempérées.

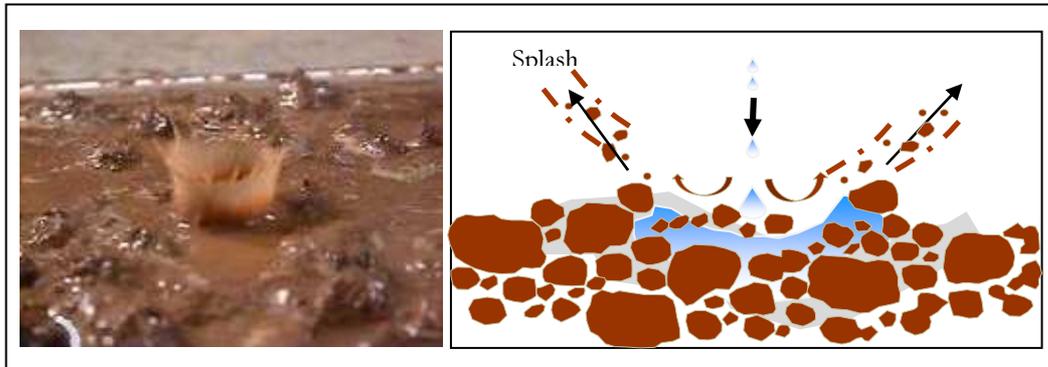


Fig.3.: Effet Splash

II-2-Ruissellement

Le ruissellement par saturation apparaît dans les situations où les capacités de stockage et de drainage de l'eau sont réduites à une certaine profondeur

L'érosion des sols se développe lorsque les eaux de pluie, ne pouvant plus s'infiltrer dans le sol, ruissellent sur la parcelle en détachant les particules de terre (Type Hortonien). L'eau excédentaire commence alors à couler à la surface du sol.

III- LES FORMES D'ÉROSION HYDRIQUE

III-1-L'érosion en nappe ou "sheet érosion"

L'érosion en nappe « sheet erosion » est le stade initial de la dégradation des sols par érosion hydrique. Elle entraîne la dégradation du sol sur l'ensemble de l'horizon superficiel, autrement dit il s'agit d'une forme d'érosion diffuse.

L'érosion en nappe se manifeste sur le terrain par la présence de plages de couleur claire aux endroits les plus découpés et les plus agressés des champs (sommets de collines et rupture de pentes). Elle se manifeste également par la remontée des cailloux en surface suite aux travaux successifs du sol. Les paysans parlent des « cailloux qui poussent ».

L'importance de l'érosion en nappe dépend à la fois de :

- * L'intensité maximale des pluies qui déclenchent le ruissellement.
- * L'énergie des pluies qui détachent les particules susceptibles de migrer.
- * La durée des pluies et/ou de l'humidité avant les pluies.

Pendant l'érosion en nappe, le déplacement des particules se fait avant tout par effet « splash » à courte distance et ensuite par le ruissellement en nappe. Le martèlement du sol par les gouttes de pluie envoie des gouttelettes et des particules dans toutes les directions. En réalité, ce n'est qu'après formation des flaques et débordement de l'eau non infiltrée d'une flaque à l'autre, que naît le ruissellement en nappe. Ce dernier, en s'étalant à la surface du

sol (**Figure 4**), maintiendra une faible vitesse même sur des pentes de 5 à 10 %, à cause de la rugosité de la surface (présence de mottes, de cailloux, d'herbes, etc.) qui l'empêchent de dépasser la vitesse limite de 25 cm/seconde.



Fig 4 : L'érosion en nappe

III-2-L'érosion linéaire (micro-channel ou Rill érosion)

Lorsque l'intensité des pluies dépasse la capacité d'infiltration du sol, des flaques se forment; ensuite celles-ci communiquent par des filets d'eau et lorsque ces derniers prennent une certaine vitesse, 25 cm/s d'après Hjulström (1935), ils acquièrent une énergie propre qui va créer une érosion limitée dans l'espace par des lignes d'écoulement. Cette énergie n'est plus dissipée sur l'ensemble de la surface du sol, mais elle se concentre sur des lignes de plus forte pente (Roose, 1994). L'érosion linéaire (**Figure 5**) est donc un indice que le ruissellement s'est organisé, qu'il a pris de la vitesse et acquis une énergie cinétique capable d'éroder le sol à un rythme plus rapide que l'érosion en nappe (Blanco & Lal, 2008).

L'érosion linéaire est révélée par tous les creusements linéaires qui incisent la surface du sol suivant diverses formes et dimensions (griffes, rigoles, ravines, etc.). En fait, L'érosion linéaire apparaît lorsque le ruissellement en nappe s'organise pour creuser des formes de plus en plus profondes.

On parle de griffes lorsque les petits canaux ont quelques centimètres de profondeur, de rigoles lorsque les canaux dépassent 10 cm de profondeur, mais encore effaçables par les techniques culturales.

Types de l'érosion linéaire :

- * L'érosion en rigoles succède à l'érosion en nappe par concentration du ruissellement dans les creux. A ce stade, les rigoles ne convergent pas, mais forment des ruisselets parallèles.
- * On parle de nappe ravinante lorsque les creux ne dépassent pas 10 à 20 cm, mais que leur largeur ait atteint plusieurs mètres.
- * On parle ravines lorsque les creux atteignent plusieurs dizaines de cm (plus de 30 cm) et en particulier, lorsqu'elles ne sont plus effaçables par les techniques culturales.
- * On parle de ravinement généralisé ou badlands lorsque l'approfondissement des ravines remonte du bas vers le haut de la pente (érosion régressive). Cette forme d'érosion peut transformer le paysage en "badlands".



Fig 5: L'érosion linéaire

III-3-L'érosion en masse

Tandis que l'érosion en nappe s'attaque à la surface du sol, le ravinement aux lignes de drainage du versant, les mouvements de masse (**Figure 6**) 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 boueuses et les glissements de terrain. Dans ce cas, seul les autorités disposent des moyens techniques, financiers et légaux, pour maîtriser les problèmes de glissement de terrain, souvent catastrophiques, et pour prescrire des restrictions d'usage aux terres soumises à des risques majeurs de mouvement de masse.

Les phénomènes de mouvement de masse sont nombreux. Dans ce qui suit on peut évoquer :

- * Les glissements.
- * Les coulées boueuses et les laves torrentielle.
- * Les formes locales.

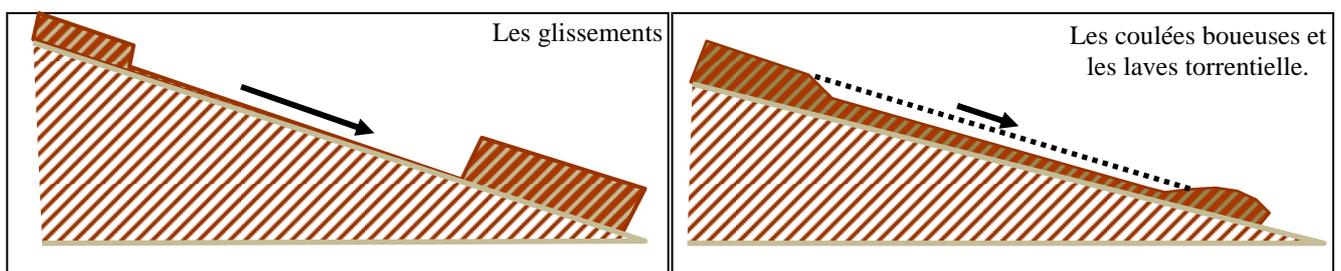


Fig 6: Schéma de l'érosion en masse

III-4-Ordres de grandeurs de pertes de sol par type d'érosion

En guise de conclusion sur l'importance des pertes en sols par type d'érosion, le **tableau 2** récapitule les ordres de grandeurs rencontrés dans la littérature. Signalons qu'une simple rigole de 2 cm de profondeur et 5 cm de large, créée pendant un orage, correspond à une perte en sols de 120 kg/100 m de rigole.

Type d'érosion	Perte du sol (T/ha/an)	Extension
Érosion en nappe	1	Généralisée
Érosion en rigole	10 - 50	Localisée
Érosion ravine	100 - 250	Localisée
Érosion en badlands	1 000	Généralisée
Sapement des berges	10 000	Localisée

Tab 2 : L'importance des pertes en sols par type d'érosion

IV- LES FACTEURS DE L'ÉROSION HYDRIQUE :

IV-1-Intensité et agressivité des précipitations :

La désagrégation de la structure et le détachement des particules sous l'impact des gouttes de pluie résultent de l'action exercée par les gouttes à la surface du sol. Il est donc lié à l'énergie cinétique des gouttes. L'évaluation de l'énergie cinétique des gouttes reste un bon critère d'évaluation de l'agressivité des pluies.

Les pluies, lors de l'impact des gouttes, provoquent un détachement des matières et une destruction des agrégats lors de la conversion de l'énergie cinétique en efforts de cisaillement. Plusieurs phases sont à considérer lors d'une averse. Les premières gouttes de pluies qui arrivent au sol y pénètrent proportionnellement à son ameublissement et sa porosité. Cette première phase s'accompagne d'un déplacement de particules et d'un tassement du sol. Puis la couche superficielle s'humidifie, et l'on assiste au développement quasi simultané de trois processus : la désagrégation de la structure, la formation d'une pellicule de battance et l'érosion par "splasch" ou érosion par rejaillissement. Jusqu'à ce stade, on ne peut parler de transport proprement dit. Il faut que le ruissellement commence pour qu'il y ait une prise en charge des particules détachées par mise en suspension ou par charriage.

IV-2-Le ruissellement :

Le ruissellement apparaît dès que l'intensité d'une pluie devient supérieure à la vitesse d'infiltration du sol. Il est nettement plus élevé sur sol nu que sous cultures. Les plus faibles ruissellements proviennent des pluies tombantes après une période sèche. Par contre, les ruissellements et les pertes en terres les plus élevées ont eu lieu à une époque où le sol est déjà très humide et dans le cas de pluies exceptionnelles et des orages d'automne et de printemps.

Le ruissellement ne débute qu'après un cumul pluviométrique journalier de 18 à 20 mm (Laouina, 1998) sur sol sec même si les pluies sont intenses ou après un cumul de 4 mm sur sol humide et compact (Chebbani, 1999). Ces seuils de hauteur dépendent en partie des caractéristiques des pluies (intensité, mais aussi du volume de pluie tombant après saturation du sol) et surtout de l'état de surface du sol ; plus le sol est dégradé plus le ruissellement est rapide.

les pluies continues mais de faibles intensités permettent une certaine infiltration de l'eau et réduisent le ruissellement sur les versants, par contre les épisodes de fortes intensités entraînent un ruissellement plus important. Mais ce sont les épisodes pluvieux durables avec des événements de forte intensité répétitifs qui occasionnent la dégradation la plus forte, avec en particulier le passage du ruissellement en nappe au

ruissellement en griffes et rigoles. D'une manière générale, il est admis que la vitesse du ruissellement est le paramètre prépondérant de l'action érosive du ruissellement superficiel.

Les facteurs qui régissent le ruissellement sont principalement :

- * L'infiltration.
- * Détention superficielle et rugosité du sol : Elle correspond à la capacité de stockage temporaire de la surface du sol vis-à-vis de l'eau. La détention superficielle se fait sous forme de flaques dans les micro-dépressions, dont la capacité de stockage est liée à la rugosité.
- * Le relief.
- * Le couvert végétal.

IV-3-L'état hydrique initial

L'état hydrique du sol au moment d'une pluie a une très forte influence sur la dégradation, la formation des croûtes et la réduction de l'infiltrabilité résultante. Les agrégats secs sont plus sensibles à l'éclatement. En effet l'intensité de ce processus croît avec le volume d'air piégé, en particulier sous des pluies de forte intensité qui peuvent former des croûtes très rapidement.

L'état hydrique initial influence aussi la succion exercée à la surface du sol par les couches sous-jacentes et donc l'infiltration au travers de cette surface.

Lorsque le sol en surface est argileux sensible à la dispersion par l'effet de l'impact des gouttes de pluie à la désagrégation mécanique par l'alternance des cycles de dessiccation et d'humectation, il y a mobilisation des particules argileuses sous l'action de l'impact des pluies (Chebbani, 1999). En effet, l'humectation des sols argileux entraîne un gonflement qui est une forme analogue de désagrégation. Cette argile mobilisée migre dans l'eau de l'infiltration, couvre la périphérie des agrégats et colmate les interstices intra-agrégats ou bien se dépose à la surface du sol pour former une croûte. La formation des croûtes ou organisation pelliculaire de surface, entraîne une réduction de l'infiltrabilité, accroît les risques de ruissellement et d'érosion.

CHAPITRE 3

CADRE GENERAL DE LA REGION D'ETUDE

I-SITUATION GEOGRAPHIQUE ET ADMINISTRATIVE

Le bassin versant (BV) de l'Assif El mal est situé sur le flanc Nord du Haut Atlas occidental dans la province de Chichaoua sur l'Oued Assif El Mal à 22 Km au Sud – Ouest de la ville d'Amez Miz.

Il s'étend entre les villes d'Imintanount et d'Amez Miz (**Figure 7**). Ce BV s'insère à l'intérieur d'un quadrilatère dont les coordonnées Lambert sont : X (189,47 à 213, 83) et Y (72,424 à 42,656).

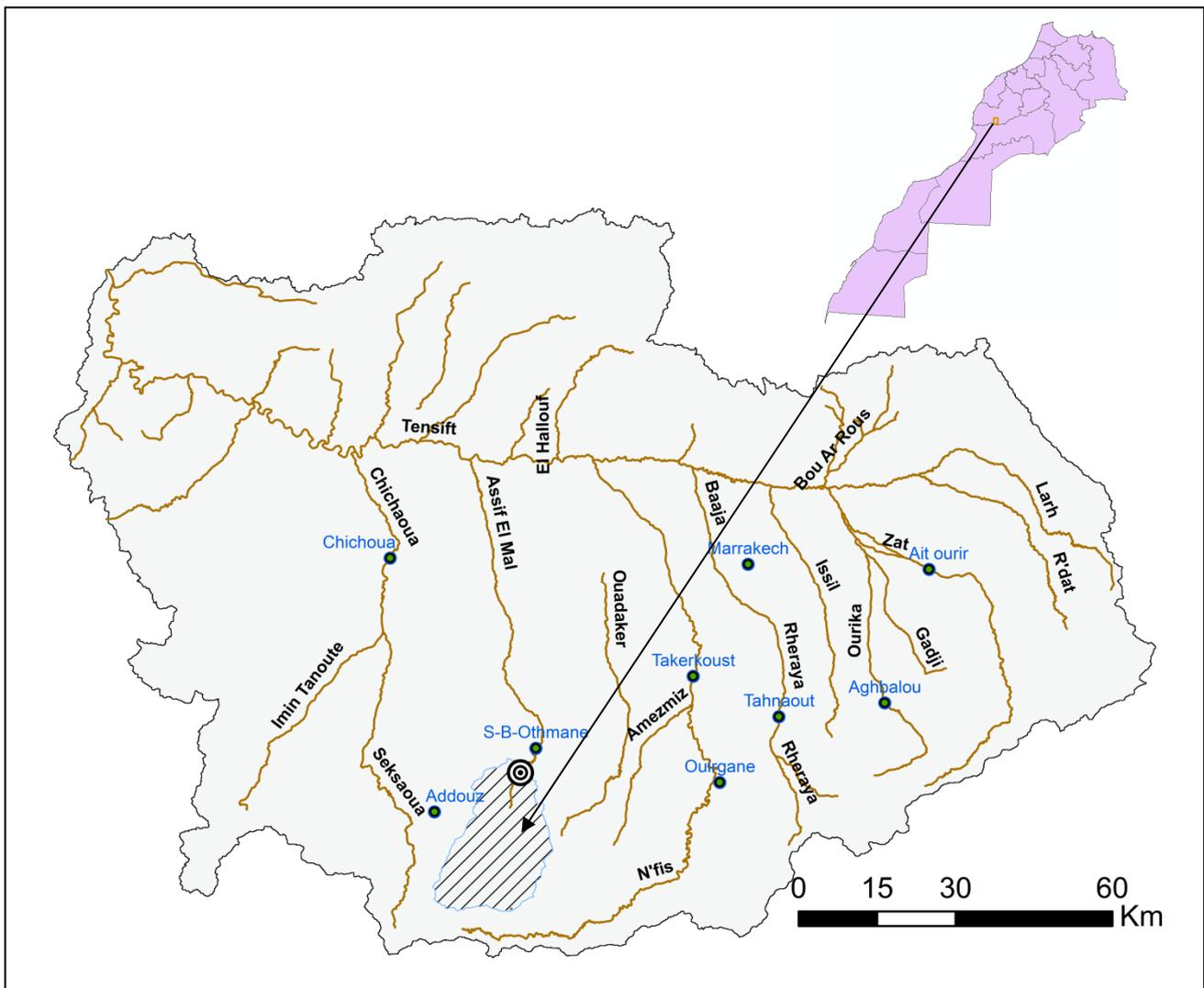


Fig 7.: Position géographique de la zone d'étude dans le bassin de Tensift- Al Houz

Le bassin versant de l'Oued Assi El Mal en amont du site de Taskourt, s'étend sur une superficie de 42500 ha. La longueur de l'oued principal et de ses affluents est d'environ 46 Km.

Ce bassin versant, fait partie du grand bassin de l'oued Tensift. Il a une forme ovale orientée Nord- Sud- et s'allonge depuis les montagnes du Haut Atlas vers la plaine du Haouz (**Figure 8**).

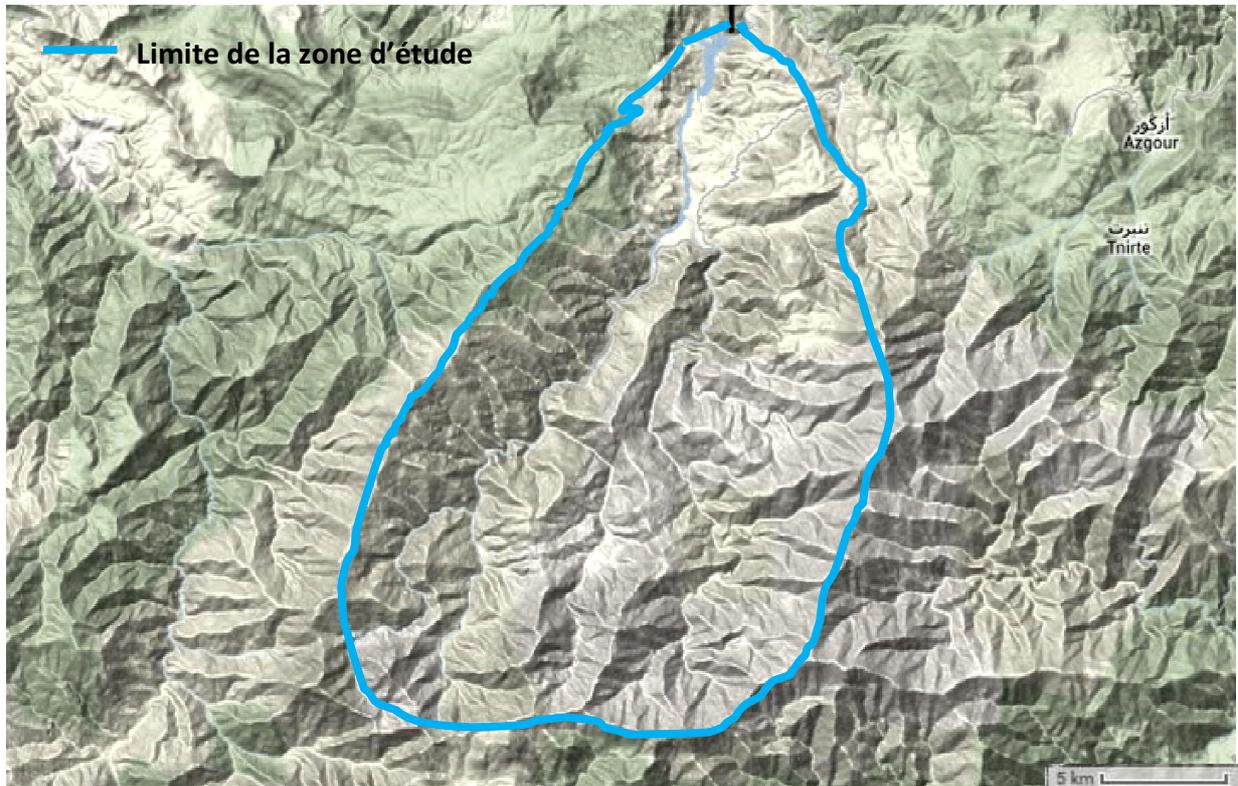


Fig 8.: Image satellitaire de la zone d'étude

Sur le plan administratif, le bassin versant de l'Oued Assif Al Mal relève du Caidat d'Assif El Mal appartenant au Cercle de Mejjat et à la province de Chichaoua. Il chevauche sur le territoire des deux communes rurales selon la répartition suivante (**Figure 9**) :

- * Iminaounite : Environ 70% de la superficie totale du Bassin Versant
- * Adassil : environ 30% de la superficie totale du Bassin Versant

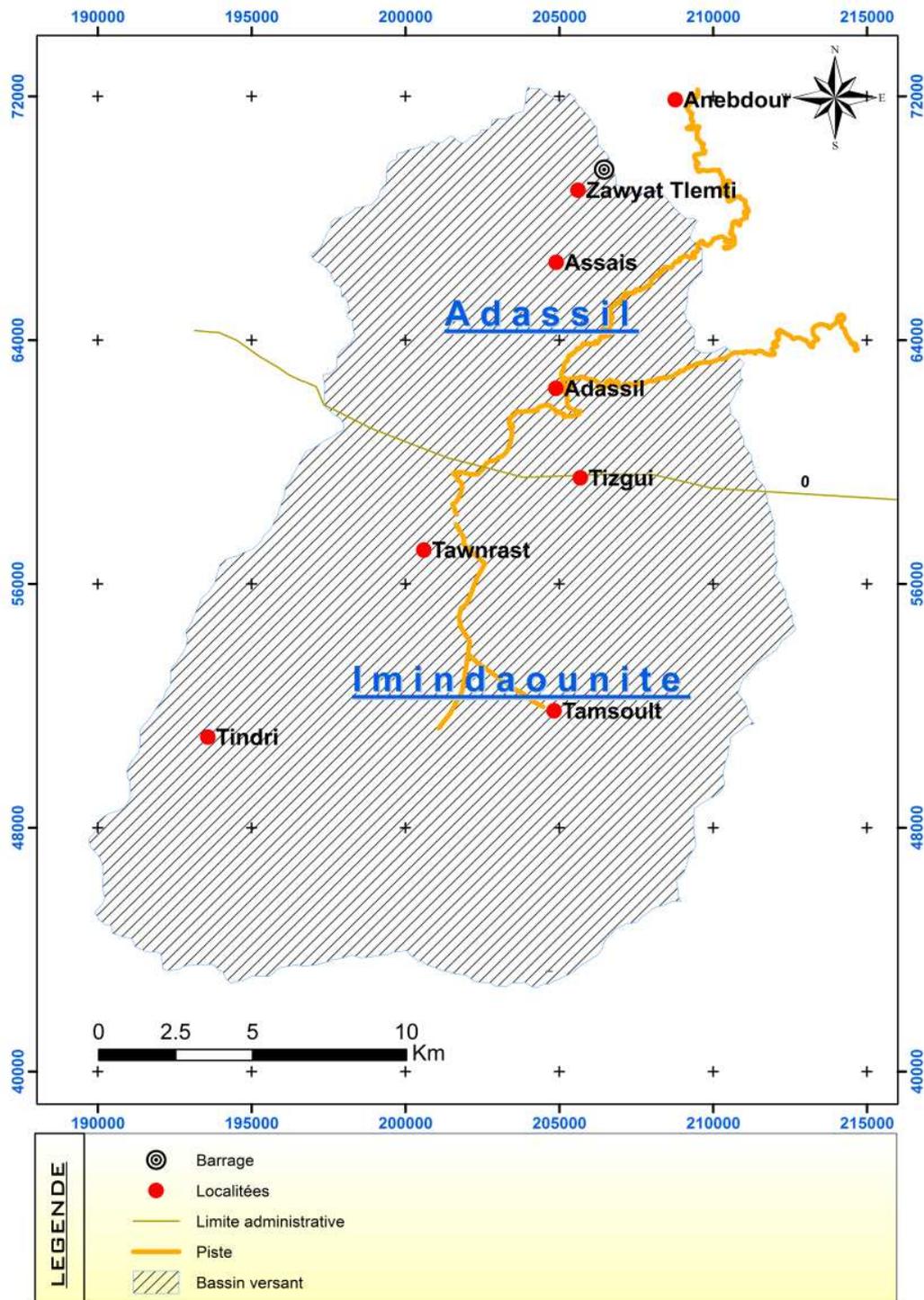


Fig.9 : Situation administrative de la zone d'étude

II- TOPOGRAPHIE DU BASSIN

II-1 Contexte général

La chaîne du Haut Atlas est subdivisée en 3 domaines distincts : le Haut Atlas Oriental, le Haut Atlas Central et le Haut Atlas Occidental. Ce dernier domaine connu également sous le Haut Atlas de Marrakech qui s'étend du col de Tichka à l'Est jusqu'à l'océan atlantique à l'Ouest. Ce domaine est subdivisé en trois secteurs d'âge différent :

- * La zone axiale qui correspond au massif ancien à relief très contrasté dans lequel culmine les plus hautes sommets de l'Afrique du Nord (Toubkal 4165 m et Ouanoukrim 4089m) ;
- * La chaîne hercynienne qui se prolonge de l'Oued Nfis à l'accident empruntant le couloir d'Argana au sud d'Imin Tanount.
- * La zone de plateaux d'altitude moyenne qui constitue l'Atlas des Ida Ou Tanane et des plateaux de Haha d'âge secondaire.

La zone d'étude se situe au niveau de la partie hercynienne de la chaîne du Haut Atlas, elle s'insère entre la vallée de Nfis à l'Est, Nord-Est et Imin'Tanount à l'Ouest (région de Seksaoua).

Sur le plan cartographique, le bassin versant de l'Oued Assif Al Mal est à cheval sur quatre cartes topographiques au 1/50000^{ème} : feuilles d'Azegour, d'Addouz, de Tafingoult et de Souk Tnin Tigouga (**Figure 10**).



Fig 10 : Situation de la zone d'étude sur la carte topographique

II-2 Carte des altitudes :

A fin de pouvoir décrire avec précision la topographie du bassin versant nous avons eu recours à la modélisation de l'altitude par le biais d'un modèle numérique de terrain communément appelé MNT.

La carte d'altitudes est obtenue suite au traitement effectué en utilisant la carte MNT STRM (Shuttle Radar Topographie Mission), fournie par la NASA ; elle est d'une précision de 30m, importée depuis sa forme originale STRM3 (*Figure 11*).

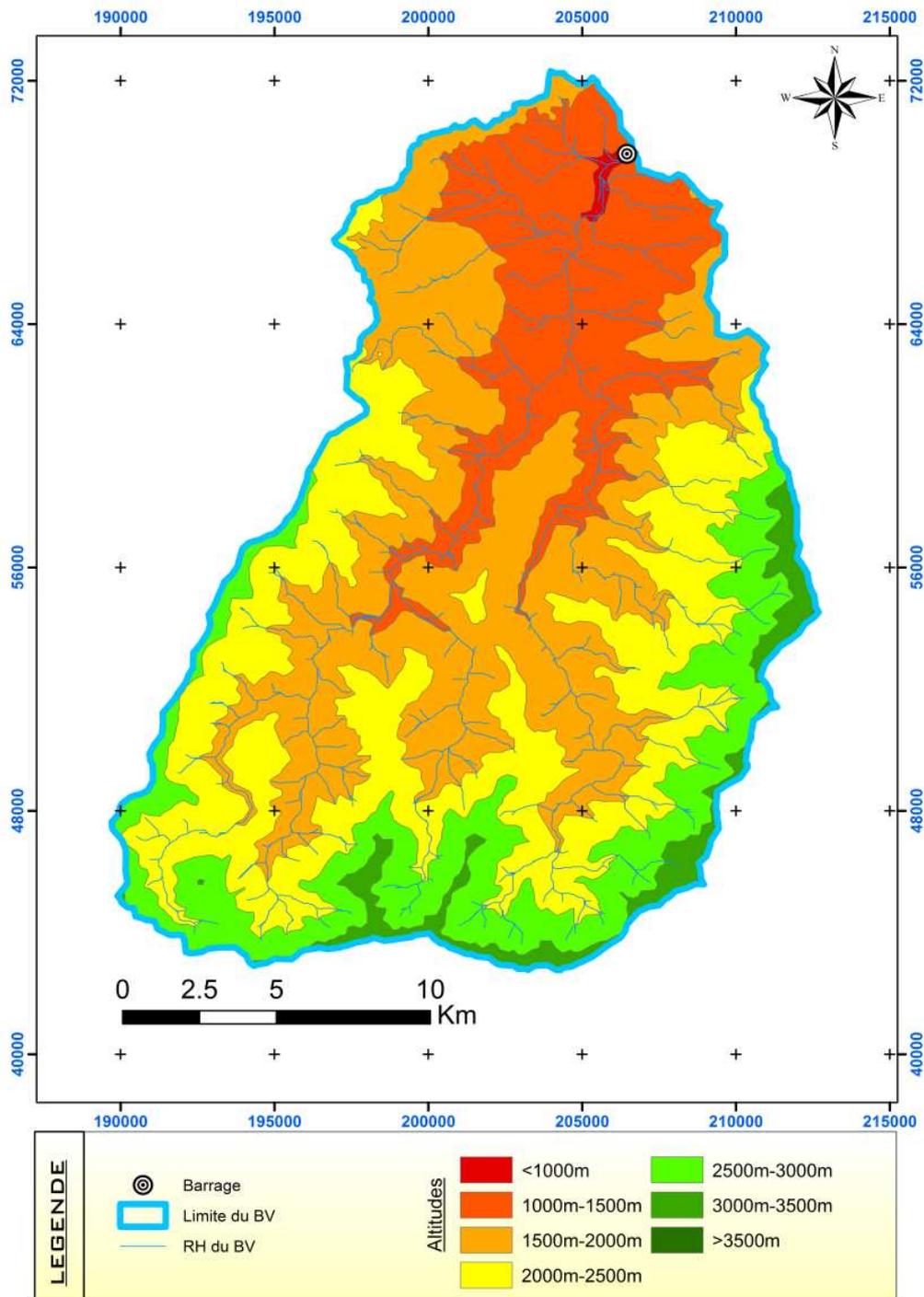


Fig 11 : Carte des altitudes

Le **tableau 3** et la **figure 12** représentent la répartition des superficies du bassin versant de l'Oued Assif El Mal selon sept tranches altitudinales et montre que 60% du bassin à une altitude supérieure à 2000m. L'altitude maximale est de 3583m (amont du bassin versant), l'altitude minimale est de 953m (aval du bassin versant) alors que l'altitude moyenne est de 2005m .

Classe d'altitudes	Surface (ha)	Surface cumulée (ha)	% cumulé
953-1000	1.46	1.46	0.34
1000-1500	78.04	79.51	18.71
1500-2000	143.58	223.09	52.50
2000-2500	120.02	343.11	80.74
2500-3000	64.92	408.03	96.02
3000-3500	16.79	424.81	99.97
3500-3583	0.12	424.94	100

Tab 3 : Classes d'altitudes et leurs surfaces

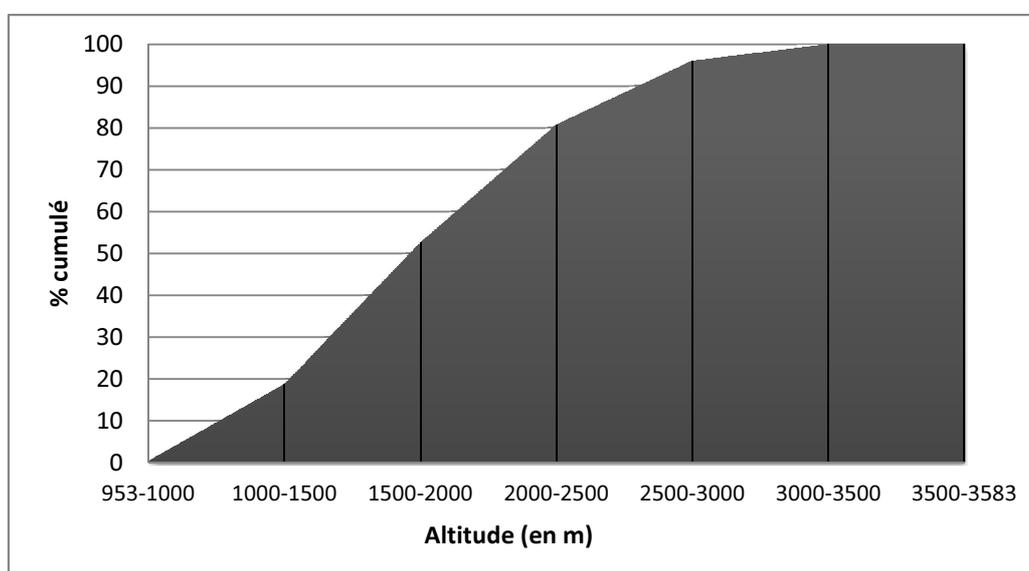


Fig 12 : Courbe hypsométrique

II-3 Carte des pentes :

A partir du modèle numérique de terrain on a déduit la carte des pentes (**Figure 12 et tableau 4**). En tenant compte de l'effet de la pente, le bassin versant de l'Oued Assif El Mal montre une forte susceptibilité à l'érosion. En effet, les résultats du tableau 4 montrent que le relief est assez contrasté avec des pentes fortes et moyennes qui occupent 84% de la surface du bassin versant. La pente maximale est de 64°, la pente minimale est de 0° alors que la pente moyenne est de 24°.

Zone	intervalle de pente	% dans le BV
Zone à pente très faible	<10°	15%
Zone à pente moyenne	10°-20°	28%
Zone à pente forte	>20°	57%

Tab 4 : Classes de pentes

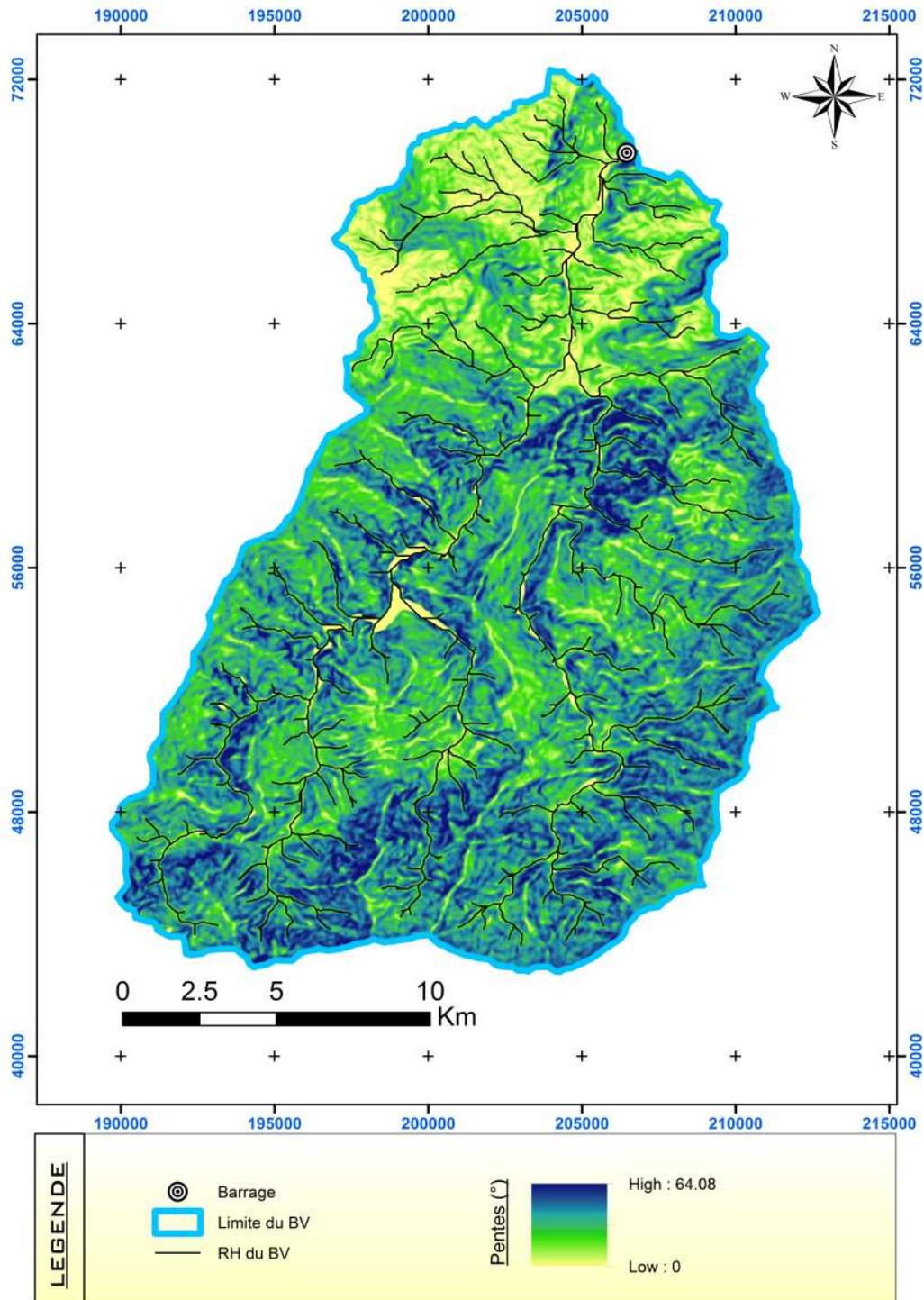


Fig.13 : Carte des pentes

D'après la carte des pentes établie (**Figure 13**), on peut conclure que les plus grandes valeurs de pente se situent au niveau de l'amont du bassin versant (ruissellement fort impliquant une forte érosion), alors que la partie aval a des valeurs de pente très faibles (ruissellement faible impliquant une faible érosion).

III- CONTEXTE CLIMATIQUE

III-1 Précipitations

La pluviométrie est un facteur qui permet de caractériser un climat, son influence est fortement corrélée au bilan hydrique du sol et au comportement des végétaux.

Les précipitations dans la région du Haut Atlas dépendent de deux facteurs qui sont l'altitude et l'orographie.

Pour caractériser la pluviométrie de la zone d'étude, on se réfère aux données climatiques fournies par les stations de référence environnantes de la zone d'étude. Dans cette étude les stations retenues sont : Talat n'Ous, Tnirt, S.Bouathmane, Tizi Ghourane, Addouz. Ces stations disposent des données relatives aux précipitations sur des périodes comprises entre 25 ans et 37 ans. La localisation de ses station fait qu'il y'a une bonne représentativité des altitudes et des étages bioclimatiques.

Les précipitations dans le bassin versant d'Assif El Mal augmentent du Nord au Sud selon un gradient altitudinale. En effet, les précipitations moyennes annuelles passent d'environ 250mm en aval du bassin versant à environ 700mm sur les hautes montagnes, ces précipitations sont irrégulières d'une année à l'autre et pour la même année. Elles sont généralement accompagnées par des orages en été.

L'analyse des données obtenues (*Tableau 5 et Figure 14*) montre que toutes les stations présentent leur minimum de précipitations pendant la période estivale (juin à septembre).

nom du poste	coordonnées géographiques			Précipitations moyennes mensuelle												Précipitations Moyenne annuelle en mm
	z	X	Y	J	F	M	A	M	J	JU	A	S	O	N	D	
Talat n'Ous	1300	239 011.87	53 957.05	36	42	40	28	8	3	3.5	3.5	5	24	23	24	250.5
Tnirt	1155	-	-	37	41	48	40	13	10	3	2	5	32	29	34	309.4
S.Bouathmane	820	209400	74300.00	37	39	46	55	23	13	3	5	13	40	39	38	341
Tizi Ghourane	1120	228700	71600.00	66	57	59	70	35	20	14	8	17	54	44	41	485
Addouz	1500	190000	62000.00	26	48	47	53	32	6	7	8	17	31	27	25	329

Tab.5 : Précipitations moyennes annuelles et mensuelles

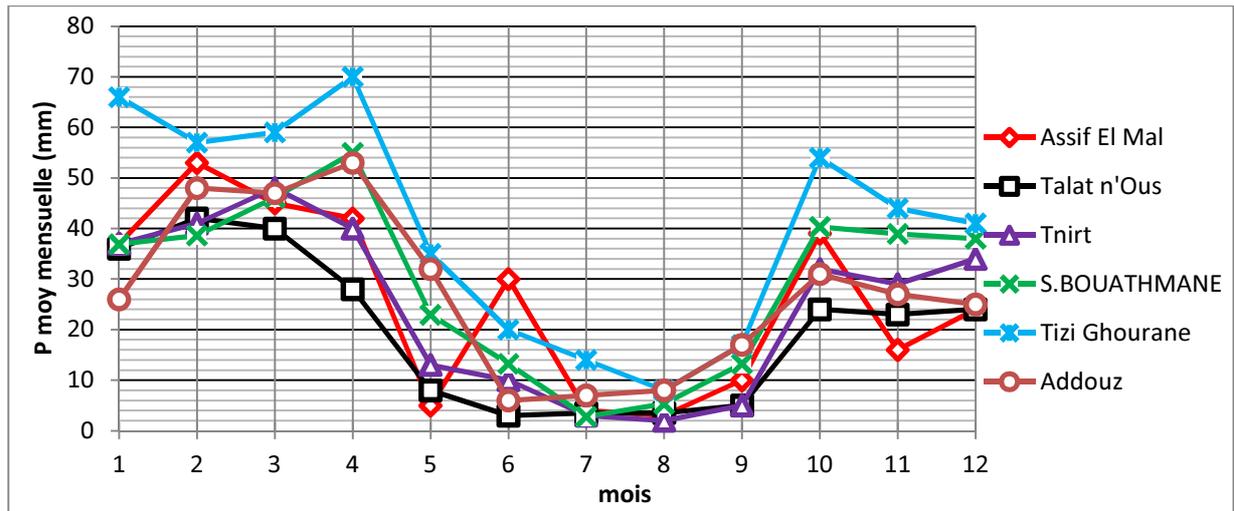


Fig.14 : Précipitations moyennes mensuelles

Les précipitations constituent l'élément principal pour le déclenchement de l'érosion des sols. Elles constituent aussi une donnée importante pour l'évaluation des apports en eau. Cette évaluation annuelle est confrontée à la difficulté dans le cas du bassin versant d'Assif El Mal au manque de stations pluviométriques bien réparties à l'intérieur de la surface du bassin. Il est donc difficile d'estimer la répartition spatiale des précipitations à partir des stations pluviométriques les plus proches du bassin.

Afin de palier à cette situation, nous avons pris en considération la relation existant entre les précipitations annuelles et l'altitude afin d'estimer les précipitations dans les parties où les stations sont inexistantes. En effet, si on considère toutes les stations pluviométriques existantes dans le grand bassin de Tensift Al Haouz (**Figure 15 et Tableau 6**), une corrélation très nette existe entre les précipitations annuelles (P) et l'altitude (Z) (**Figure 16**).

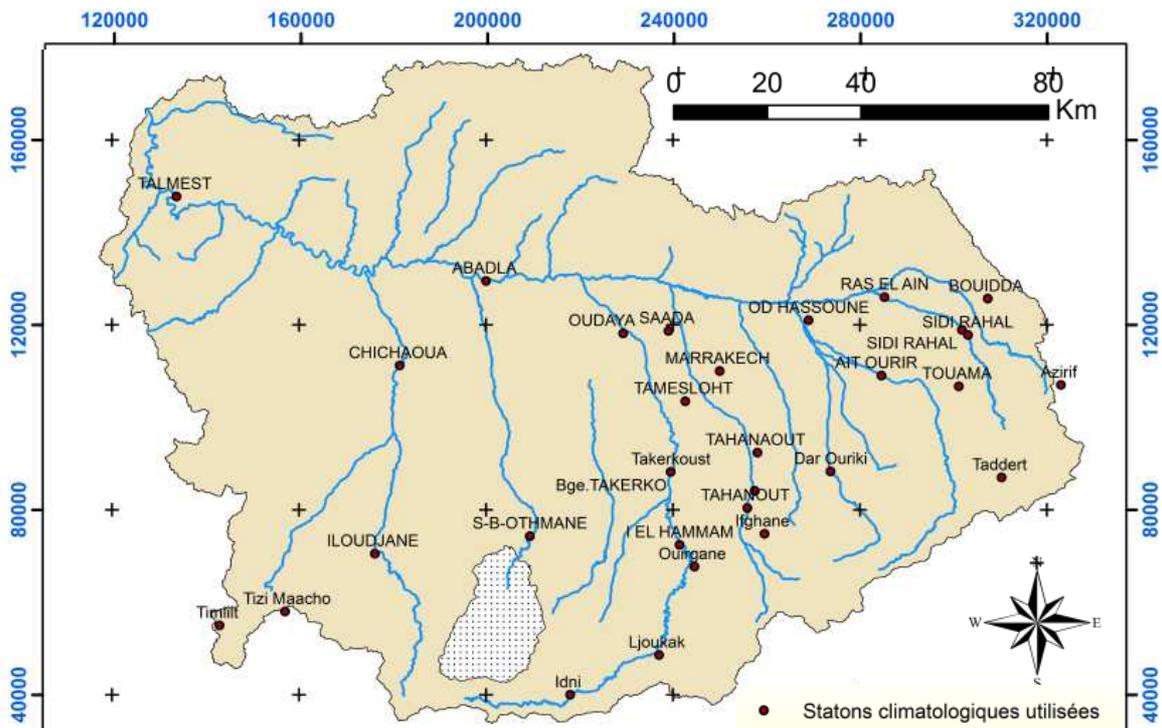


Fig.15 : Situation des stations utilisées

Stations	coordonnées géographiques			Gestion	Précipitation moyennes annuelles (mm)
	X	Y	Z		
TALMEST	133800	147750	530	ABHT	301
ABADLA	200000	129500	250	ABHT	176
RAS EL AIN	285260	125988	520	ORMVAH	228
BOUIDDA	307342	125662	650	ORMVAH	296
OD HASSOUNE	269000	120984	470	ORMVAH	211
SIDI RAHAL	301794	118917	690	ORMVAH	316
SAADA	239030	118700	410	ORMVAH	197
OUDAYA	229349	118156	390	ORMVAH	181
SIDI RAHAL	303100	117800	690	ABHT	350
CHICHAOUA	181525	111200	340	ABHT	191
MARRAKECH	250000	110000	460	ABHT	212
AIT OURIR	284607	109019	680	ORMVAH	303
Azirif	323000	107000	1600	DREF	469
TOUAMA	301150	106700	970	ABHT	379
TAMESLOHT	242620	103471	550	ORMVAH	200
TAHANAOUT	258066	92376	900	ORMVAH	366
Dar Ouriki	273700	88300	1300	DREF	429
Bge.TAKERKO	239500	88200	630	ABHT	245
Takerkoust	239500	88200	630	DREF	221
Taddert	310300	87000	1750	DREF	472
Tahanaoute	257500	84100	930	DREF	371
TAHANOUT	255900	80400	925	ABHT	382
Ifghane	259600	74800	1750	DREF	462
S-B-OTHMANE	209400	74300	820	ABHT	341
I EL HAMMAM	241400	72400	770	ABHT	374
ILOUDJANE	176245	70525	757	ABHT	293
Ouirgane	244600	67700	870	DREF	370

Tab 6 : Liste des stations utilisées

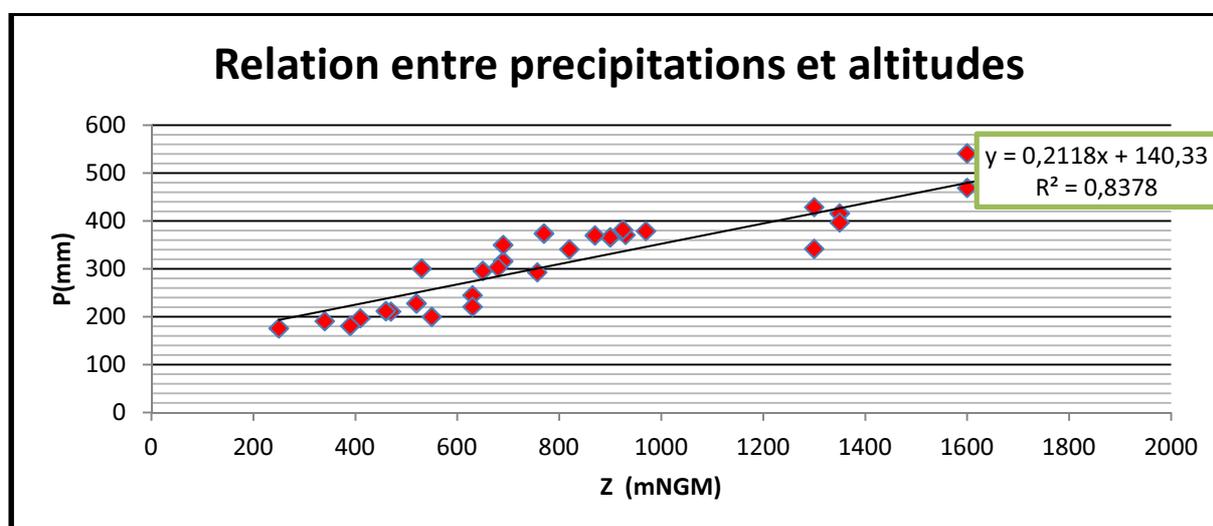


Fig 16 : Relation entre les précipitations et l'altitude

La relation existante entre les précipitations moyenne annuelle et l'altitude peut être traduite par la relation suivante :

$$y = 0.211x + 140.3$$

Le taux de corrélation de 0,837 assure l'utilisation de cette relation afin de déduire les valeurs des précipitations à l'intérieur du bassin versant d'Assif El Mal.

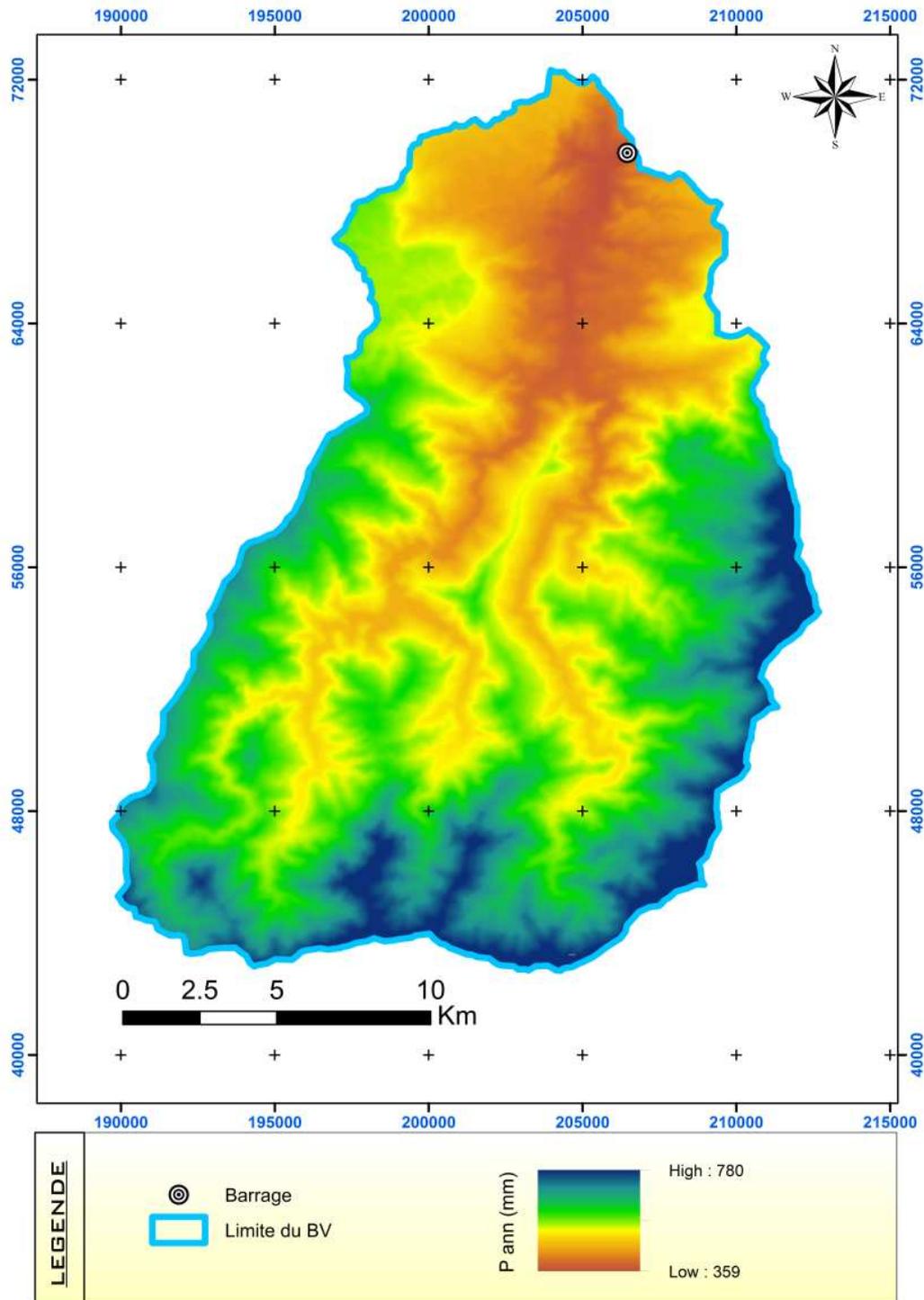


Fig 17 : Carte des précipitations annuelles

La carte des isohyètes obtenue suite à cette corrélation (**Figure 17**) montre que le minimum des précipitations est observé au Nord du bassin versant, au niveau de la zone de l'exutoire avec une valeur annuelle de 360 mm, le maximum est observé au Sud, au niveau de l'amont du bassin versant ou la précipitation moyenne annuelle est d'environ 780 mm alors que la précipitation moyenne annuelle du bassin versant est de 527 mm /an.

III-1-2-Les précipitations exceptionnelles

Alors que les données moyennes annuelles et mensuelles sont importantes pour la compréhension d'un certain nombre de processus, ce sont plutôt les événements exceptionnels qui sont responsables des processus érosifs et de génération des crues. Pour la compréhension les précipitations exceptionnelles. Les précipitations maximales de durée 24 heures ont été utilisées (**Tableau 7**).

Station \ période de retour	20	50	100	P annuelles
Imin ham	67.14	73.9	78.3	435
Abadla	48.59	53.53	56.74	177.5
Takerkoust	63.31	70.12	74.55	267.2
Assif El Mal	86.74	95.36	100.17	316
Tnirt	62.93	68.4	72.4	309

Tab 7.: Précipitations maximales de durée 24h à différentes périodes de retour et précipitation moyennes annuelles correspondantes pour différentes stations

La répartition spatiale des précipitations maximales de durée 24h suit la répartition des précipitations moyennes annuelles suivant la relation suivante $y=0.1192x+34.23$.

Avec : **Y**= hauteur de l'averse de durée 24h et de période de retour de 50ans
X= précipitations annuelle en mm

Cette relation est obtenue à travers le graphe qui combine les précipitations annuelles avec les précipitations maximales de durée 24 heures et période de retour de 50ans (Figure 18).

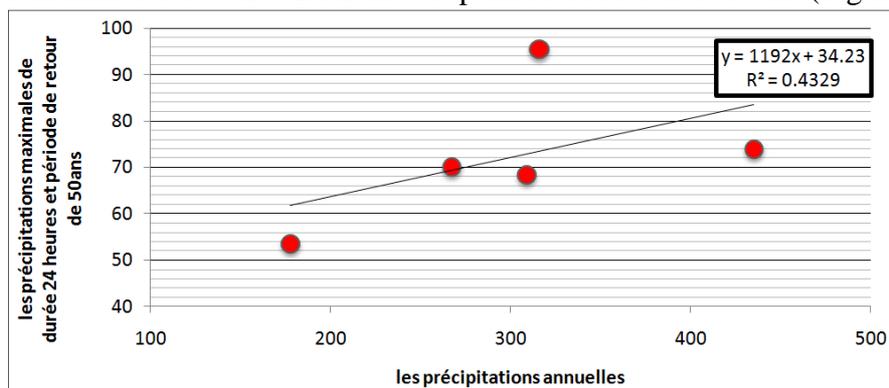


Fig 18.: Corrélation entre les Précipitations annuelles et maximale

Sachant que **Y** est la hauteur de l'averse de durée 24h et de période de retour de 50ans (valeurs qu'on cherche), et **X** sont les précipitations annuelles en mm, l'équation suivante va nous permettre de sortir la carte des averses de durée 24h (**Figure 19**).

$$Y = 0.1192X + 34.23$$

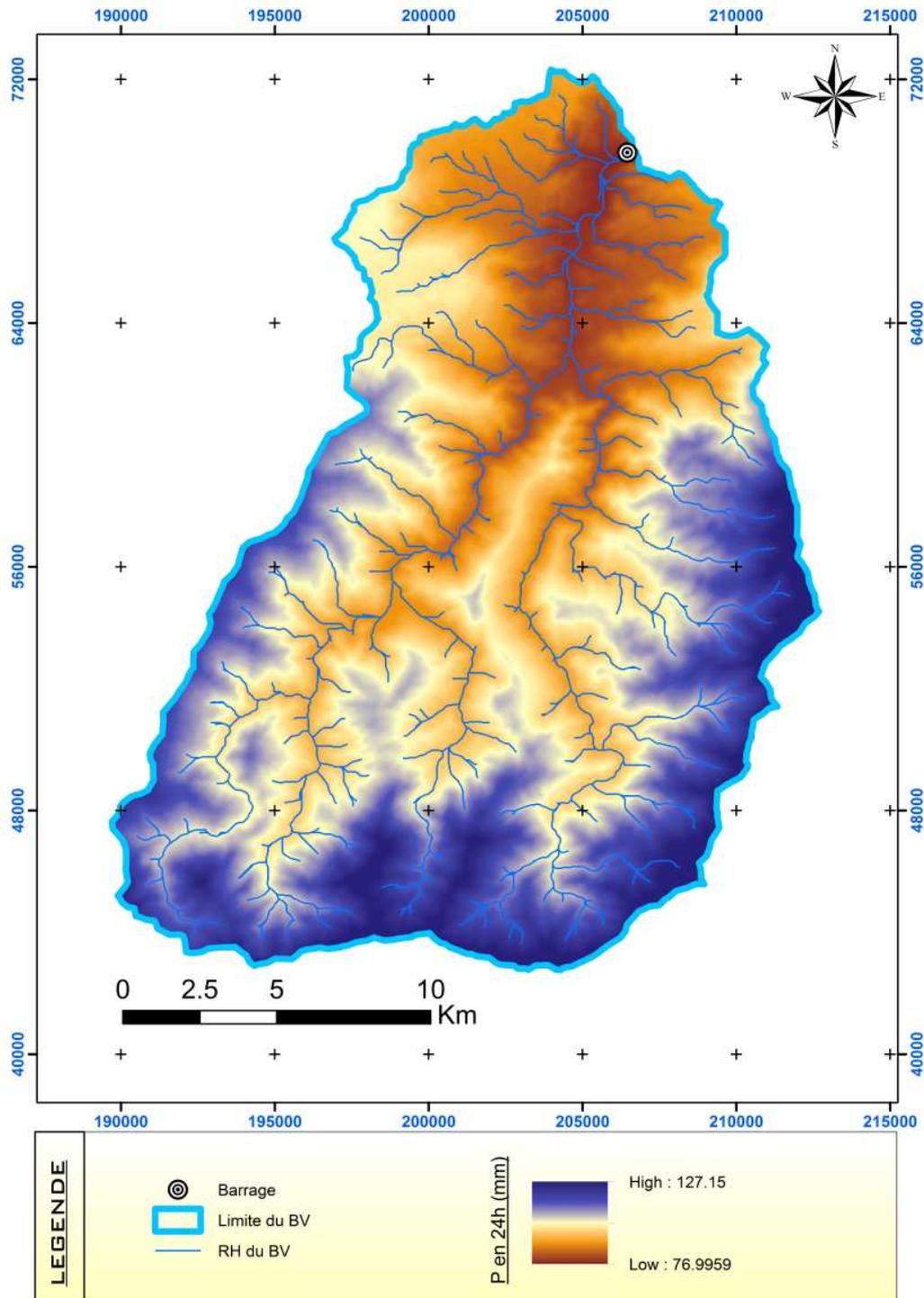


Fig 19 : Carte des isohyètes des précipitations maximale de durée 24h et 50ans de période de retour du bassin versant d'Assif El Mal

Sous l'effet de l'altitude, les précipitations maximales de 24 heures augmentent de la partie Nord (Exutoire) vers la partie Sud (amont du BV). Elles vont donc de 77mm/24 heures à 127mm/24 heures dans les hautes zones altitudinales du bassin.

III-2 Régime thermique

La rareté, dans la région d'étude, de postes offrant des séries de mesures de températures, a dicté le choix d'utiliser en plus de la station d'Amizmiz la station d'Agaiouar, bien qu'elles soient éloignées de la zone d'étude. Ce choix, permet toutefois, d'avoir une idée des conditions de température qui règnent dans le Bassin d'Assif El Mal.

Station	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Températures moy mensuelles
Amizmiz	10.7	12.2	14.4	15.2	18.4	21.5	25.8	25.8	21.6	18.5	15.3	11.6	17.6
Agaiouar	5.8	6.5	8.4	9.5	12.6	17.2	22.4	22.7	17.8	13.7	9.6	6.3	12.7

Tab 8 : Données de la station d'Amizmiz et d'Agaiouar

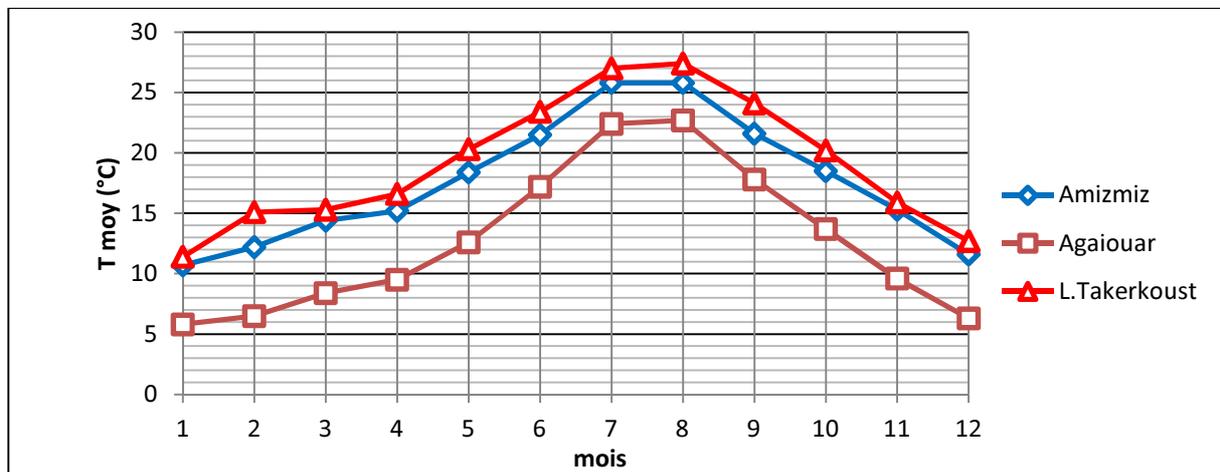


Fig 20 : Carte des précipitations annuelles

Les données obtenues pour chaque station de mesure (**Tableau 8, Figure 20**) montrent que les températures moyennes mensuelles montagneuses varient entre 17°C et 20°C. Les mois les plus chauds sont généralement Juillet et Aout avec une moyenne comprise entre 25,5°C et 29°C) ; le mois le plus froid étant janvier avec une moyenne de 12°C. Par ailleurs, plus on monte en altitude plus ces moyennes maximales et minimales baissent.

IV- CONTEXTE HYDROLOGIQUE

IV-1 Réseau hydrographique du bassin versant

Le réseau hydrographique est un paramètre qui matérialise l'efficacité du bassin versant à évacuer aussi bien les eaux de ruissellement que les sédiments arrachés à la surface du sol. Les caractéristiques du réseau hydrographique intègrent les données du substrat, de la topographie et du complexe sol-végétation.

Le bassin versant d'Assif Al Mal constitue l'impluvium drainé par l'Assif Al Mal et ses affluents. Le cours d'eau principal du bassin s'étend sur une longueur totale de 45,65 Km avec une dénivelée de 2670 m et une pente moyenne de 30 à 40%. Mais au niveau de la partie amont du cours d'eau, cette pente devient assez raide ; elle dépasse alors les 40%.

La digitalisation du réseau hydrographique du bassin versant et la délimitation précise du bassin est obtenue suite au traitement avec ArcGis du modèle numérique de terrain (MNT) de la région d'étude (**Figure 21**). La taille du pixel des cartes MNT utilisées est fixée à 30 mètres.

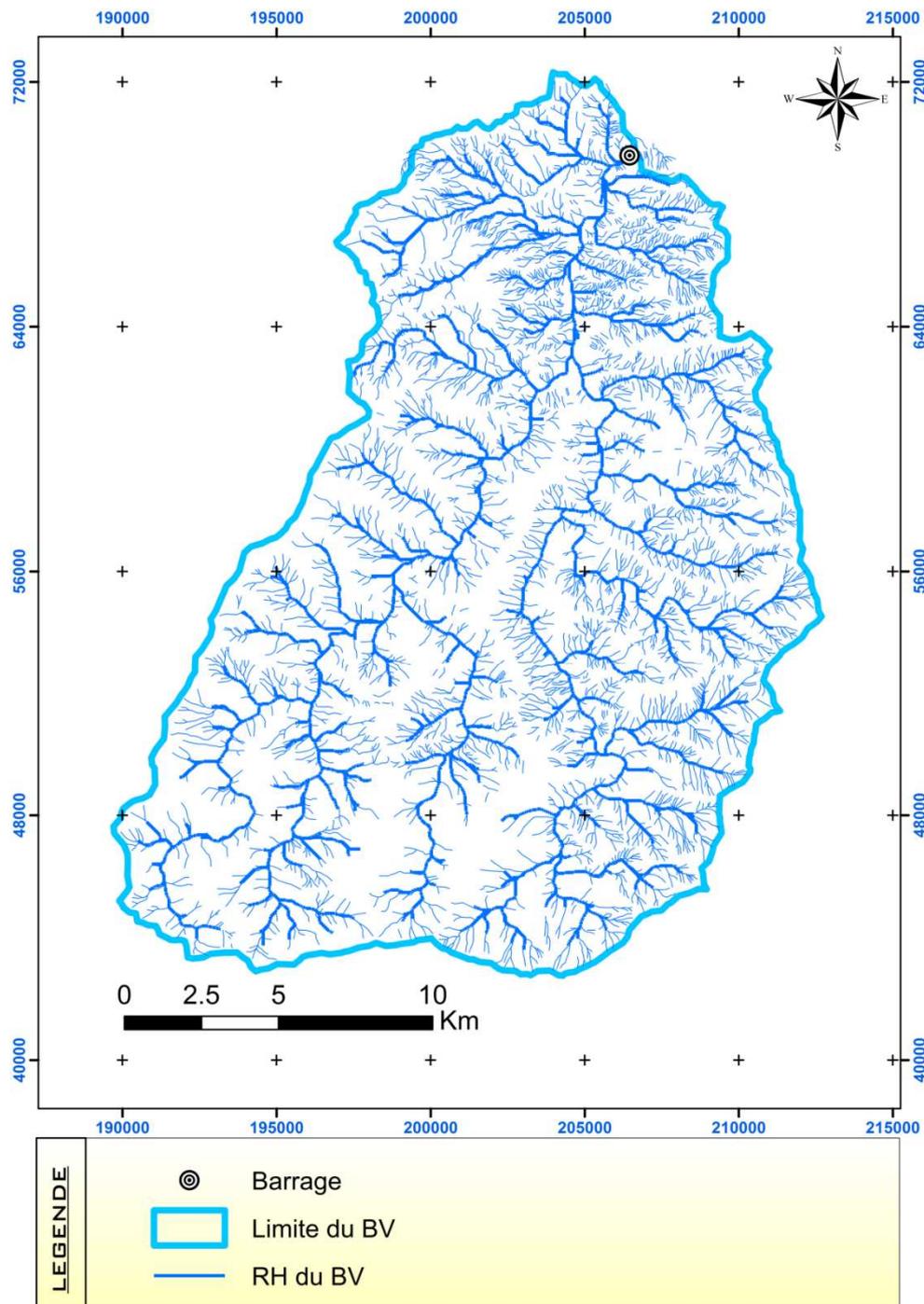


Fig 21 : Réseau hydrographique de la région d'étude

IV-2- Caractéristiques du BV :

IV-2-1 Indice de compacité de Gravellius Kc

L'indice de compacité de Gravellius Kc est un indice qui donne une idée sur la forme du bassin plus il est petit plus le bassin est circulaire.

La forme du bassin versant est une indication de la possibilité du bassin versant à favoriser les crues. Plus il est petit Plus le bassin est circulaire et plus le temps de concentration est rapide et plus il y a accumulation rapide d'eau et donc une forte probabilité de crue. Cette forme est décrite par le coefficient de forme, calculé selon la relation de Gravellius suivante :

$$Kc=0.28 * p / A^{0.5}$$

Kc : coefficient de forme « sans unité »

P : périmètre du bassin versant en « Km »

A : surface du bassin versant en « Km² »

bassin versant d'Assif El Mal	
Périmètre (Km)	95
Surface (Km ²)	425
coefficient de forme Kc	1.29

Tab 9 : Coefficient de forme Kc

La valeur du coefficient de forme du bassin d'Assif El Mal est de **1,29 (Tableau 9)**. Cette valeur suggère que le bassin versant est 3 fois plus long que la large (Bassin allongé).

Ainsi, le coefficient de forme indique que le bassin versant est de nature à ne pas générer des crues. En effet, sa forme allongée favorise l'étalement des crues surtout celle provenant des parties hautes du bassin versant.

IV-2-2 Temps de concentration Tc

Le temps de concentration permet l'évaluation de la durée du transit nécessaire pour qu'une goutte de pluie puisse parcourir le chemin hydrologique entre le point du bassin le plus éloigné de l'exutoire.

Le temps de concentration Tc est calculé selon la relation de Kiripitch suivante :

$$Tc=0.00013 L^{0.77}/S^{0.385}$$

Tc : temps de concentration en « heure »

L : longueur du cours d'eau principal en « pied »

S : Pente moyenne du cours d'eau principal en « % »

bassin versant d'Assif El Mal	
Longueur du cours d'eau principal (pied)	149770.34
Pente moyenne du cours d'eau principal (%)	35
Tc (heures)	1.88
Tc (minutes)	113

Tab.10: Temps de concentration Tc

De même, le calcul du temps de concentration du bassin versant estimé selon la formule de Kiripitch, révèle que le temps que met une crue générée dans la partie haute du bassin versant pour arriver au niveau du barrage de Taskourt est de 113 min (**Tableau 10**).

Ainsi, plus le temps de concentration est court, plus le bassin versant a une réponse hydrologique rapide et un potentiel de crues élevé.

IV-2-3 Densité de drainage Dd

La densité de drainage peut être calculée pour tout le réseau hydrographique. Elle est calculée selon la relation de Gravellius suivante :

$$Dd = \frac{\sum Li}{A}$$

$\sum Li$ = longueur total des cours d'eau en «Km »

A = surface du bassin versant en « Km² »

La cartographie de la densité du réseau hydrographique peut nous renseigner sur les sources du ruissellement et nous donne les zones les plus productrices d'eau et par conséquent d'érosion.

bassin versant d'Assif El Mal	
total des cours d'eau en (Km)	408
Surface (Km ²)	425
Densité de drainage Dd (Km/Km2)	0.96

Tab.11: Densité de drainage Dd

La densité de drainage du bassin versant d'Assif El Mal est estimée à 0,96 km/Km² (Tableau 11). Cette valeur indique que le bassin étudié est faiblement ramifié.

IV-3 Ressources en eau

IV-3-1 Eaux superficielles

Les apports des précipitations sont transformés par l'intégration des conditions de végétation, de lithologie et de la topographie en ruissellement.

Les mesures des écoulements au niveau des stations hydrométriques Sidi Bou Atmane révèlent que les apports moyens annuels des écoulements sont de 131,38mm. Ces données hydrométriques montrent que les volumes d'eau apportés par le bassin versant d'Assif El Mal au niveau de la station de Sidi Bou Atmane est de **55836500 de m³** (**Tableau 12**).

Surface Km ²	Hauteur d'eau (mm/an)		Volume (m ³ /an)		Coeff Ruissellement %
	précipitée	Ruisselée	précipité	Ruisselé	
425	527	131.38	223975000	55836500	25

Tab 12 : Partie ruisselée

IV-3-2 Eaux souterraines

La zone amont ne dispose pas de puits, il est donc difficile d'évaluer les eaux souterraines à l'intérieur du bassin, Toutefois, au vu de la topographie et de la nature géologique des terrains, on peut en déduire que la zone du bassin est plutôt une zone de recharge des eaux souterraines. Cependant, il faut noter que certaines sources existent le long des cours d'eau, ce sont ces sources qui permettent un débit d'étiage soutenu même pendant la saison sèche.

IV-3-3 Bilan hydrologique

Pour mieux connaître la situation hydrologique du bassin étudié, le bilan hydrologique est établie afin d'avoir des résultats chiffré de la comparaison du total des précipitations tombées et l'évapotranspiration potentielle (ETP) ; les résultats sont détaillées dans le tableau 13.

$$P=Q+ETP+IG$$

P (mm) : précipitations moyennes annuelles.

Q (mm) : les écoulements moyens annuels « ruissellement ».

IG (mm) : les hauteurs d'eau percolant vers le sous sol « infiltration ».

ETP (mm) : évapo-transpiration potentielle.

		Bilan hydrologique pour la station d'Amez Miz												
		J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Année
°C	T (°C)	12	14	16.5	17	21	23.5	27	27	24	20	16	13	
mm	ETP	23.3	34.1	51.2	63.5	62	97	121.8	154.5	112	72.6	42.8	26.8	861.6
	ETR	23.3	34.1	51.2	63.5	62	57	19	21	34	53	42.8	26.8	487.7
	P	49	45	62	75	49	14	2	4	32	49	52	55	488
	P-ETP	25.7	10.9	10.8	11.5	-13	-83	-119.8	-150.5	-80	-23.6	9.2	28.2	0.3
	Perte en eau						-13	-96	-215.8	-366.3	-446.3	-469.9		

Tab 13 : Bilan hydrologique de la zone d'étude

Le choix de la station d'amizmiz est basé sur le faite que seule cette station parmi les stations aux riverains qui contient des instruments capables de calculer les valeurs de l'ETP (Evapo-Transpiration Potentielle) et de l'ETR (Evapo-Transpiration Réele).

L'évapotranspiration potentielle est de 861.6 mm par an, Alors que l'évapotranspiration réelle n'est que de 487.7 mm. Selon la méthode de Thornthwaite le ruissellement est nul. Cette méthode donne une valeur moyenne annuelle à long terme des facteurs du bilan hydrologique. Elle ne tient pas compte des mécanismes du phénomène précipitation ruissellement.

Le bilan de Thornthwaite montre que la proportion de la partie évaporée par rapport aux précipitations est importante (près de 99.9%).le bilan montre aussi que 6 mois de l'année (mai à octobre) connaît un déficit hydrique. L'intégration des données hydrométriques au niveau des stations de jaugeage et qui montre que le ruissellement est de 131,38mm (Station de Sidi Bou Atmane, station juste après l'exutoire), montre que la proportion des pertes en eau du bassin versant est de 395.62mm, soit 75%.

Il s'avère en conclusion que le bassin versant connaît un déficit hydrique important et que les ressources en eaux sont faibles par rapport aux précipitations.

V- CONTEXTE GEOMORPHOLOGIQUE

Le contexte géologique, et plus particulièrement la lithologie, est l'un des paramètres déterminant dans les processus érosifs et la génération du ruissellement au niveau d'un bassin versant. La zone d'étude appartient en grande majorité à la partie du socle hercynien qui se caractérise par la présence des plis de direction surtout NNE-SSW, un métamorphisme important et la mise en place de granitoïdes comme celui de jbel Tichka.

Situé à l'ouest de la vallée d'oued Nfis, le socle hercynien du bassin versant de l'Oued Al Mal comporte est des sommets dont l'altitude est comprise entre 2500 et 3600 m. Ces reliefs sont formés de roches métamorphiques, éruptives et sédimentaire.

Du point de vue lithologique, les roches qui prédominent dans la région d'étude sont constituées essentiellement de roche d'âge Paléozoïque, composé par (*Figure 22*) :

- * des granitoïdes qui composent le massif de Tichka situé dans la partie extrême Sud du Bassin versant.
- * des schistes, grauwackes, barres de calcaires et de brèche à éléments et matrice volcanique d'âge Primaire (combro-ordovicien), cohérentes et très résistante à l'érosion, occupant les deux tiers Sud de la surface du bassin versant.
- * Dans le tiers Nord du Bassin versant, des roches plus tendres et plus sensibles à l'érosion d'âge Mésozoïque (Trias, Jurassique et Crétacé) sont intercalées au massif hercynien. Elles sont composées de marnes, de gypses, de grès rouge, d'argile, de conglomérats. Des formations plus récentes, d'âge Quaternaire, composés d'alluvions et de sable meuble affleurent au niveau des vallées. .

L'approche méthodologique adoptée pour traiter cet aspect litho-géo-morphologique consiste en l'exploitation systématique de toutes les données pertinentes à ce sujet et plus particulièrement la documentation cartographique et bibliographique disponible.

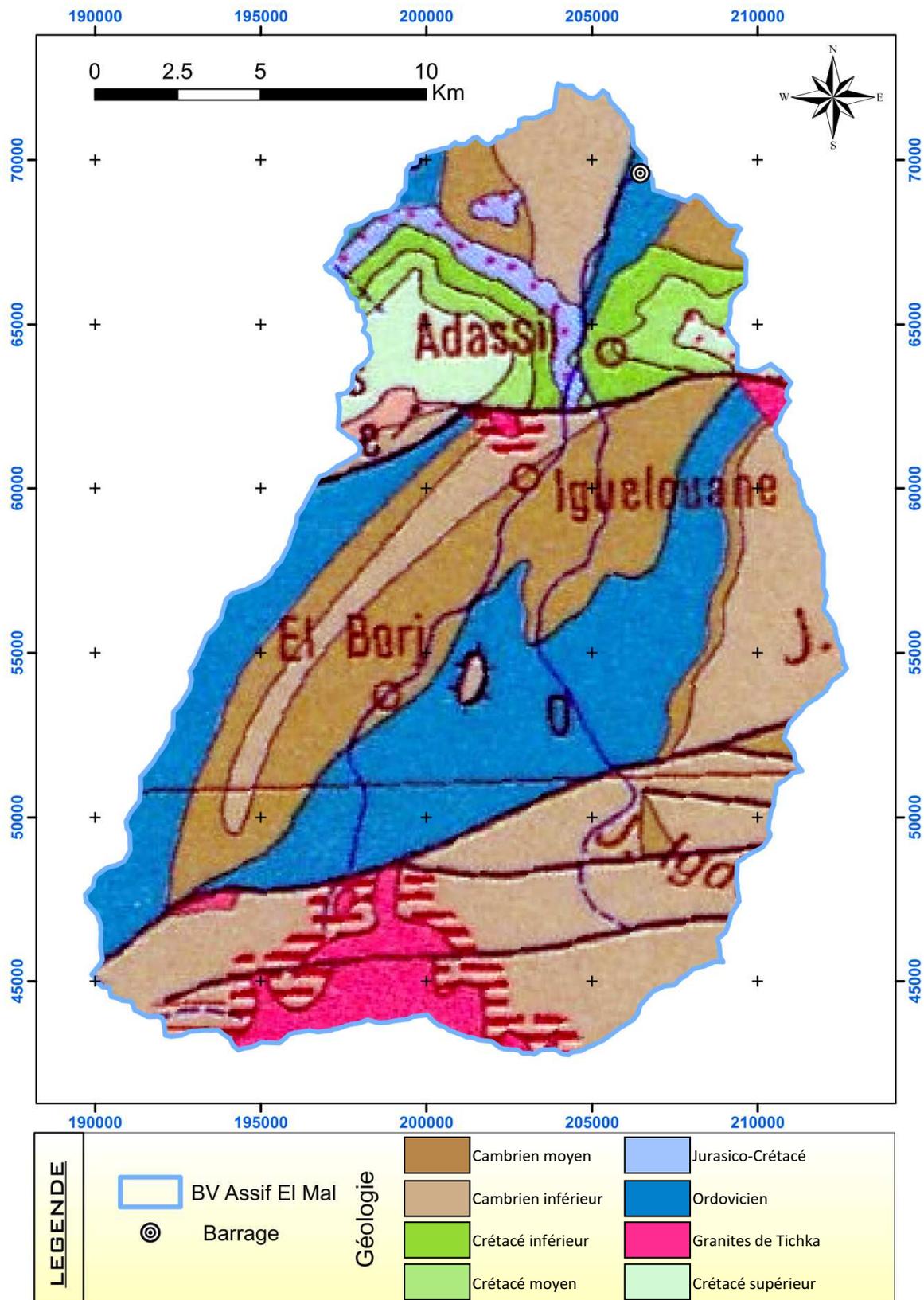


Fig 22: Carte géologique de la région

VI-FICHE TECHNIQUE DU BV

Paramètre	Valeur	Unité
L'altitude maximale	3583	(m)
L'altitude minimale	953	
L'altitude moyenne	2005	
La pente moyenne.	24	(°)
La pente maximale	64	
La pente minimale	0	
Les précipitations annuelles min	260	(mm)
Les précipitations annuelles max	80	
Les précipitations moyennes annuelles	527	
La hauteur d'eau ruisselée	131.38	
Le périmètre du bassin versant	95	(Km)
Longueur du cours d'eau principal Km	45.65	
La longueur totale des cours d'eau	408	
La pente moyenne du cours d'eau principal	35	(%)
Surface	425	(Km ²)
La densité de drainage Dd	0.96	(Km ² /Km)
Le volume précipité	223975000	(m ³ /an)
Le volume ruisselle	55836500	
Le rapport de bifurcation	1.23	sans unité
Le Coefficient de forme Kc	1.29	
Le temps de concentration Tc	113	(min)

Tab.14 : Fiche synthétique du Bassin Versant d'Assif El Mal

CHAPITRE 4

QUANTIFICATION DE L'ÉROSION

I- QUANTIFICATION DES PERTES EN TERRE

Les méthodes utilisées dans l'évaluation et la cartographie de l'érosion varient d'une part en fonction des objectifs, des moyens mis en œuvre et des échelles de travail, et d'autres parts de la région et ces particularités.

La quantification peut se faire en adoptant des mesures directes ou des évaluations indirectes.

I-1-Mesures directes

I-1-1-Les méthode topographiques

- La première méthode : elles se basent sur le suivi de la topographie de la surface du sol à l'aide d'un rugosimètre (**Figure 23**). Ce dernier permet d'estimer la variation de la hauteur des aspérités du sol par rapport à un plan de référence. Le rugosimètre permet aussi de faire le suivi de l'évolution des ravines, en mesurant la variation des dimensions des sections des ravines après chaque évènement pluvieux.



Fig 23: Rugosimètre à bornes d'acier inoxydable

- La deuxième méthode : Elle consiste à caractériser de manière détaillée les sections avec un ruban centimétrique et une règle graduée (**Figure 24**). Chaque section est assimilée à une forme géométrique simple, comme un rectangle, un triangle ou un trapèze, ou une combinaison de certaines de ces formes. Habituellement, le ruban est utilisé pour mesurer directement les distances horizontales au champ, et la règle est employée pour mesurer les distances verticales (profondeurs). Pour une précision des mesures, autant de points requis sont déterminés. Les mesures sont faites tous les mètres le long des réseaux de rigoles.



Fig. 24 : Mesure des dimensions d'une rigole

I-1-2-Simulation de pluie :

Le ruissellement de l'eau des pluies, l'infiltration de l'eau dans le sol et les risques d'érosion des sols sont des données essentielles que les chercheurs essaient de comprendre et de mesurer depuis fort longtemps.

Il est évident que pour étudier de manière adéquate les phénomènes induits par la pluie, l'idéal serait de pouvoir reproduire à volonté des événements pluvieux connus et contrôlés, en gérant tous les paramètres, pouvoir les modifier ou les faire varier pour mettre en évidence le rôle de chacun, tout en s'affranchissant du hasard et des caprices de la nature.

La simulation de pluie est une méthode qui tente de répondre à cet objectif (**Figure 25**). Elle permet d'obtenir sur le terrain, de façon expérimentale, dans un temps relativement court, de nombreuses données mesurées sur le comportement de l'eau en surface et dans le sol sous des averses artificielles effectuées et contrôlées à l'aide d'appareillages qu'on appelle simulateurs de pluies. Pour pouvoir effectuer des simulations de pluie sur le terrain, il est nécessaire de passer par l'étape de préparer les parcelles de mesure dont voici une illustration.



Fig 25 : Simulation des pluies sur parcelle de 1 m²

I-1-3-Mesures par l'étude du transport solide

- *Transport en suspension* : Son évaluation peut être faite in situ ou au laboratoire. En général, le nombre de mesures est petit. En fait, on peut procéder soit une seule mesure verticale au milieu ou au point le plus profond de la section ; soit quelques mesures (2 à 5) réparties sur la section.

Généralement, on estime que 80 à 90 % du transport des solides se fait au cours des périodes de crue durant lesquelles les conditions du travail sont les plus défavorables (manque de données).

- *Transport de fond* : Peut être estimé selon plusieurs méthodes à savoir des pièges à sédiments installés au fond de la zone active du lit, des fosses creusées au fond du lit ou aussi par marquage isotopique des sédiments. Cependant, sa mesure est imprécise.

I-2-Mesures indirectes (la modélisation)

Les phénomènes d'érosion sont le résultat d'interactions complexes variables dans le temps et dans l'espace. Dans une optique d'évaluation des risques ou d'établissement de schémas d'aménagement pour la conservation des sols, le recours à la modélisation constitue un outil d'aide à la décision. Le but de cette section n'est pas de dresser la liste exhaustive des démarches et modèles existants, mais plutôt de décrire les principales approches actuellement en usage.

La modélisation a pour objectifs d'une part, de tester notre compréhension des processus intervenant dans la dégradation des sols par l'érosion hydrique et d'autre part, prédire les risques futurs sous des conditions variables, notamment les changements climatiques.

Plusieurs méthodes de modélisation de l'érosion existent ; certaines d'entre elles sont très simples dans leur approches et font appel à des indicateurs globaux (climat : isohyètes ; relief : degré de pente) et d'autres sont plus complexes et font appel à tous les paramètres et facteurs intervenant dans les processus érosifs (climat, sol, relief, couverture du sol, pratique d'aménagement). Ces dernières sont complexes et exigeantes en informations au point qu'elles soient inutilisables dans leurs formes originales.

II- PROBLEMATIQUE DE L'UTILISATION DES MODELES PHYSIQUES (INDIRECTES)

Depuis le début des années 90, la communauté scientifique s'est principalement intéressée au développement de modèles dit physiques. Ceci a permis une meilleure compréhension du phénomène à l'échelle de la parcelle ou à l'échelle intraparcellaire.

Cependant les décideurs politiques ont besoin d'outils pour estimer l'érosion des sols à l'échelle régionale afin de mettre en place une stratégie de conservation des sols adaptée.

De plus, l'érosion a des répercussions sur les cycles des sédiments, nutriments et sur celui de l'eau, à l'échelle continentale. Les prédictions de ces répercussions nécessitent une modélisation du phénomène adaptée.

Au cours des années 80 et au début des années 90, l'évaluation de l'érosion s'appuyait sur les connaissances des scientifiques (e.g. De Ploey et al., 1989, Oldeman, 1990) ou s'articulait autour de méthodes qualitatives, avec attribution d'une note. Ces types de méthodes

permettent de délimiter les zones à risque, mais offrent des possibilités très limitées quant à l'évaluation de scénarios faisant intervenir, par exemple, des changements d'occupation du sol (voir également Grimm et al., 2001). Récemment, la disponibilité de données telles que les données climatiques, topographiques, ou d'occupation du sol a largement augmenté, rendant ainsi possible l'application de modèles quantitatifs à l'échelle européenne.

Les estimations d'érosion des sols disponibles actuellement sont répertoriées dans le *tableau 15*.

Modèle	Type	Référence
De Ploey	Expert	De Ploey et al., 1989
CORINE	Qualitatif	CORINE, 1992
IMAGE	Qualitatif	RIVM, 1992
GLASOD	Expert	VanLynden, 1994
Hot Spots	Expert	EEA, 2000
USLE	Quantitatif	Van der Knijff et al., 2000
INRA	Qualitatif	INRA, 2001
PESERA	Quantitatif	Gobin and Govers, 2003
Heush	Quantitatif	Heush, 1970

Tab 15.: Récapitulatif des différents modèles d'estimation de l'érosion

Bien que toutes les cartes d'érosion aient été produites avec les données les plus précises possible disponibles à l'échelle européenne, beaucoup d'auteurs mettent en avant les incertitudes résultant de ce genre d'application. Il est vrai que de telles estimations doivent être utilisées avec précaution. En fait, il est pratiquement impossible d'arriver à la mise en place de politiques cohérentes à partir de carte d'érosion des sols, s'il n'existe pas également d'estimations fiables de la marge d'erreur pour les prédictions.

La validation des estimations d'érosion sur une grande surface est vraiment problématique. Il n'est pas techniquement et économiquement réalisable de mesurer l'érosion des sols pour de grandes entités spatiales. De plus les processus d'érosion sont caractérisés à la fois par une grande variabilité temporelle et spatiale. A l'heure actuelle il n'a pas été évalué la précision des estimations à grande échelle.

III-ESTIMATIONS DE L'EROSION DES SOLS D'APRES LES MODELES USLE, PESERA, INRA et HEUSH.

III-1-Estimations de l'érosion des sols d'après le modèle INRA

L'Institut National de la Recherche Agronomique (INRA) a développé une approche fondée sur un arbre de décision pour définir des classes qualitatives d'aléa érosion du sol (*figure 26*).

L'aléa érosion est estimé à partir d'informations concernant l'occupation du sol (Corine 9 classes), la formation d'une croûte de battance (4 classes), la pente (8 classes) et l'érodibilité du sol (3 classes).

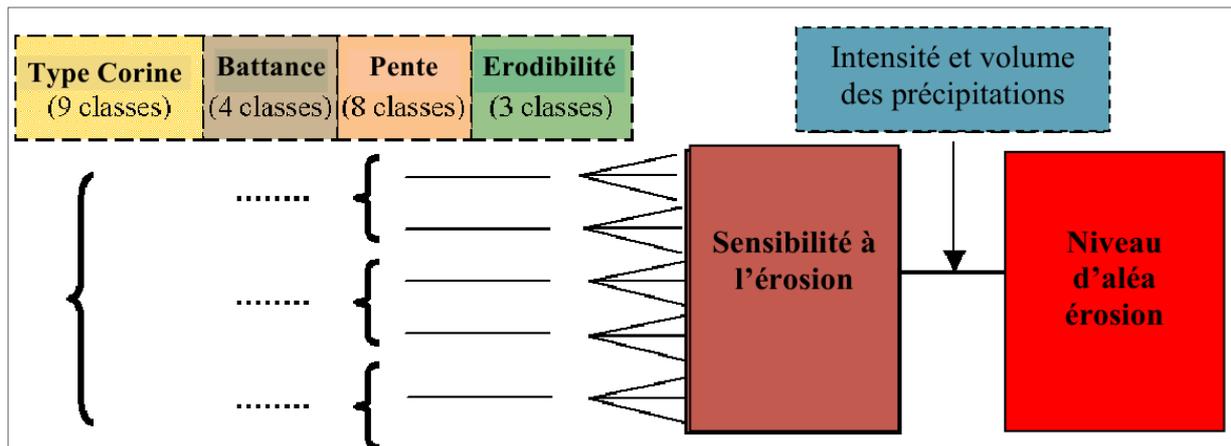


Fig 26 : conception du modèle INRA

III-2-Estimations de l'érosion des sols d'après le modèle PESERA

Pan European Soil Erosion Risk Assessment PESERA (Estimation de l'aléa érosion des sols pour l'ensemble de l'Europe) est un modèle d'érosion développé spécifiquement pour application à l'échelle européenne dans le cadre d'un contrat de recherche européen (QLKS-CT-1999-01323). Puisqu'il est fondé sur le ruissellement, les concepts du modèle diffèrent fondamentalement de ceux des modèles empiriques tels que le modèle USLE et ses dérivations (**Figure 27**). PESERA prévoit le ruissellement avec un pas journalier. Le ruissellement dépend des volumes quotidiens de précipitations, de la capacité de stockage du sol et de l'interception de la végétation. Des données quotidiennes de précipitations et de température sont employées comme données d'entrée pour le modèle de croissance de la végétation intervenant comme modulateur de la capacité de stockage du sol. Le ruissellement est lié aux pertes de sol par les équations développées par Kirkby et al. (2000).

Le modèle PESERA est construit de telle façon, qu'il peut également fonctionner comme outil d'évaluation de scénarios de changements de climat ou d'occupation du sol tous s'appuyant sur des données journalières et sur le long terme.

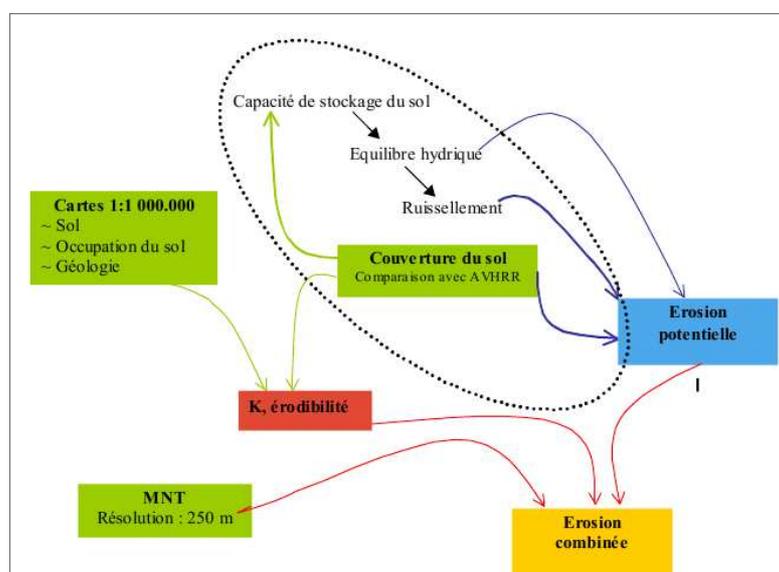


Fig 27 : Concepts du modèle PESERA (Gobin et Govers, 2003)

III-3-Estimations de l'érosion des sols d'après le modèle USLE

Ce modèle sera développé en détail dans le chapitre V

III-4-Estimations de l'érosion des sols d'après le modèle HEUSH

Ce modèle sera développé en détail dans le chapitre VI.

IV- METHODE DE VALIDATION

Etant donné la variabilité spatiale et temporelle des phénomènes d'érosion, la mesure directe de l'aléa dans les parcelles n'est pas réalisable pour de grandes entités spatiales. Il existe deux méthodes de validation alternatives mais indirectes :

- * Surveillance de la charge de sédiments dans les fleuves;
- * Mesure du dépôt de sédiments dans les lacs et les réservoirs.

La deuxième option est, en général, davantage adaptée à la validation des prévisions de pertes de sol sur le long terme, bien que les données soient seulement disponibles pour des secteurs où les réservoirs existent. Les sédiments qui se sont déposés dans un réservoir reflètent, après correction avec un coefficient d'efficacité de filtrage, la perte nette de sol dans le bassin de contribution depuis la construction ou le dernier nettoyage du réservoir. Il faut cependant garder à l'esprit que la perte nette moyenne de sol (le volume de sédiments déposés à l'exutoire) diffère du volume total d'érosion du bassin versant (tous les sédiments produits dans le bassin). Selon la configuration spatiale de la topographie et de l'occupation du sol, une part significative des sédiments érodés se dépose avant d'atteindre le cours d'eau ou l'exutoire du bassin. Le ratio de dépôt de sédiment (SDR) est le rapport de la quantité de sédiments déposés à l'exutoire et de la quantité de sédiments produits sur l'ensemble du bassin.

$$\text{SDR} = \frac{\text{Quantité de sédiments déposés à l'exutoire}}{\text{Quantité totale de sédiments érodés}}$$

L'estimation de la quantité de sédiments déposés à l'exutoire_ dans une retenue, dépend de deux paramètres : la densité et le volume des sédiments. La densité des sédiments est variable en fonction du temps et de la position dans la retenue. Elle varie aussi en fonction de la granulométrie, la composition minéralogique, l'épaisseur des dépôts, le niveau de l'eau dans la retenue et l'âge des dépôts. Quant au volume des sédiments, il est déterminé sur la base d'une comparaison de la topographie de la cuvette avant et après mise en eau du barrage. La détermination de la profondeur des sédiments par rapport à la surface d'eau est appelée bathymétrie.

Les résultats ainsi sont reporté dans un graphe avec en axe des abscisses les dépôts de sédiments observés et en ordonnées les dépôts de sédiments calculés (*Figure 28*).

Plus le coefficient de corrélation est proche de 1 plus la méthode utilisé est valide et ces résultats sont proches de la réalité.

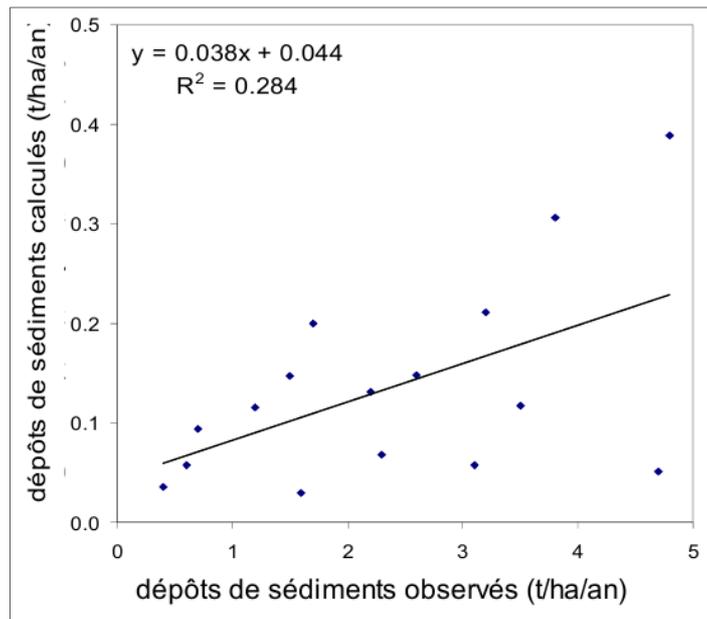


Fig 28: Evaluation de la relation existante entre les dépôts de sédiments observés et les dépôts de sédiments calculés (Italie)

ESTIMATIONS DE L'ÉROSION DES SOLS D'APRES LE MODELE USLE

1- INTRODUCTION

L'Equation universelle de pertes en sol (Universal Soil Loss Equation : USLE) (**Figure29**) établie par Wischmeier et Smith en 1978 s'applique à la quantification des pertes en sol par érosion en nappes. C'est une fonction multiplicative des cinq facteurs qui contrôlent l'érosion hydrique : agressivité climatique, érodibilité des sols, inclinaison et longueur de pente, occupation des sols et pratiques antiérosives :

$$A = P \times C \times LS \times K \times R$$

A = perte annuelle moyenne de sol (t/ha/an)

R = indice d'érosivité potentielle de la précipitation (MJmm/ha/ha/an)

K = indice d'érodibilité des sols à l'érosion hydrique (tonne.heure/Newton.hectare)

LS = facteur topographique dépendant de la pente et sa longueur

C = facteur de culture, incluant le couvert végétal (occupation du sol) ;

P = facteur de conservation et d'aménagement.

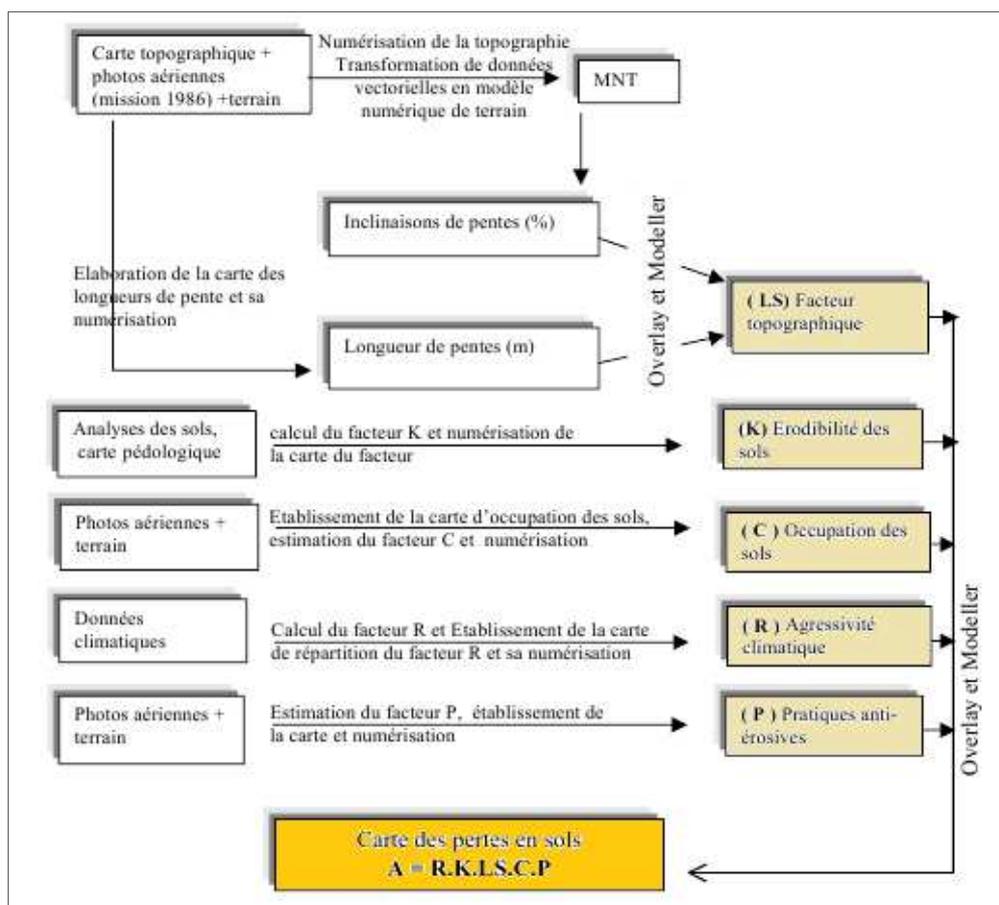


Fig.29 : Concept du modèle de Wischmeier

L'approche utilisée pour la cartographie de l'érosion hydrique dans le bassin versant d'Assif El Mal, en vue d'identifier les zones prioritaires est basée sur le principe de superposition des différentes cartes thématiques, représentant les principaux facteurs de l'érosion, en vue de la

production d'une carte de synthèse donnant une spatialisation qualitative de l'ampleur du phénomène à l'intérieur du bassin versant (**Figure 30**). Les cartes thématiques élaborées sont :

- * La carte des isohyètes reflétant l'agressivité climatique ;
- * La carte des pentes donnant l'influence du relief dans le processus de détachement et de transport des sédiments ;
- * La carte de dureté du substrat indiquant sa résistance à l'action du facteur climatique (pluie et ruissellement) ;
- * La carte de l'occupation des sols indiquant le degré de son influence sur l'érosion.
- * La carte des pratiques antiérosives.

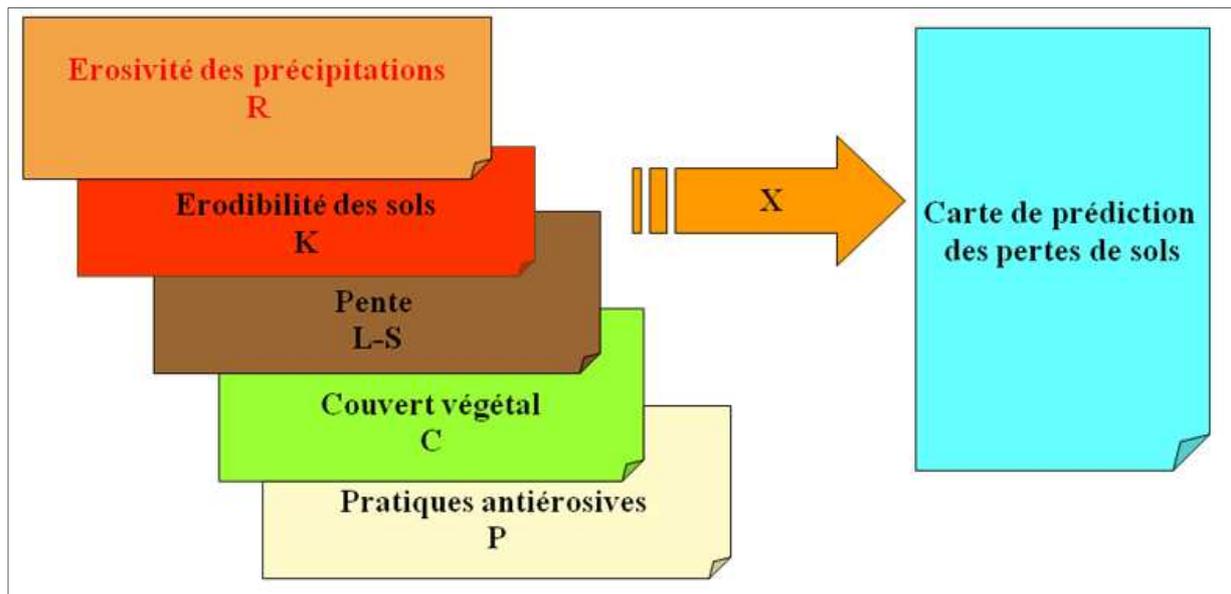


Fig 30 : Principe de l'approche utilisée

II- FACTEUR TOPOGRAPHIQUE (LS)

L'un des facteurs importants de l'érosion, qui intervient dans les processus de détachement, de transport et de sédimentation est le degré de pente. D'une manière générale, la quantité des sédiments produite sur les versants est proportionnelle au degré et à la longueur de la pente. Elle agit par l'accélération des processus de détachement (splash et abrasion) et de transport. Cependant, dans certains cas (sols à texture sablo-limoneuse), l'effet peut être inverse en améliorant la perméabilité de la surface et donc réduit le ruissellement.

Du fait qu'il n'existe pas de programmes qui donnent directement les longueurs et indices de pentes, la valeur de l'indice topographique (LS) sera calculée à partir du MNT au niveau de chaque pixel.

Le facteur LS a été directement généré par des modèles récemment mis au point ; il s'agit de : Mitasova et Brown (2001), (Geographic Modeling Systems Lab, UIUC-USA). L'équation mise au point est une équation qui donne directement la valeur LS traduisant l'effet combiné du degré et de la pente à savoir :

$$LS = (([\text{Ecoulement accumulé}] \times \text{résolution} / 22.1)^{0.4}) \times (\text{Sin}(\text{pente} \times 0.01745) / 0.09)^{1.4} \times 1.4$$

La carte MNT utilisée a une résolution de 30m. L'écoulement accumulé est généré à partir de la carte des directions générée à son tour du MNT

Le tableau 16 représente la répartition des classes de l'indice des pentes LS en fonction des surfaces et des surfaces cumulées du bassin versant de l'Assif E Mal.

Classe de l'Indice de pentes LS	Surface en ha	Surface en %	surface cumulée en %
Zone plate	3902.20	8.71	8.71
0-10	6198.08	13.83	22.54
10-20	8026.64	17.91	40.46
20-30	7616.24	17.00	57.46
30-40	6521.00	14.55	72.01
40-50	4640.48	10.36	82.37
50-60	4646.64	10.37	92.74
60-70	1270.40	2.84	95.57
70-80	575.48	1.28	96.86
80-90	318.68	0.71	97.57
90-100	215.92	0.48	98.05
100<	872.56	1.95	100.00
Total	44804.32	100.00	

Tab 16. : Les classes de l'indice de pentes et leurs surfaces dans le BV de l'Assif El Mal

L'analyse des résultats montre que presque 24% du bassin a une valeur d'indice de pente LS inférieure à 10 équivalent à un faible potentiel d'érosion, 77% du bassins montre une valeur moyenne de LS comprise entre 10 et 50 alors que seulement 14% ont un LS supérieure à 50 et donc sujet à une forte érosion potentielle due essentiellement l'effet combiné de la pente et de sa longueur.

La **figure 31** représente la carte de répartition des pentes dans le bassin versant d'Assif El Mal :

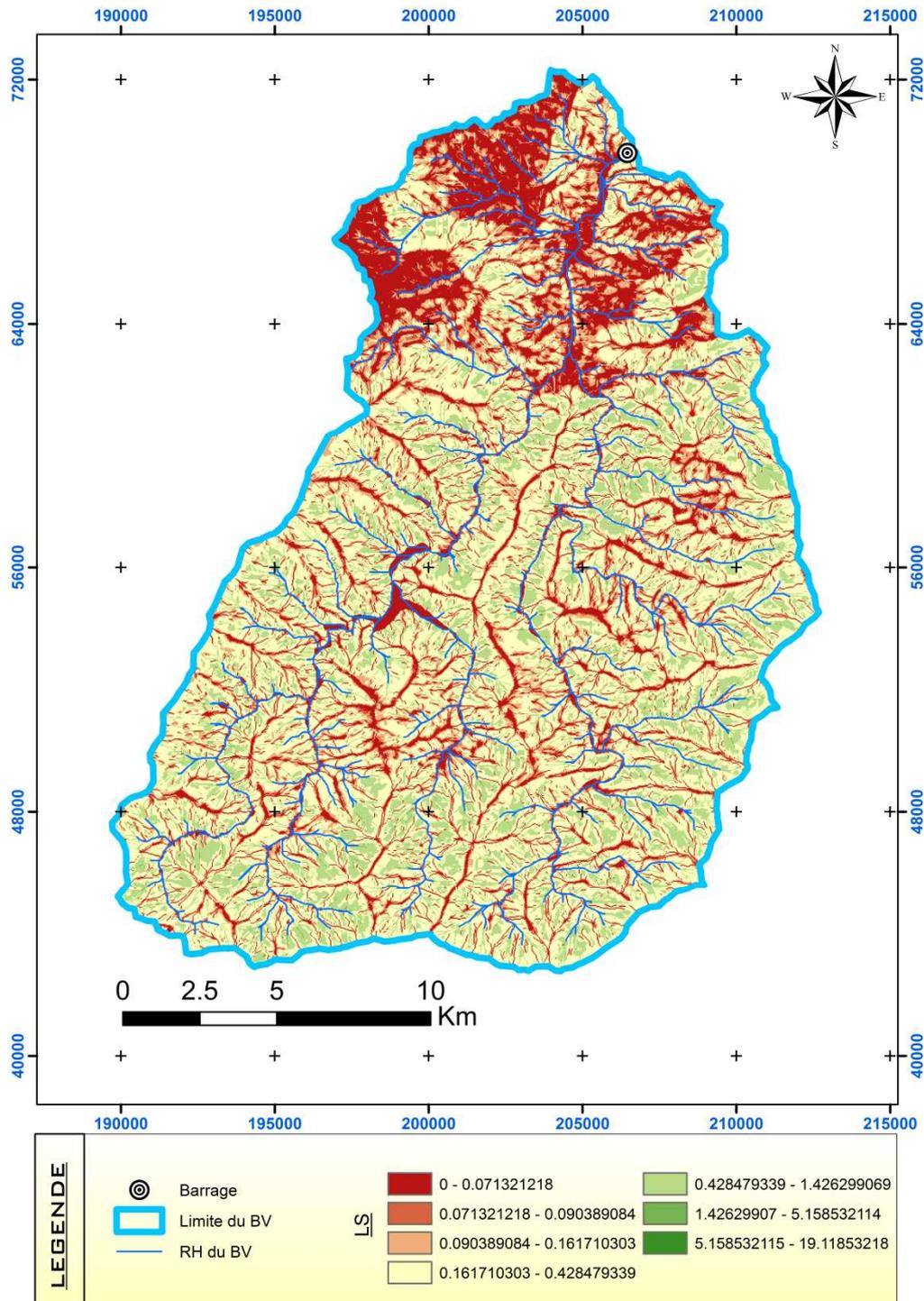


Fig 31 : Carte des pentes (degrés)

L'analyse de la répartition du facteur LS permet de constater que 60% de la superficie du bassin à une valeur de LS inférieure à 30, donc une faible contribution à l'érosion due à de faibles pentes, alors que 40% présente des valeurs de LS élevées correspondants à des zones abruptes et de fortes contributions à l'érosion.

III- FACTEUR DE L'ERODABILITE DES SOLS (K)

Etant donné les objectifs spécifiques de l'étude qui focalisent sur les aspects des apports de sédiments, des inondations et la conservation des sols, l'étude pédologique a adopté en grande partie la démarche litho-géomorphologique pour non seulement la distinction des différentes classes de sols et leur importance de point de vue répartition et occupation au niveau du bassin mais encore l'identification des zones les plus susceptibles à l'érosion.

L'érodabilité des sols peut être approché de différentes manières ; soit par le degré de sensibilité des sols à l'érosion selon leur composition (par exemple : les argiles sont plus vulnérables à l'érosion), soit par l'utilisation de l'indice K de Wischmeier. Cet indice figure parmi les facteurs de l'équation universelle de perte en terre de Wischmeier.

III-1-Caractérisation des sols de la zone d'étude

Le sol est le résultat de l'interaction de plusieurs facteurs pédogénétiques.

D'une manière générale, l'analyse de la carte géologique permet de déduire que les formations géologiques du bassin se répartissent suivant les grandes catégories suivantes (*Tableau 17 et Figure 32*) :

formation géologique	Surface (ha)	% de la surface
Formation primaire à dominance schisteuse	34580	81.36
Formation secondaires calcaire	1350	3.18
Formation secondaires marno-calcaire	4441	10.45
Roche magnétique	2130	5.01
Somme	42501	100

Tab.17..: Concepts du modèle USLE

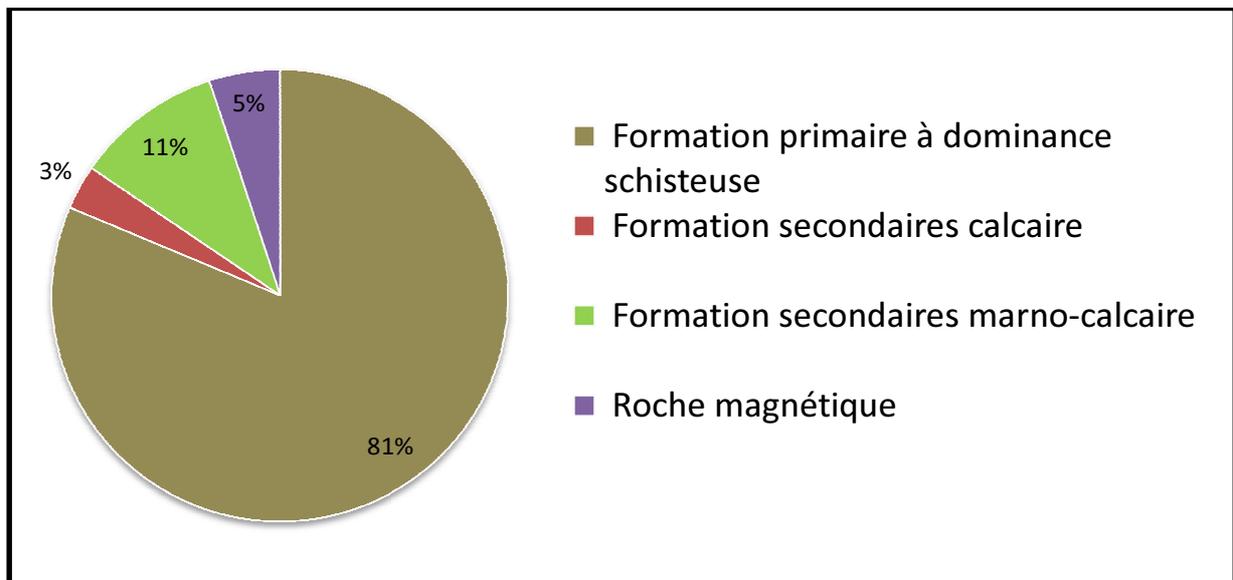


Fig.32.: Formation géologiques du BV

Sur la base de répartition spatiale des classes des litho-faciès, établie essentiellement sur les critères de dureté de la roche, nous pouvons d'ores et déjà estimer l'érodibilité des sols mais d'une façon qualitative.

Le **tableau 18** et la **Figure 33** représente la répartition des principales strates lithologiques identifiées dans le bassin versant selon leur dureté:

classe de dureté de substrat	% de la superficie du bassin versant
Tendre	10.5
Moyennement tendre	84.5
Dur	5

Tab 18.: Les classes de dureté de substrat et la surface qui occupent

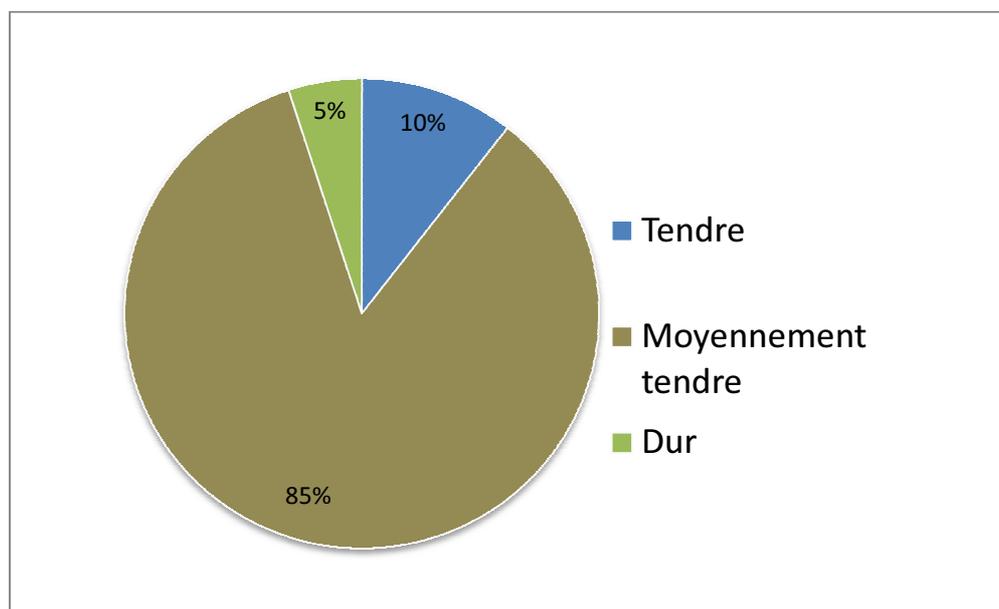


Fig 33.: Importance de dureté de substrat

D'après la répartition géologique (**Figure 22**), on peut conclure que la partie proche de la retenue du barrage (superficie de 4808 ha ; soit 11,29% de la superficie du BV) est celle la plus sensible à l'érosion ; car elle est constituée de roches à cohérence généralement tendre à modérément tendre (**Figure 33**). Ceci souligne la fragilité de cette zone proche du barrage et les risques d'envasement, d'où la nécessité d'intervention et la stabilisation de ses structures lithologiques tendres.

A défaut de données sur les caractéristiques physico-chimiques des sols, notamment leurs états de surface (texture, teneur en matière organique, structure, perméabilité), les différentes études mentionnées ont utilisé une approche indirecte reflétant la résistance (érodibilité) du sol à l'érosion hydrique, la dureté des substrats.

III-2-Les types de sols caractérisant la région

La superposition des différents facteurs de la pédogenèse (substrat lithologique, couverture végétale par l'utilisation de la carte d'occupation des sols, carte des pentes, carte des expositions, la connaissance des différentes types de pédogenèse actives au niveau de cette région du Haut Atlas occidentale, ...) a permis de déterminer les différentes classes de sols.

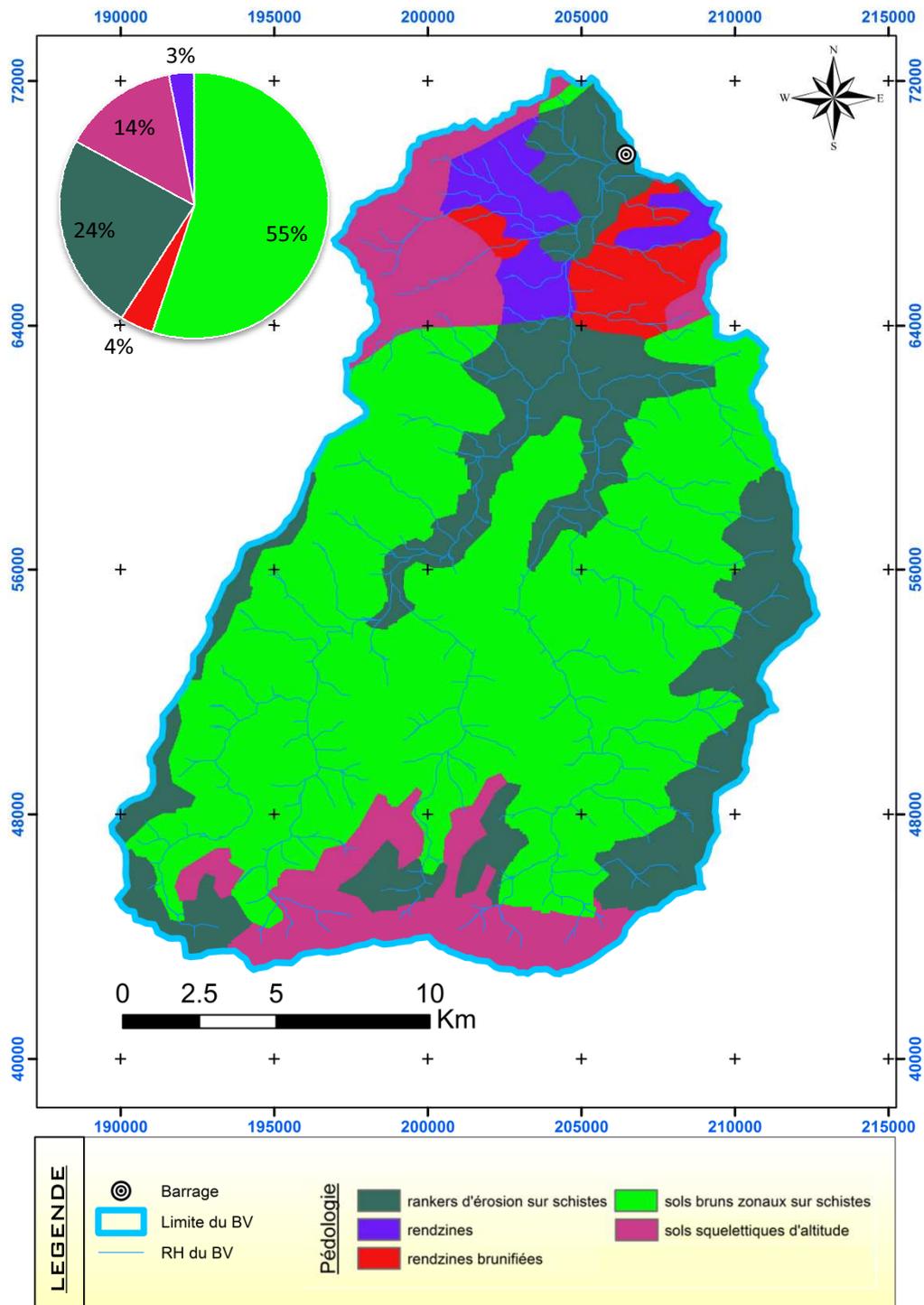


Fig.34 : Carte pédologique du BV

Les **figures 34** représentent respectivement la répartition des différents types de sols dans la région et leurs pourcentages.

Les principaux sols caractérisant la région sont essentiellement : les sols bruns zonaux sur schistes occupant la majorité centrale du bassin versant et les rankers d'érosion sur schistes qui se répartissent de manière locale dans plusieurs zones du bassin versant.

III-3- L'indice K de Wischmeier

Le facteur érodibilité des sols est le taux d'érosion déterminé expérimentalement sous des conditions standard. La répétition des expérimentations sur différents types de sols a permis à Wischmeier & Smith (1978) de développer une équation pour le calcul de l'érodibilité des sols :

$$100K=2,1.M^{1,14} \cdot 10^{-4} (12-a) + 3,25 (b-2) + 2,5 (c-3)$$

où :

M : 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 code de structure (1à6), avec 1 pour les sols à drainage rapide (>60mm/hr) et 6 pour les sols à drainage très lent (<1mm/hr).

c : est le code de la structure code de structure (1à4), avec 1 pour les structure fragmentaires et 4 pour les structure très grossières

Vu le manque de données des différentes valeurs de la matière organique, de la perméabilité, de la texture et de la structure, et vue l'absence d'étude pédologique on se retrouve face à un handicap de taille afin de calculer le facteur K des différentes zones du bassin versant. Ceci nous oblige à faire des extrapolations en se basant sur les différentes études établies au Maroc pour estimer les valeurs de K en fonction des types de sols caractérisant le bassin. Les études sur lesquelles nous nous sommes basées sont :

Les études d'aménagement du bassin versant d'oued El Malleh

Etude d'aménagement du bassin versant d'oued Inaouen

Les études d'aménagement du bassin versant de la Haute Chaouia

Les études d'aménagement du bassin versant d'oued Labiod

Les études d'aménagement du bassin versant d'oued Martil,

Les valeurs obtenues suite à cette synthèse sont récapitulées dans le tableau 19 :

unités pédologique	Surface (Km2)	% à la superficie totale du BV	valeurs d'érodabilité des sols
Rankers d'érosion sur schistes	100.44	23.63	0.28
Sols squelettiques d'altitude	59.09	13.90	0.46
Rendzines brunifiées	15.15	3.57	0.333
Sols bruns zonaux sur schistes	232.71	54.75	0.18
Rendzines	17.52	4.14	0.333
Total	425.00	100	

Tab 19 : Les unités pédologiques de la zone d'étude et les valeurs K correspondant

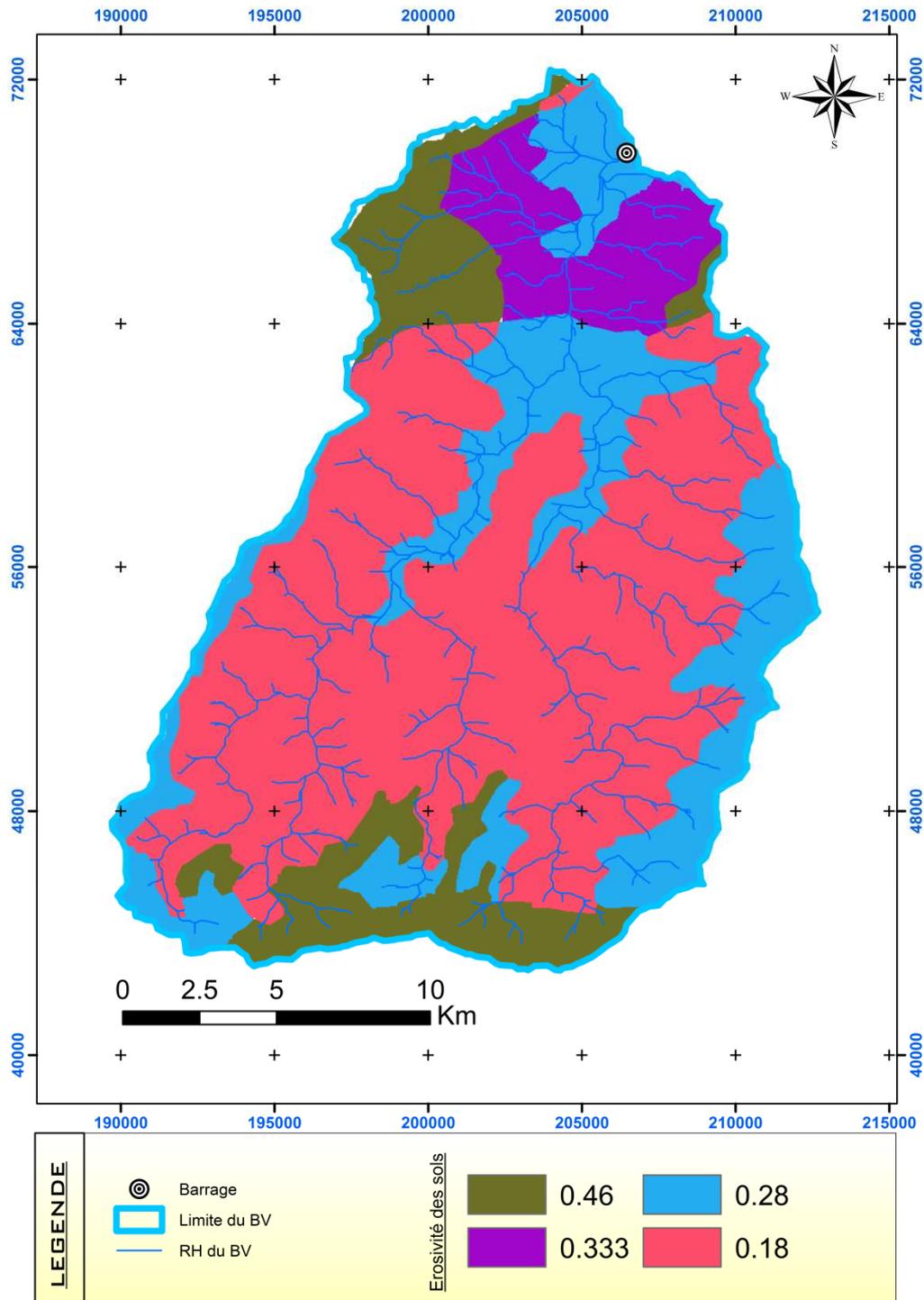


Fig.35 : Carte de l'érodabilité des sols

La carte d'érodabilité (**Figure 35**) montre que les terrains les plus érodibles se situent dans la partie amont (extrême sud du bassin) et dans la partie avale, autour de l'exutoire du bassin où se situent les terrains de couverture mésozoïque tendres à l'érosion. Dans la partie centrale du bassin, les terrains qui constituent la grande majorité de la superficie du bassin présentent un coefficient d'érodabilité relativement faible.

IV- LE COUVERT VEGETAL (C)

L'occupation du sol (état de surface) est l'un des facteurs les plus importants de l'érosion hydrique. Son effet réducteur de la détachabilité (splash) et de la transportabilité (ruissellement) des sédiments varie avec un rapport de 0 à 1. En effet, le coefficient C de la formule de Wischmeier prend des valeurs de l'ordre de 0,01 pour des couverts végétaux denses au ras du sol (multi-strates) à presque 1 pour des sols nus.

IV-1-occupation des sols

La carte d'occupation des sols (**Figure 38**) a été dérivée par l'interprétation de deux scènes Landsat TM, selon les caractéristiques détaillées ci-dessous :

Scène 2002

- Date : 10 Mai 2001
- Dims :8578 x 7771 x 1[BSQ]
- Byte order : Host (intel)
- GEO-TIFF File Imported
- Pixel bande 1,2,3,4,5,6 et 7 : 28.5 Mètres, panchromatique ; 14.25 Mètre
- Résolution spectrale : Sept (7) bandes multispectrales.
- Projection : UTM, Zone 29 North
- Datum : WGS-84

Scène 2000

- Date : 3 Février 2000
- Dims :8599 x 7631 x 1[BSQ]
- Byte order : Host (intel)
- GEO-TIFF File Imported
- Pixel bande 1,2,3,4,5,6 et 7 : 28.5 Mètres, panchromatique ; 14.25 Mètre
- Résolution spatiale : multi spectral :30 x 30 mètres, panchromatique : 10 x 10 mètres
- Projection : UTM, Zone 29 North
- Datum : WGS-84

L'objectif initial de la carte d'occupation des sols visait à distinguer les formations végétales forestières, les zones de parcours et les espaces cultivés.

Afin de bien faire ressortir les thèmes relatifs à la végétation naturelle et cultivée ; nous avons utilisé la composition RVB combinant les canaux 3, 4 et 5 de l'image satellite :

Canaux 3, 4 : bons indicateurs de la biomasse végétale

Canal 5 : bon indicateur à la quantité d'eau présente dans les feuillages d'un couvert

L'association de ces canaux : bon indicateur des stades phénologiques des plantes

Pour pouvoir avoir une bonne information sur la répartition de la végétation au niveau du bassin versant d'Assif El Mal, on a utilisé comme information supplémentaire à savoir le seuillage par l'indice de végétation NDVI : Indice de végétation normalisé l'indicateur de croissance de la végétation le plus utilisé en télédétection à savoir :

$$\text{NDVI} : (\text{AVHRR2} - \text{AVHRR1}) / (\text{AVHRR2} + \text{AVHRR1})$$

Où :

AVHRR1 : Valeur de réflectance canal 1 (visible)

AVHRR2 : Valeur de réflectance canal 2 (proche infrarouge)

Ses valeurs varient entre -1 et 1 ; les valeurs faibles sont trouvées pour les étendues d'eau, les sols nus et les aires construites. Le NDVI est corrélé positivement avec le total de la biomasse vivante ; il peut ainsi être utilisé pour donner une indication des différences de couvert végétal.

La confrontation de l'image classée avec celle de l'INDV nous a permis de déterminer les classes d'occupations du sol représentées dans le tableau 20 et la **figure 36** :

classe	surface	%
Affleurement rocheux	14486.81	34.00
terrain nus (à usage agro-pastorale : parcours et cultures céréalières bours)	24838.82	58.30
terrain renfermant une formation naturelle claire steppique	1332.99	3.13
terrain renfermant une formation naturelle moyennement dense	1434.33	3.37
terrains irrigués	512.89	1.20
total	42605.84	100.00

Tab 20 : classes d'occupations du sol dan la zone d'étude

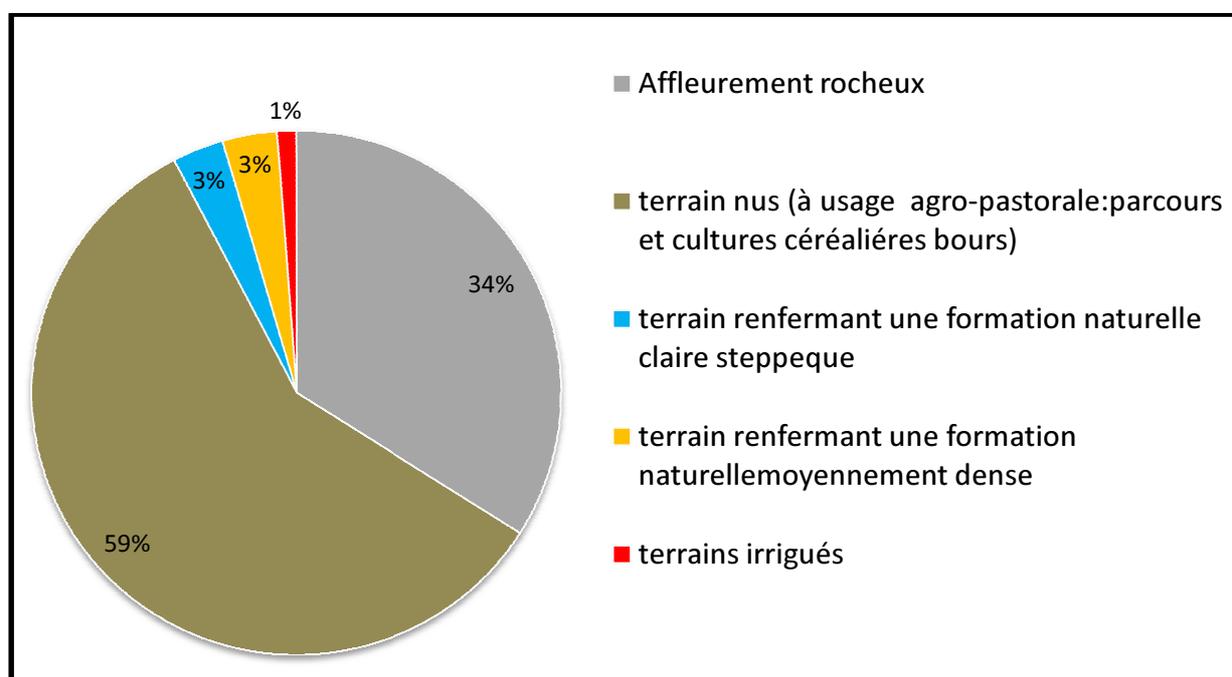


Fig.36 : Répartition des classes lithologique dans la zone d'étude

Les terrains nus utilisés pour des fins pastoraux et pour les cultures céréalières bours occupent une superficie importante de 24812 ha ; soit plus de 58% de la surface total du bassin versant. Ces terres constituent une bonne cible de traitement et méritent d'être étudiés davantage pour

leur conservation et leur valorisation. Les affleurements rocheux très peu affectés par l'érosion s'étendent sur une superficie de 14451 ha. La couverture végétale reste faible au niveau du bassin versant et ne dépasse pas le seuil de 8% de la surface totale de la zone d'étude (*Figure 37*).

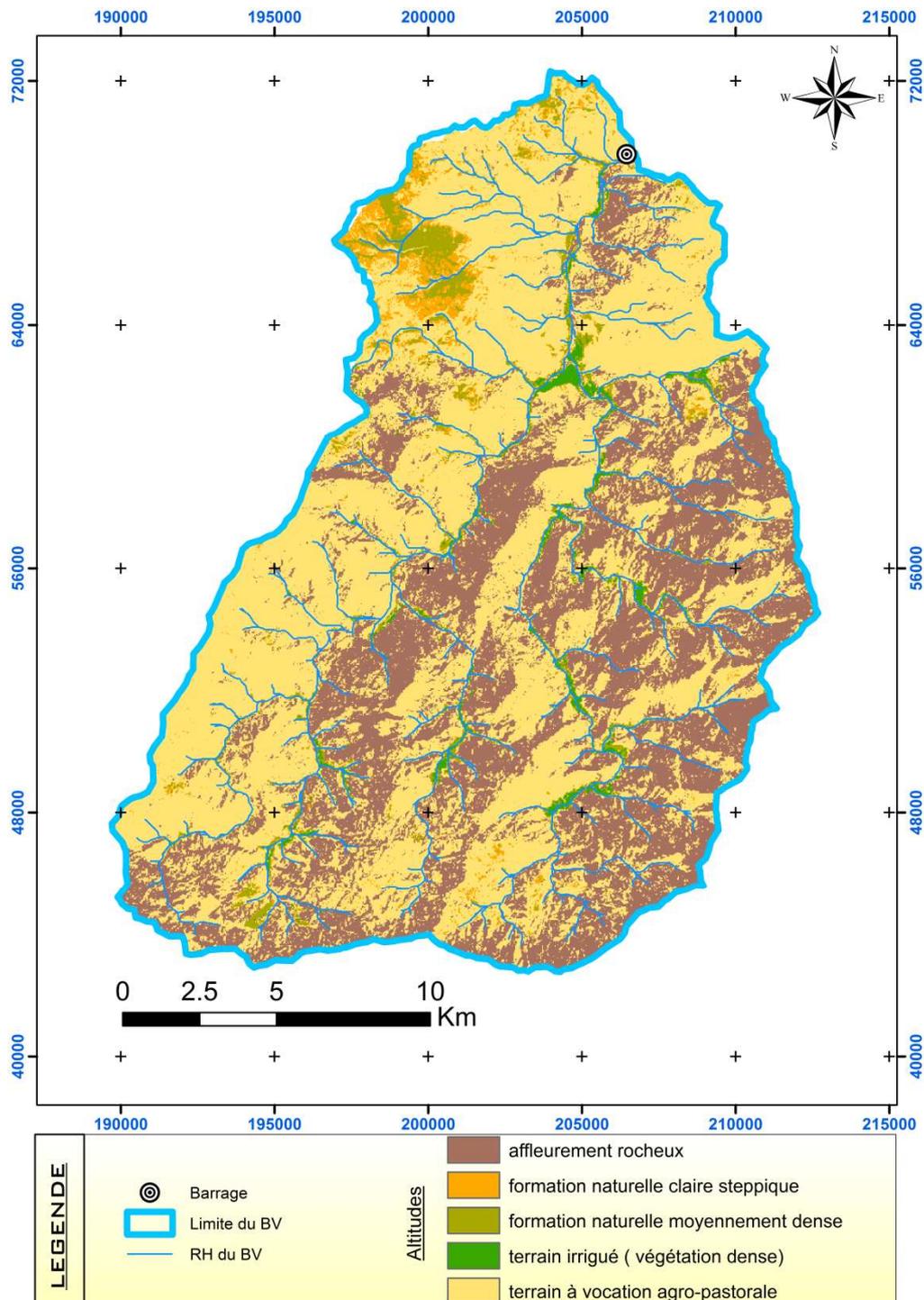


Fig.37.: Carte d'occupation des sols

VI-2-couvert végétal

Le facteur **C** renseigne sur le degré de protection du sol par le couvert végétal. Ce facteur a subi plusieurs changements depuis l'établissement de l'équation universelle de la perte en terre, sa détermination repose sur la densité de la couverture de la surface du sol par la végétation et sur la hauteur des strates végétales.

Les valeurs de ce coefficient **C** de l'équation universelle de perte en terre se faisaient toujours à partir des tables de Wischmeier et Smith (agriculture handbook n°537) en tenant compte des différentes strates de végétation herbacée, arbustive et arborée.

Cependant avec le modèle RUSLE le calcul de **C** est devenu plus précis en se basant sur l'équation suivante :

$$C = \text{PLU} \times \text{CC} \times \text{RC} \times \text{SM}$$

PLU : Prior-Land Use ; l'effet des résidus de la campagne antécédente ainsi que les opérations de labours précédent sur la consolidation du sol.

CC : Canopy Cover ; l'efficacité d'interception de la canopée et des cimes sur l'énergie des pluies.

SC : Surface Cover ; l'effet de réduction de la capacité de transport du ruissellement par la couverture de surface.

RC : Surface Roughness : l'effet de la rugosité du sol sur le détachement du sol.

SM : Soil Moisture : l'effet de l'humidité antécédente.

La détermination des ces «sous facteurs» du facteur **C** nécessite la collecte d'une base de donnée très détaillée sur les différents types de culture et du couvert végétal naturel.

Malheureusement, au Maroc ces données ne sont pas encore disponibles et plusieurs instituts de recherches essaient actuellement de récolter cette base de données.

Vue l'absence de données bien précises du facteur **C** et afin de pouvoir donner un chiffre qui traduit la réalité de la céréaliculture, on prendra en considération les résultats de l'étude menée par la société d'Etudes Techniques et d'ingénierie TTOBA qui s'est basée sur les travaux des services d'aménagements des forêts et des bassins versants (SAFBV) en collaboration avec le projet pilote (MOR/93/010) et l'Université américaine d'Arizona (Keneth Renard, Glenn A. Weesies, Kbaibi, Defaa, Moufaddal, Sejjariet et Zeriah)

En utilisant le logiciel RUSLE 2 version 1.06, 2001 les résultats de l'étude mené par TTOBA ont été répartis comme le montre le *tableau 21* :

Occupation du sol	Valeur de C
Affleurement rocheux	0.18
terrain de parcours très claire et terrain à vocation céréalières	0.13
terrain renfermant une formation naturelle claire steppique	0.231
terrain renfermant une formation naturelle moyennement dense à base de matorral	0.45
terrains irrigués et végétation dense	0

Tab 21 : classes d'occupations du sol dans la zone d'étude

La carte obtenue (*Figure 38*) permet de conclure que la valeur de couvert végétal la plus abondante est celle de l'ordre de 0.13 à 0.18. Ce type de couvert végétal est réparti dans la majorité de la surface du bassin versant.

L'occupation de valeur comprise entre 0.23 et 0.45 se localisent dans la partie nord et nord-ouest du bassin.

Pour les occupations portant une valeur nulle, ceux-ci sont placés essentiellement dans les rives des Oueds où il y a présence de cultures.

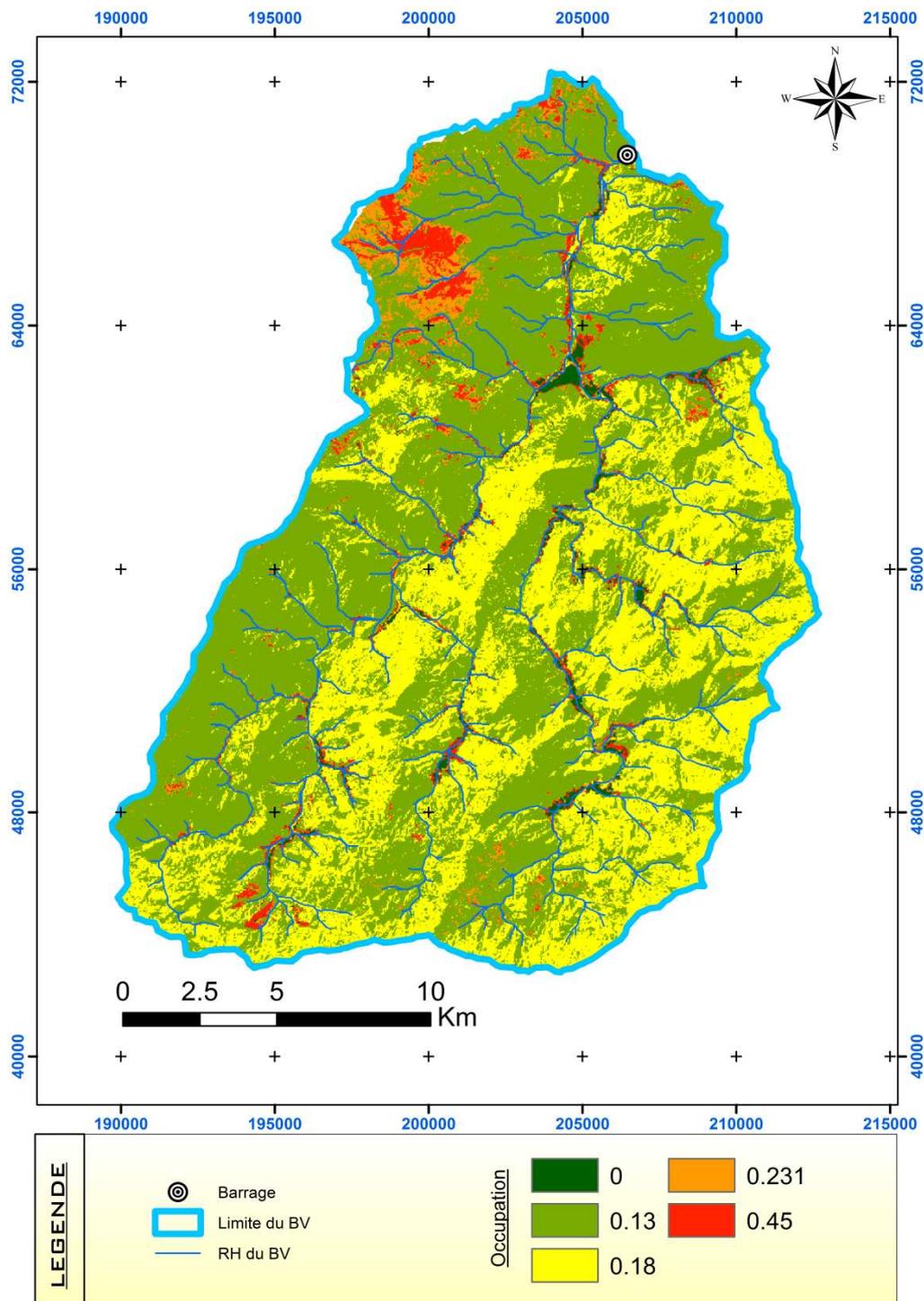


Fig 38: Carte du couvert végétal

V- PRATIQUES CULTURALES (P)

Le facteur P dit pratique culturales traduit l'effet des mesures de conservation. Les cultures en courbes de niveau, en bandes alternées ou en terrasses, les reboisements en banquettes, le buttage et le billonnage sont les pratiques les plus efficaces de conservation des sols. La valeur 1 est attribuée aux terrains sur lesquels aucune des pratiques citées n'est utilisée.

Dans cette étude, on va adopter la valeur 1 pour l'ensemble de la zone d'étude. C'est la valeur qui a été retenue par de nombreux chercheurs de même que dans les études d'aménagement des bassins versants de l'Oued Ouergha, Oued El Malleh, Oued Inaouéne et des Oueds de la Haute Chaouia.

VI- AGRESSIVITE CLIMATIQUE (R)

La précipitation joue un rôle premier pour provoquer l'érosion. Wischmeier et al. (1978) ont corrélié plus de 40 facteurs climatiques ou météorologiques (hauteur de précipitation, différentes intensités caractéristiques, les conditions antécédentes de précipitations ou d'humidité, etc.) et leur relation avec l'érosion sur des parcelles standards nues et cultivées dans le sens de la pente. La plus grande corrélation ($R = 0.90$) a été obtenue avec le produit de l'énergie de la pluie (E) et de l'intensité maximale de la pluie pour une période de 30 minutes (I_{30})

L'estimation du facteur R selon la formule de Wischmeier & Smith nécessite donc la connaissance des énergies cinétiques (E_c) et de l'intensité moyenne sur 30 minutes (I_{30}) des gouttes de pluie de chaque averse. Elles sont données par la formule suivante :

$$R = K E_c I_{30}$$

K étant un coefficient dépendant du système d'unités de mesure.

Cette formule a toujours été difficile à cause du manque de données, les seules données disponibles concernant les précipitations dans les stations qui se trouvent dans le bassin ou à sa proximité sont des moyennes mensuelles et annuelles. Pour cela, la méthode préconisée par la présente étude est celle de Renard (1996).

$$R = 0.0483 \times P^{1.61}$$

Avec:

R=l'indice de l'agressivité climatique en Mjmm/ha/H/an

P=Précipitations maximales de durée 24h en mm

Cette méthode estime l'érosion des pluies R de Wischmeier d'une manière indirecte à partir de la connaissance de la moyenne des pluies annuelles.

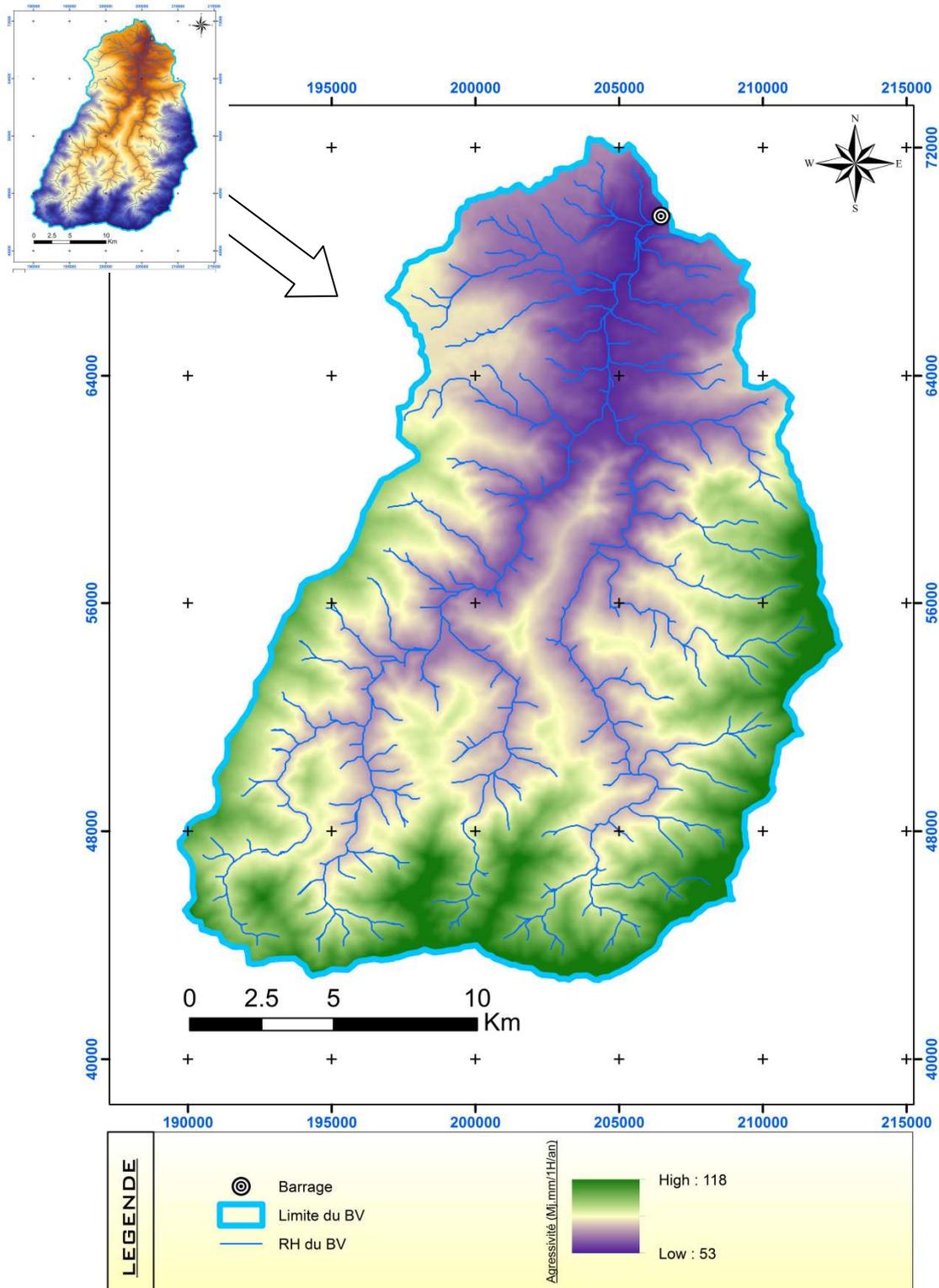


Fig 39 : Carte d'agressivité climatique

A partir de la carte des isohyètes des précipitations maximales de durée 24h et 50ans de période de retour on a élaboré la carte d'agressivité climatique (**Figure 39**). Cette carte montre que sous l'effet des précipitations, les valeurs de l'agressivité des précipitations augmentent de la partie nord (exutoire) vers la partie sud (amont du bassin). Elles vont donc de 53 Mjmm/ha/H/an à 118 Mjmm/ha/H/an.

VII- CONCLUSION : EROSION POTENTIELLE (A)

La carte de l'érosion potentielle pour le Bassin Versant d'Assif El Mal est produite par un simple procédé de superposition des cartes thématiques obtenus (au nombre de cinq) et de multiplication des indices correspondants qui varient comme suit :

Carte d'agressivité climatique (R) : de 53 à 118 ;

Carte du facteur topographique (LS) : de 0 à 19,12 ;

Carte de l'érodabilité des sols (K) : de 0,18 à 0,46 ;

Carte de l'occupation des sols (C) : de 0 à 0,45.

Les valeurs de l'indice synthétique ainsi obtenu par multiplication varient de 0 à 679 t/ha/an, avec une moyenne de 9,38 t/ha/an.

La carte d'érosion obtenue (**Figure 40**) montre que les plus faibles pertes en terre (inférieur à 2t/ha/an) se localisent en grande partie des zones à côté des oueds où on a des terres plates à très faible pente (5° à 7°) et des terrains irrigués (végétation dense) qui maintient le sol et donc une résistance forte à l'érosion. Cependant, la majorité de la superficie du bassin versant présente des taux d'érosion importants, supérieures à 5t/ha/an. Ce sont des zones à matériaux friables dénudées de végétation avec des terres accidentés (60°) ; elles se localisent dans la partie Sud, Nord-est et Nord-ouest du bassin versant.

La majorité de la superficie qui se trouve au Nord, non loin de la retenue du barrage de Taskourt, est exposée à une forte érosion potentielle. Cette exposition très forte à l'érosion génère une grande production de sédiments participant de façon directe au risque d'envasement. La proximité de cette zone au barrage participe aussi à l'envasement du fait que les sédiments érodés ne se déposent nulle part autre que dans la retenue.

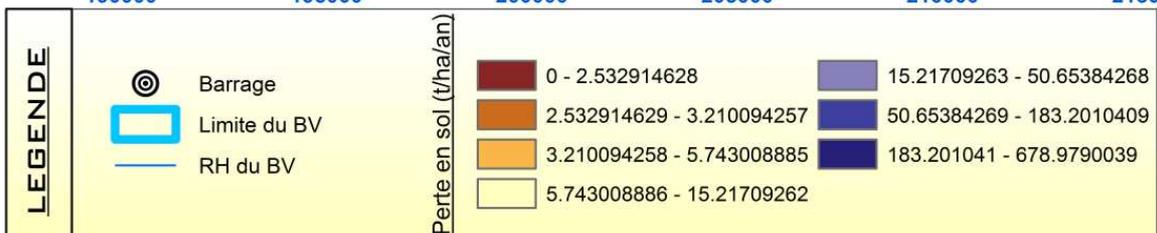
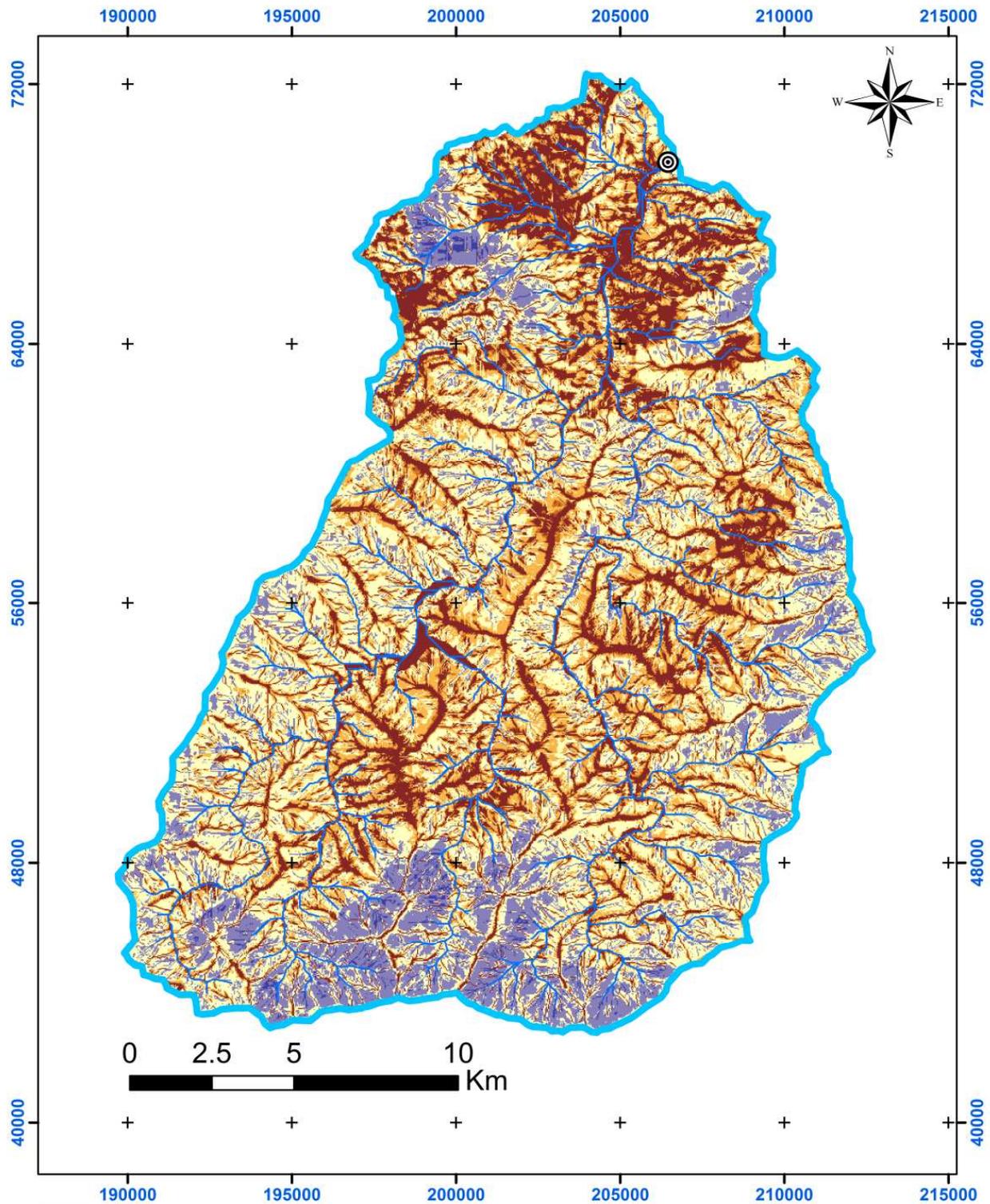


Fig 40: Carte d'érosion potentielle

CHAPITRE 6

ESTIMATIONS DE L'ÉROSION DES SOLS D'APRÈS LE MODÈLE HEUSCH

I-INTRODUCTION

Les apports en sédiments au niveau de chaque bassin versant sont estimés par les corrélations trouvées par Heusch ; quatre corrélations ont été élaborées sur la base des mesures de sédiments en suspension au niveau des stations de jaugeage en relation avec les apports liquides.

D'après Demmak (1982), il y a une relation étroite entre le type d'érosion, les transports de sédiments et la lithologie. Là où les roches sont résistantes, on trouve les pentes les plus fortes et des couverts végétaux denses et des transports de sédiments faibles ; mais sur les roches argileuses tendres et les marnes on peut trouver des pentes relativement modérées, des activités humaines intenses, une végétation peu dense et des transports abondants de sédiments (Heusch, 1970).

C'est sur cette base que Heusch à pu sortir quatre corrélations qui relient les trois paramètres lithologie, apports solides et apports liquides.

Ces corrélations ont été établies en prenant en considération la nature lithologique du bassin versant et les hauteurs d'eau ruisselées. Il est évident que ces relations expriment des concentrations de solides transportées jusqu'aux exutoires des bassins versants. La turbidité T est calculée à partir de l'équation :

$$\text{LogT} = a \log Q + b$$

Avec :

T : turbidité moyenne annuelle en gramme/litre

Q : lame d'eau écoulée en mm

a et **b** varie en fonction du type de lithologie

L'application des corrélations au niveau des sous bassins versants d'Assif Al Mal, après estimation des lames d'eau écoulées et détermination de leur dominance annuelle des sous bassins versants d'Assif El Mal.

II- LA LAME D'EAU RUISSELEES Q

II-1-Sous bassins versants d'Assif El Mal

La division de la surface du bassin versant d'Assif El Mal en sous bassins versants est réalisée dans l'objectif d'individualiser les surfaces qui génèrent le plus de ruissellement et de sédiments dans un premier temps et d'identifier les zones prioritaires et d'action dans un deuxième temps (*Figure 41*).

Dans ce but, le sous bassin versant qui représente une unité hydrologique, constitue l'unité de base de la division. L'identification des sous bassins versants a été faite de manière à identifier tous les sous bassin versants qui constituent des affluents du cours d'eau principal. Cette répartition a l'avantage d'évaluer les apports de chaque sous bassin en terme de sédiments et de crues au niveau du cours d'eau principal et surtout au niveau du barrage de Taskourt. Ces bassins versants ne sont pas indépendants de point de vu hydrologique puisque certains sont des sous bassins.

Le *tableau 22* donne les caractéristiques (surface, pente moyenne, précipitation, ruissellement) des sous bassins versants identifié. Ces caractéristiques montrent l'importance potentielle de chacun en matière de production d'eau (apport globale, crues et sédiment). Plus la surface est grande plus les apports sont importants.

Cette répartition en sous bassins versants permettra de mieux affiner l'identification des sous bassins et des zones d'action prioritaires.

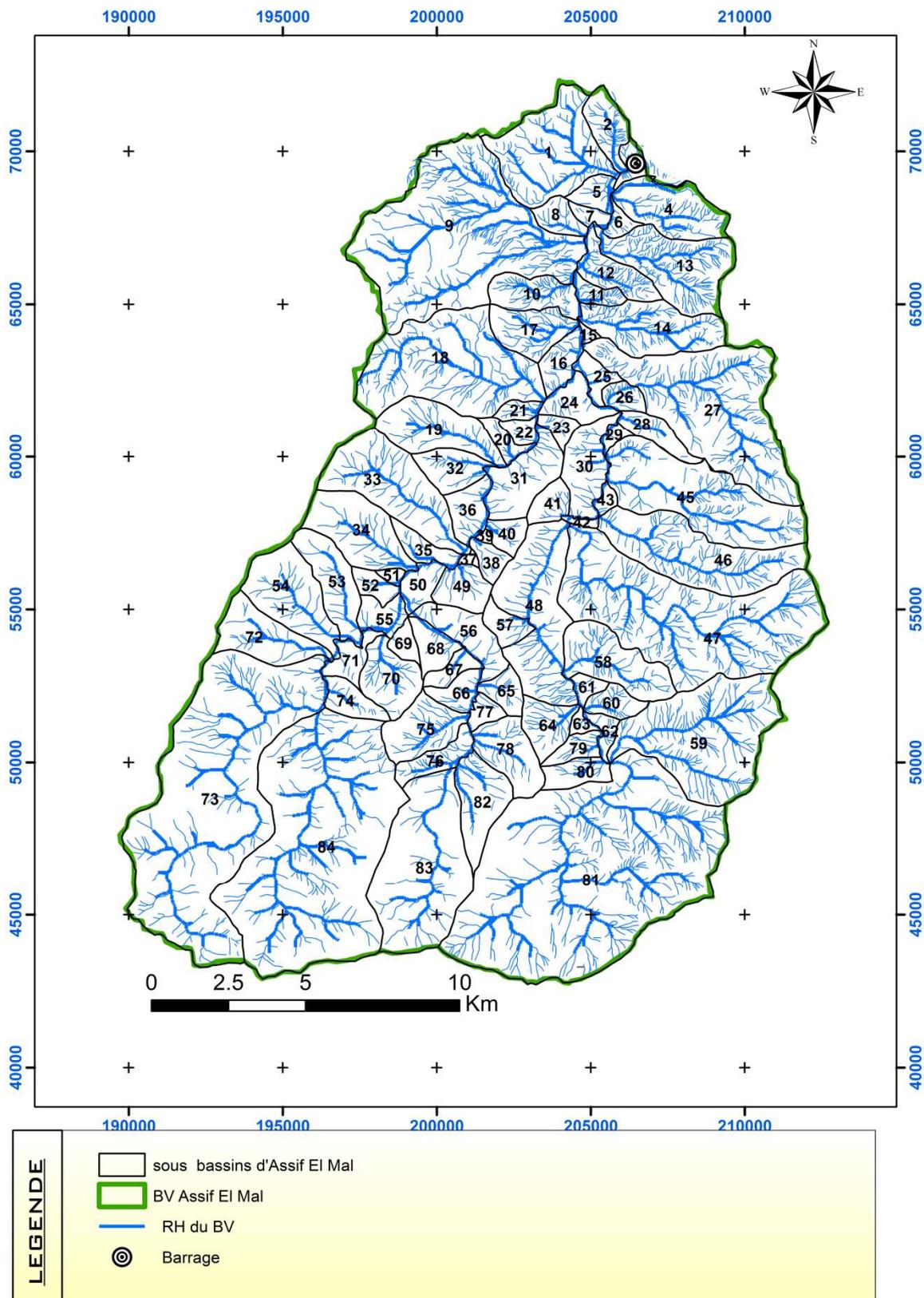


Fig 41 : Carte des sous bassins versant

II-2-Précipitation annuelles

La *figure 42* montre la répartition spatiale des précipitations en fonction de chaque sous bassin versant la plus faible valeur enregistrée est celle 429mm (en Aval du bassin) alors que la plus haute valeur est 654mm (en Amont du BV)

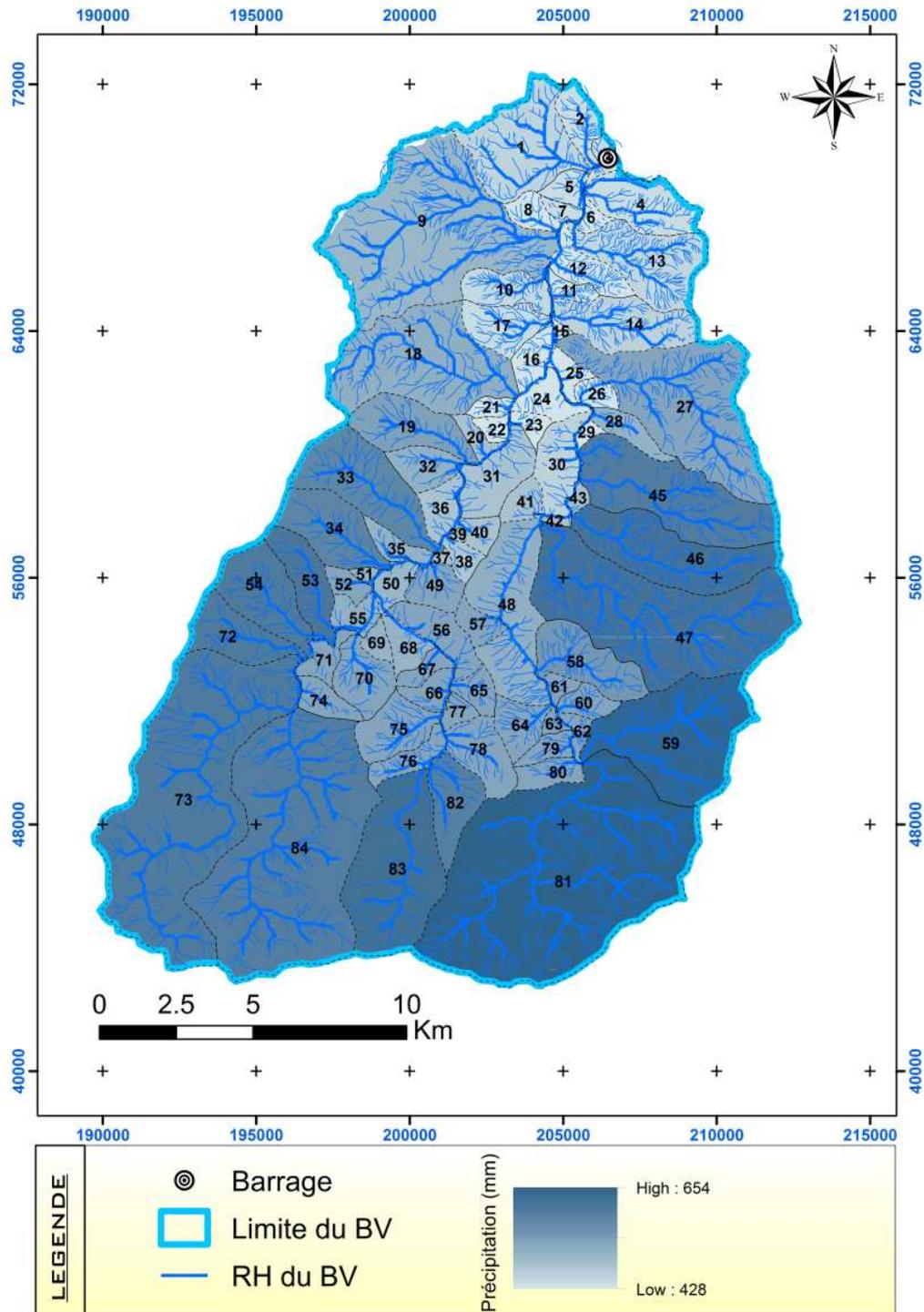


Fig 42.: Carte des précipitations par sous bassin

II-3-Relation entre les précipitations et les ruissellements

La relation entre précipitation et ruissellement tout en étant une relation complexe au vue des paramètres impliqués dans ce mécanisme a été évaluée au niveau du bassin versant à travers les données hydrométriques et pluviométrique annuelles de la station de Sidi Bou Atman (**Figure 43**). La répartition des points démontre la variabilité temporelle de ruissellement. Toutefois, la modélisation de cette relation montre une forme exponentielle croissante entre les précipitations et les ruissellements conséquents.

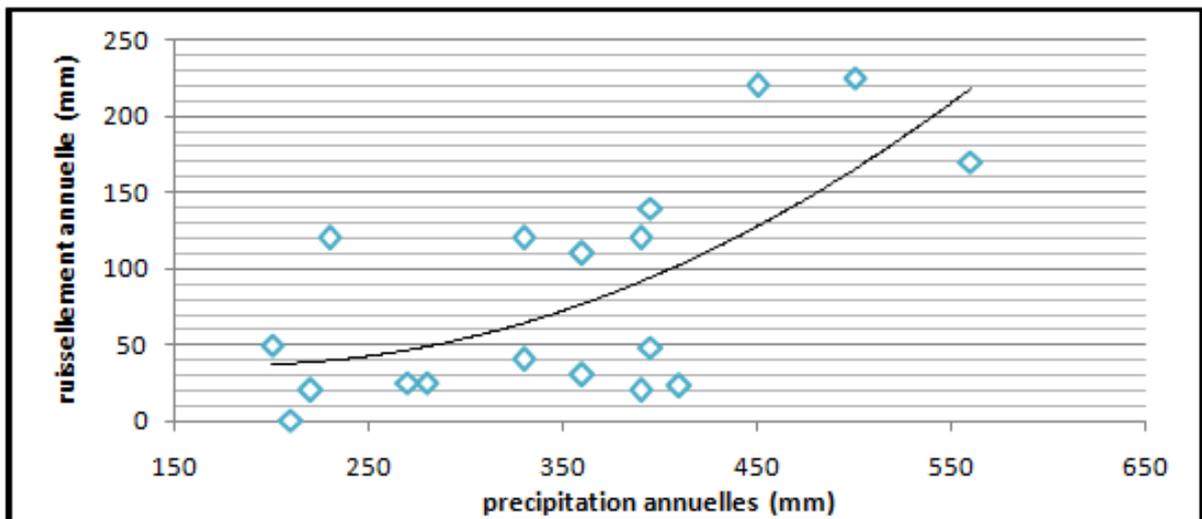


Fig 43 : Relation précipitations ruissellement

La relation entre les précipitations annuelles et les ruissellements annuels peut être exprimé par la relation de la courbe suivante :

$$Q=aP^2$$

Q : ruissellement annuel en mm

P : précipitations annuelles en mm

a : l'ajustement de cette relation a donné un coefficient 'a' de 0.000342

II-4-Ruissellement annuels

Les lames d'eau apportées par les sous bassins versants enregistrent un maximum de 164,7 mm au niveau du bassin versant 81 ; soit un coefficient d'écoulement de 25,3% et un minimum de 55,1 mm observé au niveau du bassin versant 6 avec des précipitations de l'ordre de 430 mm, ce qui fait un coefficient d'écoulement de 12,8% . Les différences s'expliquent par la combinaison des précipitations reçues et la nature lithologique (**Figure 44 et 45**). Les lames d'eau maximum se trouvent au niveau des sous bassins versant recevant le maximum de précipitations, une lithologie dominée par des roches imperméables et ayant une forte pente.

Les apports en eau exprimés en volume d'eau suivent le schéma décrit (**Tableau 22**) en y incluant l'effet de la surface des sous bassins. Le maximum est par conséquent situé au niveau du bassin versant n°81 avec un apport de 7 308 612,04 m³ d'eau par an.

La quantité totale d'eau apportée par le bassin versant d'Assif El Mal est de 49 360 685,92 m³ annuellement.

N° SBV	Surface (ha)	Domaine lithologique	Code	Pente moy	Précipitations (mm)	Ruissellement (mm)
1	929	Calcaires, grés, micaschistes, granite, limon des plaines	4	13.20	454	65.10
2	251	Schistes, Marno calcaire, marno-grés, pyélites	3	21.70	440	59.30
3	187	Marno schistes	2	17.90	440	59.30
4	543	Marno schistes	2	16.30	442	60.10
5	130	Schistes, Marno calcaire, marno-grés, pyélites	3	25.20	440	59.30
6	70	Schistes, Marno calcaire, marno-grés, pyélites	3	33.00	430	55.10
7	67	Schistes, Marno calcaire, marno-grés, pyélites	3	19.00	440	59.30
8	146	Marnes	1	18.20	428	54.30
9	2599	Marnes	1	15.20	500	85.50
10	309	Marnes	1	28.00	447	62.20
11	103	Schistes, Marno calcaire, marno-grés, pyélites	3	11.80	430	55.10
12	273	Schistes, Marno calcaire, marno-grés, pyélites	3	12.8	430	55.10
13	761	Marno schistes	2	20.20	450	63.50
14	630	Marnes	1	18.10	458	66.90
15	24	Marnes	1	20.90	430	55.10
16	185	Marno schistes	2	21.50	430	55.10
17	341	Marno schistes	2	25.50	443	60.50
18	1476	Marno schistes	2	20.40	513	91.50
19	530	Marno schistes	2	38.40	539	103.90
20	101	Calcaires, grés, micaschistes, granite, limon des plaines	4	40.70	480	76.50
21	82	Schistes, Marno calcaire, marno-grés, pyélites	3	47.90	430	55.10
22	81	Schistes, Marno calcaire, marno-grés, pyélites	3	40.70	430	55.10
23	86	Schistes, Marno calcaire, marno-grés, pyélites	3	46.40	430	55.10
24	209	Schistes, Marno calcaire, marno-grés, pyélites	3	29.90	430	55.10
25	120	Calcaires, grés, micaschistes, granite, limon des plaines	4	11.00	430	55.10
26	111	Marno schistes	2	16.80	430	55.10
27	1764	Marno schistes	2	25.30	532	100.60
28	181	Schistes, Marno calcaire, marno-grés, pyélites	3	49.00	507	88.70
29	49	Schistes, Marno calcaire, marno-grés, pyélites	3	85.70	430	55.10
30	379	Schistes, Marno calcaire, marno-grés, pyélites	3	52.30	458	66.90
31	435	Schistes, Marno calcaire, marno-grés, pyélites	3	48.10	480	76.50
32	251	Marno schistes	2	63.90	510	90.10
33	855	Schistes, Marno calcaire, marno-grés, pyélites	3	33.90	584	126.60
34	580	Schistes, Marno calcaire, marno-grés, pyélites	3	37.20	586	127.60
35	150	Schistes, Marno calcaire, marno-grés, pyélites	3	49.50	507	88.70
36	213	Schistes, Marno calcaire, marno-grés, pyélites	3	48.50	480	76.50
37	22	Schistes, Marno calcaire, marno-grés, pyélites	3	53.00	480	76.50
38	109	Calcaires, grés, micaschistes, granite, limon des plaines	4	44.30	478	75.60
39	16	Schistes, Marno calcaire, marno-grés, pyélites	3	53.10	480	76.50
40	119	Calcaires, grés, micaschistes, granite, limon des plaines	4	45.60	480	76.50
41	144	Calcaires, grés, micaschistes, granite, limon des plaines	4	42.20	480	76.50
42	28	Schistes, Marno calcaire, marno-grés, pyélites	3	46.90	480	76.50

N° SBV	Surface (ha)	Domaine lithologique	Code	Pente moy	Précipitations (mm)	Ruissellement (mm)
43	50	Schistes, Marno calcaire, marno-grés, pyélites	3	64.30	490	80.90
45	1027	Calcaires, grés, micaschistes, granite, limon des plaines	4	32.60	602	136.10
46	1031	Schistes, Marno calcaire, marno-grés, pyélites	3	31.50	621	146.30
47	2405	Schistes, Marno calcaire, marno-grés, pyélites	3	24.10	620	145.80
48	1016	Schistes, Marno calcaire, marno-grés, pyélites	3	25.30	513	93.40
49	222	Calcaires, grés, micaschistes, granite, limon des plaines	4	48.00	530	99.60
50	156	Schistes, Marno calcaire, marno-grés, pyélites	3	35.80	500	85.50
51	35	Schistes, Marno calcaire, marno-grés, pyélites	3	32.50	505	87.80
52	109	Schistes, Marno calcaire, marno-grés, pyélites	3	42.10	528	98.60
53	409	Calcaires, grés, micaschistes, granite, limon des plaines	4	39.60	613	142.00
54	605	Calcaires, grés, micaschistes, granite, limon des plaines	4	32.70	605	137.70
55	160	Schistes, Marno calcaire, marno-grés, pyélites	3	48.20	510	90.10
56	324	Schistes, Marno calcaire, marno-grés, pyélites	3	53.90	530	99.60
57	141	Schistes, Marno calcaire, marno-grés, pyélites	3	49.80	530	99.60
58	545	Schistes, Marno calcaire, marno-grés, pyélites	3	23.60	553	110.80
59	1460	Schistes, Marno calcaire, marno-grés, pyélites	3	25.10	647	160.80
60	149	Schistes, Marno calcaire, marno-grés, pyélites	3	37.50	533	101.00
61	72	Schistes, Marno calcaire, marno-grés, pyélites	3	43.70	530	99.60
62	83	Schistes, Marno calcaire, marno-grés, pyélites	3	49.10	530	99.60
63	45	Schistes, Marno calcaire, marno-grés, pyélites	3	44.70	530	99.60
64	246	Schistes, Marno calcaire, marno-grés, pyélites	3	30.10	530	99.60
65	144	Schistes, Marno calcaire, marno-grés, pyélites	3	37.10	530	99.60
66	151	Schistes, Marno calcaire, marno-grés, pyélites	3	35.40	530	99.60
67	109	Schistes, Marno calcaire, marno-grés, pyélites	3	45.80	530	99.60
68	176	Schistes, Marno calcaire, marno-grés, pyélites	3	38.00	505	87.80
69	89	Schistes, Marno calcaire, marno-grés, pyélites	3	44.20	505	87.80
70	353	Schistes, Marno calcaire, marno-grés, pyélites	3	30.20	530	99.60
71	158	Schistes, Marno calcaire, marno-grés, pyélites	3	51.20	530	99.60
72	446	Schistes, Marno calcaire, marno-grés, pyélites	3	36.80	605	137.70
73	3484	Schistes, Marno calcaire, marno-grés, pyélites	3	26.40	607	138.70
74	179	Schistes, Marno calcaire, marno-grés, pyélites	3	32.30	530	99.60
75	386	Schistes, Marno calcaire, marno-grés, pyélites	3	27.10	530	99.60
76	197	Schistes, Marno calcaire, marno-grés, pyélites	3	26.30	530	99.60
77	87	Schistes, Marno calcaire, marno-grés, pyélites	3	50.00	530	99.60
78	380	Schistes, Marno calcaire, marno-grés, pyélites	3	28.30	530	99.60
79	123	Schistes, Marno calcaire, marno-grés, pyélites	3	37.70	530	99.60
80	177	Schistes, Marno calcaire, marno-grés, pyélites	3	34.30	530	99.60
81	4437	Calcaires, grés, micaschistes, granite, limon des plaines	4	25.30	654	164.70
82	413	Schistes, Marno calcaire, marno-grés, pyélites	3	38.10	596	132.90
83	1416	Schistes, Marno calcaire, marno-grés, pyélites	3	32.30	625	148.50
84	3518	Schistes, Marno calcaire, marno-grés, pyélites	3	16.20	600	135.00

Tab 22 : liste des sous bassins versants et leurs caractéristiques

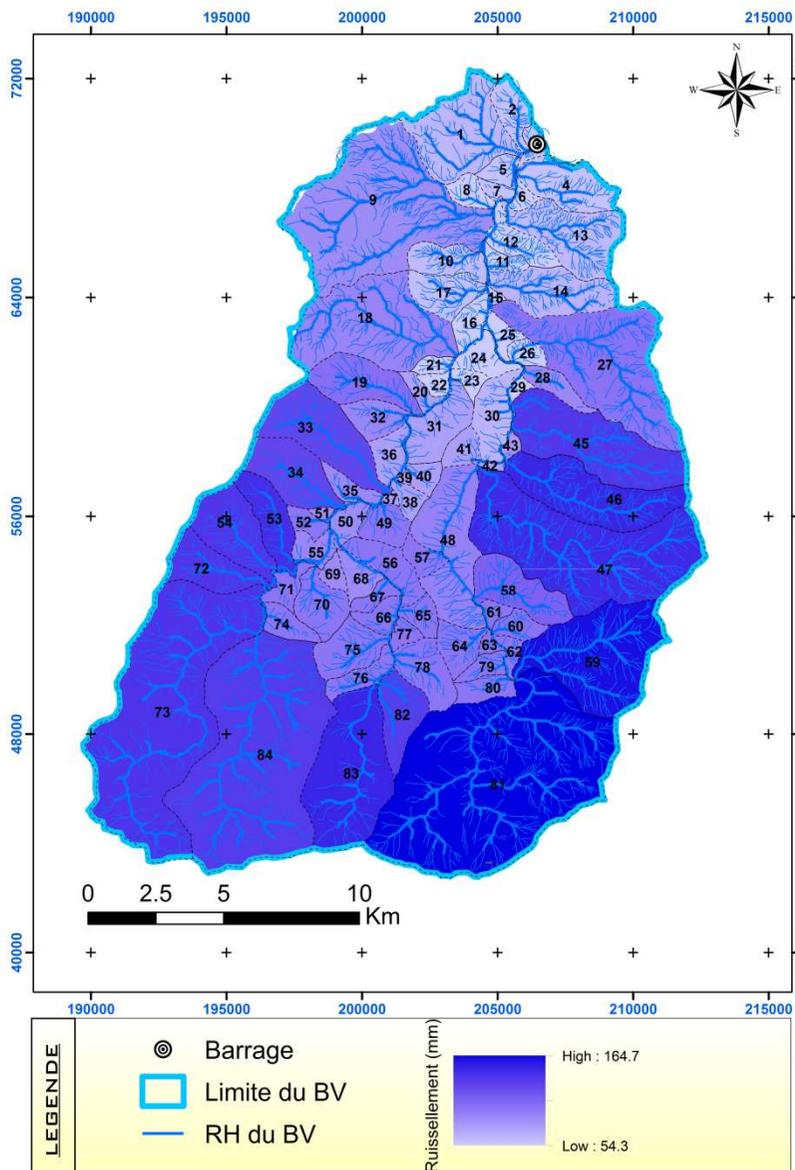


Fig.44 : carte des ruissellemets par sous bassin

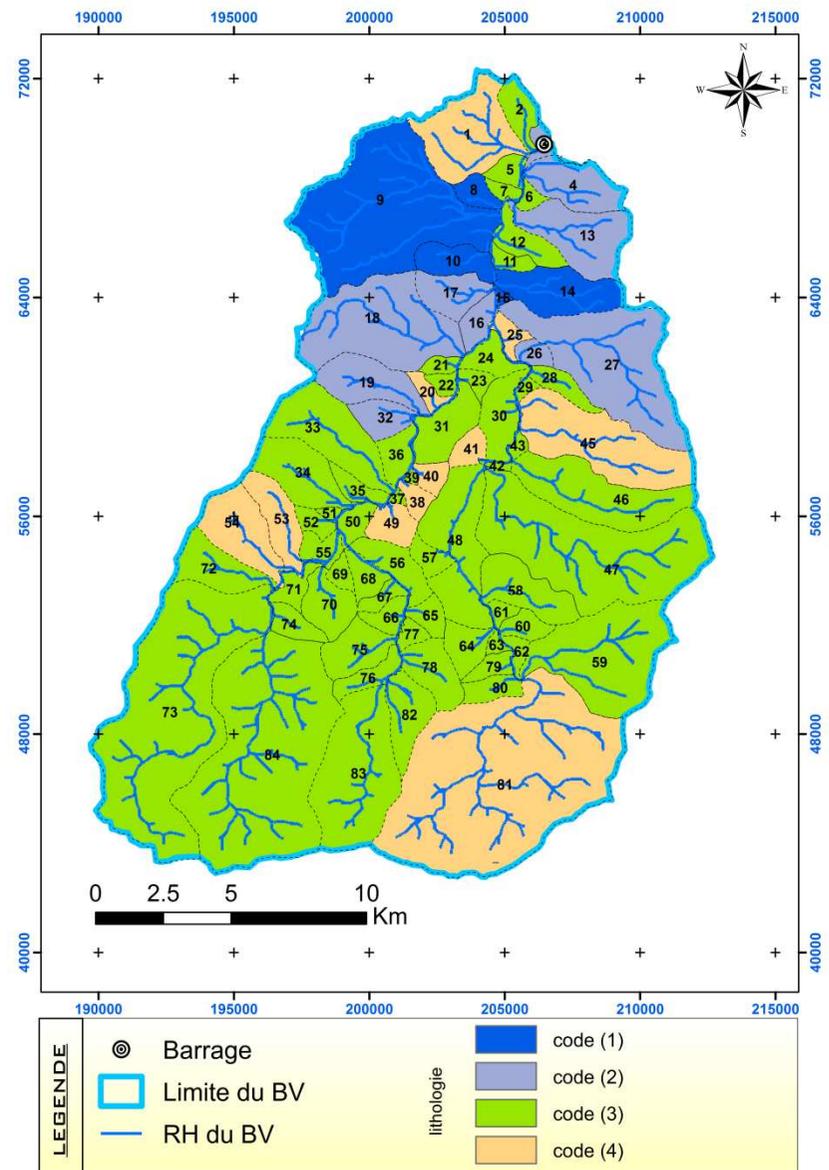


Fig.45 : carte lithologique par sous bassins

III- LA TURBIDITE

La turbidité T est calculée à partir des équations du *tableau 23* en connaissant la quantité d'eau ruisselée et le type de lithologie déjà estimée dans le *tableau 25*.

Type de lithologie	Relation entre les apports solides et liquides
Marnes	$\text{LogT} = 0.0039 \log Q + 1.465$
Marno schistes	$\text{LogT} = -0.474 \log Q + 2.15$
Schistes, Marno calcaires, marno-grès, pélites	$\text{LogT} = -0.19 \log Q + 1.24$
Calcaires, grès, micaschistes, granit, limon des plaines	$\text{LogT} = -0.5 \log Q + 1.215$

Tab 23 : Différentes corrélations élaborées par Heush entre les apports solides en sédiments et ceux liquides aux niveaux des BV

Avec :

T : turbidité moyenne annuelle en gramme/litre

Q : lame d'eau écoulée en mm

L'application de ces corrélations au niveau des sous bassins versants d' Assif El Mal, après estimation des lames d'eau écoulées et détermination de leur dominance de point de vue du type lithologique, nous a permis d'estimer la contribution à l'envasement moyenne annuelle des sous bassins versants d' Assif El Mal *Tableau 24*.

N° sous BV	Surface (ha)	Domaine lithologique	Ruissellement (mm)	Turbidité (g/l)	Erosion (t/ha/an)	Erosion (t/an)
1	929	4	65.10	2.02	1.23	1142.67
2	251	3	59.30	8.00	4.74	1189.74
3	187	2	59.30	20.32	12.04	2251.48
4	543	2	60.10	20.28	12.19	6619.17
5	130	3	59.30	8.00	4.74	616.2
6	70	3	55.10	8.11	4.47	312.9
7	67	3	59.30	8.00	4.74	317.58
8	146	1	54.30	29.63	16.09	2349.14
9	2599	1	85.50	29.68	25.38	65962.6
10	309	1	62.20	29.64	18.43	5694.87
11	103	3	55.10	8.11	4.47	460.41
12	273	3	55.10	8.11	4.47	1220.31
13	761	2	63.50	19.75	12.53	9535.33
14	630	1	66.90	29.65	19.82	12486.6
15	24	1	55.10	29.70	16.34	392.16
16	185	2	55.10	18.83	10.38	1920.3
17	341	2	60.50	20.20	12.22	4167.02
18	1476	2	91.50	16.60	15.19	22420.4
19	530	2	103.90	15.62	16.24	8607.2
20	101	4	76.50	1.87	1.43	144.43
21	82	3	55.10	8.11	4.47	366.54
22	81	3	55.10	8.11	4.47	362.07
23	86	3	55.10	8.11	4.47	384.42
24	209	3	55.10	8.11	4.46	932.14
25	120	4	55.10	2.21	1.22	146.4
26	111	2	55.10	18.83	10.38	1152.18
27	1764	2	100.60	15.92	16.01	28241.6
28	181	3	88.70	7.41	6.57	1189.17
29	49	3	55.10	8.11	4.46	218.54
30	379	3	66.90	7.82	5.23	1982.17
31	435	3	76.50	7.62	5.83	2536.05
32	251	2	90.10	16.73	15.08	3785.08
33	855	3	126.60	6.92	8.76	7489.8
34	580	3	127.60	6.91	8.82	5115.6
35	150	3	88.70	7.41	6.57	985.5
36	213	3	76.50	7.62	5.83	1241.79
37	22	3	76.50	7.62	5.83	128.26
38	109	4	75.60	1.88	1.42	154.78
39	16	3	76.50	7.62	5.83	93.28
40	119	4	76.50	1.87	1.43	170.17
41	144	4	76.50	1.87	1.43	205.92
42	28	3	76.50	7.62	5.83	163.24

N° sous BV	Surface (ha)	Domaine lithologique	Ruissellement (mm)	Turbidité (g/l)	Erosion (t/ha/an)	Erosion (t/an)
43	50	3	80.90	7.54	6.10	305
45	1027	4	136.10	1.40	6.38	6552.26
46	1031	3	146.30	6.73	1.90	1958.9
47	2405	3	145.80	6.74	9.85	23689.3
48	1016	3	93.40	7.33	9.82	9977.12
49	222	4	99.60	1.64	6.85	1520.7
50	156	3	85.50	7.46	1.63	254.28
51	35	3	87.80	7.39	6.38	223.3
52	109	3	98.60	7.26	6.49	707.41
53	409	4	142.00	1.37	7.16	2928.44
54	605	4	137.70	1.42	1.94	1173.7
55	160	3	90.10	7.38	1.95	312
56	324	3	99.60	7.24	6.65	2154.6
57	141	3	99.60	7.24	7.21	1016.61
58	545	3	110.80	7.10	7.21	3929.45
59	1460	3	160.80	6.61	7.87	11490.2
60	149	3	101.00	7.23	10.63	1583.87
61	72	3	99.60	7.24	7.31	526.32
62	83	3	99.60	7.24	7.21	598.43
63	45	3	99.60	7.24	7.21	324.45
64	246	3	99.60	7.24	7.21	1773.66
65	144	3	99.60	7.24	7.21	1038.24
66	151	3	99.60	7.24	7.21	1088.71
67	109	3	99.60	7.24	7.21	785.89
68	176	3	87.80	7.39	6.49	1142.24
69	89	3	87.80	7.39	6.49	577.61
70	353	3	99.60	7.24	7.21	2545.13
71	158	3	99.60	7.24	7.21	1139.18
72	446	3	137.70	6.70	9.22	4112.12
73	3484	3	138.70	6.80	9.43	32854.1
74	179	3	99.60	7.24	7.21	1290.59
75	386	3	99.60	7.24	7.21	2783.06
76	197	3	99.60	7.24	7.21	1420.37
77	87	3	99.60	7.24	7.21	627.27
78	380	3	99.60	7.24	7.21	2739.8
79	123	3	99.60	7.24	7.21	886.83
80	177	3	99.60	7.24	7.21	1276.17
81	4437	4	164.70	1.27	2.09	9273.33
82	413	3	132.90	6.86	9.12	3766.56
83	1416	3	148.50	6.70	9.94	14075
84	3518	3	135.00	6.84	9.23	32471.1

Tab 24 : liste des sous bassins versants et leurs taux d'érosion

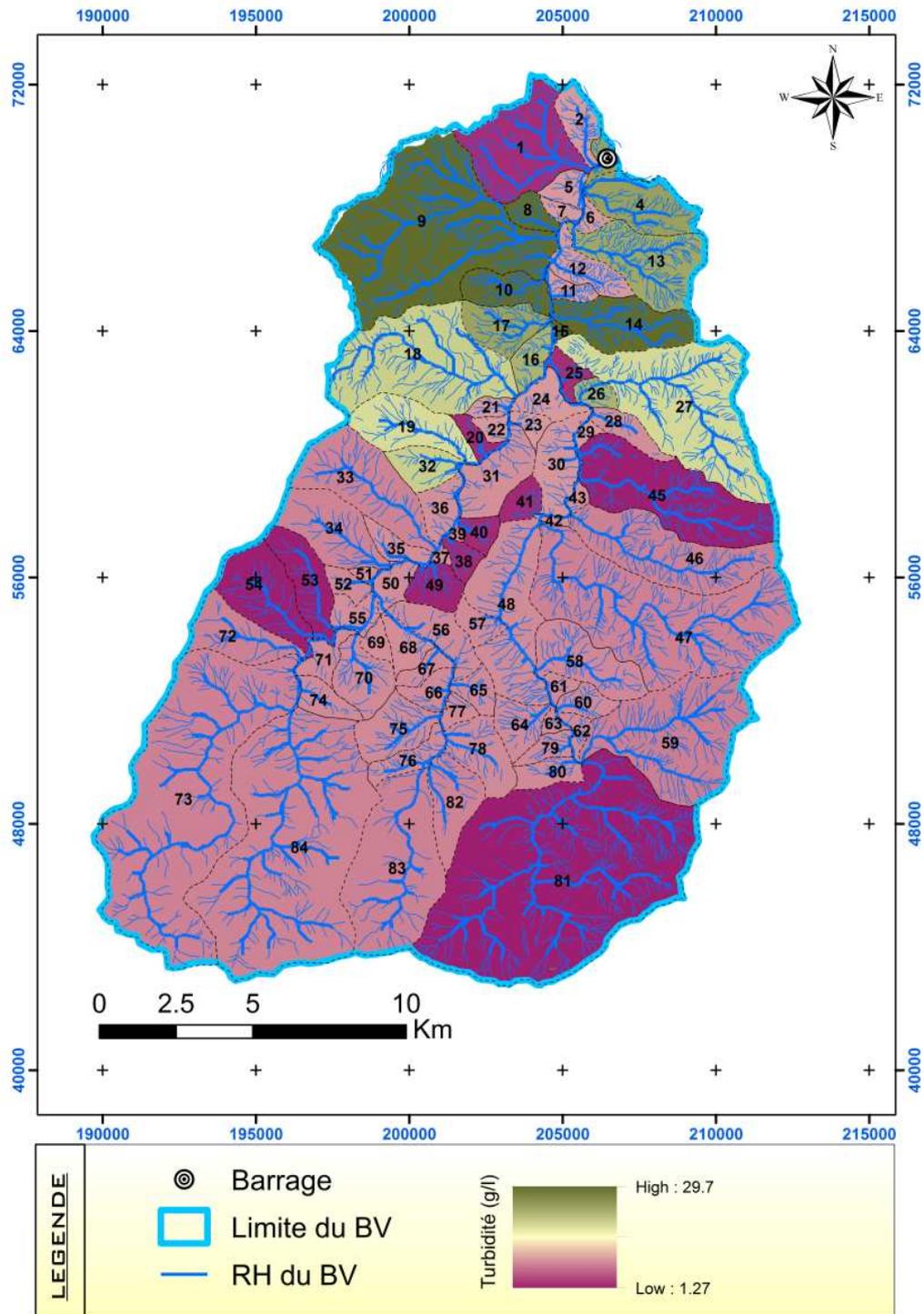


Fig.46 : Carte de turbidité par sous bassin

La **Figure 46** présente la répartition spatiale de la turbidité, selon la méthode de Heusch, que les sédiments transportés par suspension. Sur la base de cette estimation,

IV- CONCLUSION : EROSION POTENTIELLE

Le classement de la contribution à l'envasement selon la méthode de Heusch est exprimé en t/ha/an (**Figure 47**), dimension qui exprime le potentiel de génération des sédiments des sous bassins. Le maximum est de 25,38 t/ha/an pour le sous bassin 9, alors que le minimum est de 1,32 t/ha/an observée au niveau du sous bassin 1 alors que la moyenne est de 9,34 t/ha/an.

Le volume total des sédiments délivrés par les 84 sous bassin versants est de 398 348,88 t/an

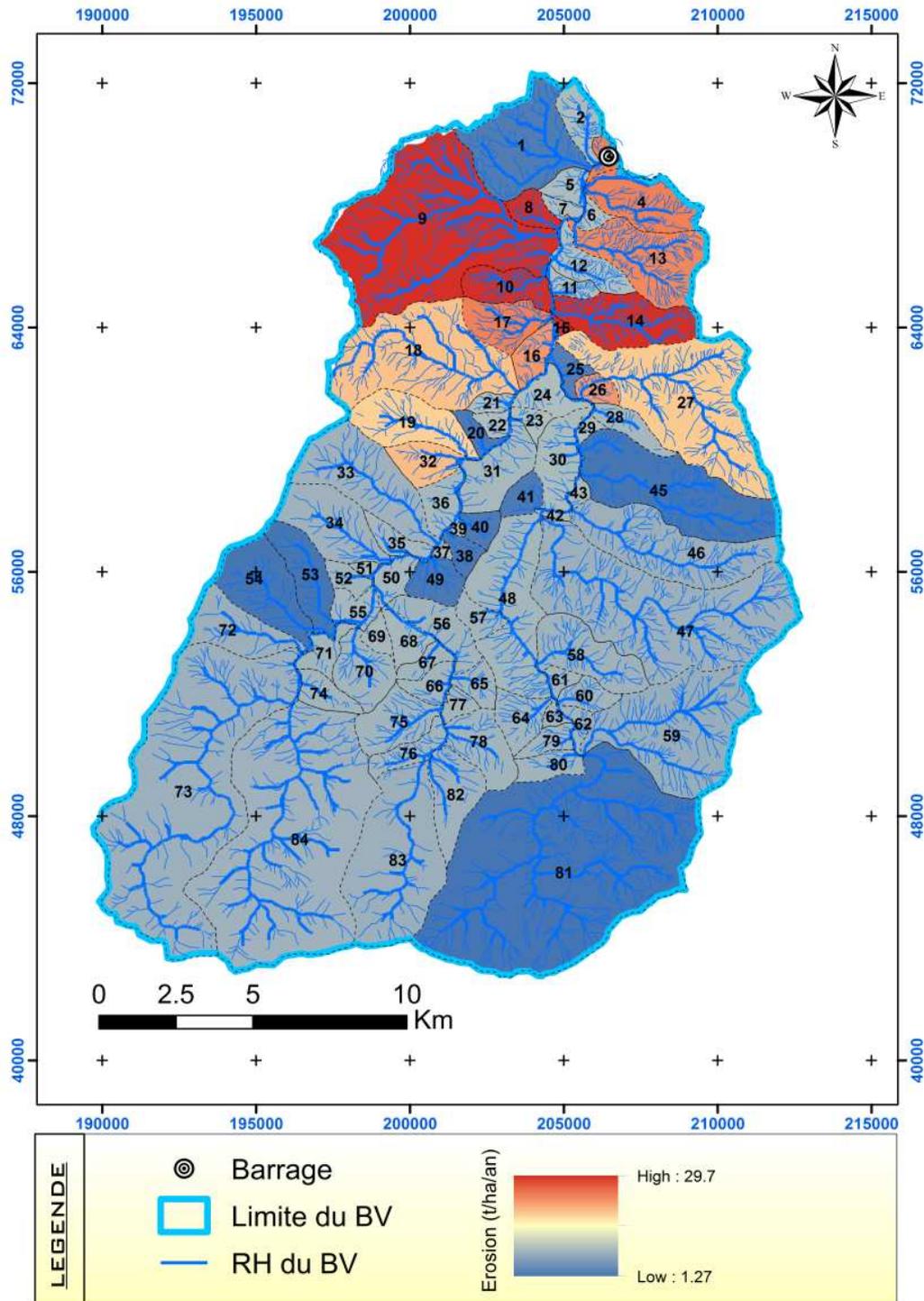


Fig.47.: Carte d'érosion par sous bassin

CHAPITRE 7

DISCUSSION ET INTERPRETATIONS

1- COMPARAISON DES RESULTATS OBTENUS PAR HEUSCH ET USLE

Selon le modèle USLE, la répartition des classes de pertes en terre dans le bassin versant d'Assif El Mal est résumée dans *le tableau 25* :

Erosion Potentielle t/ha/an	Intensité	S (Km ²)	% par rapport au BV
0 _ 2	Faible	75.94	18%
2 _ 5	Modérée	98.88	23%
5 _ 20	Forte	208.18	49%
20 _ 50	Très forte	36.06	8%
>50	Extrêmement forte	5.93	1%

Tab 25: répartition des classes de l'érosion potentielle (USLE)

Nous constatons que 18% du bassin versant présente une faible perte en terre (inférieur à 2t/ha/an). Il s'agit en grande partie des zones à proximité des oueds où on a des terres plates à très faible pente (5 à 7°) et des terrains irrigués (végétation dense) qui maintient le sol et qui présentent donc une forte résistance à l'érosion. Cependant, près de 58% de la superficie du bassin versant présente des taux d'érosion importants, supérieures à 5t/ha/an. Ce sont des zones à matériaux friables dénudées de végétation avec des terres accidentés (60°) ; elles se localisent dans la partie Sud, Nord-est et Nord-ouest du bassin versant (*Figure 48*)

La majorité de la superficie qui se trouve au Nord, non loin de la retenue du barrage de Taskourt, est exposée à une forte érosion potentielle. Cette exposition très forte à l'érosion génère une grande production de sédiments participant de façon directe au risque d'envasement. La proximité de cette zone au barrage participe aussi à l'envasement du fait que les sédiments érodés ne se déposent nulle part autre que dans la retenue.

La valeur maximale de l'érosion potentielle est de 679 t/ha/an, c'est-à-dire que l'intensité d'érosion est extrêmement forte. La valeur minimale d'érosion est de 0 t/ha/an. La moyenne de l'érosion potentielle calculée est estimée à **9.38 t/ha/an**.

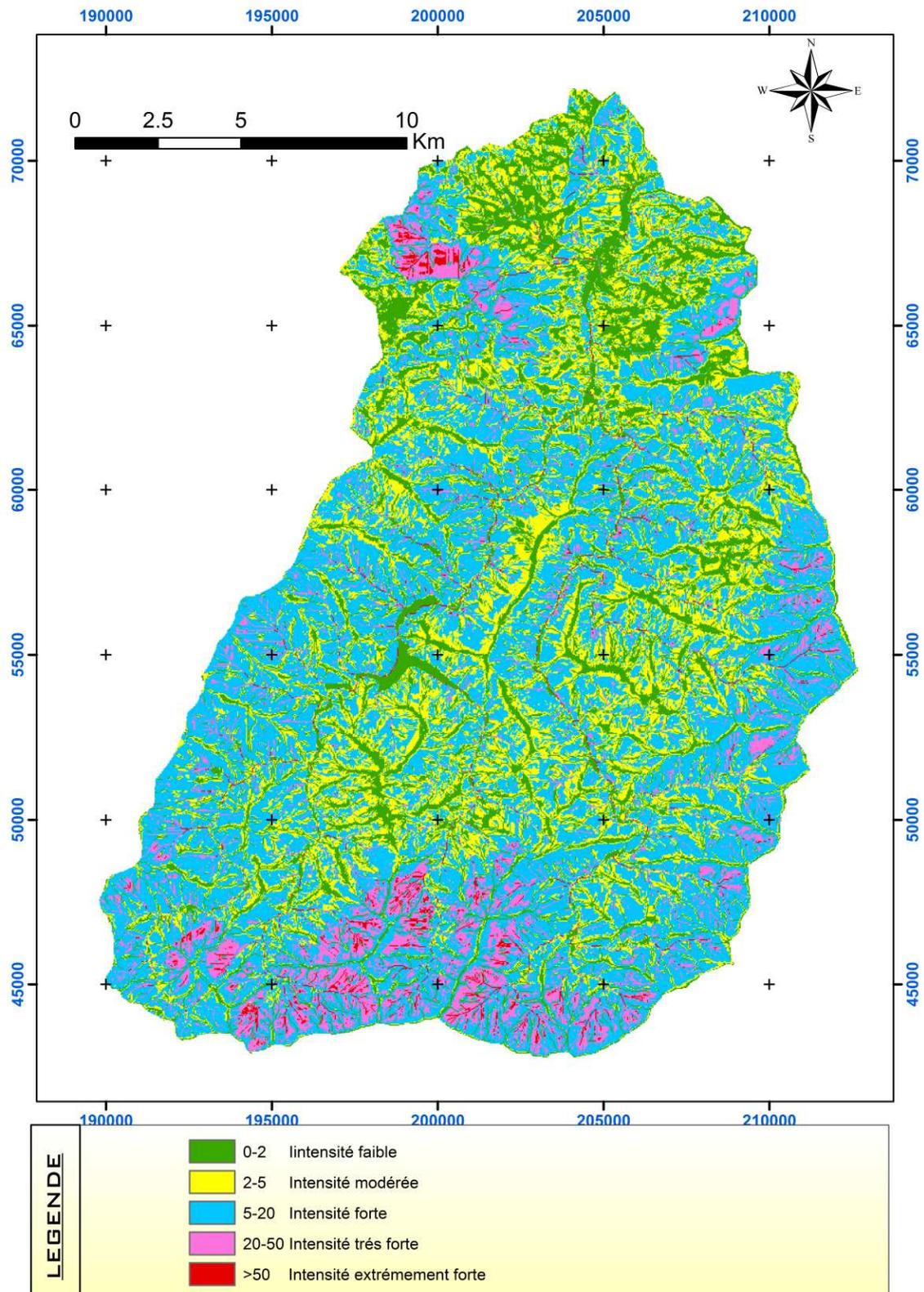


Fig 48: Carte des classes de l'érosion potentielle (USLE)

Selon le modèle de Heusch, la répartition des classes de pertes en terre dans le bassin versant d'Assif El Mal (**Tableau 26**) est comme suit :

Erosion Potentielle t/ha/an	Intensité	S (Km ²)	% par rapport au BV
0 _ 2	Faible	74.18	17%
2 _ 5	Modérée	10.53	3%
5 _ 20	Forte	294.13	69%
20 _ 50	Très forte	46.16	11%
>50	Extrêmement forte	0	0%

Tab 26 : répartition des classes de l'érosion potentielle (HEUSCH)

Nous constatons d'après la **figure 49 et le tableau 26** que 17% du bassin versant présente une faible perte en terre (inférieur à 2t/ha/an). Il s'agit en grande partie des zones à lithologie dure résistante à l'érosion. Ces zones sont représentés par les sous bassin 20, 38, 40, 41, 45, 49, 53, 54, 81.

Près de 80% de la superficie du bassin versant présente des taux d'érosion importants, supérieures à 5t/ha/an. Ce sont des zones à lithologie friables avec des terres accidentés (60°) ; elles se localisent dans la partie Nord-est et Nord-ouest du bassin versant, les sous bassin versants 3, 4, 8, 9, 10, 14, 17 sont considérés comme très vulnérables avec une érosion potentielle de 20-50 t/ha/an.

La majorité de la superficie qui se trouve au Nord, non loin de la retenue du barrage de Taskourt, est exposée à une forte érosion potentielle. Cette exposition très forte à l'érosion génère une grande production de sédiments participant de façon directe au risque d'envasement. La proximité de cette zone au barrage participe aussi à l'envasement du fait que les sédiments érodés ne se déposent nulle part autre que dans la retenue.

Dans la zone étudiée, la valeur maximale de l'érosion potentielle est de 29.7 t/ha/an, c'est-à-dire que l'intensité d'érosion est extrêmement forte. La valeur minimale d'érosion est 1.27 t/ha/an. La moyenne calculée de l'érosion potentielle est de **9.34 t/ha/an**.

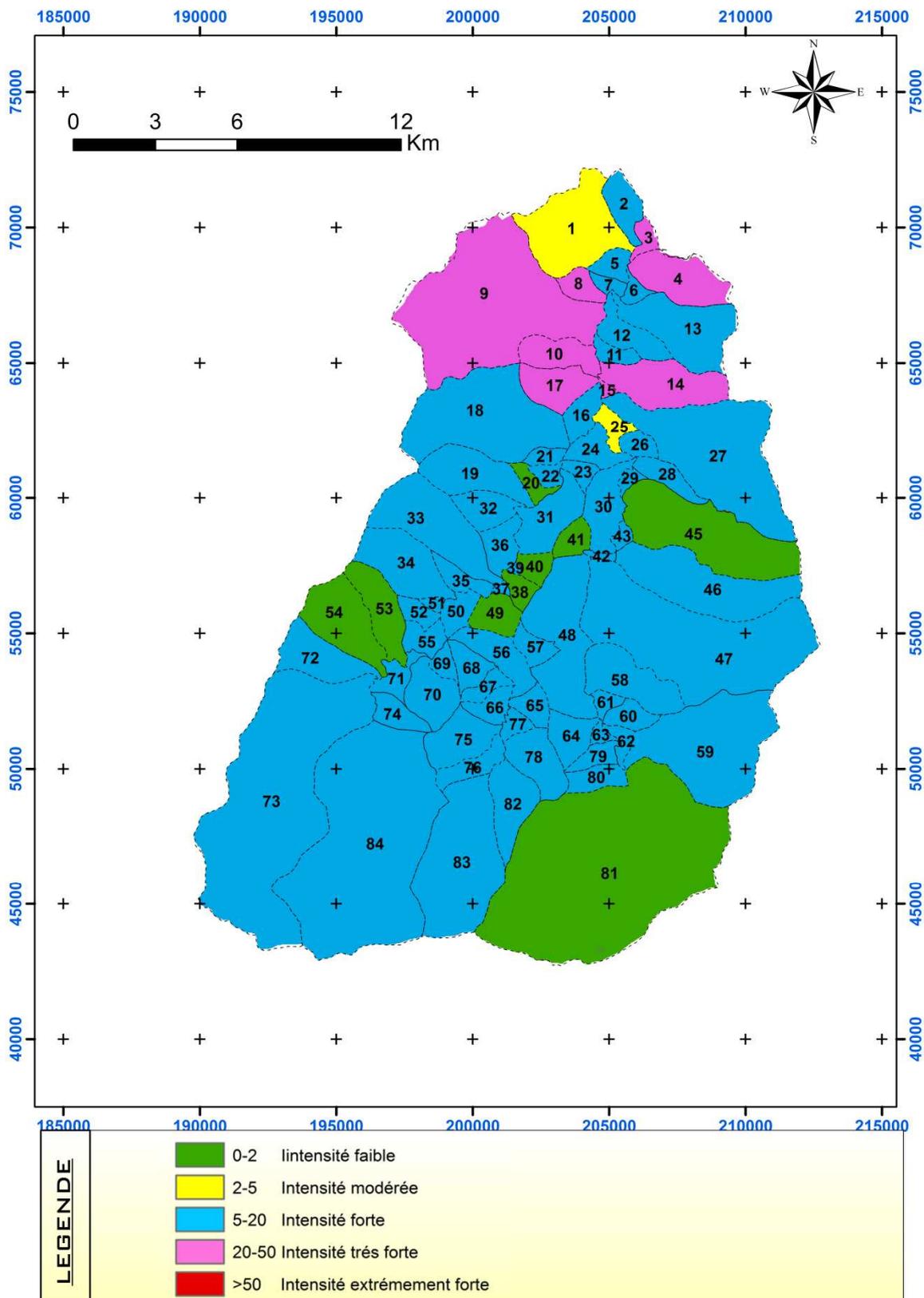


Fig. 49 : Carte des classes de l'érosion potentielle (HEUSCH)

Pour conclure, la comparaison entre les deux cartes montre plusieurs ressemblances dans les résultats de l'érosivité représentés par les deux méthodes, sauf au niveau de la partie Sud et la partie centrale du bassin versant, où les résultats sont plus au moins différents.

Dans la partie sud, la carte réalisée par le modèle de Wischmeier représente des valeurs d'érosion potentielle très élevées (>20 t/ha/an). Ceci est expliqué par la présence d'une agressivité climatique est très importante vue que la zone est caractérisée par des reliefs à haute altitude. Dans la carte réalisée par le modèle de Heusch, les valeurs d'érosion potentielle sont moins fortes vue que ce modèle ne tient pas compte de l'agressivité climatique.

Pour la partie centrale du bassin versant, le modèle de Wischmeier montre des valeurs faibles dans les rives des fleuves (<5 t/ha/an), cette faiblesse est expliquée par la présence d'un couvert végétal plus au moins dense. Le modèle de Heusch par contre, montre dans cette même partie du bassin versant des valeurs plus fortes, vu que cette méthode ne donne pas beaucoup d'importance au facteur de la végétation (Tableau27).

	Méthode de HEUSCH	Méthode de USLE
Erosion moyenne	9.34	9.38
Erosion min	1.27	0
Erosion max	29.7	679
Précision	sous bassin versant	Chaque 30m (résolution)
Ecart type	faible	fort
Endroits représentant le plus grand risque	Nord-est, Nord-ouest	Sud, Nord-est, Nord-ouest

Tab 27 : récapitulation de la différence entre le modèle de HEUSCH et d' USLE

II- AVANTAGES ET INCONVENIENTS DES DEUX MODELES

II-1-Avantages

II-1-1-Modèles d'USLE

Le modèle de Wischmeier est un modèle pratique qui convient à l'esprit d'un chercheur qui, avec peu de données, est obligé de chercher des solutions raisonnables à des problèmes pratiques, de façon moins empiriques que jusqu'alors.

Cette méthode fait intervenir les principaux facteurs contribuant à l'érosion :

- L'agressivité climatique
- Le couvert végétal
- L'érodabilité des sols
- La pente et sa longueur

II-1-2-Le modèle de Heusch

Le modèle de Heusch est un modèle pratique et expérimental simple qui ne demande pas beaucoup de temps ni beaucoup de données. En effet, Celui-ci permet avec peu de données de faire une estimation des taux d'érosion par sous bassin versants.

Ce modèle permet aussi de donner une estimation globale de la dégradation spécifique en tenant compte des différents types d'érosion. (Érosion en nappe, sapement de berges, ravinement...)

Cette méthode représente une corrélation entre les deux principaux facteurs contribuant à l'érosion :

- Type de lithologie
- Apports liquides par sous bassin

Il est aussi nécessaire de noter que la méthode de Heusch utilise les sous bassins versant comme unité de base, ce qui rend plus facile de déterminer les sous bassins versants prioritaires qui demandent des interventions.

II-2-Faiblesses

II-2-1-Le modèle de Heush

Le modèle de Heusch n'est pas d'une très grande précision parce qu'il donne des taux d'érosion à l'échelle de sous bassin versant. Celui-ci ne donne pas non plus beaucoup d'importance à l'agressivité climatique, au couvert végétal, à l'effet de battance et aux pratiques de lutte antiérosifs malgré que ces facteurs peuvent jouer un rôle décisif dans certains cas.

Il est remarquable aussi que ce modèle donne beaucoup plus d'importance à la lithologie et moins d'importance au facteur de sol et ses caractéristiques (la matière organique, sa texture et sa structure).

II-2-2-Le modèle d'USLE

L'équation universelle des pertes de sol n'év²²alue que les pertes moyennes à long terme causées par l'érosion de surface (pluie et ruissellement). Elle ne tient pas compte des autres types d'érosion autre que l'érosion en nappe (ravinement, érosion en rigole, érosion en badlands, Sapement des berges). Celle-ci n'est pas conçue pour prédire les pertes de sol hors des champs. Elle ne peut pas prédire les pertes de sol d'une année particulière, d'une saison particulière ou d'un orage particulier. Mais elle peut prédire la moyenne normale à long terme pour des années semblables, pour des saisons semblables ou des orages semblables. Beaucoup d'autres variables secondaires peuvent influencer les pertes de sol à court terme, mais leurs effets tendent à s'annuler à long terme.

Il est utile de rappeler que l'utilisation du modèle Wischmeier dans telle région de moyenne et de haute montagne caractérisée par une topographie très accidentée et l'hétérogénéité du milieu entraîne parfois des anomalies de quantification des pertes en terre.

En effet, le modèle de Wischmeier est conçu pour des parcelles agricoles homogènes, mais pour son utilisation en dehors des terrains agricoles, cette équation doit être adaptée aux conditions des milieux par l'étalonnage des différents facteurs d'érosion et plus particulièrement les facteurs K et C.

Ce modèle est basé sur des données provenant de petites parcelles (100 m²), des champs ou des bassins versants de surface très limitée (quelques hectares): il se pose donc des problèmes d'échelle lorsqu'on tente de prévoir des valeurs régionales d'érosion et surtout, de transport solides sur de vastes bassins versants concernés par des aménagements hydrauliques craignant l'envasement.

Enfin, ce modèle néglige les interactions entre les différents facteurs. Or, ces interactions se sont avérées très nombreuses à l'analyse des résultats. Ainsi, on a observé une grande différence de réaction de sol à l'agressivité des pluies en fonction de la pente, selon que le sol est argileux (rigoles) ou sableux (nappes) et selon l'état de surface du sol (rugosité due aux façons culturales, humidité préalable du sol, gestion des résidus de culture).

III-VALIDITE DES MODELES UTILISEES :

L'équation universelle de perte de sol (USLE) est un modèle empirique qui estime l'érosion nette. L'USLE a été développé pour prévoir la perte annuelle moyenne de sol provoquée par érosion de ruisseau d'un élément de pente de colline. Il n'a pas été créé pour considérer le dépôt ou pour conduire le sédiment d'un élément de pente de colline. Dans des lignes de partage relativement grandes, seulement une fraction du sol qui est érodé des pentes de colline atteindra le débouché du système. Cette fraction ou partie de sédiment qui est disponible pour la livraison est désignée sous le nom du rapport de la livraison de sédiment (RDS : sediment delivery ratio). Ce rapport peut être multiplié par le taux prévu d'érosion pour estimer les pour cent de matériel érodé qui atteindront le débouché de ligne de partage.

Le coefficient de délivrance est le facteur qui exprime la proportion des sédiments générés au niveau des versants qui arrive à l'exutoire du bassin versant (Barrage e Taskourt).

Ce coefficient SDR estimé selon la méthode de Shen et Julien (1993) et dont la formule figure ci-après, a été appliqué pour trouver les pertes en terre délivrées au niveau de l'exutoire :

$$\text{SDR} = 0.41 \times A^{-0.3}$$

Où :

SDR : coefficient de délivrance (%)

A : surface du bassin versant (Km²)

Pour notre cas (BV d'Assif El Mal) la surface était de 425Km², donc SDR égale à 7%.

On peut conclure que 93% des sédiments sont emprisonnés entre le champ et le débouché de du bassin versant, les sédiments qui n'arrivent pas à atteindre l'exutoire sont arrêtés dans les pièges à court terme et de long terme entre le point de génération et le débouché de ligne de partage.

Donc la valeur de la contribution à l'envasement du barrage CEB va représenter la moyenne trouvée A (données par l'équation universelle de Wischmeier) multipliées par le coefficient de délivrance (SDR) :

$$\text{CEB} = \text{SDR} \times A_{\text{moy}} = 7\% \times 9.38 \text{ soit } 0.7 \text{t/ha/an.}$$

Donc on peut conclure que la dégradation spécifique retenue pour le bassin versant d'Assif El Mal selon le modèle USLE est **0.7t/ha/an** et non pas 9.38 t/ha/an

Pour la méthode HEUSCH, comme on l'a déjà cité, les quatre corrélations expriment des concentrations solides transportées jusqu'à l'exutoire du bassin versant et donnent par conséquent la valeur de la contribution des sous bassins versants à l'envasement. D'où on doit garder la valeur moyenne calculée de 9.34t/ha/an.

Normalement, Il existe deux méthodes de validation alternatives indirectes :

- * Surveillance de la charge de sédiments dans les fleuves;
- * Mesure du dépôt de sédiments dans les lacs et les réservoirs.

Vu que le barrage de Taskourt vient d'être mis en service (date de mise en œuvre 2014/02/22) et vue que les stations de jaugeage et les appareils de mesure de la turbidité n'ont pas encore été installés, cela implique un manque très important de données. Ainsi l'étude de la fiabilité des méthodes utilisées dans le bassin versant d'Assif El Mal nous oblige à analyser la logique des deux cartes d'érosion potentielle et celle de leurs moyennes calculées.

En projetant les deux moyennes de la dégradation spécifique obtenue dans le bassin versant d'Assif Al Mal donnée par les deux modèles (9.34 et 0.7 t/ha/an) sur la carte du potentiel érosif à l'échelle du Maroc (étude d'aménagement des bassins versant et détermination des zones prioritaires 2014) (**Figure 50**), on constate que la valeur estimées par le modèle de Heusch se combine de façon approximative avec les données de la carte, alors que la valeur trouvé par la méthode de Wischmeier s'éloigne beaucoup avec les données de la carte.

Afin de confirmer la fiabilité des résultats estimés par les deux méthodes, il ne faudrait pas s'arrêter ici. En revenant aux avantages et inconvénients de chaque méthode on remarque que cette différence dans les résultats des deux méthodes est raisonnable car USLE, donne seulement les taux d'érosion au niveau de la surface (érosion en nappe), tandis que HEUSCH donne le taux d'érosion total (résultat des différentes sortes d'érosion).

Les deux méthodes HEUSCH et USLE peuvent être valides au niveau du bassin versant. La Méthode d'USLE, à travers le calcul du CEB, donne la dégradation spécifique générée par l'érosion en nappe. La méthode de HEUSCH donne la dégradation spécifique totale générée par les différentes formes de l'érosion ainsi que les zones prioritaires qui demandent une intervention. Enfin, ce que je propose plus pratique et raisonnable, c'est de combiner les deux méthodes Heusch et Wischmeier pour que chacune complémente les faiblesses de l'autre.

L'utilisation des deux cartes va nous permettre de déterminer la dégradation spécifique causée par l'érosion en nappe (carte A de Wischmeier), les autres types de dégradation spécifique autre que l'érosion en nappe (carte A de Wischmeier moins Carte de dégradation de Heusch) et la dégradation spécifique totale (carte de dégradation Heusch).

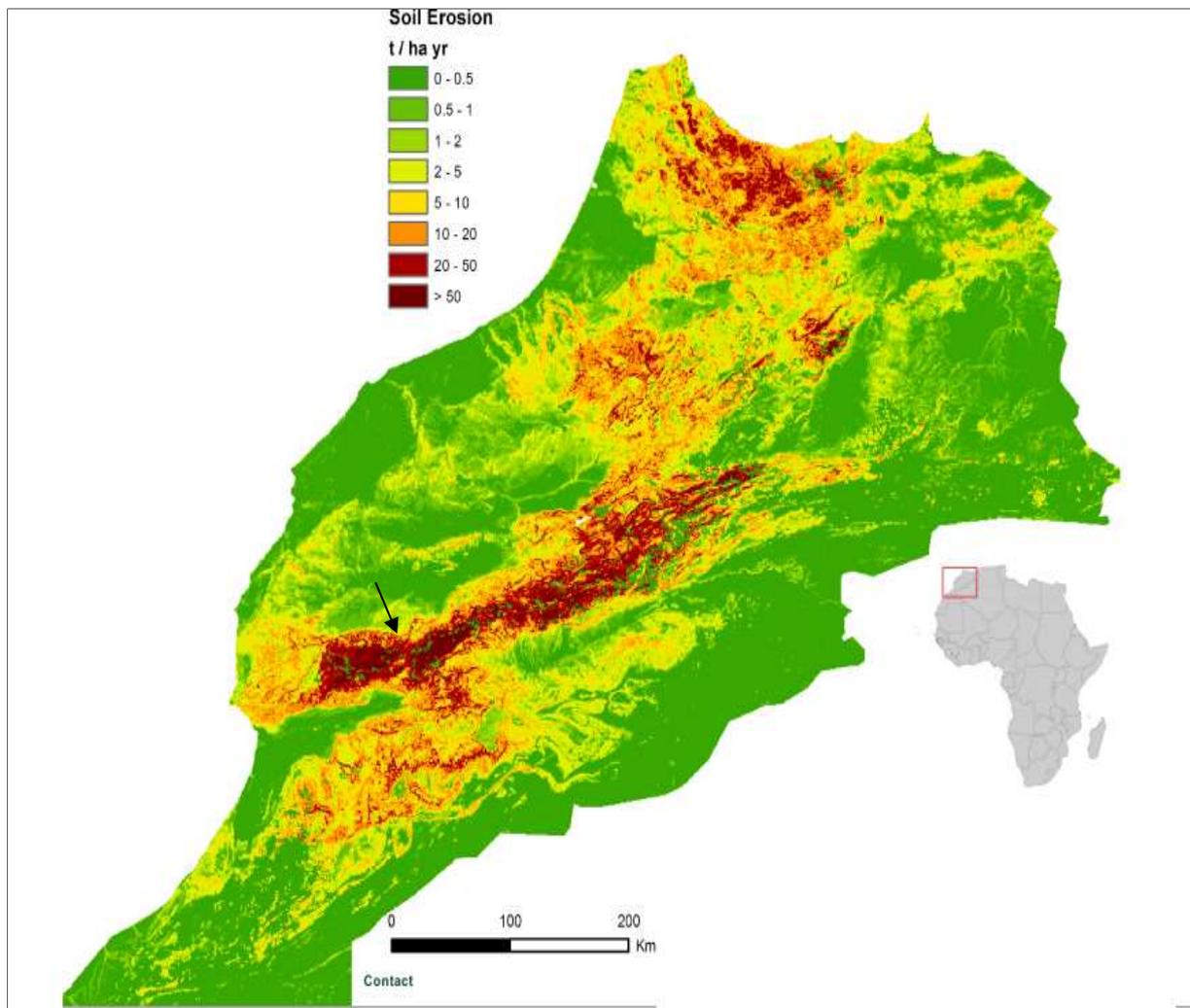


Fig. 50. : Carte générale de la dégradation du Nord du Maroc établie selon la méthode de Wischmeier

IV-ZONES PRIORITAIRES :

IV-1-Modèle de Heusch

La figure 49 montre la répartition de la production de sédiments par sous bassin, en prenant en considération le seuil critique généralisé au Maroc par la direction des eaux et forêts et de la lutte contre la désertification est de 12 t/ha/an (en dessous de ce seuil l'érosion ne nécessite pas l'intervention, au dessus il faut intervenir), on peut avancer que les sous bassins versants 4, 17, 13, 32, 18, 27, 8, 19, 15, 10, 14, 9 sont ceux qui demandent une assistance dans la restauration de la capacité hydrologique de leurs sols.

IV-2-Modèle de Wischmeier

La figure 48 montre la répartition de la production de sédiments par chaque 30m (résolution de la MNT), en prenant en considération le seuil critique généralisé de 12 t/ha/an, on peut avancer que la partie bassins versants sud, Nord-est et Nord-ouest sont ceux qui demandent une intervention.

IV-3-Conclusion des zones prioritaires en combinant les deux modèles

Les cartes qui spatialisent la distribution du potentiel de génération des sédiments, révèlent que :

- la plupart situés dans la zone aval du bassin versant se coïncident avec les sous bassins ayant une lithologie caractérisée par des roches tendres. Ces sous bassins sont en plus situés dans une zone proche de l'exutoire ; ce qui favorise leur transport jusqu'à la retenue du barrage.
- la zone amont se coïncide avec un relief très accidenté (érosion hydrique très forte).

V-PROGRAMME D'INTERVENTION

V-1-programme d'intervention prévu

La direction régionale des eaux et forêts et de la lutte contre la désertification a prévu un programme d'intervention au niveau du bassin versant d'Assif El Mal (*figure 51*) en vue de protéger la région contre la dégradation des sols de la région puisque c'est une zone agricole et aussi la augmentation de la durée du barrage installé ressemant à l'embouchure du bassin.

Le programme présenté dans le *tableau 28*, est celui qui rassemble la totalité des actions prévues. Sur le plan technique, c'est le programme qui assurera le maximum d'impact en matière d'action directe et indirecte sur l'atténuation des effets des processus érosifs.

Actions	Unit	Prix unitaire x 1000dhs	Total x 1000 dhs	% au coût total
1. Réhabilitation et reconstitution des zones forestières dégradées				
Reboisement d'enrichissement	Ha	7	5887	11.03
2. Embroussaillage	Ha	7	2026.5	3.80
3. Conservation des terres de cultures sur pentes				
Réhabilitation/réalisation murettes en pierres sèches	Ha	9	3442.5	6.45
Plantation arbres fruitiers	Ha	7	2677.5	5.02
haies vives (clôtures)	Ha	3.5	1338.75	2.51
4. Reboisement tampon	Ha	8	2400	4.50
5. Traitement du réseau hydrographique				
i, correction mécanique				
seuils maçonnerie	M3	0.4	4200	7.87
seuils en gabions	M3	0.5	6250	11.71
seuils filtrants	M3	0.2	1700	3.18
seuils en pierres sèches	M3	0.15	1650	3.09
ii, végétalisation des ravins et des badlands	Ha	7	9696.75	18.16
6. Réhabilitation des terrasses irriguées				
Réhabilitation des terrasses irriguées	Ha	5	1615	3.03
Réhabilitation d'arbres fruitiers	Ha	8	2584	4.84
7. Fournitures de plants				
forestier	Plants	0.002	4834	9.06
fruitier	Plants	0.01	800	1.50
8. Mesures d'appui	Douars	20	200	0.37
9. Infrastructures et équipements				
Réhabilitation des pistes	Km	40	1600	3.00
Aménagement des points d'eau (sources)	Unité	20	120	0.22
Aménagement des seguias	Km	80	240	0.45
Distribution de ruchers	Unité	1.2	120	0.22
Total global			53382	100

Tab 28. Les actions prévues pour la protection du bassin contre la dégradation du sol

La *figure 52* résume l'ensemble des interventions prévues selon la DREF.

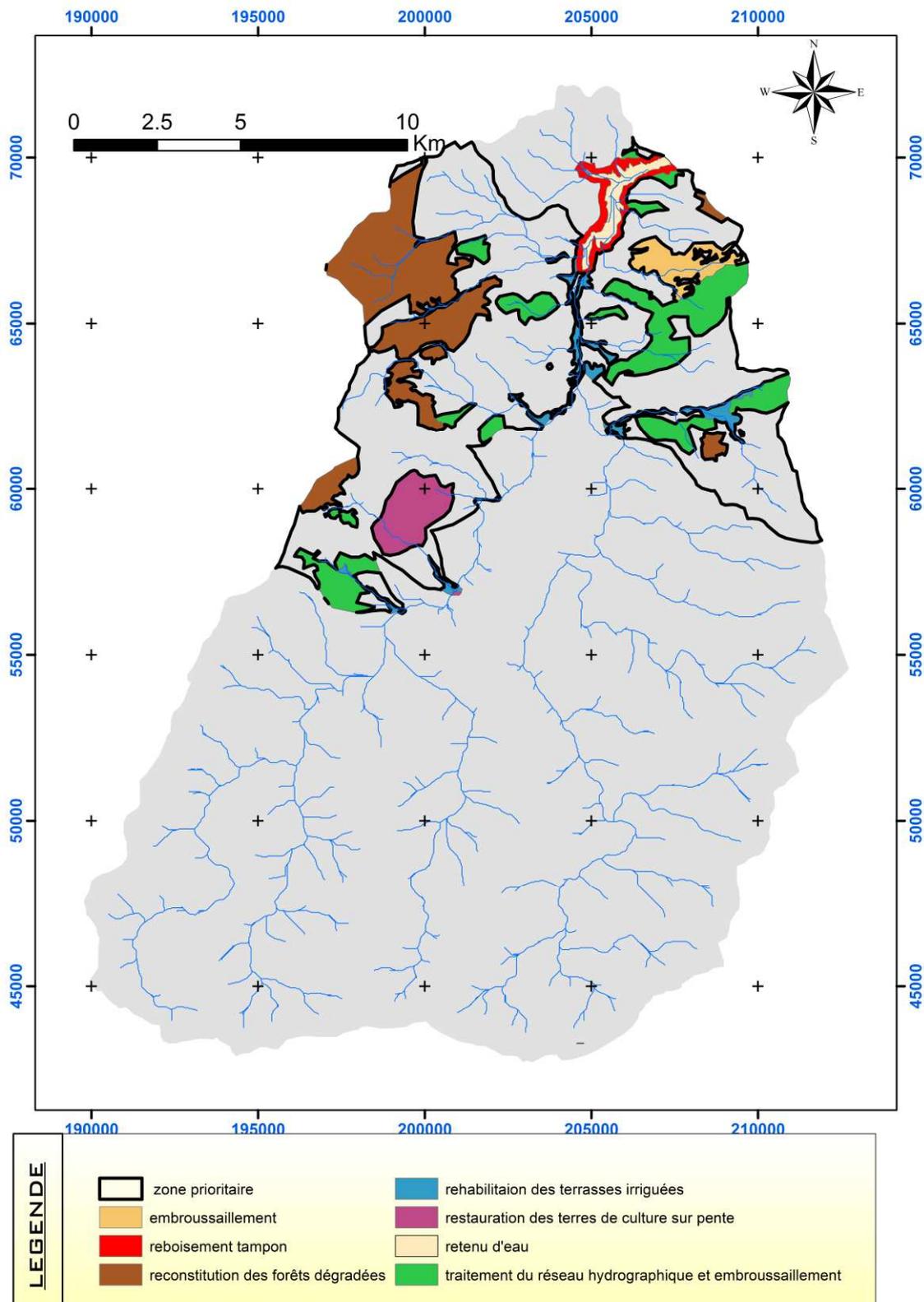


Fig.51: les différentes interventions prévues et leurs natures

V-1-programme d'intervention proposé :

D'après la figure 51 on peut constater que le programme prévu d'intervention précise la zone Nord là où il y a des roches tendres comme étant la zone qui demande une intervention par l'installation de nombreux aménagements (embroussaillage, reboisement tampon, reconstitution des forêts dégradées...),

En se basant sur l'étude faite à travers la méthode de Heusch et de Wischmeier, j'affirme que les interventions proposées par la DREF restent raisonnables, mais il est nécessaire d'ajouter d'autres aménagement au niveau de la partie sud du bassin dans le but de:

- minimiser le débit de ruissellement dans cette zone pour arriver en aval avec une faible vitesse,
- lutter contre la dégradation du sol en amont.

La *figure 52* résume les différentes interventions prévues par la DREF, ainsi que les interventions que je propose en se basant sur cette étude, les aménagements choisis sont les terrasses en pierres sèches en raison de leur efficacité dans les terrains en pente. Ainsi l'objectif de cet aménagement consiste dans la réduction du phénomène du ruissellement et de la perte en terre et de la fertilité des sols sur pentes face aux événements pluviométriques exceptionnelles. Cet objectif sera réalisé par non seulement l'action mécanique des terrasses en pierres qui vont stopper les excès de pluie et les pertes en sol, mais aussi par l'action biologique qui consiste en une augmentation du couvert végétal par l'intermédiaire des plantations d'arbres fruitiers.

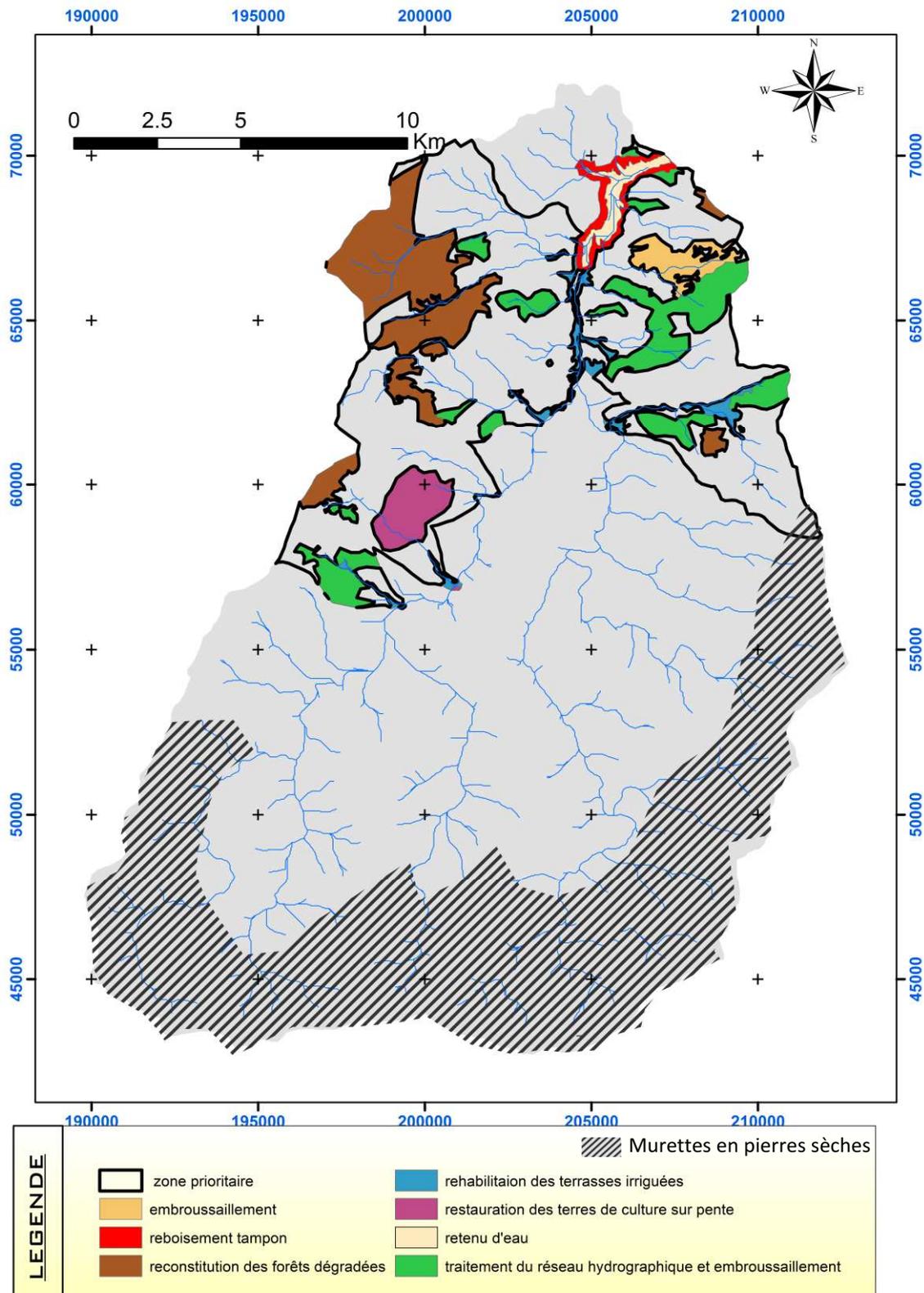


Fig.52 : Carte des aménagements proposés

VI-DUREE DE VIE DU BARRAGE :

VI-1-Fiche synoptique du Barrage de Taskourt

VI-1-1-SITUATION DE L'OUVRAGE :

Le barrage Taskourt (*Figure 53*) est situé dans la province de Chichaoua sur l'Oued Assif El Mal à 22 Km au Sud – Ouest de la ville d'Amez Miz.

VI-1-2-BUT DE L'OUVRAGE :

- Irrigation des périmètres aval,
- Alimentation en eau potable des populations avoisinantes,
- La protection contre les inondations.

VI-1-3-CARACTERISTIQUES :

- **Données naturelles**

Bassins versant	: 425 km ²
Apport moyen annuel	: 44 hm ³
Début de la crue de projet (1/1000)	: 1700 m ³ /s

- **La retenue**

Cote de la retenue normale	: 1 000,00 NGM
Aire de la retenue normale	: 132,00 ha
Volume de la retenue normale	: 25,5 Mm ³
Volume régularisé	: 24 Mm ³
Niveau du PHE	: 1 004,30 NGM

- **Barrage**

Type	: Poids en BCR
Longueur en crête	: 415,00 m
Largeur en crête	: 8 m
Cote de la crête	: 1 007,50 NGM
Hauteur max sur fondation	: 74,50 m
Volume total de béton	: 415 000 m ³

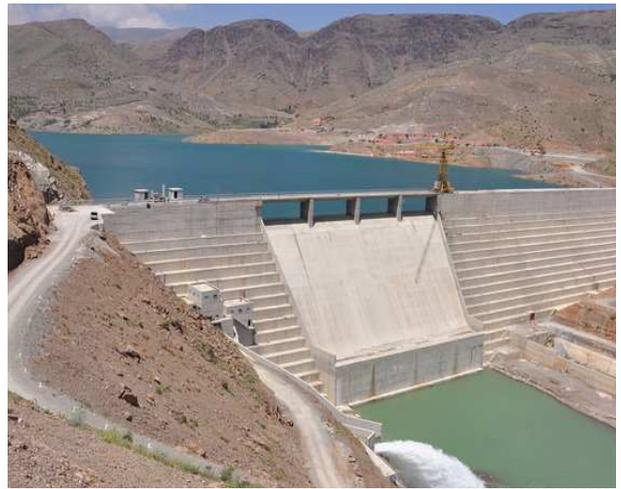


Fig 53 : Images du barrage de Taskourt

VI-2-Durée de vie du barrage

Etant donné que la superficie du bassin versant d'Assif El Mal est de 425Km² et la valeur moyenne de sa dégradation spécifique est de 9.34t/ha/an, on peut déduire que la contribution du bassin à l'envasement du barrage de Taskourt en aval est de 398 650 t/an.

Afin de déduire la durée de vie du barrage en cause on va utiliser la corrélation étudiée entre la dégradation spécifique des différents barrages à l'échelle du Maroc et leur taux d'envasement l'objectif principal de cette corrélation (*Figure55*) est de prendre en considération la quantité de sédiments lâchés par le barrage ainsi que la densité de la vase *tableau 29*.

Barrages des bassins versants prioritaires	Superficie BV (Km ²)	Capacité de la retenue Mm ³	Dégradation spécifique (t/ha/an)	Dégradation en (Mt/ha)	Envasement annuel (Mm ³ /an)
Hassan I	1670	254	26	4.34	2.9
Moulay Youssef	1441	175	27.06	3.90	2.6
Oued El Makhazine	1820	772	37.91	6.90	4.6
Idriss I	3680	1173	8.97	3.30	2.2
El Kansera	4540	265	4.63	2.10	1.4
Bine El Ouidane	6400	1300	11.72	7.50	5
Mansour Ed Dahbi	15000	505	4.7	7.05	4.7
Med Ben A Khattabi	780	34	25	1.95	1.3
Lalla Takerkoust	1707	68	4.39	0.75	0.5
Sidi M. B. Abdellah	9800	477	2.6	2.55	1.7
Youssef Ben Tachfine	3784	303	8.32	3.15	1.43
Aoulouz	4500	100	3.2	1.44	2.1
Al Massira	28500	2747	1.32	3.76	2.5
Hassan Eddakhil	4400	343	3.99	1.76	1.17
Ibn Batouta	178	36	47.19	0.84	0.56
Nakhla	107	6	42.06	0.45	0.3
Abdelmoumen	1300	213	2.65	0.34	0.23
Hachef	220	300	26.5	0.58	0.5
Melleh	1800	8	0	0.00	0.15

Tab 29 : Barrages utilisée afin de sortir la relation entre la dégradation spécifique et l'envasement annuel

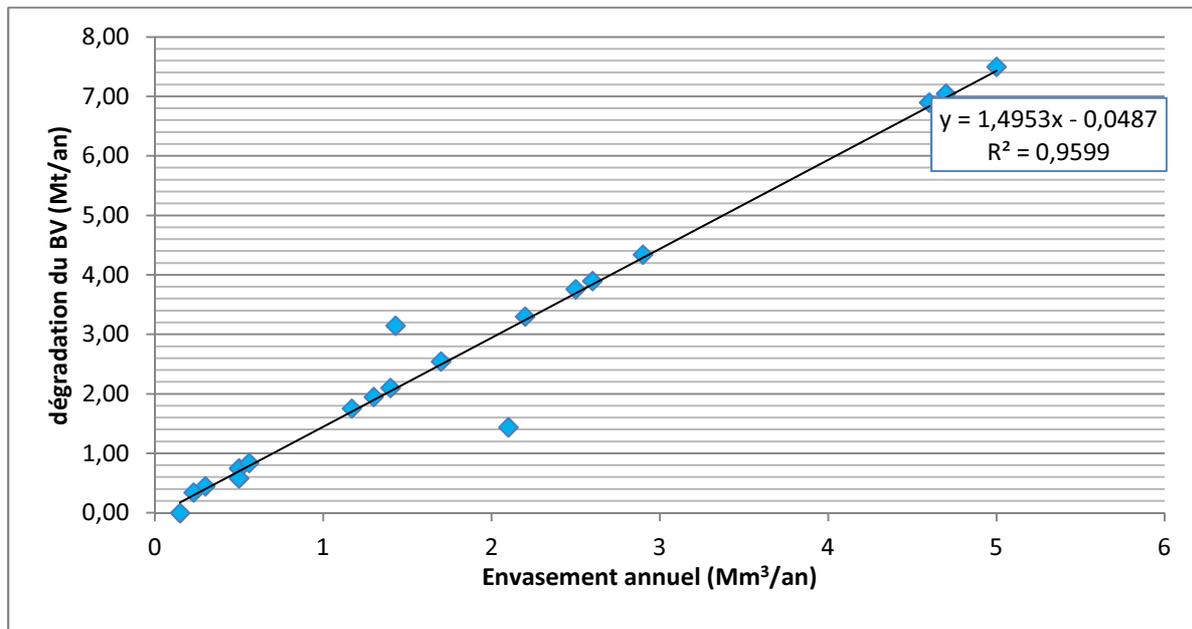


Fig. 54: Corrélation étudiée entre les dégradations spécifique et l'envasement annuel des barrages correspondants

Avec un taux de corrélation de $R^2=0.959$ on trouve que la relation qui lie la dégradation des bassins versants avec l'envasement annuel dans leurs barrages correspondants :

$$Y=1.495X-0.048$$

Avec :

Y : la dégradation des bassins versants (Mt/an)

X : l'envasement annuel (Mm^3/an)

En remplaçant la valeur de la dégradation spécifique rencontrée au niveau du bassin versant d'Assif El Mal (0.4 Mt/an) on va trouver :

$$298\ 762\ m^3/an$$

Sachant que la retenue de barrage de Taskourt a un volume de : **24 000 000 m^3**

La durée de vie du barrage est donc : **80 ans.**

CONCLUSIONS

Les travaux effectués dans le bassin versant Assif El Mal (combinant traitement de l'imagerie satellitaire, données pédologiques et climatologiques dans un SIG), ont permis d'identifier et de cartographier les surfaces des terres nécessitant la plus grande priorité d'intervention pour la protection du patrimoine sol afin de réduire les apports solides au niveau de la retenue du barrage Taskourt encore appelé Abou El Abbas Assabti .

Du fait que peu de références bibliographiques existe sur le thème du transfert de sédiments depuis le versant jusqu'au réseau hydrographique et suit à la non disponibilité d'informations concernant les relations entre la composition des sédiments érodés sur les versants et celle des sédiments dans retenues, ce travail a permis de démontrer que :

- Il est important d'évaluer l'exactitude des estimations de l'aléa érosion des sols, provenant de n'importe quel modèle, qui pourraient être employées dans le contexte de la protection des sols contre la dégradation et la lutte contre l'érosion. Cependant, il est très difficile, d'acquérir des mesures directes de ce phénomène pour de grandes superficies afin de valider les résultats des modèles.
- La méthode de Wischmeier ne quantifie que l'érosion en nappe. Pour être plus significative et applicable, l'équation de Wischmeier devrait être multipliée par le coefficient de délivrance SDR.
- Afin de mieux adapter le modèle d'USLE au bassin versant d'Assif El Mal, pour une meilleure quantification de l'érosion à l'exutoire, il est indispensable d'introduire le paramètre instabilités de terrain. Ainsi, une fois les glissements de terrain cartographiés, et plus particulièrement les sapements de berges, il suffira d'évaluer uniquement la quantité de sédiments véhiculée par la charge solide du réseau hydrographique vers la retenue du barrage Taskourt (surtout lors des périodes de crues).
- L'origine de la plus grande partie des sédiments dans les retenues de barrages est le sapement des berges et l'érosion en masse, contrairement à ce qui a été reconnu auparavant et qui stipule que l'érosion en nappe est considérée comme agent principal au phénomène d'envasement.
- La dégradation spécifique dans le bassin versant d'Assif El Mal est estimée à 9.34 t/ha/an (intensité forte), dont seulement 7% due à l'érosion en nappe.
- La durée de vie du barrage de Taskourt est estimée à 80 ans suivant des apports solides annuels de 298 762 m³, alors qu'elle est estimée à 200 ans par l'ABHT avec des apports solides estimés à environ 120 000 m³/an.
- Selon la carte de vulnérabilité et d'érosion que nous avons établie, les aménagements prévus par la DREF sont en grande partie convenables, bien choisis à l'emplacement adéquat. Cependant, il est nécessaire de revoir la partie Sud du BV où les pentes sont très fortes pour prévoir des aménagements plus convenables comme ceux proposés dans le chapitre 7.

- La zone amont, située dans une zone avec un relief très accidenté présente un risque de dégradation suite à la très forte érosion hydrique. La zone située en aval du bassin versant présente une lithologie caractérisée par des roches tendres ; sa proximité de l'exutoire permettra un grand apport de sédiment dans la retenue du barrage.
- La mise en place de ces aménagements permettra de réduire les apports solides dans la retenue ; la dégradation spécifique est alors estimée à 3t/ha/an, ce qui prolongera la durée de vie de barrage qui serait de 200 ans.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Abdelli M., Zeggane M., 2007, Problématique et enjeu de l'envasement. L'expression. Du 05 Septembre 2007.

Ammari, A., Remini, B., 2008. Estimation des débits liquides des Oueds en se basant sur l'équation de Chiu. Watmed, LRS-Eau ENP, Algérie. 22- 24 mars.

Bull L., Kirkby M., Reaney S. 2000. The influence of field morphology and location on delivery of hillslope runoff to channel networks in SE Spain. Wainwright J., Puigdefabregas J., Calvo A. Cost 623 << Soil erosion and global change >> meeting Almeria, Spain:3.

CHEBBANI (R), 1997. Etude à différentes échelles des risques d'érosion dans le bassin versant de l'Isser Tlemcen, Diplôme de Magistère, Université de Tlemcen, Algérie, 125 p.

Chow V.T., 1964. Handbook of Applied Hydrology. Mc-Graw Hill Book Company.
Sibari et al, 2003 : Hayat Sibari , S. Haidi, A. Ait Fora, Département de géologie, Université Ibn-Tofail, Faculté des sciences, BP 133, Kénitra, Maroc..

De Ploey, J. (in collaboration with: Auzet, A.V., Bork, H.-R., Misopolinos, N., Rodolfi, G., Sala, M. and Silleos, N.G.). (1989). Erosional systems and perspectives for erosion control in European löss areas. Soil Technology Series, 1: 93-102.

Demmak A. (1982). Contribution à l'étude de l'érosion et des transports solides en Algérie septentrionale. Thèse Doct. Ing. Paris, 323 p.

Fox H.R., Moore H.M, Newell Price J.P, EL Kasri M., 1997. Soil erosion and reservoir sedimentation in the High Atlas Mountains, Southern Morocco. IAHS Publication. 245:233-240.

Gobin, A., Govers, G. (2003). Pan European Soil Erosion Risk Assessment – 3th Annual Report – EU 5th Framework Programme, Project No. QLK5-CT-1999-01323. 144 pp. Available at: <http://pesera.jrc.it/>

Grimm, M., Jones, R.J.A., Montanarella, L. (2001). Soil erosion risk in Europe. European Soil Bureau. EUR 19022 EN, 38pp. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg.

HEUSCH B., 1970 - L'érosion dans le Pré-rif: une étude quantitative de l'érosion hydraulique dans les collines marneuses du Pré-rif occidental. Annales des recherches forestières, Rabat, 12 : 9-176.

Kirkby, M.J., Le Bissonais, Y., Coulthard, T.J., Daroussin, J., McMahon, M.L. (2000). The development of Land Quality Indicators for Soil Degradation by Water Erosion. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 81, 125-36.

Laouina A., Nafaa R., Chaker M., 1998. Gestion des eaux et des terres et dégradation dans les collines de ksar el kebir, Maroc. *Bulletin Réseau Erosion*. 19. p18.

Mitasova, H., Hofierka, J., Zlocha, M. and Iverson, L. R. (1996) Modelling topographic potentiel for erosion and deposition using GIS. *International Journal Geographical Information System*, vol. 10, n°5, p. 629-641

Remini W., Remini B., 2003. La sédimentation dans les barrages de l'Afrique du Nord. *Larhyss Journal*, 2 : 45-54.

Renard K.G., Foster G.R., Weesies G.A., McCool D.K., Yorder D. C., 1996. Predicating soil loss equation (RUSLE). USDA/ARS. ARG. AG. Handbook # 703. Washington. DC.

Walling D.E., 1984, The Sediment Yields of African rivers. IAHS Publications. 144: 265-283.
WISCHMEIER W.H., SMITH D.D., 1978. - Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning USDA, Agriculture Handbook, no 537,58 p.

[REMINI B. AVENARD J. M. KETTAB A 1997] Livre de l'envasement des barrages pages 5 à 89.