

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université A.MIRA-BEJAIA



Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie

Département : Biologie de l'Environnement

THÈSE

Présentée par

HAMDANI AZIZ

Pour l'obtention du grade de

DOCTEUR EN SCIENCES

Filière : Biologie

Option : Écologie et environnement

Thème

**Dynamique morphogénique contemporaine du bassin versant du
barrage d'Ighil Emda approche Ecoenvironnementale**

Soutenue le 14-02-2026

Devant le Jury composé de :

Nom et Prénom	Grade		
Mr CHELLI Abdelmadji	MCA	Univ. de Bejaia	Président
Mr ZOUGGAGHE Fatah	Professeur	Univ. de Bouira	Rapporteur
Mr MOULAI Riadh	Professeur	Univ. de Bejaia	Co-rapporteur
Mr RAMDANE Zouhir	Professeur	Univ. de Jijel	Examineur
Mr KHAMMOUDJ Kadour	MCA	Univ. de Bejaia	Examineur
Mr ARAB Amar	MCA	Univ. de Bouira	Examineur

Année Universitaire 2025 / 2026 .

Remerciements

Grace à dieu « Alhmodoulilahi,, le miséricordieux » ce travail a vu le jour. Mes remerciements vont en direction des membres de ma petite famille qui m’ont soutenu durant toute cette durée de préparation de thèse, qui ont tant espéré à voir le jour de finalisation de cette thèse.

Mes remerciements s’adressent à l’équipe de direction de thèse, Professeur Zougaghe Fatah pour avoir accepté la direction de ce travail, à Professeur Moulai Riadh pour avoir accepté de codiriger, je les remercie pour leurs précieux conseils, leur patience et leurs encouragements. A fin de mener à bien ce projet.

Mes remerciements vont Aux membres de jury pour avoir accepté d’expertiser cette thèse. Je remercie toutes personnes ayant contribué de près ou de loin à m’orienter, je cite en l’occurrence mon cher ami Ali Immessodène, Boubker Aberkan qui n’ont jamais ménagé un effort pour me

Remerciements.....	1
Préface.....	8
Résumé.....	9
Abstract:.....	10
Introduction générale.....	11
Concepts.....	11
Problématique.....	11
Objectifs et structure de thèse.....	11
Cadre conceptuel du sujet de thèse.....	11
Déterminisme géomorphologique et écologie ;.....	12
Déterminisme Morpho-dynamique, succession écologique et climax:.....	13
Déterminisme géomorphologique et dynamique des paysages écologiques à l'ère de l'anthropocène et les changement globaux :.....	15
Géomorphologie dynamique, construction biogéomorphologique et évolution des communautés végétales:.....	16
Sujet de recherche, problématique de thèse et question centrale:.....	18
Les objectifs de la thèse :.....	21
Originalité de la recherche :.....	21
Structure de la thèse :.....	22
Chapitre 1 :.....	25
Cadre méthodologique global et présentation de la zone d'étude.....	25
Introduction.....	25
I. Démarches, Données, principes et outils de réalisation de la thèse :.....	26
I.1. Les données exploitées :.....	26
I.1.1 Traitement des données :.....	26
I.1.2 Outils utilisés :.....	27
I.1.3 Le choix de la zone d'étude :.....	27
I.2 Présentation de la zone d'étude :.....	27
I.2.1 Reliefs et lithologie des terrains du bassin versant :.....	28
I.2.2 Caractéristiques hydro-climatiques :.....	31
I.2.2.1 Les précipitations :.....	31
b. Précipitations mensuelles interannuelles.....	32
c. Précipitations journalières maximales.....	33
I.2.2.2 La température.....	33
I.2.2.3 L'hydrographie et les sous bassins versants :.....	34
I.2.2.4 L'évaporation :.....	36
I.2.2.5 L'hydrologie et les ruissellements :.....	36
I.2.2.6 Récapitulatif des caractéristiques physiques et hydro climatique de la zone d'étude :.....	37

Chapitre 02.....	39
Bilans sédimentaires et morphogéniques dans le bassin versant. (Synthèse des résultats antérieurs).....	39
Introduction.....	39
II.1 Historiques des études antérieures sur les bilans sédimentaires et la morphogénèse au niveau du bassin versant d'Ighil Emda:.....	39
II.1 Les travaux de Bougherrara (1986) :.....	40
II.1.1 Les résultats des bilans sédimentaires.....	40
II.1.2 Le bilan morphogénique :.....	40
II.1.3 Les insuffisances liées aux approches adoptées:.....	41
II.2. Les travaux de Remini (1995) :.....	41
II.2.1 les résultats des bilans sédimentaires:.....	42
II.2.2 Bilan morphogénique associé au bilan sédimentaire selon Remini (morphogénèse et effets associés).....	42
II.3 Les travaux de Hamdani (2012):.....	42
II.3.1 Le bilan sédimentaire :.....	44
II.3.1 Le bilan morphogénique.....	44
II.4 Synthèse sur les interprétations faites par les auteurs quant aux bilans sédimentaire et les activités morphogéniques:.....	45
Conclusion:.....	47
Chapitre 3 :.....	49
Dynamique morphogénique, entre modélisation d'érosion et approche qualitative géomorphologique.....	49
Introduction :.....	49
III.1 Terrain d'étude :.....	49
III.1. 2 Méthodologie et étapes de réalisation de l'étude.....	50
III.2 Présentation des Modèles empiriques testés pour le calcul d'érosion :.....	52
III.2.1 L'Abaque de HUSSON (1975) :.....	52
III.2.2 Le modèle de DEMMAK (1982).....	52
III.2.3 Le modèle de REMINI (2005).....	53
III.2.4 Le modèle de SOGREAH/ANRH (1989).....	53
III.3 Construction d'une base de données pour exploitation informatique.....	54
III.4 Travaux menés sur terrain :.....	54
III.4.1 Rappel sur les Caractéristiques géométriques du versant d'Ighile Emda :.....	55
III.4.2 Les paramètres morphométriques et hydrologiques.....	55
III.4.3 Paramètres hydroclimatiques exploités.....	56
III.4.4 Relief et lithologie.....	56
III.5 Résultat et discussion :.....	56
III.5.1 résultats des calculs empiriques.....	56

La représentation graphique de des valeurs des produits d'érosion de chaque modèle empirique exprime clairement les divergences dans entre les valeurs (fig. 19).....	57
III.5.2 Résultats des travaux d'enquête et de cartographie réalisés sur le terrain.....	57
III.6 Discussion.....	66
Conclusion du chapitre 3.....	70
Chapitre 04:.....	72
Morphogenèse et construction Biogéomorphologiques (perspective d'une approche d'analyse morphodynamique).....	72
Introduction.....	72
IV .1 Délimitation spatiale du site étudié:.....	73
IV.2 Méthodologie et outils.....	74
IV.3 Étape de travail préparatoire :.....	75
IV.3.4 Étape de traitement et d'analyse :.....	77
IV.3.4.1 Classification numérique des images satellites et photo aérienne :.....	77
IV.3.4.1 Calcul numérique des surfaces de chaque classe correspondant aux unités paysagères obtenues :.....	79
IV.3.4.2 Élaboration des matrices de transition :.....	81
IV.4 Étude de l'évolution des métriques paysagères du fond de vallée :.....	82
IV.4.1 Outils de calculs des métriques paysagères :.....	87
IV.4.2 Résultats des calculs des métriques paysagères :.....	88
IV.5 Discussion des résultats	90
IV.5 .1 Phases d'évolution du paysage éco-géomorphologique de Oued Atteba durant les 60 dernières années	94
a- Situation du Paysage hérité en l'année 1960 :.....	94
b- Phase d'instabilité morphologique et de dynamique hydro-géomorphologique intense de Oued Atteba entre 1960-2002	95
c- phase de stabilité hydro-géomorphologique relative, de succession écologique primaire et de construction d'habitat entre 2002-2012	96
d- Phase de stabilité hydro-géomorphologique, activité écologique post-pionnière et construction de niche.....	97
Conclusion :.....	100
Conclusion générale.....	101
Références bibliographiques.....	103
Annexe 1:.....	115
Caractéristiques du Bassin versant -Morphométrie - Hydro-climat - Calculs d'érosion.....	115
ANNEXE 3 : STATISTIQUE DE MODELISATION DES PLUIES.....	130
ANNEXE 4 : Paramètres climatiques secondaires.....	134
ANNEXE05 : FORMULES ENPIRIQUES.....	136

Liste des Figures :

Figure 1: Enchaînement des causes et des conséquences du relief. Isselin-Nondedeu, 2005.....	12
Figure 2: Représentation schématique des caractéristiques de l'environnement abiotique qui contrôlent la dynamique du compartiment biologique, dans une structure de type hiérarchique. (Levêque,2001).....	13
Figure 3: interaction géomorphologie, société et dynamique des paysage (Slaymaker et al, 2009)....	15
Figure 4: Le réseau d'interactions et de rétroactions biogéomorphologiques potentielles susceptibles de relier la végétation riveraine et la géomorphologie fluviale. Les influences représentées par les flèches sont abordées dans le texte (Bendix et Stella 2013).....	17
Figure 5: synoptique sur les sujet de thèse, les questions centrales et les hypothèses énoncées.....	21
Figure 6: Localisation du bassin versant. (Inct 1963, habillage par l'auteur).....	28
Figure 7: Modèle numérique de terrain du bassin versant d'Ighil Emda.....	29
Figure 8: Répartition des surfaces du bassin versant par valeurs des pentes.....	29
Figure 9: Extraits de cartes géologiques 1/50000 couvrant le bassin versant d'Ighil Emda (ORGM)....	31
Figure 10: variabilité pluviométrique enregistrée dans les stations du bassin versant (Hamdani.2012)	32
Figure 11 : Répartition mensuelle des températures.....	34
Figure 12: courbe Ombrothermique (sur une série de 28 ans).....	34
Figure 13 : Réseau hydrographique et principaux sous bassins versants (Auteur).....	35
Figure 14 : Répartition mensuelle de l'évaporation au barrage de Ighil Emda(ANRH).....	36
Figure 15: Ajustement statistique des apports liquides annuels à loi de Gumbel (Hamdani 2012).....	37
Figure 16: délimitation du terrain d'expertise géomorphologique (Oued Etteba).....	50
Figure 17: Schéma du cheminement la méthodologique d'évaluation de l'usage et de pertinence des applications empiriques dans les études morphogéniques et les apports de la démarche géomorphologiques in situ.....	51
Figure 18 : Réseau hydrographique sur MNT.....	55
Figure 19 : comparatif schématique des produits d'érosion calculés selon les quatre modèles.....	57
Figure 20 : Carte géo morpho dynamique.....	58
Figure 21: schéma du fonctionnement morpho sédimentaire et morphodynamique du bassin versant étudié.....	60
Figure 22 : Sapement par courant d'oued : a . Sapement de terrasse fluviale contact du courant d'eau avec un sol argileux; b. Sapement latérale d'un cône de déjection	61
Figure 23 : a. vue aérienne de l'état du cône de déjection en 2002 ; b. vue aérienne de l'état du cône de déjection en 2016.....	62
Figure 24 : Combinaison de processus morphogénique. a. Talus naturel d'une masse de terres glissante soumise à l'attaque des courants de l'oued ; b. solifluxion et sapement sur talus naturel....	63
Figure 25 : Ouvrage submersible traversant l'oued. a. Curage du pont ; b. vue aérienne prise en 2002 avant la mise en place du pont ; c. Vue aérienne en 2016 après mise en place du pont.....	64
Figure 26 : Aqueduc traversant une section de l'oued.....	65
Figure 27 : Exemple de disparité morphogénique entre deux versants opposés à morphostructure différente. a. versant convexe sur structure Sub-tabulaire, b. versant à une morphostructure complexe.....	66
Figure 28 : Synthèse sur la discussion et les interprétation des résultats qui opposent l'approche empirique et l'approche géomorphologique dans le complexe morpho-dynamique du bassin versant	69

Figure 29: Synoptique du contexte et des objectifs du chapitre 4.....	73
Figure 30: délimitation du site étudié sur fond topographique.....	73
Figure 31 : Étape de réalisation du chapitre 4.....	74
Figure 32: Extraits des images satellites et photo aérienne diachroniques de la zone d'étude.....	76
Figure 33: résultats de la classification supervisée des images satellites et photo aérienne exploitées : A : photo aérienne de 1960, B : image satellite de 2002, C : image satellite de 2012, D : image satellite de 2022.....	78
Figure 34: Répartition des surfaces des classes paysagères dans les images exploitées.....	81
Figure 35 : Les variations des métriques paysagères à travers les trois intervalles temporels de.....	89
Figure 36: formation végétale arbustive et herbacée du fond de la vallée en février 2012 (Photo prise de loin) . Source : (Hamdani.2012).....	91
Figure 37: Formation végétale arbustive et herbacée du fond en février 2012 (photo prise de près) . Source : (Hamdani.2012).....	91
Figure 38: formation végétale arbustive et herbacée (Tamarix et laurier rose) du fond d'oued en Juin 2012 (prise de près) . Source : (Hamdani.2012).....	92
Figure 39: Formation végétale arborée et arbustive (peuplier et Tamarix) du fond d'oued en Juin 2022.	93
Figure 40: formation végétale arborée et arbustive (peuplier et Tamarix) du fond d'oued en Juin 2022 (prise de près)	93
Figure 41: Extrait de carte d'état-major de 1927 montrant Oued Atteba sous forme d'un seul tracé.	95
Figure 42: nidification observée au niveau de la formation végétale (plante du laurier rose) . Source : Auteur.....	98
Figure 43 : synthèse globale intégrée sur résultats d'analyse et les interprétations associées des différentes phase de hydromorphodynamique et les transformation du paysage géo-écologique du fond de vallée de Oued Etteba (1960-2022).....	99

Liste des tableaux :

Tableau 1: Répartition statistique des pentes du bassin versant par surface (réalisé par analyse dans le SIG).....	29
Tableau 2: Données pluviométriques moyennes mensuelles interannuelles (ANRH 69/07).....	32
Tableau 3: Caractéristiques des pluies maximales journalières, source ANRH (1969 -2007).....	33
Tableau 4 : Les températures à la station de Sétif (° C).SELTZER.....	33
Tableau 5: statistique du réseau hydrographique du bassin versant (E par analyse SIG).....	35
Tableau 6: statistiques des mesures d'apports liquide au niveau du bassin versant (Archive SONELGAZ, 1953-1968).....	37
Tableau 7: Résultat de calcul du transport solide quelques formule empiriques appliquées en Algérie (Hamdani, 2012).....	43
Tableau 8: Synthèse de revue littéraire sur les travaux menés dans la zone d'étude ayant rapport avec les bilans sédimentaires, transport solides et la morphogénèse.....	46
Tableau 9 : Valeurs de α pour différentes perméabilités des terrains.....	53
Tableau 10 : Indices morpho métriques et hydrographiques du bassin versant.....	55
Tableau 11 : paramètres hydro-climatiques du bassin versant.....	56
Tableau 12 : Les taux d'érosion estimés selon les modèles empiriques.....	57
Tableau 13 : : Répartition des surfaces des unités paysagères (1960).....	79
Tableau 14: Répartition des surfaces des unités paysagères (2002).....	79
Tableau 15: Répartition des surfaces des unités paysagères (2012).....	80
Tableau 16: Répartition des surfaces des unités paysagères (2022).....	80
Tableau 17: Matrice de transition du paysage éco-géomorphologique du fond d'oued dans l'intervalle temporel entre 1960 -2002.....	81
Tableau 18: Matrice de transition du paysage éco-géomorphologique du fond d'oued dans l'intervalle temporel entre 2002- 2012.....	82
Tableau 19: Matrice de transition du paysage éco-géomorphologique du fond d'oued dans l'intervalle temporel entre 2012- 2022.....	82
Tableau 20: Indices des métriques paysagères choisis pour caractériser le paysage du fond de vallée.	84
Tableau 21: résultats de calcul des métriques paysagères pour les quatre classifications des images satellites et photo aérienne.....	88
Tableau 22: évolution des métriques paysagères selon les trois intervalles des images classifiées.....	89

Préface

Grâce à dieu ce travail a vu le jour. " Alhmdoulilahi le miséricordieux" .

Ce travail aurait pu être finalisé il y a bien quelques temps, mais parfois c'est dans le temps prolongé que des réponses sont données à des questions complexes ouvertes sur toutes les éventualités que nul expériences opérées dans les laboratoires ne peuvent éprouver .J'atteste que l'expérience vécue en menant cette étude m'a laissé persuadé que le terrain demeure le meilleur laboratoire du monde qui fournit gracieusement et sans contrepartie des réponses à des questions souvent laissées à des théories non vérifiées où des interprétations subjectives. Ce laboratoire à ciel ouvert nous a permis de vivre et d'assister à vue d'œil à un spectacle de cycle complet d'évolution d'un écosystème qu'aucun modèle réduit ne pourra imiter et encore loin le simuler. La question de La relation entre la géomorphologie et l'écologie me tenait à cœur depuis le cycle de graduation en préparant mon ingéniorat, cet intérêt a persisté et même avec acuité à mesure que des nouvelles connaissances et des nouvelles épreuves s'acquéraient, mon parcours de chercheur aurait pu prendre une autre trajectoire en raison du caractère flexible de ma formation en géographie. Le renouement avec le milieu universitaire en qualité de maitre-assistant, précisément dans la faculté des sciences de nature et de la vie, a fait renaître cet intérêt d'explorer le lien entre la morphogenèse et la genèse des écosystèmes, c'est dans cette espace universitaire que cette thèse a fait ça germination, se nourrissait et grandissait à mesure que les idées se cristallisent à maturité.

Par ailleurs, Certaines disciplines auraient pu se faire une place incontestable dans cette thèse, je cite notamment la géophysique, la dendrochronologie, la pédologie, la topométrie et la géodésie spatiale, mais par soucis de ne pas alourdir l'étude d'une part, mais aussi en raison des contraintes d'ordre matériel auxquelles nous étions confrontés, nous avons opté pour des approches qui répondaient aux besoins globaux sans pour autant altérer la question centrale de notre thèse. Donc, il convient d'évoquer ici à quel point les sciences se croisent et s'interpellent. En fin, j'espère avoir contribué modestement à pousser la progression des connaissances, du moins dans le contexte maghrébin et algérien particulièrement, dans un domaine scientifique d'interférence entre les géosciences, la géographie et les sciences de la nature et du vivant , ce domaine qui cherche encore à être exploré en Algérie.

Hamdani Aziz

Résumé

Dans la présente étude menée sur le bassin versant d'Ighil Emda dans la chaîne des Babords de l'Algérie tellienne, nous avons mis en évidence l'apport incontestable des approches biogéomorphologiques et écologiques dans la caractérisation de la dynamique morphogénique des paysages. Un suivi de près du site d'Oued Etteba dans le bassin versant étudié a permis d'identifier le caractère déterministe reliant la géomorphologie et l'évolution des écosystèmes naturels. Par ailleurs, nombreuses études de quantification d'érosion par estimation des apports solides font état d'une dégradation intense traduite par des volumes considérables de matières en suspension qui atterrissent souvent dans des barrages ou entraînées vers la mer. Dans le même contexte, des analyses fondées sur la confrontation entre des résultats empiriques des produits d'érosion et des observations de terrain, ont mis en évidence le caractère limité des approches strictement quantitatives dans la caractérisation de la dynamique morphogénique en raison de la spatialité du phénomène d'érosion. Ces résultats intéressants suggèrent l'intérêt incontestable d'intégrer les aspects écologiques et géomorphologiques dans les recherches sur la dynamique des paysages. Les perspectives de cette approche biogéomorphologique sont prometteuses dans l'appréhension de la genèse des micro habitats écologiques, microclimats et tendance d'évolution des écosystèmes. L'application combinée des outils de cartographie géomorphologique, des Systèmes d'Information Géographiques (SIG), de la télédétection, des matrices de transition et des métriques paysagères s'est révélée d'un intérêt incontournable pour l'analyse de la dynamique paysagère. Ces méthodes procurent un potentiel inestimable pour les études intégrées des interactions entre relief, processus morphogéniques et organisation écologique.

Abstract:

In this study conducted on the Ighil Emda watershed in the Babord mountain range of the Tellian region of Algeria, we have highlighted the undeniable contribution of the biogeomorphological and ecological approach to characterizing the morphogenic dynamics of landscapes. Close monitoring of the Oued Etteba site in the studied watershed has identified the deterministic nature linking geomorphology and the evolution of natural ecosystems. Furthermore, numerous studies quantifying erosion by estimating solid inputs report intense degradation, reflected in considerable volumes of suspended matter that often end up in dams or are carried out to sea. In the same context, analyses based on a comparison of empirical results of erosion products and field observations have highlighted the limited nature of strictly quantitative approaches in characterizing morphogenic dynamics due to the spatial nature of the erosion phenomenon. These interesting results suggest the undeniable value of integrating ecological and geomorphological aspects into research on landscape dynamics. The prospects for this biogeomorphology approach are promising in understanding the genesis of ecological microhabitats, microclimates, and ecosystem evolution trends. The combined application of geomorphological mapping tools, Geographic Information Systems (GIS), remote sensing, transition matrices, and landscape metrics has proven to be of essential interest for the analysis of landscape dynamics. These methods offer undeniable potential for integrated studies of the interactions between relief, morphogenic processes, and ecological organization.

Introduction générale

- Concepts
- Problématique
- Objectifs et structure de thèse

Cadre conceptuel du sujet de thèse

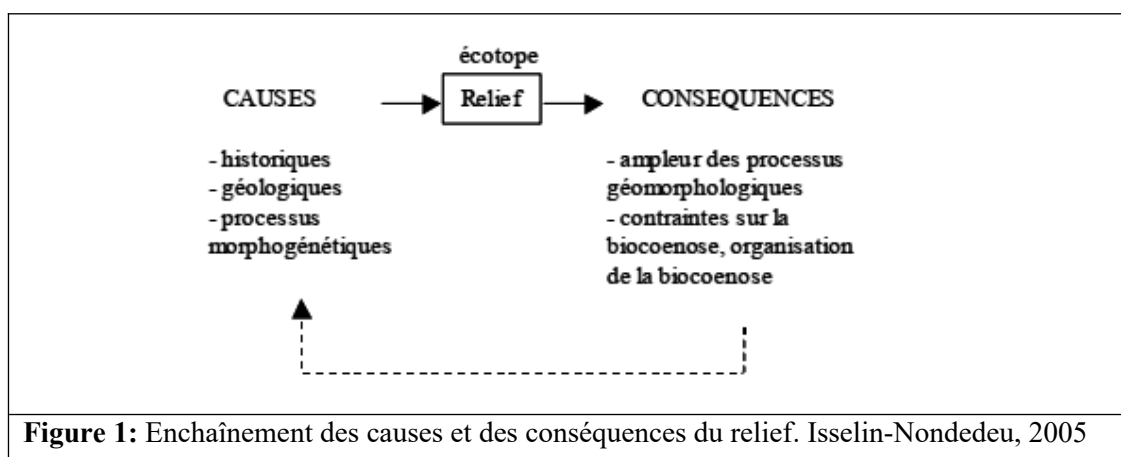
L'idée de base d'où émane le sujet de recherche de la présente thèse est la relation qui relie les phénomènes géomorphologiques avec les phénomènes écologiques, à savoir la genèse et l'évolution des paysages écologiques. L'idée est ainsi motivée par les événements morphogéniques contemporains vécus et qui conduisent, et continuent à le faire à ce jour, à une redistribution et recomposition des communautés vivantes (flore et faune) dans un contexte marqué par des mutations d'ordre naturel, sociétal, socioculturel mais aussi politique (Bertrand, 2002 ; Tricart, 1977). Dans plusieurs espaces géographiques du monde, les reconfigurations des paysages physiques et écologiques s'opèrent dans un complexe fonctionnel qui regroupe l'ensemble abiotique, la biocénose, les facteurs climatiques et les phénomènes sociétaux (Tansley, 1935 ; Blondel, 1979). Beaucoup d'auteurs estiment que la reconfiguration des paysages géomorphologiques, et par conséquence écologiques, durant les cent dernières années a pris une allure accélérée, due à plusieurs raisons dont l'anthropisation qui est une réponse aux besoins des sociétés modernes, de plus en plus exigeantes, imposant un usage excessif, parfois inapproprié, des ressources naturelles notamment les sols (Forman & Godron, 1986 ; Naveh & Lieberman, 1994).

Déterminisme géomorphologique et écologie ;

Nombreux scientifiques, notamment les géographes, les écologistes, les biogéographes et les phytosociologues, admettaient l'idée selon laquelle la morphogenèse, ou la dynamique des surfaces de relief, exerce un déterminisme dans la configuration et la distribution des paysages écologiques (Tricart & Cailleux, 1967 ; Huggett, 2007 ; Birot, 1968 ; Demek, 1972).

Le déterminisme en géomorphologie se réfère à l'idée que la composition physique des paysages géomorphologiques et leur dynamique orientent l'évolution des paysages écologiques (Chorley, 1962 ; Schumm, 1977). Autrement dit, l'organisation spatiale des communautés écologiques et leurs fonctionnements dépendent étroitement de la distribution des ensembles géomorphologiques qui constituent le support des habitats et des niches écologiques (Forman & Godron, 1986 ; Huggett, 1995).

Par conséquent, toute transformation dans la composition ou la réorganisation spatiale des écotopes impose fatalement une modification du paysage écologique (Tricart, 1974 ; Summerfield, 1991). Les facteurs géomorphologiques déterminants sont essentiellement d'ordre géométrique et morphométrique (orométrie, pente, exposition), ainsi que ceux liés à la résistance aux forçages externes (météorisation, érosion), dépendant de la nature lithologique et morphostratigraphique des reliefs, mais aussi de la présence ou de l'absence de couvert végétal (Birot, 1968 ; Huggett, 2007). L'influence des facteurs géomorphologiques dans la distribution des communautés écologiques réside dans le fait que toute transformation dans la composition intrinsèque du biotope (érosion, accumulation de sédiments) conduit à la transformation des écosystèmes (Fig.1), par l'instauration de conditions nouvelles, défavorables à certaines espèces et favorables à d'autres (Forman & Godron, 1986 ; Huggett, 2007).



Déterminisme Morpho-dynamique, succession écologique et climax:

Les évènements morphogénétiques provoqués par des processus d'érosion conduisent souvent à reconfigurer les paysages en instaurant parfois des conditions primitives qui initialisent le processus de succession écologique primaire. Souvent, ces évènements sont considérés comme une perturbation du processus d'évolution écologique (Fig.2) (Courcoul et al, 2024 ; Decocq et al, 2021 Bourgeoi et al 2017 ; Levêque , 2001 ; Peco et al 1983).

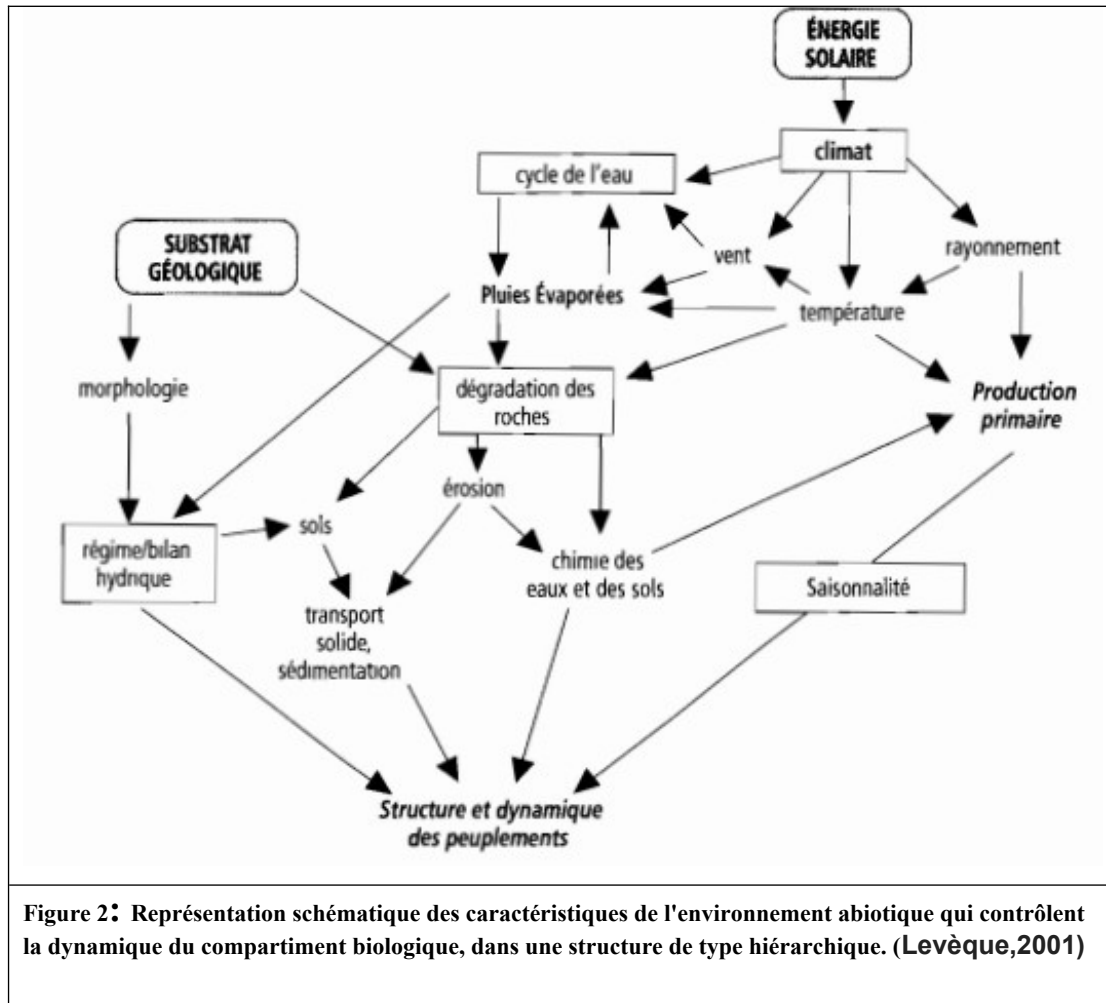


Figure 2: Représentation schématique des caractéristiques de l'environnement abiotique qui contrôlent la dynamique du compartiment biologique, dans une structure de type hiérarchique. (Levêque, 2001)

Dans ces nouvelles conditions, un écosystème pionnier commence à se mettre en place à partir de propagules et de plantules transportées par les courants hydriques vers l'aval, notamment dans les fonds d'oued et les fonds de vallées, où les conditions d'humidité et de sédimentation sont propices à la germination et à la colonisation végétale (Walker & del Moral, 2003 ; Bendix & Hupp, 2000). Sur les versants, les perturbations morphogénétiques, telle que l'érosion en nappe, les glissements ou les ruissellements concentrés, entraînent le déplacement des couches superficielles du sol, souvent riches en matériaux nutritifs (Huggett, 2011 ; Montgomery, 1999). Ce transfert de matière favorise la réorganisation spatiale de la couverture végétale et la

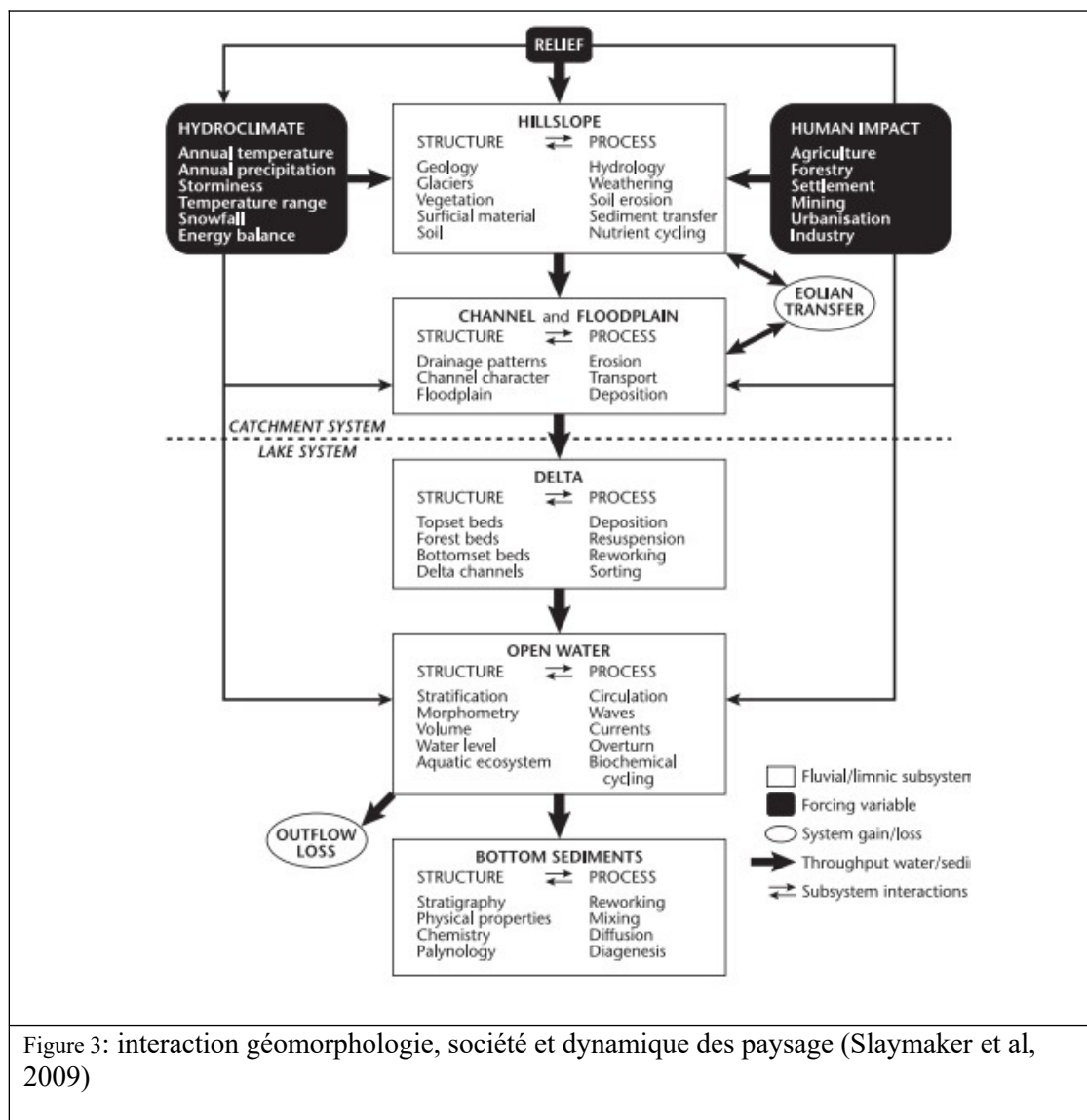
colonisation par des espèces tolérantes aux contraintes édaphiques et hydriques (Walker & Wardle, 2014 ; Forman & Godron, 1986).

Ainsi, de nouveaux écosystèmes s'établissent sur les pentes dénudées ou appauvries en nutriments, dominés par des espèces xérophiles et pionnières typiques des milieux perturbés, comme le câprier commun (*Capparis spinosa*), espèce souvent associée aux substrats instables et aux zones de pentes semi-arides (Fici, 2014 ; Rhazi et al., 2004). Nombreuses études menées dans des contextes géographiques et géomorphologiques mondiaux ont montré un lien étroit entre les perturbations morphogénétiques et l'évolution des paysages écologiques, en soulignant que les dynamiques d'érosion, de transport et de dépôt engendrent des hétérogénéités spatiales et une réorganisation des relations entre les unités paysagères qui composent un écosystème (Huggett, 2011; Isselin-Nondedeu, 2005). Ces perturbations morphogénétiques favorisent ainsi la création de mosaïques écologiques, traduisant la complexité et la diversité des réponses biogéomorphologiques (Schumm, 1977 ; Corenblit et al., 2007).

Cette réorganisation spatiale peut s'exprimer par différentes valeurs métriques, notamment l'agrégation, la fragmentation, la connectivité et la diversité, qui constituent des indicateurs clés de la structure paysagère et de son évolution (; McGarigal & Marks, 1995 ; Forman & Godron, 1986). Le stade initial d'une succession écologique qui suit un événement perturbateur lié à l'érosion des sols est caractérisé par des mosaïques d'accumulations sédimentaires favorisant l'installation de nouveaux écosystèmes pionniers (Walker & del Moral, 2003 ; Levêque, 2001). Toutefois, le stade de succession primaire demeure souvent instable et peut subir des ruptures dues à la récurrence d'événements perturbateurs associés à l'hydrodynamique des courants d'eau et aux processus hydrogéomorphologiques (Corenblit et al., 2011 ; Montgomery, 1999). Pour qu'une évolution écologique se poursuive et progresse d'un stade inférieur vers un stade supérieur, des conditions propices à la fois extrinsèques (climat, topographie, hydrologie) et intrinsèques (résilience biotique, interactions interspécifiques) doivent être réunies (Connell & Slatyer, 1977). Lorsque ces conditions sont satisfaites, la succession peut atteindre le stade de climax, stade ultime d'équilibre écologique, où une biomasse mature et stable est établie (Decocq et al., 2021 ; Odum, 1969). À ce stade, des rétroactions s'exercent contre les influences exogènes, en particulier celles liées aux actions hydrodynamiques et aux processus hydrogéomorphologiques, assurant ainsi la stabilité et la résilience du système (Odum & Barrett, 2005 ; Wu & Loucks, 1995).

Déterminisme géomorphologique et dynamique des paysages écologiques à l'ère de l'anthropocène et les changement globaux :

Ce qui paraît une relation de déterminisme naturel entre la dynamique des paysages géomorphologiques et les transformations écologiques y afférentes pourrait être associé à des facteurs de contingence introduits par les sociétés humaines d'une part, mais d'autres facteurs qui s'imposent en raison des transformations des influences climatiques (Reynard et al., 2011 ; Bravard & Petit, 1997). Donc, ce qui est supposé prévisible comme évolution géomorphologique et sa production de nouveaux écosystèmes pourrait conduire à des résultats imprévisibles (Phillips, 2009 ; Huggett, 1988). Les transformations opérées par les sociétés humaines et les relations qu'elles entretiennent avec les milieux physiques ont grandement changé les réponses morphogéniques vis-à-vis des forçages exogènes (fig.3) (Slaymaker et al , 2009 ; Néboit, 1999; Tricart & Kilian, 1982).



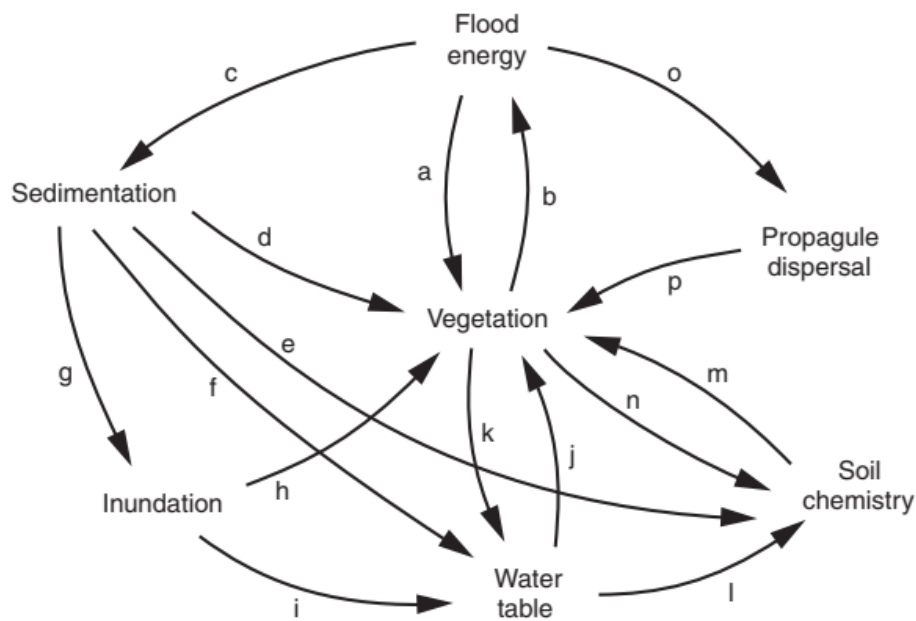
Les sociétés modernes ont souvent privilégié un usage qui répond aussi favorablement aux besoins des communautés humaines de plus en plus exigeantes, notamment en matière d'infrastructure, de services et de logement. Souvent, des usages inappropriés ont vulnérabilisé les milieux en conduisant à des reconfigurations uniques des paysages écologiques (Slaymaker et al., 2009 ; Clément, 1995 ; Bertrand, 1978; Holling, 1973). C'est souvent le cas des reconfigurations observées suite à des événements hydrologiques singuliers induits par des pics climatiques et exacerbés par des transformations opérées dans les hydrosystèmes et les systèmes hydrodynamiques des cours d'eau (Piegay & Bravard, 1996; Kondolf et al., 2003).

Géomorphologie dynamique, construction biogéomorphologique et évolution des communautés végétales:

Partant du principe du modèle des filtres écologiques, les composantes abiotiques (milieu physique) constituent le premier niveau des filtres qui définit l'organisation spatiale et la distribution des communautés végétales ainsi la typologie floristique qui compose les communautés et qui est tributaire de la nature physicochimique du sol (Decocq, 2021) .

Le contrôle de la dynamique géomorphologique sur les bilans sédimentaires et nutritifs impose un deuxième niveau des filtres qui conditionnerait la vitesse de croissance des essences végétales (Fig.4) (Dufour, 2018 ;Bendix et Stella, 2013,Isselin-Nondedeu, 2005 , selon Malavoi 1996, Keddy 1992, Weiher and Keddy 1995 ; Diaz et al. 1999), cet impact s'exprime surtout en milieux fluviaux (hydrogéomorphologie) , mais aussi sur les versant (Cohen et Rey,2005). Plusieurs auteurs considèrent que la dynamique végétale est un indicateur qui reflète fidèlement l'impact de la dynamique des géosystème (stallins, 2006 ; Levêque 2001 ; Amoros et al 1986).

Cet indicateur pourrait servir comme outils de mesure naturel pour estimer l'équilibre des écosystèmes en réponse aux impulsions géomorphologiques naturelles liées uniquement aux facteurs climatiques ou associées à des facteurs de contingence d'ordre anthropiques introduits par les société humaines (SikuzaniI et al 2018, Médail et Diadema, 2006 ; Géhu, 1980 ; Veyret, 1994; Clément, 1994, Trémolières, 2008).



- a.** Flood energy affects riparian vegetation directly, through mechanical damage or scour
- b.** Riparian vegetation affects flood energy through hydraulic roughness .
- c.** Flood energy affects sedimentation, controlling the size distribution of mobilized sediment, its sorting, and the spatio-temporal patterns of deposition.
- d.** Sedimentation affects riparian vegetation directly, through burial of existing plants and through creation of alluvial surfaces for colonization .
- e.** Sedimentation affects soil chemistry, through the composition of the alluvium deposited and particle size controls on nutrient dynamics and mineralization rate.
- f.** Sedimentation affects water-table depth through the height of depositional landforms and the texture of the deposits (i.e., capillarity).
- g.** Sedimentation affects inundation through the height of depositional landforms.
- h.** Inundation affects riparian vegetation directly, through anoxia .
- i.** Inundation affects water-table depth and dynamics through contributions to groundwater.
- j.** Water-table depth and dynamics affect riparian vegetation directly, through provision of water or through limiting the aerated rooting zone .
- k.** Riparian vegetation affects the water table through transpiration.
- l.** The water table affects soil chemistry through its impact on redox potential.
- m.** Soil chemistry affects riparian vegetation directly, by serving as the primary control of nutrient availability
- n.** Vegetation affects soil chemistry through plant litter and mineralization rate in the root zone.
- o.** Flood energy provides transport for propagules .
- p.** Dispersal of propagules directly affects vegetation, allowing its establishment at new sites

Figure 4: Le réseau d'interactions et de rétroactions biogéomorphologiques potentielles susceptibles de relier la végétation riveraine et la géomorphologie fluviale. Les influences représentées par les flèches sont abordées dans le texte (Bendix et Stella 2013).

Sujet de recherche, problématique de thèse et question centrale:

Durant les 60 dernières années le contexte géographique du nord d'Algérie a été marqué par des transformations profondes dans les systèmes morphogéniques et qui sont exprimées par des bilans sédimentaires dépassant de très loin les moyennes mondiales pour ainsi traduire une dégradation très intense du patrimoine « sol » en impactant les fonctions de plusieurs écosystèmes et ses services connexes, notre zone d'étude qui est le bassin versant du barrage d'Ighil Emda, y fait partie, illustre parfaitement cette dynamique (Bougherara, 1986, Hamdani 2012). Environ 4000 t/km²/an de sédiments sont les valeurs estimées de l'érosion hydrique des sols. Donc la thématique de l'érosion des sols en Algérie, moteur de la morphogénèse et de la dynamique des paysages géomorphologiques, a été dans le centre d'intérêt de nombreux auteurs. Deux approches ont émergé par deux écoles qui revendiquaient le sujet de la dynamique géomorphologique opérée par les processus d'érosion surtout hydrique, la première approche adoptée par des géographes (Pouquet, 1952 ; Benchetrit, 1954) qui abordaient le sujet selon une démarche descriptive qualitative dont l'outil de base est la cartographie géomorphologique. A la même époque, les besoins d'aménagements ruraux ont interpellé des ingénieurs en génie rural à introduire quelques aspects empiriques dans le calcul de perte des sols afin de dimensionner les ouvrages de défense et de restauration des paysages géomorphologiques (Saccardy, 1949 ; Monjauze, 1961 ; Greco, 1966, 1978), cette école a perduré jusqu'à la moitié des années 1970, puis elle disparaît, où les travaux réalisés étaient quelques essais surtout cartographiques dont la plupart n'était pas publiés, on cite notamment les travaux de Dewolf et al. (1972) et les travaux de Tihay (1976). Une nouvelle école s'était substituée en opérant une rupture avec l'ancienne, cette école s'est démarquée par une nouvelle approche basée principalement sur des modélisations mathématiques qui s'intéressait plutôt aux bilans sédimentaires en valeurs absolues qu'aux résultats morphogéniques opérés sur les paysages géomorphologiques, cette tendance à réduire l'étude des dynamiques morphogéniques à des bilans sédimentaires a été fortement critiquée par nombreux auteurs dont Tricart (1961) qui la considère comme une approche qui tend « à mathématiser les problèmes afin de les ramener sur un terrain où ils se sentent sûrs d'eux-mêmes bien que dans bien des cas aboutissent à des résultats non pertinents et non concordants avec une nature changeante et diverse ». dans ce contexte algérien, l'approche quantitative du bilan sédimentaire basée sur des modèles mathématiques a marqué incontestablement le paysage scientifique où un nombre foisonnant d'études a été réalisé par des auteurs de diverses disciplines à savoir la pédologie (Benkadja et al., 2015 ; Touaibia et al., 2000),

l'hydraulique et l'hydrologie et bien d'autres spécialistes des géosciences (Probst et Amiotte Suchet, 1992 ; Bourouba, 1998-a, 1998-b, 1996 ; Kassoul *et al.* 1997, 1999 ; Achite et Ouillon, 2007; Megnounif *et al.*, 2007, 2003 ; Ghenim *et al.*, 2007 ; Ghenim *et al.*, 2008 ; Abdi et Meddi, 2015).

A ce jour, cette approche est largement sollicitée dans le milieu scientifique algérien, notamment universitaire. Le constat fait état d'une divergence autour du concept de dynamique du milieu physique (Neboit-Guilhot, 1999) ce qui fait que les efforts consentis et les approches adoptées en Algérie ne sont pas réunis autour d'un concept commun de la dynamique des paysages géomorphologique et ses composante associées (Flore et faune) ou il s'impose de concilier les deux approches, quantitative et qualitative, pour concevoir un instrument de travail efficient qui servirait de base dans toute action menée sur le milieu physique et écologique. Par ailleurs, dans l'autre rive de la méditerranée au nord et à degré plus important dans les écoles des continents d'Amériques, des nouvelles approches ont connu un fulgurant essor, il s'agit surtout de celles basées sur l'évolution des paysages écologiques en rapport avec la dynamique morphogénique (Biogéomorphologie) (Díaz-Redondo, 2018, Doublas et al., 2015; Lavorel et al., 1998, Stallins, 2006 ; Turner, 2010 ; Sirami et al, 2010, Malavoi and Souchon, 1996 ; Gurnell, 1997; Corenblit, 2009).

Partant du cadre conceptuel du sujet de recherche et de la problématique, notre recherche s'attache aux **hypothèses** suivantes :

Hypothèse 1 : Les approches quantitatives basée sur les bilans sédimentaires sont insuffisantes pour caractériser une dynamique morphogénique et qui 'il est nécessaire d'associer d'autres approches qualitatives afin de traduire aussi fidèlement la réalité morphogénique des milieux physiques.

Cette hypothèse suggère une intégration épistémologique et méthodologique entre les deux paradigmes.

- L'approche géographique qualitative permet une lecture globale, contextualisée et systémique des formes du relief, en intégrant les dimensions spatiales, temporelles écologiques et humaines.
- L'approche empirique quantitative, issue des sciences physiques et mathématiques, permet de modéliser les processus et de mesurer les flux, les bilans et les dynamiques.

- Leur complémentarité pourrait offrir une représentation plus exhaustive et fidèle de la morphogenèse, en évitant les limites du réductionnisme quantitatif et du subjectivisme descriptif.

Hypothèse 2 : la théorie du déterminisme géomorphologique en écologie peut être appliquée **dans un sens inverse pour** s'apparenter aux deux approches (géographique et empirique) afin de les affiner et d'expliquer aussi tangiblement la dynamique des paysages géomorphologiques, ainsi d'asseoir une approche méthodologique intégrée dans les études des dynamiques des paysages géomorphologiques.

Cette hypothèse propose une transversalité des concepts qui consiste à faire passer le déterminisme géomorphologique (selon lequel le relief et la structure contrôlent les processus naturels et les formes d'organisation spatiale) dans le champ de l'écologie.

- Cela revient à considérer les contraintes et potentialités morphologiques comme des facteurs écologiques déterminants dans la genèse, la distribution et l'évolution des écosystèmes.
- En sens inverse, l'écologie peut fournir à la géomorphologie des indicateurs dynamiques (couverture végétale, occupation du sol, succession écologique) révélant l'état et l'évolution des formes.

Le schéma ci après (fig.5) offre un synoptique sur le sujet de thèse, les questions centrales et les hypothèses énoncées :

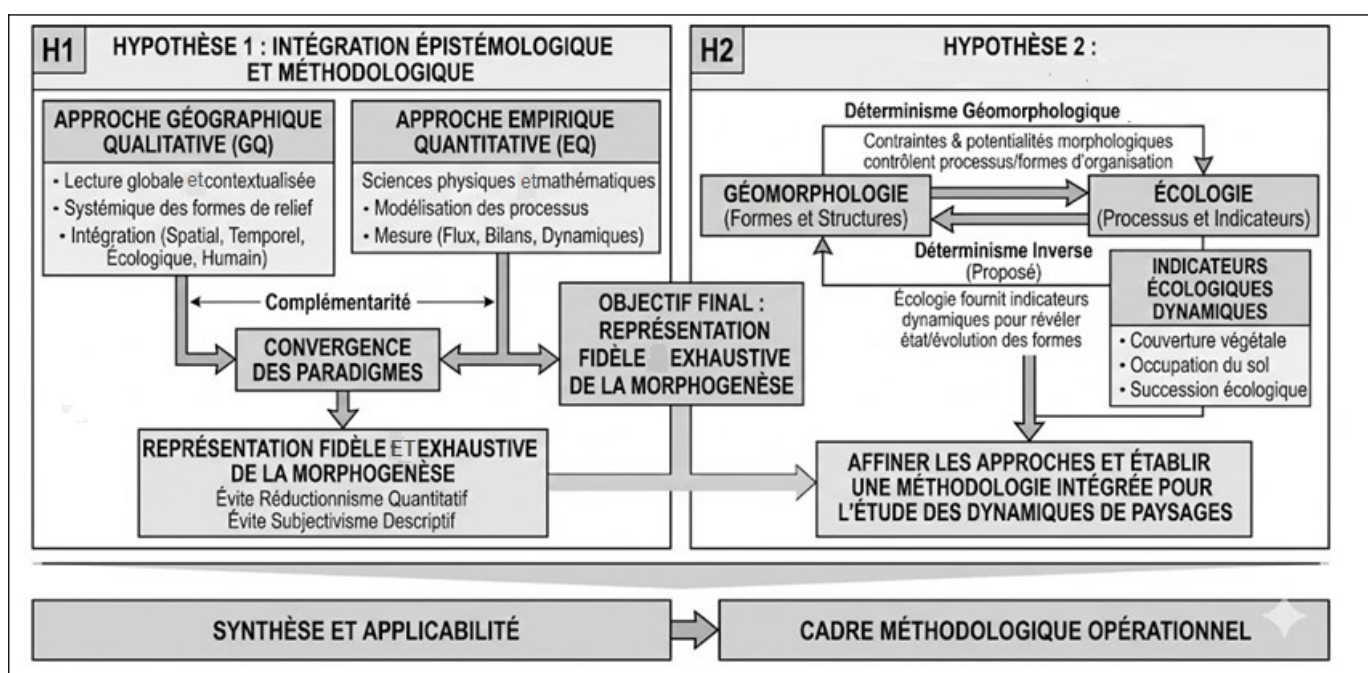


Figure 5: synoptique sur les sujet de thèse, les questions centrales et les hypothèses énoncées

Les objectifs de la thèse :

En se référant à la problématique et en cohérence avec les hypothèses énoncées, les objectifs se décomposent en objectif global et en objectifs spécifiques.

L'objectif global : Est de contribuer modestement et de manière originale et significative à faire avancer les connaissances dans les approches scientifiques appliquées dans les études des dynamiques géomorphologiques en introduisant la dimension paysagère écologique notamment dans le contexte Algérien , en complétant les approches actuelles qui sont largement appliquées en dépit des éventuelles insuffisances et incohérences qui pourraient les entacher.

Les objectifs spécifiques se résument dans les points suivants :

- Évaluer la dynamique morphogénique dans le domaine tellien dans l'Algérie du nord soumis aux influences des changements globaux et les dynamiques socioéconomiques .
- Établir un bilan sur les tendances évolutives des paysages écologiques notamment en milieu fluvial.
- Produire une matière scientifique qui servirait de référence à des projets de recherches similaires mais aussi pour usage en lien avec le développement durable et les politiques territoriales.
- Éprouver des approches et des outils techniques de modélisation numérique et d'analyse spatiale (Outils, SIG, télédétection, métriques paysagères ...etc)

Originalité de la recherche :

La présente recherche tire son originalité à partir de la problématique du thème proposé dans le contexte géographique appartenant à la rive sud de la méditerranée où la thématique relative au sujet des dynamiques géomorphologiques en liaison avec l'évolution des écosystèmes n'est pas encore explorée, et dans un sens inverse, la recherche vise à introduire une lecture géo écologique des processus morpho dynamiques. En outre, l'originalité méthodologique et empirique se propose par l'introduction des métriques paysagères dans l'étude de la dynamique des formes sédimentaires en milieu fluvial (hydro géomorphologie) avec un croisement

corrélatif entre les événements hydrologiques, morphogéniques, écologiques et l'anthropisation.

Structure de la thèse :

Suivant un ordre logique, d'une part qui se conforme aux exigences des travaux scientifiques, d'autre part qui s'accorde avec la problématique et les hypothèses énoncées, nous avons structuré le travail en quatre chapitres : **Le premier est consacré** à la présentation du cadre méthodologique du travail de recherche, ainsi la présentation du cadre géographique et hydro climatique du bassin versant étudié.

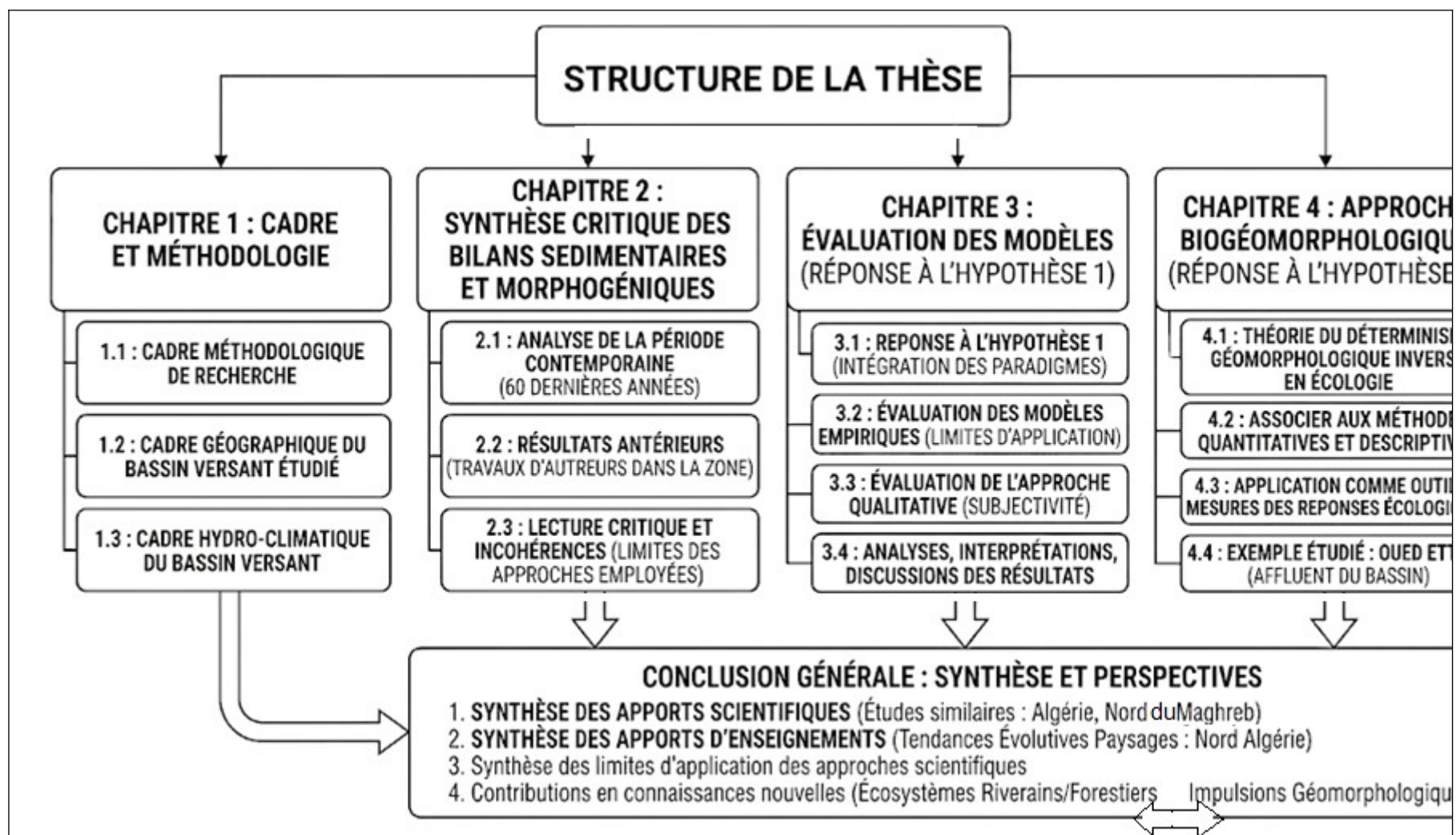
Le chapitre 2 dresse une synthèse sur les bilans sédimentaires et morphogéniques ayant marqué le bassin versant durant la période contemporaine des 60 dernières années. Cette synthèse est établie sur la base d'un nombre de résultats antérieurs réalisés par des auteurs ayant travaillé sur notre zone d'étude. Une lecture critique est faite sur les insuffisances et les incohérences probables liées aux approches employées.

Le chapitre 3 est consacré pour répondre à l'hypothèse 1. Dans ce chapitre il est question d'effectuer une évaluation objective de la limite d'application des modèles empiriques dans la caractérisation morphogénique des milieux physiques, ainsi, on évaluerait les limites d'application de l'approche qualitative qui tend à subjectiviser les phénomènes morphogéniques. Des analyses, des interprétations et des discussions suivront les résultats.

Le chapitre 4 se propose par l'application de l'approche biogéomorphologique comme outils de mesures des réponses écologiques aux événements géomorphologiques opérés dans le bassin versant, l'exemple étudié est Oued Etteba qui est un des affluents important du bassin versant d'Ighile Emda. Ce chapitre se propose pour répondre à l'hypothèse 2 selon laquelle il est supposé qu'il y a possibilité d'appliquer dans un sens inverse la théorie du déterminisme géomorphologique en écologie, ainsi d'associer cette approche aux méthodes quantitatives et descriptives afin de les affiner et d'expliquer aussi tangiblement la dynamique des paysages géomorphologiques.

Dans La conclusion générale, une synthèse sur les apports scientifiques de la recherche en matière d'approches utiles pour mener des études et des recherches similaires dans d'autres contextes géographiques, notamment algérien et du nord maghrébin en général, d'autre part, les apports en enseignements sur les tendances évolutives des paysages du nord d'Algérie en particulier. Dans la conclusion, on s'attèle à établir une synthèse sur les limites d'application

des approches scientifiques dans l'évaluation des systèmes morphogéniques, ainsi à évoquer les contributions en connaissances nouvelles sur les traits évolutifs des écosystème (riverain et forestier) en relation avec les impulsions géo morphogéniques.



Chapitre 1 :

Cadre méthodologique global et présentation de la zone d'étude

Introduction

Le cadre méthodologique vise à articuler l'intérêt d'appliquer l'approche biogéomorphologique pour caractériser aussi tangiblement les dynamiques des systèmes géomorphologiques des versants et des systèmes hydro morphologiques fluviaux dans une région méditerranéenne soumise à des forçages d'ordre climatiques et anthropiques qui est le bassin versant de Ighil Emda. Cette approche se propose pour en faire une éventuelle complémentarité aux approches déjà existantes (modélisation quantitative et analyse descriptive) dont l'hypothèse de la limite d'usage est à confirmer dans la présente recherche.

Par ailleurs les méthodes spécifiques à chaque dimension de l'étude, elles sont détaillées dans les chapitres respectifs correspondants. Dans la présente section il est question d'exposer la logique d'ensemble, les choix scientifiques et les principes d'usage.

Il est estimé que le principe méthodologique qui répond le mieux aux besoins de la présente recherche s'inscrit dans la suite logique ci-après.

- 1- Mettre en évidence l'activité morphogénique, dans notre cas la mise en évidence du phénomène morphogéniques est manifesté par des bilans sédimentaires estimé par des approches de calcul mathématiques. Ce bilan a été obtenu par une revue littéraire des travaux antérieurs réalisés sur la zone d'étude.
- 2- Mettre en évidence les limites d'application des modèles empiriques de calcul d'érosion dans l'estimation des bilans sédimentaires et morphogénique avec une présentation des alternatives qui pourraient s'imposer comme des approches fiables, complémentaires et pertinentes.
- 3- Suivi et analyse corrélative de l'évolution du paysage géo écologique et la dynamique hydro géomorphologique au niveau d'un fond de vallée.

Cette suite logique des étapes ci-dessus suppose à répondre au propos suivant : « Pour interpellier l'application de l'approche biogéomorphologique dans notre zone d'étude, il est question de mesurer quantitativement la dynamique sédimentaire dont les résultats seraient soumis à un examen et une expertise menée en confrontant les valeurs à la configuration du paysage morphodynamique des terrains étudiés, si les valeurs ne reflèteraient pas la réalité, il serait nécessaire d'associer les approches et d'introduire d'autres outils de mesure afin de caractériser le mieux possible la dynamique morphogénique ».

I. Démarches, Données, principes et outils de réalisation de la thèse :

I.1. Les données exploitées :

Pour mener l'étude selon les approches annoncées nous avons procédé à la collecte d'une banque d'information relative au bassin versant étudié, nous avons identifié les détenteurs d'informations à savoir les administrations locales et nationales (ONM, collectivités locales, SONEGAS), les agences de gestion des patrimoines hydriques (ANBT et ANRH...etc.). les données brutes sont les suivantes :

- Informations sur le cadre physique (cartes topographiques, géologiques et géomorphologiques ...etc)
- Annuaire statistiques météorologiques (paramètres climatiques et hydrologiques)
- Données socioéconomiques
- Imagerie satellite et photos aériennes
- des statistiques sur les bilans sédimentaires et données d'archives

I.1.1 Traitement des données :

Les données brutes ont subi des traitements pour pouvoir les rendre exploitables. Il a été question de faire appel à des méthodes et des procédés techniques de traitement cartographique et statistique (SIG et bases de données numériques). Des procédés de correction géométrique ont été appliqués sur les images satellites et les photos aériennes dans l'environnement des systèmes d'information géographiques pour fabriquer des spatio-cartes. Les techniques de classification ont été appliquées sur les images satellites pour en extraire des cartes thématiques relatives aux paysages des sites ciblés.

I.1.2 Outils utilisés :

Il s'agit essentiellement des programmes informatiques suivants :

- **ArcGis, QGis et Global mapper**, utilisés pour les traitements des base de données cartographiques et la classification des images satellites
- **FRAGSTA** est utilisé pour les traitements statistiques des paysages écogéomorphologiques

I.1.3 Le choix de la zone d'étude :

Le choix de la zone d'étude est motivé d'une part par la diversité morpho-structurale et la diversité paysagère dont dispose la région, d'autre part par les traits de dynamique morphogénique ayant marqué la zone durant les six dernières décades d'autant que les influences climatiques méditerranéennes s'imposent comme moments moteurs de la dynamique. Le terrain est situé dans le domaine tellien d'Algérie à la limite des zones côtières de Bejaia Est ce qui fait sa représentativité pour tous l'ensemble tellien. L'unité physique spatiale est le bassin versant qui est une surface délimitée physiquement par une ligne de partage des eaux, c'est dans cette unité de base que s'opèrent tous les phénomènes liés à l'hydrosystème, et les phénomènes morphogéniques et écologiques qui y sont associés.

I.2 Présentation de la zone d'étude :

La zone d'étude qui est le bassin versant d'Ighil Emda fait partie du Tell Nord d'Algérie, partie intégrante de la chaîne des Bâbords en petite Kabylie.

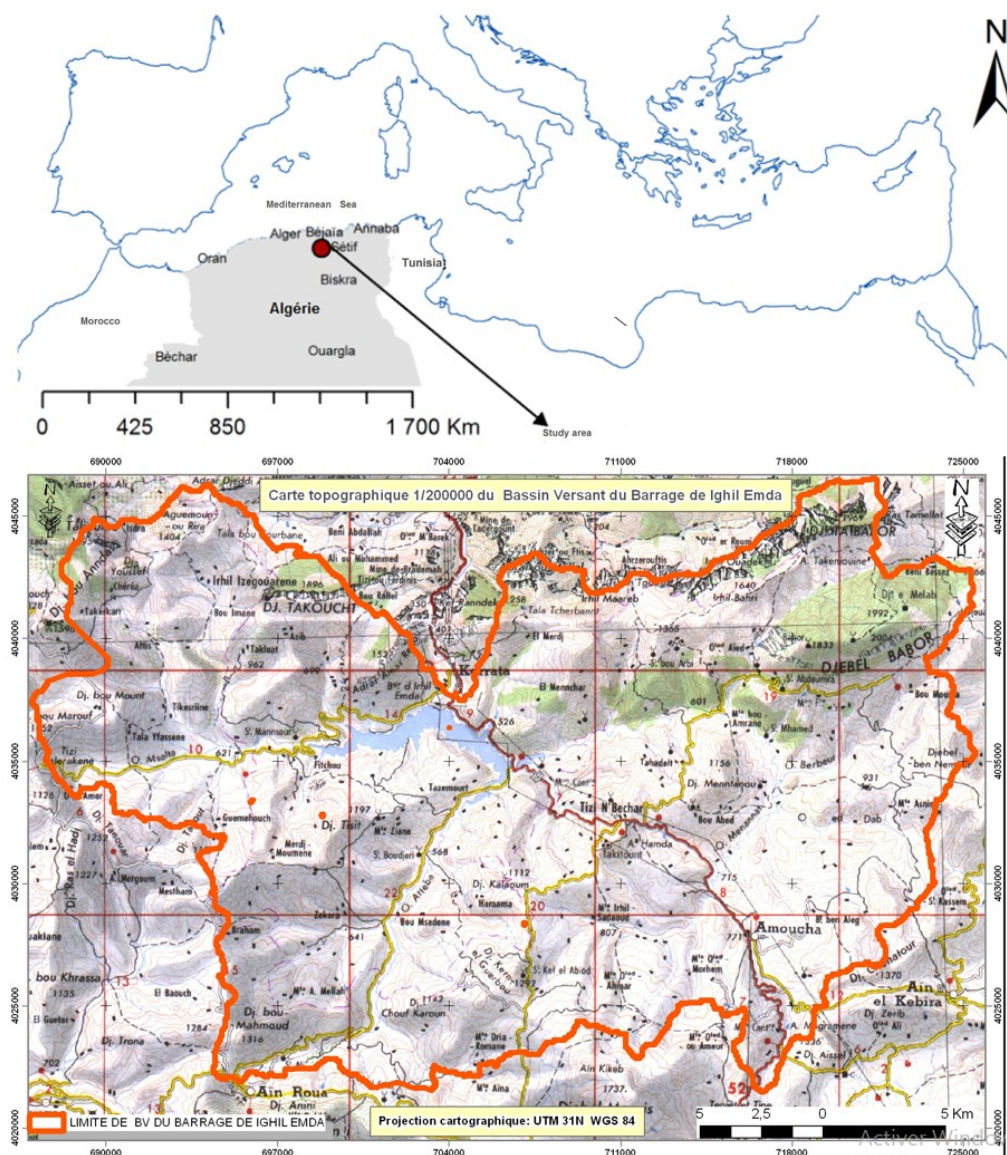


Figure 6: Localisation du bassin versant. (Inct 1963, habillage par l'auteur)

1.2.1 Reliefs et lithologie des terrains du bassin versant :

Les principaux traits topographiques sont les altitudes élevées variant de 500 m à 2000 mètres (fig. 7) au niveau du pic du mont du Babor (Hamdani, 2012 Gabert, 1984).

Le caractère montagneux du bassin versant et les fortes dénivelées ont conféré aux reliefs un aspect à dominance pentu (fig.7) comme l'exprime aussi les valeurs du tableau 1 :

Tableau 1: Répartition statistique des pentes du bassin versant par surface (réalisé par analyse dans le SIG)

De Pente %	à Pente %	Superficie en Km2	Pourcentage
	0 à 10	89,31	14,22
	10 < P <= 20	198,15	31,57
	20 < P <= 35	221,05	35,22
	35 < P <= 45	65,38	10,41
	45 < P <= 60	39,22	6,24
	60 < P <= 75	11,28	1,79
	> 75	3,23	0,514

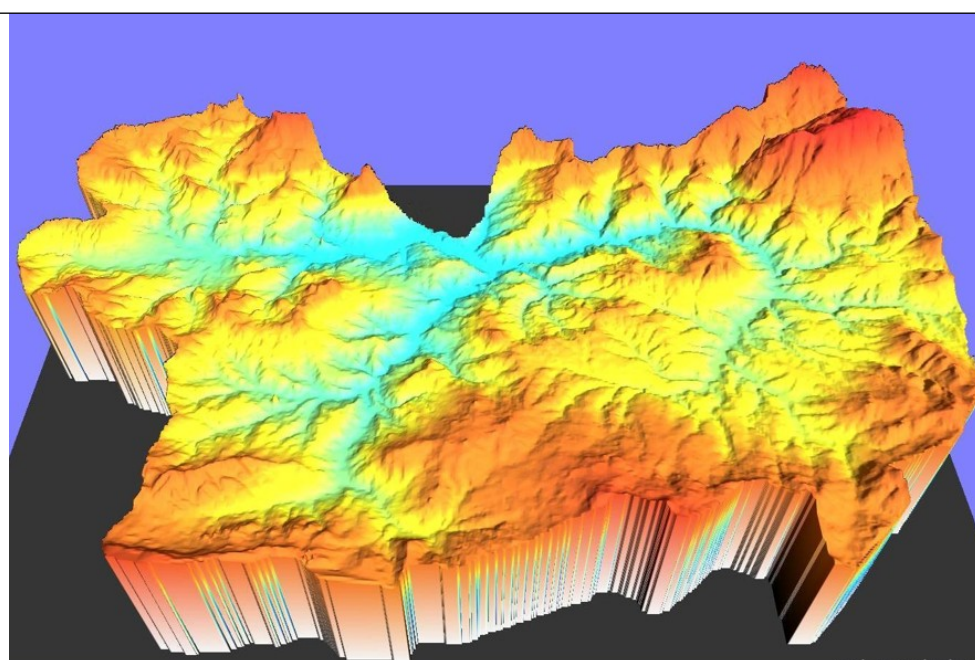


Figure 7: Modèle numérique de terrain du bassin versant d'Ighil Emda.

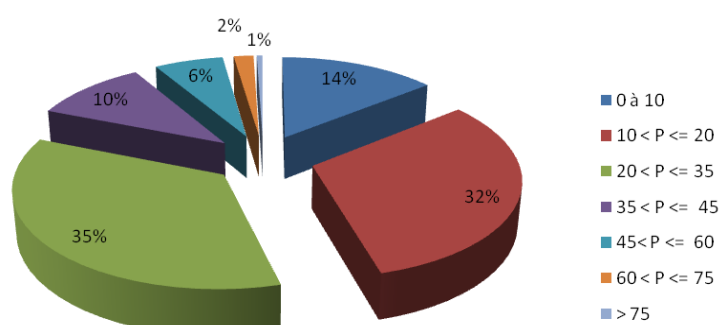
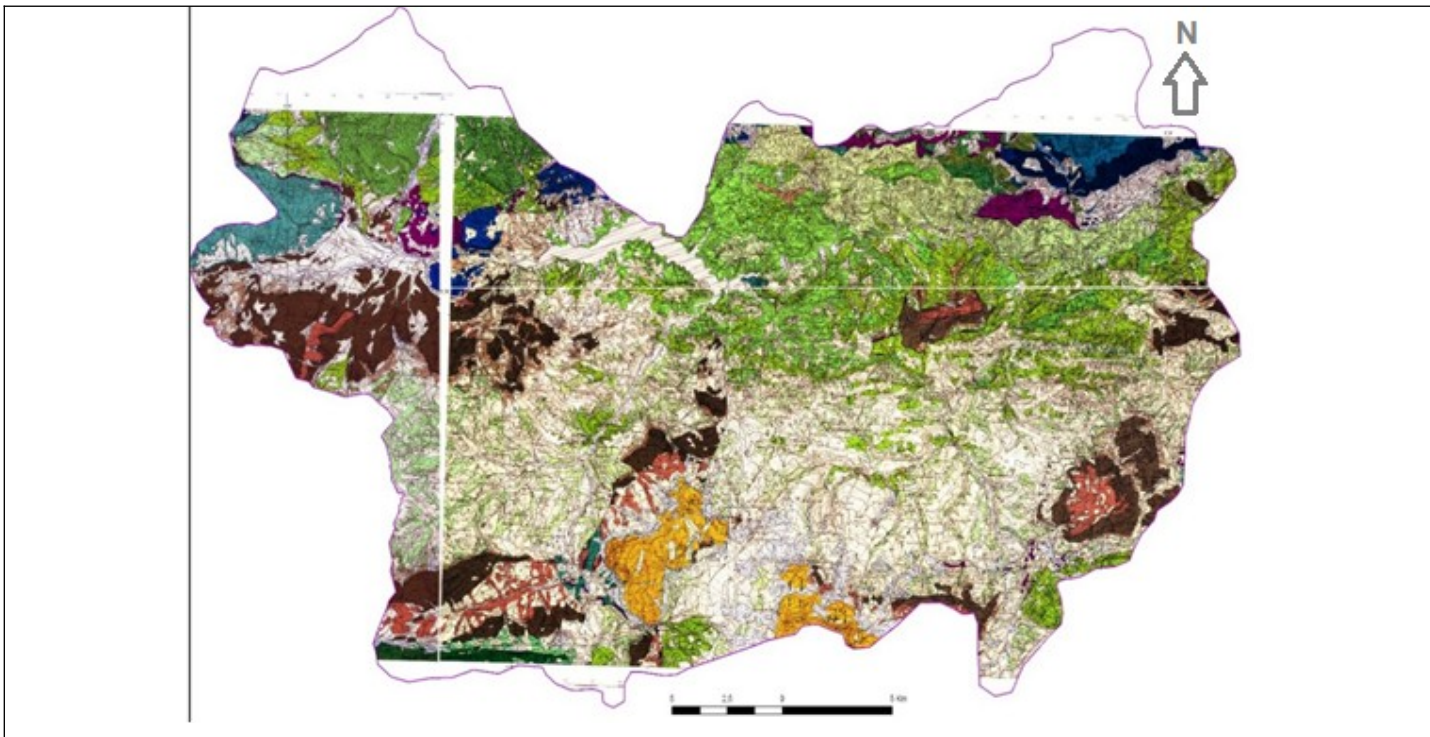


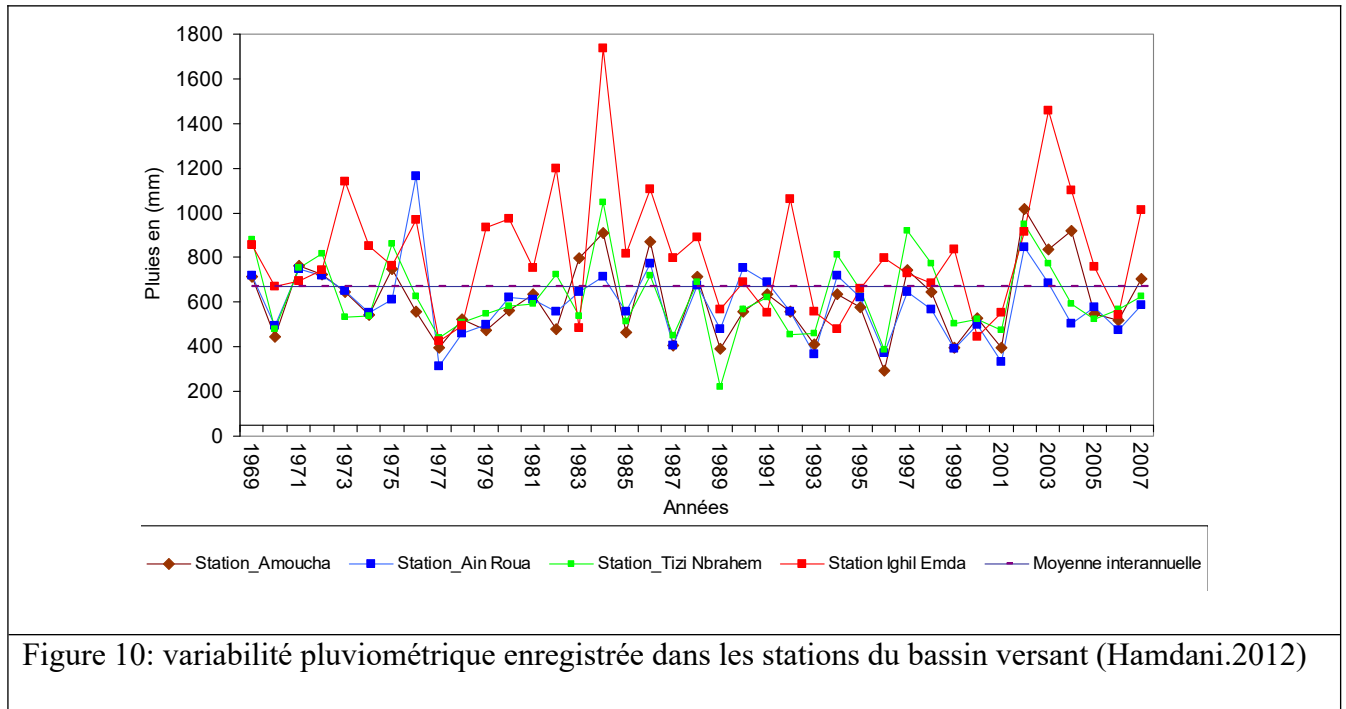
Figure 8: Répartition des surfaces du bassin versant par valeurs des pentes.

La lithologie de la zone d'étude est caractérisée par la prédominance des terrains calcaires et marneux plus ou moins argileux (Gabert, 1984 ; Rothe, 1950) . Les formations superficielles argileuses se localisent sur les petits plateaux intermédiaires, sur les colluvions formées aux pieds des versants et les fonds des oueds (fig.9). La superposition de la carte des pentes du bassin versant avec la carte géologique (Hamdani, 2012) montre que :

- 20 % de la superficie du bassin versant correspond à des terrains calcaires dont les pentes topographiques sont supérieures à 35 %.
- 35 % de la superficie du bassin versant correspond à des terrains marneux dont les pentes topographiques sont comprises entre 20 et 35 %.
- 45 % de la superficie du bassin versant correspond à des formations superficielles argileuses et les alluvions des fonds des oueds dont les pentes topographiques sont inférieures à 20 %.



- a. Les variations pluviométriques interannuelles :** La moyenne des pluies enregistrée dans le bassin versant est estimée à 671 mm dont 193 mm ruissellent sous forme d'apports liquides vers le barrage d'Ighil Emda,. Il est constaté des irrégularités dans la répartition spatiale et temporelle des pluies à l'échelle du bassin versant (Fig. 10).



b. Précipitations mensuelles interannuelles.

La répartition mensuelle des pluies indique des maxima en hiver dépassant 14 % notamment le mois de décembre. Les minima sont atteints en période estivale, notamment entre Juillet et Août (2 %). 42% des précipitations annuelles tombent en hiver, 75 % des précipitations annuelles tombent en l'espace de 6 mois (entre Novembre et Avril).

Tableau 2: Données pluviométriques moyennes mensuelles interannuelles (ANRH 69/07)

	Pluie moyenne mensuelle interannuelle (1969-2007) des quatres staion du bassin versant d'Ighil Emda												
	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	annuel
Pmoy- Amoucha	38,00	41,48	59,53	103,64	82,78	74,73	70,30	59,87	43,4 6	14,30	5,36	11,4 3	604,87
Pmoy- Barrage Ighil Emda	39,04	59,87	85,41	168,03	122,9 6	107,23	102,08	80,27	38,2 0	13,46	4,19	8,28	829,02
Pmoy- Tizi N'Brahem	32,6	56,0	66,9	102,8	89,3	74,9	74,5	65,4	38,6	12,6	2,1	5,6	621,3
Pmoy- Ain Roua	44,43	40,59	62,31	89,96	75,97	65,70	72,13	64,57	50,0 0	16,03	9,60	11,2 9	602,58

c. Précipitations journalières maximales

Les valeurs relatives aux pluies journalières maximales ont été obtenues auprès de l'ANRH, une série d'observation de 39 ans au niveau de trois stations.

Les données des pluies journalières maximales interannuelles sont résumées dans le tableau ci-après :

Tableau 3: Caractéristiques des pluies maximales journalières, source ANRH (1969 -2007)

N°	Station	X	Y	N ^{bre} d'années	Pjmax [mm]	Ecart- type [mm]	Cv	i.conf 80% [mm]	Pjma x min [mm]	Pjma x max [mm]
1	Ain Roua	722900	399950	37	48,77	15,53	0,31	3,2690 6147	21	82,5
2	Amoucha	743600	346150	39	52,58	20,49	0,38	4,2008 23	24	109,5
3	Tizi N'Brahem	714450	354100	36	62,87	22,31	0,35	4,7601 693	24	108

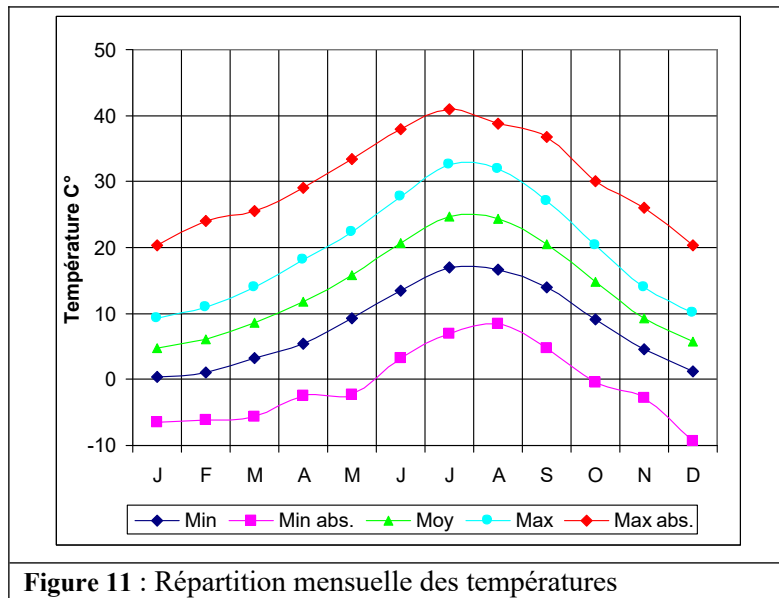
I.2.2.2 La température

Les températures de l'air dans la zone d'étude varient selon les saisons et selon la période journalière. La valeur moyenne est estimée à 13,9°. Les valeurs extrêmes (min et max) enregistrées dans l'annuaire météorologique sont respectivement (-9 °) en hiver et 41 ° en été.

Tableau 4 : Les températures à la station de Sétif (° C).SELTZER

MOIS	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	An
Min	0,4	1,1	3,2	5,5	9,2	13,5	16,9	16,7	13,9	9,1	4,5	1,3	7,9
Min abs.	-6,4	-6,2	-5,6	-2,4	-2,3	3,2	7,0	8,4	4,8	-0,5	-2,8	-9,3	-9,3
Moy	4,8	6,1	8,6	11,8	15,8	20,6	24,7	24,3	20,45	14,8	9,3	5,7	13,9
Max	9,2	11,0	14,0	18,1	22,4	27,7	32,5	31,9	27,00	20,4	14,0	10,1	19,9
Max abs.	20,4	24,1	25,6	29,0	33,4	38,0	41,0	38,8	36,8	30,1	26,0	20,4	41,0

L'amplitude thermique annuelle est donc de 31,7°C. La forte amplitude diurne annuelle au niveau du bassin versant s'explique par le fait de soustraction de l'effet régulateur de la mer. La soustraction, de la zone d'étude, à l'influence maritime est due essentiellement à l'influence des massifs montagneux des Babors qui constituent une barrière qui tourne le dos à la mer. La position latitudinale est une cause importante de la forte amplitude diurne.



La représentation de la courbe Ombrothermique (Fig 12) indique deux périodes climatiques distinctes qui caractérisent le bassin versant, une période sèche qui s'étale de mi-Mai à mi-Septembre et une période fraîche et humide qui s'étale de de Octobre à Avril.

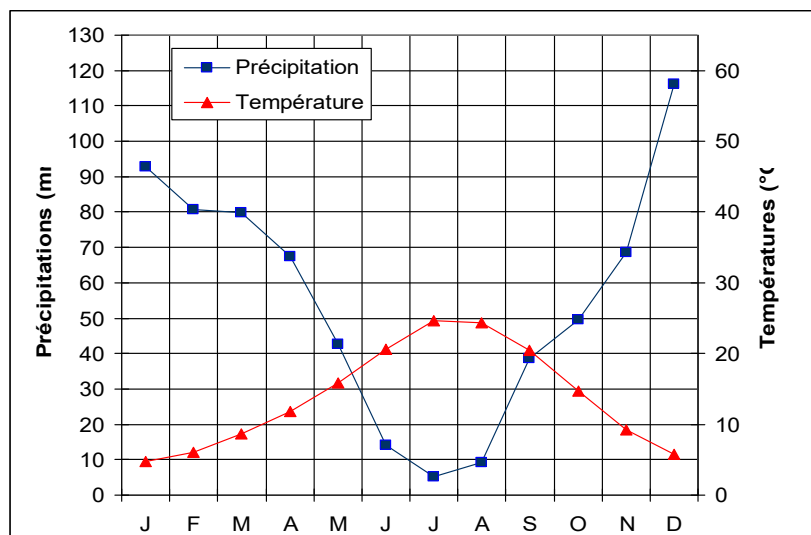


Figure 12: courbe Ombrothermique (sur une série de 28 ans)

I.2.2.3 L'hydrographie et les sous bassins versants :

Le chevelu hydrographique du bassin versant d'Igil Emda est d'une ramification remarquable (Fig.6). Cette configuration traduirait une activité hydrologique et morphogénique très intense comme l'expriment la densité de drainage et le rapport de confluence (Cudennec, 2004 ; Rogers and Singh,1998) . Sa hiérarchisation est exprimée graphiquement et statistiquement comme l'indiquent la Fig.13 et le tableau. Le bassin versant se subdivise en quatre sous bassin versants important comme le montre la Fig 13.

Tableau 5: statistique du réseau hydrographique du bassin versant (E par analyse SIG)

Bassin	Ordre	Nombre	Longueur	Rc	Rc m	Dd		Ct
Ighil Emda	1	6040	5437	3,73	6,5	13	12	120,4
	2	1618	2588	5,48				
	3	295	295	4,33				
	4	68	170	4,25				
	5	16	87	4				
	6	4	26,3	4				
	7	1	18	-				

Rc : Rapport de confluence ; Dd : Densité de drainage ; Ct : coefficient de torrentialité

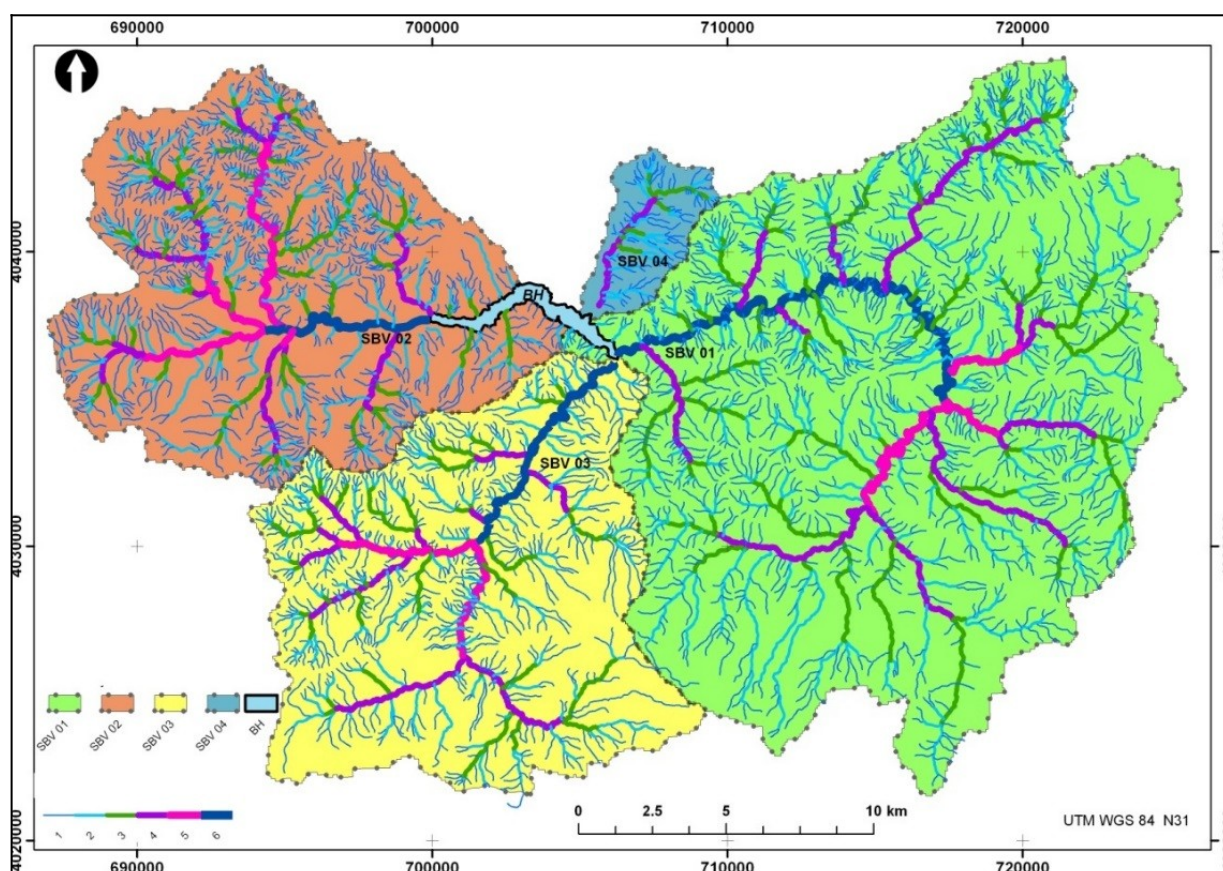


Figure 13 : Réseau hydrographique et principaux sous bassins versants (Auteur).

SBV1 : sous bassin versant de l'oued Elbared. SBV2 : sous bassin versant de l'oued M'barek.

SBV3 : sous bassin versant de l'oued Etteba : SBV4 : sous bassin versant de l'oued Takerboust.

BH : barrage hydraulique.

1 : cours d'eau d'ordre 1. 2 : cours d'eau d'ordre 2. 3 : cours d'eau d'ordre 3. 4 : cours d'eau d'ordre 4. 5 : cours d'eau d'ordre 5. 6 : cours d'eau d'ordre 6.

I.2.2.4 L'évaporation :

Le facteur d'évaporation est soumis à l'impact des températures (fig.14) et la configuration du paysage géomorphologique. La zone d'étude enregistre annuellement un cumul d'évaporation potentiel sur nappe libre estimé à 1550 mm (ANRH). Ce facteur joue un rôle très important dans le contrôle de la croissance de la biomasse et même la typologie des espèces floristiques (Zhang et al, 2001 ; Le Maitre et Versfeld, 1997).

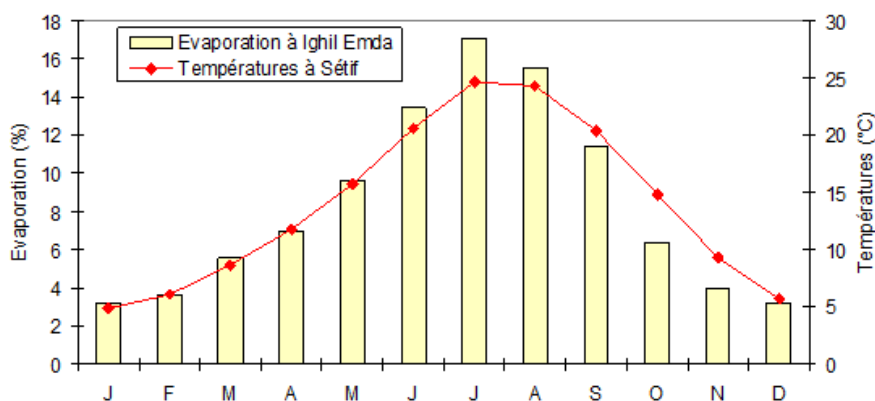


Figure 14 : Répartition mensuelle de l'évaporation au barrage de Ighil Emda(ANRH).

I.2.2.5 L'hydrologie et les ruissellements :

L'hydrosystème du bassin versant d'Ighil Emad draine une surface d'environ de 650 km², les écoulements s'acheminent vers le barrage hydraulique de Kherrata situé à l'exutoire dont la capacité de stockage initiale était de 150million m³. Pour une lame d'écoulement moyenne annuelle de 193 mm, les apports liquides correspondant sont de l'ordre 125 million m³, cela s'explique par le régime d'écoulement à caractère torrentiel mais aussi par une activité hydrodynamique significative et un système géomorphologique contrasté. Une série statistique des apports liquides mesurés au niveau du barrage (Tableau.3) a permis d'obtenir un modèle statistique ajusté à la loi de Gumel et qui donne la relation des apports en fonction des fréquence de retour des apports de la série statistique (fig.15) .

Tableau 6: statistiques des mesures d'apports liquide au niveau du bassin versant (Archive SONELGAZ, 1953-1968)

Année	Apports liquide (Hm3)	Année	Apports liquide (Hm3)
1953	182,4	1961	103
1954	260,4	1962	219
1955	126,8	1963	90
1956	316,4	1964	165
1957	278	1965	204
1958	250	1966	125
1959	249	1967	219
1960	174	1968	142

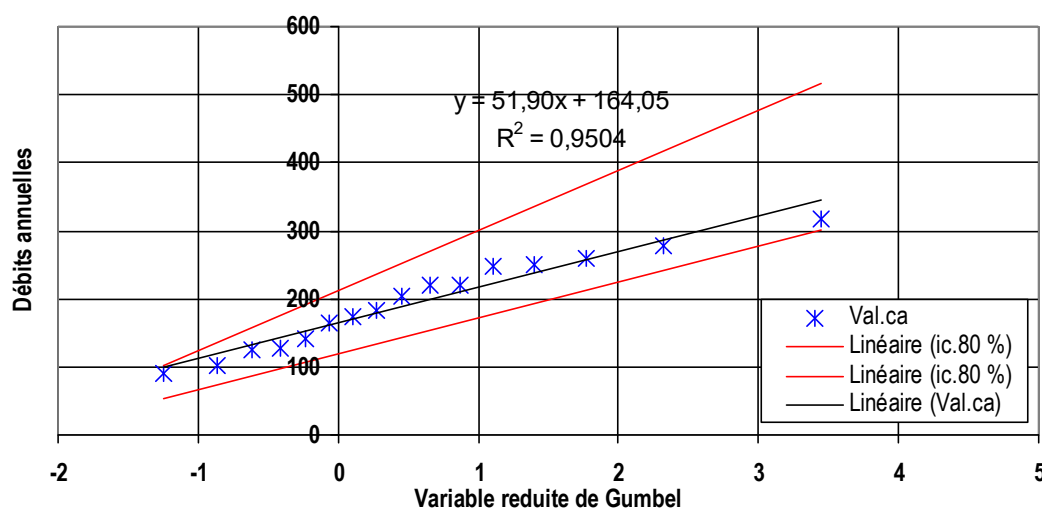


Figure 15: Ajustement statistique des apports liquides annuels à loi de Gumbel (Hamdani 2012)

I.2.2.6 Récapitulatif des caractéristiques physiques et hydro climatique de la zone d'étude :

L'analyse du milieu physique montre que le bassin possède un relief contrasté, caractérisé par des altitudes moyennes à forte et des pentes importantes confirmant un caractère montagneux dominant. Ces pentes raides sont des moteurs principaux de la dynamique des formes géomorphologiques notamment les processus d'érosion élémentaire et même les mouvements de masse. La nature lithostratigraphique s'exprime par des alternances entre des roches dures (calcaires) et des matériaux plus tendres et érodables (marnes, schistes). Ces formations plus

tendres sont particulièrement vulnérables aux processus d'érosion hydrique et fournissent d'importantes quantités de sédiments grossiers et fins au réseau hydrographique.. Le climat est surtout à caractère méditerranéen des zones de montagnes, caractérisé par des précipitations fortement saisonnières et irrégulières. Le caractère orageux de certains épisodes pluvieux (en automne et en hiver) est un facteur déclencheur des processus érosifs. Le caractère hiérarchisé et dense du réseau hydrographique témoigne de réponses hydrologiques et hydromorphologique très significatives aux pluies, d'autant que la torrencialité et les temps de concentration des eaux pourraient influencer les débits des cours et l'énergie cinétique des courant pour ainsi conduire de d'importantes charges sédimentaires. Les Caractéristiques présentées sur la zone d'étude reflètent clairement la typicité du domaine tellien de l'Algérie du nord. Complexité et hétérogénéité topo-morphologique et géologique vulnérables à l'attaque par les agents climatiques et les aléas naturels. Donc, il est supposée à priori qu'il existe des conditions propices pour les activités morphogéniques, hydrodynamiques et écologiques assez prononcées.

Chapitre 02

Bilans sédimentaires et morphogéniques dans le bassin versant. (Synthèse des résultats antérieurs)

Introduction

Dans ce chapitre, il convient de préciser que l'optique est de dresser un bilan sédimentaire et morphogéniques dans le bassin versant, on se base sur des résultats antérieurs, mais aussi on s'attèle à se faire une idée sur l'ordre de grandeur et l'intensité des activités morphogéniques induites par les activités érosives opérées au niveau du bassin versant étudié, d'autre part, on s'attèle à faire une évaluation critique sur le degré de pertinence et les lacunes de ces bilans, obtenus par différentes approches à des dimensions multi échelles, cette évaluation est faite à travers des arguments objectifs. Donc, il est question de s'inscrire dans une démarche qui consiste à expertiser les résultats d'application de telles approches et de dégager des éléments de réflexion qui aideraient à saisir la réalité des phénomènes étudiés. Les résultats d'expertise obtenus dans la présente section de la thèse nous mèneront à pousser nos arguments à travers une évaluation concrète et tangible des limites d'usage des approches habituelles au quelle le chapitre 3 lui est réservée.

II.1 Historiques des études antérieures sur les bilans sédimentaires et la morphogénèse au niveau du bassin versant d'Ighil Emda:

Une revue littéraire sur les travaux publiés ayant été consacrés à la thématique d'érosion du sol et la géomorphologie font état d'un nombre insignifiant et un manque notoire en terme d'informations sur le milieu du bassin versant compte tenu de la taille du bassin versant qui avoisine 650 km², mais aussi compte tenu de la diversité et de l'hétérogénéité topomorphologique, géologique, hydrologique et socio-écologique.

Trois auteurs avaient consacré des travaux sur l'érosion des sols et la morphogénèse dans la région, il s'agit des travaux de Bougherrara (1986), les travaux de Remini (1995) et le projet de thèse de magister de Hamdani (2012).

II.1 Les travaux de Bougherrara (1986) :

L'auteur a fait un essai de quantification de l'érosion dans le bassin versant d'Ighil Emda, et en a déduit les formes morphogénétiques (modifications du relief, ravines, recul des versants, transferts solides).

II.1.1 Les résultats des bilans sédimentaires,

Les bilans avancés dans l'étude (Bougherra, 1986) sont des valeurs estimées sur la base d'une observation effectuée sur le terrain avec une approche descriptive associant une extrapolation par analogie aux zones situées dans le contexte géographique du nord de l'Algérie. Il faut souligner qu'à cette époque des insuffisances notoires en outils et moyens d'études ont caractérisé le paysage scientifique, cela a constitué une faiblesse dans les approches utilisées. Suivant les contextes géologique et topographique, l'auteur estime que les taux d'érosion varient de 1500 à 3000 t/km²/ an sans pour autant effectuer une spatialisation du phénomène, autrement dit , aucune précision ne situe la distribution spatiale des zones sources de production des sédiments et les secteur d'accumulation.

II.1.2 Le bilan morphogénique :

Selon l'auteur (Bougherrara,1986), le bilan dressé, bien que descriptif, il reflète une situation assez inquiétante en terme de rupture d'équilibre morphogénique. La morphogénèse s'est manifestée par les formes suivantes :

- Ravinement dans une bonne étendue du bassin versant et des rigoles assez prononcées sur les versants dépourvus de végétation ou sur matériaux faciles à éroder. Cela correspond à un ravinement actif.
- Attaques accrues des versants : creusement actif, recul des fronts de versants, , instabilités le long du profil de certain versant.
- Allongement et densification du réseau hydrographique, notamment par l'entraînement de nouveaux chenaux secondaires et l'incision accrue.
- Transport massif des sédiments vers les fonds de vallées, voir vers l'exutoire du bassin versant, provoquant l'envasement des zones en aval, voir en mer pour les bassins littoraux.

- Modification de la topographie locale : formation de dépôts colluviaux et alluviaux, coulées de masse, ravinements pouvant laisser des escarpements ou des terrasses incisées.
- Impact sur l'occupation des sols et la couverture végétale : les sols superficiels déjà minces peuvent être arrachés, ce qui a entraîné une baisse de la fertilité, une désertification locale partielle, et un changement d'équilibre morphogénétique (le versant passe d'un état d'équilibre à un état d'érosion active).

II.1.3 Les insuffisances liées aux approches adoptées:

Les insuffisances manifestées dans cette approche sont énumérées ci après :

- Absence des valeurs fines et pertinentes sur les taux d'érosion en raison des faiblesses des modèles de quantification d'autant qu'aucune référence de mesure ne pourrait vérifier la véracité des résultats.
- Insuffisance en matière d'outils à l'époque de réalisation de l'étude (SIG, télédétection, modèle d'érosion) ce qui suppose que des incohérences auraient entaché les résultats.
- Absence de cartographie des zones de versants sensibles (fortes pentes, matériaux meubles, faible végétation) afin de d'établir une classification des vulnérabilités et des aléas.

II.2. Les travaux de Remini (1995) :

L'auteur a eu le mérite de publier un premier travail consacré à l'érosion intitulé Envasement du barrage d'IGhil Emda (Algérie) en 1995 où il s'est focalisé essentiellement sur les transports solides des oueds en se basant sur des valeurs issues des campagnes de mesures et des levés bathymétriques effectués sur l'étendue du barrage, un calcul de différence de cubature (volume entre deux levés diachroniques) permettait d'obtenir la quantité des matières sèches entraînées par les oueds et piégées dans le barrage. Quelques travaux de même ordre ont succédé cette étude mais l'approche utilisé était la même avec une élaboration d'un modèle calé sur les valeurs mesurées d'envasement.

II.2.1 les résultats des bilans sédimentaires:

Selon Remini (1995), les taux d'érosion spécifique dans les bassins versants situés dans le Tell Nord peuvent atteindre 5 000 tonnes/km²/an dans certains cas. Dans l'étude consacrée au bassin versant d'Ighil Emda, une étude Hydraulique, les valeurs du bilan sédimentaire ont été traduites sous forme d'indication sur la superficie des terres touchées par l'érosion qui est estimée à 22 354 hectares, sur une superficie totale du bassin égale à 650 km² ou environ 65 000 hectares dont 720,5 hectares sont classés comme « bad-lands ». L'auteur a tenté de spatialiser le phénomène par approche abstraite en indiquant le zonage des zones exposées aux phénomènes érosifs et en classifiant abstraitement l'érodibilité des terrains avec attribution des nuances d'intensité, l'auteur estime qu'à l'échelle du bassin versant :

Les Secteurs stables ou quasi stables étaient d'environ 9 586 hectares (15 % du bassin) où la couverture végétale est bonne et l'érosion limitée. Les secteurs fortement érodés étaient d'environ 619,5 hectares (9,5 %) caractérisés par un ravinement important, des pentes souvent supérieures à 45 % et des sols marneux. Les Secteurs dégradés en stade irréversible (bad-lands) étaient d'environ 720,5 hectares. De plus, la répartition spatiale de l'érosion montre qu'environ ≈24 % du bassin (22 354 ha sur ~65 000 ha) est menacé par une érosion active ou sévère, avec une partie supplémentaire de 720 ha en état d'irréversibilité « bad-lands ».

II.2.2 Bilan morphogénique associé au bilan sédimentaire selon Remini (morphogénèse et effets associés).

Le bilan morphogénique selon Remini peut être exprimé par rapport au colmatage du barrage par les apports solides fins. L'envasement du barrage selon l'auteur (Remini 1994) résulte principalement du transfert massif de matériaux du bassin vers le barrage, ce qui entraîne : une perte de capacité de stockage, une modification de la dynamique hydrologique et une transformation du milieu physique. Cependant, l'auteur n'évoque pas de manière exhaustive les processus et la typologie morphogénétique qui caractérisent les versants,

II.3 Les travaux de Hamdani (2012):

Les travaux menés par Hamdani (2012) sur l'évolution géomorphologique et la morphodynamique du bassin versant du barrage d'Ighil Amda (région de Kherrata) ont permis de quantifier et d'interpréter les processus érosifs actifs ainsi que leurs impacts sur la morphogénèse régionale. L'étude a mis en évidence une dynamique érosive intense,

conséquence directe de conjugaison de facteurs et de processus entre la lithologie fragile (marnes, schistes et flyschs), la pente accentuée, et un régime pluviométrique impulsif et irrégulier.

Selon l'auteur, durant les cinquante dernières années le zone était le théâtre d'une morphogenèse dramatique. L'auteur a mobilisé plusieurs modèles empiriques fondés sur le calcul des débits solides afin de quantifier l'érosion dans le bassin. Une étude diachronique (1960-2008) par photographies aériennes a permis de constater les évolutions morphologiques dans le bassin versant. Ainsi une banque de données a été constituée et structurée via un SIG (Système d'Information Géographique) pour le milieu d'étude.

Tableau 7: Résultat de calcul du transport solide quelques formule empiriques appliquées en Algérie (Hamdani, 2012)

IGHIL EMDA WATERSHED ESTIMATED SEDIMENTS VALUES						
Relation	Symbole	Parameters	SUSPENSION	CHARRIAGE	GLOBAL	
			t/km ² .year	t/km ² .year	m ³ /km ² .year	m ³ /year
				(20% susp.)	Density (t/m ³)=	1,3
FOURNIER I:				1 743	2 266	1 459 304
TIXERONT:	A=	169				
	alfa=	2000	5 873,40	1 174,70	9 162,53	5 900 669,32
GAVRILLOVIC:	Z=	0,875				
	Crm=	1,1				
	T=	1,27				
	qsp=	2190	2 409	482	3 758	2 420 152
HUSSON			4 200	840	6 552	4 219 488
Empirical formula chosen as consistent with experimental measurements.	GAVRILLOVIC:		2 891		3 758	2 420 152

Parmi les formules empiriques testées, la relation de Gavrilović a donné un taux d'érosion de 2891 t/km².an (Tableau.7), et c'est la formule qui a été retenue pour servir de modèle de calcul de la zone d'étude et les zones voisines. Ce modèle a été calé sur des valeurs mesurées dans le barrage d'Ighil Emda dont la moyenne était de 2908 t/km².an. La bonne corrélation entre ces deux valeurs a permis à l'auteur d'adopter la formule de Gavrilović comme celle la mieux adaptée aux conditions physiques et hydroclimatique de la région.

II.3.1 Le bilan sédimentaire :

La lecture des résultats indique une perte de sol très importante dans le bassin étudié qui est se situe dans un contexte méditerranéen. Cela suggère une forte dynamique de transfert sédimentaire vers le barrage situé à l'aval et un envasement rapide.

Selon l'auteur, le bilan sédimentaire enregistré dans le bassin versant varient selon les unités morphostructurales, atteignant localement des valeurs supérieures à 3000 t/km²/an, notamment sur les versants marneux-argileux découverts et fragilisés. Ces taux témoignent d'un déséquilibre morphodynamique marqué et par une évolution accélérée des formes du relief.

Sur le plan processus morphogénique opérant dans le bassin versant, la recherche a mis en évidence plusieurs résultats essentiels :

- L'intensité de l'érosion linéaire se manifeste par une incision accentuée du réseau hydrographique, favorisant la formation de ravines et de badlands sur les versants les plus fragiles.
- Les mouvements de masse (glissements, coulées boueuses) jouent un rôle déterminant dans la redistribution des matériaux, contribuant à l'alimentation sédimentaire du cours principal et du barrage en aval.
- La morphogenèse ayant marqué la période étudiée traduisait un état d'évolution régressive, où l'érosion domine largement sur les processus de stabilisation ou de sédimentation.

II.3.1 Le bilan morphogénique.

L'étude a mis en évidence plusieurs résultats morphogénétiques liés à cette forte érosion et à la dynamique morphologique du bassin :

- Une élévation (exhaussement) des lits des oueds, ce qui signifie que les fonds des cours d'eau s'étaient comblés en sédiments conduisant à un relèvement topographique du lit fluvial.
- Un élargissement des berges par sapement (érosion latérale), ce qui indique que les versants et berges des oueds étaient soumis à des attaques intenses, ce qui accroît la largeur active du cours d'eau et fragilise les versants.

- Le changement morphologique global du bassin au cours de la période 1960-2008 est jugé très important : la forme du relief, l'organisation des versants et du réseau hydrographique ont été considérablement modifiés.

II.4 Synthèse sur les interprétations faites par les auteurs quant aux bilans sédimentaire et les activités morphogéniques:

De ce qui est établi comme revue littéraire sur l'historique des études menées dans le bassin versant, il convient de souligner que les trois auteurs s'étaient focalisés essentiellement sur les bilans sédimentaires où les valeurs avancées dans les trois études suggèrent une divergence remarquable. Les deux auteurs (Hamdani, 2012 ; Bougherrara, 1986) ont relativement manifesté un certain intérêt à l'aspect morphogénique à travers des relevés cartographiques très localisés, en raison de leurs profils de géographe, mais sans pour autant l'exprimer par une approche cartographique conventionnelle et appropriée en l'occurrence la cartographie géomorphologique détaillée qui est un outil de base. Par ailleurs, l'auteur (Remini, 1995) a accordé toute son attention aux mesures des valeurs absolues des dépôts sédimentaires estimés dans le barrage situé en aval en laissant place à une interprétation abstraite sur la distribution spatiale du phénomène érosif et morphogénique.

Le tableau suivant est une synthèse récapitulative de la revue littéraire faite sur les contributions, les méthodologies et les insuffisances identifiées pour chacun des trois principaux auteurs ayant traité le sujet de l'érosion, les bilans sédimentaires et la morphogénèse dans le bassin versant du barrage d'Ighil Emda .

Tableau 8: Synthèse de revue littéraire sur les travaux menés dans la zone d'étude ayant rapport avec les bilans sédimentaires, transport solides et la morphogénèse.

Auteur	Approche Méthodologique	Principaux Apports	Limites et Insuffisances (Sédimentaire)	Limites et Insuffisances (Morphogénèse)	Shortcomings Communs et Critique Épistémologique
Bougherrara (1986)	Descriptive et Estimative : Observation de terrain, extrapolation par analogie géographique.	Estimation des taux d'érosion (1500-3000 t/km ² /an). Description qualitative des formes actives (ravines, rigoles, recul de versants).	Absence de valeurs fines et pertinentes, faiblesse des modèles de quantification, manque de référence de mesure.	Approche purement descriptive, absence de spatialisation, manque de cartographie des zones sensibles.	Tendance Dogmatique : Interprétation de chiffres absolus comme une réalité globale pour tout le bassin, masquant l'hétérogénéité spatiale. Approche statistique globale plutôt que géographique intégrée.
Remini (1995)	Hydraulique et Bathymétrique : Mesures et levés bathymétriques au barrage, calcul de cubature.	Estimation des taux (jusqu'à 5000 t/km ² /an), classification de l'area affectée. Description de l'impact sur le barrage (colmatage, perte de stockage).	Spatialisation abstraite, classification de l'érodibilité abstraite.	Manque de typologie exhaustive des processus de versants.	-
Hamdani (2012)	Géomorphologique, Modélisation et SIG : Modèles empiriques, photo-interprétation diachronique, Système d'Information Géographique.	Quantification d'érosion intense (modèle Gavrilović validé à 2891 t/km ² /an vs 2908 mesurés). Identification d'une dynamique régressive, incision, mouvements de masse, exhaussement des lits.	Modèles empiriques, validité limitée à l'échelle globale.	Relevés cartographiques localisés, absence de cartographie géomorphologique détaillée et conventionnelle.	-
Synthèse Critique Commune	-	Focalisation sur les bilans sédimentaires. Divergence	Interprétation Abstraite : Généralisation des chiffres		

		remarquable des valeurs quantitatives. Intérêt géographique (Bougherrara, Hamdani) vs volumetric (Remini).	absolus, masquant l'hétérogénéité spatiale. Approche statistique globale.		
--	--	--	---	--	--

Conclusion:

Une des conclusions tirée à partir des travaux menés sur la thématique des bilans sédimentaires est que nombreux auteurs tendent à interpréter les chiffres absolus (produits d'érosion) comme une réalité qui se généralise à l'ensemble d'espace géographique étudié en l'occurrence le bassin versant. Alors qu'une des réalités incontestables est que le phénomène d'érosion des sols est géographiquement spatialisé, c'est-à-dire que sa distribution est intimement liée à l'hétérogénéité spatiale et intrinsèque des composantes du milieu physique du bassin versant. Donc cette tendance dogmatique a souvent biaisé l'analyse environnementale et géomorphologique, en masquant les interactions spatiales entre les facteurs qui composent le paysage géomorphologique (Fig.), il convient dans ce contexte de retenir que lorsque les résultats d'une étude portant sur la dynamique morphogénique, qui est un phénomène spatial, sont exprimés uniquement sous forme de valeurs quantitatives non spatialisées, ils relèvent d'une approche statistique globale plutôt que géographique intégrée qui se propose comme solution fiable .

Ainsi, une telle représentation, bien que pouvant indiquer des tendances générales du phénomène, demeure épistémologiquement limitée, car elle ne reflète ni la variabilité spatiale, ni les interactions territoriales propres à la dynamique géomorphologique, et c'est dans cet ordre d'idées que se propose le chapitre 3 afin de mettre en évidence les limites d'application des approches quantitatives basées sur les bilans sédimentaires estimés par le calcul de l'érosion hydrique.

Chapitre 3 :

Dynamique morphogénique, entre modélisation d'érosion et approche qualitative géomorphologique.

Introduction :

De ce qui est développé dans le chapitre 2, il est bien supposé que lorsque les résultats d'une étude portant sur la dynamique morphogénique, qui est un phénomène spatial, sont exprimés uniquement sous forme de valeurs d'érosion quantitatives non spatialisées, ils relèvent d'une approche statistique globale plutôt que géographique intégrée. C'est dans ce contexte scientifique que se propose le présent chapitre pour répondre d'une part à l'hypothèse 1 selon laquelle on suppose que les approches quantitatives (bilan sédimentaire) sont insuffisantes pour caractériser une dynamique morphogénique et qu'il est nécessaire d'associer d'autres approches qualitatives spatialisées afin de traduire aussi fidèlement la réalité morphogénique des milieux physiques. Ainsi on essayera de démontrer les propos que nous avons tenu quant aux insuffisances qui entachent les analyses et les interprétations des résultats obtenus par les approches quantitatives basée sur l'estimation du bilan d'érosion des sols. Dans ce contexte, nous nous attacheront à effectuer une évaluation objective de la limite d'application des modèles empiriques dans la caractérisation morphogénique des milieux physiques, ainsi, on évaluera les limites d'application de l'approche qualitative qui tend, à son tour, à subjectiver les phénomènes morphogéniques. Des analyses, des interprétations et des discussions suivront les résultats.

III.1 Terrain d'étude :

Le terrain d'étude ciblé pour opérer notre expertise (fig.16) est choisi sur la base d'un nombre de paramètres et de critères d'ordre naturel à savoir l'hétérogénéité morpho structurale et géologique, des critères d'ordre hydrologique et anthropique où toutes les formes et processus morphogéniques sont réunis dans cette zone. Le terrain est inclus dans la partie inférieure du bassin versant de Oued Etteba où la concentration des activités hydrodynamiques est au maximum. Il convient de souligner que des visites successives ont été menées sur l'ensemble du bassin versant pour cibler le site le plus représentatif du secteur étudié. Les critères et

paramètres réunis dans cette zone serviront de support naturel pour mener notre expertise et vérifier nos hypothèses soulevées dans la problématique.

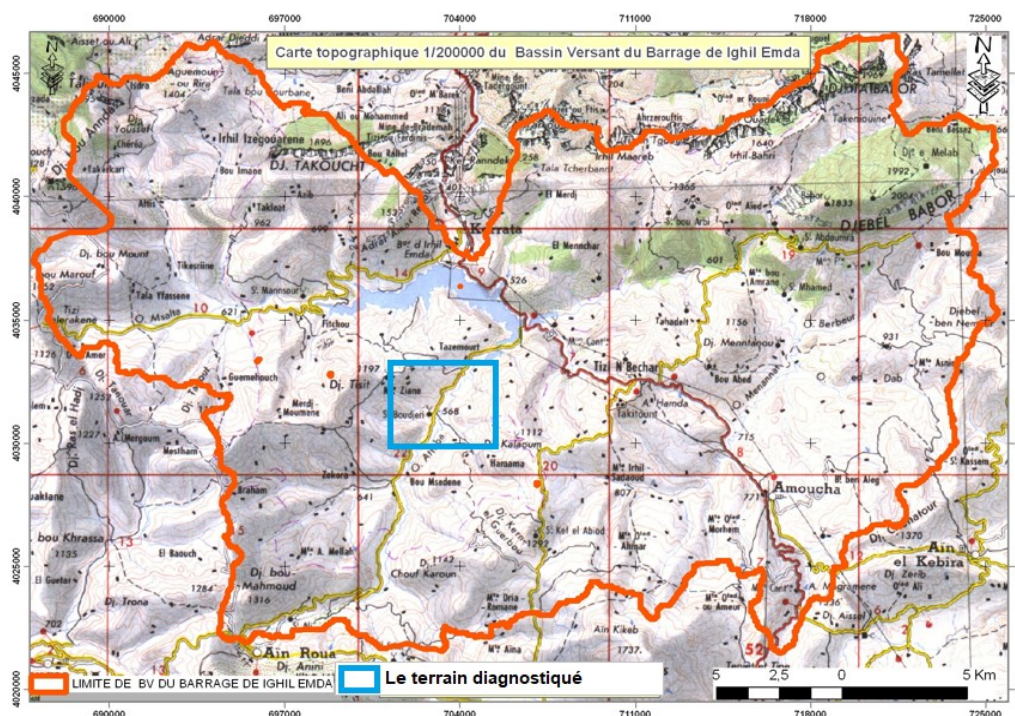


Figure 16: délimitation du terrain d'expertise géomorphologique (Oued Etteba)

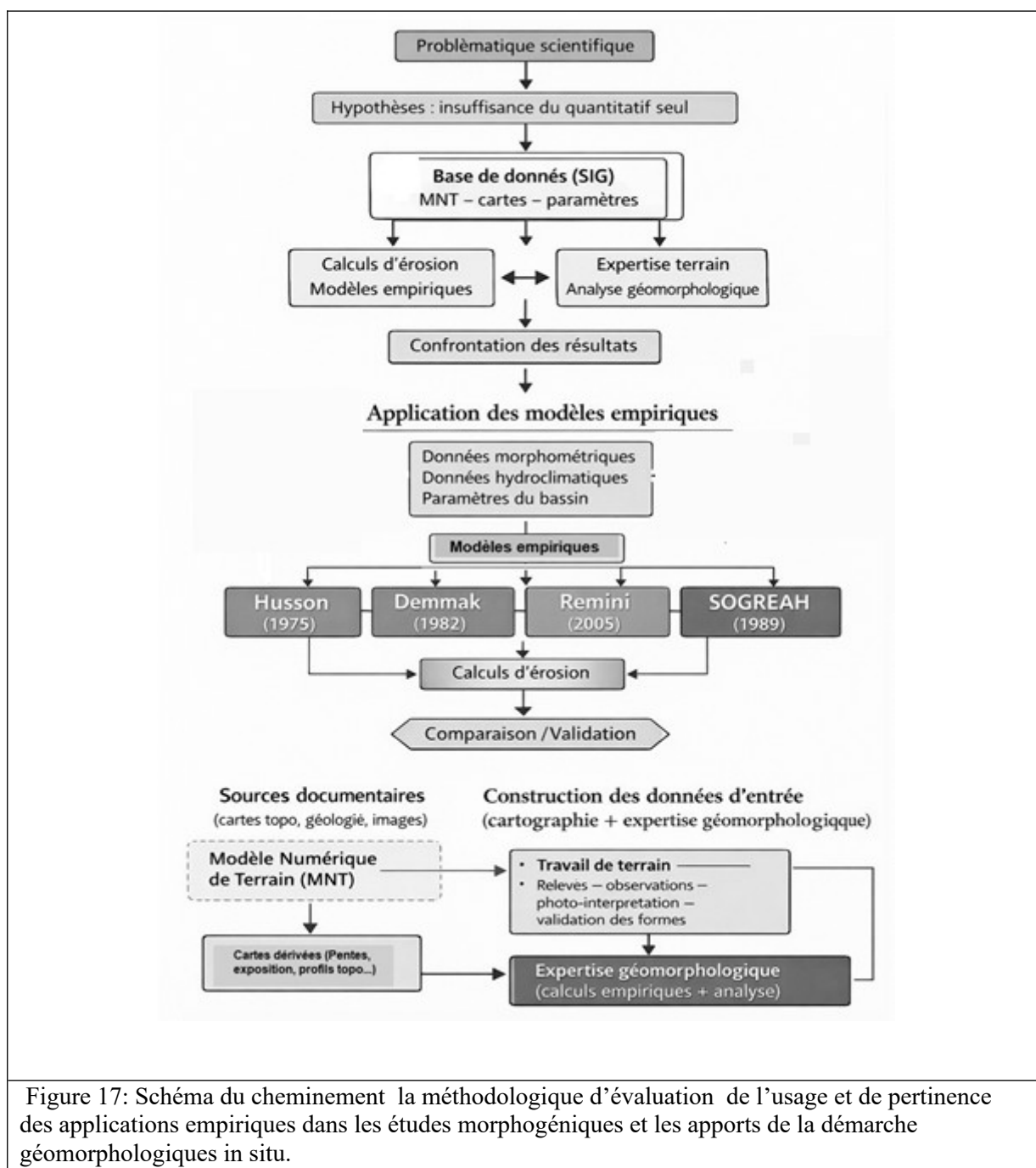
III.1. 2 Méthodologie et étapes de réalisation de l'étude

Le principe de l'étude consistait en deux opérations, la première était d'opérer des calculs des taux d'érosion selon quelques modèles empiriques (quatre modèles choisis) jugés comme les plus adaptés pour quantifier l'érosion des sols dans le bassin versant d'ighil Emda, il s'agit des modèles suivants : Husson (1975), le modèle de Demmak (1982), Le modèle de Sogreah/Anrh (1989) et le modèle de Remini (2005).

La deuxième opération consistait en travail effectué sur terrain sous forme de diagnostic reposant sur une analyse géomorphologique et les processus géomorphogénétiques, il était question de réaliser une cartographie géomorphologique et morpho dynamique. Le choix de la saison est d'une importance capitale, et c'est la raison pour laquelle on a choisi la période hivernal coïncidant avec la fonte des neiges.

Un travail préparatoire a été effectué en amont avant de procéder aux étapes décrites ci-dessus, il s'agissait d'une implémentation d'une base de données qui a servi de support informationnel pour les calculs empiriques et les missions effectuées sur terrain.

Le terrain choisi fait partie du bassin versant du barrage d'ighil Emda précisément le sous bassin de Oued Etteba (fig. 16), son choix est justifié par le caractère contrasté des reliefs d'une part (Gabert, 1984), d'autre par le caractère morpho-dynamique observé et l'hétérogénéité spatiale et paysagère. Le schéma ci-contre (fig. 17) résume les étapes opérées pour mener les travaux du présent chapitre :



III.2 Présentation des Modèles empiriques testés pour le calcul d'érosion :

III.2.1 L'Abaque de HUSSON (1975) :

Le modèle de HUSSON (voir annexe) a été développé suite à l'étude d'envasement de quelques barrages d'Algérie exploitant le coefficient de torrentialité du bassin versant comme paramètre déterminant, sur la base de résultats expérimentaux obtenus une abaque a été dressée et qui exprime le taux d'érosion selon le coefficient de torrentialité. L'exploitation de l'abaque de Husson (1975) consiste à lire et extraire la valeur de l'érosion directement de l'abaque en faisant la projection horizontale de la valeur du coefficient de torrentialité correspondant au bassin versant du barrage concerné, l'intersection avec la ligne de l'abaque est projetée ensuite perpendiculairement sur de l'axe des abscisses correspondant aux valeurs d'érosion.

À préciser que le coefficient de torrentialité correspondant au bassin versant de notre zone d'étude a été calculé selon la formule de la formule donnée dans l'annexe

III.2.2 Le modèle de DEMMAK (1982)

Il est donné selon l'expression ci-après :

$$TSS = 26,62 IL + 5,07 Ip + 9,77 CT - 593,56 \quad (1)$$

Avec :

TSS : Moyenne annuelle de transport solide spécifique, exprimé en (t/km²/an)

IL : indice lithologique qui exprime en pourcentage la superficie des formations marneuses et argileuses.

Ip : indice d'énergie du ruissellement qui est le produit mathématique du pourcentage et de la fréquence des précipitations annuels tombées sous forme de pluie supérieures à 20 mm ;

CT : coefficient de torrentialité = produit de la densité de drainage et de la fréquence des thalwegs élémentaires.

III.2.3 Le modèle de REMINI (2005)

Ce modèle est calé sur des valeurs mesurées relatives à l'envasement d'un certain nombre de barrages hydrauliques en Algérie dont le barrage d'Ighil Emda objet de cette étude. La formule est selon la relation suivante :

$$Ev = 0,0063.S^{0,66} \quad (2) \quad \text{Avec :}$$

Ev : taux d'envasement (apports solides des oueds) exprimé en millions de m^3/an . Pour convertir le m^3 en tonne nous avons pris la valeur de 1,8 comme densité moyenne du produit d'érosion (Remini, 2003).

S : superficie du bassin versant (km^2).

III.2.4 Le modèle de SOGREAH/ANRH (1989)

Ce modèle a été développé à partir d'études sur 30 bassins algériens, de superficie comprise entre 100 et 300 km^2 et recevant une pluviométrie annuelle variant entre 300 et 1 000 mm (Bouanani, 2004) :

$$Ass = \alpha \cdot E^{0,15} \quad (3)$$

Avec :

Ass : apport solide spécifique ($t/km^2/an$)

α : coefficient dépendant de la perméabilité du sol (Tab. 1)

E : Écoulement annuel (mm)

Tableau 9 : Valeurs de α pour différentes perméabilités des terrains.

Forte 8,5	Moyenne 75	Moyenne à faible 350	Perméabilité faible 1400	Imperméable 3200
-----------	------------	-------------------------	-----------------------------	---------------------

Selon les conditions litho-structurales de notre zone d'étude qu'on a examiné sur les carte géologique et le terrain , nous avons adopté une valeur de α égale de 1400.

III.3 Construction d'une base de données pour exploitation informatique

Pour les besoins de l'étude, La base de données a réuni toutes les composantes en relation avec les paysages et les phénomènes géomorphologiques (Bishop *et al.*, 2012 ; Theler *et al.* 2010 ; Gustavsson 2006 ; Carton *et al.* 2005). Toutes les informations de base sont rendues dynamiques grâce aux fonctionnalités du SIG (Jacob Napieralski, 2007). Un modèle numérique du terrain a été généré en exploitant des cartes topographiques ayant l'échelle 1/50000 obtenues auprès de l'INCT d'Algérie, le Modèle Numérique du Terrain nous a permis, d'un seul trait, de cerner et de visualiser la répartition spatiale des éléments physiques qui constituent l'ossature du bassin versant (Moor *et al.*, 1991 ; Puech *et al.* , 2009). Le chevelu hydrographique du bassin versant a été vectorisé afin de nous servir de support informationnel numérique et dynamique pour les calculs des paramètres hydrologiques et hydrographiques du bassin versant, le réseau hydrographique a été hiérarchisé selon la classification de Strahler (1952).

III.4 Travaux menés sur terrain :

Cette étape a été effectuée selon une démarche géomorphologique qualitative qui se base sur des relevés géomorphologiques cartographiques et descriptifs (Bishop *et al.*, 2012 ; Theler & Reynard, 2011 ; Tricart, 1972 ; ; Otto & Dikau, 2004 ; Dewolf, 1981).

Dans ce travail géomorphologique, nous nous sommes intéressés uniquement à la dimension spatiale, c'est-à-dire la répartition spatiale et l'organisation des formes géomorphologiques ainsi et les processus morphogéniques apparents. Les séquences sédimentaires (dépôts alluvionnaires) n'ont pas été traitées dans la présente étude car il n'était pas question de retracer la chronologie et l'évolution des formes mais plutôt de caractériser la morphodynamique.

La zone ciblée par le travail cartographique est une surface appartenant au sous bassin versant de Oued Etteba qualifié de plus représentatif de la totalité du terrain d'étude de par sa vulnérabilité érosive et morpho-dynamique, (Hamdani, 2012). Il faut souligner que dans cette approche géomorphologique nous avons accordé un intérêt particulier aux formes et au processus hydro-géomorphologiques c'est-à-dire les interactions hydrologie-Morphologie (Chave, 2002 ; Garry *et al.* 2002 ; Maire & Corbonnois, 2000 ;)

Un travail de photo-interprétation (Girard, 2010) a été réalisé en préparation à la sortie sur terrain où les principaux traits géomorphologiques et hydro-géomorphologiques ont été dressés selon les règles sémiologiques et graphiques conventionnelles et appropriées à la carte

géomorphologique , quelques généralisation cartographiques se sont imposées par l'échelle de représentation (Smith *et al.*, 2011). Le produit cartographique a été commenté et illustré par des photographies et des images aériennes diachroniques.

III.4.1 Rappel sur les Caractéristiques géométriques du versant d'Ighile

Emda :

les paramètre métriques et les caractéristiques naturelles du bassin versant ont été obtenues à partir des documents de base et de la banque de données que nous avons transformées en système d'information géographique. La souplesse et les potentialités de l'outils nous a conféré un gain de temps et de précision.

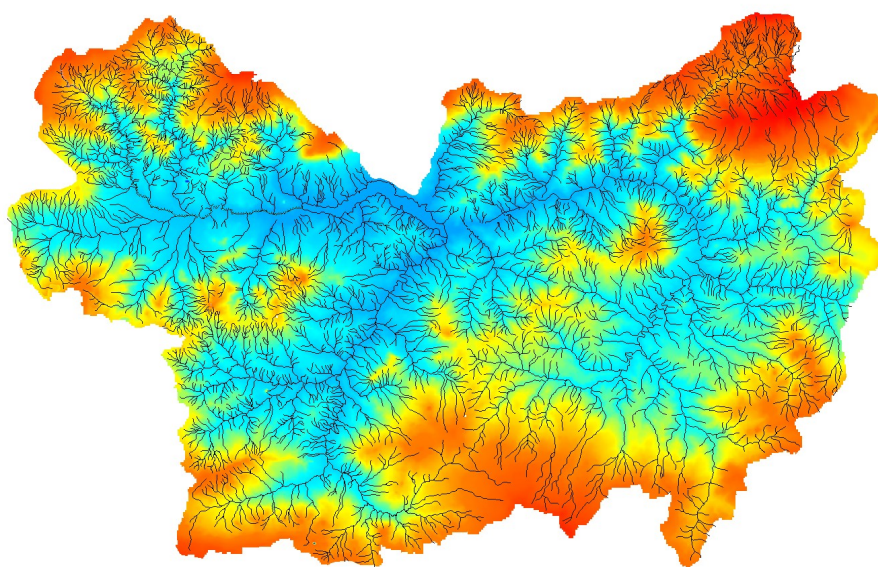


Figure 18 : Réseau hydrographique sur MNT

III.4.2 Les paramètres morphométriques et hydrologiques

Les caractéristiques géométriques introduites dans les calculs sont essentiellement la superficie, les altitudes caractéristiques. Quant aux caractéristique hydrographique, il s'agit de la densité de drainage, le coefficient de torrentialité.

Tableau 10 : Indices morpho métriques et hydrographiques du bassin versant.

Paramètre s	A (km ²)	Hmin (m)	Hmax (m)	Hmoy (m)	Dd	F1	Ct
Valeurs	644	520	1984	925	3,47	4,30	14,9

A : superficie, Hmin : altitude minimale. Hmax : altitude maximale. Hmoy : altitude moyenne, Dd : densité de drainage. F1 : fréquence des talwegs d'ordre 1. Ct : coefficient de torrentialité.

III.4.3 Paramètres hydroclimatiques exploités

Les paramètres hydroclimatiques introduits dans le calcul sont indiqués dans le tableau ci après :

Tableau 11 : paramètres hydro-climatiques du bassin versant.

Paramètres	Moy Pan(mm)	Lr (mm)	% des pluies >20mm	Fp> 20mm
Valeurs	671	193	35	0,35

Moy Pan :moyenne annuelle des pluies sur le bassin versant. Lr : moyenne annuelle des lames d'eau écoulées. Fp : fréquences de pluie supérieure à 20 mm.

La valeur moyenne de la lame d'eau écoulée est obtenue à partir de l'annuaire des mesures effectuée par SONEGAS dans la barrage d'Ighil Emda,

III.4.4 Relief et lithologie

Le caractère topographique est contrasté, des versants à morphologie complexes et courts à dénivelées importantes dont relèvent les pentes raides. La lithologie de la zone d'étude est caractérisée par la prédominance des terrains calcaires et marneux plus ou moins argileux (Gabert, 1984 ; Rothe, 1950). Les formations superficielles argileuses se localisent sur les petits plateaux intermédiaires, sur les colluvions formées aux pieds des versants et les fonds des oueds.

III.5 Résultat et discussion :

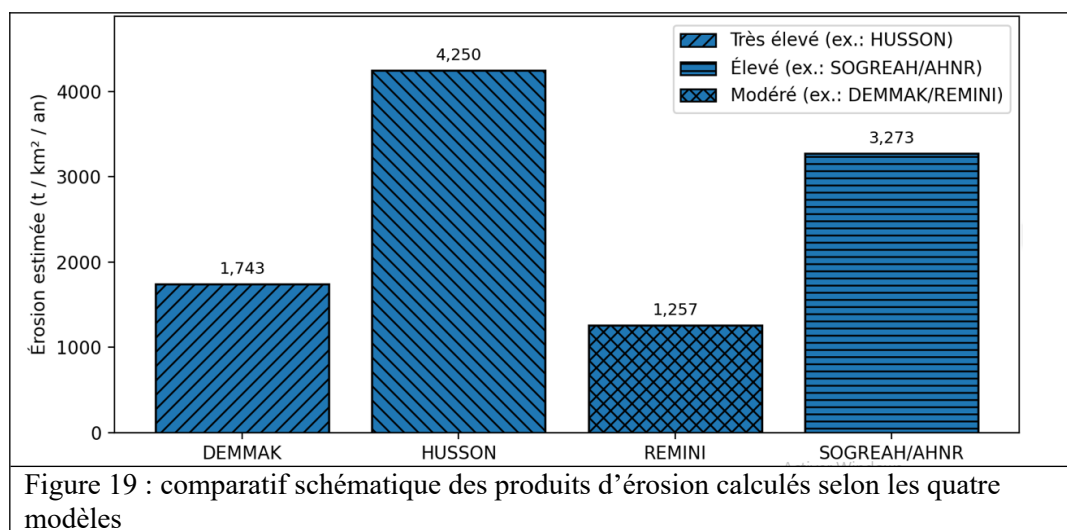
III.5.1 résultats des calculs empiriques

Les résultats des calculs empiriques de l'érosion annuelle (Sédiments) obtenus par l'application des quatre modèles décrits dessus sont indiqués dans le tableau ci après (Tab.12) :

Tableau 12 : Les taux d'érosion estimés selon les modèles empiriques.

Modèle empirique	DEMMAK	HUSSON	REMINI	SOGREAH/ AHNH
Érosion estimée t/km ² /an	1743	4250	1257	3273

La représentation graphique de des valeurs des produits d'érosion de chaque modèle empirique exprime clairement les divergences dans entre les valeurs (fig. 19)



III.5.2 Résultats des travaux d'enquête et de cartographie réalisés sur le terrain.

Les résultats obtenus à travers les travaux du terrain sont représentés sous forme de produit de Cartographie géomorphologique, la lecture et l'interprétation des informations contenues dans la carte sont développés dans les paragraphes en bas.

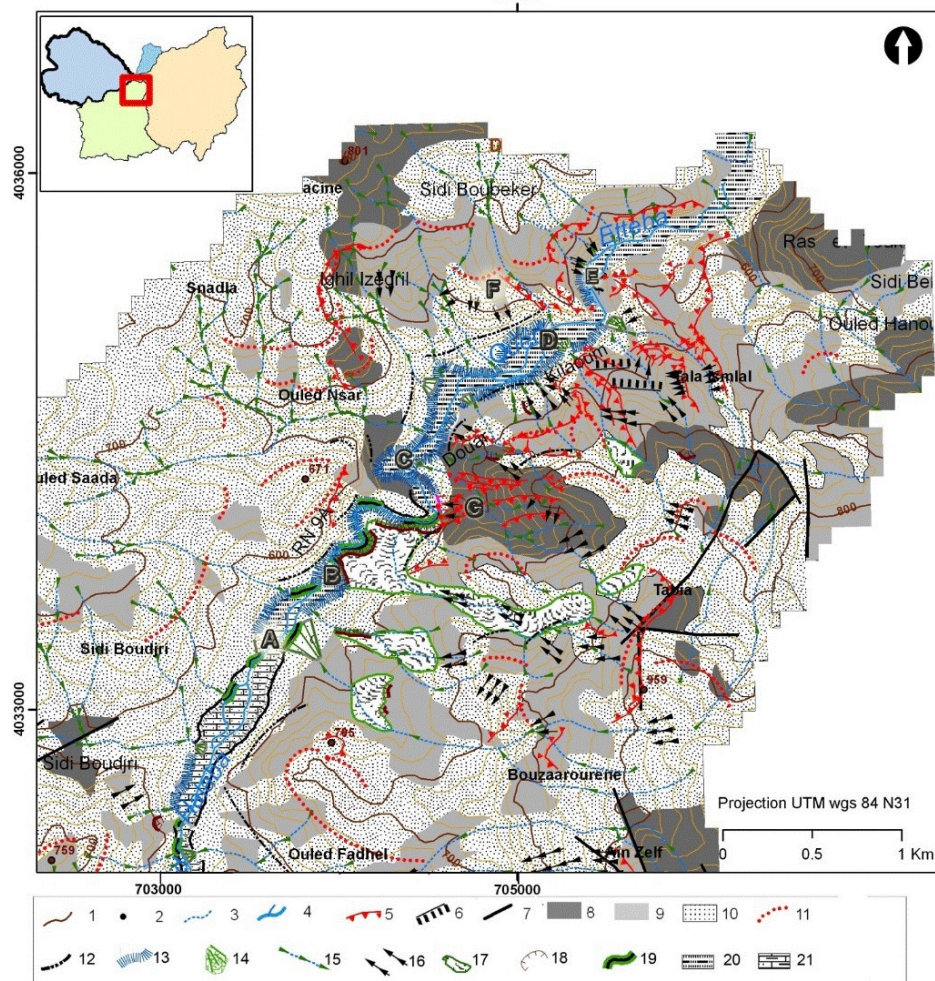


Figure 20 : Carte géo morpho dynamique.

1. Courbes de niveau ; 2 point coté ; 3. Talwegs affluents temporaire ; 4. Lits de l'oued principal ; 5. Crêt ; 6. Escarpement de faille ; 7. Failles ; 8. Affleurement calcaire ; 9. Affleurement marneux ; 10. Formation superficielle meuble ; 11. Convexité du versant ; 12 ; concavité basale ; 13. Zone inondable avec limons de débordement ; 14. Cône de déjection ; 15. Ravin profond ; 16. Activité érosive intense ; 17. Masses de terres en mouvement ; 18. Solifluxion ; 19. Sapement latéral des talus naturels, des cônes de déjection et terrasses ; 20. Alluvions actuelles de sables, limons et argiles ; 21. Alluvions actuelles à calibre grossiers et galets.

Les formes, les formations et les processus géomorphologiques sont les éléments qui chargent le fond topographique utilisé dans notre expertise menée sur terrain. Le commentaire associé aux éléments cartographiés est exprimé sous forme de notice explicative qui combine une lecture interprétative du paysage géomorphologique, des phénomènes observés et les processus responsables de la dynamique. Ce que transmis la carte comme enseignements et informations se résument dans les points suivants :

- Les lettres majuscule en gras sur la carte (fig 20) **A, B, C, D, E, F, G** sont des points qui correspondent à des situations géomorphologiques et hydro géomorphologiques singulières illustrées par les figures (Fig. 22 à 27) sous forme de photographies et d'imageries aériennes diachroniques. .

Le point A. Correspond à une situation de sapement d'une terrasse fluviale argileuse illustrée par la figure (fig.22 a), et une situation de remobilisation des épandages de cône de déjection illustrée par la figure (fig.22 b). La situation du cône de déjection en 2002 et 2016 est illustré par l'imagerie aérienne diachronique (fig.23 a, b).

Le point B. Correspond à une situation de contact du courant d'eau avec un talus naturel qui constitue la langue d'une immense masse de terre glissante illustrée par la figure (fig.24 a), l'attaque de l'eau à ce point, en poinçonnant le talus (fig.24 b), fait charger intensément l'eau d'oued en matière en suspension mais aussi fait avancer les masses de terre vers le fond d'oued.

Le point C. Correspond à une section d'oued traversé par un pont submersible illustrée la figure (fig.15a), ce pont est transformé en piège à alluvions en raison des charges très important des matériaux non évacués à travers les ouvertures du pont. Cette situation a provoqué une extension spatiale extraordinaire de la section mouillée. Le recours au curage est obligatoire pour désengorgé l'oued, dans la plupart des cas les matériaux creusés restent in situ. La situation avant et après la mise en place du pont est illustrée par deux images aériennes diachroniques de 2002 et 2016 (fig.25 b. c).

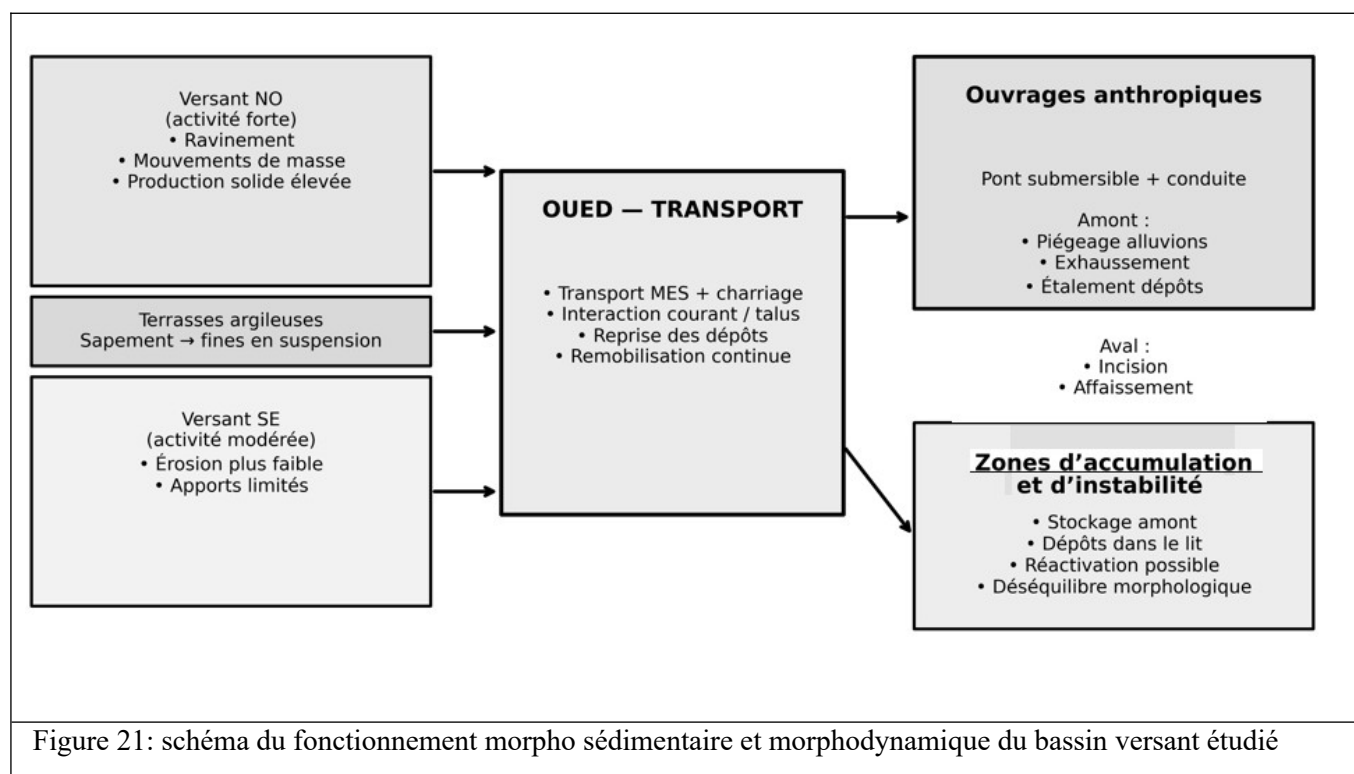
Le point D. Correspond à une situation marquée par le passage d'un aqueduc transférant les eaux du barrage illustré par la figure (fig.26 a). Ce passage a provoqué un piégeage des alluvions surtout sableuses à l'amont et un étalement spatial dramatique des lits d'oued. La situation avant et après la mise en place de l'ouvrage est illustrée par l'imagerie diachronique de l'année 2002 et l'année 2016 (fig.26 b,c).

Le point E. illustré par la figure (fig.26 d) correspond à une incision profonde et affaissement du lit d'oued à quelques mètres en aval de l'aqueduc. Un déséquilibre du profil longitudinal est opéré en raison du gradient altimétrique causé par l'aqueduc qui a fait percher le lit d'oued à l'amont de l'aqueduc.

Le point F. Exemple de versant à exposition S-E, illustré par la figure 27a

Le point G. Exemple de versant à exposition N-O, illustré par la figure 27 b

Le schéma suivant (fig. 21) est un résumé simplifié de la carte géomorphologique établi sur terrain et qui explique le fonctionnement morpho-sédimentaire et le système morphodynamique du bassin versant et son hydrosystème.



- 1- La carte géomorphologique montre que les phénomènes géomorphologiques et morphogéniques sont très marquants (Fig. 20). La lecture de la carte montre visiblement que l'activité morphogénique dans le bassin versant s'opère dans un système complexe très vulnérable surtout liée à l'érosion hydrique qui constitue le principal moment moteur de la morphodynamique dans le bassin versant.
- 2- La carte (Fig. 20) montre clairement les rapports entre l'activité morphodynamique et les variables intrinsèques du bassin versant notamment la morphométrie du relief et son exposition, la structure géologique et la lithologie soumise aux actions érosives.
- 3- Dans certaines sections de l'oued, il a été observé des contacts directs entre les courants de l'oued et les terrasses fluviales très évoluées composées essentiellement de texture fine argileuse telle que le souligne la fig 20.
- 4- Aux pieds des versants et au contact avec le cours d'eau principal, les actions érosives se combinent tel que représenté sur la carte géomorphologique. La (fig. 22 a,b) illustre le sapement de l'oued exercé sur les apports du cône de déjection, et la comparaison de deux images aériennes diachroniques du même cône de déjection (fig. 23 a b) montre à quel point ça a été importante la vitesse du recule de la frange active du cône de déjection.



Figure 22 : Sapement par courant d'oued : **a** . Sapement de terrasse fluviale contact du courant d'eau avec un sol argileux; **b**. Sapement latérale d'un cône de déjection



- 5- Les mouvements de masse (glissements et solifluxion) produits sur des talus naturels très fortement instables (fig. 24 a, b) se combinent très étroitement avec l'action érosive de l'oued pour alimenter très densément les courants d'eau en matière fine.

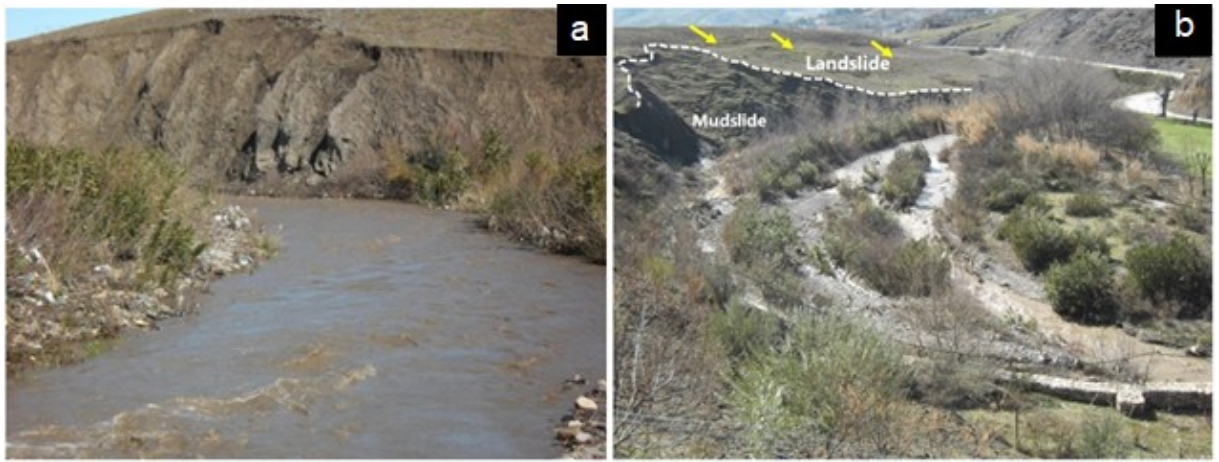


Figure 24 : Combinaison de processus morphogénique. a. Talus naturel d'une masse de terres glissante soumise à l'attaque des courants de l'oued ; b. solifluxion et sapement sur talus naturel

- 6- Une tendance d'évolution hydro morphologique spatiale de l'oued principal est visiblement notable, où le fond d'oued s'est vu transformé en surface d'atterrissement des alluvions. des terrasses fluviales quaternaires sont ensevelies et emboîtées entièrement dans les alluvions actuelles. Ce phénomène hydro-géomorphologique est provoqué par l'implantation des ouvrages linéaire, devenus des pièges à alluvions à deux endroits, il s'agit de : pont submersible (fig25. a), et de conduite de transfert des eaux de barrage (fig. 26 a).

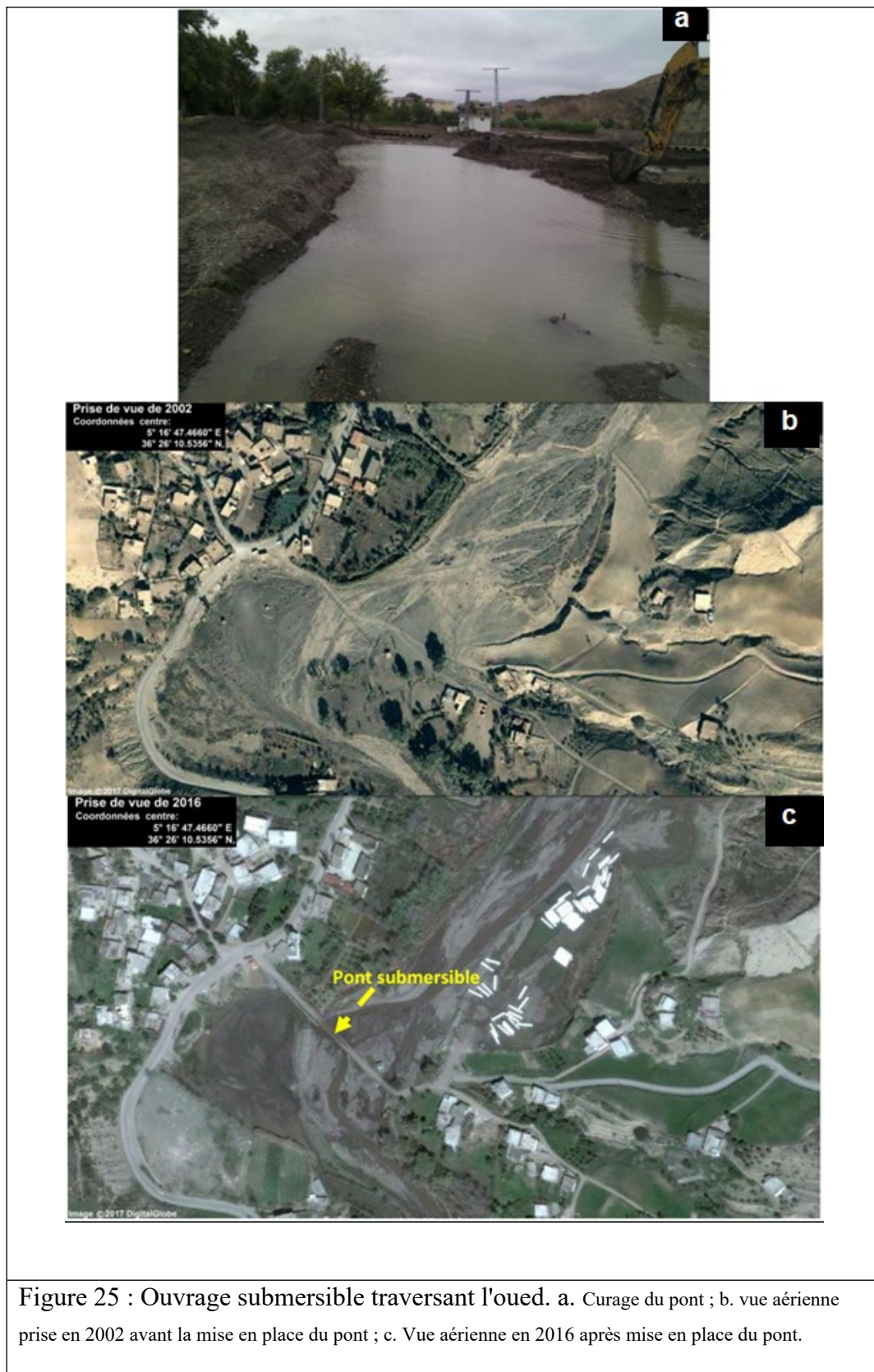
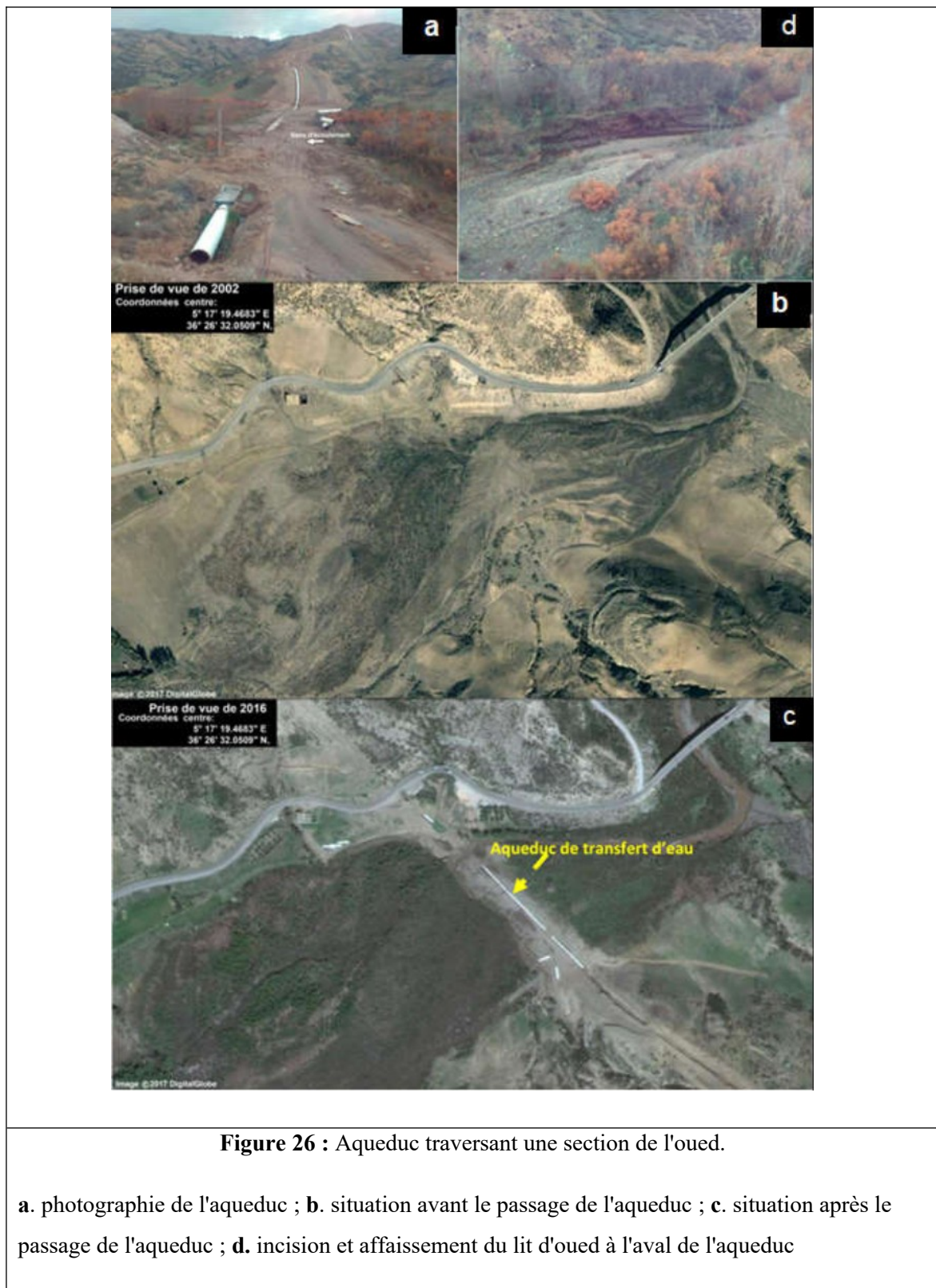


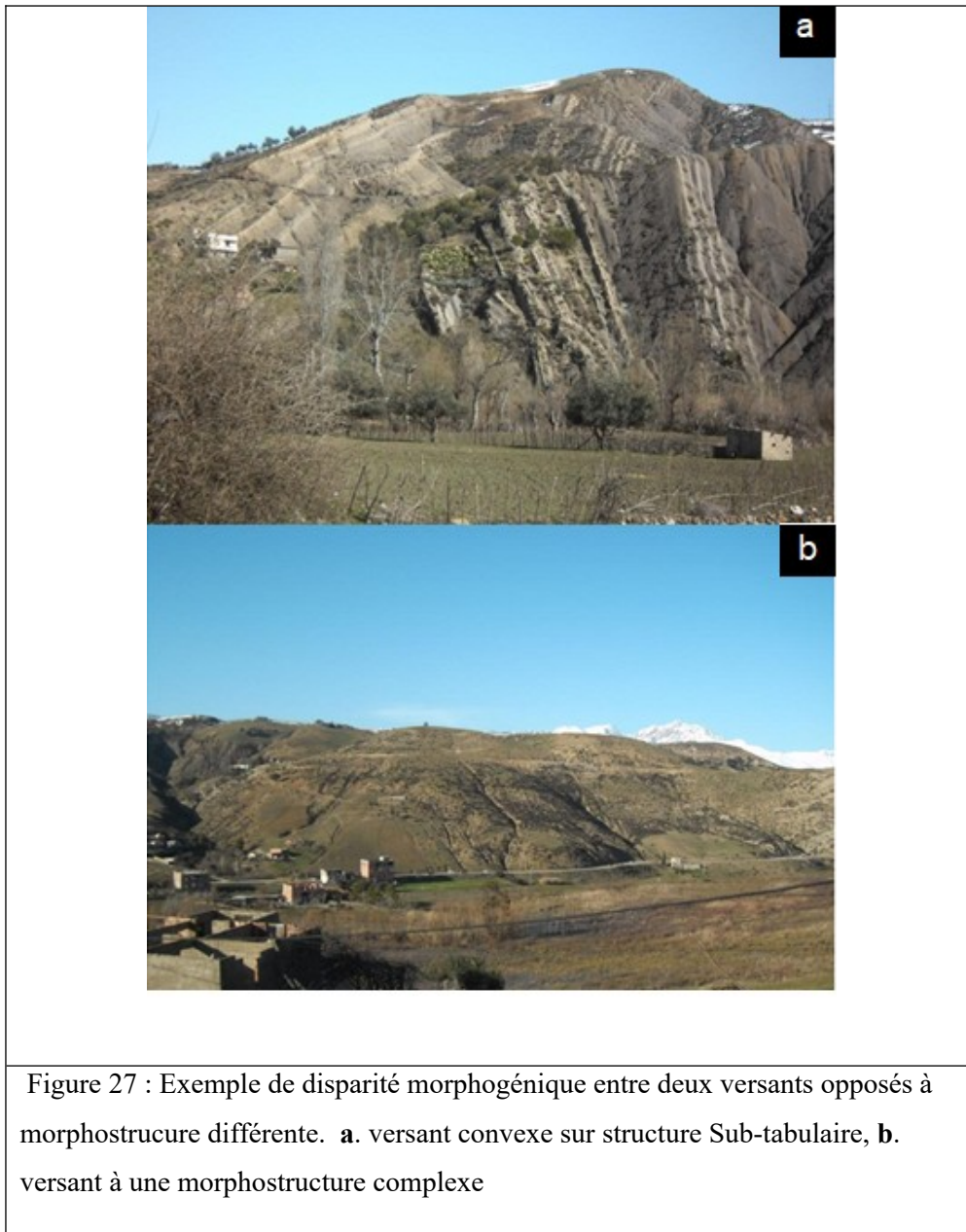
Figure 25 : Ouvrage submersible traversant l'oued. a. Curage du pont ; b. vue aérienne prise en 2002 avant la mise en place du pont ; c. Vue aérienne en 2016 après mise en place du pont.

Les situations avant et après l'implantation des ouvrages traversant l'oued sont bien illustrées par des images aérienne diachroniques (fig 25. b,c) présentées ci-dessus et (fig.26 b, c) et qui montrent l'ampleur du changement spatial.



7- En se basant sur la carte géomorphologique, il est clairement aperçu que la disparité morphogénique est visiblement remarquable en comparant les deux versants opposés du cours d'eau principal. Le versant à exposition NO (fig.27 a) est fortement soumis à l'activité morphogénique que le versant à exposition SE (fig.27b) en raison de la

complexité des composantes qu'il présente à savoir la structure géologique Chahutée, la morphométrie et la géotechnique des formations superficielles soumises à des actions de l'eau météorique et l'alternance du gel-dégel en hiver, cette situation est surtout propice à l'érosion ravinant (Mathys et Poesen, 2005).



III.6 Discussion

La discussion des résultats s'articule autour d'une comparaison entre les résultats empiriques obtenus par l'application des modèles de calculs et les résultats obtenu par le suivi effectué sur le terrain et exprimés par des relevés cartographiques et des évaluation et d'expertise in situ.

1. les valeurs élevées des taux d'érosion des sols estimés selon les quatre modèles empiriques, elles présentent des divergences entre elles car les paramètres des modèles ne sont pas les mêmes, donc C'est de différentes manières que sont exprimés les causes de l'érosion et de la sédimentation (Fournier ,1977). Certains modèles tendent à surestimer et d'autres à minimiser l'importance du phénomène.

A retenir qu'un grand nombre de facteurs influents le phénomène morphogénique n'était pris en considération. Le premier élément auquel nous portons attention est que les modèles employés négligent bon nombre de facteur intervenant dans le processus érosif et morphodynamique, ils tendent aussi à généraliser et repartir abstraitement et de manière homogène le phénomène d'érosion sur toute la surface du bassin versant. Or, les résultats obtenus par l'expertise géomorphologique révèlent que l'activité morphogénique est inégalement répartie à l'échelle du même bassin versant (Bourouba, 1996). Cette inégale répartition de l'activité érosive et de production sédimentaire seraient liées:

- Aux caractéristiques intrinsèques hétérogènes des composantes physiques ou variables de contrôle intrinsèques qui définissent le degré de résistance aux forçages externes et la distribution spatiale de l'énergie potentiel et l'énergie cinétique (Brunsden, 2001),
- à la dynamique des paysages écologiques notamment le couvert végétale (Cohen & Rey, 2005),
- à la façon dont la gestion et les pratiques humaines sont opérées sur le milieu physique (Mathys & Poesen, 2005 ; Benchrit,1954) d'autant que la logique du découpage administratif et la nature juridique des terrains, qui sont d'ailleurs remises en question (Nahrath,2009 ; arone , 2013), s'imposent et compliquent la gestion du bassin versant où souvent les actions d'aménagement ne pourraient se faire de manière intégrée et coordonnée.

2. Si on part du principe que les modèles empiriques ont été calés sur des valeurs mesurées à l'exutoire des bassins versants, il n'est pas pour autant possible de déterminer la source précise de provenance des flux sédimentaires en raison des **discontinuités dans les flux** de matériaux (Peiry, 1989), Cette imprécision dans l'identification des parcours des produits d'érosion aurait biaisé les mesures d'érosion et par conséquence la réalité du phénomène érosif étudié selon l'approche quantitative.

3. Par ailleurs, il n'est pas évident que toute particule arrachée s'acheminerait vers le cours principal d'autant que certains épisodes pluvieux et érosifs ne sont pas générateurs de crues (Cosandey, 1990) ce qui signifie que d'importantes quantités des produits sédimentaire ne seraient pas quantifiées, choses qui entachent les résultats d'estimation du bilans sédimentaire à l'échelle du bassin versant . Dans cet ordre d'idées et dans notre contexte d'étude, il a été constaté que

l'essentiel des produits d'érosion transportés en suspension dans le cours principal de l'oued ont comme origines les processus suivants :

- le sapement des terrasses fluviatiles et les apports latéraux (fig. 22),
- les mouvements de masse enregistrés sur les talus naturels saturés jusqu'à limite de liquidité et dont les effets sur la teneur en matière en suspension entraînée par les courants d'eau sont très importants (fig. 24 a, b),
- La remobilisation des mosaïques sédimentaires des fonds d'oued (alluvions des lits et sédiments piégés par la végétation) et des apports latéraux suite à un épisode hydrologique intense.
- Remobilisation des sédiments suite aux travaux de curage des ponts submersibles (fig.25a)

4. Partant du principe qu'un modèle empirique sert aussi à la prédiction, sa vérification et sa validation dans un système naturel jamais fermé est impossible selon Oreskes (1994), leur limite d'application est bien atteinte dès qu'un nouveau facteur, notamment anthropique s'introduit dans un système morphogénique et morpho-sédimentaire complexe .

5. Dans notre cas, l'exemple des nouveaux facteurs introduits par l'homme se représentent par des ouvrages d'engineering traversant l'oued, à savoir un pont submersible et une conduite de transfert des eaux de barrage, qui ont affecté profondément le système hydro-géomorphologique et le profil d'équilibre de l'oued principal (Cubizole,1996 ; Petts et Amoros 1996). En effet, Nous avons assisté, dans un laps de temps ne dépassant pas 20 ans, à une mutation très profonde. À l'amont, les ouvrages en question sont devenus des pièges à alluvions, où des surfaces d'atterrissement sont créées et traduites par des exhaussements dramatiques des lits d'oued (5 m par endroit) et des étalements spatiaux spectaculaires des alluvions (fig.25 b,c) et (fig.26b,c), cette situation impose des curages réguliers du lit de l'oued. A l'aval de l'ouvrage du transfert (fig.26d), une incision et affaissement profond du lit d'oued s'étaient produits à cause du déséquilibre du profil longitudinal de l'oued transformé en gradins. La situation décrite dessus montre que les nouvelles conditions introduites par l'homme dans ce système morphogénique transforment les modèles empiriques de prédiction, conçus dans des conditions initiales différentes, en modèles incertains (Gregory, 2006). Certains modèles empiriques laissent place à trop de subjectivité et de spéculation, nous citons celui de Sogreah/ANRH 1989 qui fait appel au paramètre de perméabilité qu'on pondère par un coefficient attribué sur la base d'une appréciation subjective. Or la complexité et l'hétérogénéité des milieux (Brunsden, 2001) rendent très difficile cette appréciation. Le schéma (fig.28) synthétise les résultats et les discussion du chapitre 3.

Approche par modèles empiriques (Approche quantitative simplifiée)

LIMITES DES MODÈLES EMPIRIQUES
| Hétérogénéité • Flux discontinus
| Système ouvert • Incertitudes

MODÈLES EMPIRIQUES D'ÉROSION

Représentation simplifiée

Paramètres incomplets
Calibration à l'exutoire
Hypothèses stationnaires

SOURCES D'INCERTITUDE

- Hétérogénéité spatiale non représentée
- Discontinuité des flux sédimentaires
- Stockage temporaire non quantifié
- Influence anthropique imprévisible
- Système naturel ouvert

Modèles calés à l'exutoire,
ne distinguent pas les
sources précises

mesures à
l'exutoire

Modèles incertains face aux
nouveaux facteurs anthropiques

Approche géomorphologique réaliste (Approche systémique et dynamique)

Variabilité Intrinsèque et Contrôles

Caractéristiques physiques
hétérogènes

Dynamique
des paysages
écologiques

Pratiques
humaines

Discontinuités et Sources de Sédiments

Sapement des
terrasses fluviales
et apports latéraux

Mouvements
de masse
(glissements)

Remobilisation
des fonds d'oued
apports latéraux

Répartition inégale
de l'activité
morphogénique

Sources de
sédiments
multiples et
discontinues

Perte de sédiments
en cours de route (rapport
de livraison sédimentaire)

Parcours
imprécis

Travaux de curage des ponts

épisodes non
générateurs
de crues

Mutation rapide
du système par les
infrastructures
humaines

Mutation du Système par l'Homme

Piège à alluvions
ouvrages
d'engineering

Exhaussement
dramatique du lit
(+5m)
surfaces
d'atterrissement

Incision et
affaissement
profond
step-pool

Déséquilibre
du profil longitudinal
transformé en gradins

Modèles
empiriques
deviennent
incertains

Figure 28 : Synthèse sur la discussion et les interprétation des résultats qui opposent l'approche empirique et l'approche géomorphologique dans le complexe morpho-dynamique du bassin versant

Conclusion du chapitre 3

Les résultats obtenus montrent que l'estimation des taux d'érosion des sols selon l'approche quantitative devraient être non pertinente si elle n'est pas étayée par une approche géomorphodynamique opérée in situ avec une cartographie géomorphologique détaillée qui traduit aussi fidèlement le phénomène érosif et morphogénique. La cartographie géomorphologique permettrait de situer de manière précise les problèmes en associant un ordre de grandeur quantitatif de l'érosion (Brochot, 1998). Ainsi, Il s'avère clairement que la complexité du phénomène morphogénique et le nombre indéfini des variables de contrôle ne peuvent être réunis dans un modèle de calcul dont le système naturel est ouvert.

Les divergences autour du concept de l'érosion des sols (Neboit-Guilhot, 1999) a fait que les efforts consentis et les approches adoptées ne se sont pas réunis autour d'un objectif commun du moins dans le contexte académique Algérien. C'est pourquoi il est indispensable de valoriser les résultats quantitatifs et qualitatifs pour concevoir un instrument de travail efficient qui servirait de base dans toute action menée sur le milieu physique et écologique, notamment le renforcement du cadre juridique relatif à l'exploitation des ressources et l'aménagement du territoire (Renschler & Harbor, 2002). On conclut à travers les résultats obtenus dans le chapitre 3 que La thématique de la morphogénèse doit être abordée dans toute sa complexité géo-systémique en cernant toutes les composantes du milieu physique, anthropique et socioéconomique dans une démarche de diagnostic intégrée (Brochot, 1998) et pluridisciplinaire qui permettraient de dégager un instrument qui sert de référence dans toute action opérée sur les paysages géo-écologiques. Il se propose, ainsi, après avoir démontré l'insuffisance de l'approche basée sur l'estimation des bilans d'érosion et de transport sédimentaire de proposer des approches idoines et adaptées qui exprimeraient de manière aussi concrète et spatialisée le phénomène morphogénique, et c'est dans cette optique que se propose le chapitre 4 à travers lequel nous présentons une approche écologique comme outils de mesure de la dynamique morphogénique pouvant s'apparenter aux approches quantitatives et géomorphologiques pour en faire une approche intégrée.

Chapitre 04:

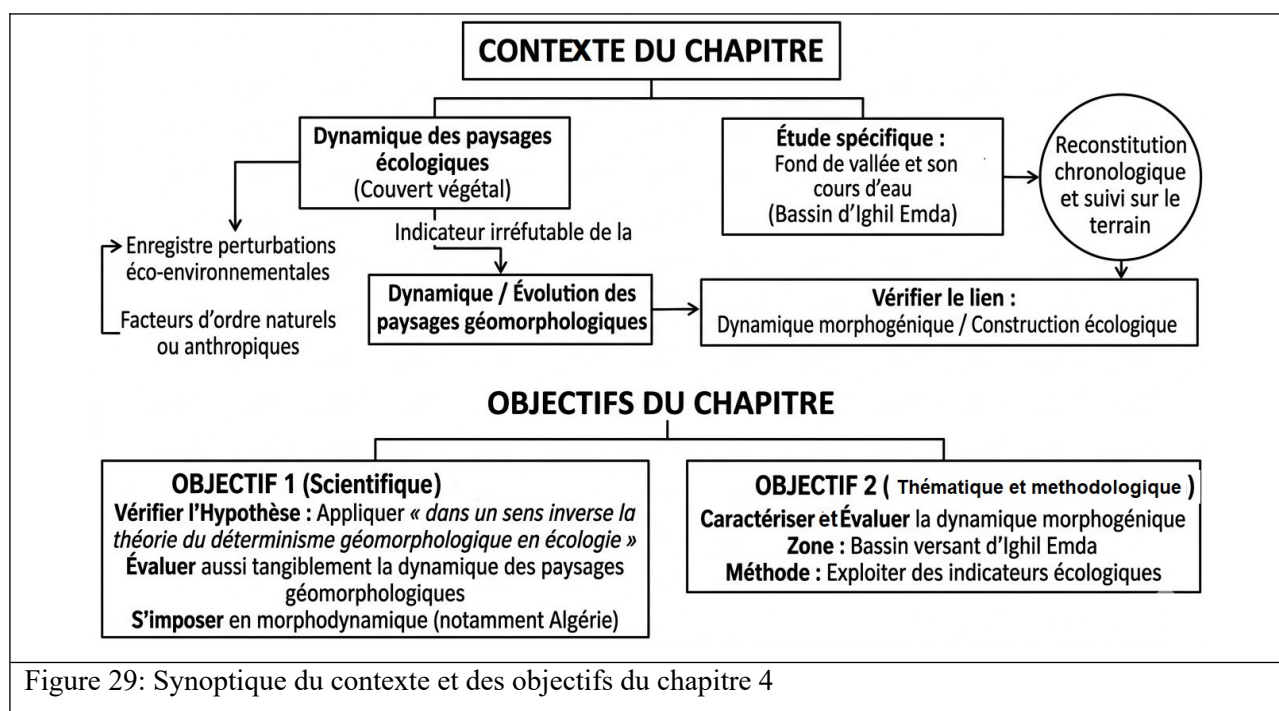
Morphogenèse et construction Biogéomorphologiques (perspective d'une approche d'analyse morphodynamique)

Introduction

Plusieurs auteurs considèrent que la dynamique des paysages écologiques, notamment le couvert végétal, constitue un indicateur irréfutable qui reflète aussi fidèlement l'impact de la dynamique et d'évolution des paysages géomorphologiques (stallins2006, Amoros et al 1986), selon nombreux auteurs (Trémolières, 2008 ; Médail et Diadema, 2006 ; Géhu, 1980 ; Veyret, 1994; Clément, 1994) cet indicateur qui sert d'outils de mesure naturel peut enregistrer des réponses à des perturbations eco- environnementales, induites que ce soit par des facteurs d'ordre naturels ou d'ordre anthropiques. Dans ce chapitre il sera question de vérifier ce lien qui relie la dynamique morphogénique à la construction écologique (genèse des écosystème). L'étude s'est intéressée à un fond de vallée et son cours d'eau au niveau du bassin d'Ighil Emda où une reconstitution chronologique et un suivi sur le terrain ont été opérés. Cet chapitre se propose, ainsi, pour atteindre deux objectifs qui s'inscrivent dans les objectifs globaux et spécifiques de notre recherche :

Le premier est de vérifier notre hypothèse soulevée dans la problématique, et qui suppose qu'il est possible d'appliquer « **dans un sens inverse la théorie du déterminisme géomorphologique en écologie** » afin d'expliquer et d'évaluer aussi tangiblement la dynamique des paysages géomorphologiques. Cette approche écologique à éprouver viserais, dans un objectif scientifique, à s'imposer à fortiori dans les études géomorphologiques (la morphodynamique) et revendiquer une place dans le paysage des recherches en géomorphologie notamment dans le contexte algérien.

Le deuxième objectif est de caractériser et d'évaluer la dynamique morphogénique dans le bassin versant d'Ighil Emda en exploitant des indicateurs écologiques. Le synoptique ci après (fig 29) offre une lecture simple et d'ensemble du contexte et des objectifs du chapitre :



IV .1 Délimitation spatiale du site étudié:

La zone d'étude ciblée par la classification numérique des unités paysagères sur les images satellites et la photo aérienne exploitées concerne le fond de vallée d'Oued Atteba sur une distance longitudinale de 4 km le long du profil en long de l'oued. Les limites coïncident avec les concavités basales des bas des versants (piedmont) incluant les terrasses alluviales, les lits mineurs et les lits majeurs de l'oued.

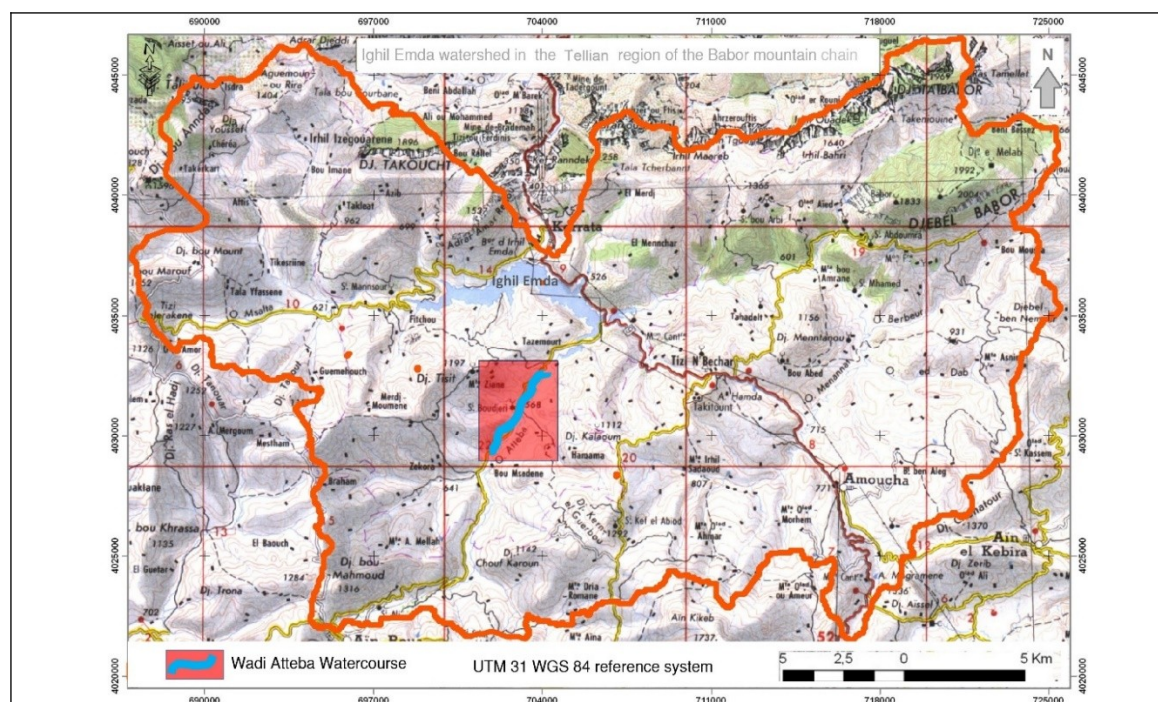


Figure 30: délimitation du site étudié sur fond topographique

IV.2 Méthodologie et outils

L'approche méthodologique adoptée dans la présente étude repose sur l'exploitation des données cartographiques existantes et l'imagerie aérienne ayant servi pour des analyses synchroniques et diachroniques selon trois intervalles temporels allant de l'année 1960 à l'année 2022. Le choix des intervalles temporels entre les dates diachroniques est fait par rapport à certains événements climatiques qui ont caractérisé la région durant la période allant de 1960 (date de référence) à 2022 (Hamdani,2012), Ainsi en raison de certains nombres de faits socioéconomiques ayant marqué la région à savoir l'évolution démographique et urbanistique . Les documents cartographiques ont fait l'objet de photo-interprétation visuelle et informatisée, après numérisation et digitalisation des informations. L'étude a été réalisée en trois étapes, une étape de travail préparatoire, une étape de traitement et d'analyse, une étape d'interprétation et de discussion des résultats.

L'étude dans ses détails a été réalisée selon le cheminement suivant (fig. 31) :

- Collecte des informations
- Délimitation de la zone d'étude
- Classification numérique des photos aériennes et des images satellites
- Calculs numériques des surfaces des classes paysagères
- Élaboration des matrices de transition des classes
- Caractérisation statistique de l'évolution des unités paysagères
- Analyse et interprétation des résultats

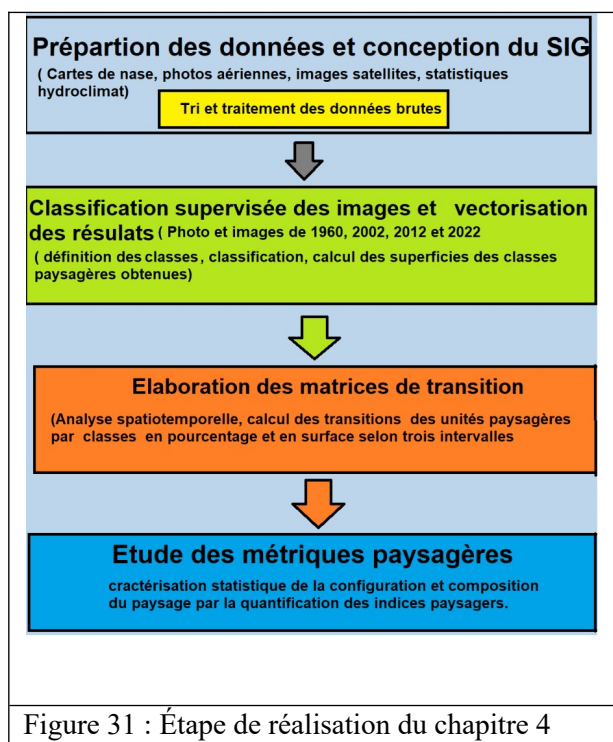


Figure 31 : Étape de réalisation du chapitre 4

IV.3 Étape de travail préparatoire :

IV.3.1 Collecte des informations :

Les informations exploitées dans cette étude se rapportent aux :

1. Caractéristiques du milieu physique et naturel,
2. Les informations sur le climat sous forme de séries d'observation et d'enregistrement météorologique ayant caractérisé la zone d'étude durant les intervalles temporels étudiés (1960 – 2022).
3. Les informations hydrologiques concernent les hauteurs d'eau circulant dans l'hydro système du bassin versant de l'oued objet de cette étude où il a été question d'exploiter des données issues des campagnes de mesures effectué par la SONELGAZ, celles-ci allant de 1953 à 1992. Les informations manquantes ont été estimées sur la base de modèles de calcul mathématique à savoir le modèle empirique de COUTAGNE.
4. Les informations relatives à la charge sédimentaire d'Oued Atteba provenant de l'activité érosive opérant sur les versants et les cours d'eau. Les produits d'érosion sont calculés en appliquant un modèle empirique calés sur des résultats de mesures effectués par la société de SONELGAZ.
5. Les documents cartographiques exploités concernent des cartes thématiques existantes et des photos aériennes et images satellitaires couvrant la zone d'étude, notant que les photos aériennes utilisées proviennent de la prise de vue de l'année 1960, les images satellitaires à haute résolution provenant du serveur Google Earth datant respectivement de 2002, 2012 et 2022.

Les documents cartographiques en question ont fait l'objet d'insertion et de numérisation dans un environnement informatique du système d'information géographique (Arc gis). Des corrections d'ordre géométrique ont été apportées aux images pour pouvoir effectuer des mesures d'arpentage, il s'agit d'un géo référencement sur la base des points de calage connus en coordonnées planimétrique (x, y), la projection cartographique utilisée est UTM WGS 84. Les figures 32 (a, b, c, d) couvrant la zone d'étude du fond de vallée d'oued Atteba sont des extraits des images satellites exploités en composition colorée ainsi la photo aérienne en panchromatique.

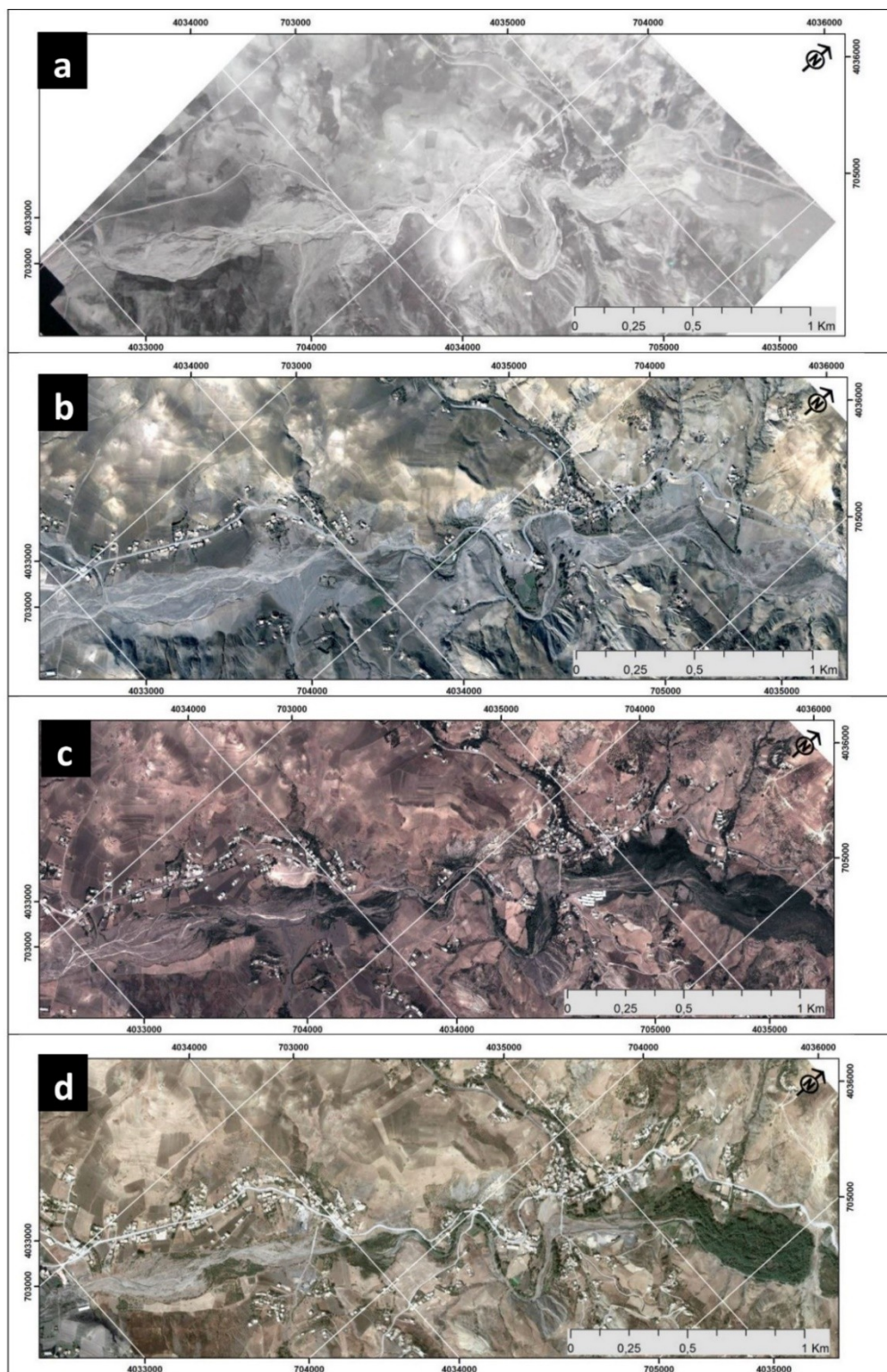


Figure 32: Extraits des images satellites et photo aérienne diachroniques de la zone d'étude

a : photo aérienne de 1960, b : image satellite de 2002, c : image satellite de 2012, d : image satellite de 2022.

IV.3.4 Étape de traitement et d'analyse :

IV.3.4.1 Classification numérique des images satellites et photo aérienne :

La méthode de classification adoptée est la classification supervisée basée sur une connaissance à priori des unités composant les paysages du fond de vallée, cette méthode est jugée plus pertinente (Enderle et al, 2005). Le logiciel Arc Gis a été utilisé et les classes sont codifiées sous forme de lettre d'abréviation indiquant les premières lettres l'appellation de chaque classe. Les résultats de la classification obtenus pour chaque image et photo utilisée sont représentés dans les figures suivantes (figure 33, A,B,C et D..) Selon un ordre chronologique de l'ancien au récent. Des données d'archive et des enquêtes auprès des riverains ont été utilisées pour retracer quelques informations sur l'occupation du sol sur la photo aérienne datant de 1960.

La composition des classes obtenu pour les quatre classifications sont indiqué dans la légende ci après :

Composition des classes obtenues par la classification de la photo aérienne (1960) :

ALM_1960 : Alluvion du lit mineur (sables et galets), *DAS 1* : Dépôts argileuses et sableux (Mosaïque, terrasses et apports latéraux), *DAS 2* : Alluvions argileuses et sableuses,

Composition des classes obtenues par la classification de l'image stellite (2002) :

ALM_2002 : Alluvions du lit mineur (galet, sable, argile) ; *AM* : Alluvions en mosaïque (Sables, silts et argiles) ; *VPSMH* : formation végétale de plantules muscinal et herbacée ;

Composition des classes obtenues par la classification de l'image stellite (2012) :

ALM_2012 : Alluvions du lit mineur (sable et galets), *AMS-2012* : Alluvions en mosaïque sédimentaire (argiles, sables, gravats et galets) ; *VSARH* : Formation végétale -strate arbustive et herbacée ; *ALMAJ*

Composition des classes obtenues par la classification de l'image stellite (2022) :

2022 : Alluvions du lit majeur (sables, argiles, silt, galets et graviers) ; *ALMID 2022* : Alluvions du lit mineur et de débordement (sables, argiles, silt, galets et graviers) ; *DOATR* : Dépôts d'origine anthropique et dépôts remaniés par l'homme ; *VSARB* : Formation végétale -strate arborée ; *VSARH 2022* : Formation végétale -strate arbustive et herbacée

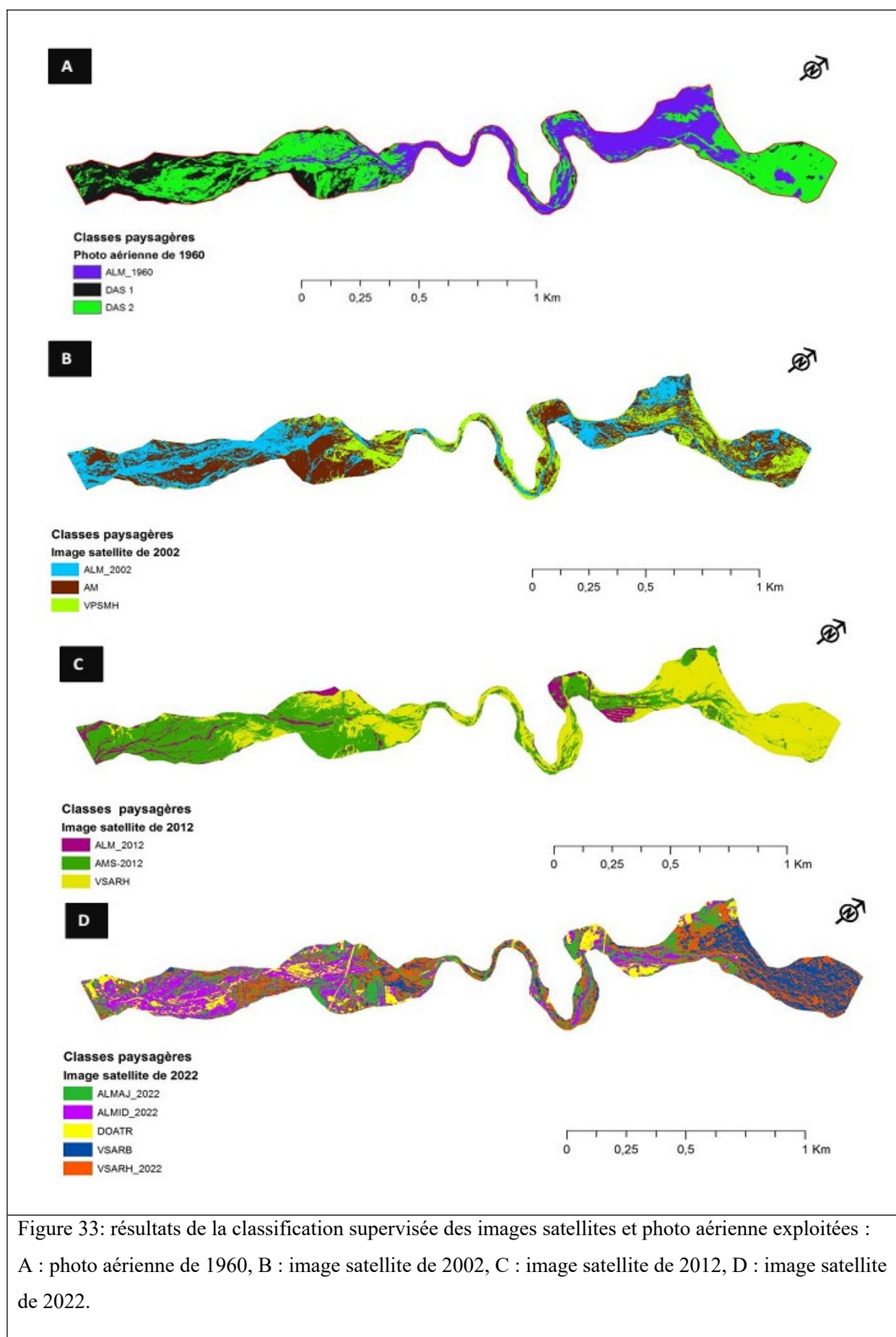


Figure 33: résultats de la classification supervisée des images satellites et photo aérienne exploitées :
A : photo aérienne de 1960, B : image satellite de 2002, C : image satellite de 2012, D : image satellite de 2022.

IV.3.4.1 Calcul numérique des surfaces de chaque classe correspondant aux unités paysagères obtenues :

Dans cette opération, le travail consistait à convertir les images classifiées du format raster en format vectorisé pour pouvoir effectuer le calcul. L'outil utilisé dans Arc GIS est « conversion Tools » de Arc Toolbox qui permet de convertir les taches colorées dans l'image et qui correspondent aux classes paysagères en polygones dynamiques duquel on a calculé les surfaces, les résultats obtenus sont indiqués suivant un ordre chronologique dans les tableaux correspondant à chaque image classifiée.

Tableau 13 : Répartition des surfaces des unités paysagères (1960)

Date de prise de vue	Classes	composition de l'unité paysagère	Surface en (ha)
Photo de 1960	ALM_1960	Alluvion du lit mineur (sables et galets)	17,72
	DAS 1	Dépôts argileux et sableux (Mosaïque, terrasses et apports latéraux)	11,52
	DAS 2	Alluvions argileuses et sableuses	26,67

La dynamique des superficies des unités paysagères identifiées par image satellite entre 1960 et 2022 fluctue avec des dates intermédiaires 2002 et 2012 laisse apparaître une certaine évolution régressive et progressive récapitulée dans les tableaux 2, 3 et 4 et la synthèse dans la figure 5.

Tableau 14: Répartition des surfaces des unités paysagères (2002)

Date de prise de vue	Classes	composition de l'unité paysagère	Surface en (ha)
Image satellite de 2002	ALM_2002	Alluvions du lit mineur (galet, sable, argile)	18,25
	AM	Alluvions en mosaïque (Sables, silts et argiles)	25,54
	VPSMH	Végétations pionnières en strate muscinal et herbacée	12,12

Tableau 15: Répartition des surfaces des unités paysagères (2012)

Date de prise de vue	Classes	composition de l'unité paysagère	Surface en (ha)
Image satellite de 2012	ALM_2012	Alluvions du lit mineur (sable et galets)	4,46
	AMS-2012	Alluvions en mosaïque sédimentaire (argiles, sables, gravats et galets)	25,87
	VSARH	formation végétale -strate arbustive et herbacée	25,59

Tableau 16: Répartition des surfaces des unités paysagères (2022)

Date de prise de vue	Classes	composition de l'unité paysagère	Surface en (ha)
Image satellite de 2012	ALMAJ_2022	Alluvions du lit majeur (sables, argiles, silt, galets et graviers)	12,67
	ALMID_2022	Alluvions du lit mineur et de débordement (sables, argiles, silt, galets et graviers)	13,24
	DOATR	Dépôts d'origine anthropique et dépôts remanié par l'homme	5,89
	VSARB	formation végétale -strate arborée	10,43
	VSARH_2022	formation végétale -strate arbustive et herbacée	13,68

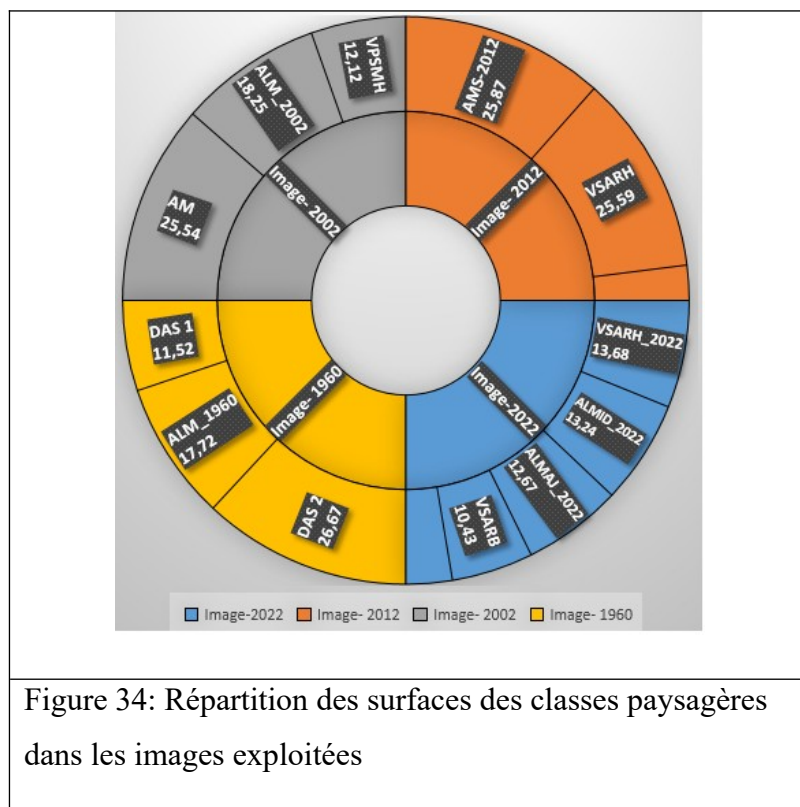


Figure 34: Répartition des surfaces des classes paysagères dans les images exploitées

IV.3.4.2 Élaboration des matrices de transition :

Les matrices de transition expriment nominalement (typologie des classes) et numériquement l'évolution spatiotemporelle des unités du paysage éco géomorphologique du fond d'oued depuis la date de référence correspondant à l'année 1960 (photo aérienne) jusqu'à l'année 2022 à travers les trois intervalles à savoir de (1960 à 2002), de (2002 à 2012) et de (2012 à 2002). Nous avons converti les images classifiées en informations vectorisées sur lesquelles nous avons opéré des analyses statistiques à l'aide de l'outil « Analyse Tools » de Arcgis, les résultats numériques (pourcentage des surfaces) et typologiques obtenus sont indiqués dans les tableaux suivants :

Tableau 17: Matrice de transition du paysage éco-géomorphologique du fond d'oued dans l'intervalle temporel entre 1960 -2002.

		Unités éco-géomorphologiques(2002) (%)		
Classes		ALM_2002	AM	VPSMH
Unités éco-géomorphologiques (1960) (%)	ALM_1960	29,71	41,57	28,62
	DAS 1	41,57	49,59	8,68
	DAS 2	30,65	46,64	22,60

Tableau 18: Matrice de transition du paysage éco-géomorphologique du fond d'oued dans l'intervalle temporel entre 2002- 2012

	Classes	Unités éco-géomorphologiques (2012) (%)		
		ALM_2012	AMS-2012	VSARH
Unités éco-géomorphologiques (2002) (%)	ALM_2002	11,46	57,88	30,55
	AM	6,64	49,89	43,35
	VPSMH	5,48	20,83	73,49

Tableau 19: Matrice de transition du paysage éco-géomorphologique du fond d'oued dans l'intervalle temporel entre 2012- 2022

	Classes	Unités éco-géomorphologiques (2022) (%)				
		ALMAJ_2022	ALMID_2022	DOAT_2022	VSAR_2022	VSARH_2022
Unités éco-géomorphologiques (2012) (%)	ALM_2012	26,07	36,63	26,16	1,94	8,96
	AMS-2012	28,12	37,04	14,46	5,31	14,93
	VSARH	16,45	7,86	3,82	35,01	36,72

IV.4 Étude de l'évolution des métriques paysagères du fond de vallée :

L'opération de caractérisation statistique de l'évolution des indices paysagers relatifs aux unités éco-géomorphologiques du paysage du fond de l'oued à travers les intervalles temporels étudiés a été réalisée à l'aide du programme FRAGSTAT. Cette approche est une expression mathématique sous forme de quantification spatiale de la configuration et de la composition du paysage cartographié (McGarigal and Marks 1995, Gustafson 1998). La quantification des métriques paysagères se base sur les relations de voisinage entre les unités paysagères cartographiées appelées patch c'est-à-dire la distance entre des unités voisines de même nature, selon McGarigal (1995) la distance au plus proche voisin peut être l'une des plus importantes caractéristique du paysage. L'approche des métriques paysagères s'agit aussi d'une étude de l'hétérogénéité spatiale du paysage et sa structure ainsi sa diversité.

Par ailleurs l'étude de l'évolution des métriques paysagères dans un intervalle temporel est un outils d'évaluation de la dynamique ou la stabilité des unités composant le paysage éco-géomorphologique de la zone d'étude. Cette dynamique est bien évidemment en relation avec

plusieurs facteurs dont l'activité hydrologique et la dynamique de l'hydro système du bassin versant dans son ensemble (Malavoi et Souchon 1996 ; Miller et al 2002). Bien que les indices des métriques paysagères et l'interprétation des valeurs sont largement documentés dans les publications réalisées dans le domaine de l'écologie des paysages (McGarigal and Marks 1995, Gustafson 1998), les interprétations doivent être faites avec vigilance selon le contexte du paysage étudié, les objectifs de l'étude et le domaine traité (Cushman et al, 2008). Parmi plusieurs indices appliqués dans le calcul des métriques paysagères, ceux qui répondent le mieux à nos objectifs en relation avec la thématique combinant la dynamique géomorphologique et l'évolution écologique des fonds d'oueds, sont les Indices indiqués dans le tableau 16 ci-dessous. Pour plus de détail sur les relations de calcul des de chaque indice, le lecteur est renvoyé au manuel d'utilisation de Fragstats en accès libre:

Tableau 20: Indices des métriques paysagères choisis pour caractériser le paysage du fond de vallée.

Indice	interprétation	Intervalle des valeurs
<i>LPI: La métrique du plus large fragment</i>	La métrique du plus large fragment (LPI) permet de quantifier la part relative qu'il occupe par rapport à l'ensemble du paysage étudié	$0 < LPI \leq 100$
<i>PA FRAC : La dimension fractale du périmètre-surface</i>	décrit le niveau de complexité de la forme des unités paysagère à travers la mesure du taux de croissance du périmètre par unité de surface	$1 \leq \text{PAFRAC} \leq 2$
<i>NP :nombre de patch</i>	Le nombre de patches permet de décrire la fragmentation d'un paysage : plus le nombre de patches est élevé, plus le paysage est fragmenté	$NP \geq 1$, sans limite
<i>CONTAG : L'indice de contagion</i>	Cet indice est exprimé en pourcentage, la valeur nulle correspondant à des patches désagregés au maximum.	$0 < \text{CONTAG} \leq 100$
<i>ENN : La distance euclidienne au plus proche voisin</i>	La distance euclidienne au plus proche voisin indique la distance entre un patch et le patch de même type le plus proche	$\text{ENN} > 0$, sans limite
<i>AI : L'indice d'agrégation</i>	L'indice d'agrégation (AI) permet de décrire le niveau d'agrégation ou d'isolement des fragments dans le paysage. Les faibles valeurs de cette métrique indiquent une morphologie fragmentée où les surfaces sont dispersées, la valeur maximale étant atteinte quand ces dernières forment un seul fragment compact	$0 \leq \text{AI} \leq 100$
<i>COHESION : L'indice de cohésion</i>	L'indice de cohésion des patches mesure la connectivité physique d'un type de patch. Sa valeur est comprise entre 0 et 100. Elle tend vers 0 lorsque la proportion du paysage occupée par le type de patch étudié diminue, est subdivisée et moins connectée. Elle augmente à mesure que cette proportion augmente jusqu'à atteindre un seuil de percolation. Ainsi cet indice traduit la diversité du paysage : plus l'indice est élevé et plus le nombre d'unité est élevé et plus le paysage est diversifié	Non Fixé
<i>DIVISION : indice de division</i>	$\text{DIVISION} = 0$ lorsque le paysage est constitué d'un seul patch. DIVISION atteint sa valeur maximale lorsque le paysage est au maximum subdivisé ; c'est-à-dire lorsque chaque cellule est un patch séparé	$0 \leq \text{DIVISION} < 1$
<i>CONNECT : indice de connectivité</i>	$\text{CONNECT} = 0$ lorsque soit le paysage se compose d'un seul patch, soit toutes les classes se composent d'un seul patch, soit aucun des patches du paysage n'est "connecté" (c'est-à-dire à l'intérieur de la distance seuil spécifiée par l'utilisateur d'un autre patch du même type). $\text{CONNECT} = 100$ lorsque chaque patch du paysage est connecté	$0 \leq \text{CONTAG} \leq 100$
<i>LSI : La forme du paysage</i>	permet de mesurer la régularité des fragments. Les fortes valeurs de cet indice indiquent que les fragments présentent des formes irrégulières et complexe	$\text{LSI} \geq 1$, sans limite

<i>SHDI : l'indice de diversité de Shannon</i>	Cet indice correspond à la diversité des éléments du paysage. Plus la valeur de l'indice augmente plus le paysage est diversifié en éléments	$SHDI \geq 0$
<i>SHEI : Shannon's Evenness Index</i>	Cet indice augmente avec la diversité en éléments du paysage.	$0 \leq SHEI \leq 1$

Les formules mathématiques de calcul de chaque indice sont les suivantes :

1. Métriques de Composition et de Fragmentation		
Indice	Formule de Calcul	Description des Variables
LPI (Largest Patch Index)	$LPI = \frac{\max(a_{ij})}{A} \times 100$	a_{ij} : surface du fragment ij ; A : surface totale du paysage.
NP (Number of Patches)	$NP = n_i$	n_i : nombre total de fragments (patches) dans le paysage.
DIVISION (Landscape Division Index)	$DIVISION = \left[1 - \sum_{j=1}^n \left(\frac{a_{ij}}{A} \right)^2 \right]$	Basé sur la probabilité que deux points choisis au hasard ne soient pas dans le même fragment.
2. Métriques de Forme et de Complexité		
Indice	Formule de Calcul	Description des Variables
PAFRAC (Perimeter-Area Fractal Dimension)	$PAFRAC = \frac{2}{\beta}$	β est la pente de la régression log du périmètre (p_{ij}) sur le log de la surface (a_{ij}).
LSI (Landscape Shape Index)	$LSI = \frac{e_i}{2\sqrt{\pi \cdot A}}$	e_i : longueur totale des bordures ; A : surface totale. Mesure la régularité des formes.

3. Métriques de Configuration Spatiale (Agrégation et Connectivité)

Indice	Formule de Calcul	Description des Variables
CONTAG (Contagion Index)	$CONTAG = \left[1 + \frac{\sum \sum (P_i \frac{g_{ik}}{\sum g_{ik}}) \cdot \ln(\dots)}{2 \ln(m)} \right]$	P_i : proportion du type i ; g_{ik} : nombre de adjacences entre classes i et k .
AI (Aggregation Index)	$AI = \left[\frac{g_{ii}}{\max g_{ii}} \right] \times 100$	g_{ii} : nombre d'adjacences de cellules de même type.
ENN (Euclidean Nearest-Neighbor)	$ENN = h_{ij}$	h_{ij} : distance en ligne droite (mètres) vers le voisin le plus proche de même type.
COHESION (Patch Cohesion Index)	$COHESION = \left[1 - \frac{\sum p_{ij}}{\sum p_{ij} \sqrt{a_{ij}}} \right] \cdot \left[\dots \right]$	p_{ij} : périmètre ; a_{ij} : surface ; Z : nombre total de cellules.
CONNECT (Connectance Index)	$CONNECT = \left[\frac{\sum_{j=k}^n c_{ijk}}{\frac{n_i(n_i-1)}{2}} \right] \times 100$	c_{ijk} : jonction entre fragments j et k selon une distance seuil.

4. Indices de Diversité

SHDI (Shannon's Diversity Index)	$SHDI = - \sum_{i=1}^m (P_i \cdot \ln P_i)$	P_i : proportion du paysage occupée par la classe i .
SHEI (Shannon's Evenness Index)	$SHEI = \frac{- \sum_{i=1}^m (P_i \cdot \ln P_i)}{\ln m}$	m : nombre total de classes présentes.

IV.4.1 Outils de calculs des métriques paysagères :

Les métriques paysagères sont calculées à l'aide du logiciel FRAGSTATS qui offre des possibilités performantes en matière de calcul, une centaine d'indices sont proposés en fonction des besoins d'analyse intégrant les patches, les classes et le paysage intégral. La méthode consiste à exploiter l'image raster issues de la classification des unités paysagères dont les valeurs sémantiques sont attribuées aux classes selon une structure pouvant être reconnu par le programme, le format de l'image raster utilisé dans le présent travail est le Géotif.

En ce qui concerne le processus de calcul appliqué dans Fragstats, selon les objectifs de l'étude, il est proposé plusieurs paramétrage dans le logiciel à savoir :

- La règle de voisinage qui consiste à choisir entre la règle des 4 cellules et celle des 8 cellules pour délimiter les patches (unités paysagère). La règle des 4 cellules ne considère que les 4 cellules adjacentes qui partagent un côté avec la cellule focale (c'est-à-dire les voisins orthogonaux) pour déterminer l'appartenance au patch. La règle des 8 cellules considère les 8 cellules adjacentes, y compris les 4 voisins orthogonaux et les 4 voisins diagonaux. Ainsi, si la règle des 4 cellules est sélectionnée, deux cellules de la même classe qui se touchent en diagonale seront considérées comme faisant partie de patches séparés ; si la règle des 8 cellules est sélectionnée, celles-ci seront considérées comme faisant partie du même patch. Le choix de la règle de voisinage du correctif affectera la plupart des métriques de configuration, mais n'aura aucun effet sur les métriques de composition. La règle des 8 cellules est la règle par défaut
- Le choix du niveau d'analyse qui consiste à préciser dans les paramètres du logiciel lequel des trois niveaux sont concernés par les métriques paysagères où il est proposé le niveau d'analyse des patches, des classes et le niveau du paysage dans son ensemble en tant qu'entité fonctionnelle. donc le niveau d'analyse dépend surtout de l'objectif d'analyse c'est-à-dire est ce que l'opérateur s'intéresse aux niveaux élémentaires (patches et classes) ou bien il s'intéresse à la structure du paysage dans son ensemble où les métriques paysagère à calculer et caractériser la structure et la composition spatiale du paysage dans son intégralité, dans notre cas, il nous intéresse ce dernier niveau qui est le niveau « paysage » où on cherche à caractériser la structure du paysage et sa composition qui traduisent les modalités de distribution et d'organisation spatiale des éléments composants ce paysage, cette caractérisation paysagère est interprétée selon un des variables spatiales qui s'imbriquent dans le système fonctionnel du paysage étudié.

IV.4.2 Résultats des calculs des métriques paysagères :

Les résultats obtenus par les calculs des métriques paysagères pour chaque classification correspondant aux images étudiées sont indiqués dans le tableau ci-après.

Tableau 21: résultats de calcul des métriques paysagères pour les quatre classifications des images satellites et photo aérienne.

Métriques paysagères	Année 1960	Année 2002	Année 2012	Année 2022
NP	4197,00	12144,00	11796,00	13479,00
COHESION	99,66	99,35	99,55	98,91
AI	93,74	87,20	88,61	80,34
CONTAG	41,23	32,43	40,64	32,29
LSI	32,96	67,35	54,25	91,73
LPI	26,60	16,34	30,81	11,54
ENN_MN	3,23	2,60	2,80	2,95
PAFRAC	1,38	1,39	1,45	1,44
SHDI	1,04	1,05	0,92	1,57
SHEI	0,95	0,96	0,84	0,98
DIVISION	0,84	0,94	0,84	0,97
CONNECT	0,14	0,06	0,06	0,08

Les variations des métriques paysagères à travers les trois intervalles temporels 1960-2002 ; 2002-2012 et 2012-2022 ont été calculées en faisant la différence des valeurs des métriques du paysage récent et les métriques du paysage précédent. Les résultats sont indiqués dans le tableau 22 ci-après :

Tableau 22: évolution des métriques paysagères selon les trois intervalles des images classifiées

Métrique paysagère	Metrics Index Change between 1960-2002	Metrics Index Change between 2002-2012	Metrics Index Change between 2012-2022
NP	7947,00	-348,00	1683,00
COHESION	-0,31	0,20	-0,63
AI	-6,54	1,41	-8,27
CONTAG	-8,80	8,21	-8,35
LSI	34,39	-13,10	37,48
LPI	-10,26	14,47	-19,27
ENN_MN	-0,64	0,20	0,16
PAFRAC	0,00	0,07	-0,01
SHDI	0,01	-0,13	0,65
SHEI	0,01	-0,12	0,14
DIVISION	0,09	-0,10	0,13
CONNECT	-0,08	-0,01	0,02

L'évolution des métriques paysagères indiquées dans le tableau est représentée graphiquement dans figure 35 ci-contre :

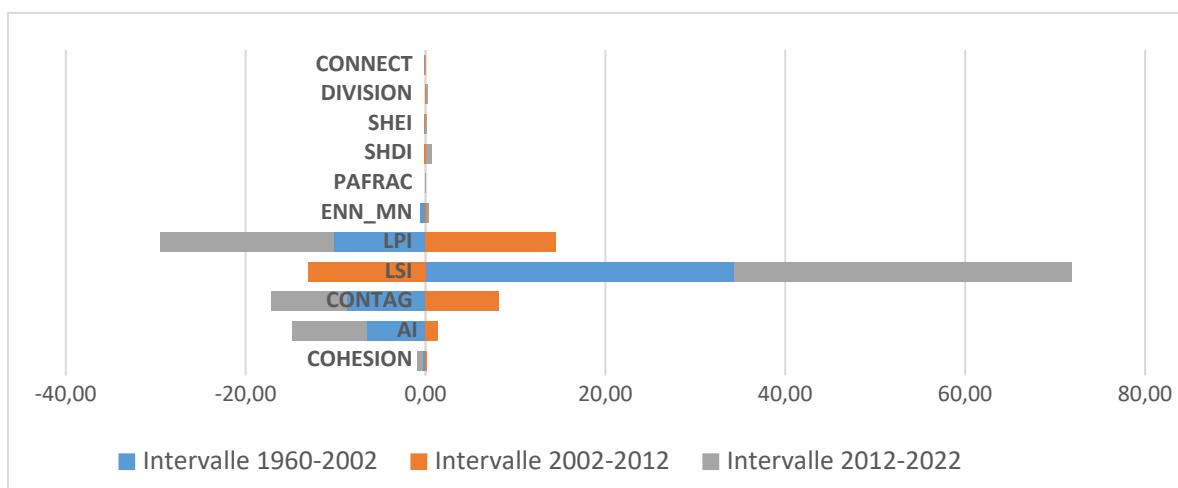


Figure 35 : Les variations des métriques paysagères à travers les trois intervalles temporels de 1960-2002 ; 2002-2012 et 2012-2022

IV.5 Discussion des résultats

L'interprétation des résultats repose sur une correspondance entre les phases et les stades d'évolution du paysage éco-géomorphologiques du fond de vallée et les événements géomorphogéniques ayant marqué l'hydro-système du bassin versant. Chaque stade d'évolution du paysage écologique du fond de vallée a été identifié durant les trois intervalles temporels étudiés. Elle correspondait à des modifications dans le fonctionnement hydro-géomorphologique de l'oued, qui est une réponse hydrologique à des épisodes pluviométriques, ainsi une réponse liée à l'impact de la reconfiguration du paysage environnemental et socioéconomique du bassin versant incluant la zone d'étude.

Les matrices de transition (tableau 17, 18 et 19) montrent des variations des surfaces des unités paysagères qui ont eu lieu à travers les intervalles temporels allant de 1960 à 2022. Certaines unités ont été substituées par d'autres tandis que d'autres ont vu leurs surfaces se réduire, cette variation est bien évidemment liée à la dynamique hydro-géomorphologique ayant marqué le fond d'oued et ce qui traduit une instabilité du parcours des eaux, cette dynamique hydro-géomorphologique est tributaire des conditions intrinsèques liées à la morphologie du fond d'oued et ses composantes d'une part, d'autre part aux conditions du bassin versant et son fonctionnement, et les variabilités météorologiques notamment les précipitations.

A partir de l'année 2002 une nouvelle classe paysagère s'est donnée naissance et qui correspond à la classe de la végétation pionnière en strate muscinal et herbacée occupant une surface de 12.12 ha, la naissance de cette classe témoigne d'un changement important dans le fonctionnement du système hydrologique de l'oued.

Jusqu'à 2012, en l'espace de 10 ans, la végétation pionnière muscinal et herbacée s'est vue évoluer en strate de végétation arbustive et herbacée s'étendant sur une superficie de 25,59 comme l'illustre les figures ci-après (figures 36, 37, 38). Cette situation exprime clairement que des conditions nouvelles se sont introduites dans le système hydro-géomorphologique du fond d'oued et l'environnement global du bassin versant et qui ont instauré une situation de bio stabilisation conduisant à une transition remarquable d'un stade de végétation pionnière vers un stade de végétation arbustive.



Figure 36: formation végétale arbustive et herbacée du fond de la vallée en février 2012 (Photo prise de loin) . Source : (Hamdani.2012)



Figure 37: Formation végétale arbustive et herbacée du fond en février 2012 (photo prise de près) . Source : (Hamdani.2012)



Figure 38: formation végétale arbustive et herbacée (Tamarix et laurier rose) du fond d'oued en Juin 2012 (prise de près) . Source : (Hamdani.2012)

Durant l'intervalle temporelle allant du 2012 au 2022, le paysage du fond d'oued s'est vue enrichi par cinq classes paysagères, deux classes correspondant à la mosaïque sédimentaire qui ont marqué le paysage durant les deux intervalles précédents allant de 1960 à 2012, deux classes correspondent aux unités de formation végétale, la cinquième correspond à l'empreinte anthropique.

La classe de formation végétale arbustive et herbacée ayant marqué le paysage au cours de l'Intervalle temporelle compris entre les années 2002-2012 s'est vue évoluée en deux classes correspondant à deux strates de formation végétale, il s'agit de la formation végétale de la strate arborée d'une superficie de 10,43 ha, et la classe de formation végétale de la strate arbustive et herbacée d'une superficie de 13,68 ha. La figure 39 et la figure 40 ci-après illustrent la situation nouvelle du paysage du fond d'oued instaurée au cours de l'intervalle temporelle allant du 2012 au 2022.



Figure 39: Formation végétale arborée et arbustive (peuplier et Tamarix) du fond d'oued en Juin 2022. .



Figure 40: formation végétale arborée et arbustive (peuplier et Tamarix) du fond d'oued en Juin 2022 (prise de près) .

IV.5 .1 Phases d'évolution du paysage éco-géomorphologique de Oued Atteba durant les 60 dernières années

La combinaison des résultats obtenus par la matrice de transition et ceux obtenus par le calcul des métriques paysagères nous a conduit à subdiviser les stades d'évolution du paysage du fonde vallée en quatre phases distincts :

Une situation d'héritage correspondant à la configuration du paysage en l'année 1960, une phase entre 1960-2002, une phase 2002-2012 et la phase de 2012-2022.

a- Situation du Paysage hérité en l'année 1960 :

Les métriques paysagères calculées pour la photo aérienne de l'année 1960 classifiée indique que le paysage hérité présente des faibles fragmentation et complexité par rapport aux années suivant l'année 1960 comme le traduit l'indice de forme du paysage LSI ainsi l'indice du nombre de patch Np dont les valeurs sont respectivement 32,96 et 4197. Par ailleurs l'indice d'agrégation est bien corrélé avec les deux indices **NP** et **LSI** avec une valeur maximale de 93, 74 qui traduit ainsi un paysage formant un fragment compact. Cette situation héritée peut être considérés comme une situation d'équilibre hydro-géomorphologique qui suppose que les apports en flux d'énergie entrant dans le système hydrologique sont équivalent aux apports sortant, cette situation suppose aussi que l'oued Atteba se présentait comme un seul tracé linéaire profond sans chenaux divagants (figure 41) ce qui n' a pas permis à la composition écologique (formation végétale) de se constituer.



Figure 41: Extrait de carte d'état-major de 1927 montrant Oued Atteba sous forme d'un seul tracé.

b- Phase d'instabilité morphologique et de dynamique hydro-géomorphologique intense de Oued Atteba entre 1960-2002

Au cours de cette phase, une recomposition des unités paysagères du fond de vallée a été observée à travers une redistribution des mosaïques sédimentaires. Un important étalement dans la section mouillés de l'oued qui a conduit à la disparition des terrasses alluviales et qui traduit un remplissage et un exhaussement très important des lit mineurs, ce phénomène a conduit à la naissance de chenaux divagant sur une section très importante, cette situation témoigne ainsi sur les apports sédimentaires très importants qui ont été acheminés par les crues d'une fréquence de retour centennale et décennale. Une étude réalisée sur le bassin versant de Oued Atteba a montré que les apports en sédiments solides ont atteint des valeurs spectaculaires au cours de la période allant de 1960 à 2002 dont les valeurs maximales ont été enregistrées surtout en 2002 (Hamdani.2012). Les métriques paysagères calculées pour l'image satellite classifiée de 2002 indiquent que le paysage du fond de vallée d'Atteba a été marqué par une fragmentation très importante où la valeur NP a passé de 4197 patchs à 12144 patchs, cette valeur du NP est corrélée avec les indices d'agrégation AI, l'indice de division et l'indice LSI, ce dernier a passé de 32.96 à 67.35 traduisant un paysage très complexe en raison de la très forte fragmentation.

Il faut noter que l'année 2002 est marquée par les prémices de recrutement de quelques plantules pionnières qui ont survécu en instaurant le début de la phase de succession écologique primaire construite sur des alluvions nues (Amoros et al 1986 , Corenblit et al 2020). Avant cette date toutes les tentatives d'installation des plantes pionnières finissaient par un échec en raison d'absence de conditions propices (Shafroth et al., 2002 ; Scott et al., 1997) soit par l' enfouissement sous les apports alluviaux qui se succèdent d'une année hydrologique à l'autre soit par l'arrachage opéré par les crues d'oued (Jourdain et al, 2017 ; Karrenberg et al. ; Merritt et al 2010 ; Corenblit et al , 2009) .La survie des premières quelques plantules pionnières à la fin de l'année 2002 est interprétée par l'affaiblissement des forces motrices hydrodynamiques des crues où la tendance d'atterrissement des sédiments et l'exhaussement des lits emportait sur la mobilisation d'autant que la pente du fond d'oued a diminué pour atteindre une valeur de 3 %. Ces nouvelles conditions ont permis aux jeunes Plantules pionnières de résister aux crues à faible motricité.

c- phase de stabilité hydro-géomorphologique relative, de succession écologique primaire et de construction d'habitat entre 2002-2012

La matrice de transition réalisée pour l'intervalle temporelle compris entre 2002 et 2012 indique que l'espace occupé par les formations végétales a passé de 12.12 ha en 2002 à 25.59 ha en 2012. Ce qui signifie que d'autres mosaïque sédimentaires ont été investies par la végétation au cours de 10 ans , cette situation peut être interprétée par une relative stabilité hydro-géomorphologique ayant offert des conditions favorables et propices aux plantules déjà existantes en 2002 de survivre puis d'évoluer en stade pionnier comme l'illustre la figure 25 (Amoros et al 1986 ; Corenblit et al 2020). Cette stabilité paysagère est ainsi exprimée par les métriques paysagères calculées pour l'image satellite de 2012 où la valeur NP du paysage classifié pour cette image n'a pas beaucoup changé par rapport au paysage de l'image prise en 2002 on note une valeur NP égale à 11796 patchs contre une valeur de 12144 patchs en 2012 avec une différence de – 348 patchs. La même observation pour les autres indices paysagers qui n'ont pas marqué des changement significatifs, il s'agit notamment de l'indice d'agrégation qui passé de 87.2 en 2002 à 88.61 2012 avec une différence 1.41 traduisant ainsi une stabilité de cette indice, mêmes remarques sont faites pour les indices de Cohésion et de connectivité.

Il faut souligner que plusieurs facteurs intrinsèques et extrinsèques ont conduit à instaurer cette nouvelle situation de stabilité relative. L'activité hydrodynamique des crues a connu une baisse très sensible bien que les apports pluviaux ont connu une abondance durant les 10 ans entre

2002 et 2012. Cette baisse de motricité est due surtout à des mutations qui sont produites au niveau de l'oued où des interventions de stabilisation des pentes du profil d'oued ont été opérées à des fins d'aménagement. Cet aménagement a contribué grandement à favoriser la survie des plantules qui se sont évoluées ensuite en espèces pionnières pour ainsi gagner en surface le long du profil longitudinal de l'oued. Les cures ont continué à alimenter le système racinaire des plantules en produits sédimentaires fins et grossiers provenant d'une activité érosive très intense opérée dans le bassin versant de Oued Atteba (Hamdani, 2012). Elles apportent de la matière organique et contribuent au rechargement des nappes phréatiques alluviales qui assurent une humidité et une croissance importante et rapide surtout en période printanière et estivale. Ces conditions ont permis aux plantes pionnières de grandir assez rapidement, ainsi, ces conditions ont conduit au recrutement des nouvelles plantules le long du profil de l'oued vers la partie amont et aval (Corenblit et al 2020, Guilloy-Froget et al., 2002), .

d- Phase de stabilité hydro-géomorphologique, activité écologique post-pionnière et construction de niche.

Durant la décennie 2012-2022 une nouvelle ère écologique et bio-géomorphologique est inscrite dans le paysage du fond d'oued annonçant le début de stade post pionnier. C'est un intervalle au cours duquel la bio-construction des entités bio-géomorphologiques a progressé pour achever une succession primaire et passer à un stade post pionnier, sous forme de forêt alluviale composée de strate arborée et une strate arbustive et herbacée. Ce passage au stade post pionnier serait interprété par une stabilité hydrogéomorphologique ayant conduit les formations végétales à progresser (Corenblit et al 2009). Les valeurs des métriques paysagères expriment clairement cette stabilité où le nombre de patchs ayant caractérisé la période de 2012-2022 est passé de 11796 à 13479 traduisant une stabilité des composantes paysagères du fond d'oued. Cela a accordé le temps nécessaire à l'achèvement de la bioconstruction des entités biogéomorphologiques, la valeur du NP est bien corrélée avec les indices d'agrégation AI, de connectivité et de division.

La stabilité paysagère est ainsi exprimée dans l'indice d'agrégation AI et l'indice de cohésion qui n'ont pas beaucoup changé entre l'année 2012 et 2022. Ainsi, ce qui il faudrait noter c'est l'augmentation des valeurs de l'indice du paysage relatif à la diversité, il s'agit de l'indice de diversité de Shannon (**SHDI**) qui a passé de 0.92 à 1.57 traduisant un paysage diversifié. Par ailleurs, deux phénomènes intervenaient durant cet intervalle temporel pour instaurer une stabilité des entités bio géomorphologiques, d'une part le système racinaire des formations végétale post pionnière a joué un rôle de piège à sédiments et à la matière organique pour

renforcer le système racinaire des plantes (Corenblit et al 2020 ; Piégay, 2003, 1997). D'autre part l'empreinte anthropique qui est traduite surtout par des aménagements et des activités opérées au niveau du fond d'oued imposant la reconfiguration de son paysage dans certaines sections. Durant cette phase les entités bio-géomorphologiques ont atteint un stade de maturité fonctionnelle où les espèces végétales peuvent subvenir à leur propres besoins en nutriment, en reproduction sans recours aux apports exogènes grâce à une forte biomasse aérienne et un système racinaire profond et très développés (figures 39 et Figure 40). La présence de nids (fig.42) traduit clairement l'achèvement de phase de construction de niche (Corenblit et al 2020).



Il y a lieu à noter qu'un auto-éclaircissement s'est opéré dans la formation forestière, ce phénomène se rapporte à une compétition sur les ressources selon Westoby (1984). Cette compétition est bien traduite par la croissance très importante des peupliers. Par ailleurs, nous rappelons que d'importantes activités anthropiques ont caractérisé le fond de vallée de oued Atteba dans sa section aval durant la décennie de 2012 à 2022 (chapitre 3) conduisant ainsi à l'affaiblissement de l'énergie cinétique et la motricité des crues, chose qui a conduit les unités bio géomorphologiques pionnières à atteindre le stade post pionnier sans être impactées par des crues exceptionnelles à forte activité motrice (Ruffinoni et al, 2003). Les activités en question concernent des aménagements hydrauliques opérés sur le profil de l'oued notamment pour la stabilisation des lits, le passage du viaduc et de l'aqueduc traversant certaines sections de l'oued, ainsi que des opérations d'extraction des alluvions destinées aux travaux publics.

Le schéma (fig.43) offre une synthèse globale intégrée sur les résultats d'analyse et les interprétations associées exprimant les différentes phases de hydromorphodynamique et transformation du paysage géoécologique du fond de vallée de Oued Etteba.

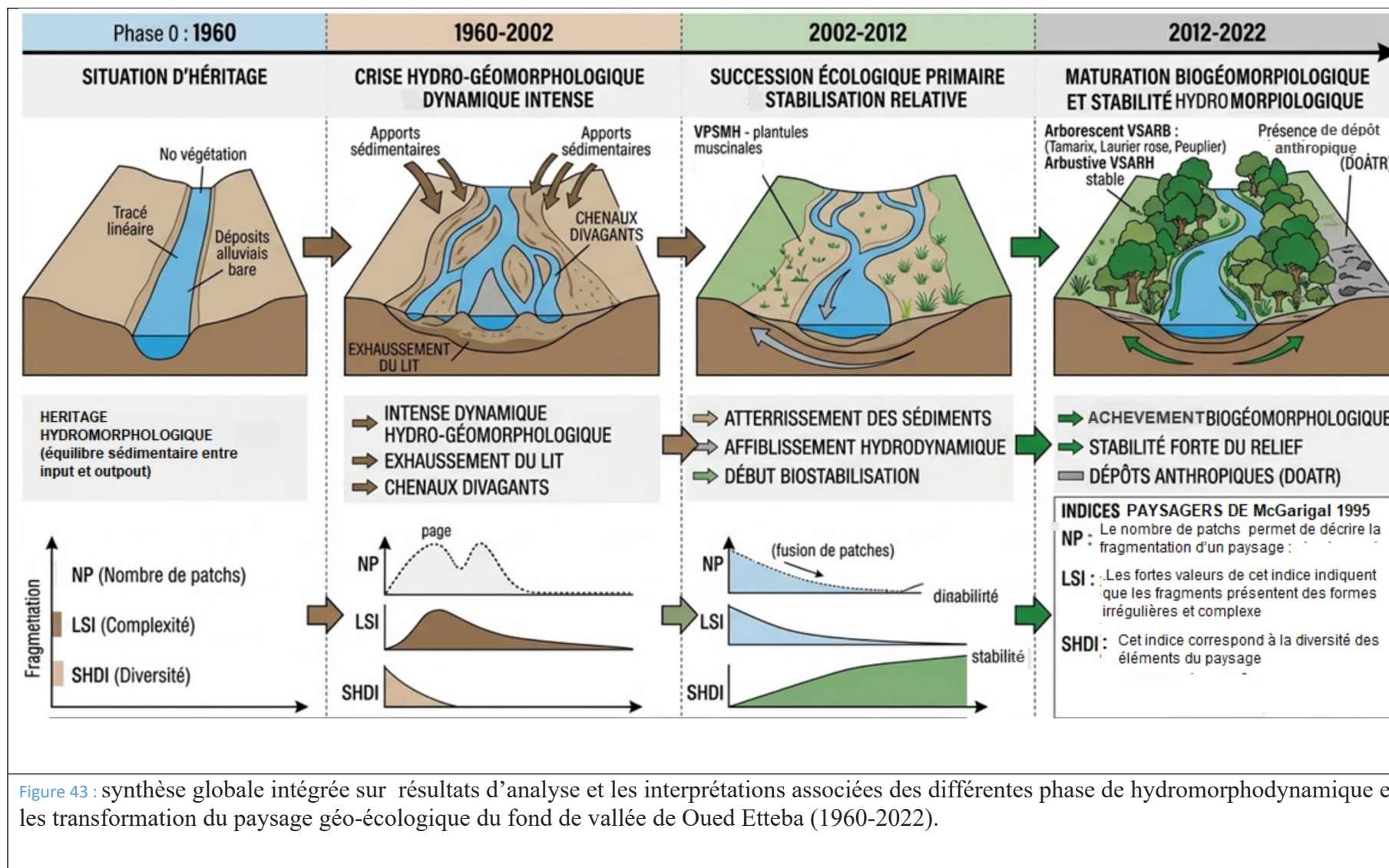


Figure 43 : synthèse globale intégrée sur résultats d'analyse et les interprétations associées des différentes phase de hydromorphodynamique et les transformation du paysage géo-écologique du fond de vallée de Oued Etteba (1960-2022).

Conclusion :

Les analyses et les interprétations réalisées à l'aide d'outils géoinformatiques et de suivis sur le terrain ont démontré clairement que le système hydromorphologique du cours d'eau de Oued Atteba a subi de profondes transformations dans sa composition et sa configuration spatiale. La variabilité spatio-temporelle des valeurs quantitatives obtenues par l'application des matrices de transition et de métriques paysagères confirme cette dynamique du paysage hydromorphologique et de sa composition. Cette étude montre que les composantes de l'environnement physique et naturel du bassin versant ont subi des dynamiques très intenses, qui ont entraîné de profondes transformations du système hydromorphologique du cours d'eau principal, conduisant par conséquent à la formation d'une forêt alluviale. Cette réponse écologique confirme, ainsi, que une des origine de la genèse de nombreux écosystèmes dans les paysages terrestres serait une réponse à des impulsions morphogéniques ayant marquée l'histoire de la Terre. La réponse écologique enregistrée dans le bassin versant d'Ighil Emda se démarque et se singularise par son caractère accéléré où une foret alluviale en **stade de climax** s'est donnée naissance en un temps record ne dépassant pas 15 ans, , cela serait expliqué par un déséquilibre dans le système morphogénique de tous le bassin versant. Cette étude, qui s'ajoute à d'autres menées dans des contextes géographiques différents a apporté une réponse pertinente qui vérifie et approuve la relation déterministe qui existe entre la dynamique géomorphologique et l'évolution des écosystèmes, d'autre part , en confirmant l'hypothèse selon laquelle on a supposé qu' il y a possibilité d'appliquer dans un sens inverse la théorie du déterminisme géomorphologique en écologie afin d'expliquer aussi tangiblement la dynamique des paysages géomorphologiques.

Par ailleurs, le suivi effectué sur le terrain a permis d'assister de près à la genèse d'un écosystème forestier et de comprendre le mécanisme de construction du paysage biogéomorphologiques en milieu fluvial dans notre cas. L'approche basée sur **métriques paysagères** s'avère applicable pour quantifier l'évolution des paysages hydrogéomorphologiques et biogéomorphologiques, les indices LSI, NP et AI étant plus appropriés pour étudier la dynamique hydromorphologique, tandis que les indices SHDI et SHEI sont mieux adaptés pour étudier l'évolution biogéomorphologique. Ainsi, les résultats obtenus devraient fournir des informations intéressantes sur l'origine et la genèse des forêts de ripisylve.

Conclusion générale

Au terme de cette recherche, on estime que d'intéressants résultats sont obtenus et qui contribuent notablement à appréhender les dynamiques géomorphologiques et écologiques dans le domaine tellien au nord de l'Algérie et la rive sud de la méditerranée. Une revue littéraire des travaux antérieurs a révélé que d'important efforts ont été consacré pour évaluer l'intensité remarquable des processus morphogéniques à l'échelle de ce bassin. Cependant, tous auteurs ayant traité cette thématique ont accordé une importance particulière à des approches de quantification de l'érosion afin de caractériser cette morphogenèse.

Nos analyses, fondées sur la confrontation entre des résultats empiriques et des observations de terrain, ont mis en évidence les limites de cette approche strictement quantitative. En effet, la morphogenèse s'exprime selon une logique spatiale complexe qui ne peut être correctement appréhendée sans une mise en relation des données d'érosion avec les structures et formes du relief. L'intégration des méthodes géomorphologiques cartographiques s'avère ainsi essentielle pour offrir une lecture complète et cohérente du fonctionnement morphogénique du bassin versant.

Par ailleurs, l'étude a permis de démontrer l'existence d'une relation étroite entre l'activité morphogénique et la genèse des écosystèmes locaux, notamment dans les fonds de vallée. Cette relation inversement proportionnelle, en termes de déterminisme géomorphologique, souligne que les dynamiques du relief peuvent influencer la structuration écologique, mais que les composantes écologiques peuvent également renseigner sur l'histoire morphogénique des milieux. Les formations forestières alluviales observées témoignent d'une morphogenèse particulièrement active ayant façonné un paysage en constante évolution.

L'application combinée des outils de cartographie géomorphologique, des Systèmes d'Information Géographique (SIG), de la télédétection, des matrices de transition et des métriques paysagères s'est révélée d'une efficacité incontestable pour l'analyse de la dynamique paysagère. Ces méthodes procurent un potentiel considérable pour les études intégrées des interactions entre relief, processus morphogéniques et organisation écologique.

Par ailleurs, certaines techniques d'investigation complémentaires et d'ordre méthodologique auraient pu avoir incontestablement leurs places dans cette recherche, l'apport du travail de terrain s'est révélé déterminant pour la validation et la fiabilité des résultats.

Enfin, en confrontant nos observations à des études menées dans d'autres contextes géographiques, notamment en Europe et en Amérique du Nord (États-Unis et Canada), il apparaît que les processus morphogéniques méditerranéens se distinguent par une intensité et une variabilité spatio-temporelle supérieures. Cette singularité résulte de la combinaison entre les conditions climatiques, la lithologie et l'occupation du sol, conférant au bassin d'Ighil Emda un intérêt scientifique particulier pour l'étude des interactions entre morphogenèse et dynamique écologique.

Références bibliographiques.

ABDI I., MEDDI M., 2015. Modélisation pluie-débit distribuée dans deux bassins versants de l'est de l'Algérie: Larhyss journal Issn 1112-3680, (23), 7-22.

ACHITE M., OUILLON S., 2007. Suspended sediment transport in a semiarid watershed, Wadi Abd, Algeria (1973–1995). Journal of hydrology, 343 (3), 187-202.

AMOROS C., BRAVARD, J. P., PAUTOU, G., 1986. Synthèse, prévisions et gestion écologique. Recherches Interdisciplinaires sur les Ecosystèmes de la Basse-Plaine de l'Ain: Potentialités Evolutives et Gestion. Doc. Cartogr. Ecol, vol. 29, p. 147-160

ANRH/SOGREAH ., 1989. Etude méthodologique sur l'hydrologie des retenues collinaires. 152p.+Annexes (non publié).

BENCHETRIT M., 1954. L'érosion anthropogène: couverture végétale et conséquences du mode d'exploitation du sol. L'information géographique, 18 (3), 100-108.

BENDIX, J. AND HUPP, C. R. 2000. Hydrological processes and impacts on riparian plant communities. *Hydrological Processes*, 14, 2977-2990.

BENDIX J. and STELLA J. C., 2013. Riparian Vegetation and the Fluvial Environment: A Biogeographic Perspective.

BERTRAND G ., 2002. Une géographie traversière : L'environnement à travers territoires et temporalités. Paris : Éditions Arguments.

BERTRAND G. 1978. Le paysage entre la nature et la société. Revue Géographique des Pyrénées et du Sud-Ouest, 49(2), 239-258.

BIROT P. 1968. Les processus morphogéniques et la morphologie des continents. Armand Colin.

BISHOP M. P., JAMES L. A., SHRODER J. F., WALSH S. J., 2012. Geospatial technologies and digital geomorphological mapping: concepts, issues and research. Geomorphology, 137 (1), 5-26.

BLONDEL J., 1979. Biogéographie et écologie. Paris : Masson.

BOUANANI A., 2004. Hydrologie, transport solide et modélisation étude de quelques sous

bassins de la Tafna (NW–Algerie). Thèse de doctorat, université de Tlemcen, 249 p.

BOUGHERARA A., 1986. L'érosion actuelle dans le Tell algérien: le cas du bassin versant de l'oued Agrioun (Doctoral dissertation, Aix-Marseille 2).

BOUROUBA M., (1998) - Phénomène de transport solide dans les hauts plateaux orientaux. Cas de l'oued Lougmenge et oued Leham dans le bassin de la Hodna. *Revue des Sciences et Technologie*, 9, 5-11.

BOUROUBA M., 1996. Essai de quantification de l'érosion actuelle à partir des mesures de turbidité en Algérie orientale: *Bull. ORSTOM*, 16, 232-250.

BOUROUBA M., 1998. Contribution à l'étude de l'érosion et des transports solides de l'Oued Medjerda supérieur (Algérie orientale). *Bulletin ORSTOM*, 18, 76-97.

BRAVARD J.-P., & PETIT, F. 1997. Les cours d'eau: dynamique du système fluvial. Armand Colin.

BROCHOT S., 1998. Approches globales pour l'estimation de l'érosion torrentielle-Apports des versants et production de sédiments. *Ingénieries-EAT*, (15), p. 61-p. 78.

CARTON A., CORATZA P., MARCHETTI M., 2005. Guidelines for geomorphological sites mapping: examples from Italy. *Géomorphologie: relief, processus, environnement*, 11 (3), 209-218.

CLÉMENT VINCENT.,1994). Contribution épistémologique à l'étude du paysage. *Mélanges de la Casa de Velázquez*, vol. 30, no 3, p. 221-237.

COHEN M., & REY, F., 2005. Dynamiques végétales et érosion hydrique sur les marnes dans les Alpes françaises du Sud. *Géomorphologie: relief, processus, environnement*, 11(1), 31-44.

CONNELL, J.H., and SLATYER, R.O. 1977 . *Mechanisms of succession in natural communities and their role in community stability and organization*. *American Naturalist*.

CORENBLIT D et AL. 2011 . *Geomorphic–vegetation succession in fluvial systems*. *Earth Surface Processes and Landforms*.

CORENBLIT D., STEIGER, J., GURNELL, A. M., & NAIMAN, R. J., 2009. Plants intertwine fluvial landform dynamics with ecological succession and natural selection: a niche construction perspective for riparian systems. *Global Ecology and Biogeography*, 18(4), 507-520.

CORENBLIT D., STEIGER, J., MAZAL, L., & TILL-BOTTRAUD, I., 2020. Relier la biogéomorphologie fluviale à l'écologie évolutive: un focus sur les arbres riverains pionniers. *Géomorphologie: relief, processus, environnement*, 26(1), 55-72.

CORENBLIT, D., BAILEY, P., BORNETTE, G., ET AL. 2007 . *The biogeomorphological succession: a framework for understanding ecosystem engineering along river corridors*. *Geomorphology*.

COSANDEY C., 1990. Published, L'origine des crues dans les bassins-versants élémentaires : du ruissellement sur les versants à l'écoulement de crue, in *Proceedings Annales de géographie* 1990, JSTOR, p. 641-659.

CUDENNEC C., FOUAD Y., SUMARJO GATOT I et DUCHESNE J., 2004. geomorphological explanation of the unit hydrograph concept. *Hydrological Processes*, 18(4), 603-621.

CUSHMAN S. A., MCGARIGAL, K., & NEEL, M. C., 2008. Parsimony in landscape metrics: strength, universality, and consistency. *Ecological indicators*, 8(5), 691-703.

DECOCQ G et AL., 2021 . *Écologie des communautés végétales et succession écologique*. Presses Universitaires du Septentrion.

DECOCQ G., DUPOUEY, J. L., & BERGÈS, L., 2021. Dynamiques forestières à l'ère anthropocène: mise au point sémantique et proposition de définitions écologiques. *Revue forestière française*, 73(1), 21-52.

DEMMAK A., 1984. Recherche d'une relation empirique entre apports solides spécifiques et paramètres physico-climatiques des bassins: application au cas algérien. *Challenges in African hydrology and water resources*, 403-414.

DEWOLF Y., 1981. De la carte géomorphologique aux enquêtes géotechniques: *Bulletin de l'Association française pour l'étude du quaternaire*, 18 (1), 9-12.

DEWOLF Y., JOLY F., RAYNAL R., ROUGERIE G. (1972) - Premières observations sur une traversée du Sahara central. *Bulletin de l'Association de géographes français*, 49 (399), 191-211.

DIAZ S., M. CABIDO M. ZAK, E. CARRETERO AND A. JULIETA. 1999. Plant functional traits, ecosystem structure and land-use history along a climatic gradient in central-western Argentina. *Journal of Vegetation Science*:651- 660.

DUFOUR S., 2018. Une approche géographique de la végétation et de la gestion biophysique des hydrosystèmes fluviaux. éléments épistémologiques, thématiques et opérationnels (doctoral dissertation, université rennes 2).

ENDERLE D. I., & WEIH JR, R. C., 2005. Integrating supervised and unsupervised classification methods to develop a more accurate land cover classification. *Journal of the Arkansas Academy of Science*, 59(1), 65-73.

FICI S. 2014. A taxonomic revision of the *Capparis spinosa* group (Capparaceae) from the Mediterranean to Central Asia. *Phytotaxa*, 174(1), 1-24.

FORMAN R.T.T and GODRON, M. 1986 . *Landscape Ecology*. Wiley.

FOURNIER F., 1977. Thème 1b estimation des paramètres de l'érosion et des quantités de sédiments dans les bassins fluviaux ou les données sont insuffisantes-relations entre l'érosion et les quantités de sédiments et leurs facteurs climatiques et les caractéristiques du bassin versant et du lit lui-même: *Hydrological Sciences Journal*, 22 (4), 521-525.

GABERT P., 1984. Séismes, néotectonique et effets induits sur les versants des massifs des Babors dans la région de Kerrata (Algérie). *Méditerranée*, 51 (1), 25-31.

GARRY G., BALLAIS J.-L., MASSON M., 2002. La place de l'hydrogéomorphologie dans les études d'inondation en France méditerranéenne/The contribution of hydrogeomorphology in flood hazard assessment: a review of the situation in southern France. *Géomorphologie: relief, processus, environnement*, 8 (1), 5-15.

GAVRILOVIC S., 1976. Bujicni tokovi i erozija (Torrents and erosion): *Gradevinski kalendar*, Beograd, Serbia.

GHENIM A., TERFOUS A., SEDDINI A., 2007. Étude du transport solide en suspension dans les régions semi-arides méditerranéennes: cas du bassin-versant de l'oued Sebdou (Nord-Ouest algérien). *Science et changements planétaires/Sécheresse*, 18 (1), 39-44.

GIRARD M.-C., GIRARD C.-M., 2010. *Traitement des données de télédétection-2e éd.:* Environnement et ressources naturelles, Dunod.

GRECO J., 1966. L'érosion, la défense et la restauration des sols, le reboisement en Algérie, Ministère de l'agriculture et de la réforme agraire, Alger, 303 pages.

GRECO J., 1978. La défense des sols contre l'érosion. La Maison Rustique, Paris, 183 pages.

GREGORY K., 2006. The human role in changing river channels. *Geomorphology*, 79 (3), 172-191.

GUILLOY-FROGET H., MULLER, E., BARSOUM, N., & HUGHES, F. M. M., 2002. Dispersal, germination, and survival of *Populus nigra* L.(Salicaceae) in changing hydrologic conditions. *Wetlands*, 22(3), 478-488

GUSTAFSON E. J., 1998. Quantifying landscape spatial pattern: what is the state of the art?. *Ecosystems*, 1(2), 143-156.

GUSTAVSSON M., KOLSTRUP E., SEIJMONSBERGEN A. C., 2006. A new symbol-and-GIS based detailed geomorphological mapping system: Renewal of a scientific discipline for understanding landscape development. *Geomorphology*, 77 (1), 90-111.

HAMDANI AZIZ., 2012. Evolution géomorphologique et morpho dynamique du bassin versant de l'Oued Agrioun à l'amont du barrage d'Ighil Amda (Région de Kherrata. Thèse de magister. Université d'Alger USTHB. 120 p

HOLLING C. S. 1973. Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 4, 1-23.

HUGGETT R. J. 1995. *Geoecology: An Evolutionary Approach*. Routledge.

HUGGETT R. J. 1988. Dissipative systems and the laws of morphogenesis. *Transactions of the Institute of British Geographers*, 13(4), 512-520.

HUGGETT R. J. 2007. *Fundamentals of Geomorphology*. Routledge.

HUGGETT R.J. (2011). *Fundamentals of Geomorphology*. Routledge.

HUGGETT, R. J. 2011. *Fundamentals of Geomorphology (3rd ed.)*. Routledge.

HUSSON A., 1975. Coefficients de torrentialité et géomorphologie dynamique, leurs apports à l'étude des bassins versants, Rapport Direction d'Étude et d'Aménagement des Ressources Hydrauliques, Volume 52/SHYL, Algérie, p. 18.

ISSELIN-NONDEDEU F., 2005. Déterminismes géomorphologique et fonctionnels de la distribution des plantes dans les milieux d'altitude: essai d'éco-géomorphologie. Implications et applications pour la restauration de la biodiversité des pistes de ski (Doctoral dissertation, Université Joseph-Fourier-Grenoble I).

ISSELIN-NONDEDEU, F. 2005 . *Dynamiques géomorphologiques et mosaïques écologiques : approche biogéomorphologique des paysages*. Thèse, Université de Rennes 2.

JOURDAIN C., BELLEUDY, P., TAL, M., & MALAVOI, J. R., 2017. Le rôle de l'hydrologie sur la destruction de la végétation dans le lit d'une rivière à galets aménagée: l'Isère en Combe de Savoie. *Géomorphologie: relief, processus, environnement*, 23(3), 203-217

KARRENBERG S., BLASER, S., KOLLMANN, J., SPECK, T., & EDWARDS, P. J., 2003. Root anchorage of saplings and cuttings of woody pioneer species in a riparian environment. *Functional ecology*, 170-177.

KASSOUL M., 1999. Prédétermination de la durée de vie de barrages en Algérie. *La houille blanche*, (3-4), 89-94.

KASSOUL M., ABDELGADER A., BELORGEY M., 1997. Caractérisation de la sédimentation des barrages en Algérie: *Revue des sciences de l'eau/Journal of Water Science*, 10 (3), 339-358.

KEDDY P. A. 1992. Assembly and Response Rules - 2 Goals for Predictive Community Ecology. *Journal of Vegetation Science* 3:157-164

KONDOLF G. M., PIÉGAY H., & LANDON N. 2003. Channel response to increased and decreased bedload supply from land use change: Contrasts between two catchments. *Geomorphology*, 45(1-2), 35-51.

LÉVÊQUE C., Écologie. De l'écosystème à la biosphère, 2001.

MAIRE G., CORBONNOIS J., 2000. Evolution morphodynamique récente de la Moselle entre Charmes et Bayon. Diagnostic de l'état actuel du lit, choix d'un type de gestion de l'espace fluvial./The recent morphodynamic development of the Moselle between Charmes and Bayon. An audit of the present state of the river bed and the choice of an appropriate management system for the fluvial area. *Géocarrefour*, 75 (4), 305-315.

MALAVOI J. R., & SOUCHON, Y., 1996. Dynamique fluviale et dynamique écologique. *La Houille Blanche*, (6-7), 98-107.

MALAVOI J. R., & Souchon, Y., 1996. Dynamique fluviale et dynamique écologique. *La Houille Blanche*, (6-7), 98-107.

MATHYS N., POESEN J., 2005. Ravinement en montagne: processus, mesures, modélisation, régionalisation. Gully erosion in Mountain areas: processes, measurement, modelling and regionalization. *Géomorphologie: relief, processus, environnement*, 11 (1), 3-6.

MCGARIGAL K., & MARKS, B. J., 1995. Spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure. Gen. Tech. Rep. PNW-GTR-351. US Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station, 1-122.

MÉDAIL F., & DIADEMA, K., 2006. Biodiversité végétale méditerranéenne et anthropisation: approches macro et micro-régionales. In *Annales de géographie* (No. 5, pp. 618-640). Cairn/Isako.

MEGNOUNIF A., TERFOUS A., GHENAIM A., POULET J.-B., 2007. Key processes influencing erosion and sediment transport in a semi-arid Mediterranean area: the Upper Tafna catchment, Algeria/Processus clefs influençant l'érosion et le transport des sédiments dans une région semi-aride Méditerranéenne: le bassin versant de la Haute Tafna, Algérie. *Hydrological Sciences Journal/Journal des Sciences Hydrologiques*, 52 (6), 1271-1284.

MERRITT D. M., SCOTT, M. L., LEROY POFF, N., AUBLE, G. T., & LYTLE, D. A., 2010. Theory, methods and tools for determining environmental flows for riparian vegetation: riparian vegetation-flow response guilds. *Freshwater Biology*, 55(1), 206-225.

MILLER S. N., KEPNER, W. G., MEHAFFEY, M. H., HERNANDEZ, M., MILLER R. C., GOODRICH, D. C., ... & MILLER, W. P., 2002. Integrating landscape assessment and hydrologic modeling for land cover change analysis 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 38(4), 915-929.

MONJAUZE A., 1961. Les exigences et les perspectives du développement agricole de l'Algérie: *Cahiers des ingénieurs agronomes*, (147).

MONTGOMERY D.R. 1999 . *Process domains and the river continuum*. *Journal of the American Water Resources Association*.

MOORE I. D., GRAYSON R., LADSON A., 1991. Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications. *Hydrological processes*, 5 (1), 3-30.

NAHRATH S., VARONE F., GERBER J.-D., 2009. Les espaces fonctionnels: nouveau

référentiel de la gestion durable des ressources?: VertigO-la revue électronique en sciences de l'environnement, 9 (1).

NAPIERALSKI J., HARBOR J., LI Y., 2007. Glacial geomorphology and geographic information systems. *Earth-Science Reviews*, 85 (1), 1-22.

NAVEH Z., & LIEBERMAN, A., 1994. *Landscape Ecology: Theory and Application*. New York: Springer.

NEBOIT R. 1999. Les milieux naturels et les sociétés: géographie physique et environnement. Armand Colin.

NEBOIT-GUILHOT R., 1999. Autour d'un concept d'érosion accélérée: l'homme, le temps et la morphogenèse/The concept of accelerated erosion: man, time and geomorphic systems. *Géomorphologie: relief, processus, environnement*, 5(2), 159-172.

ODUM E.P and BARRETT G.W. 2005. *Fundamentals of Ecology*. Brooks/Cole.

ODUM E.P. 1969. *The strategy of ecosystem development*. Science.

ORESKE N., SHRADER-FRECHETTE K., BELITZ K., 1994. Verification, validation, and confirmation of numerical models in the earth sciences: *Science*, 263 (5147), 641-646.

OTTO J.-C., DIKAU R., 2004. Geomorphologic system analysis of a high mountain valley in the Swiss Alps. *Zeitschrift für Geomorphologie*, NF, 323-341.

PECO B., LEVASSOR, C., CASADO, M. A., GALIANO, E. F., & PINEDA, F. D., 1983. Influences météorologique et géomorphologique sur la succession de pâturages de thérophytes méditerranéennes. *Ecologia Mediterranea*, 9(1), 63-76.

PEIRY J., 1989. Les sédiments dans les torrents de l'Arve: discontinuité fonctionnelle et impacts de l'aménagement des bassins versants. *La houille blanche*, (3-4), 205-211.

PETTS G. E., AMOROS C., 1996. The fluvial hydrosystem, *The Fluvial Hydrosystems*. Springer, 1-12 p.

PHILLIPS J. D. 2009. Changes, perturbations, and responses in geomorphic systems. *Progress in Physical Geography*, 33(1), 17-30.

PIEGAY H., & BRAVARD, J.-P. 1996. Rivières et société : le territoire des cours d'eau. *Revue de Géographie de Lyon*, 71(4), 263-278.

PIÉGAY H., 1997. La ripisylve, un compartiment structurant des hydrosystèmes fluviaux intra-alpins et de piémonts. *La Houille Blanche*, (1-2), 13-18.

PIÉGAY H., PAUTOU, G., & BRAVARD, J. P., 2003. Les forêts riveraines des cours d'eau 3-l'histoire contemporaine des marges fluviales: entre renaturation et dénaturation. *Les forêts riveraines des cours d'eau: Écologie, fonctions et gestion*, 72.

POUQUET J., 1952. Les monts du Tessala. Essai morphogénétique. Thèse Lettres. SEDES.

PROBST J.-L., SUCHET P. A., 1992. Fluvial suspended sediment transport and mechanical erosion in the Maghreb (North Africa). *Hydrological Sciences Journal*, 37 (6), 621-637.

PUECH C., THOMMERET N., KAISER B., BAILLY J.-S., JACOME A., REY F., MATHYS N., 2009. MNT à très haute résolution dans les modelés fortement disséqués: des données aux tests d'application. *Géomorphologie: relief, processus, environnement*, 15 (2), 141-152.

REMINI B., HALLOUCHE W., 2005. Prévision de l'envasement dans les barrages du Maghreb. *Larhyss Journal*, 4, 69-80.

REMINI B., KETTAB A., HIHAT H., 1995. Envasement du barrage Ighil Emda (Algérie). *La houille blanche*, (2-3), 23-31.

RENSCHLER C. S., HARBOR J., 2002. Soil erosion assessment tools from point to regional scales, the role of geomorphologists in land management research and implementation. *Geomorphology*, 47 (2), 189-209.

REYNARD E., CORATZA, P., & REGOLINI-BISSIG, G. 2011. Geomorphosites: definition, assessment and mapping. In *Geotourism* (pp. 21-33). Pfeil Verlag.

RICHARD J. F., 1975. Paysages, écosystèmes, environnement: une approche géographique. *L'espace géographique*, 81-92.

ROGERS W. F., & SINGH, V. P., 1986. Some Geomorphic Relationships And Hydrograph Analysis 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 22(5), 777-784.

ROOSE É., SABIR M., ARABI M., MORSLI B., MAZOUR M., 2012. Soixante années de

recherches en coopération sur l'érosion hydrique et la lutte antiérosive au Maghreb. *Physio-Géo. Géographie physique et environnement*, (Volume 6), 43-69.

ROTHE J.-P., DECHEVOY N., SELTZER P., 1950. Les séismes de Kerrata et la séismicité de l'Algérie, Pauc.

RUFFINONI O. C., PAUTOU, G., PIÉGAY, H., & RUFFINONI, C., 2003. Forêts riveraines, ripisylves ou forêts alluviales: un compartiment complexe de l'hydrosystème. *Les forêts riveraines des cours d'eau: Écologie, fonctions et gestion*, 10

SACCARDY L., 1949. Nécessité de la lutte contre les érosions. *Méthodes modernes de conservation des sols et des eaux. Bull. Techn. des ISA*, (142).

SCHUMM S. A. 1977. *The Fluvial System*. Wiley.

SCOTT M. L., AUBLE, G. T., & FRIEDMAN, J. M., 1997. Flood dependency of cottonwood establishment along the Missouri River, Montana, USA. *Ecological Applications*, 7(2), 677-690.

SELTZER P., LASSERRE A., GRANDJEAN A., AUBERTY R., FOUREY A., 1946. Le climat de l'Algérie, Impr." La Typo-litho" et J. Carbonel.

SHAFROTH P. B., STROMBERG J. C., & PATTEN D. T., 2002. Riparian vegetation response to altered disturbance and stress regimes. *Ecological applications*, 12(1), 107-123.

SINGH V. P., CHOWDHURY P. K., 1986. Comparing some methods of estimating mean areal rainfall. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 22 (2), 275-282.

SLAYMAKER O., SPENCER T., EMBLETON-HAMANN C. (Eds.).
(2009). *Geomorphology and global environmental change*. Cambridge University Press.

SMITH M. J., PARON P., GRIFFITHS J. S., 2011. *Geomorphological mapping: methods and applications*, Elsevier (Vol. 15).

STALLINS J. A., 2006. Geomorphology and ecology: unifying themes for complex systems in biogeomorphology. *Geomorphology*, vol. 77, no 3-4, p. 207-216

STRAHLER A. N., (1952). Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. *Geological society of America bulletin*, 63(11), 1117-1142

SUMMERFIELD M. A. 1991. Global Geomorphology. Longman.

TANSLEY A. G., 1935. “The Use and Abuse of Vegetational Concepts and Terms.” Ecology, 16(3), 284–307.

THELER D., REYNARD E., 2011. A geomorphological map as a tool for assessing sediment transfer processes in small catchments prone to debris-flows occurrence: a case study in the Bruchi Torrent (Swiss Alps): Smith MJ, Paron P., Griffiths JS Geomorphological mapping: methods and applications.–Amsterdam. Elsevier, 441-456.

THELER D., REYNARD E., LAMBIEL C., BARDOU E., 2010. The contribution of geomorphological mapping to sediment transfer evaluation in small alpine catchments. Geomorphology, 124 (3), 113-123.

TIHAY J.-P., 1976. Published, Dynamique des versants et milieux naturels dans la vallée de la Soummam (Grande Kabylie, Algérie), in Proceedings Annales de géographie 1976, JSTOR, p. 257-280.

TIXERONT J., 1960. Débit solide des cours d'eau en Algérie et en Tunisie. General Assembly of Helsinki IAHS Publ, 53, 26-42.

TOUAIBIA B., GOMER D., AIDAOUI A., 2000. Estimation de l'index d'érosion de Wischmeier dans les micro bassins expérimentaux de l'Oued Mina en Algérie du Nord. Bull. Réseau Erosion, (20), 478-484.

TREMOLIERES M., COMBROUX, I., THIEBAUT, G., & HAURY, J., 2008. Réponse des communautés végétales aux conditions environnementales: perturbations ou contraintes. Sciences Eaux & Territoires, (Spécial Ingénieries-EAT-25), 63-77.

TRICART J. 1974. Principes et méthodes de la géomorphologie. Masson.

TRICART J., & CAILLEUX, A. 1967. Introduction à la géomorphologie climatique. Sedes.

TRICART J., & KILIAN, J. 1982. La géomorphologie dans l'aménagement du territoire. Masson.

TRICART J., 1961. Géomorphologie appliquée, In: Annales de Géographie. 1961, t. 70, n°381. pp. 493-498

TRICART J., 1972. Published, Cartographie géomorphologique, in Proceedings Annales de Géographie 1972, Volume 81, JSTOR, p. 751-753.

TRICART J., 1977. Écodynamique et aménagement du milieu naturel. Paris : Masson.

VEYRET Y., 1994. Géographie, environnement, écologie (Geography, environment, ecology). Bulletin de l'Association de Géographes Français, 71(4), 426-435.

WALKER L.R., & DEL MORAL R. 2003. *Primary Succession and Ecosystem Rehabilitation*. Cambridge University Press.

WALKER, L. R. AND DEL MORAL, R. 2003. Primary Succession and Ecosystem Rehabilitation. *Cambridge University Press*.

WEIHER E., AND P. A. KEDDY. 1995. Assembly rules, null models, and trait dispersion: New questions from old patterns. *Oikos* **74**:159-164

WESTOBY M., 1984. The self-thinning rule. In *Advances in ecological research* (Vol. 14, pp. 167-225). Academic press.

WICHEREK S., 1991. New approach to the study of erosion in cultivated lands. *Soil technology*, 4 (2), 99-110

WU J., and LOUCK, O.L. 1995. *From balance of nature to hierarchical patch dynamics: a paradigm shift in ecology*. Quarterly Review of Biology.

ZHANG L., DAWES W. R., & WALKER G. R., 2001. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale. *Water resources research*, 37(3), 701-708.

Annexe 1:

- *Caractéristiques du Bassin versant*
 - *Morphométrie*
 - *Calculs d'érosion*
- *Hydro-climat*

Additional information

It should be noted that scientific standards and the structure of the article required us to omit certain information related to the study. We realized that this information was crucial to article's evaluation and assessment. Therefore, in order to give readers and evaluators more information that clarifies the article's content, we think that a supplemental report should be supplied with the article.

The article's additional content, which we felt was essential, mostly related to quantitative data on soil erosion and hydrological quantification (flood flows, runoff water values at the watershed scale). It should be mentioned that hydrological modeling was done, which allowed erosion rates to be measured. Our analysis and interpretation of the hydro-morphological and bio-geomorphological dynamics covered in our article were greatly aided by the results we were able to collect.

Watershed	Area (km ²)	Périmètre (km)	shape index	slope index	global slope index	relief classes	Equivalent rectangle length (m)	Equivalent rectangle width (m)
Wadi Elbared river	343	78	1,18	0,195	0,362	Rugged terrain	25,66	13,35
Wadi Atteba river (study area)	152	53,7	1,22	0,213	0,49	Rugged terrain	18,75	8,1
Wadi Moubarek river	157	52,3	1,17	0,189	0,45	Rugged terrain	16,87	9,3
Ighil Emda (Total)	652	120,6	1,41	0,126	0,162	Rugged terrain	51,67	12,63

1- Calculated morphometric parameters of Ighil Emda watershed and its sub-watersheds:

The following table summarizes the morphometric parameters calculated for the Ighil Emda watershed and its sub-watersheds, including that of the Wadi Etteba river.

- Table 1: morphometric parameters of Ighil Emda watershed and its sub-watersheds

Table 2: hydrographical network characteristics (Statistical data)

IGHIL EMDA WATERSHED AND ITS SUB- WATERSHED S	STREA M ORDER	WATER COURSE S NUMBER BY ORDER	TOTAL LENGTH OF WATERCOURSE S	CONFLUENCE OF HYDROGRAPHI C NETWORK	DRAINAGE DENSITY OF HYDROGRAPHI C NETWORK	TORRENTIALIT Y COEFFICIENT
Wadi El Berd river	1	3400	3060		14	138
	2	907	1450	3,74		
	3	164	164	3,53		
	4	42	105	3,9		
	5	8	57	5,25		
	6	2	11	4		
	7	1	18	2		
Wadi Atteba river	1	1410	1270		12	111,3
	2	320	512	4,4		
	3	61	61	5,24		
	4	11	27	5,54		
	5	2	18	5,5		
	6	1	8,3	2		
Wadi Moubarek river	1	1230	1107	3,14	12	94
	2	391	626	5,58		
	3	70	70	4,66		
	4	15	38	2,5		
	5	6	20	6		
	6	1	7			
Ighil Emda	1	6040	5437	3,73	13	120,4
	2	1618	2588	5,48		

	3	295	295	4,33		
	4	68	170	4,25		
	5	16	87	4		
	6	4	26,3	4		
	7	1	18	-		

-2. Precipitation, flood, and soil erosion data in chronological series:

A quantitative methodology based on statistical computations and estimations of climatic and hydrological events was used to characterize the morphodynamic and morphogenic aspects of the Ighil Emda watershed. Rainfall and wadi runoff served as the primary input data for the computations. The services in charge of maintaining the Ighil Emda dam provided the time series data. It should be mentioned that the Ighil Emda dam, which is used to produce energy, is managed and observed by SONELGAZ (the national electricity and gas corporation).

2.1 Rainfall data:

The following data are used in hydrological modelling and erosion calculations. The figure below shows the four weather stations in operation with their areas of influence according to Thiessen polygons.

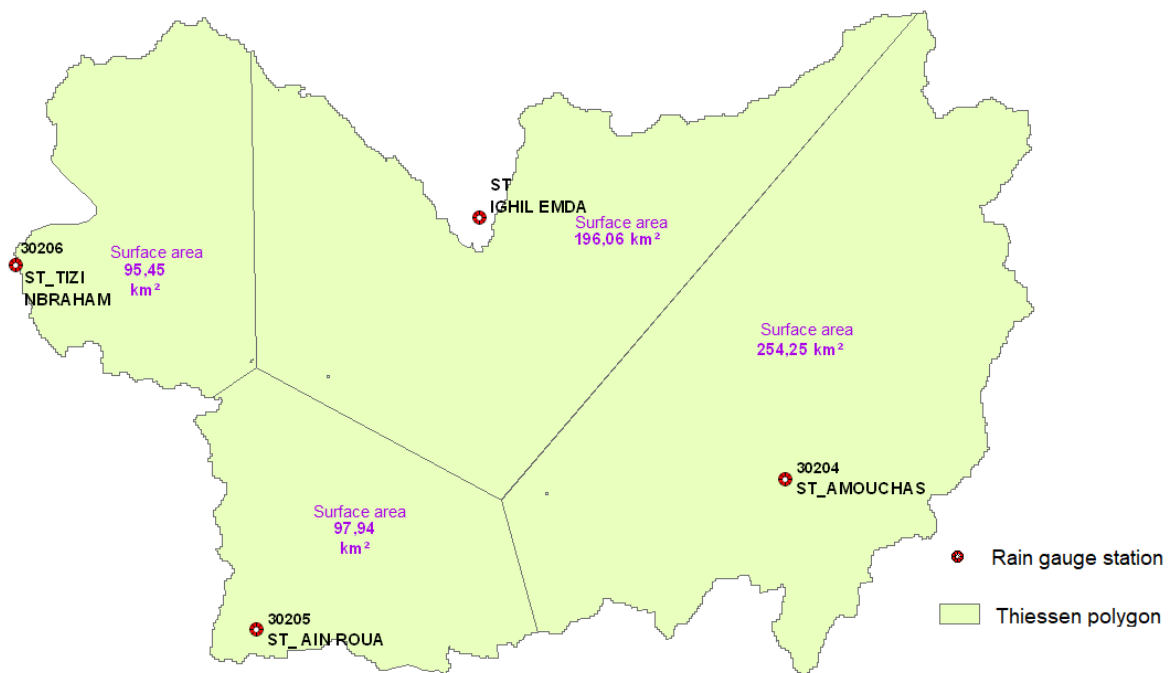


Figure 1: Weather stations with their areas of influence according to Thiessen polygons.

Table 3: Interannual rainfall characteristics (1969–2007)

N°	Weather station name	X	Y	Z	number of years	Inter-Annual rainfall [mm]	Ecart-type [mm]	coefficient of variation Cv	i.conf 80% [mm] confidence interval	Minimal rainfall [mm]	Maximum rainfall [mm]
1	Amoucha	743600	346150	800	39	607,71	168,073	0,277	34,899	293,900	1015,50
2	Ain Roua	722900	399950	1100	39	600,64	154,284	0,257	32,036	330,300	1165,78
3	Tizi N'Brahem	714450	354100	860	39	621,28	172,42	0,278	35,80	222,0	1044,60
4	Ighil Emda	-	-	570	39	812,78	277,612	0,342	57,644	427,300	1735,80

2.2 Flood river data:

The Ighil Emda watershed's runoff water volumes were modeled using observations of a series of runoff water inflows into the dam (Table 4). Gumbel rule was applied to a statistical analysis of a 16-year period (1953–1968).

Table 4 : Amount of water runoff in the Ighil Emda dam

Year	Amount of water runoff (Hm3)
1953	182,4
1954	260,4
1955	126,8
1956	316,4
1957	278
1958	250
1959	249
1960	174
1961	103
1962	219
1963	90
1964	165
1965	204
1966	125
1967	219
1968	142

2.2.2 Runoff water inflows into the catchment area according to return periods:

The annual Runoff water inflows of different frequencies are given in the following table. return periods (frequencies) were calculated according to Gumbel's law.

Table 5: Annual water inflows of different frequencies (return periods)

Return periode	2	4	5	10	20	25	50	100	1000
Fréquence:	0,5	0,75	0,8	0,9	0,95	0,96	0,98	0,99	0,999
Gumbel variates	-0,367	-1,246	-1,5	-2,25	-2,97	-3,199	-3,902	-4,6	-6,907
water inflows maxima (hm ³):	144,9527	99,3326	86,15	47,225	9,857	-2,028	-38,51	-74,74	-194,5
Gumbel variates	0,367	1,246	1,5	2,25	2,97	3,199	3,902	4,6	6,907
water inflows maxima (hm ³):	183,0473	228,6674	241,85	280,775	318,14	330	366,5	402,7	522,5

2.2.3 Empirical estimates of flood flows and annual runoff inflows:

a. We estimated the runoff inflows and flows of the principal watercourses in the Ighil Emda watershed, including the Wadi Atteba, which is the focus of our paper, using empirical relationships calibrated to the mathematical model based on the modeling of runoff inflows (Figure 5 and Table 5). We were able to evaluate erosion and morphodynamic events by using the model's calibration to recreate historical values for flow rates and water inputs. The results of flood flow rates for the watershed's principal watercourses are compiled in Tables 6 and 7 below.

Table 6. Annual water inflows in Ighil Emda watercourse estimated by empirical formulas (hm³)

Empirical formulas for calculating flow rates	Annual water inflows (hm ³)				
	Wadi Atteba watercourse	Wadi El Bared watercourse	Wadi MouBraek watercourse	Wadi Takerboust watercourse	Total watershed (Ighil Emda)
COUTAGNE I	30,34	62,45	30,54	2,96	126,29
COUTAGNE II	26,64	54,84	26,82	2,60	110,90
COUTAGNE III	15,09	29,48	15,19	1,59	61,35
"SAMIE":	18,48	36,14	18,60	1,92	75,14
"CHAUMONT	14,94	30,75	15,04	1,55	62,28
"PADOUN":	14,63	30,75	13,18	1,28	59,84
"DERI I":	21,82	40,08	21,94	3,07	86,91
"DERI II":	15,43	32,14	15,54	1,45	64,56
"DERI III":	18,63	38,36	18,76	1,82	77,57
TOUAT	25,87	63,72	26,04	3,02	118,65
SAIDI	26,03	53,57	26,20	2,54	108,34

a. Wadi flows according to empirical relationships:

The table below summarizes the results of empirical calculations of annual river flows in the Ighil Emda catchment area.

Table 7. River flow rates according to various empirical formulas

	<i>Wadi Takerboust</i> <i>watercourse</i>	<i>Wadi MouBraek</i> <i>watercourse</i>	<i>Wadi Atteba</i> <i>Watercourse</i>	<i>Wadi El Bared</i> <i>watercourse</i>
<i>EMPIRICAL FORMULAS</i> <i>USED FOR</i> <i>CALCULATING RIVER</i> <i>FLOW RATES</i>	Annual flow rates m3/s	Annual flow rates m3/s	Annual flow rates m3/s	Annual flow rates m3/s
<i>COUTAGNE I</i>	0,094	0,969	0,963	1,981
<i>COUTAGNE II</i>	0,082	0,851	0,845	1,74
<i>COUTAGNE III</i>	0,05	0,482	0,479	0,935
<i>SAMIE</i>	0,061	0,589	0,585	1,144
<i>CHAUMONT</i>	0,057	0,56	0,556	2,482
<i>PADOUN</i>	0,04	0,417	0,465	0,98
<i>DERI I</i>	0,098	0,698	0,693	1,265
<i>DERI II</i>	0,046	0,491	0,488	1,014
<i>DERI III</i>	0,057	0,594	0,59	1,214
<i>TOUAT</i>	0,096	0,826	0,821	2,019
<i>SAIDI</i>	0,08	0,829	0,824	1,696

2.2.4 Experimental and empirical calculations of soil erosion in the watershed::

a- Experimental measurements of sediment trapped in the Ighil Emda Dam:

Two methods served as the foundation for our soil erosion estimations. Experimental measurements of silt trapped in the Ighil Emda Dam serve as the basis for the first. An empirical formula is applied in the second method. The erosion phenomenon for the entire Ighil Emda watershed and its sub-watersheds could be modeled thanks to the combination of theoretical and experimental measurements. The data used, the empirical applications, and the computation results are listed below.

Table 8. Suspended sediments quantified at the Ighil Emda dam

<i>Measurement programme</i>	<i>Year</i>	<i>Suspended sediments (m3)</i>
<i>1954-156</i>	1954	952797
	1955	702259
	1956	2337111
	1974	237094
	1975	823122
	1976	1453767
	1977	125598
	1978	144165
	1979	396126
	1980	1523020
<i>1974 - 1954</i>	1981	285406
	1982	1129228
	1983	203962
	1984	948211
	Total 1985 -1992	888408
<i>1985 -1992</i>		

b- Empirical application to estimate soil erosion:

The formulas used were applied to the four sub-catchment areas as well as the entire catchment area. The results obtained are summarised in the following table:

WADI EL BARED WATERCOURS ESTIMATED SEDIMENTS VALUES						
Empirical formula	Symbol	Parameters	SUSPENSION	CHARRIAGE	GLOBAL	VOLUME
			t/km ² .year	t/km ² .year	m ³ /km ² .year	m ³ /year
				(20% susp.)	density (t/m ³)=	1,3
FOURNIER I:				2 434	3 164	1 002 988
TIXERONT:	A=	169				
	alfa=	2000	4 317,30	863,5	6 735,04	2 135 007,68
GAVRILLOVIC:	Z=	0,995				
	Crm=	0,93				
	T=	1,27				
	qsp=	2656	2 470	494	3 853	1 221 401
HUSSON			4 200	840	6 552	2 076 984
Empirical formula chosen as consistent with experimental measurements.			2 470	494	3 853	1 221 401
WADI ATTEBA WATERCOURS ESTIMATED SEDIMENTS VALUES						
Empirical formula	Symbol	Parameters	SUSPENSION	CHARRIAGE	GLOBAL	VOLUME
			t/km ² .year	t/km ² .year	m ³ /km ² .year	m ³ /year
				(20% susp.)	Density (t/m ³)=	1,3
FOURNIER I:				2 548	3 313	510 202
TIXERONT:	A=	169				
	alfa=	2000	4 317,30	863,5	6 735,04	1 037 196,16
GAVRILLOVIC:	Z=	0,995				
	Crm=	1,01				
	T=	1,22				
	qsp=	2551	2 577	515	4 020	619 080
HUSSON			1 800	360	2 808	432 432

Empirical formula chosen as consistent with experimental measurements.	GAVRILLOVIC:		2 577	515	4 020	619 080
WADI MOUBAREK WATERCOURS ESTIMATED SEDIMENTS VALUES						
Empirical formula	Symbol e	Parameters	SUSPENSION	CHARRIAGE	GLOBAL	VOLUME
			t/km ² .year	t/km ² .year	m3/km ² .year	m3/year
			(20% susp.)	Density (t/m3)=		1,3
FOURNIER I:				2 817	3 662	567 610
TIXERONT:	A=	169				
	alfa=	2000	4 317,30	863,5	6 735,04	1 043 931,20
GAVRILLOVIC :	Z=	0,995				
	Crm=	0,87				
	T=	1,22				
	qsp=	2551	2 219	444	3 462	536 610
HUSSON			1 800	360	2 808	435 240
Empirical formula chosen as consistent with experimental measurements.	GAVRILLOVIC:		2 219	444	3 462	536 610
WADI TAKERBOUST WATERCOURS ESTIMATED SEDIMENTS VALUES						
Empirical formula	Symbol e	Parameters	SUSPENSION	CHARRIAGE	GLOBAL	VOLUME
			t/km ² .year	t/km ² .year	m3/km ² .year	m3/year
			(20% susp.)	Density (t/m3)=		1,3
FOURNIER I:				6 482	8 427	126 405
TIXERONT:	A=	169				
	alfa=	2000	4 317,30	863,5	6 735,04	101 025,60
GAVRILLOVIC:	Z=	0,995				
	Crm=	0,91				
	T=	1,27				
	qsp=	2656	2 417	483	3 770	56 550

HUSSON			1 800	360	2 808	42 120
Empirical formula chosen as consistent with experimental measurements.	GAVRILLOVIC:		2 417	483	3 770	56 550
IGHIL EMDA WATERSHED ESTIMATED SEDIMENTS VALUES						
Relation	Symbol e	Parameters	SUSPENSION	CHARRIAGE	GLOBAL	
			t/km ² .year	t/km ² .year	m ³ /km ² .year	m ³ /year
				(20% susp.)	Density (t/m ³)=	1,3
FOURNIER I:				1 743	2 266	1 459 304
TIXERONT:	A=	169				
	alfa=	2000	5 873,40	1 174,70	9 162,53	5 900 669,32
GAVRILLOVIC:	Z=	0,875				
	Crm=	1,1				
	T=	1,27				
	qsp=	2190	2 409	482	3 758	2 420 152
HUSSON			4 200	840	6 552	4 219 488
Empirical formula chosen as consistent with experimental measurements.	GAVRILLOVIC:		2 409	482	3 758	2 420 152

- It should be noted that the Wadi Atteba sub-watershed is the most eroded of the four sub-watersheds.

3- Assessment of sediment filling in the Atteba riverbed:

Calculations of soil erosion have revealed that erosion rates have increased dramatically. The extremely high rates of wadi bed filling and elevation at the wadi level make the effects of erosion quite apparent. We estimated the wadi bed filling's height using a physical indicator. An electrical cable that crosses a portion of the wadi serves as this sign. According to the specification, the distance between the power line and the riverbed was approximately

6 meters when it was installed in 1987. We assessed the line's height from the riverbank in 2012, and it was approximately 1.30 meters.

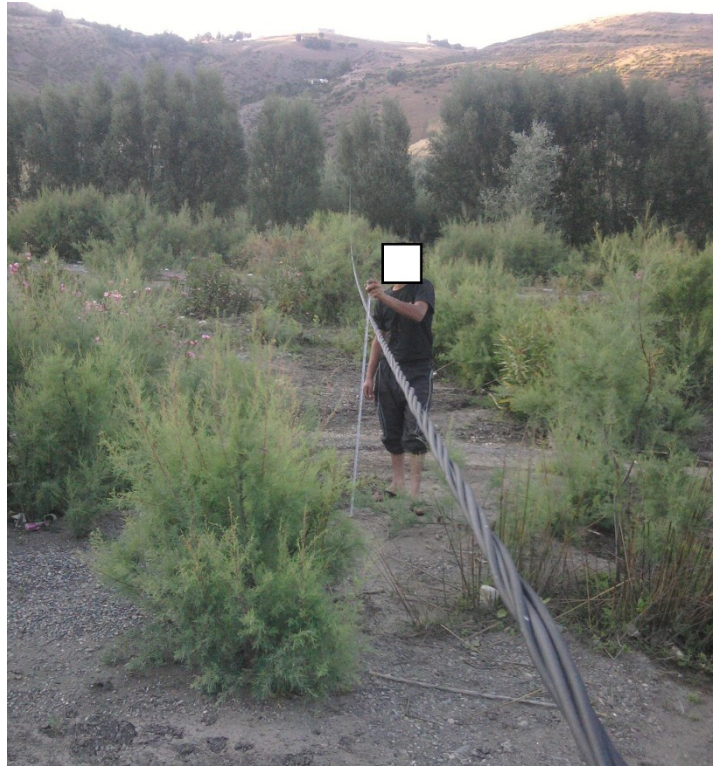


Photo: Power line crossing the Wadi Atteba riverbed (at a height of 1.30 meters above the riverbed) (Author ,2012).

5- Some photographic illustrations in wadi Atteba chowing erosion caused by flooding.

As seen in the following images, we witnessed severe erosion events impacting the wadi's hydromorphological components while on a field trip to evaluate the effects of flooding on the banks of the Wadi Atteba hydromorphological system:



Photos : Erosive effects of floods on a terrace (Hamdani , 2012)

ANNEX 2 : PHOTOS AERIENNES (Pour analyse diachronique) :

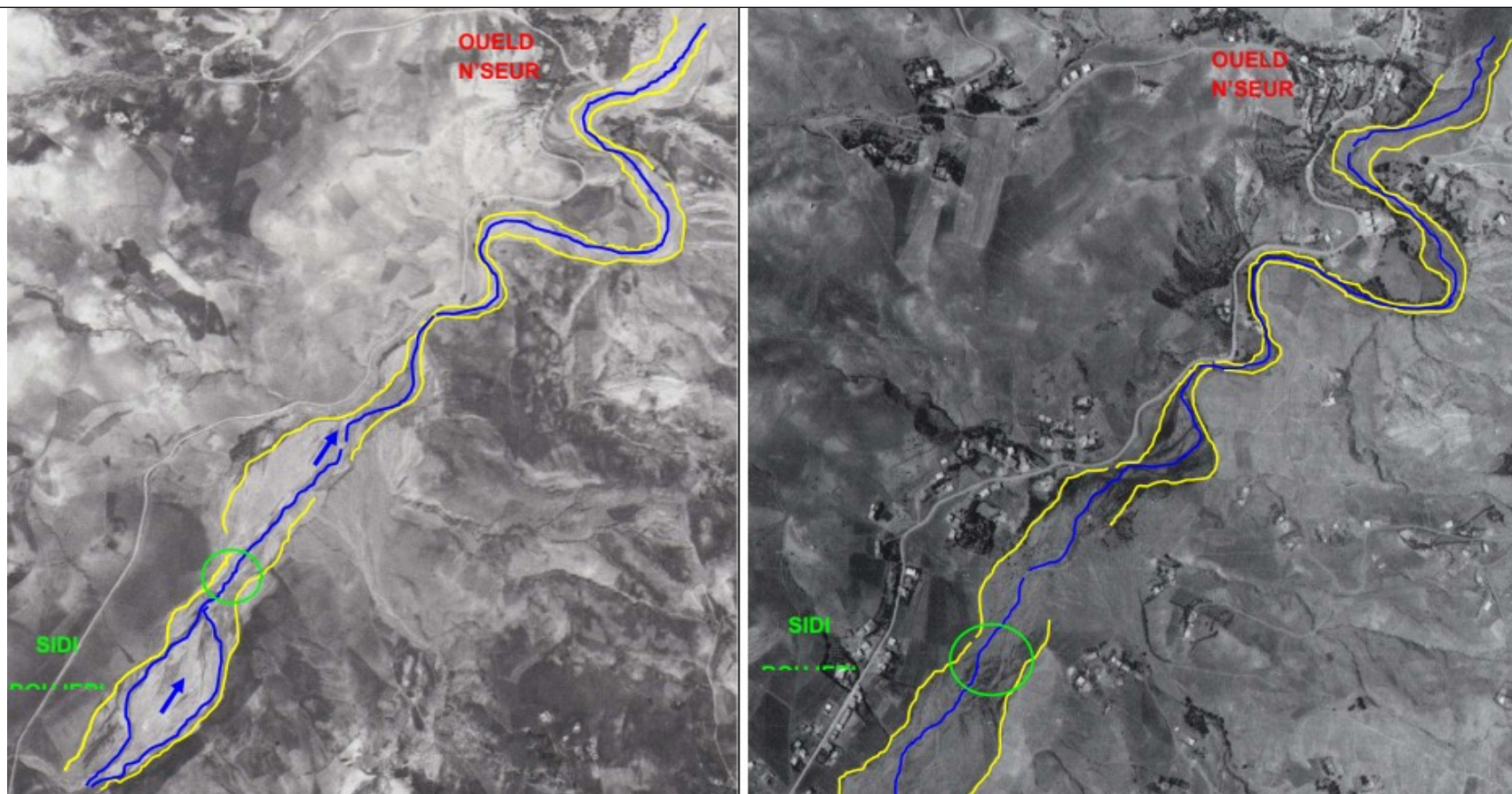


Photo à gauche prise en 1960 , l'image à droite prise en 1998

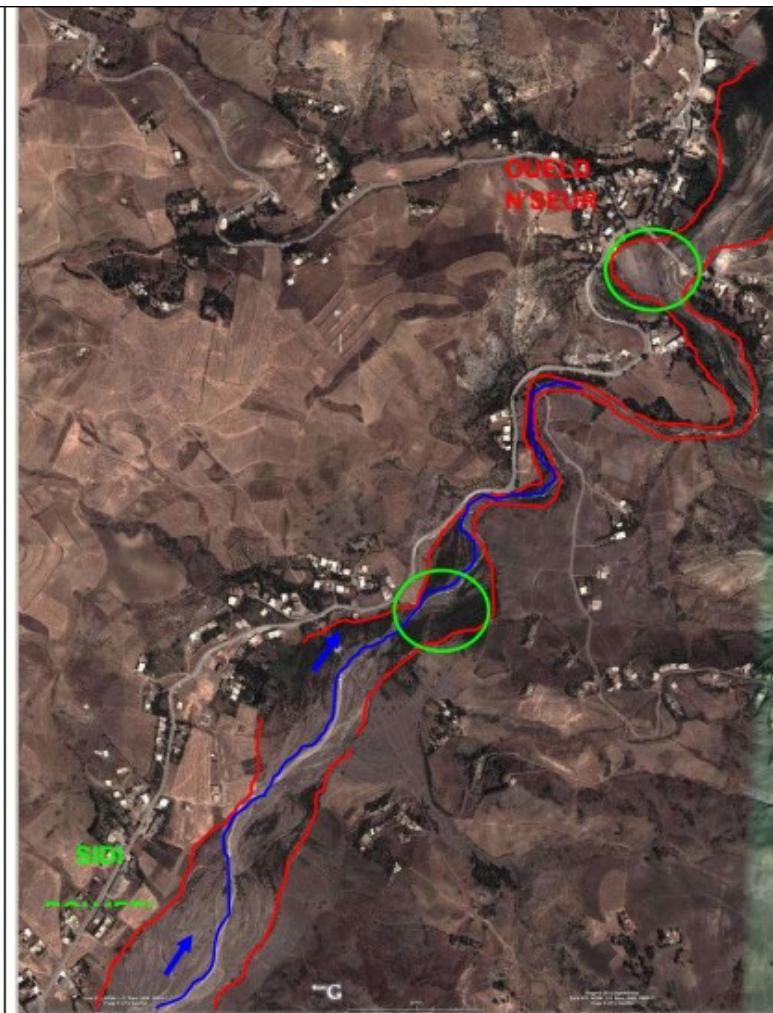
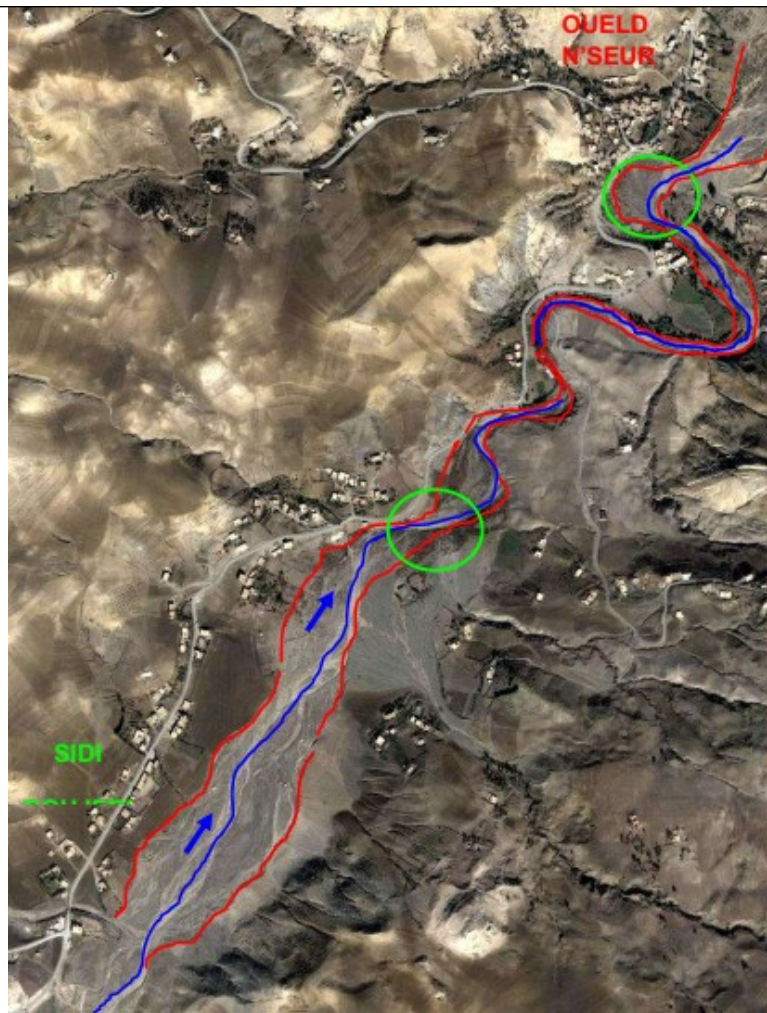


Image à Gauche ; 2002 et image à droite de 2008

ANNEXE 3 : STATISTIQUE DE MODELISATION DES PLUIES

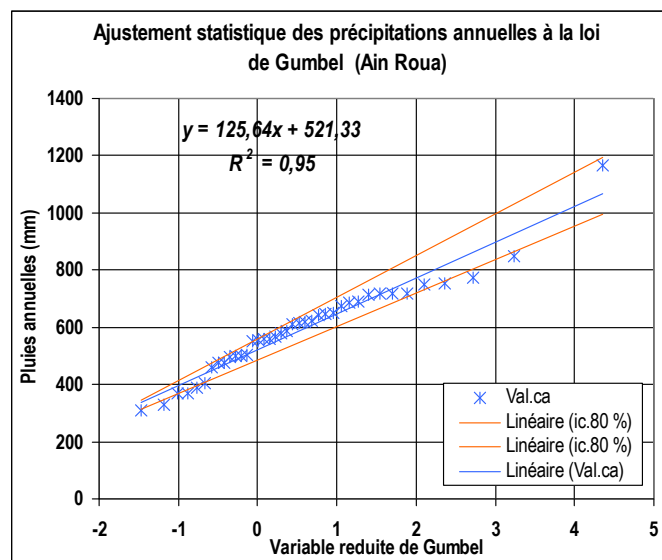
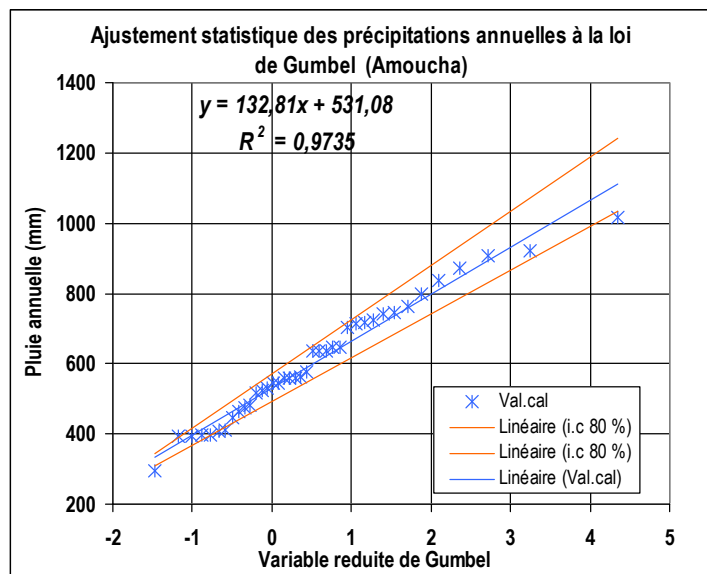


Figure: Ajustement statistique des Pan à la station de Ain Roua

Précipitations moyennes annuelles de différentes fréquences										
P. de retour:	2	4	5	10	20	25	50	100	1000	10000
Fréquence:	0,5	0,75	0,8	0,9	0,95	0,96	0,98	0,99	0,999	0,9999
Variable										
Gumbel	-0,367	-1,246	-1,5	-2,25	-2,97	-3,199	-3,902	-4,6	-6,907	-9,21
Pluies maxima:	475,2	364,8	332,9	238,6	148,2	119,4	31,1	-56,6	-346,5	-635,8
Variable										
Gumbel	0,367	1,246	1,5	2,25	2,97	3,199	3,902	4,6	6,907	9,21
Pluies maxima:	567,4	677,9	709,8	804,0	894,5	923,3	1011,6	1099,3	1389,1	1678,5

Tableau: Précipitations moyennes annuelles de différentes fréquences à la station de Ain Roua



Précipitations moyennes annuelles de différentes fréquences										
P. de retour:	2	4	5	10	20	25	50	100	1000	10000
Fréquence:	0,5	0,75	0,8	0,9	0,95	0,96	0,98	0,99	0,999	0,9999
Variable Gumbel	-0,367	-1,246	-1,5	-2,25	-2,97	-3,2	-3,902	-4,6	-6,907	-9,21
Pluies maxima:	482,3	365,5	331,8	232,2	136,6	106,2	12,8	-79,9	-386,2	-692,1
Variable Gumbel	0,367	1,246	1,5	2,25	2,97	3,199	3,902	4,6	6,907	9,21
Pluies maxima:	579,8	696,6	730,3	829,9	925,4	955,8	1049,2	1141,9	1448,3	1754,1

Figure: Ajustement statistique des Pan à la station de Amoucha

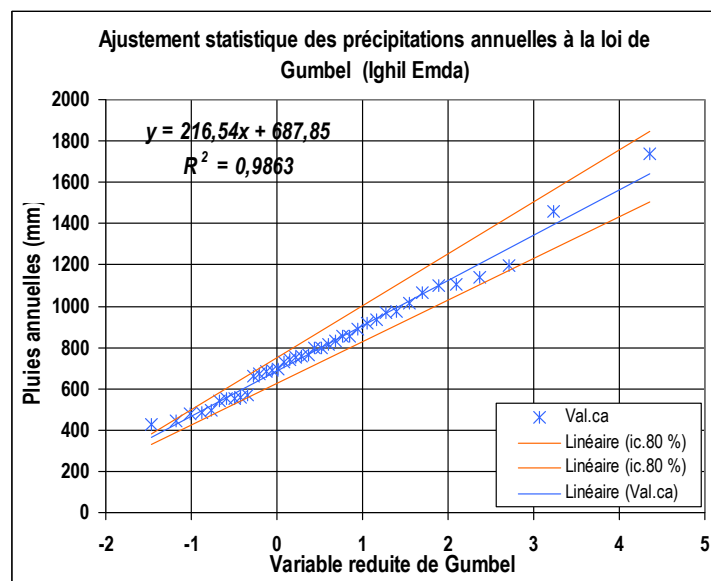


Tableau: Précipitations moyennes annuelles de différentes fréquences à la station de Amoucha

Précipitations moyennes annuelles de différentes fréquences										
P. de retour:	2	4	5	10	20	25	50	100	1000	10000
Fréquence:	0,5	0,75	0,8	0,9	0,95	0,96	0,98	0,99	0,999	0,9999
Variable Gumbel	-0,367	-1,246	-1,5	-2,25	-2,97	-3,199	-3,902	-4,6	-6,907	-9,21
Pluies maxima:	608,4	418,0	363,0	200,6	44,7	-4,9	-157,1	-308,2	-807,8	-1306,5
Variable Gumbel	0,367	1,246	1,5	2,25	2,97	3,199	3,902	4,6	6,907	9,21
Pluies maxima:	766,3	956,7	1011,7	1174,1	1330,0	1379,6	1531,8	1682,9	2182,5	2681,2

Figure Ajustement statistique des Pan à la station de Ighil Emda

Tableau: Précipitations moyennes annuelles de différentes fréquences à la station de Ighil Emda

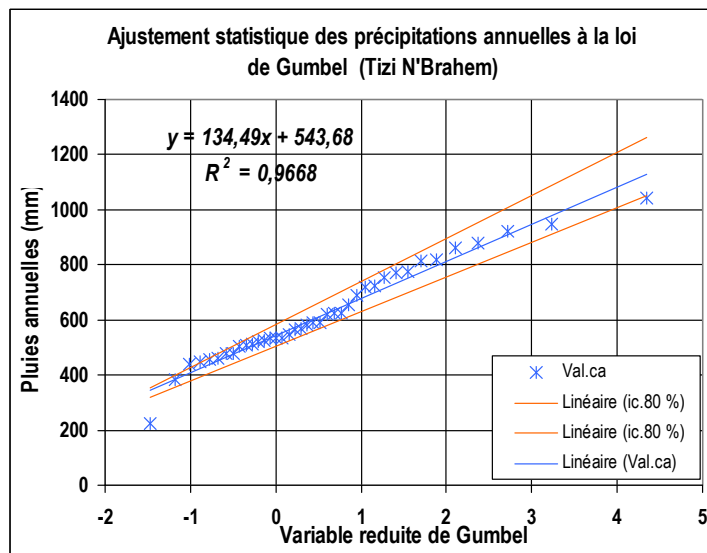


Figure: Ajustement statistique des Pan à la station de Tizi Brahem

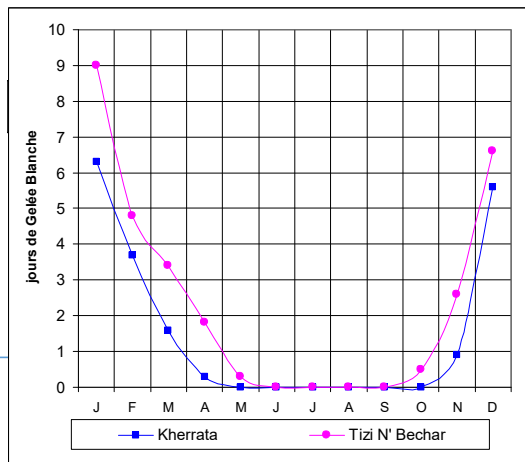
Précipitations moyennes annuelles de différentes fréquences										
P. de retour:	2	4	5	10	20	25	50	100	1000	10000
Fréquence:	0,5	0,75	0,8	0,9	0,95	0,96	0,98	0,99	0,999	0,9999
Variable Gumbel	-0,367	-1,246	-1,5	-2,25	-2,97	-3,199	-3,902	-4,6	-6,907	-9,21
Pluies maxima:	494,3	376,1	341,9	241,1	144,2	113,4	18,9	-75,0	-385,2	-695,0
Variable Gumbel	0,367	1,246	1,5	2,25	2,97	3,199	3,902	4,6	6,907	9,21
Pluies maxima:	593,0	711,3	745,4	846,3	943,1	973,9	1068,5	1162,3	1472,6	1782,3

Tableau: Précipitations moyennes annuelles de différentes fréquences à la station de Tizi Nbrahem

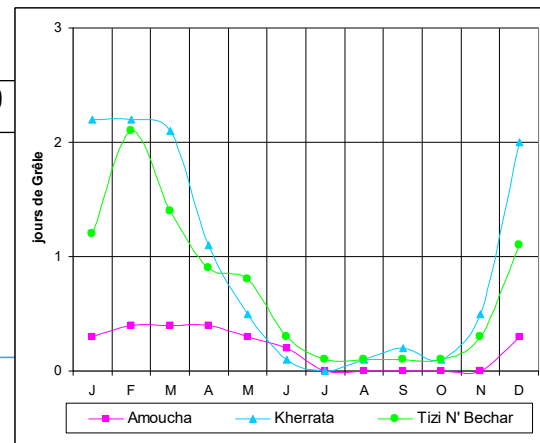
ANNEXE 4 : Paramètres climatiques secondaires

Tableau: Nombre de jours d'apparition de caractéristiques climatiques secondaires

N°	MOIS	Station	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	An	Moy
1	Pluie	Ain Roua	12,0	10,0	11,0	9,0	8,0	7,0	3,0	3,0	6,0	8,0	11,0	12,0	100,0	
		Amoucha	9,0	8,0	7,0	6,0	6,0	4,0	1,0	1,0	4,0	5,0	7,0	8,0	66,0	
		Kherrata	13,0	12,0	13,0	9,0	8,0	5,0	2,0	2,0	6,0	9,0	12,0	13,0	104,0	
		Tizi N' Bechar	12,0	11,0	12,0	10,0	8,0	5,0	2,0	3,0	7,0	10,0	10,0	11,0	101,0	
2	Neige	Kherrata														2,4
		Amoucha														15,2
3	Gelée Blanche	Kherrata	6,3	3,7	1,6	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,9	5,6	18,4	
		Tizi N' Bechar	9,0	4,8	3,4	1,8	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	2,6	6,6	29,0	
4	Grêle	Kherrata	2,2	2,2	2,1	1,1	0,5	0,1	0,0	0,1	0,2	0,1	0,5	2,0	11,1	
		Amoucha	0,3	0,4	0,4	0,4	0,3	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	2,3	
		Tizi N' Bechar	1,2	2,1	1,4	0,9	0,8	0,3	0,1	0,1	0,1	0,1	0,3	1,1	8,5	
5	Orage	Kherrata	1,3	1,6	1,9	1,8	3,5	3,6	2,2	3,3	3,6	1,9	1,1	1,3	27,1	
		Amoucha	0,7	1,3	1,5	2,0	4,2	4,4	3,3	3,3	4,2	2,4	0,7	1,2	29,2	
		Tizi nBechar	1,3	1,5	1,8	4,3	6,1	5,6	3,3	3,8	5,0	2,0	1,3	1,3	37,3	



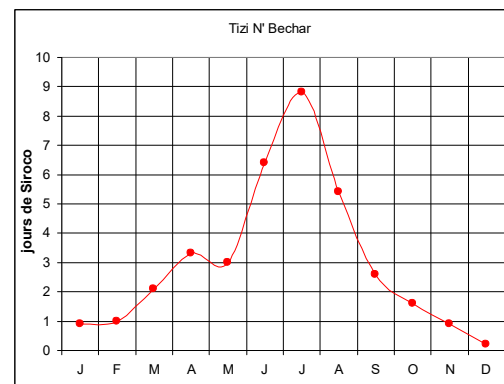
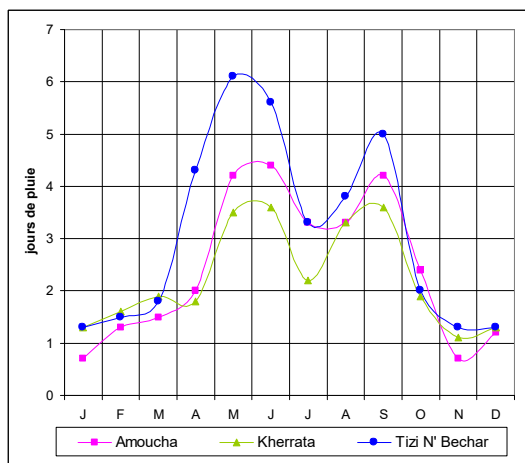
1,0	2,1	3,3	3,0
-----	-----	-----	-----



36,2	
------	--

Figure: Nombre de jours d'apparition par an de gelé

Figure: Nombre de jours d'apparition par an de grêle



ANNEXE05 : FORMULES ENPIRIQUES

La densité de drainage

La densité de drainage, introduite par Horton, est la longueur totale du réseau hydrographique par unité de surface du bassin versant :

$$D_d = \frac{\sum L_i}{S} \quad [\text{km}/\text{km}^2]$$

(13)

D_d : densité de drainage [km/km^2] ;

L_i : longueur de cours d'eau [km] ;

A : surface du bassin versant [km^2].

La densité de drainage dépend de la géologie (structure et lithologie) des caractéristiques topographiques du bassin versant et, dans une certaine mesure, des conditions climatologiques et anthropiques

Le Coefficient De Torrentialité

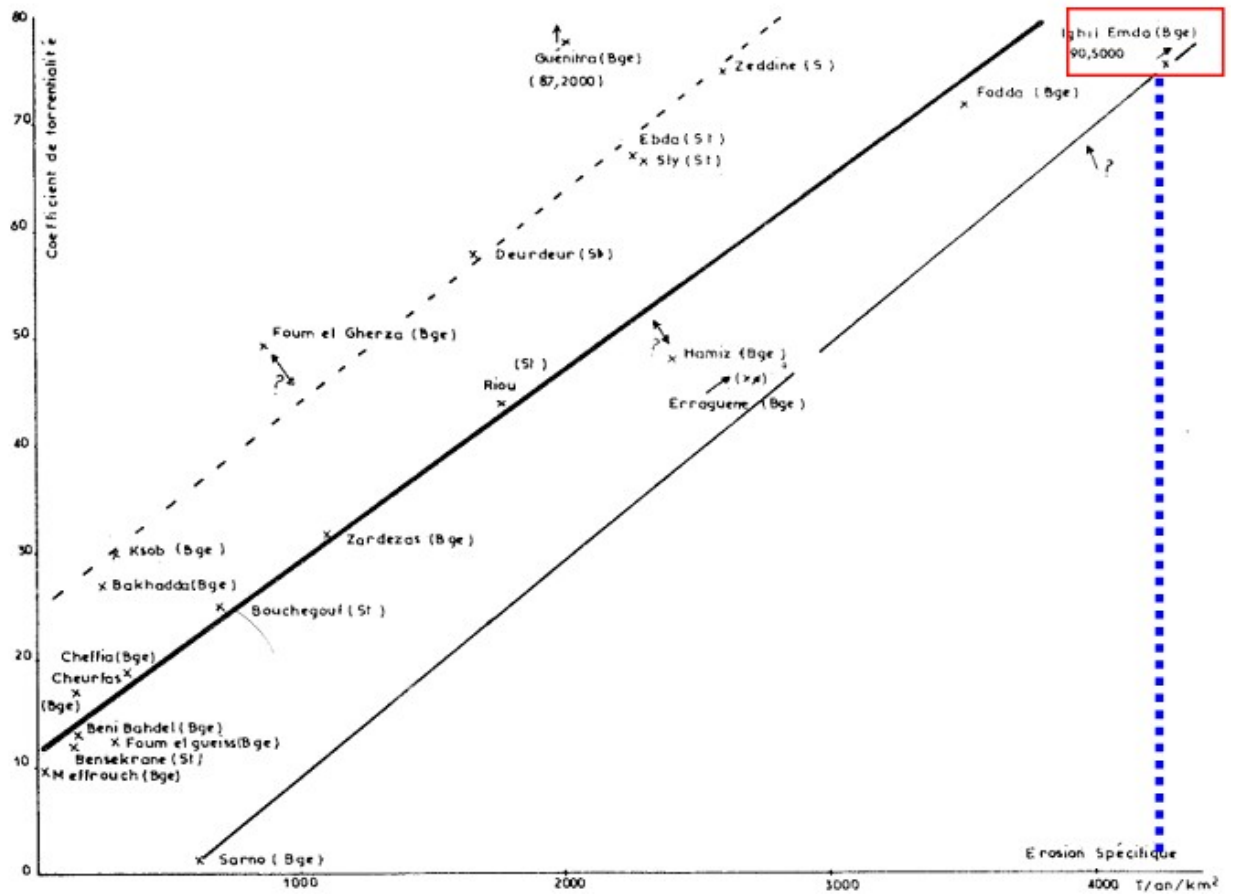
(C_t) est calculé à l'aide de l'équation:

$$C_t = D_d F_1, \quad [\text{Adimensionnel}] \quad (15)$$

F_1 : est le rapport entre le nombre de thalwegs d'ordre 1 et la surface globale du Bassin versant

D_d : est la densité du drainage,

Abaque de HUSSON 1975 . Source ANARH (Algérie)



ملخص

في هذه الدراسة التي أجريت على مستجمع مياه إغيل إمدا في سلسلة جبال بابور بمنطقة التل في الجزائر، سلطنا الضوء على المساهمة الجوهرية للمناهج البيوجيومورفولوجية والإيكولوجية في توصيف ديناميكيات تشكل المناظر الطبيعية. وقد مكّنا الرصد الدقيق لموقع وادي عتيبة ضمن مستجمع المياه المدروس من تحديد الطبيعة الحتمية للعلاقة بين الجيومورفولوجيا وتطور النظم البيئية الطبيعية. علاوة على ذلك، تشير العديد من الدراسات التي تُقيس التعرية من خلال تقدير أحمال الرواسب إلى تدهور شديد، ينتج عنه كميات كبيرة من المواد العالقة التي غالبًا ما ينتهي بها المطاف في السدود أو تُنقل إلى البحر. وفي السياق نفسه، كشفت التحليلات القائمة على مقارنة النتائج التجريبية لمنتجات التعرية مع الملاحظات الميدانية عن قصور المناهج الكمية البحتة في توصيف ديناميكيات تشكل المناظر الطبيعية نظرًا للطبيعة المكانية لظاهرة التعرية. وتشير هذه النتائج المهمة إلى القيمة الجوهرية لدمج الجوانب الإيكولوجية والبيوجيومورفولوجية في أبحاث ديناميكيات المناظر الطبيعية. تُبشّر آفاق هذا النهج البيوجيومورفولوجي بفهم نشأة الموائل البيئية الدقيقة، والمناخات المحلية، واتجاهات تطور النظم البيئية. وقد أثبت التطبيق المتكامل لأدوات رسم الخرائط الجيومورفولوجية، ونظم المعلومات الجغرافية، والاستشعار عن بُعد، ومصفوفات الانتقال، ومقاييس المناظر الطبيعية، أهميته البالغة في تحليل ديناميكيات المناظر الطبيعية. وتُتيح هذه الأساليب إمكانات هائلة لإجراء دراسات متكاملة للتفاعلات بين التضاريس، والعمليات المورفوجينية، والتنظيم البيئي.

Résumé

Dans la présente étude menée sur le bassin versant d'Ighil Emda dans la chaîne des Babords de l'Algérie tellienne, nous avons mis en évidence l'apport incontestable des approches biogéomorphologiques et écologiques dans la caractérisation de la dynamique morphogénique des paysages. Un suivi de près du site d'Oued Etteba dans le bassin versant étudié a permis d'identifier le caractère déterministe reliant la géomorphologie et l'évolution des écosystèmes naturels. Par ailleurs, nombreuses études de quantification d'érosion par estimation des apports solides font état d'une dégradation intense traduite par des volumes considérables de matières en suspension qui atterrissent souvent dans des barrages ou entraînés vers la mer. Dans le même contexte, des analyses fondées sur la confrontation entre des résultats empiriques des produits d'érosion et des observations de terrain, ont mis en évidence le caractère limité des approches strictement quantitatives dans la caractérisation de la dynamique morphogénique en raison de la spatialité du phénomène d'érosion. Ces résultats intéressants suggèrent l'intérêt incontestable d'intégrer les aspects écologiques et géomorphologiques dans les recherches sur la dynamique des paysages. Les perspectives de cette approche biogéomorphologique sont prometteuses dans l'appréhension de la genèse des micro habitats écologiques, microclimats et tendance d'évolution des écosystèmes. L'application combinée des outils de cartographie géomorphologique, des Systèmes d'Information Géographiques (SIG), de la télédétection, des matrices de transition et des métriques paysagères s'est révélée d'un intérêt incontournable pour l'analyse de la dynamique paysagère. Ces méthodes procurent un potentiel inestimable pour les études intégrées des interactions entre relief, processus morphogéniques et organisation écologique.

Abstract:

In this study conducted on the Ighil Emda watershed in the Babord mountain range of the Tellian region of Algeria, we have highlighted the undeniable contribution of the biogeomorphological and ecological approach to characterizing the morphogenic dynamics of landscapes. Close monitoring of the Oued Etteba site in the studied watershed has identified the deterministic nature linking geomorphology and the evolution of natural ecosystems. Furthermore, numerous studies quantifying erosion by estimating solid inputs report intense degradation, reflected in considerable volumes of suspended matter that often end up in dams or are carried out to sea. In the same context, analyses based on a comparison of empirical results of erosion products and field observations have highlighted the limited nature of strictly quantitative approaches in characterizing morphogenic dynamics due to the spatial nature of the erosion phenomenon. These interesting results suggest the undeniable value of integrating ecological and geomorphological aspects into research on landscape dynamics. The prospects for this biogeomorphology approach are promising in understanding the genesis of ecological microhabitats, microclimates, and ecosystem evolution trends. The combined application of geomorphological mapping tools, Geographic Information Systems (GIS), remote sensing, transition matrices, and landscape metrics has proven to be of essential interest for the analysis of landscape dynamics. These methods offer undeniable potential for integrated studies of the interactions between relief, morphogenic processes, and ecological organization.

