

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université de Mohamed Elbachir El Ibrahimi



Bordj Bou Arreridj
Faculté des sciences et de la technologie
Département de Génie Civil



MÉMOIRE

En vue de l'obtention d'un diplôme de Master en Génie Civil
Option : Géotechnique

Thème

**Modélisation de la susceptibilité à l'érosion via
la méthode Frequency ratio : Application sur les
terrains de la région Sud de BBA**

Réaliser par :

RAHMANI Samra

Devant le jury composé de :

Dr. Noui Ammar	MCB	UBBA	Président
Dr. Achour Yacine	MCA	UBBA	Encadreur
Dr. Hadji Rihab	MCA	UFAS	Examineur
Dr. Belkadi AbdRaouf	MCB	UBBA	Examineur

Promotion: 2019/2020

Remerciements

Merci tout d'abord à Dieu, Tout puissant qui m'a donné la santé pour entreprendre ce modeste travail.

Je tiens à remercier spécialement ; ma famille ; mes très chers parents, qui ont toujours été là pour moi. Un grand merci également à mes sœurs mes frères pour leurs encouragements.

J'exprime mes profonds remerciements à mon directeur de mémoire, Monsieur le professeur ACHOUR Yacine pour l'aide compétente qu'il m'a apportée, pour sa patience et son encouragement. Son œil critique m'a été très précieux pour structurer le travail et pour améliorer la qualité des différentes sections. Je veux vraiment vous remercier car j'ai eu beaucoup de chance de vous avoir comme directeur de mémoire.

Je remercie également les membres de jury ; monsieurs Noui Ammar, Belkadi Abd Raouf Et monsieur Hadji Rihab pour leurs temps d'examiner mon travail.

Toute ma gratitude s'adresse aussi à Monsieur le professeur NOUI Amar pour son aide, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter ma réflexion.

Je remercie très chaleureusement M. KHABABA Oussama pour son amitié, et l'aide précieuse qu'il m'a apporté tout au long de ce travail. A toi, auprès de qui j'ai appris le sacrifice, la générosité, qui m'a aidé et encouragé aux moments opportuns.

Au final, je remercie l'équipe de travail ; NOUIOUA Thamer ,OUEDFEL Oum El Khair et ATTOUI Bachir qui ont toujours été là pour moi. Leur soutien inconditionnel et leurs encouragements ont été d'une grande aide.

Résumé :

L'érosion hydrique est un phénomène complexe, largement répandu en Algérie du Nord, notamment dans la zone d'étude où les facteurs naturels et l'agressivité du milieu influencent la perte de sol.

Cette recherche introduit une méthodologie scientifique pour la cartographie de la susceptibilité à l'érosion hydrique (GESM) qui utilise une analyse quantitative basée sur le système d'information géographique (SIG). L'objectif de la présente étude est d'évaluer la susceptibilité à l'érosion hydrique présentée par des modèles construites via la méthode de rapport de fréquence (FR) pour la prédiction spatiale de la sensibilité à l'érosion hydrique et la caractérisation des conditions de sensibilité dans la région étudiée. Dans un premier temps, une carte d'inventaire de l'érosion est préparée, à parti d'une analyse des images satellitaire ainsi que des sorties sur le terrain, à l'aide des systèmes de positionnement géographique (appareils GPS) sophistiqués. Un total, de 163 formes ont été identifiées sur terrain, 114 (70%) cas sont sélectionnés aléatoirement pour construire le modèle final, tandis que les 49 cas restants (30%) sont utilisés pour valider le modèle. Les facteurs de conditionnement sélectionnés dans cette recherche, sont : La lithologie, L'altitude, L'exposition des versants, La pente, la proximité aux routes, au réseau hydrographique et aux failles.

Les résultats obtenus montrent la fiabilité de la méthode utilisée dans la cartographie de la susceptibilité à l'érosion hydrique dans le secteur d'étude.

Mots clés : Erosion hydrique ; Systèmes d'information géographique (SIG) ; modélisation ; susceptibilité ; rapport de fréquence.

ملخص

يعتبر الانجراف المائي ظاهرة معقدة منتشرة على نطاق واسع في شمال الجزائر، خاصة في منطقة الدراسة، حيث تؤثر العوامل الطبيعية وعدوانية البيئة على فقدان التربة في هذه المنطقة.

من خلال هذه الدراسة، قمنا بعرض منهجية علمية لرسم خرائط قابلية التربة للانجراف المائي باستخدام التحليل الكمي عن طريق استعمال نظام المعلومات الجغرافية. في البداية، تم إعداد خريطة جرد للانجراف المائي بالاستعانة بتحليل بعض الصور الفضائية وكذلك باستخدام انظمة التحديد الجغرافي بعد العديد من الزيارات الميدانية لمنطقة الدراسة. اضيفت هاته الزيارات الى تحديد 163 اخدود في منطقة الدراسة، من بينها 144 (70%) تم تحديدها بطريقة عشوائية لإنجاز النموذج النهائي بينما استخدمت الحالات الـ 49 المتبقية (30%) للتحقق من صحة هذا النموذج.

من بين اهم العوامل المؤثرة في عملية الانجراف داخل المنطقة المدروسة لدينا: التكوينات الجيولوجية، الارتفاع، انكشاف و اتجاه المنحدرات، الانحدارات، القرب من الطرق الشبكة الهيدروغرافية و الفوالق.

الكلمات المفتاحية:

الانجراف المائي; نظام المعلومات الجغرافية; قابلية; النمذجة; نسبة التردد.

Abstract:

Erosion is a complex phenomenon, largely responded to in North Algeria, in particular in the study area, where natural factors and environmental aggressiveness influence soil loss.

This research introduces a scientific methodology for mapping susceptibility to ravine erosion (GESM) that uses quantitative analysis based on a geographic information system (GIS). The objective of this study is to evaluate the capacity of frequency ratio (FR) models for spatial prediction of ravine erosion sensitivity and characterization of sensitivity conditions in studied region. Initially, an inventory map is prepared, based on satellite images and hard field work using geographical positioning systems (GPS). In total, 163 ravines were identified, 114 (70%) cases are randomly selected to construct the final model, while the remaining 49 cases (30%) are used for validation purpose. The conditioning factors selected in this research are lithology, altitude, slope exposure, slope, and proximity to roads, hydrographic network and faults. The model showed reasonably good accuracy in predicting the erosion susceptibility in the study area

Key words: Erosion; Geographic Information Systems (GIS); modelling; susceptibility; frequency ratio.

Sommaire

Remerciements

Résumé

ملخص

Abstract

Liste des figures

Liste des tableaux.

Acronymes.

Sommaire

Chapitre I : Synthèses bibliographique.

Partie 1 : Généralités sur l'érosion.

1. Introduction :.....	3
2. Erosion :.....	3
2.1. Définition :.....	3
2.2. Les processus érosifs des sols :.....	4
2.3. Types d'érosion :.....	5
2.3.1. Hydrique :.....	5
2.3.2. Eolienne :.....	5
3. Erosion hydrique :.....	6
3.1. Les formes d'érosion hydrique :.....	6
3.1.1. Érosion en masse :.....	6
3.1.2. L'érosion en nappe :.....	7
3.1.3. Érosion linéaire :.....	8
3.2. Les processus de l'érosion hydrique :.....	9
3.2.1. Le détachement :.....	9
3.2.2. Le transport :.....	10
3.2.3. La sédimentation :.....	11

3.3.	Facteurs provoquant l'érosion hydrique :	11
3.3.1.	Le climat :	11
3.3.2.	La topographie :	12
3.3.3.	La lithologie :	13
3.3.4.	Le couvert végétal :	13
3.3.5.	Les facteurs anthropiques :	13

Partie 02: SIG et cartographie des risques.

1.	Introduction :	15
2.	Quelques définitions :	15
2.1.	Système d'information géographique SIG :	15
2.2.	Cartographie des risques :	15
2.3.	Modèle numérique du terrain :	15
3.	Les différentes méthodes de la cartographie de la susceptibilité :	16
3.1.	Approches qualitatives :	17
3.1.1.	L'inventaire des glissements :	17
3.1.2.	L'approche experte ou Heuristique :	17
3.2.	Approches semi-quantitatives :	19
3.2.1.	Méthode du Processus de hiérarchie analytique (AHP) :	19
3.2.2.	Le processus de réseau analytique (Analytic Network Process-ANP) ..	19
3.3.	Approches quantitatives :	20
3.3.1.	Méthode d'USLE (Universal Soil Loss Equation) :	20
3.3.2.	Méthode de Weight of Evidence (WoE):	21
3.3.3.	Méthode du rapport de fréquence (FR) :	22
4.	Conclusion :	23

Chapitre II: Description générale de la région d'étude.

Partie01: Géologie du Nord d'Algérie.

1. Introduction :.....	23
2. Aperçu sur la géologie du Nord de l'Algérie :.....	23
2.1. Domaine interne :.....	24
2.2. Domaine des flyschs:	25
2.3. Domaine externes :.....	26

Partie02: Zone d'étude

1. Introduction :.....	28
2. Région d'étude :.....	28
2.1. Situation géographique du bassin versant du K'sob :	28
2.2. Caractéristiques du bassin :	29
2.2.1. Géologie de bassin versant du K'sob :.....	29
2.2.2. Pédologie :	33
2.2.3. Couverture végétale :	33
2.3. Caractéristiques morpho-métriques du bassin :	35
2.3.1. Caractéristiques de forme :	35
2.4. Caractéristiques climatiques :.....	36
2.4.1. Le climat :	36

Chapitre III: Utilisation du SIG pour la construction de la base de données

3. Conclusion :	38
1. Introduction :.....	40
2. Zone d'étude :	40
2.1. Construction de la carte d'inventaire :	41
2.2. Les facteurs de prédisposition à l'occurrence de l'érosion hydrique :.....	42

2.2.1.	La lithologie :	43
2.2.2.	L'altitude :	45
2.2.3.	L'exposition des versants :	46
2.2.4.	La pente :	47
2.2.5.	Proximité aux failles :	48
2.2.6.	Proximité aux routes:	49
2.2.7.	Proximité au réseau hydrographique :	49

Chapitre IV: Modélisation de la susceptibilité à l'érosion via FR.

3.	Conclusion :	50
1.	Introduction :	52
2.	Application de la méthode de rapport de fréquence (FR) :	52
2.1.	Méthodologie :	52
3.	Résultats et discussion :	55
4.	Carte de susceptibilité de la zone d'étude:	57
5.	Validation :	59
6.	Conclusion :	59
	Conclusion générale :	61
	Perspectives :	61

Listes des références.

Annexes.

Liste des figures :

<i>Figure 1: Image montrant le développement des formes d'érosion à la région de Bordj Ghdir-BBA.</i>	3
<i>Figure 2: Processus de l'érosion (Olivier Dequincey, 2018).</i>	4
<i>Figure 3:Image montrant l'érosion hydrique à la région de Medjana-BBA.</i>	5
<i>Figure 4:Image montrant l'érosion éolienne d'après JM Kiener 2009.</i>	6
<i>Figure 5:Erosion en masse (Glissement). (Alberta Ouest de Canada).</i>	7
<i>Figure 6:Erosion hydrique en nappe au printemps dans le Sud-Ouest de la France.</i> ..	7
<i>Figure 7: Photo illustrant le phénomène d'érosion linéaire d'après Thomas Binet, 2007.</i>	8
<i>Figure 8:Rejaillissement du sol et de l'eau suite à l'impact d'une goutte d'eau.</i>	10
<i>Figure 9:Les processus de l'érosion hydrique.</i>	11
<i>Figure 10: Les différentes méthodes de la cartographie de la susceptibilité.</i>	16
<i>Figure 11: Carte montrant la localisation de la wilaya de Bordj-Bou-Argeridj.</i>	23
<i>Figure 12:Les différentes unités géologiques des Maghrébides (d'après Domzig, 2006).</i>	24
<i>Figure 13:Position des nappes de flyschs par rapport aux unités de la chaîne des Maghrébides.</i>	25
<i>Figure 14:Rapports structuraux entre les différentes unités de la chaîne des Maghrébides (d'après Durand-Delga, 1955).</i>	26
<i>Figure 15:Coupe générale synthétique des Maghrébides de l'Est algérien</i>	26
<i>Figure 16: Situation du bassin versant du K'sob.</i>	28
<i>Figure 17: Couverture en carte géologique (en 1/50000) de la région d'étude.</i>	30
<i>Figure 18:Précipitations de la Wilaya de Bordj Bou Argeridj 1982-2018 (INFOclimat.FR, 2020).</i>	36

Figure 19: Températures annuelles de la région de Bordj-Bou-Arreidj (INFOclimat.fr, 2020).	38
Figure 20: Carte de localisation de la zone d'étude.	40
Figure 21: Enquêtes sur terrain	41
Figure 22: Carte d'inventaire de l'érosion dans la zone d'étude.	42
Figure 23: Carte lithologique de la zone d'étude.	44
Figure 24: Carte d'altitude de la zone d'étude.	45
Figure 25: Carte d'exposition des versants de la zone d'étude.	46
Figure 26: Carte des pentes de la zone d'étude.	47
Figure 27: Carte de proximité aux failles dans la zone d'étude.	48
Figure 28: Carte de proximité des routes de la zone d'étude.	49
Figure 29: Carte de proximité au réseau hydrographique.	50
Figure 30: Organigramme du modèle FR	53
Figure 31: Organigramme générale du travail	54
Figure 32: Carte de susceptibilité de la zone d'étude.	58
Figure 33: Point de validation du modèle	59

Liste des tableaux :

<i>Tableau 1: Formes de l'érosion linéaire (Hadir, 2010)</i>	9
<i>Tableau 2: Précipitations annuelles (P mm) de la région de Bordj-Bou-Argeridj (Période 1982-2018)</i>	36
<i>Tableau 3: Températures annuelles de la région de Bordj-Bou-Argeridj (Période 1982-2018)</i>	37
<i>Tableau 4: Lithologie de la zone d'étude</i>	44
<i>Tableau 5: Résultat du modèle</i>	55

Acronymes

AHP: *Analyse Multicritère Hiérarchique.*

ANP: *Analytic Network Process.*

BBA: *Bordj Bou Arreridj.*

ESM: *Erosion Susceptibility Map.*

FAO: *Food and Agriculture Organization of the United Nations.*

FR: *Frequency ratio.*

GEI: *Gully Erosion Indice.*

GESM: *Gully Erosion Susceptibility Map.*

MNT: *Modèle Numérique du Terrain.*

PAF : *Proximité aux failles.*

PAR : *Proximité aux routes.*

PRH : *Proximité aux réseaux hydrographiques.*

SIG : *Système D'information Géographique.*

USLE: *Universal Soil Loss Equation.*

WOG: *Weight of Evidence.*

Introduction générale

Introduction générale :

L'érosion hydrique est un problème majeur pour la gestion des ressources naturelles, entraînant une dégradation des terres et des pertes économiques dans le monde entier. Ce phénomène cause différents types de dommages aux routes, aux ressources naturelles et à l'agriculture, qui est considéré comme l'un des principaux agents de dégradation géo-environnementale dans le nord d'Algérie.

En Algérie, environ 6 millions d'hectares sont exposés à une érosion active. L'érosion spécifique varie entre 20 et 40 t/ha/an (Morsli et al. 2012). L'Algérie est parmi les pays du Bassin Méditerranéen qui connaissent un énorme déficit hydrique. Pour pallier à ce problème, l'Etat a mené une politique de grande hydraulique consistant en la création d'infrastructures telles que les barrages. Cependant, les ouvrages hydrauliques localisés dans le nord de l'Algérie, s'ensable à un rythme rapide (Ministère des Ressources en eau, 2015). Le potentiel hydraulique perd annuellement 30 millions de m³. La quantité de sédiments déposée dans les 110 barrages que détient l'Algérie est estimée à 650.106 m³, soit un taux de comblement de 14,5 % en 2000 (Kouri et Gomer, 2010).

Dans la partie nord-Est du pays, en particulier la région de l'Hodna, nous observons que le taux de sédimentation a évolué ces dernières années. Cette évolution est due au processus de l'érosion hydrique à l'échelle des bassins versants où l'érosion touche environ 47 % de l'ensemble des terres. Dans ces régions montagneuses, l'érosion hydrique est un problème majeur, son intensité varie d'une zone à l'autre (Benchettouh et al. 2017).

Les processus d'érosion hydrique et de dégradation du ravin sont liés à la croissance démographique et à des effets interdépendants. En raison du climat semi-aride, des précipitations intenses et des processus de déforestation, l'érosion des ravines est considérée comme une source importante de dégradation des terres dans la région de l'Hodna.

Le bassin du K'sob d'une surface de 1569,71km² se situe dans la partie Nord-Est de l'Algérie. Il fait partie du grand bassin versant de Côtiers Algérois. Il s'étend sur la totalité de la wilaya de Bordj Bou Arreridj dont son exutoire est à la limite Nord

de la wilaya de M'sila.

Ce travail a pour but de développer notre compréhension du phénomène étudié et les différentes techniques de modélisation et la cartographie de susceptibilité à l'érosion hydrique. Plusieurs méthodes sont adoptées, parmi lesquelles on a utilisé le modèle de rapport de fréquence (FR) dans cette étude, qui est une analyse statistique bivariée.

Ainsi, ce travail a été subdivisé en quatre chapitres:

Chapitre I ; Synthèse bibliographique ; ce chapitre présente une étude bibliographique sur le phénomène (partie-1), SIG et la cartographie des risques (partie-2) ;

Chapitre II ; Description générale de la région d'étude; il est divisé en deux parties : tout d'abord une brève présentation de la géologie du Nord d'Algérie, ensuite une description générale de la région d'étude.

Chapitre III ; utilisation du SIG pour la construction de la base de donnée ; ce chapitre présente une application des concepts du SIG pour la cartographie de quelques paramètres relatifs à la région d'étude.

A la fin, création de la carte de susceptibilité à l'érosion hydrique et validation des résultats a été fait dans Chapitre IV ; Modélisation de la susceptibilité à l'érosion via FR.

Chapitre I :
Synthèse bibliographique

1. Introduction :

L'étude des risques d'érosion et de ruissellement sur un bassin versant exige une bonne compréhension du comportement hydrologique du sol et en particulier la capacité d'infiltration et de transport qui dépend de ses états de surface et de types de sols.

La cartographie du risque d'érosion hydrique implique d'évaluer le niveau d'aléa et les enjeux humains ainsi que la vulnérabilité des éléments exposés à ce risque. Mais avant d'évaluer l'aléa, il faut tout d'abord apprécier la susceptibilité des terrains à un type de phénomène donné.

2. Erosion :

2.1.Définition :

Selon la FAO (1994), l'érosion regroupe tous les phénomènes qui modifient la forme du relief sous l'action d'agents érosifs (en particulier l'eau). L'érosion est également définie comme un processus physique, chimique et naturel par lequel les sols et les roches sont constamment soumis à l'usure et à la corrosion (Georges, 2008). (Fig.1)



Figure 1: Image montrant le développement des formes d'érosion à la région de Bordj Ghdir-BBA.

2.2. Les processus érosifs des sols :

L'érosion se produit lorsque la force entraînant et transportant le matériau est supérieure à la force résistante au mouvement du matériau. Ces forces s'exercent à la surface par le vent, la pluie et le ruissellement.

Dans une première approche, l'épaisseur du sol est contrôlée par la relation entre le taux de production et le déplacement des matériaux. Le sol est produit par l'agent d'altération, ce qui provoque le changement du substratum rocheux, et la désintégration et le déplacement du sol sont terminés par le processus de conduite et de transport.

Lorsque ces deux processus sont égaux, l'épaisseur du sol reste constante. Lorsque le taux de déplacement (érosion) est supérieur au taux de production du sol, des problèmes d'érosion du sol se font sentir. En revanche, lorsque le taux de formation du sol est supérieur au taux de déplacement, le sol formé se dépose sur place et son épaisseur augmente.

Quand le changement d'épaisseur du sol est nul, l'équilibre entre la formation et le déplacement du sol peut être atteint. Dans ce cas, le taux de déplacement (ou d'érosion) est limité par le taux de production, et le premier est limité par la capacité d'entraînement du flux et la capacité de transport solide. Par conséquent, l'évaluation de l'érosion des sols agricoles dépend non seulement de la détermination de l'érosion des sols par des règles empiriques, mais également de la disponibilité des sédiments sur les versants (fonction du bilan entre la production et le déplacement des sols) et de l'écoulement qui s'y développe. (Borges, 1993).(Fig.2)

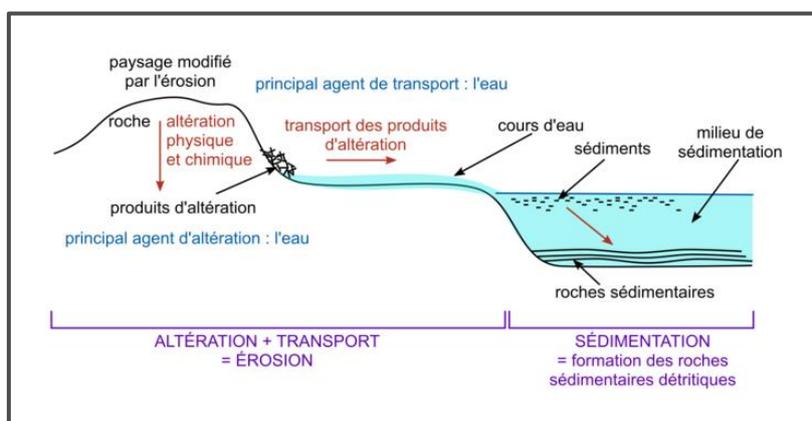


Figure 2: Processus de l'érosion (Olivier Dequincey, 2018).

2.3.Types d'érosion :

Le terme érosion du sol signifie généralement la destruction du sol par l'action de l'eau, du vent ou des phénomènes liés à l'activité de l'homme...etc

Donc nous pouvons citer différents types d'érosion :

2.3.1. Hydrique :

L'érosion hydrique est un phénomène complexe, se définit comme le détachement et le transport de particules de sol de son emplacement d'origine par l'eau vers un lieu de dépôt. Elle se développe lorsque les eaux de pluie, ne pouvant plus s'infiltrer dans le sol, ce refus du sol d'absorber les eaux en excédent apparaît soit lorsque l'intensité des pluies est supérieure à l'infiltrabilité de la surface du sol, soit lorsque la pluie arrive sur une surface partiellement ou totalement saturée par une nappe. (Yves et al ,2002). (Fig.3)



Figure 3:Image montrant l'érosion hydrique à la région de Medjana-BBA.

2.3.2. Eolienne :

Élimination des particules sèches non consolidées, en particulier la poussière et le sable, de la surface terrestre par le vent, principalement dans les climats secs.

La longue saison sèche, la faible couverture végétale, la prédominance des sols sableux et l'occurrence de forts vents érosifs à des périodes critiques de l'année favorisent ce processus (Tidjani, A. D et al, 2009). (Fig.4)



Figure 4: Image montrant l'érosion éolienne d'après JM Kiener 2009.

3. Erosion hydrique :

L'érosion hydrique est un phénomène géologique naturel qui a façonné la surface de la terre au cours des âges géologiques (White, 1986). Les changements climatiques et des paysages sous l'influence de la pression démographique et l'extension des cultures d'exploitation, ont contribué à l'augmentation de l'exposition des terres au processus de ruissellement, et par conséquent, à la dégradation des sols par l'érosion (Vezena et Bonn, 2006).

Diverses sortes d'activités humaines, pratiques agricoles, exploitations forestières, pâturages, construction des routes et bâtiments tendent à modifier les phénomènes d'érosion, en l'accéléralant souvent de façon considérable (Wachal, 2007). Elle résulte du détachement, sous l'effet de l'énergie cinétique des gouttes de pluie, et du transport de fragments ou de particules de sol ou de roches de leur emplacement initial par l'eau, dégradant la qualité des eaux et la fertilité des sols et réduisant la capacité des réservoirs. (Toumi et al., 2013)

3.1. Les formes d'érosion hydrique :

3.1.1. Érosion en masse :

L'érosion en masse déplace un volume de sol à l'intérieur de la couverture pédologique selon des formes telles que les mouvements de masse, les coulées de boue et les glissements de terrain, c'est un phénomène qui a lieu sur les terrains en pente forte.

La cause des mouvements de masse provient du déséquilibre entre d'une part la masse sol, de l'eau stockée et des végétaux qui le couvrent et d'autre part des forces de frottement qui permettent la stabilisation de ces matériaux sur la roche altérée, en pente. Les mouvements de masse constituent la manifestation d'un processus appelé solifluxion. (Hadir, 2010).(Fig.5)



Figure 5: Erosion en masse (Glissement). (Alberta Ouest de Canada).

3.1.2. L'érosion en nappe :

L'érosion en nappe est le stade initial de la dégradation des sols par l'érosion hydrique. Il s'agit en réalité d'une fonte de l'horizon humifère superficiel combiné à la remontée en surface des cailloux par un travail profond du sol. Après quelques pluies, les terres fines sont entraînées par les pluies tandis que les cailloux, trop lourds pour être emportés, s'accumulent à la surface du sol (Roose, 1973). (Fig.6)



Figure 6: Erosion hydrique en nappe au printemps dans le Sud-Ouest de la France.

3.1.3. Érosion linéaire :

Une érosion linéaire se produit quand le ruissellement en nappe se concentre et acquiert, par augmentation de la vitesse d'eau, un pouvoir érosif accru ce qui provoque des incisions linéaires dans le sol de plus en plus profondes (Foster, 1990).

On parle de griffes lorsque les petits canaux ont quelques centimètres de profondeur, de rigoles lorsque les canaux dépassent 10 cm de profondeur, En effet, sur un bassin versant ou une parcelle, l'érosion en rigoles succède à l'érosion en nappe par concentration du ruissellement dans les creux. A ce stade, les rigoles ne convergent pas mais forment des ruisselets parallèles.

Quand les rigoles constituent un réseau bien ramifié et atteignent une profondeur d'ordre métrique, on parle dans ce cas de l'érosion par ravinement (gully erosion). Les ravins constituent la forme la plus évoluée de l'érosion linéaire, et se répartissent sur l'ensemble du terrain. Parfois, lorsque le substrat est dur, les ravins s'élargissent par sapement des berges qui constituent la principale source des sédiments transporté (Ludwing et al., 1996) (Fig.7)



Figure 7: Photo illustrant le phénomène d'érosion linéaire d'après Thomas Binet, 2007

A l'intérieur des ravines, on peut encore distinguer des petites ravines dont le lit est encore encombré de végétation herbacée et surtout arbustive et qu'on pourra fixer rapidement par les méthodes biologiques. Par contre, dans des grandes ravines qui peuvent s'étaler sur plusieurs kilomètres, le canal central comporte des blocs rocheux, témoins d'un charriage important et d'une certaine torrencialité (Hadir 2010).

Tableau 1: Formes de l'érosion linéaire (Hadir, 2010).

Forme	Tracé	Longueur	Largeur	Profondeur
Griff	Simeux	< 1m	< 10 cm	5-6 cm
Rill	Rectiligne	Certain de m	10-20 cm	5-10 cm
Rigole	Simeux	Dizaine de m	5-70 cm	10-30 cm
Ravine	Peu simeux	Certaine de m	50cm-1m	30-50 cm
Petit ravine	Peu simeux	Certaine de m	50cm-1m	50-200

3.2. Les processus de l'érosion hydrique :

L'érosion hydrique résulte de la conjugaison de trois mécanismes : le détachement des particules de sol, leur transport et leur sédimentation. (Fig.9)

3.2.1. Le détachement :

L'eau de pluie a longtemps été considérée comme un facteur déclenchant d'érosion des sols. L'influence des gouttes de pluie sur la surface du sol provoque la séparation (le détachement) des particules du sol. Ce détachement est causé par ces quatre principaux mécanismes :

- a. **L'éclatement** ; lié à la compression de l'air résiduel lors de l'humidification. Les sols argileux sont moins affectés par l'éclatement que les sols limoneux ou sableux en raison de leur porosité réduite et de leur rétention d'eau élevée.
- b. **La désagrégation mécanique** ; due à l'énergie dissipée lors de l'impact des gouttes de pluie. Cette énergie est convertie en force de cisaillement, ce qui provoque le détachement des particules de sol.
- c. **La microfissuration** ; produite par le gonflement différentiel des argiles. Le gonflement et le retrait de ces argiles provoquent des microfissures des agrégats.

- d. La dispersion physique et chimique ;** due à l'attraction réduite entre les particules colloïdales qui composent le sol. Cela dépend de la taille et de la valence des cations présents, qui peuvent former des ponts entre les particules chargées négativement.

Suite à l'impact d'une goutte de pluie, des gouttelettes d'eau et des fragments de sol sont éjectés de la surface et transportés radialement autour du point d'impact, avant de se déposer à la surface. Ce rejaillissement d'eau et de sol est communément désigné par le terme de Splash (Figure.7). (Guillaume, 2003)

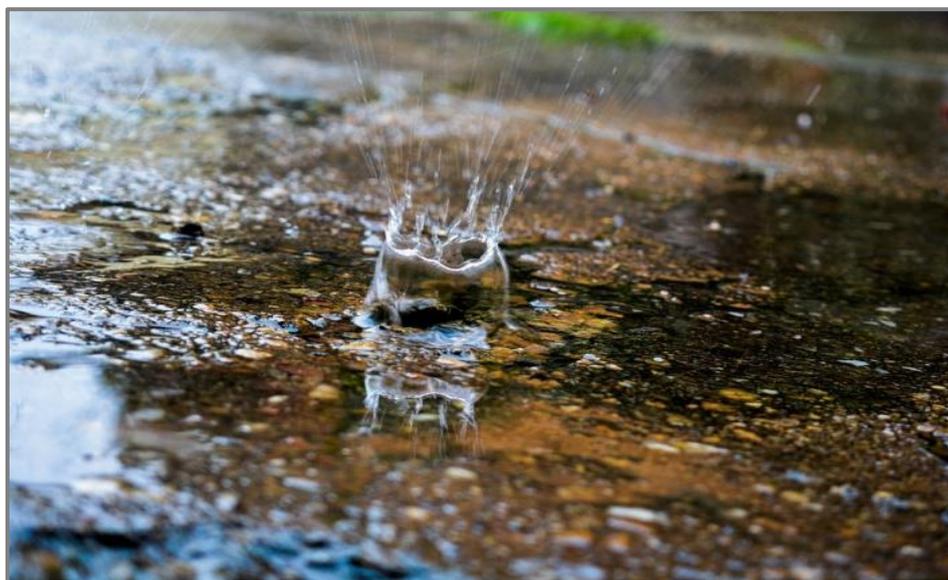


Figure 8: Rejaillissement du sol et de l'eau suite à l'impact d'une goutte d'eau.

3.2.2. Le transport :

Une fois que les particules de sol sont détachées, elles sont transportées sur des distances plus ou moins importantes. Le principal moyen de transport des fragments de sol se déplaçant sur une surface est le ruissellement.

Il existe deux types de ruissellement : le ruissellement sub-surface (ou hypodermique) en raison de la présence de couches imperméables sous la surface du sol et le ruissellement de surface. Ce dernier est dû au fait que l'intensité de l'eau de pluie est supérieure à la perméabilité de la surface du sol (mécanisme de Horton) qui est généralement le résultat de la formation de la croûte de battance, soit d'un dépassement de capacité de stockage du sol (ruissellement par saturation) (Joannon, 2004).

3.2.3. La sédimentation :

La sédimentation est un mécanisme pour contrôler et limiter la quantité d'exportations de sédiments. Cette situation se produit lorsque la capacité de transport du trafic est dépassée. Ainsi, par exemple, lorsque le ruissellement ralentit, la troisième étape du processus d'érosion hydrique se produit. Les particules les plus grossières se déposent en premier et les particules les plus fines sont transportées plus loin. On parle de classification granulométrique.

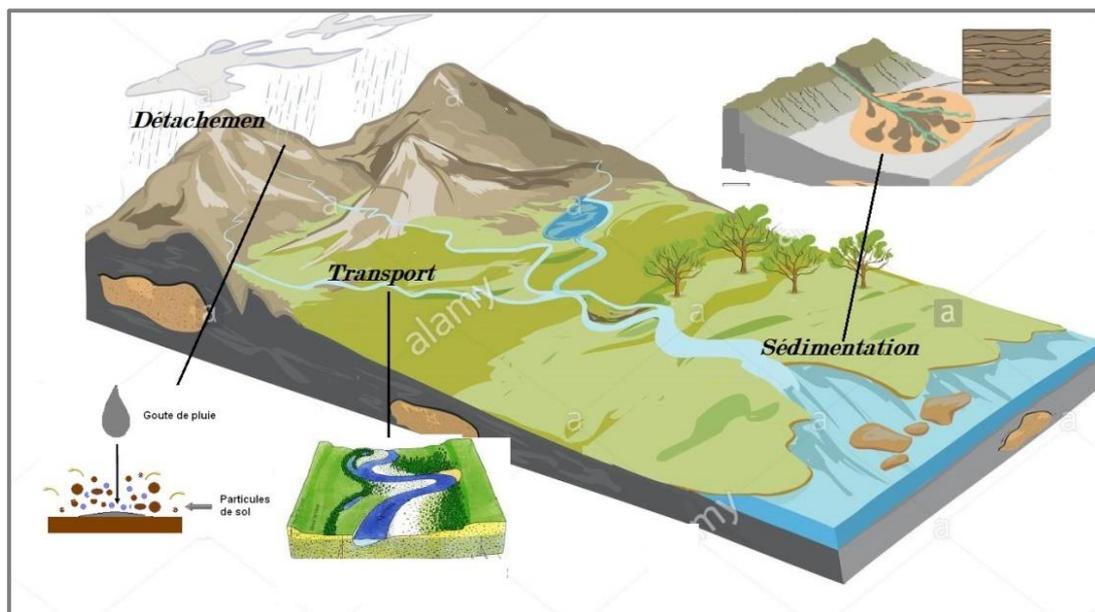


Figure 9: Les processus de l'érosion hydrique.

3.3. Facteurs provoquant l'érosion hydrique :

Deux principaux types de facteurs de l'érosion hydrique sont évoqués dans la littérature : les facteurs naturels regroupés sous quatre grandes familles ; à savoir : le climat, la topographie, la lithologie et le couvert végétal ; et les facteurs anthropiques relatifs aux activités humaines.

3.3.1. Le climat :

Le climat exerce une forte influence sur le type de végétation, la biomasse et la diversité des terres arides. Les précipitations et la température déterminent la distribution possible de la végétation terrestre et constituent les facteurs premiers de la genèse et de l'évolution des sols.

Les précipitations influencent aussi la production de végétation qui, à son tour, contrôle l'apparition spatiale et temporelle de pâturages et favorise le nomadisme. Avec la raréfaction des précipitations annuelles, le couvert végétal devient progressivement plus mince et plus clairsemé. Les plantes et les animaux des terres arides répondent par différentes adaptations physiologiques, anatomiques et comportementales aux contraintes d'humidité et de température exercées par les forts écarts diurnes et saisonniers de la température, des précipitations et de la teneur en eau du sol.

Les températures généralement élevées et les faibles précipitations sur les terres arides conduisent à une production médiocre de matières organiques et à une oxydation rapide. La rareté des matières organiques entraîne à son tour une faible agrégation et une stabilité médiocre des agrégats, d'où une forte probabilité d'érosion éolienne et hydraulique. Dans de nombreuses régions d'Afrique, par exemple, l'érosion éolienne et hydraulique est très importante : en excluant les déserts actuels, qui couvrent environ 46 % de la masse continentale, environ 25 % des terres sont menacées par l'érosion hydraulique et 22 % par l'érosion éolienne.

Les croûtes structurelles, formées par l'impact des gouttes de pluie et susceptibles de diminuer les infiltrations, augmentent le ruissellement et génèrent des écoulements superficiels et l'érosion. La gravité, la fréquence et l'étendue de l'érosion peuvent être influencées par les changements dans la hauteur et l'intensité des précipitations et par la modification des vents. (Omm, 2005)

3.3.2. La topographie :

La topographie fait avant tout référence à la pente des terres: la pente accélère l'érosion car elle augmente la vitesse d'écoulement de l'eau. La pente intervient dans les phénomènes d'érosion en fonction de sa forme, de son inclinaison et de sa longueur. (Roose et De Noni, 2004)

En effet, plusieurs études ont montrés que l'énergie cinétique du ruissellement et le pouvoir érosif croissent avec la longueur de la pente. Par ailleurs, des mesures réalisées sous pluies naturelles et simulées à l'échelle du mètre carré montrent que l'érosion diffuse augmente significativement lorsque la pente passe de 2 à 8 %.

3.3.3. La lithologie :

La lithologie joue un rôle important sur le ruissellement, l'infiltration, l'érosion et le transport solide. Les matériaux géologiques se distinguent en formations meubles (sables, argiles, marnes) ou en formations consolidées (grès, calcaires, dolomies, ...) (Toumi, 2013).

Il y a moins d'érosion dans les sols sablonneux parce que l'eau est absorbée facilement en raison de sa perméabilité élevée, par contre en cas de ruissellement ils peuvent être très érodibles. Une forte teneur en matière organique dans le sol améliore la structure granulaire et la capacité de rétention d'eau. Plus la matière organique diminue, plus l'érodibilité du sol augmente.

Les sols dans le pourtour méditerranéen sont pauvres en matière organique à cause de la faible productivité végétale, des températures élevées et du manque d'eau. Ces conditions accélèrent la minéralisation des matières organiques du sol et les rendent fragiles, faiblement structurés et prédisposés au tassement et à la formation de croûtes de battance. En conséquence ces sols sont en général très sensibles à l'érosion (Youssef Al Ali, 2007).

3.3.4. Le couvert végétal :

Un principe simple, plus un sol est couvert, plus ce couvert est dense et permanent et plus ce sol sera protégé du pouvoir érosif des gouttes de pluie et des flux de ruissellement. L'augmentation de la capacité d'infiltration due au complexe «sol-végétation » de sols bien drainés de même qu'une densité de racines élevée contribuent à limiter ces effets. (Dautrebande et al, 2006)

3.3.5. Les facteurs anthropiques :

Au-delà des causes et processus naturels, certaines activités humaines et modes de développement accélèrent le phénomène de l'érosion hydrique. Les milieux méditerranéens sont anthropisés depuis longtemps, dénoncent l'érosion des sols et l'appauvrissement des rivières et des sources imputables.

Les principaux facteurs anthropiques dans le pourtour méditerranéen ont été définis comme étant : (Youssef Al Ali, 2007)

- a. **La déforestation** ; qui favorise le ruissellement et accroît les risques d'inondations et les risques de glissement de terrain. La FAO a établi que le taux moyen de déforestation des 10 dernières années dans le sud et l'est du bassin méditerranéen était de l'ordre de 11 % contre 0,8 % pour la forêt tropicale mondiale
- b. **Le surpâturage** ; qui provoque un tassement du sol, une diminution de sa perméabilité et un accroissement du ruissellement et par conséquent la perte du sol. L'élevage extensif en montagne dans le pourtour méditerranéen s'est traduit par la dégradation des couvertures végétales et des sols, l'encroûtement ou le décapage des horizons humifères, le creusement des rigoles en ravines.
- c. **L'intensification de l'agriculture et de l'utilisation des sols** ; qui entraînent une suppression des éléments structurant le paysage, (retournement des prairies, agrandissement des parcelles...). Ce qui augmente le risque érosif et accélère les taux d'érosion par un facteur allant de 10 à 100.
- d. **L'abandon des terres** ; et en particulier de celles à faible rendement.
- e. **La croissance démographique** ; l'accroissement de l'urbanisation en aval des terres cultivées qui augmentent la vulnérabilité aux phénomènes érosifs.

1. Introduction :

Depuis l'arrivée des Systèmes d'Information Géographiques (SIG) dans les années quatre-vingt, la cartographie a pris une nouvelle dimension. Le SIG permet la centralisation et le partage de l'information, l'analyse complexe, la gestion, la modélisation et la simulation. Il permet également un accès rapide à l'information favorisant le partage d'informations graphiques et alphanumériques. La création de cartes et l'analyse géographique ne sont pas des procédés nouveaux, mais les SIG procurent une plus grande performance et proposent des outils sans cesse innovant dans l'analyse, la compréhension et la résolution des problèmes.

2. Quelques définitions :

2.1.Système d'information géographique SIG :

Est un outil informatique permettant de représenter et d'analyser toutes les choses qui existent sur terre ainsi que tous les événements qui s'y produisent (Esri, 2020).

2.2.Cartographie des risques :

C'est une carte permet d'analyser et interroger les risques dans leurs caractéristiques spatiales. Elle intervient à plusieurs échelles et peut représenter soit la répartition spatiale des aléas, soit celle des enjeux (ce qui est susceptible d'être endommagé), soit celle des vulnérabilités, soit une combinaison des trois facteurs (Esri, 2020).

2.3.Modèle numérique du terrain :

Est une représentation de la topographie (altimétrie et/ou bathymétrie) d'une zone terrestre (ou d'une planète tellurique) sous une forme adaptée à son utilisation par un ordinateur numérique (Esri, 2020).

3. Les différentes méthodes de la cartographie de la susceptibilité :

La télédétection et les systèmes d'information géographique (SIG) sont de plus en plus utilisés pour l'étude des phénomènes de surface et forment des outils essentiels dans les systèmes interactifs d'aide à la décision et opérationnels pour des opérations de gestion du risque (Wachal and Hudak, 2000 ; Shrimalil et al., 2001 ; Lee, 2004 ; Bou Kheir et al., 2006).

Sur le plan méthodologique, trois grands types d'approches peuvent être identifiées pour la cartographie de la susceptibilité : les approches qualitatives-Approches semi-quantitatives et les approches quantitatives.

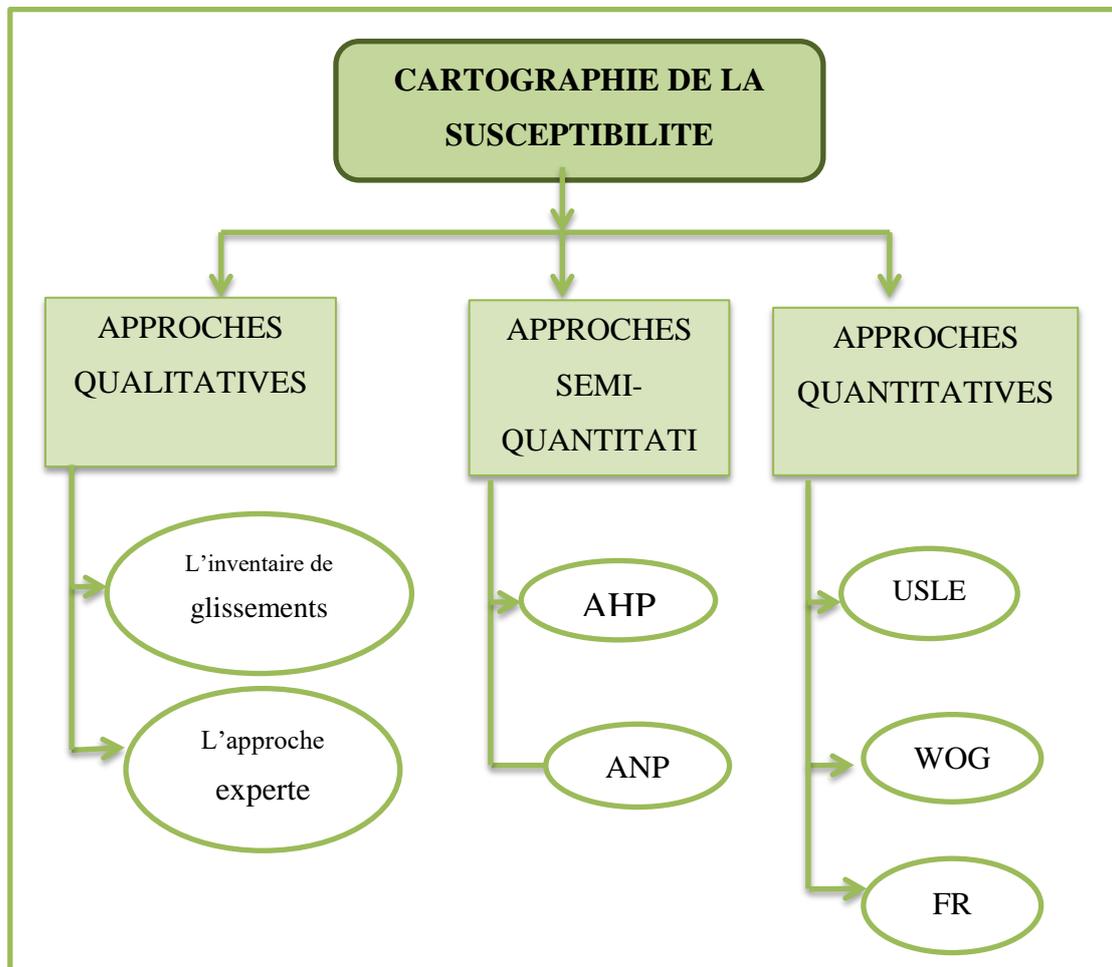


Figure 10: Les différentes méthodes de la cartographie de la susceptibilité.

3.1.Approches qualitatives :

La cartographie d'inventaire, ainsi que les approches expertes (ou heuristiques) font partie des méthodes qualitatives :

3.1.1. L'inventaire des glissements :

Constitue la source d'information de base de toute analyse spatiale, permettant de calibrer et/ou valider les modèles (Guzzetti et al., 1999). Même si ceux-ci ne sont pas directement nécessaires à la construction des modèles (exemple des modèles déterministes), les informations sur la localisation des phénomènes permettent une validation du pouvoir prédictif des résultats (Santacana et al., 2003 ; Beguería, 2006 ; Guzzetti et al., 2006). Les inventaires doivent ainsi faire l'objet d'une attention particulière, et des moyens conséquents doivent être alloués à leur réalisation, dans la mesure où seuls des inventaires de bonne qualité permettront une analyse spatiale robuste (Glade et Crozier, 2005).

A échelle large, les inventaires peuvent contenir des informations très précises sur les caractéristiques des mouvements de versant (type de phénomène, âge, état d'activité, période de retour, etc.) et peuvent ainsi être considérés comme des formes élémentaires de cartes de susceptibilité. A petite échelle, l'inventaire représenté sous forme ponctuelle peut également constituer une première approche de la cartographie de la susceptibilité, informant sur la répartition générale des phénomènes. Ces cartes se contentent de faire un état des lieux de la localisation des mouvements de versant et ne proposent pas d'informations sur la localisation potentielle d'autres phénomènes (Thiery, 2007).

3.1.2. L'approche experte ou Heuristique :

Constitue un second type d'approche qualitative. Dans ce cas, la localisation potentielle de la susceptibilité ou de l'aléa est basée sur la connaissance a priori et l'expérience locale (ou par analogie avec des cas similaires) d'un expert en charge de l'étude.

Les approches expertes sont basées sur l'utilisation de données spatialisées pour la localisation des zones potentiellement instables (pente, géologie, hydrologie, géomorphologie, géotechnique, occupation du sol etc.). Ces données sont acquises au travers de campagnes de terrain, de l'analyse d'images aériennes ou peuvent être

directement disponibles. Dans le cas des approches expertes, la cartographie géomorphologique ou morphodynamique constitue une des bases essentielles de l'évaluation de la susceptibilité ou de l'aléa (Kienholz, 1978 ; Amadesi et Vianello, 1978; Porcher et Guillope, 1979). L'expert pondère ainsi les différents facteurs sur la base de sa propre expérience. La méthode de cartographie peut être directe, l'expert définissant manuellement les limites de différentes zones potentiellement stables ou instables (van Westen, 2000 ; van Westen et al., 2003; Thiery, 2007).

Il peut également avoir recours à des applications sous SIG (systèmes d'analyse hiérarchique ou cartes d'index) permettant d'attribuer un poids à chacun des facteurs de prédisposition représentés par différentes couches thématiques. Celles-ci sont ensuite automatiquement combinées (Stevenson, 1977 ; Saaty, 1980 ; Castellanos Abella et van Westen, 2008 ; Malet et al., 2006). Cependant, l'estimation des poids est fortement dépendante de la personne en charge de l'étude. Les critères d'évaluation ne sont pas nécessairement clairs et identifiables par d'autres, ce qui constitue le problème majeur de ce type d'approche. Le caractère reproductible des cartes expertes est donc limité. Cependant, la subjectivité n'est pas nécessairement mauvaise dans la mesure où elle est basée sur l'opinion d'un expert (van Westen, 2000).

Si ce dernier possède une solide connaissance du terrain et des processus, les cartes peuvent être très précises et applicables, notamment pour des approches préliminaires de la susceptibilité (Glade et Crozier, 2005). Comme précisé précédemment, pour le Plan de Prévention des Risques (PPR), l'approche experte (approche géomorphologique à échelle large, 1/10.000mo) est utilisée pour produire des cartes d'aléa (Mate et Metl, 1999).

3.2.Approches semi-quantitaves :

3.2.1. Méthode du Processus de hiérarchie analytique (AHP) :

La méthode AHP est une méthode semi-quantitative, multi-objectifs et multicritères qui a été utilisée pour la première fois par Saaty en 1980. Cette Méthode est une approche de prise de décision multicritères dans laquelle les décisions sont prises à des échelles spécifiques en sélectionnant les préférences dans un ensemble d'alternatives (Saaty 1980). Il s'agit d'un modèle largement utilisé pour l'analyse de sensibilité, la prise de décision et la planification régionale (Kayastha et al. 2013).

L'application de l'analyse décisionnelle multicritère basée sur le SIG comprend six étapes :

1. La fixation d'un objectif ;
2. La détermination des critères et des contraintes ;
3. La normalisation des critères ;
4. La détermination des coefficients de pondération ;
5. L'agrégation des critères ;
6. La validation de la précision du modèle.

3.2.2. Le processus de réseau analytique (ANP)

Est introduit par Saaty (1996) pour surmonter les limites de la méthode AHP, qui ne considère pas l'indépendance mutuelle entre les critères. En résumé, les étapes de l'ANP sont en dessous :

- a. Construction de la structure du réseau à partir d'un problème et estimation des poids relatifs des critères sur la base de la comparaison par paires.
- b. Création de la supermatrice initiale sur la base des poids acquis à l'étape précédente (y compris; poids des grappes et des nœuds en tenant compte des interrelations entre les critères).
- c. Création de la supermatrix pondérée en multipliant la supermatrix initiale par les poids des grappes.
- d. Enfin, calculer la supermatrice limite en multipliant la supermatrice pondérée, obtenue de l'étape 3, n fois par elle-même. (B. Choubin et al., 2019)

3.3.Approches quantitatives :

Par opposition aux méthodes expertes, les approches quantitatives sont basées sur des critères de pondération "objectifs", théoriquement reproductibles, produisant des résultats identiques avec les mêmes jeux de données. Ces méthodes incluent les approches statistiques, les approches probabilistes, l'intelligence artificielle, les modèles déterministes et les approches temporelles.

Au sein de ces méthodes, les approches probabilistes sont les plus utilisées. Celles-ci analysent les relations statistiques entre la localisation des phénomènes (passés et présents) et un jeu de données spatialisées représentant les facteurs de prédisposition (pente, géologie, occupation du sol, formations superficielles, etc.). Sur la base de cette relation, une densité de phénomènes peut être calculée permettant de dériver des pondérations.

3.3.1. Méthode d'USLE (Universal Soil Loss Equation) :

L'Equation universelle de pertes en sol (Wischmeier et Smith 1978) s'applique à la quantification des pertes en sol par érosion en nappes. C'est une fonction multiplicative des cinq facteurs (Eq.1) qui contrôlent l'érosion hydrique : agressivité climatique, érodibilité des sols, inclinaison et longueur de pente, occupation des sols et pratiques anti-érosives :

$$A = R * K * Ls * C * P \dots \dots \dots \text{Eq.1}$$

Où :

- **A** est le taux annuel de perte en sol en t/ha/an,
- **R** est le facteur de l'érosivité des pluies ; il correspond à la moyenne annuelle des sommes des produits de l'énergie cinétique de la pluie par son intensité en 30 mn consécutives ; il est exprimé en MJ . mm / ha . H . an,
- **K** est l'érodibilité des sols ; il dépend de la granularité, de la quantité de matière organique de la perméabilité et de la structure du sol ; il est exprimé en t . ha . H / ha . MJ . mm,
- **LS** est un facteur sans dimension qui représente l'inclinaison (S en %) et la longueur de pente (L en m),
- **C**, est un facteur sans dimension qui représente l'effet de la couverture

végétale,

- **P**, facteur sans dimension, est un rapport qui tient compte des techniques culturales anti-érosives telles que le labour en courbes de niveau. (Sadik.A et al., 2004)

3.3.2. Méthode de Weight of Evidence (WoE):

WoE est une technique quantitative a été appliqué pour l'estimation spatiale du risque d'érosion des ravines (Dube et al. ; 2014), la cartographie de la vulnérabilité aux inondations (Tehrany et al., 2015; Rahmati et al., 2016), la cartographie des zones sujettes aux glissements de terrain (Regmi et al. ; 2013; Mohammady et al. ;2012 ; Pourghasemi et al., 2013a) et cartographie du potentiel des eaux souterraines . Ainsi, l'application du modèle WoE pour prédire le risque environnemental spatial a été largement adoptée dans la recherche. Parmi les approches statistiques bivariées, WoE implique la forme log-linéaire de la méthode de probabilité bayésienne pour décrire la signification relative des paramètres de conditionnement par des moyens statistiques (Ozdemir et Altural , 2013).

Dans ce modèle, les poids positifs (W^+) et négatifs (W^-) doivent être calculés pour chaque facteur de conditionnement en fonction des preuves des correctifs affectés par l'érosion. Ce modèle a énuméré le poids de chaque facteur de conditionnement de l'érosion du sol (X), c'est-à-dire les paramètres géo-environnementaux et morphométriques, sur la base de l'absence ou de la présence de l'érosion du sol (Y) dans la région. Les poids sont calculés selon l'équation ci-dessous (Bonham-Carter, 1994):

$$W^+ = \text{Ln} \left(\frac{P\left(\frac{X}{Y}\right)}{P\left(\frac{X}{\bar{Y}}\right)} \right) \dots\dots \text{Eq.2}$$

3.3.3. Méthode du rapport de fréquence (FR) :

Le rapport de fréquence (FR) est une approche statistique qui a été appliquée pour évaluer la sensibilité aux phénomènes de terrain. Le principe principal de cette méthode repose sur l'évaluation de la relation spatiale observée entre le phénomène et un ensemble de facteurs de conditionnement de ce dernier.

La FR est effectuée sur la base des valeurs de rapport de fréquence qui sont un rapport de la probabilité de présence et d'absence d'occurrences du phénomène pour chaque classe de facteurs de conditionnement de ce phénomène. Une valeur FR plus élevée indique une relation spatiale observée plus forte entre l'occurrence du phénomène et le facteur de conditionnement. (Rahmati et al. ; 2016)

Les valeurs FR sont calculées en appliquant l'équation suivante :

$$FR = \frac{A/B}{C/D} = \frac{E}{F} \dots \dots \dots \text{ Eq.3}$$

Où :

- **A** est le nombre de pixels touchés par l'érosion hydrique dans chaque classe,
- **B** est le nombre total de pixels touchés par l'érosion hydrique dans la zone entière,
- **C** est le nombre de pixels de chaque classe dans le facteur de conditionnement choisi,
- **D** est le nombre de pixels de la zone d'étude,
- **E** est le pourcentage d'occurrences de l'érosion hydrique dans chaque classe de facteur de conditionnement,
- **F** est le pourcentage relatif de la superficie de chaque classe.

4. Conclusion :

Nous avons consacré ce chapitre à donner les règles de l'art ainsi qu'une connaissance générale sur le phénomène étudié (érosion hydrique) afin de faciliter la compréhension de ses processus, ses différents types ainsi que ses facteurs provoquants. Ensuite, Une présentation détaillée sur la cartographie et ses différentes méthodes a été faite dans la deuxième partie. Le rôle du SIG dans l'évaluation et la cartographie de la susceptibilité à l'érosion a été aussi discuté.

Chapitre II :
Description générale de la région d'étude

1. Introduction :

Dans le présent chapitre, nous allons identifier les caractéristiques de la région d'étude ou notre travail s'est déroulé. Il s'agit d'une zone importante dans le bassin versant du K'sob. Ce dernier est localisé dans la wilaya de Bordj-Bou-Argeridj (BBA), NE Algérie. (Fig.11)

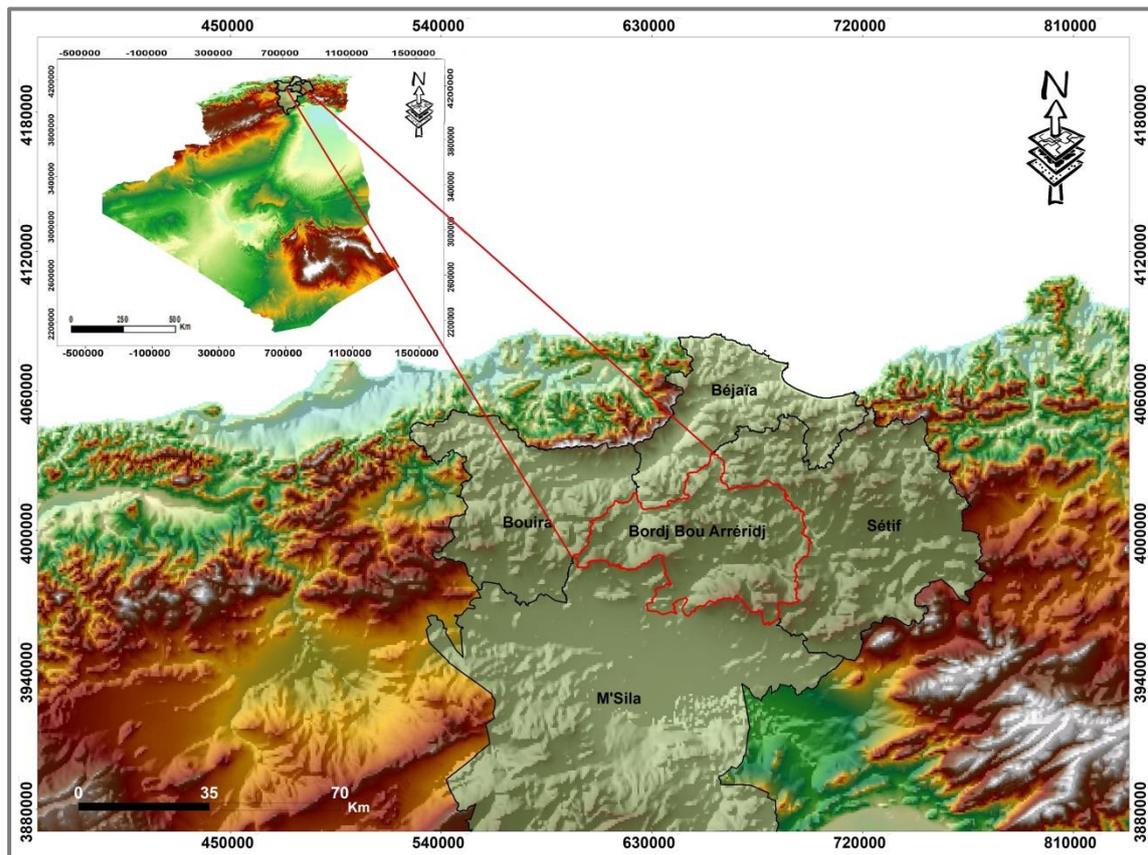


Figure 11: Carte montrant la localisation de la wilaya de Bordj-Bou-Argeridj.

2. Aperçu sur la géologie du Nord de l'Algérie :

Le Nord de l'Algérie est composé de divers domaines géologiques et structuraux, faisant partie de la chaîne alpine des Maghrébides (Fig.12), qui s'étend de Gibraltar à la Calabre (Wildi, 1983). D'après (Durand- Delga, 1955 et Vila, 1980) ; ce dernier est constitué de plusieurs domaines du Nord au Sud, on distingue les domaines suivants :

- Domaine internes ;
- Domaine des flyschs ;
- Domaines externes.

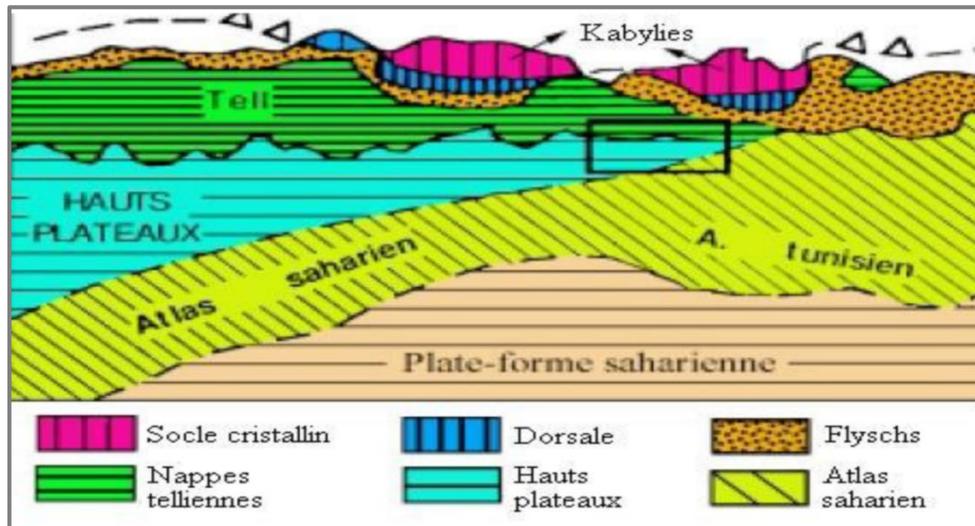


Figure 12: Les différentes unités géologiques des Maghrébides (d'après Domzig, 2006).

Nous intéresserons dans notre étude au domaine tellien et l'avant pays allochtone qui fait partie du domaine externe.

2.1. Domaine interne :

Regroupe les massifs littoraux à matériel paléozoïque et antécambrien dont les formations :

- Le socle cristallophyllien, Kabyle ou Kabylie : un massif métamorphique (gneiss, marbres, amphibolites, micaschistes et schistes).
- La dorsale Kabyle « chaîne calcaire » : c'est la bordure sud du socle d'unités mésozoïques et cénozoïques. On la reconnait par sa forme d'écailles, qui comprennent des calcaires du Lias et de l'Eocène. La dorsale est divisée en, dorsale interne, médiane et externe (Bouillin, 1986).

2.2. Domaine des flyschs:

C'est un domaine paléogéographique qui a reçu une sédimentation essentiellement argilo-gréseuse depuis le Crétacé jusqu'au Paléocène. Ce domaine occupe une position allochtone. Il est classiquement subdivisé en trois types (Vila, 1980) (Fig.13) :

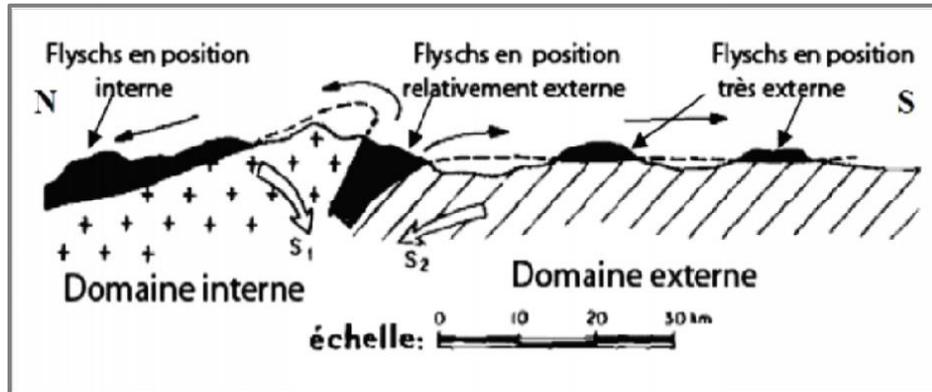


Figure 13: Position des nappes de flyschs par rapport aux unités de la chaîne des Maghrébides.

a. Les flysch mauritaniens :

Ils sont placés dans les zones internes de domaine des flyschs, faciès de Crétacé inférieur et supérieur présentent des alternances d'argile, calcaire et grès et se termine par des niveaux conglomératiques du Paléocène.

b. Les flyschs massyliennes :

Ils existent dans les zones externes de domaine des flyschs, ils sont des formations allant du Crétacé inférieur (Néocomien) au Lutétien.

c. Le flysch Numidien :

Il constitue une nappe indépendante d'âge Oligocène supérieur à Miocène inférieur. C'est une nappe qui présente des formations gréseuses et des argilites versicolores.

2.3. Domaine externes :

En Algérie orientale, il est représenté par les séries telliennes, les séries de l'avant pays allochtone (Villa, 1980) et les séries de l'avant pays atlastique (Fig.14).

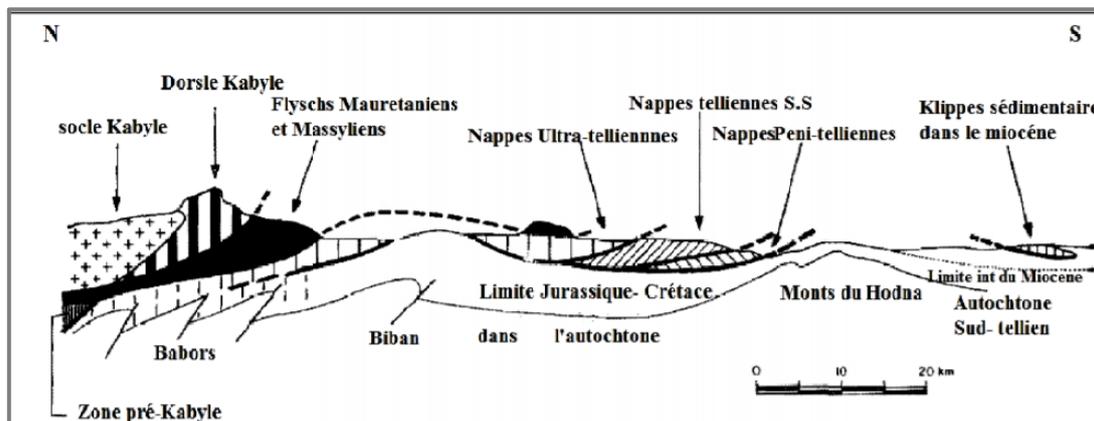


Figure 14: Rapports structuraux entre les différentes unités de la chaîne des Maghrébides (d'après Durand-Delga, 1955).

a. Les séries Telliennes :

Il se caractérise par des sédiments marneux et marno-calcaire à épaisseur importante, d'âge jurassique à Eocène, constituant les terrains des édifices des nappes telliennes. D'après Durand Delga, (1955) et Vila (1980), le domaine Tellien est divisé en trois séries, que sont du Nord vers le Sud :

- Séries Ultra-telliennes
- Série Tellienne sensu stricto (au sens strict)
- Séries Péni-telliennes et les unités méridionales à Nummulites.

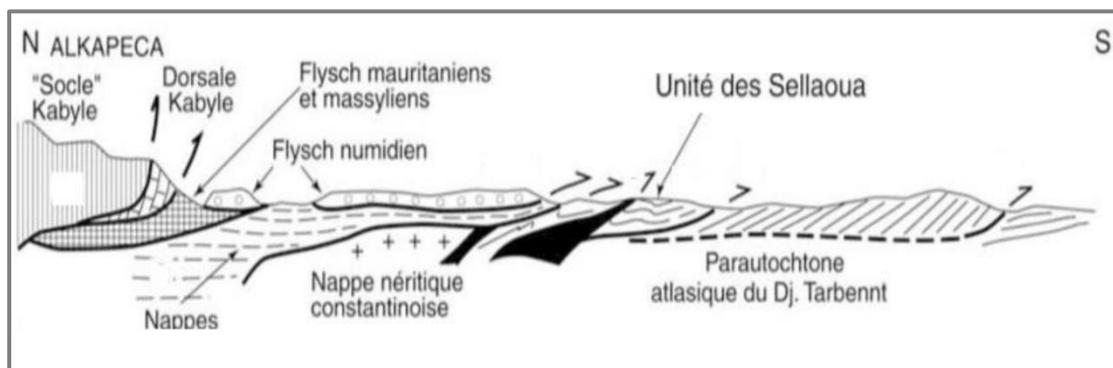


Figure 15: Coupe générale synthétique des Maghrébides de l'Est algérien

b. L'avant- pays allochtone :

Il présente plusieurs types de séries différenciées, allant du trias supérieur au crétacé et à l'éocène. Ces séries localement écaillées qui supportent les nappes telliennes au Nord et qui surmontent l'autochtone Nord Aurésien. On distingue deux familles :

- L'organisation Sétifienne ;
- L'organisation constantinoise.

c. L'avant pays Autochtones :

L'avant pays autochtone Il constitue les monts du Hodna, il forme des ensembles montagneux modérément plissés, à l'Eocène terminal, et la frange septentrional de ces derniers présentent une série de phénomènes Alpains importants (écaillage, renversement des séries) qui permettent de définir des séries parautochtones, déterminant « le front Sud-setifien de l'édifice Alpin ».

1. Introduction :

La connaissance des caractères topo-physiographiques d'un bassin versant est une étape indispensable à toute étude relative à l'environnement (Benchettouh, 2012).

2. Région d'étude :

2.1. Situation géographique du bassin versant du K'sob :

Le bassin versant du K'sob est l'un des sous bassins du HODNA (Fig-16) localisé dans sa partie Nord, il est limité au Nord-Ouest par la chaîne montagneuse des Bibans ; au Sud et au Sud-ouest par les monts du Hodna et à l'Est par les hautes plaines de Sétif. Il se situe aussi entre les méridiens de longitudes $5^{\circ}6'$ et $4^{\circ}34'$ Est et les parallèles de latitude $35^{\circ}33'$ et $36^{\circ}18'$ Nord.

Il s'étend sur la totalité de la wilaya de Bordj Bou Arreridj dont son exutoire est à la limite Nord de la wilaya de M'sila.

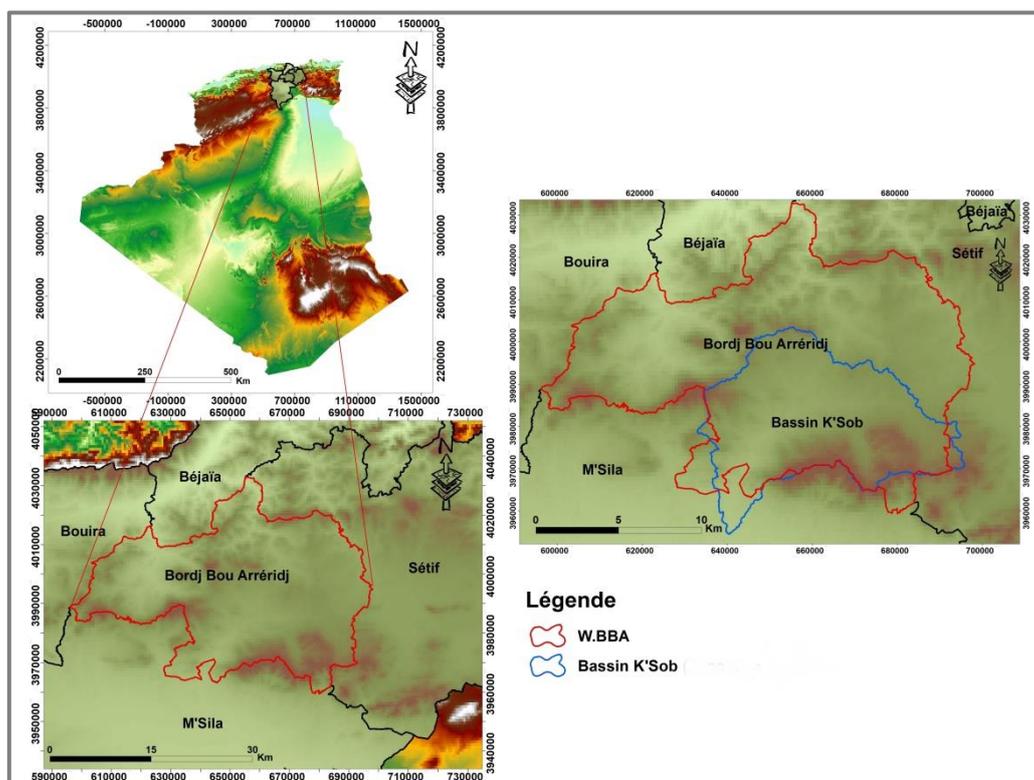


Figure 16: Situation du bassin versant du K'sob.

2.2. Caractéristiques du bassin :

2.2.1. Géologie de bassin versant du K'sob :

La géologie des terrains influe non seulement sur l'écoulement de l'eau souterraine, mais également sur le ruissellement des surfaces. Dans ce dernier cas, l'étude géologique d'un bassin versant dans le cadre d'un projet hydrologique a surtout pour objet de déterminer la perméabilité des formations lithologiques. Celle-ci intervient sur la vitesse de montée des crues, sur leur volume. Les caractères géologiques principaux à considérer sont la lithologie et la structure tectonique.

Généralement, le Djebel Maadid peut être considéré comme un large anticlinal à cœur Aptien et dont les flancs sont formés par des enchainements de plus en plus récentes du Crétacé moyen et supérieur. Une sédimentation recouvre tous les étages du crétacé représentés au Maadid est continue ; la première discordance apparaît après le Sénonien dont les couches terminales ont été érodées par un Éocène transgressif La formation de poudingues dès Lutétien précède l'émersion généralisée du massif du Maadid ou le nummulitique supérieur est entièrement continental. La mer ne reviendra qu'au Burdigalien, qui est transgressif et légèrement discordant sur les terrains éocènes.

Les auréoles externes du massif se constituent par des couches géologiques proprement dit se superposent du Sud au Nord en de puissantes assises dont les plus anciennes arrivent aux arêtes culminantes.

Ces assises, coupés de vive force par la vallée de l'Oued K'sob, donnent une succession de seuils rocheux, séparant des terrains plus tendres, argiles ou marnes. (Bourahla, 2016)

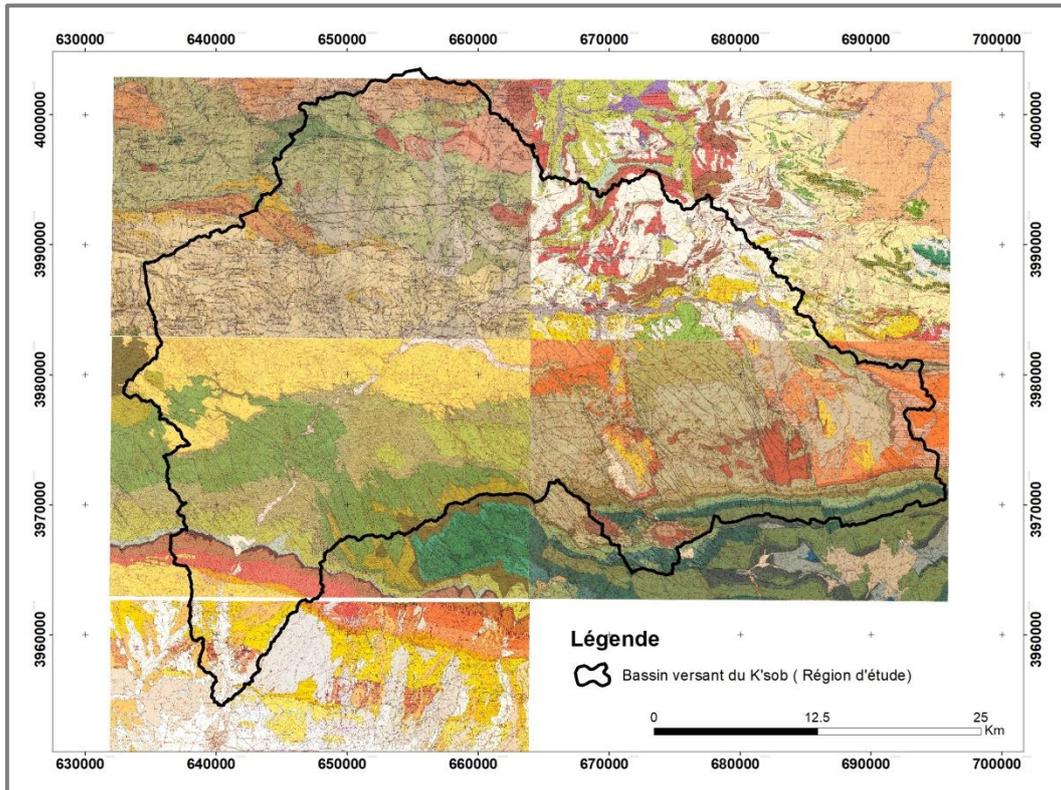


Figure 17: Couverture en carte géologique (en 1/50000) de la région d'étude.

2.2.1.1. Lithologie de bassin versant du K'sob :

La lithologie d'un bassin versant joue un rôle important dans le ruissellement, l'infiltration, l'érosion et le transport solide. Le bassin versant du K'sob et ses affluents, comprend la grande dépression de la Medjana au Nord de Bordj Bou Arreridj et la bordure Nord du massif du Maâdid (cuvettes de Bordj Ghdid et de Ras El Oued).

Sa lithologie est constituée des formations suivantes :

- a. **Quaternaire (qt)** : il est représenté, en général, par des alluvions plus anciennes, dans les bassins de Ras El Oued et de Bordj Ghdid couronnant des éminences tabulaires.
- b. **Miocène inférieur (mi)** : il occupe une grande surface dans le bassin versant du K'sob ; de larges bandes dans le Nord et quelques points isolés, près du Gourine. Dans le Nord, cet étage est nettement transgressif sur le crétacé (du Mæstrichtien au Cénomanién). La base du miocène (Burdigalien) est

représentée sur la majorité du bassin versant par des microbrèches et des conglomérats calcaires. Son épaisseur est de 200 m environ et il occupe le Nord des dépressions de M'Krazen.

- c. Eocène moyen et inférieur (Em, Ei) :** dans la région de Ras El Oued se trouve une série puissante d'environ 200 m composée de calcaire gris dolomitique et dolomies ; des organogènes et des marnes grises, verdâtres ou brunâtres, parfois légèrement gypsifères.
- d. Crétacé supérieur, moyen et inférieur (Cs, Cm, Ci) :** formant plusieurs escarpements sur le bassin versant et le flanc occidental de Maadid, ils affleurent en quelques points isolés dans le centre (gorge du K'sob) et le Nord-Ouest (Kef El Assal, BirMizane). Ils sont représentés par des calcaires gris, sublithographiques ou un peu spathiques et des dolomies cristallines, claires, en bancs bien réglés (épaisseur de 50 cm Jusqu'à 2 m).
- La partie supérieure présente en grande partie le même faciès que la partie inférieure, vers le sommet, on rencontre fréquemment des calcaires ocreux ou faunes à niveau glauconieux Pétris de fragments d'huitres.
 - La partie moyenne est particulièrement marneuse avec intercalations de calcaires- grès compacts.
 - La partie inférieure est constituée en une série de calcaire et de grès. Ces terrains occupent approximativement 25% du bassin versant toujours au Sud du bassin et particulièrement dans les monts du Hodna, on rencontre des calcaires durs de 'Albien Contenant une riche faune à ammonites ; ainsi que des marnes du campanien grisâtes ou blanchâtres avec de nombreuses intercalations de marne-calcaire et de calcaires marneux.
- e. Jurassiques supérieurs (Js) :** Puissante série homogène d'épaisseur totale : 400 à 500 m comprenant des calcaires compacts, à grains très fins, en bancs peu épais, bien stratifiés, de couleur beige ou gris claire à gris foncé et de minces intercalations marneuses.
- f. Alluvions du Quaternaire (AQ) :** On rencontre ce type de terrains dans la dépression de Medjana, dans les cuvettes de Ras-El-Oued et Bordj Ghdir. Ces terrains sont constitués de cailloutis, de sables calcaires et parfois de vases sur

les bords des Oueds et particulièrement sur l'Oued K'sob et l'Oued El-Amri. Les derniers dépôts se composent de graviers et de sables à éléments locaux. Ces terrains s'étendent sur de grandes surfaces et occupent ainsi 35% du bassin versant.

2.2.1.2. Structure tectonique :

a. Les failles :

En Particulière, les failles sont orientées en Nord-Ouest et Sud-est et les grands accidents Tectoniques sont orientées Est-Ouest. Les terrains créacés surtout sont découpés par de nombreuses failles ayant toutes le caractère de faille normale, ces failles peuvent être formées en deux phases consécutives :

- La première qui est pré Miocène, appartiennent les failles Ouest-Est observées dans les monts de Maadid. Les nombreuses failles de direction Nord-Ouest, Sud-est, datent d'un stade antérieur.
- A un certain point (environ de Medjez), ces dernières failles, curieusement très rapprochées, sont accompagnées par d'autres de direction plutôt Est-Ouest.

b. Les plis :

Généralement, il existe deux types des unités structurales importants :

- La première comprend les anticlinaux du Maadid et de Medjez-Dréât. Elle fait partie de la rangée d'anticlinaux du Nord du Chott El Honda.
- La deuxième est formée dans le Nord, principalement le Nord-Ouest, des plateaux Miocènes, qui forment une faible courbure au-dessus de l'anticlinal de Dréât.

Au Sud du Djebel Maadid, les couches créacées et paléogènes se montrent dans un vaste anticlinal dissymétrique. Les pendages sur le flanc Sud varient de la verticalité au léger déversement tandis qu'ils sont plus faibles sur le revers Nord. Cet anticlinal se termine à l'Est de l'Oued K'sob. Vers l'Ouest il est relayé par l'anticlinal de Dréât, plus faiblement bombé, commençant dans les environs de Medjez. Les couches les plus inférieures appartiennent au Cénomaniens, visible sous le Kef el Assel, dans le Nord-Ouest. A l'Ouest de Medjez seul le flanc Sud de cet anticlinal se

montre au-dessous du Burdigalien transgressif.

2.2.2. Pédologie :

D'après les études cartographiques (agro pédologique) réalisées par la direction des services agricoles de Bordj Bou Arreridj plusieurs profils existent dans la wilaya. En effet, les sols de la région sont définis comme étant des unités homogènes dans leur genèse, leurs constituants et leurs propriétés. La région d'étude se caractérise par une topographie assez variée.

En effet, sur les plateaux et collines à différents faciès lithologiques tous calcaires, cette région offre une diversité de sols plus ou moins grande. Sur les pentes et vallées il y a formation des sols peu évolués (d'apport et d'érosion). Dans les autres parties, les sols sont généralement développés sur des matériaux ayant déjà subi une altération et une évolution pédogénétique (sols calcimagnésiques, sols iso-humique). (DSA)

2.2.3. Couverture végétale :

La couverture végétale d'un bassin versant est un facteur important de l'écoulement et de l'érosion hydrique ; son action complexe et contradictoire s'exerce aussi bien sur les paramètres climatiques notamment l'évaporation, que sur les bilans hydriques des sols :

2.2.3.1. Répartition de la couverture végétale du bassin versant du K'sob :

La répartition du couvert végétal et la part de chaque type de couvert dans le bassin versant dépend des caractéristiques physico-géologiques et des caractéristiques climatiques qui en découlent.

Le bassin versant d'oued K'sob, présente une couverture végétale forestière (pins d'Alep) plus importante : 25% de la surface totale de bassin. Cette prédominance s'explique par la présence de reliefs montagneux importants (Djebel Maadid), qui s'accaparent une proportion importante de la surface de bassin versant, et par la réalisation de plusieurs programmes de reboisement sur ces reliefs qui entrent dans le cadre, soit de la défense et de la restauration des sols, soit de la protection du périmètre du barrage du K'sob.

Les terres de culture représentent 55%, et s'étendent essentiellement sur les plaines de Ras el Oued, Bordj Ghdir, Bordj Bou Arreridj.

Les surfaces mal protégées ou nues ne représentent que 20%, car les terrains de parcours sont très limités et les conditions pédoclimatiques (pente et épaisseur des sols, précipitations et températures) sont encore favorables aux pratiques de la céréaliculture traditionnelle.

2.2.3.2. Classification de la végétation :

Plusieurs classifications plus ou moins complexes ont été proposées, mais la classification des types de couverture végétale par ordre de densité est plus apte à montrer l'impact du couvert végétal sur les conditions d'écoulement à notre contexte. Nous reprendrons les grandes catégories de type de couverture végétale distinguées :

- a. **Les surfaces bien protégées** : Ce sont les surfaces qui bénéficient d'une couverture végétale plus ou moins dense et permanente et plus spécialement les forêts. Ces dernières protègent contre l'érosion et la concentration rapide des eaux.
- b. **Les surfaces incomplètement protégées** : Ce sont les surfaces partiellement nues en permanence, et les surfaces saisonnièrement protégées. Il s'agit généralement des terres de culture destinées soit à la céréaliculture qui protège le sol une période seulement de l'année, soit à l'arboriculture qui recouvre mal le sol du fait de l'espacement des arbres. La pratique de la jachère nue qui est malheureusement encore courante est très dommageable puisque les terres sont laissées au repos une année sur deux sans aucune protection. Ces surfaces ont un rôle hydrologique important et différencié selon le type de spéculation, selon le stade végétatif, selon l'état du sol au moment des pluies et selon les pratiques culturales. Sur les parties nues du bassin versant, notamment en saison de préparation du sol, les averses peuvent engendrer un ruissellement important qui peut déclencher des actions érosives et des crues inondations.
- c. **Les surfaces mal protégées ou nues** : Elles englobent les terrains dénudés, les terrains de parcours, arbustes, taillis et broussailles à faible densité de recouvrement. Sur les terrains dénudés, la circulation de l'eau dépend

directement du caractère des formations lithologiques : infiltration dans le cas des formations perméables, et ruissellement dans le cas formations imperméables. Cette phase est très courte puisque les processus s'estompent dès la fin de l'averse et le terrain retrouve son état initial.

- d. Les terrains de parcours bien traités :** Sur les terrains de parcours bien traités, humus et la végétation protègent la surface du sol contre l'énergie des gouttes de pluie et facilitent l'infiltration. Mais si la steppe est fortement pâturée (surcharge pastorale) il en résulte une dégradation de la couverture herbacée, un tassement du sol, un faible taux d'infiltration et un accroissement du ruissellement superficiel qui engendrent par conséquent une érosion hydrique intense et un régime d'écoulement très irrégulier.

2.3.Caractéristiques morpho-métriques du bassin :

2.3.1. Caractéristiques de forme :

a. Superficie du bassin versant :

C'est le paramètre le plus important du bassin parce qu'il permet de contrôler l'intensité de plusieurs phénomènes hydrologiques tels que le débit, le volume des précipitations ou d'infiltration. La surface (S) exprimée en km², peut être déterminée par planimétrie sur une carte topographique après que l'on y ait tracé les limites topographiques ou par les techniques de digitalisation (les logiciels : ArcGIS – Covadis).

-la surface du bassin versant du K'sob, est : $A= 1569,71\text{km}^2$

b. Périmètre du bassin versant :

Il correspond à la longueur de la limite extérieure du bassin, il peut être mesuré à l'aide d'un curvimètre ou par digitalisation en utilisant des logiciels cités précédemment. L'intérêt essentiel du périmètre est de pouvoir calculer l'indice de compacité et la longueur du rectangle équivalent.

-Le périmètre du B.V du K'sob est : $P= 241,71\text{Km}$.

2.4.Caractéristiques climatiques :

2.4.1. Le climat :

La wilaya de Bordj Bou Arreridj se caractérise par un climat continental, qui offre des températures chaudes en été et très froides en hiver, parmi les plus basses d'Algérie. La pluviométrie annuelle est de 300 à 700 mm.

2.4.1.1.Pluviométrie :

La précipitation est un élément fondamental en écologie. Le volume annuel des pluies conditionne la distribution des espèces dans les aires biogéographiques (Ramade, 1984). Les données pluviométriques qui caractérisent la région d'étude proviennent du site INFOclimat.fr pour la période allant de 1982 jusqu'à 2018.

Ces données sont regroupées dans le tableau n° 03 et le graphe ci-dessous ;

Tableau 2:Précipitations annuelles (P mm) de la région de Bordj-Bou-Arreidj (Période 1982-2018).

ANNEE	1982	1985	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2018
Précipitations Annuelles (mm)	799.4	588.9	642.6	540.3	234.8	332	369	358	336.9

(Source : INFOclimat.fr, 2020)

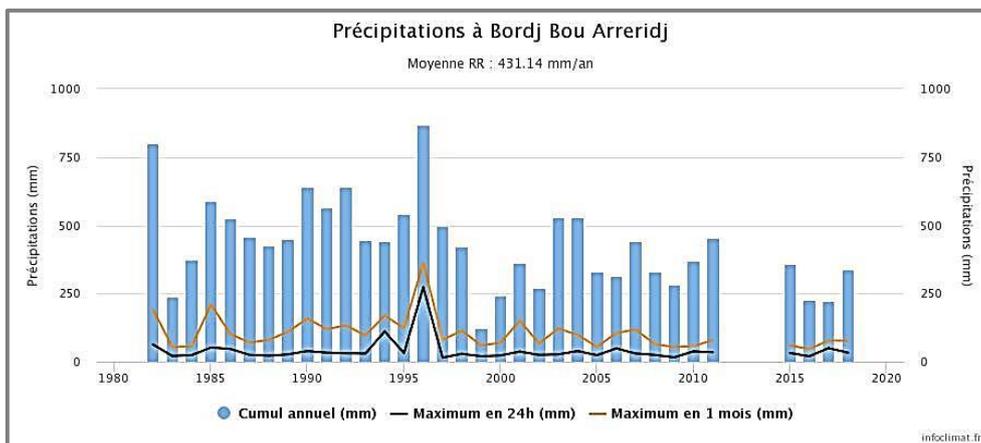


Figure 18:Précipitations de la Wilaya de Bordj Bou Arreridj 1982-2018 (INFOclimat.FR, 2020).

Le bassin du K'sob bénéficie d'un climat tempéré chaud. En hiver, les pluies sont bien plus importantes qu'elles ne le sont en été. La précipitation moyenne annuelle est de 466mm.

2.4.1.2. La température :

La température représente un facteur limitant de première importance car elle conditionne la répartition de la totalité des espèces végétales et des communautés d'êtres vivants dans la biosphère (Ramade, 1994).

D'une manière générale, le climat de la région est de type semi-aride caractérisé par un été sec et chaud et un hiver froid. Les températures de la région sont traitées à partir du site INFOclimat.fr pour une période d'observation allant de 1980 à 2018. Les données de ce site figurent dans le tableau suivant :

Tableau 3: Températures annuelles de la région de Bordj-Bou-Argeridj (Période 1982-2018).

ANNEE	1980	1985	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2018
T.MAX EXTREM (°C)	40	39.8	37.4	38.6	40	41.9	41.6	41	42.2
T.MAX MOYENNE (°C)	15.8	20.8	20.5	20.7	21.9	21.7	22.5	23.1	22.5
T.MIN MOYENNE (°C)	8.1	9.6	10.3	10	11.3	9.9	9.9	9.8	10.1
T.MIN EXTREM (°C)	-5	-6	-3.5	-3	-1.4	-7	-3.1	-3.5	-2.5

(Source : INFOclimat.fr, 2020)

La température moyenne annuelle est égale à 15.16 °C. Les mois les plus chauds sont les mois d'été, soit juin ; juillet ; août et septembre durant lesquelles les températures moyennes dépassent les 20°C. La saison froide pendant laquelle les températures sont inférieures à 10°C se prolonge de décembre à février.

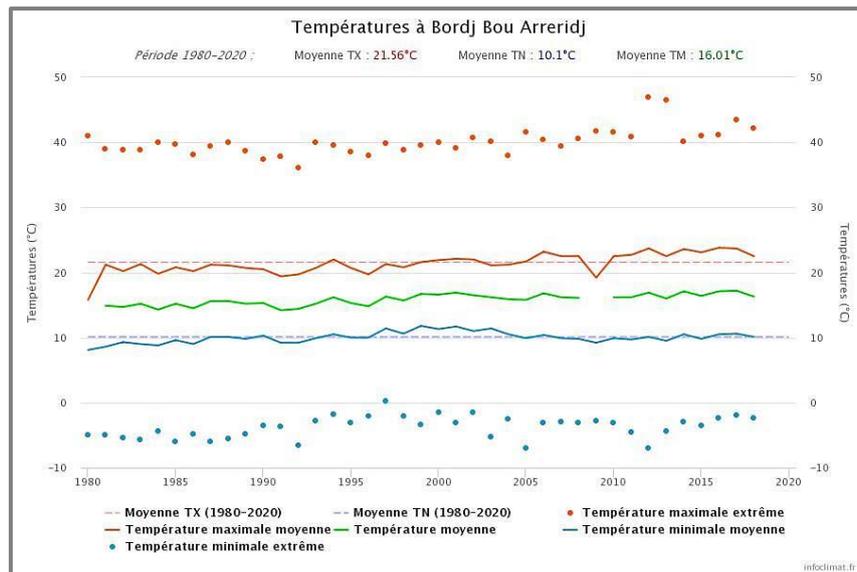


Figure 19: Températures annuelles de la région de Bordj-Bou-Arreridj (INFOclimat.fr, 2020).

3. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous présentons la géologie, la morphologie, le climat, la lithologie et la topographie de la zone d'étude. Une compréhension approfondie de ceux-ci nous permet de comprendre les facteurs qui influencent l'apparition du phénomène étudié.

Chapitre III :
**Utilisation du SIG pour la construction de
la base de données**

1. Introduction :

La région d'étude est une zone favorable à l'érosion hydrique. Le déclenchement de ce phénomène est principalement le résultat de divers facteurs : morphologie, géologie, lithologie et activités humaines. Notre zone d'étude est située dans cette région.

2. Zone d'étude :

Notre zone d'étude contient les communes suivantes : Medjana-Hasnaoua-Bordj Bou Arreridj-El Anseur- Sidi Embarek. Elle est située dans la région des Hauts-Plateaux, entre les monts des Bibans au nord et la chaîne du Hodna au sud, dans un bassin agricole situé entre 800 m et 1000 m d'altitude moyenne. (Fig.20)

La zone s'étend sur une superficie de 270km² et a un périmètre de 98 Km.

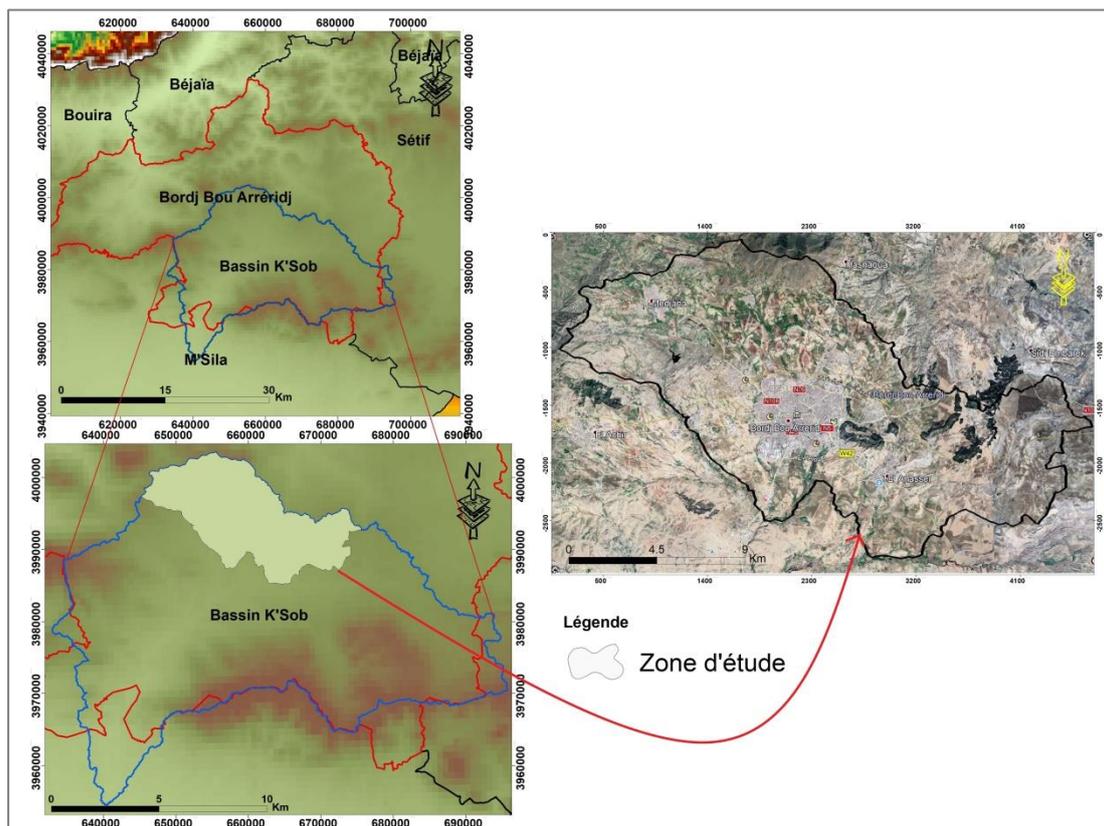


Figure 20: Carte de localisation de la zone d'étude.

Dans la présente analyse de susceptibilité, la base de données comprend une carte d'inventaire des formes d'érosion qui se sont produits dans la zone d'étude et un ensemble de facteurs prédisposant à l'érosion hydrique.

2.1.Construction de la carte d'inventaire :

Cette carte joue un rôle important pour étudier la relation entre la variable dépendante et les variables explicatives indépendantes. Il est essentiel d'obtenir une bonne base de données géographique sur l'érosion hydrique ancienne et actuelle. Elle est considérée comme l'étape de base pour cartographier la sensibilité à l'érosion. La carte d'inventaire de l'érosion montre les emplacements, les caractéristiques et les contours de ce dernier. (Achour et all ; 2018).

La représentation cartographique des données géographiques nécessite l'utilisation du Système d'Information Géographique (SIG), comme son nom l'indique, est un outil informatisé dédié à la gestion de l'information géographique. Ce type de système permet d'apporter à chacun l'information dont il a besoin pour décider et agir au mieux dans de meilleurs délais. C'est un outil de représentation d'une réalité, de Mise en place d'un système d'information géographique, compréhension des phénomènes et des conditions dans lesquelles ils se réalisent, de simulation d'alternatives et de leurs effets.

La carte d'inventaire des formes d'érosion hydrique (Fig.22) a été préparée à l'aide des enquêtes sur le terrain (Fig.20) en utilisant le système de positionnement global : (GPS : **Topcon GR5(FC500), Leica CS10 Trimbl R10**). En parallèle, un travail complémentaire sur bureau a été réalisé pour localiser les formes d'érosion sur les images satellitaires pour les pouvoir identifier sur terrain. Pour cela, les images de Google Earth et SASplanet sont utilisées.



Figure 21:Enquêtes sur terrain

Ensuite, un travail du bureau a été fait ; l'érosion localisée est transféré dans un environnement SIG (ArcGIS) sous la forme de fichier Shapefile (Fig. 22).

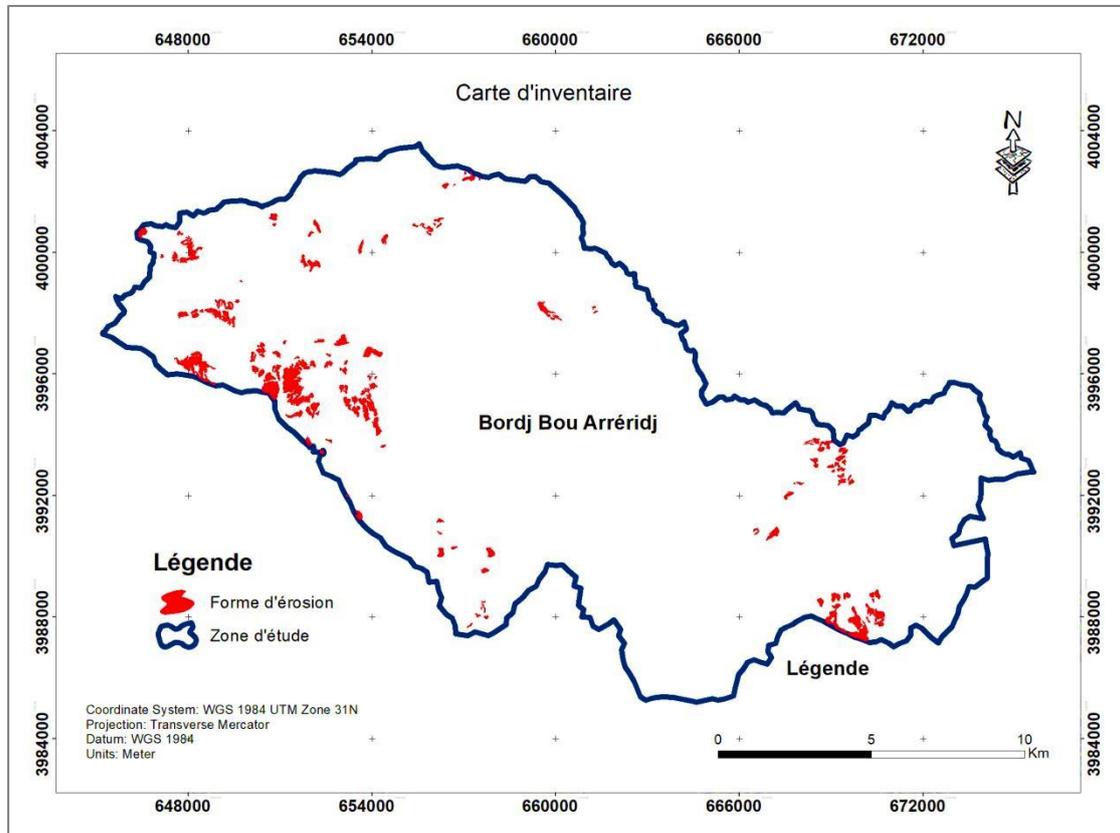


Figure 22: Carte d'inventaire de l'érosion dans la zone d'étude.

2.2. Les facteurs de prédisposition à l'occurrence de l'érosion hydrique :

L'évaluation des risques d'érosion des sols du bassin versant a nécessité la cartographie et l'analyse des nombreux facteurs intervenant dans le processus érosif : La lithologie, L'altitude, L'exposition des versants, La pente, la proximité aux routes, au réseau hydrographique et aux failles. Chaque facteur présente un comportement différent d'une zone à l'autre de la zone d'étude.

La lithologie et la proximité aux failles ont été déterminées à partir des cartes géologiques à l'échelle 1/50000. En utilisant le DEM, plusieurs facteurs tels que le degré de pente, l'aspect de la pente, la distance des rivières. Une brève description de chaque facteur est donnée dans ce qui suit :

2.2.1. La lithologie :

Le facteur lithologique est connu comme une variable importante dans l'analyse des risques naturels (Pourghasemi et Kerle 2016). Les propriétés lithologiques sont associées aux caractéristiques géomorphologiques et à l'évaluation d'une terre (Dai et al. 2001; Zinck et al. 2001; Gorum et al. 2008; Zhu et al. 2014).

De plus, l'érosion des ravins est particulièrement dépendante des propriétés lithologiques du matériau exposé ou près de la surface de la terre (Casali et al.1999; Stotle et al.2003; Agnesi et al.2011; Conforti et al.2010; El Maaoui et al. 2012; Golestani et al.2014 ; Rahmati, 2016).

La couche lithologique de la zone d'étude a été concoctée par numérisation des cartes géologiques ; Bordj Bou Arreridj et Ain Taghrout; à l'échelle 1/50 000 (Institut Géographique national, Algérie). La région contient diverses formations géologiques que l'on a classées en 6 classes (Tableau.4). La distribution spatiale des unités de lithologie dans la zone d'étude est illustrée à la figure 23.

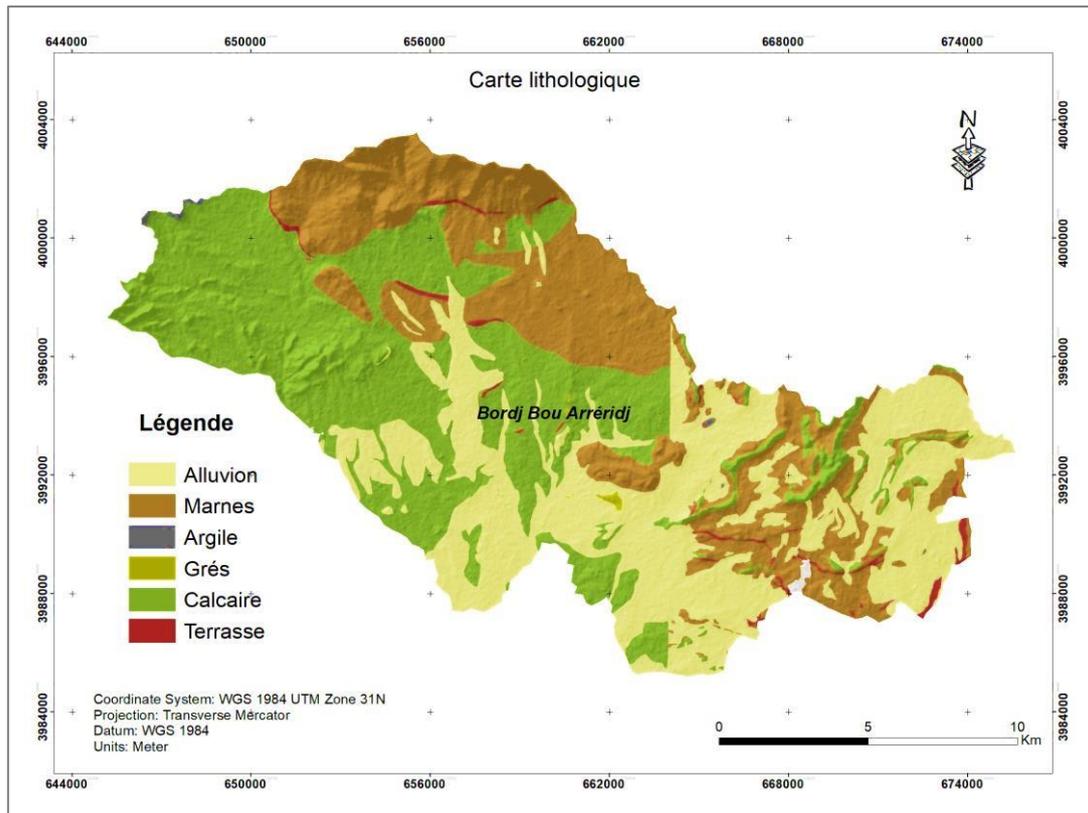


Figure 23: Carte lithologique de la zone d'étude.

Tableau 4: Lithologie de la zone d'étude.

La classe	Le code	La formation
1	$\partial, \partial^2, \partial v,$ $qL, q^1, qI, qII,$	Alluvion récent
2	$e_{\Pi} - \Pi^a, eIV, eV,$ $C^{9-10}, C^{7-9}, C^{10}$	Marnes
3	$ea^2, e_{\beta},$ mc^1	Argiles
4	$e_{\beta}^2, eA^2, e_{\Pi},$ mb^1	Grés
5	eIV^a, C^8, C^{8-7}	Calcaires
6	t	Terrasse

2.2.2. L'altitude :

Les attributs topographiques (tels que l'altitude et l'angle de pente) contrôlent principalement le processus d'érosion des ravins et, par conséquent, déterminent la distribution spatiale des ravines (Conoscenti et al. 2014; Hongchun et al. 2014; Gómez-Gutiérrez et al. 2015).

De plus, l'altitude joue un rôle important dans le type de couverture végétale et les propriétés des précipitations. Ainsi, la carte d'altitude de la zone d'étude a été obtenue à partir d'un modèle numérique du terrain d'une résolution (30x30). Les valeurs d'altitudes trouvées dans le périmètre de la zone étudiée variées de 830 m à 1462 m. (Fig-24)

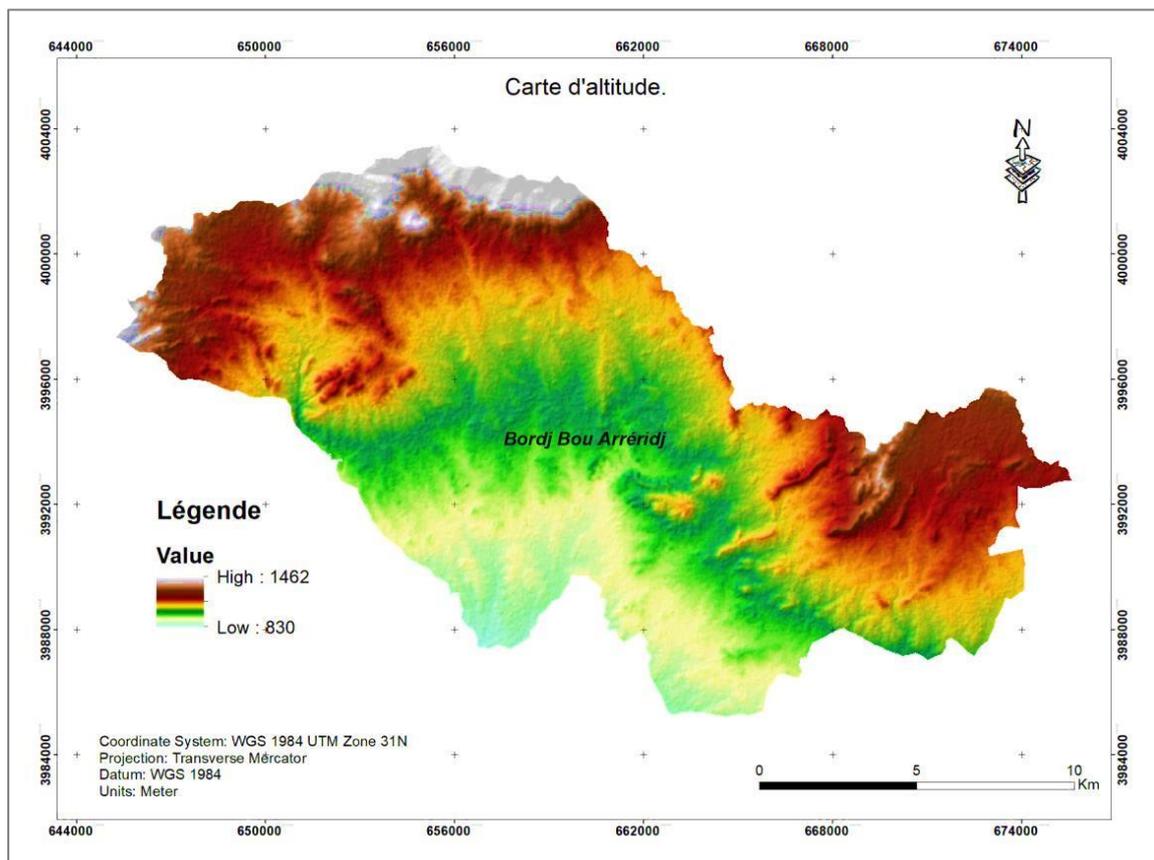


Figure 24: Carte d'altitude de la zone d'étude.

2.2.3. L'exposition des versants :

L'exposition des versants est également considéré comme un facteur crucial dans l'analyse des risques naturels et la cartographie de la sensibilité (Maharaj 1993; Baeza et Corominas 2001; Pourghasemi et al. 2013b; Umar et al. 2014). L'exposition des versants peut indirectement influencer les processus d'érosion car il contrôle la durée d'exposition au soleil, l'évapotranspiration, la rétention d'humidité, le type de couverture végétale et la répartition de la végétation sur les pentes (Dai et al.2001; Sidle et Ochiai 2006; Agnesi et al.2011; Wang et al.2011; Jaafari et al.2014).

La carte d'exposition des versants (Fig.25) a été construite automatiquement dans le logiciel ArcGIS 10.1, à l'aide du DEM avec une taille de cellule de grille de 30x30 m, et elle est classée en 9 catégories :

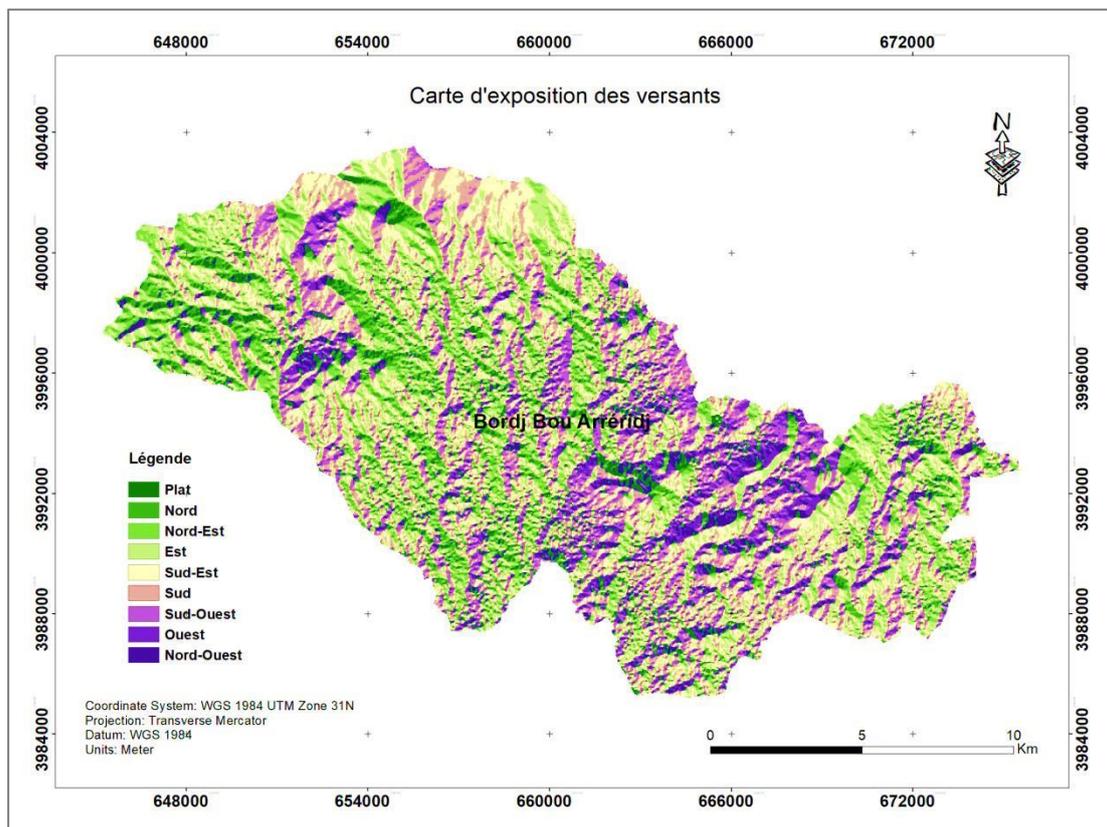


Figure 25: Carte d'exposition des versants de la zone d'étude.

2.2.4. La pente :

Ce paramètre est couramment le plus utilisé dans la cartographie de la susceptibilité à l'érosion. Généralement, il existe une relation proportionnelle entre ce facteur et l'occurrence du phénomène. Dans le cas de l'érosion hydrique, les formes d'érosion du bassin versant sont principalement situées sur des pentes douces comme le confirment d'autres recherches (Fluëgel et al. 2003; Chaplot et al.2005a; Kakembo et al.2009; Rahmati 2016). Dans la présente étude, le degré de pente a été dérivé du DEM et a été divisé en cinq classes : très faible ($<5^\circ$) ; faible ($5-10^\circ$) ; moyenne ($10-15^\circ$) ; forte ($15-20^\circ$) et très forte ($>20^\circ$).

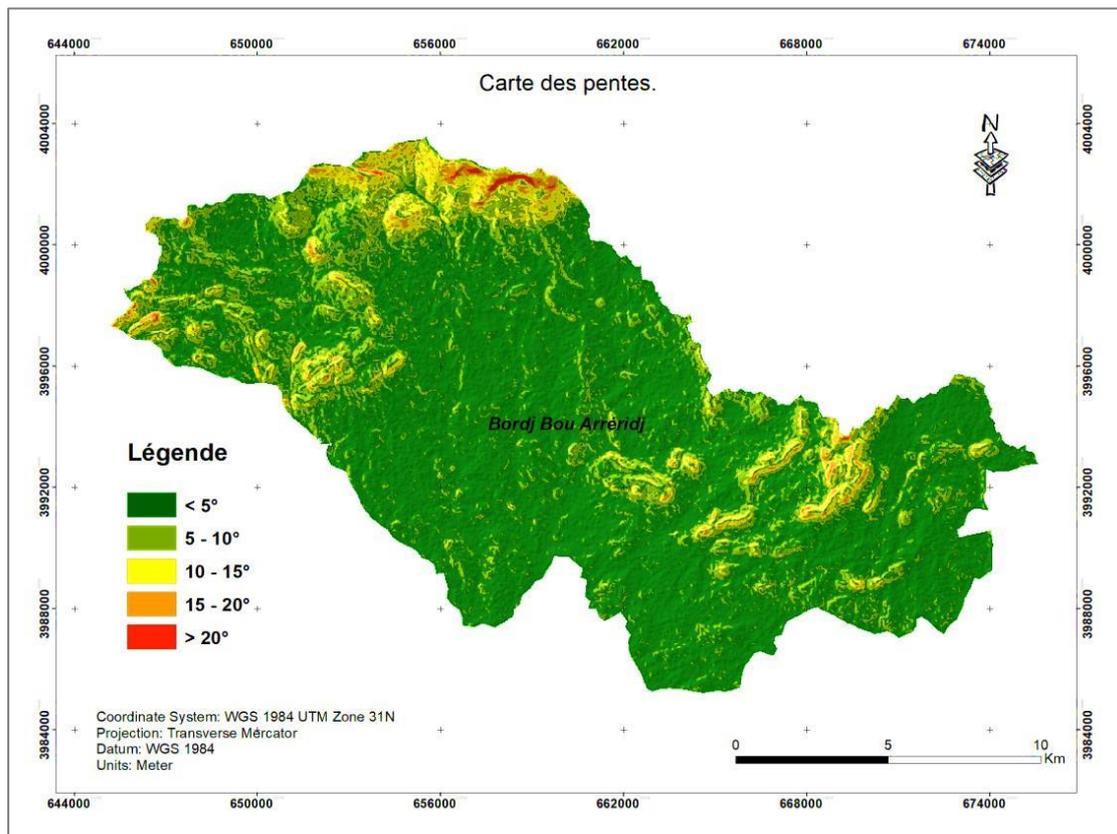


Figure 26: Carte des pentes de la zone d'étude.

2.2.5. Proximité aux failles :

Les failles actives augmentent la susceptibilité aux mouvements de terrain parce que les roches proches d'une faille sont plus faibles, en raison d'un cisaillement intense (achour et al., 2018). La distance des failles augmente la probabilité d'occurrence de l'érosion. (Pradhan et Lee, 2010).

La figure (27) présente une carte de proximité aux, cette carte a été réalisée numérisation des cartes géologiques ; Bordj Bou Arreridj et Ain Taghrout; à l'échelle 1/50 000 (Institut Géographique national, Algérie), les résultats des distances euclidiennes ont été divisées en six (06) classes : 0-100m ; 100-200m ; 300-400m ; 400-500m ; >500m.

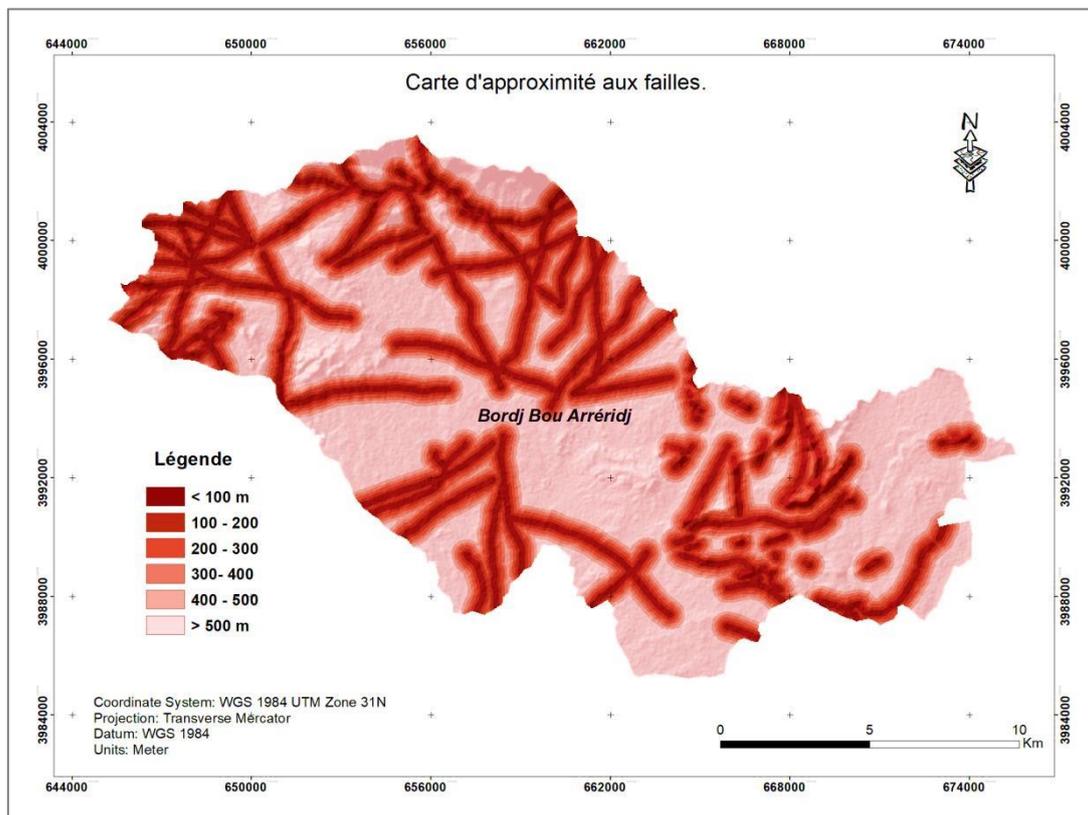


Figure 27: Carte de proximité aux failles dans la zone d'étude.

2.2.6. Proximité aux routes:

La figure ci-dessous, présente une carte de proximité aux routes réalisée à partir d'une digitalisation de réseau routier dans le secteur d'étude. Cette digitalisation est ensuite transformée dans ArcGIS afin de générer les distances euclidiennes par rapport à l'axe de chaque route (Fig.28). Six zones tampons ont été établies : 0-50m ; 50-100m ; 100-200m ; 200-400m ; 400-600m ; >600m.

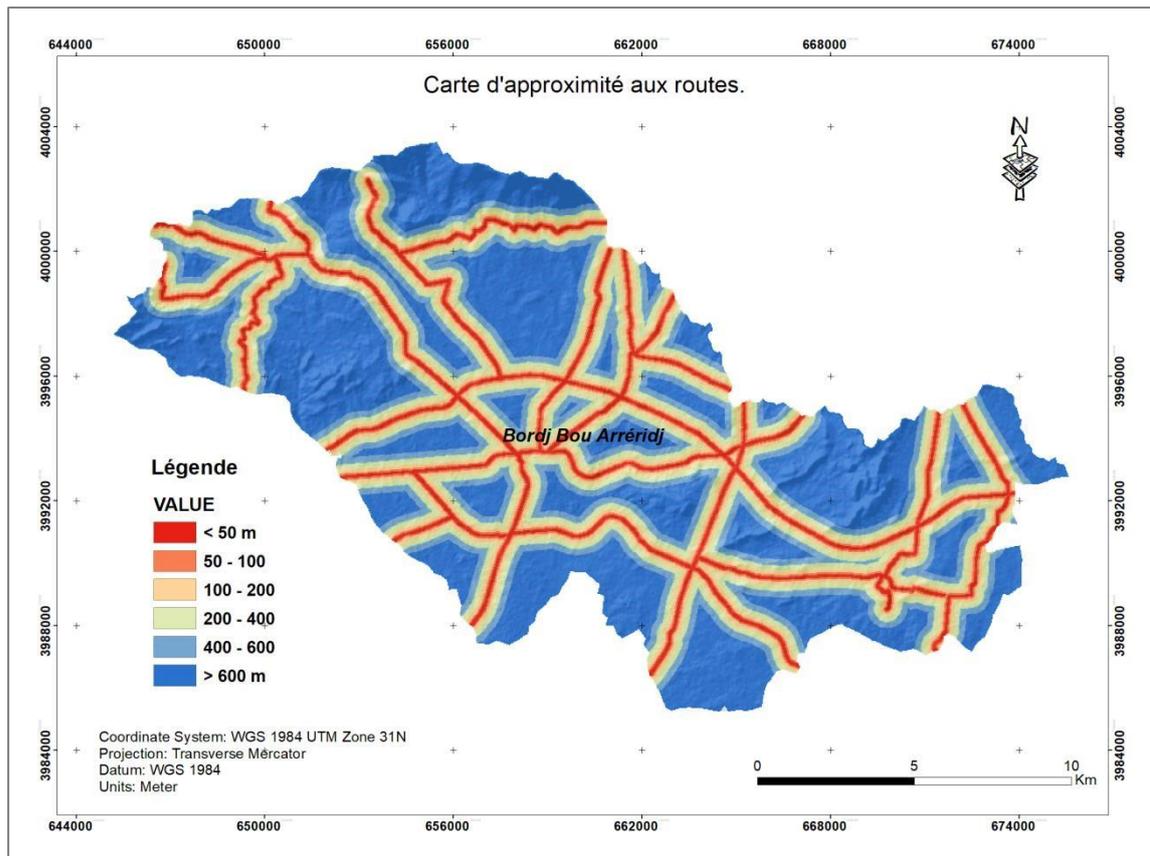


Figure 28: Carte de proximité des routes de la zone d'étude.

2.2.7. Proximité au réseau hydrographique :

Dans la plupart des cas, les ravines sont reliées au réseau de drainage / ruisseau, facilitant l'évacuation des matériaux érodés des zones de montagne (Conoscenti et al. 2014). Afin d'explorer l'influence du réseau de drainage, le facteur d'éloignement des rivières a été considéré (Choi et al.2008; Conoscenti et al.2014; Dube et al.2014; Zakerinejad et Maerker 2015).

La figure (29) présente une carte de proximité au réseau hydrographique, cette carte a été réalisée à partir du modèle numérique du terrain (MNT) de la zone d'étude d'une résolution de 30x30, cette couche a été divisée en six (06) classes : 0-100m ; 100-200m ; 200-300m ; 300-400m ; 400-500m ; >500m..

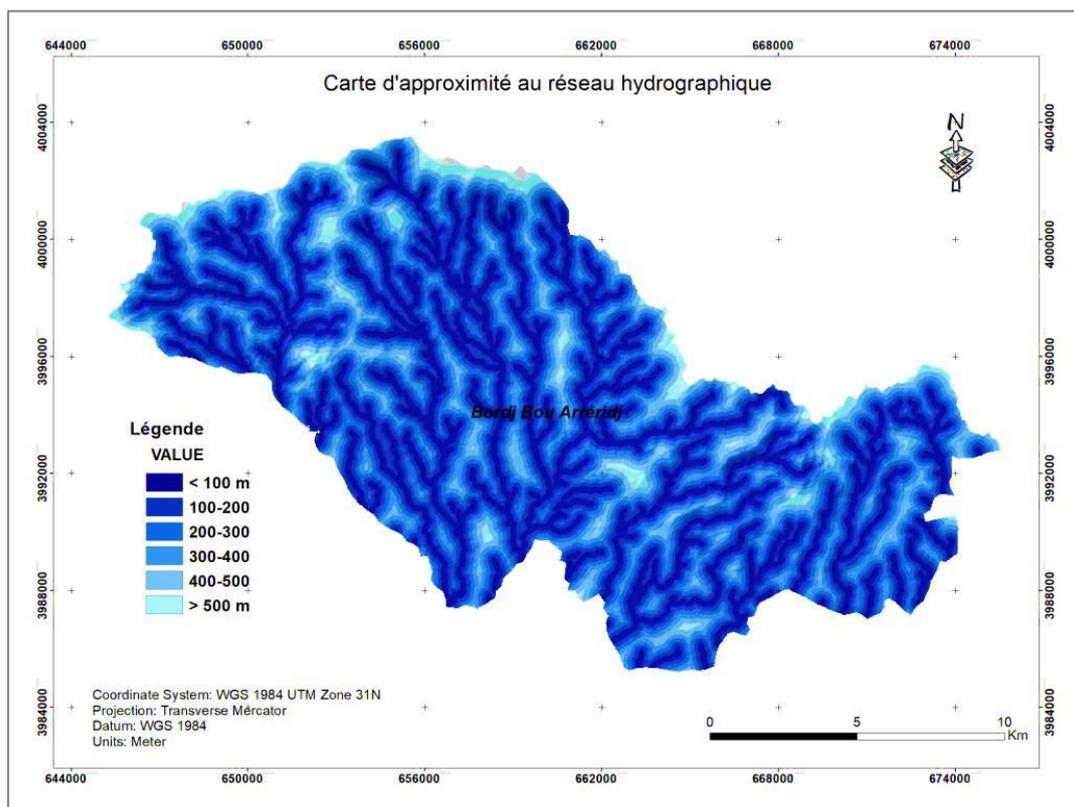


Figure 29: Carte de proximité au réseau hydrographique.

3. Conclusion :

Dans ce chapitre, une carte d'inventaire du phénomène étudié a été construite. Sept facteurs de prédisposition ont été pris en compte pour évaluer la susceptibilité à l'érosion dans la zone d'étude, à savoir : la lithologie, l'altitude, l'exposition des versants, la proximité aux routes ; aux failles ; au réseau hydrographique et la pente. L'identification de ces derniers est nécessaire pour une cartographie de la susceptibilité à l'érosion ; pour construire une carte précise, il est primordial de déterminer le rôle de ces facteurs.

Chapitre IV :
Modélisation de la susceptibilité à l'érosion
via FR

1. Introduction :

L'évaluation des risques d'érosion des sols dans la zone d'étude a nécessité la prise en compte de nombreux facteurs intervenant dans le processus érosif ; La lithologie, L'altitude, La pente, L'exposition des versants, la proximité aux routes, aux réseaux hydrographiques et aux failles ; en employant la méthode de rapport des de fréquence (Frequency ratio (FR)). Cette dernière nous permettra de définir des zones prioritaires (à susceptibilité élevée) pour des études détaillées.

2. Application de la méthode de rapport de fréquence (FR) :

Parmi plusieurs approches statistiques bivariées pour la cartographie de la susceptibilité à l'érosion hydrique, le modèle de rapport de fréquence (FR) a été utilisé dans cette étude. Un simple outil d'évaluation géospatiale pour identifier la relation probabiliste entre le facteur dépendant et les facteurs indépendants peut être expliqué à l'aide du modèle FR. Dans cette étude, les facteurs sélectionnés ; La lithologie, L'altitude, La pente, L'exposition des versants, proximité aux routes, aux réseaux hydrographiques et aux failles représentent les facteurs indépendants, tandis que l'inventaire représente le facteur dépendant. Le FR est une technique d'estimation bivariée, qui permet d'estimer la probabilité entre la carte d'inventaire de l'érosion et chaque facteur de prédisposition. Cette méthode, a été utilisée avec succès par plusieurs chercheurs dans la modélisation et la cartographie des mouvements des terrains ainsi que l'évaluation de la probabilité de l'érosion hydrique (Arabameri et al. ; 2019 ; Rahmati et al. ; 2016 ; yalcin et al ;. 2011).

2.1.Méthodologie :

Le rapport de fréquence fournit la proportion de cellules des formes d'érosion dans la catégorie spécifique pour chaque couche d'entrée (Arabameri et al., 2018 ; J. Roy, D.Saha 2019). Il peut être décrit comme le rapport entre la fréquence relative des pixels des formes d'érosion dans une catégorie (une classe d'attribut) et la fréquence relative de tous les pixels des formes d'érosion dans la zone (Eq.3): (J. Roy, D.Saha 2019)

$$\mathbf{FR} = \frac{A/B}{C/D} = \frac{E}{F} \dots \dots \dots \text{Eq.3}$$

Où :

- **A** est le nombre de pixels touchés par l'érosion hydrique dans chaque classe,
- **B** est le nombre total de pixels touchés par l'érosion hydrique dans la zone entière,
- **C** est le nombre de pixels de chaque classe dans le facteur de conditionnement choisi,
- **D** est le nombre de pixels de la zone d'étude,
- **E** est le pourcentage d'occurrences de l'érosion hydrique dans chaque classe de facteur de conditionnement,
- **F** est le pourcentage relatif de la superficie de chaque classe.

Si la valeur FR est supérieure à 1, cela indique que la concentration maximale des cellules des formes d'érosion dans une catégorie spécifique est supérieure. D'autre part, si la valeur de la catégorie spécifique est inférieure à 1, cela indique la faible concentration des cellules des formes d'érosion dans la classe considérée.

Le FR a été calculé pour chaque classe de chaque facteur, et les évaluations des facteurs ont été additionnées en utilisant l'Equation 4 afin de calculer au final l'indice de susceptibilité à l'érosion hydrique (GEI) (Lee et Talib, 2005 ; Achour et al., 2018)

$$GEI = \sum_{i=1}^n (FR) i \dots\dots Eq4$$

Où :

- **GEI** est l'indice de susceptibilité à l'érosion hydrique,
- **(FR) i** sont les rapports de fréquence pour chacun des paramètres stockés dans le pixel,
- et **n** est le nombre total de paramètres d'entrée

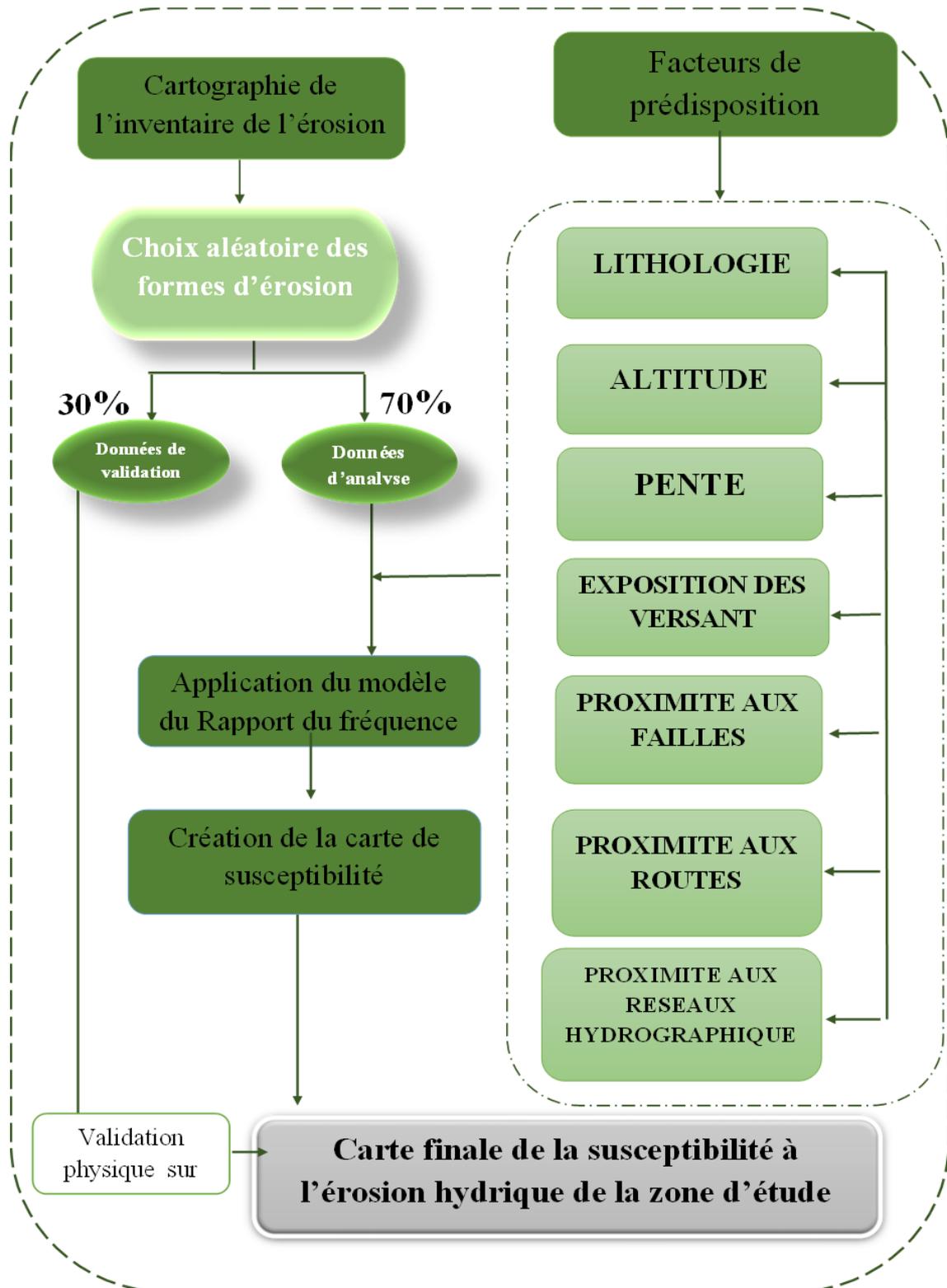


Figure 31: Organigramme générale du travail

3. Résultats et discussion :

Pour effectuer la modélisation du rapport de fréquence, chaque carte thématique a été croisée avec la carte d'inventaire (70%) de l'érosion hydrique à l'aide du logiciel ArcGIS, et le FR de chaque classe a été calculé dans l'Excel (Eq. 3).

Dans cette analyse, FR nous a permis de réaliser un modèle de susceptibilité pour l'érosion dans la zone d'étude, montrant l'importance de chaque paramètre dans l'occurrence de ce phénomène et le poids relatif de chaque classe des paramètres utilisés. Ces poids sont présentés dans le tableau 05.

Tableau 5: Résultats du modèle.

Facteur	Classe	Nombre de pixels dans chaque classe	Pourcentage (%)	Nombre de pixels correspond à L'érosion dans chaque classe	Pourcentage (%)	FR
Lithologie	1	96796.00	32.19	1226.00	1.06	1.06
	2	87302.00	29.12	47.00	24.89	24.89
	3	3792.00	1.26	111.00	0.46	0.46
	4	55.00	0.02	2630.00	0.00	0.00
	5	107904.00	35.99	0.00	0.00	0.00
	6	3630.00	1.21	0.00	0.00	0.00
	7	316.00	0.11	3.00	0.07	1.41
Altitude	< 1000	178079.00	59.40	2114	52.42	1.13
	1000 - 1100	93796.00	31.29	1511	37.47	0.84
	1100 - 1200	20662.00	6.89	375	9.30	0.74
	1200 - 1300	5297.00	1.77	26	0.64	2.74
	> 1300	1961.00	0.65	7	0.17	3.77
Pente	< 5	246497	82.22	2470	61.24	1.13
	5 - 10	37402	12.48	1213	30.08	0.41
	10 - 15	12980	4.33	291	7.22	0.60
	15 - 20	2489	0.83	51	1.26	0.66
	> 20	427	0.14	8	0.20	0.72
Exposition des versants	Flat	3665.00	1.22	9	4.07	0.00
	North	14106.00	4.71	256	15.67	0.30
	Northeast	18959.00	6.32	359	21.07	0.30
	East	34356.00	11.46	410	38.17	0.30
	Southeast	53195.00	17.74	524	59.11	0.30
	South	63148.00	21.06	891	70.16	0.30
	Southwest	55150.00	18.40	783	61.28	0.30
	West	36169.00	12.06	504	40.19	0.30
Proximité aux failles	< 100	50810	16.93	836	20.73	0.82
	100-200	39903	13.30	783	19.41	0.68
	200-300	37970	12.65	615	15.25	0.83
	300-400	29282	9.76	384	9.52	1.02
	400-500	25806	8.60	317	7.86	1.09
	>500	116292	38.76	1098	27.23	1.42

Proximité aux routes	<50	20354.00	6.79	42	1.04	6.52
	50-100	18770.00	6.26	64	1.59	3.95
	100-200	31713.00	10.58	164	4.07	2.60
	200-400	60023.00	20.02	518	12.84	1.56
	400-600	51157.00	17.06	510	12.65	1.35
	>600	117778.00	39.29	2735	67.82	0.58
Proximité au réseau hydrographique	<100	74946	25.00	729	18.08	1.38
	100-200	63659	21.23	887	21.99	0.97
	200-300	57719	19.25	816	20.23	0.95
	300-400	39882	13.30	664	16.46	0.81
	400-500	29867	9.96	578	14.33	0.70
	>500	33722	11.25	359	8.90	1.26

D'après le tableau ci-dessus, la classe 2 constituée globalement par des marnes présente la valeur de rapport de fréquence la plus élevée dans le paramètre lithologie (FR = 24.89). Cela peut s'expliquer par le fait que ces matériaux ont de mauvaises caractéristiques géotechniques les rendent très susceptible à l'érosion. (Achour et al., 2018).

L'analyse des valeurs obtenus en ce qui concerne le facteur « Altitude » permet de constater que les altitudes supérieures à 1300 m (FR=3.77) et les altitudes entre 1200-1300 m (FR=2.75) avaient une forte corrélation avec la présence des formes de l'érosion hydriques, ce qui est logique (Rahmati et al., 2016).

Pour ce qui est de facteur « proximité aux routes », les valeurs du rapport de fréquence ont montré que les zones proches des routes sont plus susceptible à ce phénomène (FR=6.52), et avec une distance croissante aux routes, cette valeur a progressivement diminuée. Ce constat peut être expliqué par le fait que ces routes ont probablement suivies d'une érosion accélérée due à la diminution des taux d'infiltration en certaines parties de ces routes et par l'interception de l'écoulement hypodermique par les talus de déblai. Une cause probable aussi peut être la diminution de la résistance au cisaillement, l'augmentation des forces de cisaillement, ou les deux à la fois, sur les talus de déblai et de remblai de ces routes.

L'analyse de FR pour la relation entre l'occurrence d'érosion hydrique et le degré de pente indique que la classe de degré de pente 0–5° à la valeur la plus élevée de FR (1.34) suivie de la classe ou le degré de pente est >20° avec FR=0.72. Cependant, on remarque que la valeur FR diminue pour les classes de degré de pente de 10° à 20°, alors que la valeur la plus basse est comprise entre 5° et 10°, ce qui

indique une faible probabilité d'occurrence de l'érosion hydrique dans ces plages de pente. Ces résultats sont similaires à ceux de Conoscenti et al. (2014), même de très faibles pentes permettent à l'eau de se mettre en mouvement. Plus la pente est forte, plus les risques d'érosion sont importants. Ces résultats indiquant que le degré de pente est un facteur majeur qui contrôle la concentration de l'écoulement terrestre et l'emplacement et le développement des ravines.

Pour le cas du facteur « proximité aux failles », les valeurs de FR augmentent quasi proportionnellement avec la distance aux failles. Ce constat peut être expliqué par la prédominance des formations alluvionnaires dans les classes lointaines des failles.

Dans le cas de la distance par rapport aux réseaux hydrographique, les résultats indiquent qu'à mesure que la distance par rapport aux rivières augmente, l'érosion hydrique diminue généralement. Dans ce cas, la valeur FR la plus élevée (FR=1.38) a été obtenue pour la classe une $D < 100\text{m}$. C'est seulement à proximité des oueds que les pentes peuvent être un peu plus fortes.

Dans le cas de l'exposition des versants, les résultats indiquent que toutes les classe aient la même valeur du FR (FR =0.30), ce qui illogique. Mais quand on se fie à l'interprétation des résultats du facteur Lithologie, on trouve une prédominance des formations marneuses dans la quasi-totalité des directions de pentes, ce qui pousse le développement du phénomène dans plusieurs directions.

4. Carte de susceptibilité de la zone d'étude:

Pour préparer une carte de susceptibilité à l'érosion hydrique et estimer le niveau de corrélation spatiale entre les emplacements des formes d'érosion hydrique et les facteurs de conditionnement, le modèle FR a été appliqué.

Concernant les données nécessaires à la cartographie, le chapitre 3 a permis de faire une présentation détaillée des différents facteurs disponibles qui influent sur l'occurrence du phénomène dans le secteur d'étude. Ces données sont compilées sous SIG et transformées en raster pour être utilisées dans l'évaluation de la susceptibilité.

La démarche méthodologique pour la cartographie de la susceptibilité via la

méthode Rapport de Fréquence (FR) est débutée par la construction d'une carte d'inventaire et par un choix judicieux des facteurs de prédisposition en se basant sur la disponibilité des données.

Au final, la carte GESM a été produite en additionnant toutes les couches déterminées à l'aide de la somme pondérée dans ArcGIS (Eq. 4). Pour chaque couche, la surface de chaque classe de facteurs a été calculée en fonction des pixels et de la zone couverte par l'érosion des sols dans la classe de facteurs, pour laquelle l'outil de surface tabulé a été appliqué (Sharma et Mahajan 2018a ; Achour et al. 2018). Ils contiennent tous les poids de chaque classe calculés avec le modèle FR. Par la suite, la carte GESM a été reclassée en cinq classes : très faible, faible, modérée, forte et très forte susceptibilité, en utilisant la méthode « Jenks » (Fig.31).

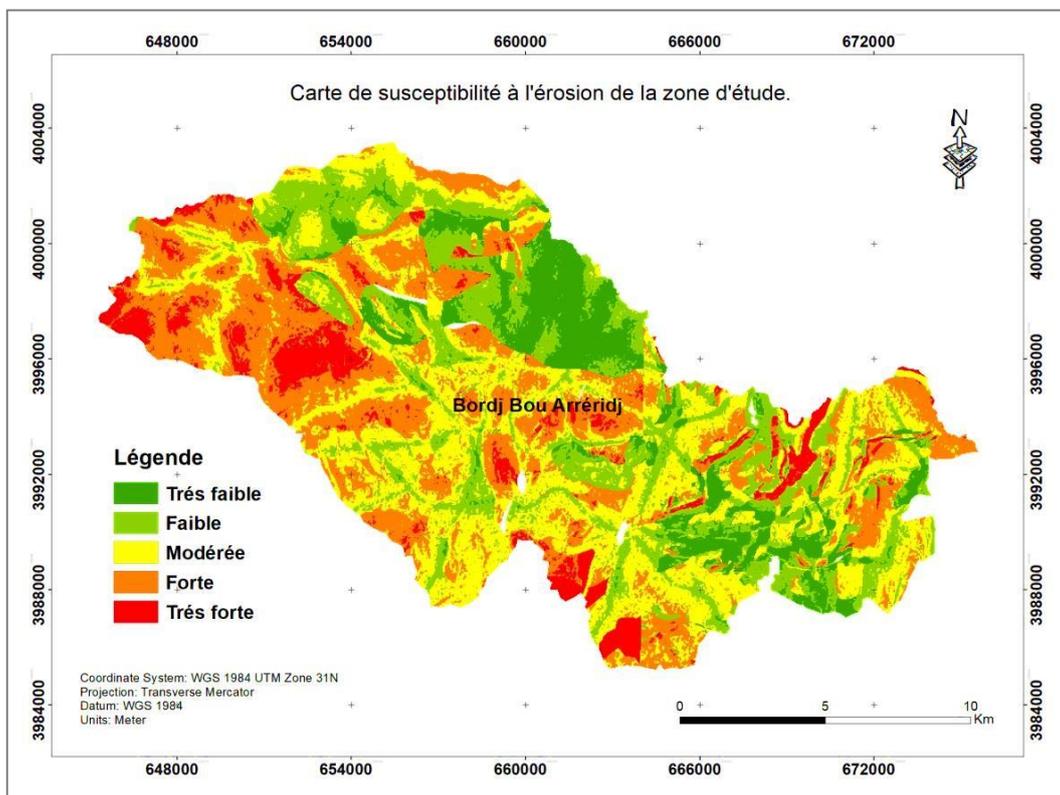


Figure 32: Carte de susceptibilité de la zone d'étude.

5. Validation :

Pour le processus de validation, deux méthodes existent pour évaluer les performances de GESM obtenu ; une validation statistique et une validation physique sur terrain. Pour déterminer l'exactitude du modèle de susceptibilité à l'érosion hydrique appliqué dans cette étude, une validation physique sur terrain a été faite.

L'existence des formes d'érosion hydrique au niveau des zones érodées détectées sur la carte de susceptibilité du modèle FR (Fig.31) confirme la crédibilité de ce dernier. De plus, on a trouvé ; la marne ; comme formation dominante a la surface de ces zones ; cette visite valide les résultats obtenus d'après la méthode Rapport de Fréquence (Fig.32).

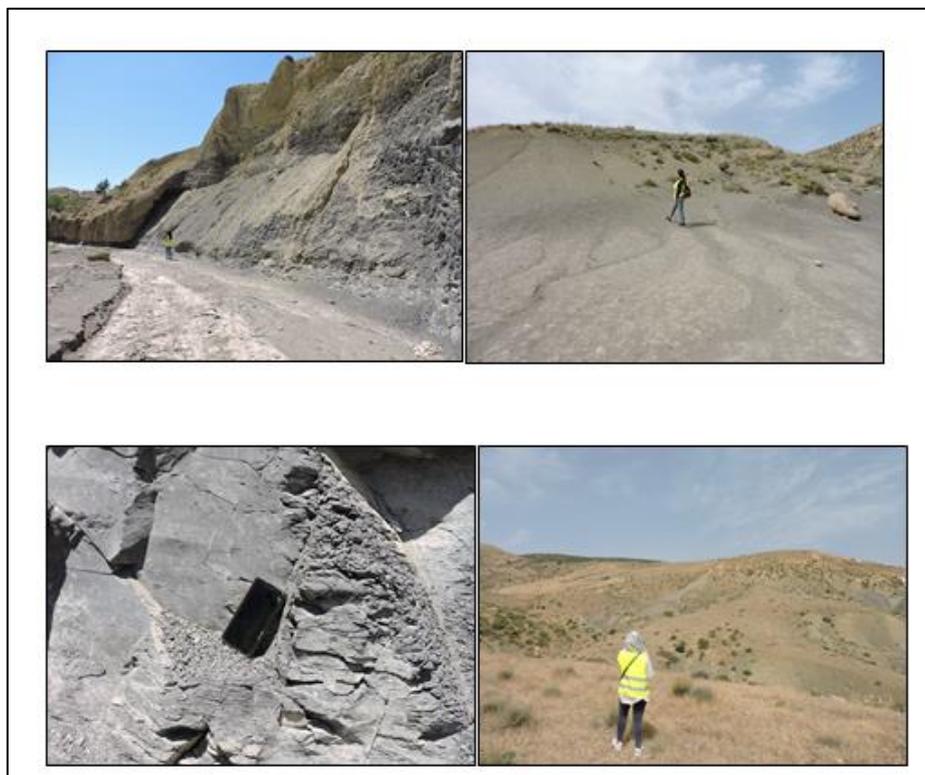


Figure 33:Point de validation du modèle

6. Conclusion :

En raison des caractéristiques dangereuses de l'érosion hydrique dans la zone d'étude, une approche quantitative a été appliquée représentée par la méthode FR, cette méthode a pour but définir la relation entre la distribution spatiale des érosions hydriques et les facteurs prédisposant.

Les résultats présentés dans ce chapitre ont prouvé que le modèle FR basé sur le SIG pouvait être appliqué avec succès à la cartographie de la susceptibilité à l'érosion hydrique, en particulier dans les pays en développement (manque des données spatiales) et le considéré comme fiable. Les résultats montrent que les sols de la zone subissent l'effet de plusieurs facteurs favorisant le phénomène d'érosion à savoir ; la lithologie, l'altitude et la distance par rapport aux cours d'eau. Ils indiquent également que les facteurs les plus efficaces dans la prédiction de la susceptibilité à l'érosion hydrique se sont révélés être la lithologie ; l'altitude ; la distance par rapport aux routes et aux réseaux hydrographique, bien que d'autres facteurs choisis aient une importance raisonnablement acceptables.

Conclusion générale :

Les résultats de ce travail montrent l'intérêt de l'utilisation de la technologie des Systèmes d'Information Géographique SIG dans l'évaluation de la susceptibilité à l'érosion dans la zone d'étude.

La carte élaborée pourrait constituer un document de base pour tout aménagement proposé. La méthode utilisée a permis d'identifier des zones à risque d'érosion dans la zone étudiée. Elle peut être généralisée sur tout le piémont de la région qui connaît actuellement une prolifération accrue des habitations construites dans des zones à risque d'érosion et sur le lit des cours d'eau. Elle peut être aussi transposable à d'autres sites de la région de Chott el Hodna vu la similitude géologique, géomorphologique et climatique. Néanmoins, il serait intéressant de l'appliquer à d'autres zones similaires afin de réduire les risques de ce phénomène.

Perspectives :

Un important travail reste à faire pour lutter efficacement contre le phénomène érosif qui menace le pays et dont les conséquences sont de plus en plus apparentes. Pour arriver à cette fin, il est recommandé :

- ✓ D'intensifier les recherches et les études dans ce domaine ;
- ✓ De profiter de l'existence d'autres outils technologiques tels que la télédétection, considérée comme une source d'information inépuisable et efficace lorsqu'il s'agit de la cartographie de l'occupation du sol. Cette outil contribuera beaucoup, du fait de ses caractéristiques, dans les études multi-temporelles et l'actualisation des bases de données ;
- ✓ Développer des techniques antiérosives adaptées aux secteurs sensibles.

Liste des références

Liste des références:

A

Achour, Y., Garçia, S., & Cavaleiro, V. (2018). GIS-based spatial prediction of debris flows using logistic regression and frequency ratio models for Zêzere River basin and its surrounding area, Northwest Covilhã, Portugal. *Arabian Journal of Geosciences*, 11(18), 550.

Agnesi, V., Angileri, S., Cappadonia, C., Conoscenti, C., & Rotigliano, E. (2011). Multi parametric gis analysis to assess gully erosion susceptibility: A test in southern sicily, italy. *Landform Analysis*, 17, 15-20.

Ali, Y. A. (2007). *Les aménagements de conservation des eaux et des sols en banquettes: Analyse, fonctionnement et essai de modélisation en milieu méditerranéen (El-Gouazine, Tunisie Centrale)* (Doctoral dissertation, Montpellier 2).

Amadesi, E. (1978). Nuova guida alla realizzazione di una carta della stabilità dei versanti.

Arabameri, A., Pradhan, B., Rezaei, K., Yamani, M., Pourghasemi, H. R., & Lombardo, L. (2018). Spatial modelling of gully erosion using evidential belief function, logistic regression, and a new ensemble of evidential belief function–logistic regression algorithm. *Land Degradation & Development*, 29(11), 4035-4049.

B

Baeza, C., & Corominas, J. (2001). Assessment of shallow landslide susceptibility by means of multivariate statistical techniques. *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group*, 26(12), 1251-1263.

Bahija Bachaoui, El Mostafa Bachaoui1, Abderrazak EL Harti, Abderrazak Bannari ET Abderrahmène EL Ghmari. (2007). CARTOGRAPHIE DES ZONES À RISQUE D'ÉROSION HYDRIQUE : EXEMPLE DU HAUT ATLAS MAROCAIN, *Revue Télédétection*, vol. 7, n° 1-2-3-4, p. 393-404

Beguería, S. (2006). Changes in land cover and shallow landslide activity: a case study in the Spanish Pyrenees. *Geomorphology*, 74(1-4), 196-206.

Belkalem Abdelkader, (2017) . Evaluation des risques d'érosion hydrique : cas du bassin versant de l'Oued Kramis (Algérie), Mostaganem, Université Abdelhamid Ibn Badis (2017)

Benchettouh, A. (2012). *Etude des risques d'érosion hydrique du sol au moyen du Système d'Information Géographique (SIG): cas de la zone marneuse du bassin versant de l'Oued Mina-Algérie* (Doctoral dissertation, Université de

Bonham-Carter, G. (1994). Geographic information systems for geoscientists: modelling with GIS. Pergamon press. 416p.

Borges, A. L. (1993). *Modélisation de l'érosion sur deux bassins versants expérimentaux des Alpes du Sud* (Doctoral dissertation).

Bourahla Lahcen,(2016). Impact du changement climatique sur le régime hydrologique du bassin versant de l'Oued Ksob, Université Mohamed Boudiaf - M'sila.

Ç

Casali, J., López, J. J., & Giráldez, J. V. (1999). Ephemeral gully erosion in southern Navarra (Spain). *Catena*, 36(1-2), 65-84.

Chaplot, V., Le Brozec, E. C., Silvera, N., & Valentin, C. (2005). Spatial and temporal assessment of linear erosion in catchments under sloping lands of northern Laos. *Catena*, 63(2-3), 167-184.

Choi, Y., Park, H. D., & Sunwoo, C. (2008). Flood and gully erosion problems at the Pasir open pit coal mine, Indonesia: A case study of the hydrology using GIS. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 67(2), 251-258.

Choubin, B., Rahmati, O., Tahmasebipour, N., Feizizadeh, B., & Pourghasemi, H. R. (2019). Application of fuzzy analytical network process model for analyzing the gully erosion susceptibility. In *Natural hazards gis-based spatial modeling using data mining techniques* (pp. 105-125). Springer, Cham.

Conforti, M., Aucelli, P. P., Robustelli, G., & Scarciglia, F. (2011). Geomorphology and GIS analysis for mapping gully erosion susceptibility in the Turbolo stream catchment (Northern Calabria, Italy). *Natural hazards*, 56(3), 881-898.

Conoscenti, C., Agnesi, V., Angileri, S., Cappadonia, C., Rotigliano, E., & Märker, M. (2013). A GIS-based approach for gully erosion susceptibility modelling: a test in Sicily, Italy. *Environmental earth sciences*, 70(3), 1179-1195.

Conoscenti, C., Angileri, S., Cappadonia, C., Rotigliano, E., Agnesi, V., & Märker, M. (2014). Gully erosion susceptibility assessment by means of GIS-based logistic regression: A case of Sicily (Italy). *Geomorphology*, 204, 399-411.

Đ

Dai, F. C., Lee, C. F., Li, J. X. Z. W., & Xu, Z. W. (2001). Assessment of landslide susceptibility on the natural terrain of Lantau Island, Hong Kong. *Environmental Geology*, 40(3), 381-391.

Dautrebande et al,2006: Dautrebande, S., Cordonnier, H., Thirion, M., & Bielders, C. (2006). Lutter contre l'érosion des terres. "*Les livrets de l'agriculture*"- p. 41

Delga, M. D. (1955). Etude géologique de l'Ouest de la chaîne numidique (Doctoral dissertation, Gouvernement général de l'Algérie Service de carte géologique).

De Ploey, J., Imeson, A., & Oldeman, L. R. (1991). Soil erosion, soil degradation and climatic change. In *Land Use Changes in Europe* (pp. 275-292). Springer, Dordrecht.

Données climatologies, <http://www.infoclimat.fr>, page consultée le 09/07/2020

Domazetović, F., Šiljeg, A., Lončar, N., & Marić, I. (2019). Development of automated multicriteria GIS analysis of gully erosion susceptibility. *Applied Geography*, 112, 102083.

E

El Maaoui, M. A., Felfoul, M. S., Boussema, M. R., & Sane, M. H. (2012). Sediment yield from irregularly shaped gullies located on the Fortuna lithologic formation in semi-arid area of Tunisia. *Catena*, 93, 97-104.

Ercanoglu, M., & Gokceoglu, C. (2002). Assessment of landslide susceptibility for a landslide-prone area (north of Yenice, NW Turkey) by fuzzy approach. *Environmental geology*, 41(6), 720-730.

Esri; <http://www.esri.com> ; page consultée le 22/08/2020

F

F. Guzzetti, M. Galli, P. Reichenbach, F. Ardizzone, M. Cardinali.(2006). *Landslide hazard assessment in the Collazzone area, Umbria, Central Italy. Natural Hazards and Earth System Science*, Copernicus Publications on behalf of the European Geosciences Union, 6 (1), pp.115-131.

FAO.(1994). ORGANISATION DES NATIONS UNIS POUR L'ALIMENTATION ET L'AGRICULTURE.1994, Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (CGES). Bulletin Pédologique de la FAO n°70, 420p

Flu'gel WA, Ma'rker M, Moretti S, Rodolfi G, Sidorchuk A (2003). *Integrating geographical information systems, remote sensing, ground truthing and modelling approaches for regional erosion classification of semi-arid catchments in South Africa.* Hydrol Process 17:929–942

Foster G. R. (2004). *User's reference guide. Revised universal soil loss equation version 2 (RUSLE2).* National Sedimentation Laboratory, USDA-Agricultural Research Service, Washington, DC, p 418

Foster, G. R. (1990). Process-based modelling of soil erosion by water on agricultural land. In *Soil erosion on agricultural land. Proceedings of a workshop sponsored by the British Geomorphological Research Group, Coventry, UK, January 1989.* (pp. 429-445). John Wiley & Sons Ltd..

Furusho, C. Y. (2008). *Étude du fonctionnement hydrologique d'un bassin versant périurbain: la Chézine* (Doctoral dissertation, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC), route de Bouaye, 44340 Bouguenais).

G

Georges, Y. (2008). Evaluation de l'érosion dans le bassin versant de la rivière grise (Haïti). *Master en gestion des Risques Naturels-Faculté universitaire des sciences agronomiques de Gembloux, Belgique.*

Glade Hufschmidt., Crozier, M., & Glade, T. (2005). Evolution of natural risk: research framework and perspectives. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 5, 375-387.

Go´mez-Gutie´rrez A´ , Conoscenti C, Angileri SE, Rotigliano E, Schnabel S (2015). *Using topographical attributes to evaluate gully erosion proneness (susceptibility) in two mediterranean basins: advantages and limitations.* Nat Hazards.

Golestani, G., Issazadeh, L., & Serajamani, R. (2014). Lithology effects on gully erosion in Ghoori chay Watershed using RS & GIS. *Int. J. Biosci*, 4(2), 71-76.

Gorum, T., Gonencgil, B., Gokceoglu, C., & Nefeslioglu, H. A. (2008). Implementation of reconstructed geomorphologic units in landslide susceptibility mapping: the Melen Gorge (NW Turkey). *Natural Hazards*, 46(3), 323-351.

Guillaume Nord, (2006). *Modélisation à base physique des processus de l'érosion hydrique à l'échelle de la parcelle* (Doctoral dissertation).

Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinali, M., & Reichenbach, P. (1999). Use of GIS technology in the prediction and monitoring of landslide hazard. *Natural hazards*, 20(2-3), 117-135.

H

Hadir sofia. (2010). *Modélisation du ruissellement et de l'érosion par le modèle STREAM dans le bassin versant de l'Oued Saboun.* Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II – B.P. 6202 – Instituts, 10101 Rabat. 7p

Hembram, T. K., Paul, G. C., & Saha, S. (2019). Comparative Analysis between Morphometry and Geo-Environmental Factor Based Soil Erosion Risk Assessment Using Weight of Evidence Model: A Study on Jainti River Basin, Eastern India. *Environmental Processes*, 6(4), 883-913.

Hongchun Zhu, Tang, G., Qian, K., & Liu, H. (2014). Extraction and analysis of gully head of Loess Plateau in China based on digital elevation model. *Chinese geographical science*, 24(3), 328-338.

I

Issa, L. K., Lech-Hab, K. B. H., Raissouni, A., & El Arrim, A. (2016). Cartographie quantitative du risque d'érosion des sols par approche SIG/USLE au niveau du bassin versant Kalaya (Maroc Nord Occidental). *J Mater Environ Sci*, 7(8), 2778-2795.

J

Jaafari, A., Najafi, A., Pourghasemi, H. R., Rezaeian, J., & Sattarian, A. (2014). GIS-based frequency ratio and index of entropy models for landslide susceptibility assessment in the Caspian forest, northern Iran. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 11(4), 909-926.

Joannon, A. (2004). *Coordination spatiale des systèmes de culture pour la maîtrise de processus écologiques: cas du ruissellement érosif dans les bassins versants agricoles du Pays de Caux, Haute-Normandie* (Doctoral dissertation, Institut national agronomique Paris-Grignon).

K

Kakembo, V., Xanga, W. W., & Rowntree, K. (2009). Topographic thresholds in gully development on the hillslopes of communal areas in Ngqushwa Local Municipality, Eastern Cape, South Africa. *Geomorphology*, 110(3-4), 188-194.

Kayastha, P., Dhital, M. R., & De Smedt, F. (2013). Application of the analytical hierarchy process (AHP) for landslide susceptibility mapping: a case study from the Tinau watershed, west Nepal. *Computers & Geosciences*, 52, 398-408.

Kheir, R. B., Cerdan, O., & Abdallah, C. (2006). Regional soil erosion risk mapping in Lebanon. *Geomorphology*, 82(3-4), 347-359.

Kheir, R. B., Wilson, J., & Deng, Y. (2007). Use of terrain variables for mapping gully erosion susceptibility in Lebanon. *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group*, 32(12), 1770-1782.

Kienholz, H. (1978). Maps of Geomorphology and Natural Hazards of Grindelwald, Switzerland: Scale 1: 10,000*. *Arctic and Alpine Research*, 10(2), 169-184.

L

Lee, S. (2004). Soil erosion assessment and its verification using the universal soil loss equation and geographic information system: a case study at Boun, Korea. *Environmental Geology*, 45(4), 457-465.

Lee, S., & Talib, J. A. (2005). Probabilistic landslide susceptibility and factor effect analysis. *Environmental Geology*, 47(7), 982-990.

Ludwig, B., Auzet, A. V., Boiffin, J., Papy, F., King, D., & Chadoeuf, J. (1996). Etats de surface, structure hydrographique et érosion en rigole des bassins versants cultivés du Nord de la France. *Etude et gestion des sols*, 3, 53-70.

M

Maharaj, R. J. (1993). Landslide processes and landslide susceptibility analysis from an upland watershed: a case study from St. Andrew, Jamaica, West Indies. *Engineering Geology*, 34(1-2), 53-79.

Malet, J.-P., Thiery, Y., Maquaire, O. & Puissant, A. (2006). Analyse spatiale, évaluation et cartographie du risque "glissement de terrain" , *Revue Internationale de Géomatique*, vol. 16, n° 3-4, pp. 499-525.

MATE & METL. (1999). *Plans de prévention des risques naturels, PPR, risques de mouvements de terrain: guide méthodologique.* La Documentation française. 71p.

Mohammady, M., Pourghasemi, H. R., & Pradhan, B. (2012). Landslide susceptibility mapping at Golestan Province, Iran: a comparison between frequency ratio, Dempster-Shafer, and weights-of-evidence models. *Journal of Asian Earth Sciences*, 61, 221-236.

Ö

OMM, (2005). Le climat et la dégradation des sols, OMM-N° 989, © 2005, Organisation météorologique mondiale ISBN 92-63-20989-8, page10

Ozdemir, A., & Altural, T. (2013). A comparative study of frequency ratio, weights of evidence and logistic regression methods for landslide susceptibility mapping: Sultan Mountains, SW Turkey. *Journal of Asian Earth Sciences*, 64, 180-197.

Í

Poiraud, A. (2012). *Les glissements de terrain dans le bassin tertiaire volcanisé du Puy-en-Velay (Massif central, France): caractérisation, facteurs de contrôle et cartographie de l'aléa* (Doctoral dissertation).

Porcher, M., Guillope, P. (1979). *Cartographie des risques ZERMOS appliquée à des plans d'occupation des sols en Normandie*. Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 99: 43–54.

Pourghasemi, H. R., & Kerle, N. (2013). Random forests and evidential belief function-based landslide susceptibility assessment in Western Mazandaran Province, Iran. *Environmental earth sciences*, 75(3), 185.

Pourghasemi, H. R., & Kerle, N. (2016). Random forests and evidential belief function-based landslide susceptibility assessment in Western Mazandaran Province, Iran. *Environmental earth sciences*, 75(3), 185.

Pourghasemi, H., Pradhan, B., Gokceoglu, C., & Moezzi, K. D. (2013). A comparative assessment of prediction capabilities of Dempster–Shafer and weights-of-evidence models in landslide susceptibility mapping using GIS. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 4(2), 93-118.

Pradhan, B. (2011). Use of GIS-based fuzzy logic relations and its cross application to produce landslide susceptibility maps in three test areas in Malaysia. *Environmental Earth Sciences*, 63(2), 329-349.

Pradhan, B., & Lee, S. (2010). Delineation of landslide hazard areas on Penang Island, Malaysia, by using frequency ratio, logistic regression, and artificial neural network models. *Environmental Earth Sciences*, 60(5), 1037-1054.

Ī

Rahmati, O., Haghizadeh, A., Pourghasemi, H. R., & Noormohamadi, F. (2016). Gully erosion susceptibility mapping: the role of GIS-based bivariate statistical models and their comparison. *Natural Hazards*, 82(2), 1231-1258.

Ramade, 1984 :Ramade, F.(1984). *Eléments d'écologie, écologie fondamentale* . ED.McGraw-hill, paris 397p

Ramade, 1994 : Ramade, F. (1994). *Eléments d'écologie, Ecologie fondamentale*,3ème édition,Ed science Paris.99P.

Regmi, A. D., Devkota, K. C., Yoshida, K., Pradhan, B., Pourghasemi, H. R., Kumamoto, T., & Akgun, A. (2014). Application of frequency ratio, statistical index, and weights-of-evidence models and their comparison in landslide susceptibility mapping in Central Nepal Himalaya. *Arabian Journal of Geosciences*, 7(2), 725-742.

Roose, E. (1991). Conservation des sols en zones méditerranéennes. *Synthèse et proposition d'une nouvelle stratégie de lutte antiérosive: la GCES-Cahiers ORSTOM, Série Pédologie*, 26(2), 145-181.

Roose, É., & De Noni, G. (2004). Recherches sur l'érosion hydrique en Afrique: revue et perspectives. *Science et changements planétaires/Sécheresse*, 15(1), 121-129.

Roy, J., & Saha, S. (2019). GIS-based gully erosion susceptibility evaluation using frequency ratio, cosine amplitude and logistic regression ensemble with fuzzy logic in hinglo river basin, India. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 15, 100247.



Saaty & Vargas, 2001 Saaty, T. L., & Vargas, L. G. (2012). *Models, methods, concepts & applications of the analytic hierarchy process* (Vol. 175). Springer Science & Business Media.

Saaty, T. L. (1980). The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resources Allocation.,(McGraw: New York.).

Saaty, T. L. (1996). *Decision making with dependence and feedback: The analytic network process* (Vol. 4922). RWS Publ..

Sadiki, A., Bouhlassa, S., Auajjar, J., Faleh, A., & Macaire, J. J. (2004). Utilisation d'un SIG pour l'évaluation et la cartographie des risques d'érosion par l'Equation universelle des pertes en sol dans le Rif oriental (Maroc): cas du bassin versant de l'oued Boussouab. *Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat, section Sciences de la Terre*, 26(2004), 69-79.

Saha, S., Gayen, A., Pourghasemi, H. R., & Tiefenbacher, J. P. (2019). Identification of soil erosion-susceptible areas using fuzzy logic and analytical hierarchy process modeling in an agricultural watershed of Burdwan district, India. *Environmental Earth Sciences*, 78(23), 649.

Santacana, N., Baeza, B., Corominas, J., De Paz, A., & Marturiá, J. (2003). A GIS-based multivariate statistical analysis for shallow landslide susceptibility mapping in La Pobla de Lillet area (Eastern Pyrenees, Spain). *Natural hazards*, 30(3), 281-295.

Sharma, S., & Mahajan, A. K. (2018a). *A comparative assessment of information value, frequency ratio and analytical hierarchy process models for landslide susceptibility mapping of a Himalayan watershed, India.* Bull Eng Geol Environ 1–18

Sharma, S., & Mahajan, A. K. (2019). A comparative assessment of information value, frequency ratio and analytical hierarchy process models for landslide susceptibility mapping of a Himalayan watershed, India. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78(4), 2431-2448.

Shrimali, S. S., Aggarwal, S. P., & Samra, J. S. (2001). Prioritizing erosion-prone areas in hills using remote sensing and GIS—a case study of the Sukhna Lake catchment, Northern India. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 3(1), 54-60.

Sidle, R., & Ochiai, H. (2006). Processes, prediction, and land use. *Water resources monograph. American Geophysical Union, Washington.*

Slimane, A. B. (2013). *Rôle de l'érosion ravinaire dans l'envasement des retenues collinaires dans la Dorsale tunisienne et le Cap Bonthèse effectuée en co-tutelle avec l'INAT* (Doctoral dissertation, Institut National d'Etudes Supérieures Agronomiques de Montpellier).

Stevenson, P. C. (1977). An empirical method for the evaluation of relative landslip risk. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology-Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur*, 16(1), 69-72.

Stolte, J., Liu, B., Ritsema, C. J., Van Den Elsen, H. G. M., & Hessel, R. (2003). Modelling water flow and sediment processes in a small gully system on the Loess Plateau in China. *Catena*, 54(1-2), 117-130.

T

Tehrany, M. S., Pradhan, B., Mansor, S., & Ahmad, N. (2015). Flood susceptibility assessment using GIS-based support vector machine model with different kernel types. *Catena*, 125, 91-101.

Thiery, Y. (2007). *Susceptibilité du Bassin de Barcelonnette (Alpes du Sud, France) aux mouvements de versant': cartographie morphodynamique, analyse spatiale et modélisation probabiliste* (Doctoral dissertation, Université de Caen).

Thiery, Y., Malet, J. P., Sterlacchini, S., Puissant, A., & Maquaire, O. (2007). Landslide susceptibility assessment by bivariate methods at large scales: application to a complex mountainous environment. *Geomorphology*, 92(1-2), 38-59.

Thiery, Y., Maquaire, O., & Fressard, M. (2014). Application of expert rules in indirect approaches for landslide susceptibility assessment. *Landslides*, 11(3), 411-424.

Tidjani, A. D., Bielders, C. L., & Ambouta, K. J. M. (2009). Dynamique saisonnière des paramètres déterminant l'érosion éolienne sur les pâturages dunaires du Niger oriental. *Geo-Eco-Trop*, 33, 39-56.

Toumi, S., Meddi, M., Mahé, G., & Brou, Y. T. (2013). Cartographie de l'érosion dans le bassin versant de l'Oued Mina en Algérie par télédétection et SIG. *Hydrological sciences journal*, 58(7), 1542-1558.

U

Umar, Z., Pradhan, B., Ahmad, A., Jebur, M. N., & Tehrany, M. S. (2014). Earthquake induced landslide susceptibility mapping using an integrated ensemble frequency ratio and logistic regression models in West Sumatera Province, Indonesia. *Catena*, 118, 124-135.

V

Van Westen, C. J. (2000). The modelling of landslide hazards using GIS. *Surveys in Geophysics*, 21(2-3), 241-255.

Van Westen, C. J., Castellanos, E., & Kuriakose, S. L. (2008). Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment: an overview. *Engineering geology*, 102(3-4), 112-131.

Van Westen, C. J., Rengers, N., & Soeters, R. (2003). Use of geomorphological information in indirect landslide susceptibility assessment. *Natural hazards*, 30(3), 399-419.

Vezena, K., & Bonn, F. (2006). Modélisation et analyse de la dynamique spatio-temporelle des relations société-érosion et pollution diffuse en milieu agricole-étude de cas en Vietnam et au Québec. *Etude de cas en Vietnam et au Québec. Interaction Nature-Société, analyse et modèles. UMR6554 LETG, La Baule.*

Vila, J. M. (1980). La chaîne alpine de l'Algérie orientale et des confins algéro-tunisiens. *These de Doctorat-es-sciences, Université Pierre et Marie curie.*

W

Wachal, D. J., & Banks, K. E. (2007). Integrating GIS and erosion modeling: A tool for watershed management. In *Esri International User Conference. No. UC1038. 11p.*

Wachal, D. J., & Hudak, P. F. (2000). Mapping landslide susceptibility in Travis County, Texas, USA. *GeoJournal*, 51(3), 245-253.

Wang, L., Wei, S., & Horton, R. (2011). Effects of vegetation and slope aspect on water budget in the hill and gully region of the Loess Plateau of China. *Catena*, 87(1), 90-100.

White, W. R. (1986). *Problèmes d'érosion, transport solide et sédimentation dans les bassins versants: projet 5.3 du programme hydrologique international.* Unesco.

Wischmeier, W. H., & Smith, D. D. (1978). *Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning* (No. 537). Department of Agriculture, Science and Education Administration.

Y

Yves Le Bissonnais, Thorette, J., Bardet, C., & Daroussin, J. (2002). L'érosion hydrique des sols en France. *Rapport INRA, IFEN, 106.*

Z

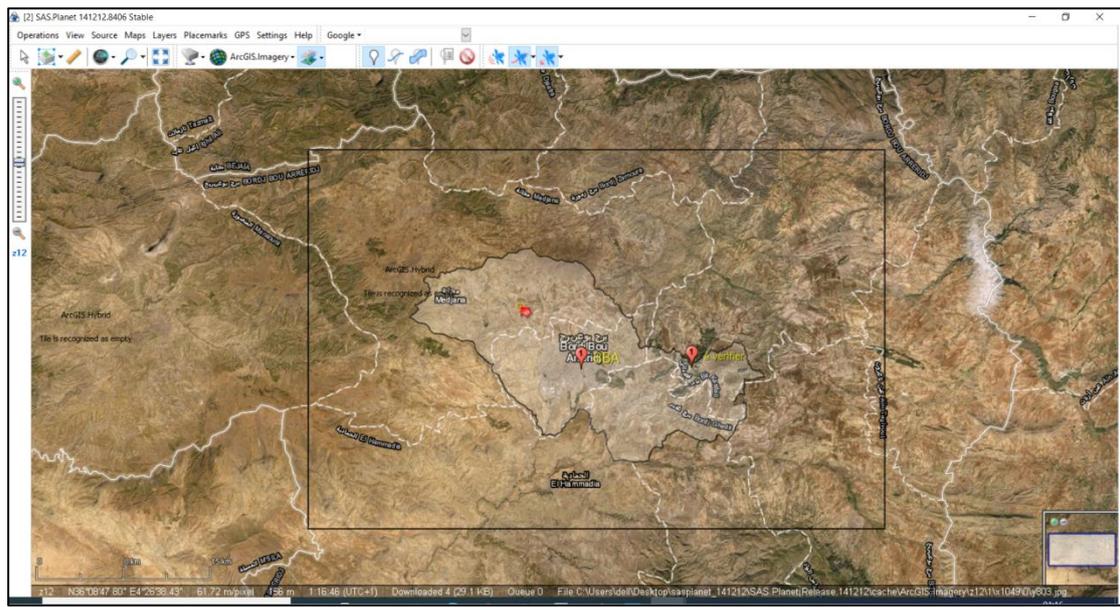
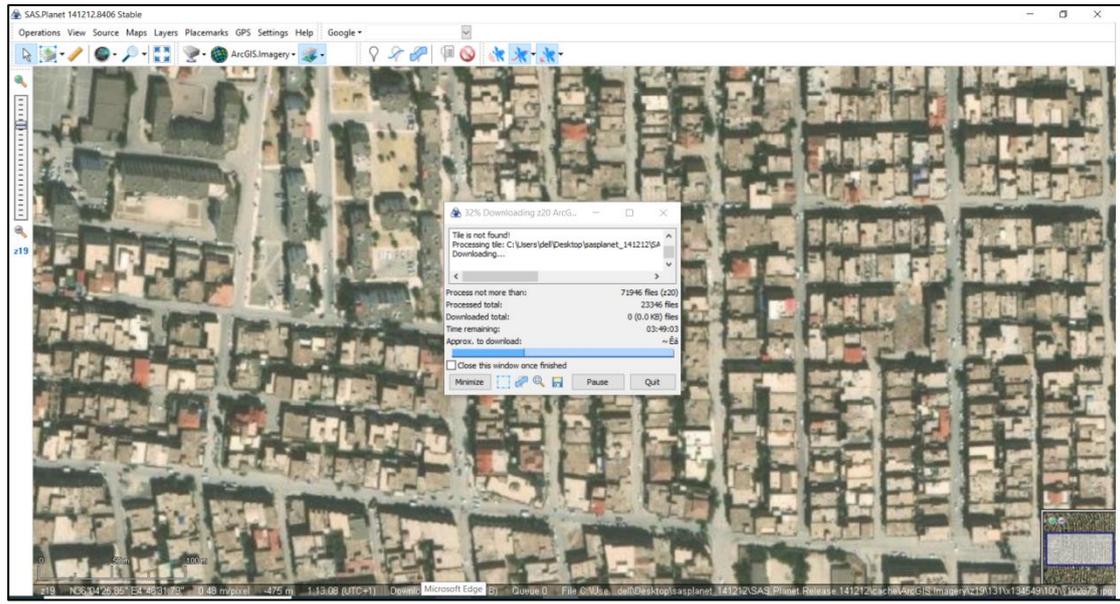
Zakerinejad, R., & Märker, M. (2014). Prediction of Gully erosion susceptibilities using detailed terrain analysis and maximum entropy modeling: a case study in the Mazayejan Plain, Southwest Iran. *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria*, 37(1), 67-76.

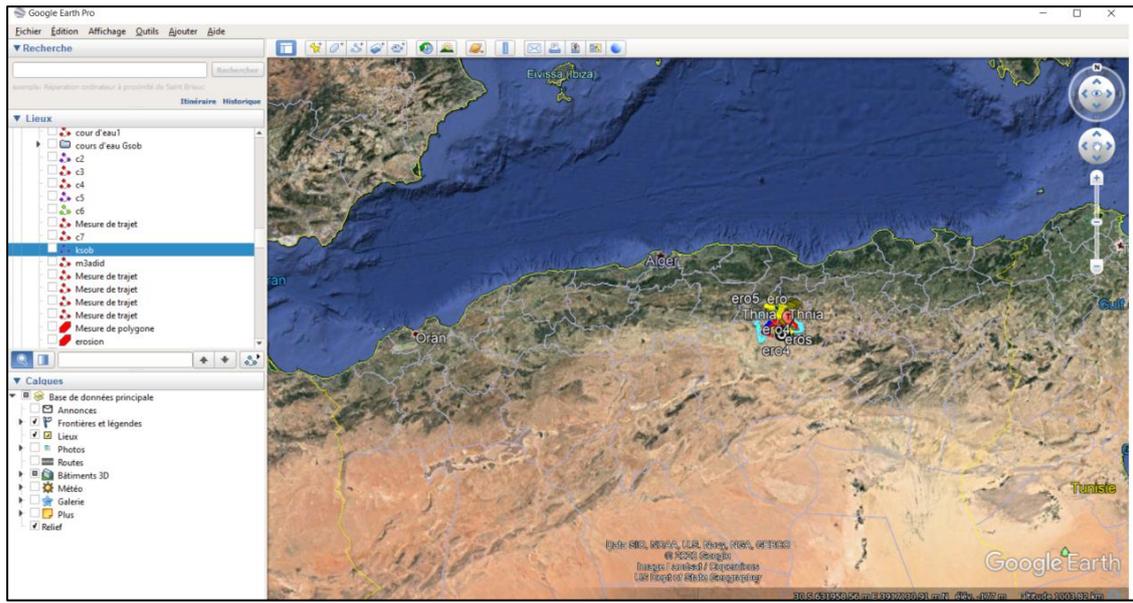
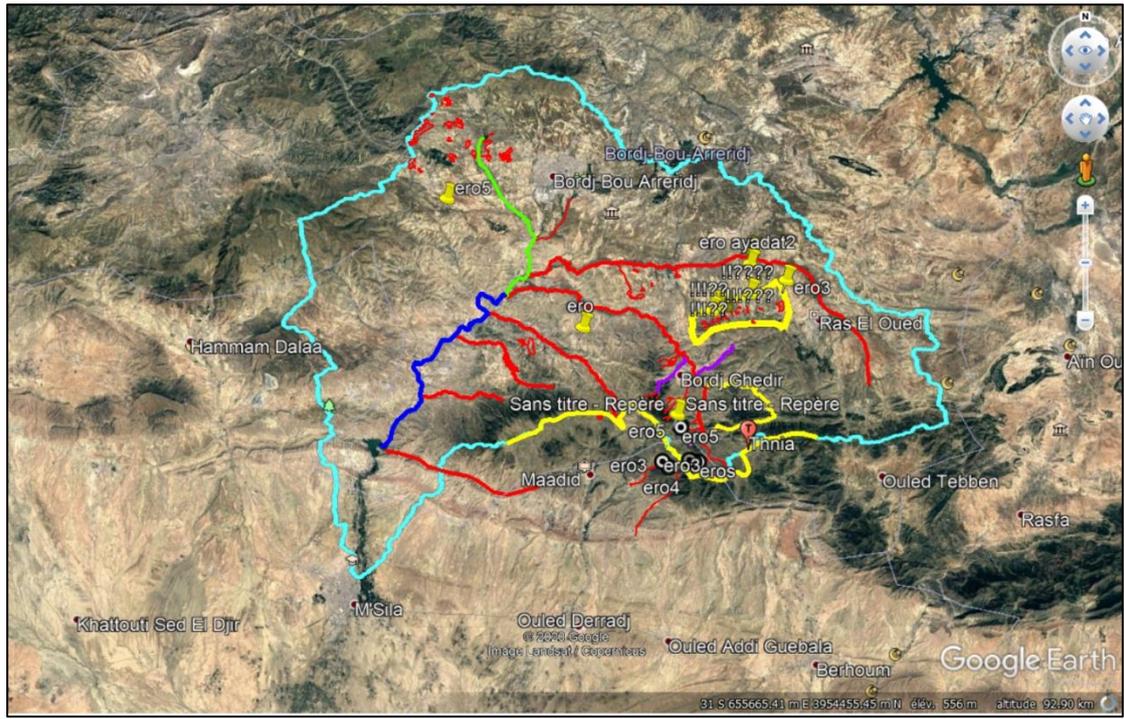
Zhu, A. X., Wang, R., Qiao, J., Qin, C. Z., Chen, Y., Liu, J., ... & Zhu, T. (2014). An expert knowledge-based approach to landslide susceptibility mapping using GIS and fuzzy logic. *Geomorphology*, 214, 128-138.

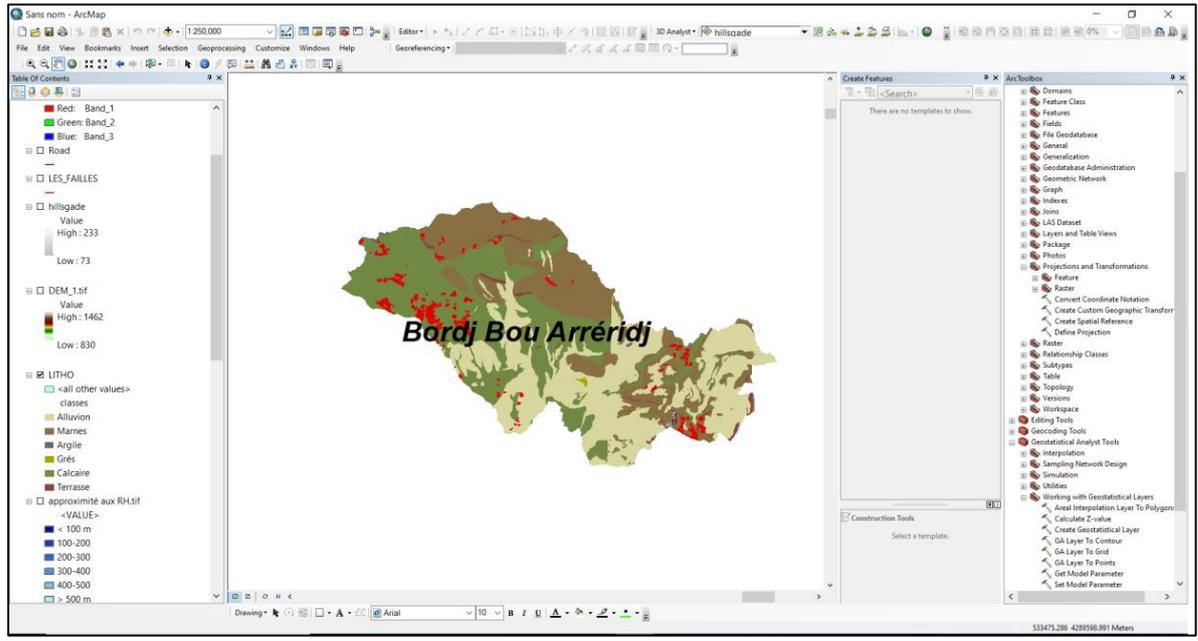
Zinck JA, Lo'pez J, Metternichtc GI, Shresthaa DP, Va'zquez-Selem L (2001). Mapping and modelling mass movements and gullies in mountainous areas using remote sensing and GIS techniques. *Int J Appl Earth Obs* 3(1):43-53.

Annexes

LOGICIELS:







The screenshot shows the Reclassify tool dialog box in ArcMap. The input raster is "Re_1_slope.tif" and the reclass field is "Value". The reclassification table is as follows:

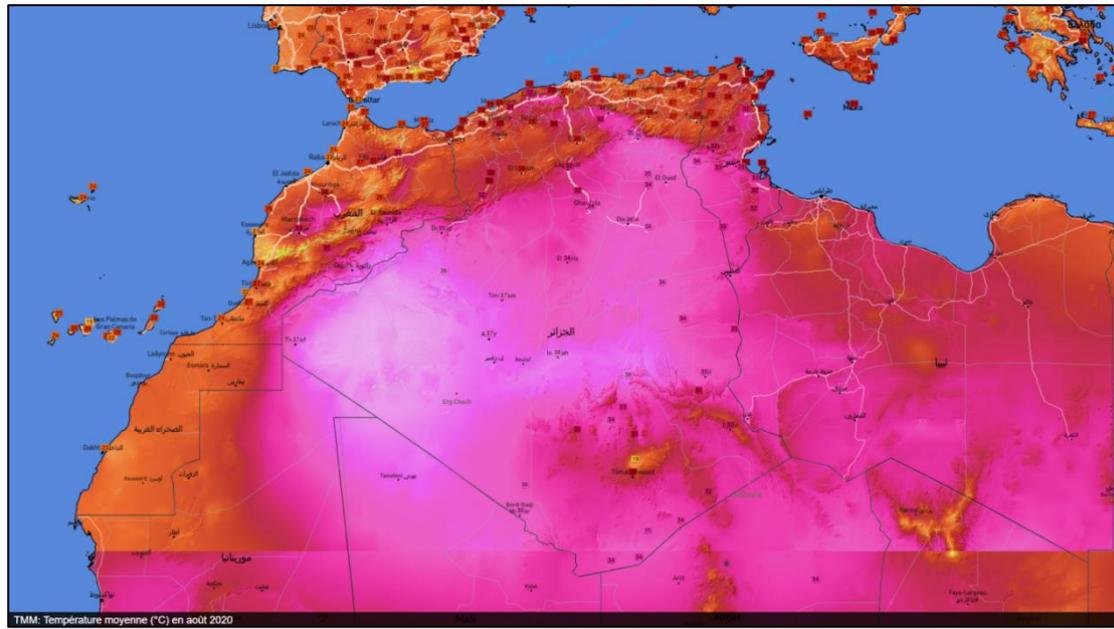
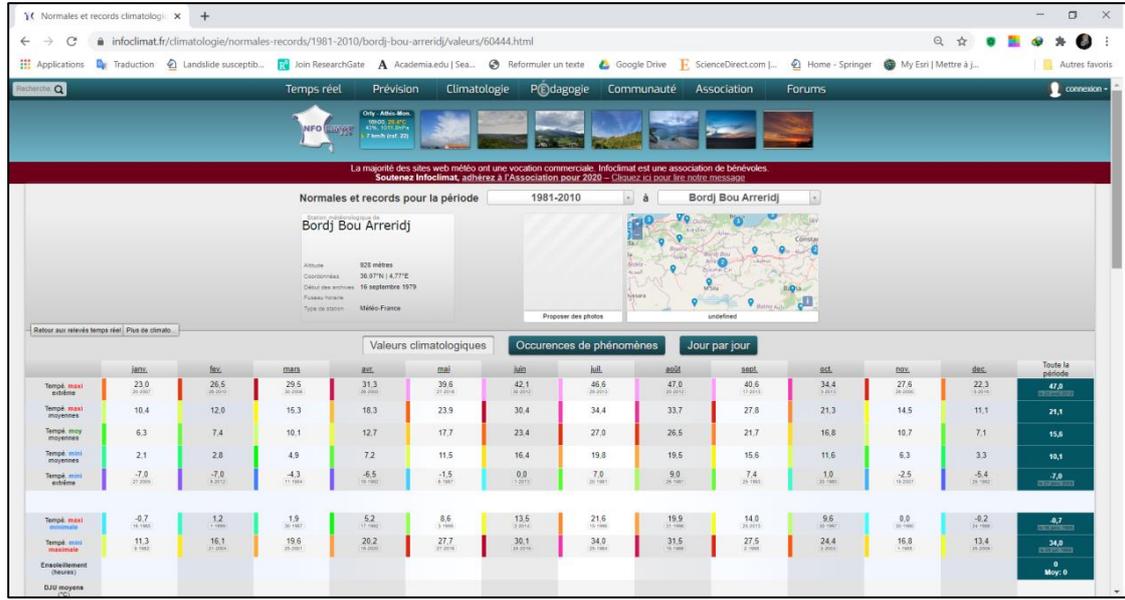
Old values	New values
1	1
2	2
3	3
4	4
5	5
6	6
7	7
NoData	NoData

The output raster is "C:\Users\Pradeep_gyawal\Documents\ArcGIS\Default1.gdb\Reclass_sf1". Below the dialog box, a data table is shown with the following content:

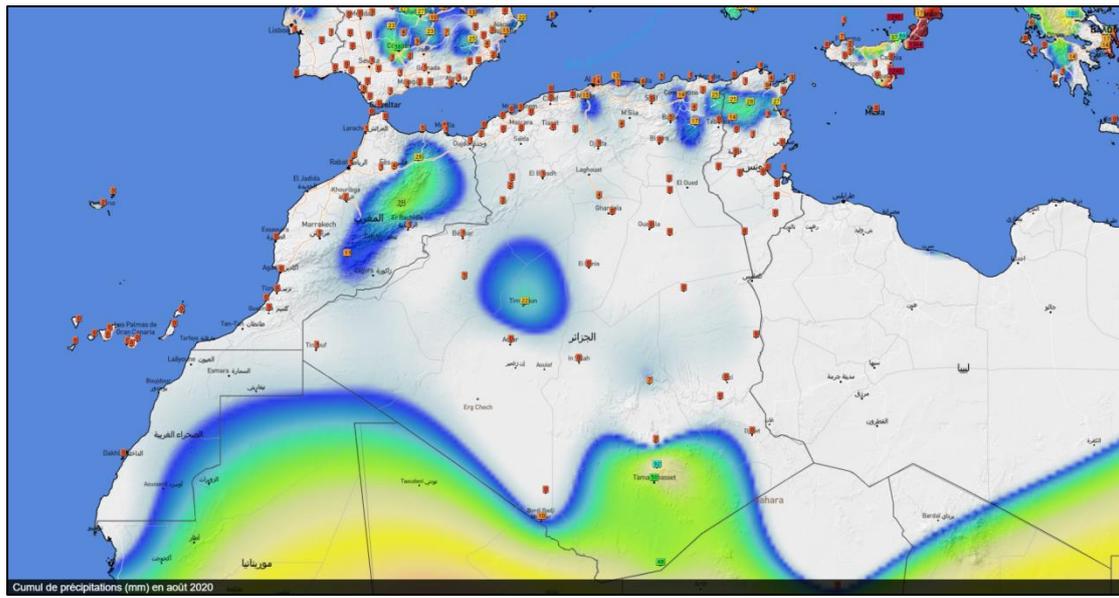
Q4	A	B	C	D
1	5%	Data Layers	Class	Class F
2		Slope (Degree)	0-10	266448
3			10-20	465773
4			20-30	558377
5			30-45	401557
6			45-55	49189
7			55-65	6763
8			>65	588
9		Total		
10	2	Plan Curvature	Concave (<-0.05)	840390
11			Flat (-0.05-0.05)	82744
12			Convex (+0.05)	825648
13		Total		
14	3	Aspect	Flat (-1)	513
15			North (0-22.5 and 337.5-360)	220344
16			North-east (22.5-67.5)	204634
17			East (67.5-112.5)	191059
18			South-east (112.5-157.5)	244035
19			South (157.5-202.5)	278119
20			South-west (202.5-247.5)	243764
21			West (247.5-292.5)	185400
22			North-west (292.5-337.5)	180825
23		Total		

DONNÉES CLIMATIQUE:

Températures:



Precipitation:



infoclimat.fr/climatologie/annee/2019/bordj-bou-arreidj/valeurs/60444.html

Applications Traduction Landslide susceptib... Join ResearchGate Academia.edu | Sea... Reformuler un texte Google Drive ScienceDirect.com | Home - Springer My Eni | Mettre à j... Autres favoris

Recherche Temps réel Prévision Climatologie Pédagogie Communauté Association Forums connexion

City: **Alger** - **Algérie**
 36.82°N 3.07°E
 4 kmh (est. 11)

Infoclimat, ce sont 1,6 millions de lignes de code, plus de 3 milliards de données stockées. Conçu et maintenu par des bénévoles. Soutenez Infoclimat, adhérez à l'Association pour 2020 - Cliquez ici pour lire notre message.

Climatologie de l'année 2019 à **Bordj Bou Arreidj (DZ)** VALIDER

Bordj Bou Arreidj
 INSEE: 04044
 Altitude: 523 mètres
 Coordonnées: 36.82°N 3.07°E
 Début des archives: 16 septembre 1979
 Fuseau horaire: Type de station: METEOROLOGIE

Proposer des photos Stations les plus proches

Sur votre site Graphiques Cartes Climatologie

	janv. 2019	fév.	mars 2019	avr. 2019	mai 2019	juin 2019	juil. 2019	août 2019	sept. 2019	oct. 2019	nov. 2019	déc. 2019	Année complète
Temp. maxi extrême	13,3 (-1)			20,4	24,1	35,7	38,2	37,0		24,5	14,3	14,6	42,6
Temp. maxi moyennes				14,0	16,8	27,3	29,8	29,0		18,4	10,5	10,1	19,5
Temp. moy moyennes				7,8	9,5	18,9	21,3	21,0		12,2	6,7	5,6	12,9
Temp. mini extrême	-2,2 (-1)			2,2	4,6	9,3	15,3	14,4		13,2	7,2	0,6	-2,2
Temp. mini moyennes				8,4	17,3	27,9	32,7	28,2		29,9	15,0	6,9	9,6
Temp. mini maximale	3,8 (-1)			13,2	15,6	30,1	29,2	26,3		18,3	15,5	13,6	30,4

Matérielles :







