

N° d'ordre 01/2012-M/INF

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
UNIVERSITE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE HOUARI BOUMEDIENE
FACULTE D'ELECTRONIQUE ET INFORMATIQUE



Mémoire

Présentée pour l'obtention du diplôme de Magister
En Informatique

Par
NOUIOUA Leila

SUJET :

Analyse multicritères et modélisation du comportement d'un
bassin versant dans un SIG

Soutenue publiquement le 24 septembre 2012, devant le jury composé de:

M. MS.GUETTOUCHE	Professeur	à l'USTHB	Président
M. M. BELHADJ AISSA	Maitre de Conférences /A	à l'USTHB	Directeur de mémoire
M ^{me} . S.AOUAT	Maitre de Conférences /A	à l'USTHB	Examinatrice
M. K.ATIF	Maitre de Conférences /A	à l'USTHB	Examineur
M. B.BESSAA	Maitre Assistant /A	à l'USTHB	Invité

RESUME:

L'érosion hydrique des sols est une thématique d'une grande importance et un processus majeur de dégradation des terrains en Algérie, qui constitue une des clés de la désertification (UNEP, 1994). La modélisation de l'érosion hydrique est utilisée pour estimer la quantité des sédiments transportés par l'eau. Les modèles d'érosion hydriques font appel à de nombreuses variables facilement obtenues avec une connaissance spatiale (par télédétection) : occupation du sol, couvert végétal, topologie, matériaux et sol, la plus utilisée est l'équation Universelle de pertes en sol (USLE)

Dans le présent travail, nous faisons usage d'un système d'information géographique (SIG) pour la cartographie et l'évaluation quantitative de l'érosion hydrique en utilisant trois modèles, à savoir l'équation universelle des pertes en sols (USLE), une extension de l'USLE appliquées sur les sous bassins et l'Equation d'Onstad et Foster (OF). L'objectif principal est de spatialiser des modèles ponctuels d'évaluation de l'érosion et de localiser des zones prioritaires pour d'éventuelles interventions d'aménagement.

Ces trois modèles ont été utilisés pour l'évaluation des risques d'érosion au bassin versant Sikkak situé au nord Ouest de l'Algérie. Les résultats obtenus indiquent une interdépendance entre l'intensité de l'érosion et les quantités de sédiments transportés varient essentiellement en fonction de l'occupation actuelle des sols ainsi que de la nature des terrains et des pentes.

MOTS –CLE: Bassin versant, Erosion hydrique, Perte en sol, modèle d'érosion hydrique, USLE, OF, sédimentation, transport

ABSTRACT:

Soil erosion by water is a very important theme and a major process of land degradation, which constitutes one of the keys of desertification (UNEP, 1994). Modelling the soil erosion by water is usually used to estimate the quantity of sediment carried by water in basins. The models of water erosion take into account numerous variables easily obtained through a spatial knowledge (using remote sensing): land cover, vegetal cover, topology, material and soil, the most used is the Universal Soil Loss Equation (USLE).

In this work, we used a geographical information system (GIS) for the cartography and quantitative evaluation of water erosion by using three models: the universal soil losses equation (USLE), an extended USLE model applied on sub basins and Onstad & Foster Equation (OF). These approaches enabled us to spatialize specific models of erosion evaluation and to locate priority zones for possible management intervention.

These three models are applied in order to evaluate the erosion risks in the basin of Sikkak which is situated in the North West of Algeria. Results obtained indicates an interdependence between the intensity of erosion and the quantities of sediments transported and the current land use as well as the nature of the grounds and slopes.

KEYWORDS: WaterShed, Water erosion, Soil Loss, water erosion models, USLE, OF Equation, sedimentation, transport

Liste des figures

Figure 1.1. Les trois Volets d'un SIG [Dang07].....	02
Figure 1.2. Notion de couches thématique [Esri 07].....	03
Figure 1.3. Intégrité au sein de la Géodatabase [Esri07].....	03
Figure 1.4. Gestion en fichiers de formes	04
Figure 1.5. Mode Vectoriel [RES 12].....	04
Figure 1.6. Mode Raster [RES 12].....	05
Figure 1.7. Formats usuels de MNT [CHE 05].....	06
Figure 1.8. Distinction entre bassin versant réel et bassin versant topographique [Roc 63]	07
Figure 1.9. La direction d'écoulement dans un bassin versant.....	07
Figure 1.10. Longueurs caractéristiques d'un bassin versant [MUS 05].....	08
Figure 1.11. Calcul de la pente moyenne du cours d'eau [LIN 82]	09
Figure 1.12. Processus de l'extraction du réseau hydrographique et des limites du bassin versant [BES 10].	10
Figure 1.13. La hiérarchie du réseau hydrographique[STR 57].	11
Figure 1.14. Découpage du bassin versant en sous bassins [BES 10].	11
Figure 2.1. Triangle textural renseigné en classes de stabilité structurale [TRI 04]	14
Figure 2.2. Classification des facteurs accentuant le phénomène d'érosion.	16
Figure 2.3. Schéma d'un talus anti-érosif.....	17
Figure 2.4. Classification des modèles de l'érosion hydrique [FLI05].	20
Figure 2.5. Schématisation de model déposition-sédimentation [GAR 08]	26
Figure 3.1. Schéma méthodologique représentant les différentes étapes de la conception.....	31
Figure 3.2. Schéma méthodologique représentant les différentes étapes de l'USLE (El Garouani et al., 2003b).	34
Figure .3.3. Répartition mensuelle des pluies.....	35
Figure 3.5. Schématisation de model sédimentation	36
Figure 3.6. Le calcul de la perte en sol nette.	36
Figure 3.7. Diagramme de cas d'utilisation de l'utilisateur.....	42
Figure 3.8. Diagrammes de séquence du calcul de perte en sol.	42
Figure 3.9. Diagramme de séquence de la simulation de l'érosion hydrique.....	43
Figure 3.11. Diagramme de séquence de la consultation des images.....	43
Figure 3.13. Diagramme d'état du système.....	45

Figure 3.14. Diagramme de classe métier.....	46
Figure 4.1. Situation du bassin versant de l'Oued Sikkak.....	49
Figure 4.2. Carte lithologique du bassin versant de Sikkak.....	49
Figure 4.3. Images «Erodibilité (R)», «Occupation du sol (C)» du bassin Sikkak.....	50
Figure 4.4. Images «MNT», «Direction» et «facteur LS» du bassin Sikkak.....	51
Figure 4.5. La cartographie de la perte en sol du bassin Sikkak en utilisant USLE.	52
Figure 4.6. La classification et la distribution des pertes en sol évaluées par l'USLE.	52
Figure 4.7. Image « Classe Chenaux » du bassin Sikkak.....	54
Figure 4.8. Image « Code Chenaux » du bassin Sikkak.....	54
Figure 4.9. La perte en sol nette du bassin Sikkak en utilisant le modèle Sédimentation avec un polygone = un pixel.	55
Figure 4.10. La classification et la distribution des pertes en sol nette du bassin Sikkak en utilisant le modèle Sédimentation avec un polygone = un pixel.	55
Figure 4.11. Image « Sous Bassin » et la base de données du bassin Sikkak.....	56
Figure 4.12. La perte en sol nette du bassin Sikkak en utilisant le modèle Sédimentation avec un polygone = un sous bassin.	57
Figure 4.13. La classification et la distribution des pertes en sol nettes du bassin Sikkak en utilisant le modèle Sédimentation avec un polygone = un sous bassin.	58
Figure 4.14. La perte en sol nette du bassin Sikkak en utilisant le modèle OF.	59
Figure 4.15. La classification et la distribution des pertes en sol nettes du bassin Sikkak en utilisant le modèle OF.	59
Figure 4.16. La classification des pentes et de l'érodibilité du bassin de Sikkak.	61
Figure 4.17. Impact des paramètres sur les pertes en sol évaluées par USLE.	62
Figure 4.18. Impact des paramètres sur les pertes en sol évaluées par OF (Onstad & Foster)	62
Figure 4.19. Exemple de simulation de l'érosion selon l'évaluation du modèle OF.	63

Liste des tableaux

Tableau.3.3 Répartition mensuelle des pluies.....	43
Tableau.3. 4. Tableau de quelques types de sols	43
Tableau 3.10. Scénario de la simulation.....	51
Tableau 3.12. Scénario de la consultation	52
Tableau 4.1. Caractéristiques morphométriques du bassin versant de Sikkak.....	60

Liste des abreviations

BV : Bassin Versant

SIG : Système d'Information Géographique

UML : Unified Modeling Language

DAO : Dessin Assisté par Ordinateur

ASAL : Agence Spatiale Algérienne.

SBV : Sous Bassin Versant

SI : Système d'Information

SIAD : Système d'information d'Aide à la Décision

MNT : Modèle Numérique de Terrain

TIN :Triangular Irregular Network (Réseau de triangles irréguliers)

LCA : Longueur d'un bassin versant

L : Longueur du cours d'eau principal

USLE : Equation universelle de perte des sols

SDR : Rapport de Restitution de Sédiments

OF : Equation de Onstad et Foster

EDM : Modèle érosion-sédimentation

CSU : Modèle de l'Université du Colorado

Sommaire

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

Chapitre 1

SIG, MNT ET BASSINS VERSANTS

Introduction	2
1. Système d'information géographique	3
1.1 Définition d'un SIG.....	3
1.2 Fonctionnement d'un SIG.....	3
1.3. Mode de gestion.....	5
1.3.1. Gestion en Géodatabase	5
1.3.2. Gestion en fichiers graphiques (fichiers de forme)	5
1.4 Modes de représentation de l'information géographique	6
1.4.1. Mode vectoriel.....	6
1.4.2. Mode Raster.....	6
2 Modèle numérique de terrain	7
2.1. Description	7
2.2 Formats du MNT.....	8
3 Réseau Hydrographique et Bassins Versants	9
3.1. Définition d'un bassin versant	9
3.2. Définition d'un Réseau hydrographique	9
3.3. Les longueurs et les pentes caractéristiques du réseau.....	10
3.3.1. Les longueurs	10
3.3.2. Le profil longitudinal du cours d'eau	11
3.3.3. La pente moyenne d'un cours d'eau	11
3.4. Extraction automatique du réseau hydrographique à partir du MNT [BES 10].....	12
Conclusion.....	15

Chapitre 2

L'Erosion dans un bassin versant : Processus et modèles

Introduction	16
1. Le phénomène de ruissellement et de l'érosion.....	16
2. Les facteurs accentuant le phénomène de l'érosion.....	19
2.1. Le facteur physique: La topographie	20
2.1.1. Influence de la valeur de la pente	20
2.1.2. Rôle de la longueur de la pente	20
2.2. Les méthodes culturales	20
2.3. Les effets des éléments linéaires permanents: [HAS 00]	21
2.3.1. L'effet de la voirie	21
2.3.2. L'effet des fossés	21
2.3.3. L'effet des talus	22
3. Hiérarchisation des différents paramètres	23
4. Les formes de l'érosion	24
4.1. L'érosion diffuse	24
4.2. L'érosion linéaire ou concentrée	24

5. Modélisation de l'érosion d'un bassin versant	24
5.1. Modèles empiriques	25
5.1.1. Equation de Fournier	25
5.1.2. Equation de Flaxman	26
5.1.3. Equation de Dendy et Bolton	27
5.1.4. Equation universelle de perte des sols – USLE.....	27
5.1.5. Equation universelle de perte des sols modifiée - MUSLE	29
5.2. Modèles conceptuels	30
5.2.1. Equation de Onstad et Foster – OF	30
5.2.2. Modèle érosion-sédimentation (EDM)	31
5.2.3. Modèle sédimentation	32
5.2.4. Modèle ANSWERS	33
5.3. Modèles mécanistes	35
5.3.1. Modèle de Foster et Meyer	35
5.3.2. Modèle de l'Université du Colorado	35
6. Les modèles d'érosion : Etude Critique	36
Conclusion	38

Chapitre 3 **Modélisation et conception**

Introduction	39
1. Méthodologie proposée	39
2. Les couches des données en entrées	40
3. Les Modèles d'érosion	42
3.1. Le modèle : USLE	42
3.1.1. Méthodologie	42
3.1.2. Détermination des paramètres	43
3.2. Le modèle sédimentation	46
3.2.1. Méthodologie	46
3.3. Le modèle Onstad et Foster (OF)	48
4. Modélisation UML	50
4.1. Identification des acteurs	50
4.2. Spécification des besoins	50
4.2.1. Diagramme des cas d'utilisation	51
4.2.2. Diagramme de séquence métier	52
4.3. Diagramme d'état	55
4.4. Diagramme de classe	56
Conclusion	59

Chapitre 4 **Testes et résultats**

Introduction	48
1. Présentation générale du bassin versant	48
1.1. Caractéristiques physiques	48
1.2. Géologie du site	49
2. Evaluation des pertes en sol.....	49

2.1. Application du modèle USLE	50
2.1.1. Données de départ.....	50
2.1.2. Réalisation de la carte d'érosivité	51
2.2. Application du modèle Sédimentation1 (Polygone= pixel)	53
2.2.1. Données de départ.....	53
2.2.2. Réalisation de la carte d'érosivité	55
2.3. Application du modèle Sédimentation2 (polygone= sous bassin)	56
2.3.1. Données de départ.....	56
2.3.2. Réalisation de la carte d'érosivité	57
2.4. Application du modèle OF	58
2.4.1. Données de départ.....	58
2.4.2. Réalisation de la carte d'érosivité	60
3. Interprétation des résultats	60
4. Simulation du processus de l'érosion hydrique dans le bassin de Sikkak	63
Conclusion	63
Conclusion générale	
Bibliographie.....	

Introduction

générale

Introduction générale

L'érosion des sols en Algérie touche de nombreuses régions, c'est un phénomène naturel, dû au vent et particulièrement à l'eau, qui s'exprime sur l'ensemble des terres. La perte de la couche superficielle du sol par érosion réduit sa fertilité et les baisses de rendements dans les secteurs touchés témoignent de cet effet. Le phénomène peut parfois prendre des tournures catastrophiques, soit par l'expression exceptionnelle de l'un de ses facteurs (très fortes pluies...), soit en raison des modifications apportées par l'homme aux paysages.

L'érosion hydrique est une thématique qui s'impose de jour en jour au niveau des politiques environnementales. Le phénomène par son ampleur est aujourd'hui appréhendé en termes de risque naturel. C'est un phénomène fortement spatialisé car sa prévisibilité temporelle demeure un exercice difficile et surtout hasardeux dans l'état actuel des connaissances.

En revanche la prévisibilité spatiale, objet de ce travail, peut être établie avec beaucoup de précision. En effet, depuis le début des années quatre vingt dix, la communauté scientifique s'est principalement intéressée au développement des modèles qui permettent de mieux comprendre le phénomène à l'échelle de la parcelle. Cependant, les décideurs politiques ont besoin d'outils pour estimer l'érosion des sols à l'échelle régionale afin de mettre en place une stratégie de conservation des sols adaptée, de plus l'érosion a des répercussions sur les cycles des sédiments, nutriments et sur celui de la qualité des eaux. Les prédictions de ces répercussions nécessitent une modélisation du phénomène adaptée.

S'il est possible de réduire considérablement l'érosion hydrique par le biais de techniques adaptées, il est d'abord nécessaire de cibler les secteurs de forte érosion nécessitant une intervention prioritaire car le phénomène revêt un caractère d'irréversibilité.

Les phénomènes hydrologiques sont généralement étudiés au moyen des modèles hydrologiques de bassins versants. Ces modèles de bassins versants exigent l'information physiographique telle que la configuration du réseau hydrographique, la localisation de surface drainée et les propriétés géométriques de bassin versant.

Traditionnellement, ces paramètres sont obtenus à partir des cartes ou des enquêtes de terrain. Pendant les deux dernières décennies, cette information a été de plus en plus dérivée directement des représentations numériques de la topographie. La représentation numérique de la topographie s'appelle un modèle numérique de terrain.

La dérivation automatisée des données topographiques par modèle numérique de terrain est plus rapide, moins subjective et fournit des mesures plus reproductibles que les techniques traditionnelles appliquées aux cartes topographiques. Les données numériques produites par cette approche ont également l'avantage qu'elles peuvent être aisément importées et analysées par des systèmes d'information géographique.

Les progrès technologiques fournis par les systèmes d'information géographique et la disponibilité croissante et la qualité des modèles numériques de terrain ont considérablement augmenté le potentiel applicatif de ce dernier dans divers domaines : l'hydrologie, l'hydraulique, la gestion de l'eau et les investigations environnementales.

Le présent travail rentre dans le cadre de la prévention des risques d'érosion hydrique en Algérie et plus particulièrement au bassin versant de Sikkak situé au nord-ouest de l'Algérie. Cependant, les méthodologies développées ici ne se limitent pas à ce contexte mais peuvent être utilisées dans d'autres situations et d'autres zones d'étude.

Dans le but d'estimer les pertes en sol présentes dans notre zone d'étude, nous avons eu recours à différents modèles mathématiques, ce qui nous permettra de tester leur efficacité et lequel est le mieux adapté dans notre bassin. Nous avons également mené une analyse multicritère sur les résultats (estimations des pertes en sol) des différents modèles conçus afin d'étudier l'impact de chaque paramètre sur les résultats, et donc établir une hiérarchie de ces paramètres. Cette hiérarchie permettra donc de savoir comment pallier aux risques d'érosion dans cette zone et quelles mesures doit-on prendre pour lutter contre l'érosion.

Le présent mémoire est structuré en deux grandes parties. La première partie est introductive et contient deux chapitres. Le chapitre 1 présente les outils principaux de notre travail ; les systèmes d'information géographiques (SIG) et les modèles numériques de terrain (MNT).

Le chapitre 2 présente deux phénomènes observés dans les bassins versants, à savoir le ruissellement et l'érosion ainsi que la classification de ses différents modèles mathématiques afin de synthétiser les connaissances existantes. Ceci est nécessaire pour avoir une vision d'ensemble de ce phénomène complexe dans le but de mettre au point la méthode la plus fiable. Ces deux chapitres privilégient les aspects en liaison directe avec le contexte de notre travail.

La deuxième partie présente notre contribution et comprend les chapitres 3 et 4. Le chapitre 3 présente une intégration des SIG et des différents modèles conçus dans une approche structurée et globale de la problématique. Ce travail est décrit par deux étapes importantes : l'importation des images nécessaires pour évaluer les pertes en sol à partir du SIG et le modèle calculant les pertes en sols. Dans le chapitre 4, nous présentons notre zone d'étude, les données décrivant cette zone et les résultats obtenus après l'application des modèles présentés dans le chapitre 3 dans notre zone d'étude (Bassin Sikake), ces résultats sont analysés et discutés.

Nous terminons par une conclusion et des perspectives pour améliorer ces résultats et tester l'efficacité d'autres méthodes d'estimation de perte en sols.

Chapitre1

SIG, MNT

Et

Bassin Versants

Introduction

Le Système d'Information Géographique (SIG) est un système moderne permettant de rassembler, stocker et traiter des données, de sources et d'échelles différentes, décrivant ainsi le milieu naturel, la dynamique démographique et les différentes activités (activités agricoles, industrielles, touristiques, etc.). Il permet aussi de les combiner pour produire une cartographie à la fois globale, locale et synthétique. Le SIG est un système d'analyse spatiale qui met à la disposition du thématique voire du gestionnaire, des outils d'analyse rapide de l'information. Ce système fonctionne comme un outil de diagnostic et d'aide à la prise de décision.

D'après les divers domaines d'applications, le SIG englobe certaines fonctionnalités de plusieurs disciplines telles que la cartographie, le dessin assisté par ordinateur (DAO), les bases de données, la télédétection et les spatiaux-cartes.

Dans le cadre de notre travail, nous nous intéressons au domaine hydrologique et plus particulièrement à l'étude du comportement d'un bassin versant (BV). Le nombre des paramètres spatiaux nécessaires, montre bien l'apport des SIG dans ce domaine.

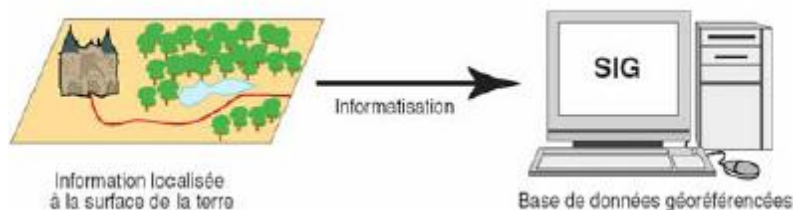
L'information la plus intéressante du point de vue de l'hydrologue concerne les MNT (modèle numérique de terrain) et certaines images pour des sections importantes: sols, indice de végétation, géologie, précipitation, température, etc.

Dans ce chapitre nous présentons certaines généralités sur les SIG, les MNT et les bassins versants.

1. Système d'information géographique

1.1 Définition d'un SIG [Esri,07]

Nés il y a une trentaine d'années, les systèmes d'information géographique ont évolué très rapidement, surtout durant les 20 dernières années, grâce aux progrès technologiques sans cesse grandissants. Leur origine récente et leur progression rapide rendent difficile l'établissement d'une définition adéquate.



Un système d'information géographique est un système informatique de matériels, de logiciels, et de processus conçus pour permettre la collecte, la gestion, la manipulation l'analyse, la modélisation et l'affichage de données à référence spatiale afin de résoudre des problèmes complexes d'aménagement et de gestion [Luis, 03].

1.2 Fonctionnement d'un SIG

D'après [Herv 05] [Luis 03], le SIG peut être défini comme un ensemble de procédures informatisées qui offrent aux professionnels des fonctions adaptées pour le stockage, l'extraction, le traitement et l'affichage des données à référence spatiale à l'aide de trois volets :

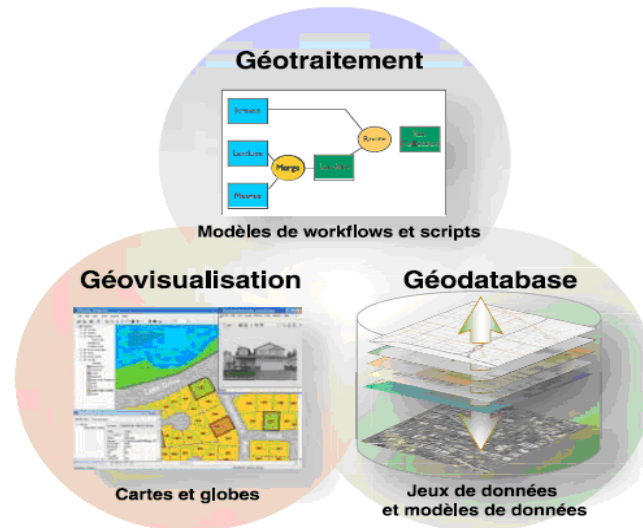


Figure 1.1. Les trois Volets d'un SIG [DAN07]

a. Volet géodatabase : Un SIG se connecte à une base de données spatiale. Cette dernière décrit les objets manipulés géographiquement et sémantiquement.

b. Volet géovisualisation : Un SIG est un ensemble de cartes et de vues qui montrent les entités et leurs relations à la surface de la terre. Il est possible d'élaborer différentes vues cartographiques afin d'effectuer des requêtes, des analyses et de modifier les informations géographiques.

c. Volet géotraitement : Un SIG comprend des outils de transformation des données qui produisent des informations à partir des données existantes en appliquant des fonctions analytiques.

Un SIG contient généralement plusieurs sortes d'objets géographiques appelés Informations Géographiques, organisés sous forme de couches superposées, où chacune englobe les objets de même nature (routes, bâtiments, cours d'eau, limites de communes, entreprises,...). Chaque objet est constitué d'une forme (géométrie de l'objet) et d'une description (appelé aussi sémantique).

Le niveau géométrique est la description de la position et de la forme des objets. La position peut s'exprimer par la latitude et la longitude des objets (ou des points qui composent ces objets) ou par des coordonnées x, y dans un système de projection.

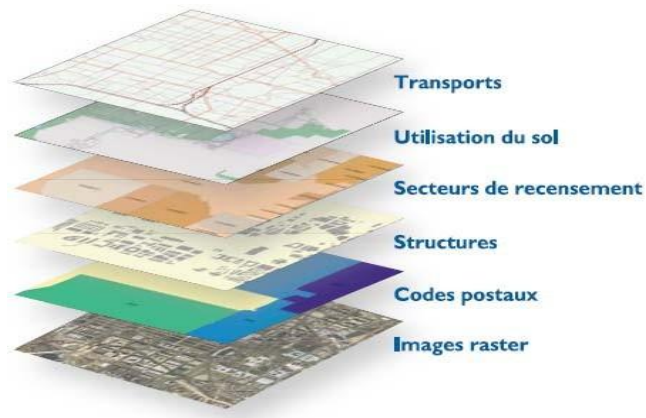


Figure 1.2. Notion de couches thématique [Esri 07]

Les objets peuvent être identifiés sous forme de points (villes, entreprises,..), de lignes (routes, chemins de fer,...) et de polygones (communes, occupation du sol,...).

A chaque objet est attribuée une fiche contenant des informations de type alphanumérique. Ces informations décrivent l'objet (nom de la ville, code de la commune, type de l'occupation du sol,...). Ces fiches permettent de stocker des informations qui décrivent les objets.

1.3. Mode de gestion

La gestion des données géographiques peut être envisagée selon deux approches :

1.3.1. Gestion en Géodatabase

La géodatabase est une base de données géographique orientée objet, qui inclut les tables attributaires et les relations notamment les associations topologiques. Les entités d'une classe sont stockées en tant qu'enregistrement dans une table où la géométrie est stockée dans un champ *shape*. Cette approche présente l'avantage d'être « sécurisée », en particulier dans un environnement Multi-Utilisateurs nécessitant une stricte gestion des accès concurrentiels. Elle est particulièrement adaptée à la gestion des grands volumes de données, à forte périodicité de mise à jour (ex. : un SIG de simulation du trafic autoroutier).

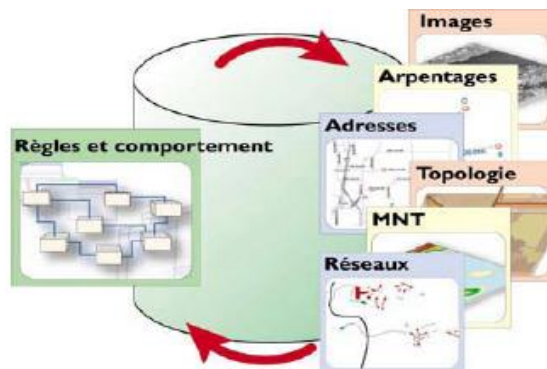


Figure 1.3 Intégrité sein de la Géodatabase [Esri07]

1.3.2. Gestion en fichiers graphiques (fichiers de forme)

Un fichier de forme stocke la forme des attributs d'une classe d'entité géographique ayant une géométrie simple (point, ligne ou polygone). Un fichier de forme est constitué de trois fichiers : un fichier de données spatiales (.shp), un fichier d'index (.shx) et un fichier de données attributaires (.dbf) Cette approche est plus facile à mettre en oeuvre, en particulier lorsque les volumes des données sont réduits et où la périodicité de mise à jour est faible

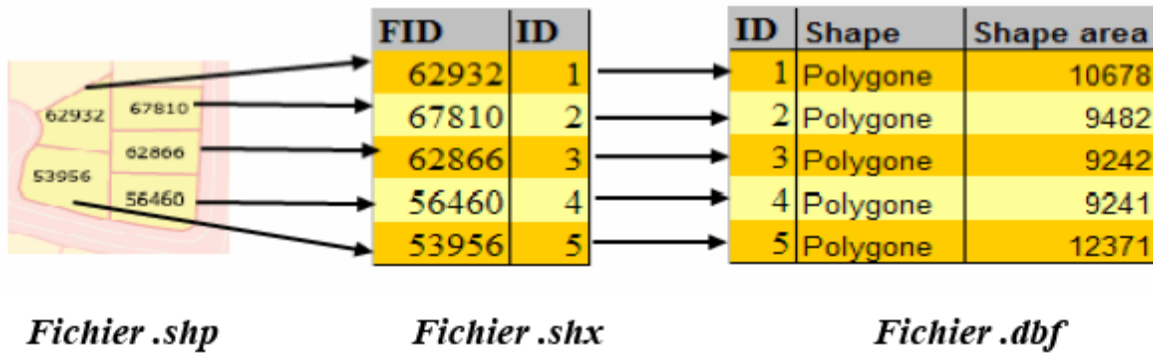


Figure 1.4 Gestion en fichiers de formes

1.4 Modes de représentation de l'information géographique

Il existe deux modes de représentations de l'information géographique :

« Le mode vecteur » et « le mode Raster ». Ce choix dépend de la disponibilité des données, et / ou du niveau de détail de représentation exigé.

1.4.1. Mode vectoriel [RES 12]

Le Mode vecteur permet de représenter le monde réel sous forme de points, lignes ou polygones :

- les points identifient des lieux sous forme de coordonnées
- les lignes connectent les points (réseau d'eau potable),
- les polygones sont formés par des lignes connectées entre elles, représentant une surface (parcelle).

Ces entités spatiales sont alors définies par les coordonnées de leur contour dans un système de coordonnées cartésiennes en X et Y.

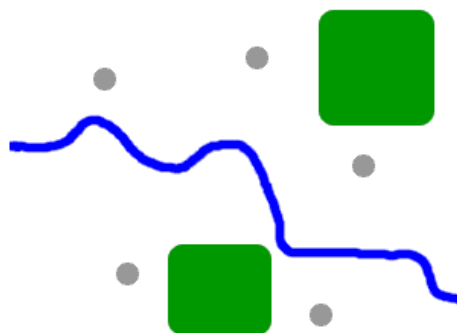


Figure 1.5. Mode Vectoriel [RES 12]

1.4.2. Mode Raster

Représente un espace découpé selon une grille régulière de taille prédéterminée (la résolution).

A chaque maille est attribuée une valeur numérique et une seule, pouvant correspondre à une mesure (pollution, altitude), à une catégorie (type de végétation) ou à l'identifiant d'un objet (numéro d'une commune, d'une route, d'une école).

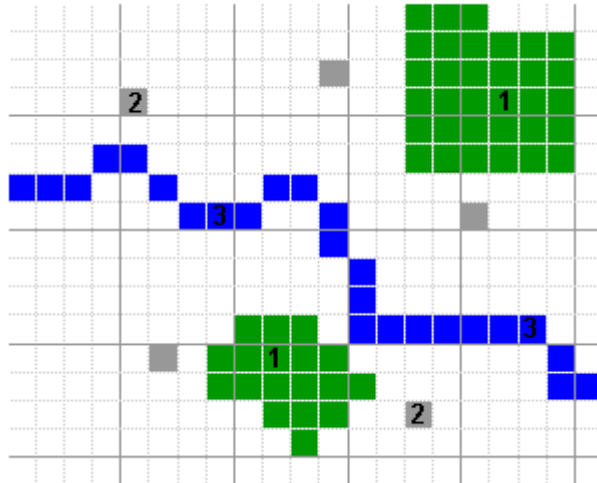


Figure 1.6. Mode [RES 12]

2 Modèle numérique de terrain

2.1. Description [CHA 01]

Un modèle numérique de terrain « MNT » est une représentation numérique de terrain en termes d'altitude qui représente la topologie sur une zone géographique donnée.

Le MNT fournit une représentation partielle du relief du terrain.

Dans un MNT, on distingue deux types de résolution, la résolution planimétrique ou spatiale et la résolution altimétrique. La résolution spatiale est relative à la taille du pixel, elle représente la portion du terrain représentée par un pixel, alors que la résolution altimétrique dépend de l'unité de mesure des valeurs d'altitude.

La troisième dimension apportée par le MNT a permis d'améliorer les processus de visualisation et de modélisation des phénomènes dépendant du relief. A partir de cette information, plusieurs paramètres topographiques peuvent être extraits. Nous citons principalement: la pente et l'encaissement.

La pente : définie par deux composantes : un module (composante verticale de la dérivée première) et une orientation (composante horizontale selon les points cardinaux, appelée azimut).

L'encaissement : somme pondérée par la distance des dénivelées entre un point et ses huit voisins dans un MNT. Cette notion permet de définir une typologie géomorphologique en familles de formes de terrain : plans horizontaux (absence significative de relief) ; versants inclinés ; sites encaissés (vallées, dépressions,

cuvettes) ; sites dominants (crêtes, sommets) ; cols (points bas de deux lignes de crête, points hauts de deux lignes de talweg le plus généralement).

Ces paramètres peuvent être utilisés dans l'étude et la modélisation des systèmes complexes tels que l'hydrologie et la gestion des risques naturels (comme l'érosion hydrique) où intervienne la topographie.

2.2 Formats du MNT [CHE 05]

Plusieurs formats existent pour représenter un MNT, tels que dans chacun, le terrain est subdivisé en entités de base régulières ou irrégulières. Le choix d'un format dépend de l'exploitation du MNT.

Les formats les plus utilisés sont : les courbes de niveau, le réseau de triangles irréguliers (*Triangular Irregular Network* : TIN) et le format de grille régulière (raster) (Figure I.5). Les deux premiers formats sont relatifs à une représentation vectorielle alors que la dernière correspond à la représentation raster.

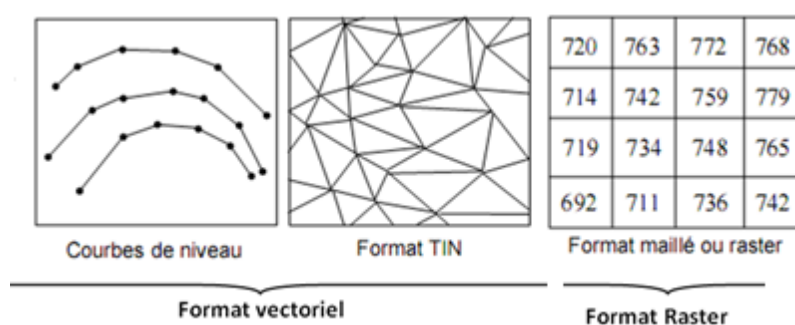


Figure 1.7. Formats usuels de MNT [CHE 05]

- **Courbes de niveau** : ou isoplèthes d'altitude, elles permettent de relier les points sur la carte ayant la même altitude. Chaque courbe est représentée par une polyligne fermée ou ouverte et chaque deux courbes successives sont séparées par une différence altimétrique fixe appelée équidistance. Plus les courbes de niveau sont rapprochées, plus la pente est forte.
- **Réseau de triangles irréguliers (TIN)**: la surface topographique est représentée par des facettes triangulaires adjacentes, de forme et de taille variables construites à partir d'un nuage de points.
- **Grille maillée (Raster)**: c'est un ensemble de valeurs numériques régulièrement distribuées représentant des altitudes, présenté sous forme d'une grille. Chaque valeur correspond à une altitude moyenne d'une portion de la surface du terrain. Les dimensions de cette dernière définissent la résolution spatiale du MNT.

3 Réseau Hydrographique et Bassins Versants

3.1. Définition d'un bassin versant

Défini comme l'élément essentiel dans les études hydrologiques, un bassin versant d'une rivière, ou d'un oued considéré en un point donné représente l'aire limitée par le contour à l'intérieur duquel l'eau précipitée se dirige vers ce point (appelé exutoire). Les limites du bassin sont définies topographiquement par une ligne de crête qui le sépare des bassins voisins. Cette ligne est appelée aussi ligne de partage des eaux.

Elle représente les limites du bassin topographique, alors que pour certains sols perméables, dans le cas d'une circulation interne et particulièrement intense, le bassin versant réel peut être différent [ROC 63].

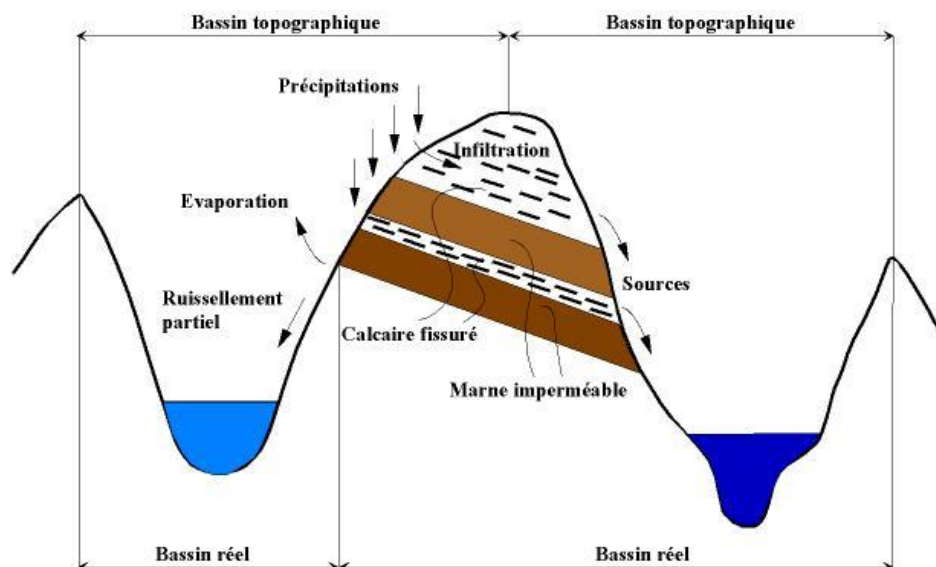


Figure 1.8. Distinction entre bassin versant réel et bassin versant topographique [ROC 63].

3.2. Définition d'un Réseau hydrographique

L'eau collectée par le bassin versant est transférée dans une trajectoire définie par la pente vers un point dit exutoire du bassin. Ce dernier, est défini comme le point le plus en aval du réseau hydrographique par lequel passent toutes les eaux drainées par le bassin.

L'ensemble des cours d'eau participant à l'écoulement de surface représente le réseau hydrographique. Il est sans doute une des caractéristiques les plus importantes du bassin et il peut prendre une multitude de formes.

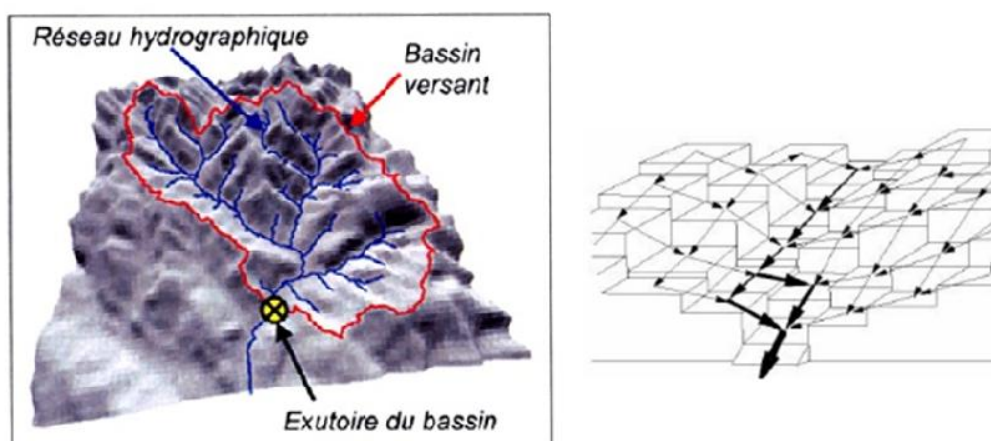


Figure 1.9. La direction d'écoulement dans un bassin versant.

Plusieurs facteurs interviennent dans l'apparition d'un écoulement surfacique, comme l'occupation du sol, la pluviométrie et la topographie. Cette dernière qui représente l'information maîtresse extraite à partir d'un MNT est supposée être le facteur dominant pendant l'opération de l'extraction automatique du réseau hydrographique. Ce qui paraît réaliste d'après Crave [CRA 95] pour des systèmes dont le processus dominant

est le ruissellement. Cette hypothèse a donné naissance à des méthodes d'extraction automatique du réseau hydrographique et des limites du bassin à partir d'un MNT.

3.3. Les longueurs et les pentes caractéristiques du réseau

3.4.1. Les longueurs

Un bassin versant se caractérise principalement par les deux longueurs suivantes, illustrées sur la figure ci-dessous:

- La longueur d'un bassin versant (LCA) est la distance curviligne mesurée le long du cours d'eau principal depuis l'exutoire jusqu'à un point représentant la projection du centre de gravité du bassin sur un plan [MUS 12]
- La longueur du cours d'eau principal (L) est la distance curviligne depuis l'exutoire jusqu'à la ligne de partage des eaux, en suivant toujours le segment d'ordre le plus élevé lorsqu'il y a un embranchement et par extension du dernier jusqu'à la limite topographique du bassin versant. Si les deux segments à l'embranchement sont de même ordre, on suit celui qui draine la plus grande surface.

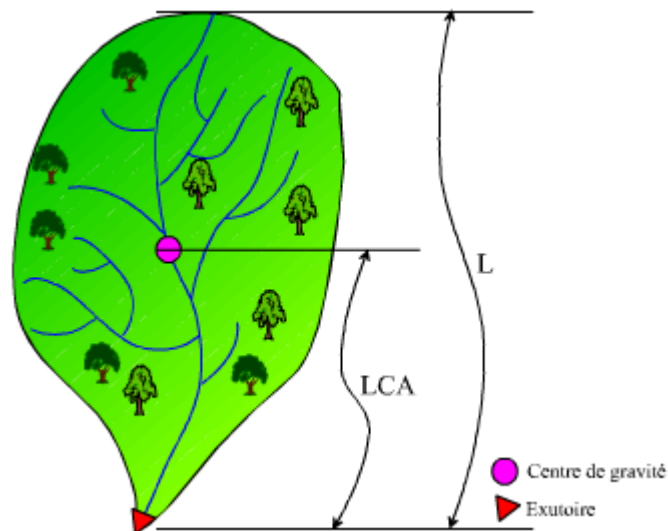


Figure 1.10 Longueurs caractéristiques d'un bassin versant [MUS 05]

3.3.2. Le profil longitudinal du cours d'eau

On a l'habitude de représenter graphiquement la variation altimétrique du fond du cours d'eau en fonction de la distance à l'émissaire. Cette représentation devient intéressante lorsque l'on reporte les cours d'eau secondaires d'un bassin versant qu'il est alors facile de comparer entre eux et au cours d'eau principal.

3.3.3. La pente moyenne d'un cours d'eau

La pente moyenne du cours d'eau détermine la vitesse avec laquelle l'eau se rend à l'exutoire du bassin donc le temps de concentration. Cette variable influence donc le débit maximal observé.

Une pente abrupte favorise et accélère l'écoulement superficiel, tandis qu'une pente douce ou nulle donne à l'eau le temps de s'infiltrer, entièrement ou en partie, dans le sol.

Le calcul des pentes moyennes et partielles de cours d'eau s'effectue à partir du profil longitudinal du cours d'eau principal et de ses affluents. La méthode la plus fréquemment utilisée pour calculer la pente

longitudinale du cours d'eau consiste à diviser la différence d'altitude entre les points extrêmes du profil par la longueur totale du cours d'eau.

$$P_{moy} = \frac{\Delta H_{max}}{L}$$

Où :

P_{moy} : pente moyenne du cours d'eau [m/km] ;

ΔH_{max} : dénivellation maximale de la rivière [m] (différence d'altitude entre le point le plus éloigné et l'émissaire) ;

L : longueur du cours d'eau principal [km].

On préfère parfois utiliser d'autres méthodes plus représentatives : par exemple celle qui consiste à assimiler la pente moyenne à la pente de la droite tracée entre les points situés à 15% et 90% de distance à partir de l'exutoire, suivant le cours d'eau principal Benson, ou encore, comme le préconise Linsley [LIN 82], on prend la pente de la ligne, tracée depuis l'exutoire, dont la surface délimitée est identique à la surface sous le profil en long.

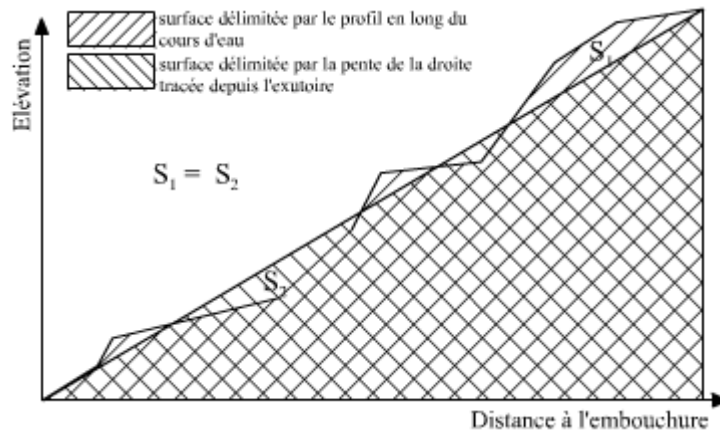


Figure 1.11. Calcul de la pente moyenne du cours d'eau [LIN 82]

3.4. Extraction automatique du réseau hydrographique à partir du MNT [BES 10]

Le format raster est le format le plus adapté aux méthodes d'extraction qu'un format vecteur (TIN ou courbes de niveaux). Il est caractérisé par l'organisation régulière des cellules et par la facilité de les analyser et de les atteindre.

Plusieurs méthodes d'extraction automatique du réseau hydrographique à partir d'un MNT de format raster sont proposées. Elles sont classées en trois familles selon le type d'analyse suivi :

- Les méthodes hydrologiques qui sont basées sur la simulation de l'écoulement de l'eau qui suit la ligne de la plus grande pente.
- Les méthodes de type géomorphologique qui exploitent la variation altimétrique entre le pixel et son voisinage.
- Les méthodes combinées qui allient les deux en faisant suivre l'analyse géomorphologique par une analyse hydrologique.

La figure 1.12. Présente les différentes étapes de la méthode hydrologique introduite dans [BES 10] pour l'extraction du réseau hydrographique et des limites d'un bassin versant.

Dans cette méthode, un réseau de référence est utilisé pour la vérification des résultats. Ce réseau est obtenu par digitalisation manuelle à partir d'une carte topographique au 1/200 000 de la zone d'étude et ses paramètres géomorphologiques sont déterminés pour la comparaison avec les différents réseaux générés à partir du MNT.

Deux paramètres géomorphologiques sont utilisés: Le nombre de points d'émergence (têtes de rivières) et le nombre de points de confluence qui représentent les paramètres fondamentaux

Pour l'étude et la simulation du comportement des bassins versants [GAN 97] (Gandolfi et al. 1997), [LIN 06] (Lin et al, 2006).

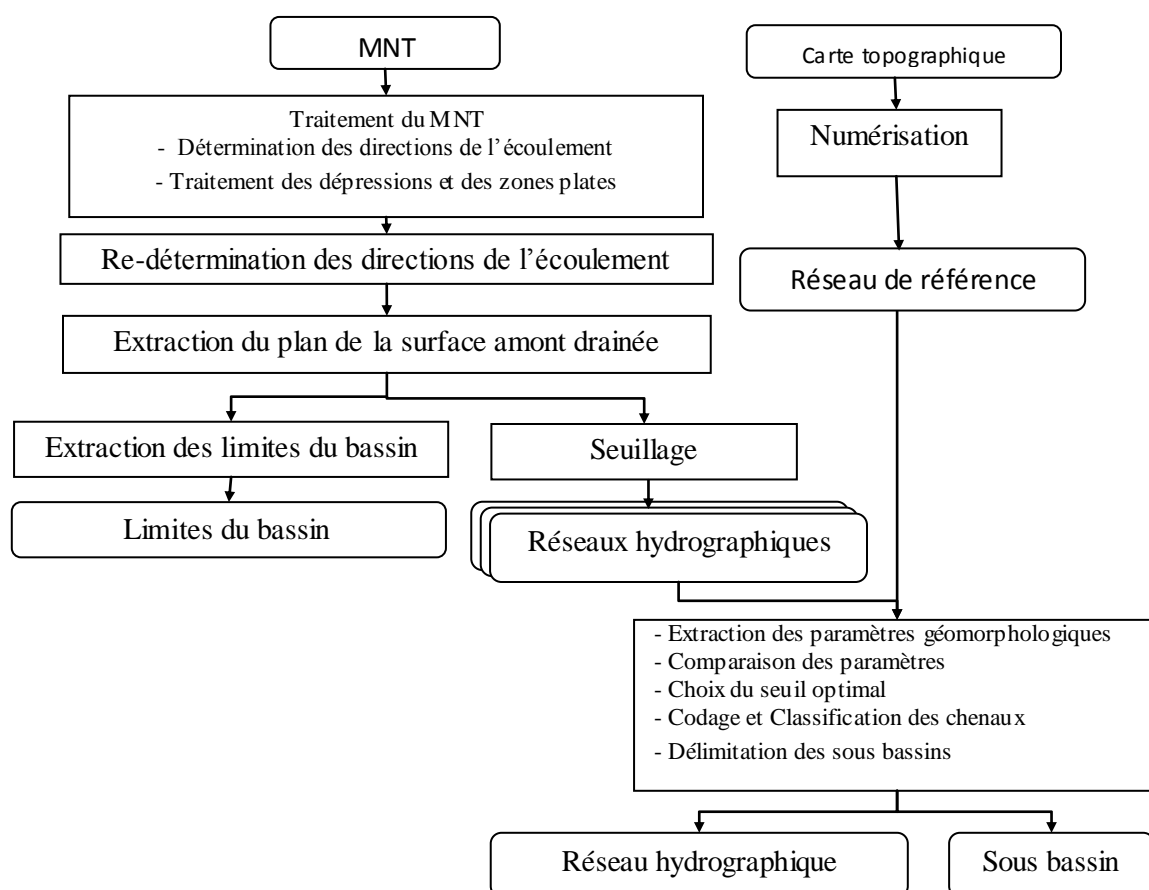


Figure 1.12. Processus de l'extraction du réseau hydrographique et des limites du bassin versant [BES 10].

En premier lieu, pour définir les directions de l'écoulement, on utilise l'algorithme D8 avec schéma unidirectionnel. Les codes sont attribués aux directions selon la méthode proposée par Jenson & al [JEN 88] et en utilisant une table de décision. Un traitement particulier est entrepris pour les dépressions et les zones plates rencontrés lors de l'établissement du plan de direction (selon la méthode Martz[MAR98]).

En second lieu, une classification des différents chenaux trouvés est faite afin de déterminer les lignes de partage et l'exutoire, et donc déterminer les limites du bassin versant (la classification de strahler [STR57]).

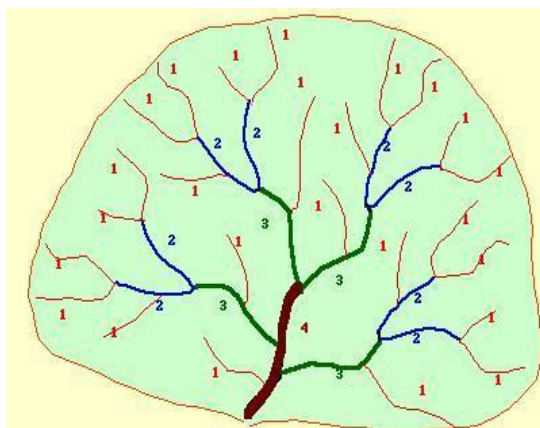


Figure 1.13. La hiérarchie du réseau hydrographique [STR 57].

Ensuite, le réseau hydrographique est généré pour plusieurs seuils de la surface amont drainée (40, 50, ..., 90, 100). Pour chacun d'eux, nous calculons : le nombre de points d'émergence et le nombre de points de confluence. Le seuil dont le réseau est le plus proche du réseau référence est choisi comme seuil de référence pour la suite du traitement.

Enfin, pour chaque chenal du réseau hydrographique trouvé (dont le seuil est choisi), un sous bassin versant est défini. Ce dernier est codé et est classé selon le chenal correspondant. Dans ce cas, le bassin versant est découpé en sous bassins (Figure 1.14). Le traitement est effectué dans le sens d'écoulement. Les sous bassins relatifs aux chenaux de la première classe (les feuilles de l'arbre) sont les premiers à délimiter, ensuite le traitement est effectué aux sous bassins de la deuxième classe et ainsi de suite jusqu'à ce qu'on arrive au chenal contenant l'exutoire principal.

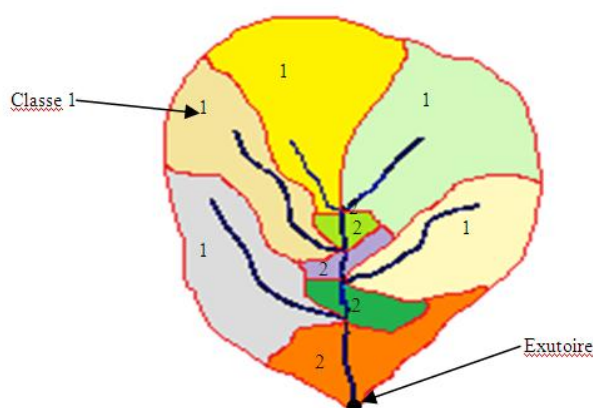


Figure 1.14. Découpage du bassin versant en sous bassins [BES 10].

Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous avons présenté les notions de base des systèmes d'information géographique (SIG) et quelques principes et méthodologies des modèles numériques de terrain (MNT) ainsi que leurs intérêts et leurs structures.

Nous avons également introduit l'un des grands domaines d'application des SIG et MNT : l'Hydrologie et plus précisément les bassins versants dans lesquels plusieurs phénomènes sont produits et nécessitent une étude profonde.

La disponibilité de l'information topographique dans un modèle numérique de terrain (MNT) et la nécessité d'un SIG pour interroger ces informations les rend indispensables dans l'étude et la simulation du comportement des bassins versants. Nous avons présenté un exemple de leur utilisation pour extraire les réseaux hydrographiques et leurs bassins versants ainsi que leurs paramètres géomorphologiques.

Dans le chapitre suivant, nous présenterons un phénomène hydrique très intéressant à l'intérieur des bassins versants, à savoir l'érosion hydrique.

Chapitre 2

L'Erosion dans un bassin versant : processus et modèles

Introduction

Le domaine de l'hydrologie fait intervenir un grand nombre de paramètres complexes qui concernent l'environnement, la méthodologie et la nature du sol afin d'étudier ou prévoir une diversité de problèmes ou risques telles que l'érosion hydrique des sols. Ce phénomène se développe lorsque les eaux de pluie, ne pouvant plus s'infiltrer dans le sol, ruissellent sur la parcelle en emportant les particules de terre. Une fois le ruissellement déclenché sur la parcelle, l'érosion peut prendre différentes formes qui se combinent dans le temps et dans l'espace pouvant ainsi causer des dégâts sur les deux plans : économique et humain.

Les processus érosifs dépendent d'une multiplicité de facteurs interagissant entre eux, et sont de ce fait complexes à modéliser.

Pour étudier ce phénomène, il est nécessaire d'utiliser un modèle mathématique faisant intervenir les différents facteurs devant être pris en compte pour le décrire.

Dans ce chapitre, nous décrivons les processus de ruissellement et de l'érosion dans un bassin versant ainsi que les différents types des modèles mathématiques qui nous permettent d'avoir une vision globale et de simuler le phénomène de l'érosion hydrique.

1. Le phénomène de ruissellement et de l'érosion [GEO 08]

Afin de mener à bien cette étude, il est essentiel tout d'abord de faire un résumé des connaissances existantes sur les phénomènes de ruissellement et d'érosion dans un bassin versant. Ceci dans le but de mettre en évidence les facteurs principaux devant être intégrés dans le SIG pour estimer le degré de risque pour chaque parcelle du bassin versant.

Selon [GEO 08] « le ruissellement est l'écoulement superficiel des eaux pluviales, se rendant directement aux thalwegs sans passer par l'intermédiaire des sources. »

Selon [COS 00] « le ruissellement est la circulation de l'eau qui se produit sur les versants en dehors du réseau hydrographique, que cette circulation soit connectée, ou non, à un drain permanent. »

Nous pouvons distinguer deux origines au ruissellement :

- Le ruissellement par dépassement du seuil d'infiltration qui se produit sur un sol non saturé lorsque l'intensité des précipitations est plus forte que la capacité d'infiltration du sol.
- Le ruissellement par dépassement du seuil de saturation qui se déclenche lorsque le sol est déjà saturé en eau.

Il existe différentes formes de ruissellement [COS 00]:

- Le ruissellement diffus dont l'épaisseur est faible et dont les filets d'eau buttent et se redivisent sur le moindre obstacle.
- Le ruissellement anastomosé: multiples chenaux secondaires qui se divisent et qui se rejoignent.
- Le ruissellement concentré, organisé en rigoles parallèles le long de la plus grande pente.
- Le ruissellement en nappe, plutôt fréquent sur les pentes faibles, occupe toute la surface du versant.

La quantité d'eau qui ruisselle dépend de trois facteurs :

- L'intensité des précipitations.

- La perméabilité du sol.
- La saturation en eau du sol.

Les deux facteurs physiques contrôlant le ruissellement sont la texture et la profondeur du sol, qui en déterminant la réserve utile du sol, conditionnent sa capacité d'infiltration.

Un sol à texture limoneuse va être sensible au ruissellement car il est sensible à la battance : selon le type de travail du sol, une croûte se forme plus ou moins rapidement et limite l'infiltration de l'eau.

Selon le triangle de texture adapté à la sensibilité des sols au ruissellement [TRI 04], les sols ont une susceptibilité forte à très forte à émettre du ruissellement à partir d'un taux d'argile de 17,5% et un taux de limons de 45%.

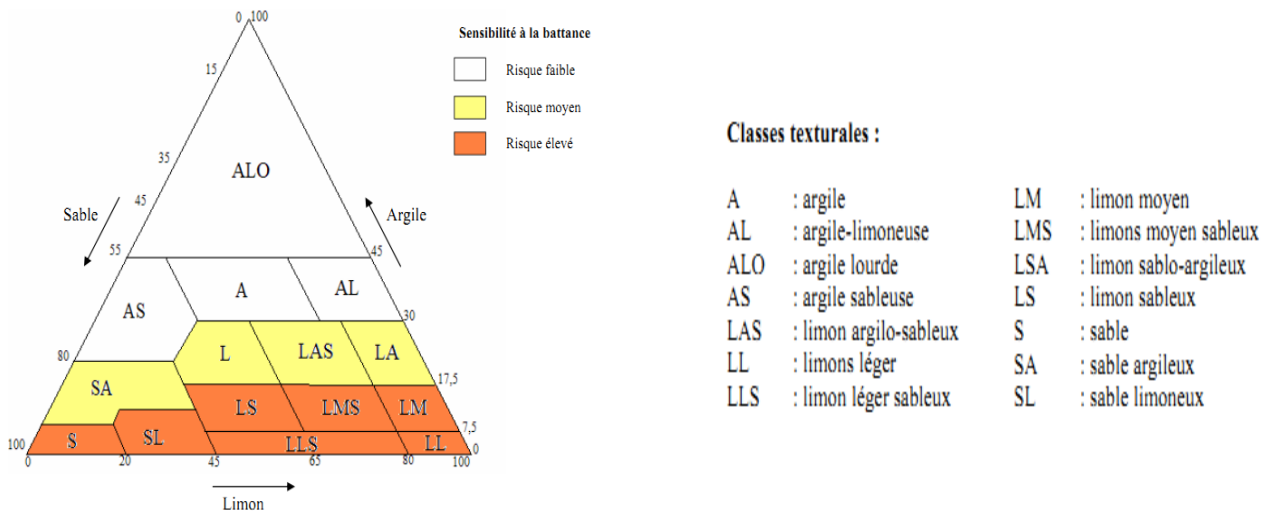


Figure 2.1. Triangle textural renseigné en classes de stabilité structurale [TRI 04]

Ce phénomène de ruissellement de l'eau en surface provoque un deuxième phénomène aux conséquences importantes, l'érosion des sols.

L'érosion des sols par l'eau est un phénomène complexe qui résulte de divers processus (détachement, transport, dépôt) causés par l'action en général combinée de la pluie et du ruissellement, et dont l'expression varie en fonction de la résistance du milieu (sol nu, couvert végétal, techniques culturales) et de la topographie [ROO 84].

Le détachement des particules du sol se produit lorsque les gouttes de pluie brisent les agrégats (effet "splash") ou quand la force de cisaillement de la lame d'eau à la surface du sol dépasse les possibilités de résistance au détachement de ce sol. L'action cisailante de l'écoulement de l'eau est d'autant plus importante que la vitesse du courant est forte.

Le transport des particules s'effectue généralement par l'eau donc l'un des principaux agents responsables du transport sur des distances appréciables reste le ruissellement.

La sédimentation se produit lorsque le courant n'est plus capable de maintenir les particules en suspension et résulte d'un ralentissement de la vitesse d'écoulement [KAU 10].

L'érosion des sols est aujourd'hui un phénomène généralisé dans les secteurs de grandes cultures. Elle est à l'origine de rigoles, et de ravines, qui apparaissent y compris sur des pentes assez peu marquées [LIE 04]. Le critère le plus important pour apprécier la résistance d'un sol à l'érosion est la stabilité structurale qui est l'aptitude de la terre à résister à l'action dégradante de l'eau. Cette résistance reflète leur comportement à l'humectation lorsqu'ils sont soumis à l'impact des gouttes de pluie. La stabilité structurale est influencée par de nombreuses caractéristiques des sols dont les plus importants sont la texture, la teneur en matière organique et l'état et l'histoire hydrique. Il existe un indice d'instabilité structurale (Is) qui varie de 0,1 à plus de 100 pour les terres les moins stables [BER 02].

- La composition granulométrique: Kheyrahi et Monnier, cités par [AUZ 92] mettent en évidence que les sols limoneux apparaissent comme les plus instables au contraire des sols argileux. Par ailleurs, ces deux auteurs démontrent que les sols à texture plus grossière ou plus fine sont moins sensibles au détachement par la pluie du fait de la masse plus importante de leurs particules ou de la plus grande stabilité des agrégats.

- La matière organique: elle favorise l'agrégation des particules entre elles et a ainsi une influence positive sur la stabilité structurale, influence d'autant plus grande que la teneur en argile est faible. Elle agit essentiellement en modifiant la mouillabilité du sol puisqu'elle favorise l'infiltration de l'eau lorsque le sol est humide. Dans un sol limoneux type et sur sol labourable, un taux de matière organique de 2,5 à 3% est considéré comme bon. Par contre, sur des prairies, ce taux est fréquemment de 4 à 6%.

- L'état et l'histoire hydrique expliquent d'importantes variations de la stabilité structurale et de la sensibilité au tassement. L'histoire hydrique intervient du fait des modifications de mouillabilité des constituants organiques [AUZ 92]. La stabilité du sol augmente si le sol reste faiblement humide pendant plusieurs jours et inversement, diminue lorsqu'il est à proximité de saturation. Les flux d'infiltration qui conditionnent le ruissellement dépendent de l'état de surface et du système de porosité, influencé par l'état de compacité, la fissuration et l'activité biologique [AUZ 92].

2. Les facteurs accentuant le phénomène de l'érosion

L'évolution des pratiques et des paysages agricoles, ainsi que l'accroissement de l'urbanisation ont conduit à accentuer les mécanismes aggravant les écoulements de surfaces.

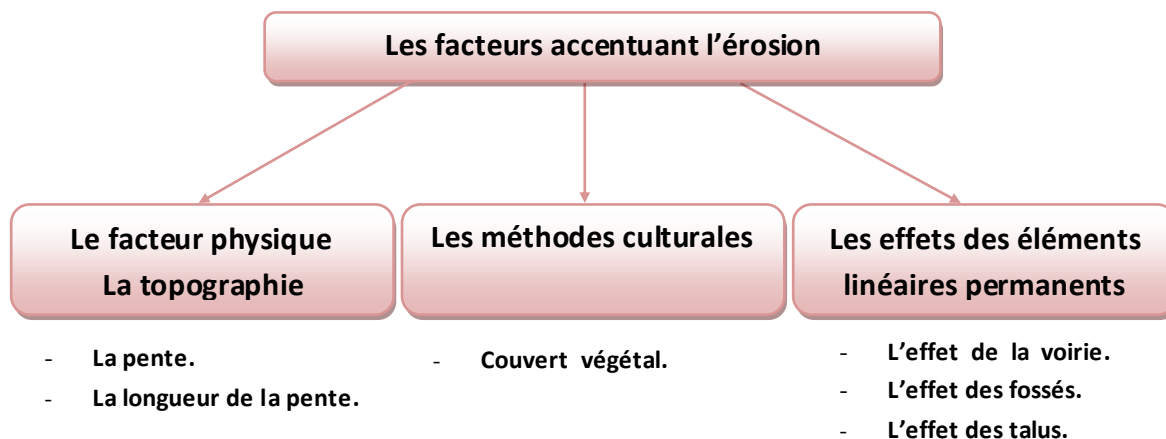


Figure 2.2. Classification des facteurs accentuant le phénomène d'érosion.

2.1. Le facteur physique: La topographie [HAM99]

La topographie du territoire est un facteur essentiel dans l'accroissement des écoulements de surface sur une parcelle. Plus le sol possède une pente forte, plus le risque de ruissellement sera important.

2.1.1. Influence de la valeur de la pente :

Le rôle de l'inclinaison de la pente sur le partage entre l'infiltration et le ruissellement est discuté. Pour [HAM99], le ruissellement des sols cultivés s'accroît avec le gradient de la pente. Cependant, ils montrent que ces relations seraient largement influencées par le type de culture, la rugosité de la surface et la saturation du profil. Ainsi avec des cultures sarclées, le ruissellement serait directement proportionnel au pourcentage de la pente. A l'inverse, avec des surfaces engazonnées, aucune relation n'était vraiment significative.

En fait, tout dépend de la perméabilité des sols. En effet, si les sols sont absolument imperméables, le ruissellement de la pluie sera total et ne dépendra pour une surface de pente donnée que de l'intensité de la pluie. Par contre, si les sols sont relativement perméables, la pente aura une influence certaine sur l'infiltration et donc le ruissellement.

2.1.2. Rôle de la longueur de la pente

Là aussi, le rôle de la longueur de la pente dans le phénomène de l'érosion et de ruissellement est controversé. Certains auteurs admettent que l'érosion moyenne par unité de surface croît avec la longueur de la pente et l'expliquent par le fait que les pentes les plus longues permettent une plus forte accumulation du ruissellement, ce qui accroît l'énergie globale de celui-ci et sa force de détachement et de transport. Alors que d'autres auteurs comme Roose(1977) contestent la croissance de l'érosion par unité de surface avec la longueur. Il semble néanmoins que la longueur de la pente ait une influence sur la concentration du ruissellement et sa force d'arrachage des particules du sol.

2.2. Les méthodes culturales:

Le risque d'érosion augmente lorsque le sol n'a qu'un faible couvert végétal ou de résidus végétaux. Les résidus et la végétation protègent le sol de l'impact des gouttes de pluie et de l'éclaboussement, tendent à ralentir la vitesse de l'eau de ruissellement et permettent une meilleure infiltration.

L'efficacité du couvert est conditionnée par la densité des plants cultivés. Plus le taux de couverture au sol est important, plus le risque de déclenchement du ruissellement sera faible. La végétation et les résidus combinés, couvrant complètement le sol, interceptent la pluie et sont le moyen le plus efficace pour réduire les pertes de sol (forêt et pâturages permanents). Les résidus partiellement incorporés et leurs racines ont aussi leur importance, parce qu'ils facilitent l'infiltration.

Les opérations culturales ont aussi un effet sur les risques d'érosion du sol. Ceci comprend la profondeur, la direction et la période de labour, le type d'équipement utilisé et le nombre de passages sur les parcelles. Généralement, on considère que le travail du sol limite l'érosion s'il dérange le moins possible la végétation ou les résidus de surface (Bocher, 2005).

2.3. Les effets des éléments linéaires permanents: [HAS 00]

2.3.1. L'effet de la voirie : La route affecte significativement les processus hydrologiques et géomorphologiques. Elle est souvent identifiée comme la cause de l'accélération des transferts de surface et de l'augmentation des transports de sédiments vers le cours d'eau.

Deux paramètres principaux sont à prendre en compte pour appréhender la réponse de la route vis-à-vis des processus physiques.

Selon la nature du tablier, les manifestations du ruissellement seront différentes : une route goudronnée constitue un collecteur privilégié. La surface imperméabilisée accroît la surface de ruissellement. Sur ces revêtements, l'écoulement de surface s'organise en nappes et/ou en filets généralement le long des bords de routes. Cependant, à l'inverse, une route sans revêtement ne signifie pas nécessairement une moindre capacité à engendrer un écoulement de surface dans la mesure où un chemin de terre est compacté et sa capacité d'infiltration est réduite. De plus, l'absence de revêtement la rend plus sensible aux attaques du ruissellement et par conséquent au ravinement.

La position topographique de la route par rapport au versant va définir son action sur les écoulements de surface. Si la voirie est dans l'axe de l'écoulement naturel donc dans le sens de la pente, elle est conductrice et va accélérer ou diriger l'écoulement. Si elle est perpendiculaire à l'axe d'écoulement, elle pourra agir comme un obstacle en créant une cuvette artificielle sur l'un de ses bords.

2.3.2. L'effet des fossés : En association avec le réseau de voirie ou bien intégrés au système agraire, les fossés interviennent eux aussi dans la structuration de l'écoulement de surface. Cependant, si à l'échelle de la parcelle, leur impact dans l'interception des écoulements ne fait aucun doute, en revanche, leur rôle et fonctionnement à l'échelle du bassin restent mal compris.

Globalement, le rôle du fossé est dépendant de son orientation par rapport à la plus grande pente : un fossé en travers de la pente va collecter les eaux de ruissellement et des écoulements subsurfaciques; un fossé parallèle à la ligne de plus grande pente va rabattre latéralement la nappe et transférer l'eau vers l'aval. L'écoulement dans le fossé est ensuite mis en mouvement en fonction de la pente du tronçon.

Les études de [MOU 02] montrent que les fossés accélèrent le ruissellement en concentrant les écoulements et facilitent les connexions entre les différentes unités hydrologiques du bassin versant.

2.3.3. L'effet des talus : Le talus est une levée de terre d'une hauteur variant de 0,8 à 1 mètre, le plus souvent boisée. Le cœur est constitué de terre végétale, recouvert sur les côtés d'une terre moins riche. Suivant les secteurs du département, sa taille varie. Sa largeur à la base est d'environ deux mètres, et d'un mètre au sommet.

Le talus lorsqu'il est situé en travers de la pente se comporte comme un écran vis-à-vis des écoulements de surface. Sur les parcelles sensibles au ruissellement, son rôle est immédiatement perceptible (accumulation d'eau et de sédiments). Cependant, l'impact du talus sur les écoulements et l'érosion des sols diffère selon sa place par rapport à la topographie. Les talus parallèles aux courbes de niveaux jouent un effet de barrage tandis que les talus perpendiculaires favorisent la circulation des écoulements en les canalisant.

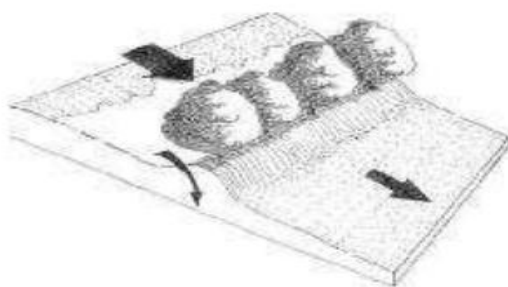


Figure 2.3 : Schéma d'un talus anti-érosif

Les rôles du talus ne sont plus à démontrer :

- Il régule le régime des eaux;
- Il lutte contre l'érosion des sols;
- Il favorise la biodiversité.

Mais l'un des facteurs primordiaux qui détermine le rôle d'obstacle du talus est la continuité du linéaire. Si celui-ci est rompu à un endroit stratégique (en aval de la pente) par une entrée de champ, tout le flux de ce ruissellement va s'engouffrer dans la percée et le talus ne va plus jouer son rôle de barrière.

3. Hiérarchisation des différents paramètres

L'ensemble des paramètres cités ci-dessus affecte le ruissellement et l'érosion. Toutefois, ils n'ont pas tous le même poids et peuvent être hiérarchisés. Par exemple, les précipitations provoquent le détachement des particules localement. L'érosion qui correspond à leur transport est dépendante du ruissellement.

Plusieurs études dont celle de [HER 03], suggèrent que le facteur déterminant dans l'érosion des vignobles est la couverture végétale. S'en suivent la texture du sol et la pente avec des poids plus faibles.

Selon Herbreteau [HER 03], la pente et la texture se combinent et caractérisent, pour chaque parcelle, un degré de sensibilité à l'érosion potentielle. Le viticulteur peut alors raisonner l'entretien de sa parcelle et le sens de plantation de la vigne pour limiter l'ampleur de l'érosion sur la parcelle. Les pratiques culturales ont un rôle non négligeable dans le déclenchement de l'érosion, en particulier le taux de couverture végétale va avoir un rôle fondamental sur l'intensité de l'érosion des sols en retardant ou en accélérant les phénomènes.

Le Bissonais[BIS 02] confirme les observations de Herbreteau en affirmant que la couverture végétale est considérée comme le facteur principal de l'aléa d'érosion. La classification des autres facteurs est dans l'ordre : la sensibilité à la battance, la topographie (pente et surfaces drainées), l'érodibilité des terrains, et enfin les caractéristiques des précipitations. Le Bissonais se base sur les principes suivants :

- Seuls les sols nus et les sols cultivés sont sensibles à la battance. Elle n'a pas d'influence sur les prairies et les forêts.
- L'influence de la pente augmente quand elle est associée à la battance.
- Seules des pentes fortes sont sensibles à l'érosion.

La sensibilité potentielle des terrains est ensuite combinée avec les données climatiques. L'effet du climat augmente avec la sensibilité à l'érosion. Dans des cas de très faible sensibilité à l'érosion, par exemple des sols couverts en permanence sur de faibles pentes, le risque reste très faible quelque soit l'érosivité des pluies.

Nous retiendrons que l'érosion est un phénomène complexe qui ne saurait être appréhendé par l'un ou l'autre des facteurs étudiés précédemment. L'érosion résulte de l'interaction de différents processus élémentaires qui peuvent varier spatialement au sein d'un bassin versant et temporellement durant l'année.

4. Les formes de l'érosion [BAR 08]

L'érosion peut prendre plusieurs formes :

4.1. L'érosion diffuse : est due à l'impact des gouttes de pluies. L'énergie de la pluie provoque l'éclatement des agrégats et les particules arrachées rejaillissent à la surface. Cette érosion par effet "splash" apparaît sur des pentes même faibles et n'affecte que les éléments fins, argiles et limons. La disponibilité des fines est donc accrue, elles pourront être mobilisées même avec un ruissellement faible. Cette érosion est donc sélective, les éléments grossiers s'accumulent en surface.

4.2. L'érosion linéaire ou concentrée : apparaît sur les pentes plus fortes et le plus souvent dans des zones de concentration (fossé, talweg, traces de roues et d'outil, chemins, rigoles...). Les sols en argile sont les plus touchés. L'énergie forte de l'eau concentrée conduit au transport et à l'arrachement des particules. Des rigoles peuvent se former dans les traces de roues.

Parfois, dans le cas de fortes pentes, sur du substrat marneux, des mouvements de masse, véritables coulées de boues peuvent se former [BIS 02].

Selon la fréquence des phénomènes érosifs, on parle d'érosion chronique et exceptionnelle. Par exemple, dans le vignoble alsacien l'érosion exceptionnelle, ressentie par l'exploitant comme catastrophique, se caractérise par une période de retour de 4 à 10 ans (Vogt et al, 1986). Les techniques d'action ne sont pas les mêmes. Pour une érosion chronique, il convient d'agir à l'échelle de la parcelle, alors que pour l'érosion exceptionnelle, c'est au niveau du bassin versant qu'il faut agir.

Les dépôts de particules ont lieu lorsque la charge sédimentaire excède la capacité de transport du flux, lors d'une diminution de la vitesse de ruissellement. Par exemple, un changement de pente va favoriser les dépôts.

5. Modélisation de l'érosion d'un bassin versant [FLI05]

Au sens général, un modèle est une représentation schématisée de phénomènes. Plus particulièrement, les modèles de simulation cherchent à reproduire des phénomènes ou à prévoir le comportement d'un système soumis à des sollicitations données. On calcule l'évolution de variables inconnues (les sorties) en fonction des variables connues (les entrées) et des paramètres du système.

Dans ce paragraphe nous présentons les principaux modèles d'évaluation du flux de sédiments à l'exutoire d'un bassin versant. Ces modèles ont été classés selon leur valeur cognitive en trois grandes classes : modèles empiriques, modèles conceptuels et modèles mécanistes.

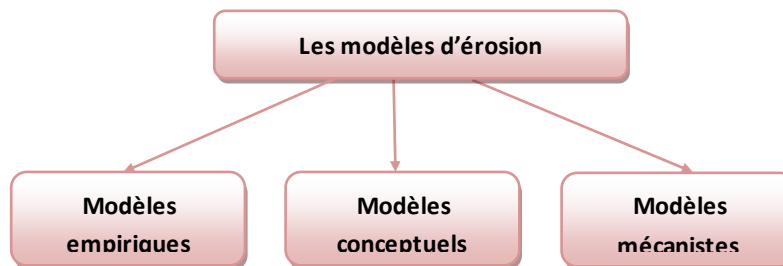


Figure 2.4. Classification des modèles de l'érosion hydrique [FLI05].

5.1. Modèles empiriques: Ces modèles peuvent être vus comme des modèles boîte-noire, ou aussi entrée-sortie.

Les modèles empiriques pour évaluer l'érosion d'un bassin versant se contentent d'établir une relation entre le flux de sédiments à l'exutoire et des variables explicatives des différents facteurs influençant l'érosion.

5.1.1. Equation de Fournier [KAU 10]

Cette formulation pour estimer l'érosion à l'échelle des bassins fluviaux remonte à Fournier en 1960. Elle utilise les variables explicatives suivantes :

- ✓ La pluie mensuelle moyenne du mois le plus pluvieux en mm (p).
- ✓ La pluie moyenne annuelle en mm (P).
- ✓ La dénivelée moyenne selon la courbe hypsométrique en m (H).
- ✓ La surface du bassin en km² (M).

L'équation de Fournier est donnée par :

$$S = \frac{1}{36} + \left(\frac{P^2}{P}\right)^{2,65} \left(\frac{H}{A}\right)^{0,46}$$

Où **S** est le flux moyen annuel de sédiments en t/km²/an.

Cette formule a été mise au point à partir des données de 96 bassins versants à travers le monde de superficie comprise entre 2,5x10³ et 1 060x10³ km². Fournier a testé cette formule sur de petits bassins fluviaux (< 2 000 km²) et il a constaté un ajustement acceptable. Par contre sur de très petits bassins versants (< 100 km²), l'influence d'autres facteurs, non pris en compte dans l'équation, semble jouer un rôle important.

5.1.2. Equation de Flaxman [BOG 83]

En 1972, Flaxman a proposé une autre équation pour prévoir le flux de sédiments à l'exutoire des bassins versants. La formule a été obtenue à partir des données de sédimentation dans 39 retenues dont les surfaces des bassins versants variaient entre quelques hectares jusqu'à une centaine de km².

Les variables explicatives sont :

- ✓ La pluie moyenne annuelle.
- ✓ La température moyenne annuelle.
- ✓ La texture.
- ✓ Le pH du sol.

La formule de Flaxman est donnée par :

$$\log (S + 100) = 6M301 - A_{x1} + A_{x2} - A_{x3} + A_{x4}$$

Où $A_{x1} = 2,19113 \log (x_1 + 100)$

$A_{x2} = 0,06034 \log (x_2 + 100)$

$A_{x3} = 0,01644 \log (x_3 + 100)$

$A_{x4} = 0,04250 \log (x_4 + 1)$

Où

S est le flux moyen annuel de sédiments en acre-ft/m².

X₁ est le rapport entre la pluie moyenne annuelle en inches et la température moyenne annuelle en °F.

x₂ est la pente moyenne du bassin versant en %.

x₃ est la fraction de particules du sol > 1,0 mm en %.

x₄ est un index d'agrégation du sol en % qui dépend du pH et de la teneur en argile du sol.

Une extension de cette équation a été proposée par [ONS 84] en ajustant un terme additionnel correspondant à la médiane du débit de pointe spécifique.

Le flux des sédiments calculé par l'équation de Flaxman est sensible aux variations du rapport précipitation-température mais relativement insensible aux changements des autres paramètres. Par ailleurs, [WEB 76] ont montré que la formule logarithmique de Flaxman avec une constante égale à 100 est pratiquement équivalente à une relation linéaire entre les variables pour les plages de valeurs normalement rencontrées.

5.1.3. Equation de Dendy et Bolton [KAU 10]

Cette équation a été établie en 1976 à partir des données de sédiments décantés dans environ 500 réservoirs aux Etats Unis. La surface des bassins versants variait de quelques km² à 77 700 km² pour un débit moyen annuel compris entre presque zéro et 1270 mm/an.

Les variables explicatives sont :

- ✓ Le débit moyen annuel en mm/an (Q).
- ✓ La surface du bassin en km² (A).

La formule de Dendy et Bolton est donnée par ;

$$S = 756 e^{-0,0002165Q} (1,54 - 0,26 \log A) \quad (Q > 50 \text{ mm/an})$$

$$S = 111,6 Q^{0,64} (1,54 - 0,26 \log A) \quad (Q < 50 \text{ mm/an})$$

Où S est le flux moyen annuel de sédiments en t/km²/an.

5.1.4. Equation universelle de perte des sols - USLE [TRI 09]

Cette expression, établie en 1954 à partir d'un grand nombre d'observations de ruissellement et de perte de sol, considère que l'érosion est fonction de l'érosivité des pluies et de l'érodabilité des sols. La figure 2.5 illustre la structure de l'USLE. Originellement, cette équation, comme d'ailleurs les formules précédentes, a été développée pour prévoir à long terme la perte des sols due à l'érosion inter-rigoles et en rigoles à l'échelle du champ sur des surfaces homogènes et dans des conditions de culture et de pratiques culturales définies. Le paramétrage de cette formule a été réalisé pour une grande diversité de sols et de pratiques agricoles. Ces nombreuses expérimentations ont permis de déterminer les valeurs des paramètres de l'équation pour la plupart des conditions environnementales rencontrées, ce qui lui confère un caractère prévisionnel. Nous renvoyons à Wischmeier et Smith (1978) pour plus de détails sur la détermination des paramètres.

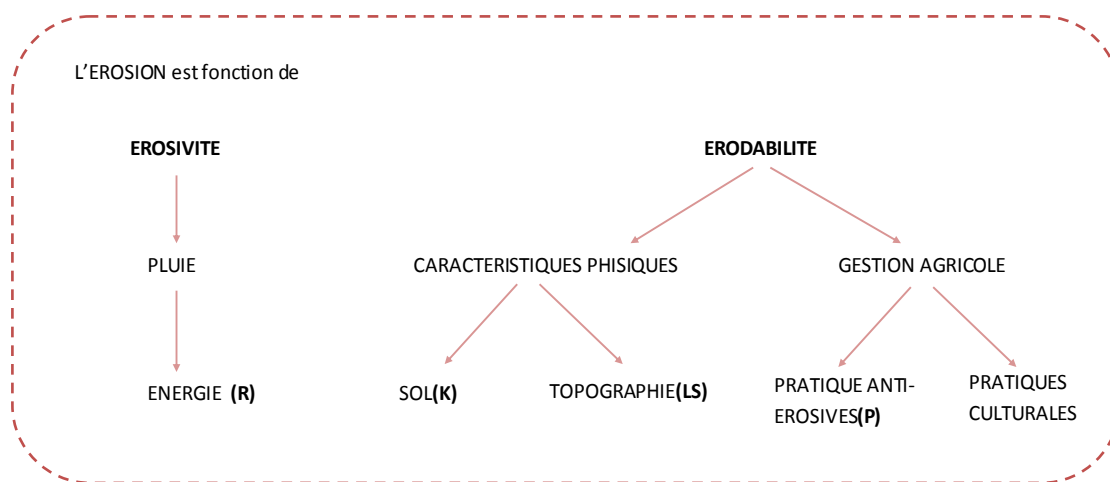


Figure 2.5. Structure de l'équation universelle de perte des sols USLE [GAR 05]

L'équation universelle de perte des sols USLE est donnée par : $A = R \cdot K \cdot LS \cdot P \cdot C$

Où

A : Perte de sols t/ha/an.

R : Facteur d'érosivité de la pluie (MJ mm)/(ha h an).

K : Facteur d'érodabilité du sol (t ha h)/(ha MJ mm).

L : Facteur de la longueur de la surface du sol (mètre/mètre).

S : Facteur de la pente de la surface du sol (adimensionnel).

P : Facteur de conservation du sol (adimensionnel).

C : Facteur de pratiques culturales (adimensionnel).

Bien que l'USLE a été appliquée directement pour calculer le flux de sédiments à l'exutoire de bassins versants (par exemple, DeVera en 1981 et van Vuren en 1982), il est clair que l'érosion calculée est probablement différente du flux de sédiments à l'exutoire car l'USLE ne prend pas en compte, d'une part, le processus de sédimentation des sols érodés à l'intérieur du bassin et d'autre part l'érosion en ravins, l'érosion

de thalweg et l'érosion en rivière. Dans les bassins versants où ces dernières ont une importance majeure, il faut les estimer par d'autres moyens (Par exemple, , Piest et Grissinger, 1980 ; Lane et Foster, 1980).

Par ailleurs, l'érosion "brute" calculée par l'USLE doit être diminuée de la fraction sédimentée tout au long des versants. Plusieurs méthodes ont été proposées dans la littérature pour estimer le rapport de restitution (SDR en %), i.e., le flux solide cumulé à l'exutoire du bassin rapporté à la masse érodée dans le bassin ("sediment delivery ratio" des auteurs anglo-saxons).

[WIL 72] ont proposé une formulation pour le rapport de restitution en fonction de la pente moyenne du canal principal (pondérée par la longueur) à partir de 8 années de données de 5 petits bassins versants :

$$\text{SDR} = 62,7 S_m^{0,403}$$

Où S_m est la pente moyenne en %.

D'après Wischmeier (1976), afin d'utiliser l'USLE pour calculer l'érosion "brute" d'un bassin versant, il convient que le bassin soit discrétisé en sous-bassins homogènes de manière à disposer des paramètres représentatifs de chacune des surfaces. La somme de l'érosion des sous-bassins peut être ainsi utilisée pour approcher la quantité de particules des sols qui ont quitté leur position originale. Alors, le couplage de l'USLE (A) avec une relation pour le rapport de restitution de sédiments (SDR) constitue un moyen d'estimer le flux de sédiments à long terme à l'exutoire des bassins versants. Le flux annuel de sédiments est donc :

$$S = \text{SDR} A$$

5.1.5. Equation universelle de perte des sols modifiée - MUSLE

Afin d'incorporer, d'une part, le rapport de restitution de sédiments d'un bassin versant à l'équation universelle de perte des sols et d'autre part d'avoir une équation pour calculer le flux de sédiments à l'exutoire à l'échelle de l'averse, [WIL 75b] a remplacé l'indice annuel de l'érosivité des pluies par un indice d'érosivité calculé pour chaque averse. Ce nouvel indice a été obtenu par optimisation en comparant les flux de MES mesurés à ceux calculés par la MUSLE sur 18 petits bassins versants dont les surfaces variaient entre 1 ha et 18 km². Parmi les variables explicatives qui ont été essayées, le volume total écoulé à l'exutoire pendant l'événement et le débit de pointe ont donné les meilleurs résultats. L'indice d'érosivité dans la MUSLE devient donc :

$$R_w = a(Vq_p)^b$$

où

- ✓ R_w est l'indice d'érosivité de Williams en (MJ mm)/(ha h)/averse.
- ✓ V est le volume total écoulé en m³.
- ✓ q_p est le débit de pointe en m³/s.
- ✓ a et b sont des coefficients obtenus par optimisation, 89,6 et 0,56 respectivement.

La MUSLE est donc donnée par :

$$S = 89,6 (V q_p)^{0,56} \text{KLSCP}$$

Où

S est le flux de sédiments à l'exutoire en t/averse.

K, LS, C et P sont les paramètres de l'équation universelle de perte des sols.

Les paramètres C et P doivent être à priori déterminés pour les conditions existantes au moment de l'averse.

5.2. Modèles conceptuels qui regroupent les modèles: systémiques, paramétriques, boîte-grise, quasi-déterministes, et synthétiques.

Ces modèles prennent en compte au moins un mécanisme à l'intérieur du système bassin versant pour mieux représenter les flux de sédiments à l'exutoire. Toutefois, la formalisation conceptuelle de ce mécanisme reste dans la plupart des modèles totalement empirique.

La notion commune à tous les modèles conceptuels est que le flux de sédiments à l'exutoire du bassin est le résultat de deux mécanismes fondamentaux de l'érosion des sols, à savoir, le détachement et le transport. Ces deux mécanismes sont présents dans tous les modèles conceptuels qui vont se différencier, d'une part, par la prise en compte de ces deux phénomènes seulement au niveau des terres ou du réseau de drainage (ou sur les deux) et d'autre part, sur la discrétisation spatiale du bassin versant [FLI05].

5.2.1. Equation de Onstad et Foster - OF [ONS 76]

En 1975, Onstad et Foster essayent d'améliorer l'équation universelle de perte de sols pour l'estimation du flux de sédiments d'un bassin versant à l'échelle d'une averse en décomposant l'érosion en ses mécanismes fondamentaux (le détachement, le transport et la sédimentation).

Leur principe est de discrétiser les bassins versants en plusieurs zones d'altitudes décroissantes dont les paramètres K, S, C et P de l'USLE sont uniformes.

Le flux de sédiments est calculé à l'exutoire de chaque zone en comparant le détachement et la capacité de transport. Si le transport dépasse le détachement dans la zone plus la contribution de la zone amont, le sol est érodé. Sinon les particules de sol érodées se déposent dans la zone. Le calcul commence dans la zone la plus amont et se poursuit jusqu'au canal. Le flux de sédiments total à l'exutoire est la somme des flux de zones contiguës au canal. L'érosion en rivière est négligée.

Le détachement dans une zone j est donnée par :

$$A = \frac{R_{OF} K S C P}{47} (X_j^{1,5} - X_{j-1}^{1,5})$$

$$R_{OF} = 0,5 R + 3,42 Q Q_p^{1,3}$$

Où

- ✓ A est le détachement dans la zone j en kg/m (de largeur).
- ✓ R_{OF} est l'indice de l'érosivité d'Onstad et Foster en (MJ mm)/(ha h)/averse.
- ✓ K, S, C et P sont les paramètres de l'USLE.
- ✓ x est l'abscisse le long de la pente en m.
- ✓ R est l'indice d'érosivité des pluies de USLE.
- ✓ Q est le volume ruisselé en mm.
- ✓ Q_p est le débit de pointe mm/h.

La capacité de transport est calculée par :

$$T = \frac{R_{OF} K S C P}{47} X_j^{0,5}$$

Où

- ✓ K est un indice de transportabilité de sédiments et estimé par la moyenne des K des zones amont.
- ✓ C, P et S sont constants et prennent la même valeur pendant les phases de transport et de détachement.

5.2.2. Modèle érosion-sédimentation (EDM) [KAU 10]

En 1983, Khanbivardi et al combinent l'approche de l'équation universelle de perte des sols avec les notions de transport solide dans les cours d'eau (suite des travaux d'Onstad et Foster). Ils supposent que le flux de sédiments à l'exutoire d'un bassin est le résultat de l'érosion de surfaces contiguës au réseau de drainage naturel du bassin et de l'érosion linéaire des thalwegs.

Pour cela, le bassin est discrétisé en mailles carrées et le réseau de drainage superficiel est décrit allant toujours du centre d'un carré à l'autre. Seules les mailles adjacentes au réseau de drainage sont considérées comme susceptibles d'être érodées.

L'érosion de ces mailles est calculée par l'USLE et tous les sédiments érodés sont supposés être transportés par écoulement superficiel jusqu'au réseau de drainage.

Le transport des sédiments au long du réseau résulte de l'équilibre entre la quantité de sédiments érodés dans le réseau et dans les mailles contiguës et la capacité de transport de l'écoulement dans le réseau. Si la capacité de transport dépasse la masse de sédiments érodés, les sédiments vont être transportés par l'écoulement dans les thalwegs. Cependant, seulement la fraction des sédiments érodés égale à la capacité de transport se déplacera vers l'aval.

Le calcul de l'érosion dans le canal est basé sur l'équation classique de DuBoys (1879) :

$$D_c = \psi \tau (\tau - \tau_\sigma)$$

Où

- ✓ D_c est la capacité de détachement de l'écoulement en lb/ft de largeur/s.
- ✓ ψ est un coefficient empirique.
- ✓ τ est la tension de cisaillement en lb/ft².
- ✓ τ_σ est la tension de cisaillement critique en lb/ft² obtenue par les diagrammes de Shield.

ψ est calculé d'après Morris et Wiggert (1972) par :

$$\psi = \frac{10 V}{d(Y_s - Y)}$$

Où

- ✓ V est la vitesse de l'écoulement en ft/s.
- ✓ d est le diamètre des particules en ft.
- ✓ y_s et y sont respectivement les densités des sédiments et de l'eau en lb/ft³.

La capacité de transport de l'écoulement concentré d'après Yalin (1963) est :

$$T_c = 600d\delta HB^{0,5} \left(1 - \frac{0,6}{(Y_{cr})^{0,5}\delta} \log(1 + 1,66Y_{cr})^{0,5}\delta\right)$$

Où

- ✓ T_c est la capacité de transport en lb/ft de largeur/s.
- ✓ d est le diamètre des particules en ft.
- ✓ δ est égal à $[(Y/Y_{cr}) - 1]$.
- ✓ Y est la force ascensionnelle [$Y = (H B)/(1,65 d)$].
- ✓ Y_{cr} est la force ascensionnelle critique donnée à partir des diagrammes de Shield.
- ✓ H est le rayon hydraulique en ft et B est la pente de la ligne d'énergie.

5.2.3. Modèle sédimentation [GAR 08]

Le modèle Sédimentation est basé sur les résultats du modèle USLE pour calculer le bilan d'érosion dans chaque parcelle élémentaire considérée homogène. Il utilise des polygones homogènes résultant du calcul du module USLE pour évaluer le mouvement net du sol (érosion ou dépôt) dans des parcelles ou des sous bassins versants. Si les données sont analysées à l'échelle du bassin versant, un rapport de la délivrance du sédiment peut être entré pour déterminer la quantité du sédiment à la sortie du bassin. L'exécution de ce module vient après

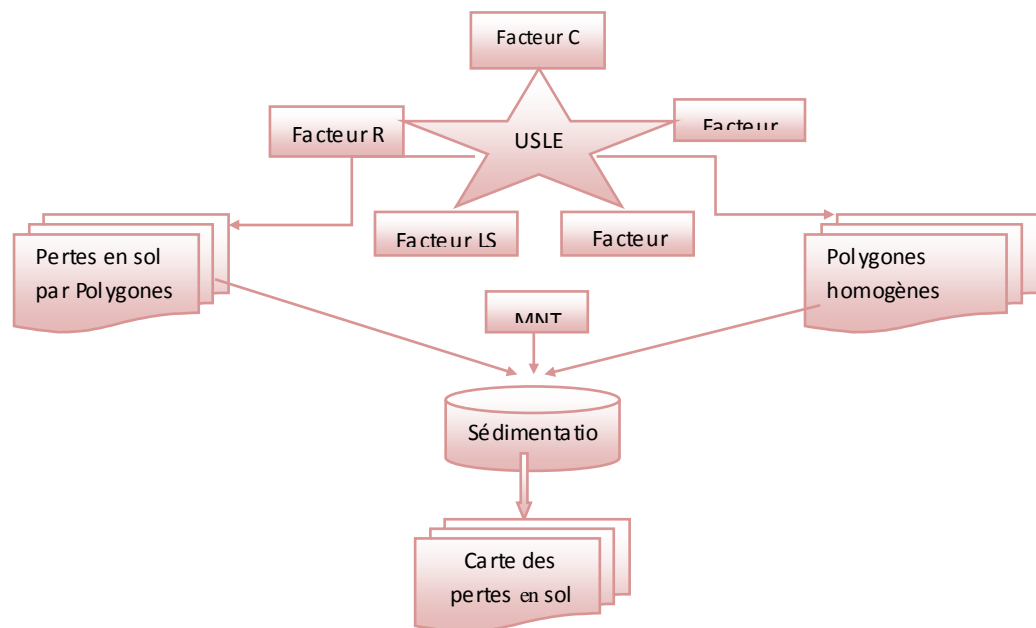


Figure 2.6. Schématisation de model déposition-sédimentation [GAR 08]

celle du module USLE et nécessite le recours à un modèle numérique du terrain (MNT), aux images d'identification de polygones homogènes et à celle des pertes en sol résultant du calcul fait par USLE.

5.2.4. Modèle ANSWERS [KAU10]

En 1980, Beasley et al proposent de discrétiser le bassin en mailles carrées dont les caractéristiques hydrologiques "signifiantes" sont uniformes. Chacune des mailles est modélisée globalement et les sorties d'une maille deviendront les entrées d'une (ou des) maille(s) adjacentes en fonction de la direction de la pente maximale. Les mailles ayant un canal de drainage naturel ont un double comportement. Elles fonctionnent

comme une maille ordinaire mais tous les écoulements et les flux de matières arrivant dans cette maille vont transiter dans le canal (supposé rectangulaire).

L'érosion des sols est représentée par deux processus indépendants, le détachement et le transport.

Le détachement des sols est effectué par deux mécanismes : le détachement par les gouttes de pluies et le détachement par le ruissellement.

Le premier est calculé par la relation proposée par Meyer et Wischmeier (1969) :

$$D_R = 0,108 K C A I^2$$

Où

- ✓ D_R est le détachement des sols sur une maille en kg/min.
- ✓ K et C sont les paramètres de l'équation universelle de perte des sols (USLE).
- ✓ A est la surface de la maille en m^2 .
- ✓ I est l'intensité de la pluie pendant le pas de temps en mm/min.

Le détachement par ruissellement est décrit selon l'équation de Meyer et Wischmeier (1969), modifiée par Foster (1976) :

$$D_Q = 0.9KCSQ$$

Où

- ✓ D_Q est le détachement par le ruissellement sur une maille en kg/min.
- ✓ S est la pente de la maille en m/m.
- ✓ Q est le ruissellement par unité de largeur en m^2/min .
- ✓ K et C sont les paramètres de USLE.

A chaque pas de temps de calcul, chaque particule détachée sera déplacée vers les mailles adjacentes s'il y a suffisamment d'énergie disponible pour le transport, dans le cas contraire, elle sera incorporée au sol et requerra la même énergie que celle fournie lors du premier détachement pour être re-détachée.

La capacité de transport du ruissellement ainsi que de l'écoulement concentré dans le réseau de drainage est calculée selon la relation empirique (Beasley et al, 1980) :

$$\begin{array}{ll} T_c = 161SQ^{0.5} & Q < 0,046 \text{ m}^2/\text{min} \\ T_c = 16320 SQ^2 & Q > 0,0046 \text{ m}^2/\text{min} \end{array}$$

Où

- ✓ T_c est la capacité de transport en kg/min/m de largeur.

Bien que le modèle néglige l'érosion en canal, les sédiments déposés dans le réseau de drainage peuvent être remis en suspension quand un excès de capacité de transport se produit.

5.3. Modèles mécanistes qui sont représentés par les modèles: physiques, de connaissance, théoriques, descriptifs, boîte-blanche et déterministes.

Avec plus de précision que les modèles conceptuels, ces modèles tentent de représenter le phénomène d'érosion à partir d'une description fine des mécanismes fondamentaux. Toutefois, la formulation de ces mécanismes reste entièrement conceptuelle voir empirique.

5.3.1. Modèle de Foster et Meyer

Le modèle de Foster et Meyer (1975) est basé sur le concept de séparation du processus d'érosion en érosion inter-rigoles et érosion en rigoles. La totalité des sédiments détachés dans les zones inter-rigoles est supposée se déplacer latéralement vers les rigoles. Ces sédiments des zones inter-rigoles sont transportés vers l'aval par l'écoulement dans les rigoles ainsi que les sédiments détachés dans les rigoles.

L'équation de base gouvernant le processus d'érosion d'une surface de sol est l'équation de la continuité du transport des sédiments par le ruissellement (Bennett, 1974) exprimée par :

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \rho_s \frac{\partial cy}{\partial t} = D_i + D_r$$

Où

- ✓ q_x est le flux de sédiments en unité de masse par unité de temps par unité de largeur.
- ✓ x est la distance.
- ✓ ρ_s est la densité des sédiments.
- ✓ c est la concentration des sédiments du ruissellement en volume de sédiments par volume de ruissellement.
- ✓ y est la profondeur du ruissellement.
- ✓ t est le temps.
- ✓ D_i est le détachement inter-rigoles en unité de masse par unité de surface par unité de temps. D_r est le détachement (ou la sédimentation) dans les rigoles.

Le terme $\frac{\partial q_x}{\partial x}$ est le taux de variation du flux de sédiments au long de la pente et le terme $\frac{\partial cy}{\partial t}$ est le taux de variation du stock de sédiments dans l'eau du ruissellement.

5.3.2. Modèle de l'Université du Colorado (CSU)

Ce modèle (1979) est également distribué spatialement selon une maille carrée et un système de canaux pour représenter le bassin versant. Il travaille avec des petits pas de temps pour décrire une averse et il est généralement utilisé pour simuler la réponse d'un nombre limité d'événements.

Le flux de sédiments est calculé en comparant le stock des particules érodées pour des différentes classes granulométriques dû au détachement par les pluies et par le ruissellement et la capacité de transport du ruissellement.

La capacité de transport pour les sédiments en suspension est calculée selon l'équation d'Einstein (1950) et celle des sédiments de fond selon l'équation de Meyer-Peter et Muller (USBR, 1960). La propagation des sédiments au long d'une pente est réalisée par résolution dynamique de l'équation de la continuité par une méthode numérique aux différences finies couplée avec la propagation de l'écoulement superficiel.

Une procédure analogue réalise la propagation pour chaque fraction granulométrique des sédiments en suspension et de fond dans le réseau de drainage du bassin versant. De plus, l'utilisation de l'équation de la continuité permet la détermination du déblaiement et du remblaiement du lit des cours d'eau.

Le modèle propose une alternative plus simple pour la représentation spatiale du bassin versant. Dans le modèle simplifié, le bassin versant est découpé en sous-bassins et chaque sous-bassin est supposé avoir la forme d'un livre ouvert, c'est-à-dire deux plans avec un canal central.

6. Les modèles d'érosion : Etude Critique

Parmi toutes les approches de modélisation de l'érosion dans le bassin versant, il est indéniable que celles qui sont dérivées de l'équation universelle de perte des sols (USLE) sont les plus répandues. Toutefois, l'application de l'USLE dans ses multiples versions et développements fait l'objet d'une très grande controverse (qui soulève même parfois des passions). Les principales critiques faites à l'USLE sont :

- (1) la non-prise en compte de l'humidité du sol et de la disponibilité des particules de sol détachées par des pluies antérieures.
- (2) la non-prise en compte directe du ruissellement, principal responsable du transport des particules détachées.
- (3) la non-évaluation des mécanismes responsables du détachement et du transport de particules, ces mécanismes étant déterminants de l'érosion à l'échelle de l'averse.
- (4) l'inadaptation de la formule pour prendre en compte des phénomènes de seuils.
- (5) l'inadaptation de la formule pour certaines conditions climatiques.
- (6) le paramétrage de l'équation nécessaire pour des conditions différentes de celles des Etats Unis, ce qui implique une expérimentation longue et coûteuse.

Concernant le premier type de critique fait à l'USLE (i.e. 1, 2, 3 et 4), on ne trouve aucune argumentation rigoureuse sur la nécessité d'ajouter d'autres variables afin de mieux expliquer l'érosion à long terme des sols. Le fait d'avoir mis en évidence une relation entre une variable et un phénomène observé à une échelle de temps et d'espace donnée n'implique pas forcément le besoin d'introduire cette variable pour expliquer le phénomène à une autre échelle. Comme l'a affirmé Thom (1979), "... ce qui fait l'intérêt d'un modèle, c'est sa portée ontologique, c'est-à-dire la mesure dans laquelle le modèle exprime la réalité de l'être modélisé". En plus, on ne trouve pas dans la littérature une autre formulation (validée sur un grand nombre d'observations) basée sur d'autres variables explicatives et qui explique l'érosion à long terme mieux que l'USLE.

Le deuxième type de critique (i.e. 5 et 6) met en cause le caractère universel de l'USLE. Historiquement, l'adjectif « universelle » a été employé par Wischmeier par opposition aux modèles régionaux et pour indiquer qu'aucun paramètre du modèle n'était particulier à une région géographique précise. Comme l'a affirmé Wischmeier (1984), l'USLE n'a pas de limites géographiques, toutefois, l'application à un site particulier dépend de la disponibilité des valeurs locales représentatives des paramètres de l'équation. De ce fait, certains paramètres de l'USLE ont été adaptés aux conditions environnementales de plusieurs autres pays dans presque tous les continents (SCSA, 1977 et 1985). L'analyse de l'USLE indique que c'est principalement au niveau du

paramètre C (Les pratiques agricoles) que les différences peuvent être importantes. Cette analyse est confirmée par les résultats obtenus par Bollinne (1985) avec l'application de l'USLE en Belgique. Ainsi, le paramétrage se réduirait à seulement un des six paramètres de l'USLE.

Les modèles conceptuels et mécanistes de simulation de l'érosion sur le bassin versant sont fondés sur l'extrapolation des formulations établies à une petite échelle vers le bassin versant. Or, afin que les hypothèses restent valables à une échelle plus grande il faudrait que l'on soit capable tout d'abord d'estimer les variables de forçage et plus particulièrement le ruissellement sur tout le bassin versant. Pour cela les modèles d'érosion se basent sur des modèles de simulation du cycle de l'eau qui n'ont pas de réalisme physique, c'est-à-dire, les différents flux d'eau simulés ne correspondent aucunement aux vrais flux sur le bassin versant.

Par conséquent, tous ces modèles restent conceptuels, et par respect du principe de minimalité, il n'est pas raisonnable de complexifier la description des mécanismes d'érosion tant que l'on se fonde sur des modèles hydrologiques dépourvus de réalisme physique.

Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté, dans un premier lieu, les deux notions du ruissellement et de l'érosion hydrique ainsi que ses facteurs principaux et ses formes. Dans un second lieu, nous nous sommes intéressés aux différents modèles mathématiques permettant la représentation et l'étude du comportement des bassins versants, plus précisément l'érosion hydrique.

Nous pouvons conclure que les modèles en hydrologie présentent des avantages variés dont le principal est qu'ils complètent la méthode expérimentale classique en permettant d'aborder l'étude du comportement des systèmes réels complexes, sans en exiger, à priori, les connaissances physiques détaillées. De plus, leur but n'est pas seulement l'explication du phénomène observé, mais surtout sa prévision, qui est l'étape la plus importante. En ce sens, ils constituent un excellent trait d'union entre l'hydrologie et l'informatique.

Nous présentons dans le chapitre suivant la contribution de ce travail qui consiste à la modélisation mathématique et la simulation de l'érosion hydrique dans un site intéressant : le bassin versant d'Oued Sikkak. Le choix des modèles dépendra évidemment de l'étude critique et détaillée des différents modèles d'érosion.

Chapitre3

Modélisation et

conception

Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons vu les différents modèles mathématiques de l'érosion hydrique ainsi que leurs avantages et inconvénients. Sur la base de cette étude, nous avons opté pour les trois modèles que nous jugeons les plus efficaces, à savoir le modèle « **USLE** » qui est le modèle de base, et les deux modèles conceptuels : le modèle « **sédimentation** » et le modèle « **Onstad & Foster (OF)** » qui, tous les deux, sont des extensions du modèle basique USLE.

Dans ce chapitre nous allons présenter la contribution qu'apporte ce travail qui permet d'élaborer un schéma conceptuel de données en utilisant les modèles mathématiques étudiés précédemment et de simuler l'érosion hydrique dans la zone étudiée.

1. Méthodologie proposée

La mise en œuvre d'un simulateur d'érosion dans un bassin versant, qui est le but de ce travail, nécessite un ensemble de données (descriptives et géométriques) qui sont stockées au sein d'un Système d'Information Géographique (SIG) et un ensemble de traitements à faire sur ces données.

Le schéma ci-dessous illustre la méthodologie suivie afin d'aboutir à l'objectif souhaité, allant des données préliminaires nécessaires jusqu'au résultat de la modélisation et la simulation : la quantité des sédiments érodée à l'intérieur du bassin.

- En entrée, on trouve les différentes couches des données intervenant dans la phase de la modélisation ainsi que dans la simulation : le MNT, l'image des sous bassins, l'image pente, l'image direction, l'image type de sol, la pluviométrie et d'autres paramètres.
- Les modèles d'érosion doivent être soigneusement conçus et les algorithmes des différents traitements sont développés.
- En sortie, plusieurs images résultats sont construites contenant chacune la quantité des sédiments érodés à un instant donné (simulation).

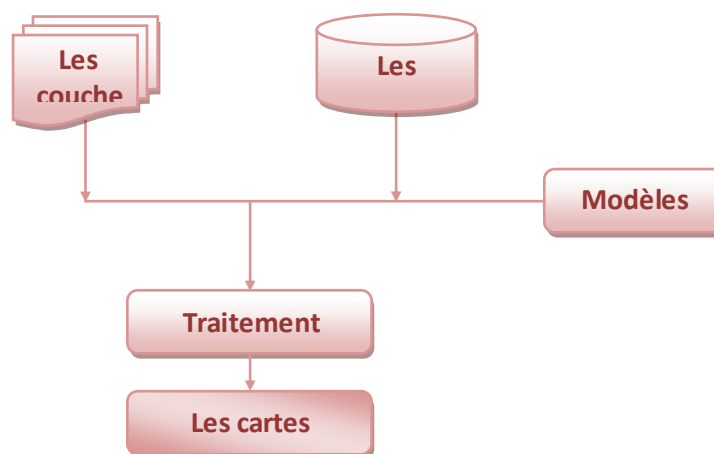


Figure 3.1. Schéma méthodologique représentant les différentes étapes de la conception

2. Les couches des données en entrées

Les images utilisées doivent être des images géo-référencées ayant la même résolution spatiale afin de pouvoir les superposer. En effet le traitement d'une cellule (pixel), ayant une position spatiale, manipule des données provenant des différentes couches utilisées.

❖ MNT et l'Image direction

Un modèle numérique de terrain appelé singulièrement MNT, est une carte indiquant la forme brute du terrain, sans construction ni végétation. Il correspond donc à une schématisation du relief de la région étudiée. L'ensemble des points de la carte établie, correspond à une altitude permettant de travailler sur un modèle surfacique numérique. Cette carte (MNT) permet donc d'établir une image direction en déterminant le sens d'écoulement de l'eau (direction) dans chaque cellule en tenant compte du voisinage.

❖ Image type de sol

Un des paramètres important pour la simulation de l'écoulement surfacique des eaux de pluie est la nature de la surface du sol. Comme dans un bassin versant on peut avoir plusieurs types de sol avec des couvertures végétales différentes, il est nécessaire d'effectuer une segmentation de la zone concernée. Ceci peut être effectué par un traitement de classification adéquat. Dans ce cas nous utilisons une image classifiée avec les différents paramètres descriptifs à partir du SIG.

❖ Image de la couverture végétale

❖ Image d'érosivité de la pluie

C'est une donnée considéré constante, elle présente la quantité de pluie qui tombe sur la zone d'étude dans un intervalle donné (jours, mois, ans,...).

❖ Image pente

Deux types de pentes sont définis pour les réseaux hydrographiques et leurs bassins versants. Une pente linéaire est définie pour les réseaux hydrographiques et une autre, surfacique, est définie pour les bassins versants.

La pente linéaire est calculée en découpant les chenaux en segments de droite et en déterminant pour chacun sa pente. Ce qui permet d'identifier les zones de pente homogène et les points de ruptures, Floissac [FLO 97]. D'après la comparaison de la pente moyenne des chenaux de différents ordres, [FLO 97] a remarqué que lorsque l'ordre du chenal augmente sa pente diminue.

Plusieurs indices de pentes sont proposés pour le bassin versant. Par exemple, I_g est un indice global de pente calculé à partir de La **courbe hypsométrique**, dont la dénivelée Δh est calculée comme suit : $\Delta h = \Delta_{sup} - \Delta_{inf}$, telle que 5% de la superficie du bassin soit d'altitude supérieur de Δ_{sup} et 5% de la superficie du bassin soit d'altitude inférieur à Δ_{inf} . Si L est la longueur du rectangle équivalent du bassin, alors, $I_g = \Delta h / L$

La génération du plan de pente du bassin versant permet de calculer des statistiques globales comme la pente moyenne, la pente maximale, la pente minimale et le relief qui représente la différence entre ces deux dernières.

❖ Image code chenal et Image classe chenal

Cette image contient pour chaque pixel le code et la classe du chenal auquel appartient la zone représentée par ce pixel. Ces deux images sont construites à partir de la vectorisation du bassin versant objet d'étude.

3. Les Modèles d'érosion :

La méthodologie consiste à l'intégration et la représentation des informations cartographiques et descriptives des composantes du milieu naturel dans un SIG en vue d'étudier le comportement hydrodynamique et érosif des sols. Ainsi, on a créé une base de données à références spatiales contenant des informations qualitatives et quantitatives nécessaires sur le bassin versant étudié.

3.1. Le modèle : USLE

L'Equation universelle de pertes en sol (USLE) de Wischmeier & Smith (1978)[WIS 78] reste, de loin, le modèle le plus utilisé parmi les modèles mathématiques de prédiction de l'érosion en nappes. L'intégration des cartes thématiques des facteurs de ce modèle dans le SIG permet de cerner l'impact de chaque facteur dans les pertes en sol, de classer par importance relative les zones d'érosion, et de quantifier les pertes en sol. D'où le choix de ce modèle.

3.1.1. Méthodologie

La modélisation du processus de l'érosion hydrique dans la région d'étude a été effectuée en utilisant l'équation universelle de perte de sol (USLE) dans sa version adaptée par Kalman (1967) aux conditions algérienne. Le modèle empirique USLE est intégré dans le SIG, pour l'estimation quantitative de l'érosion hydrique.

Ce modèle, réunit les facteurs ayant une incidence sur l'importance de l'érosion et se présente comme suit :

$$\mathbf{A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P}$$

Où :

A = Taux de perte en sol (t/ha/an).

R = Erosivité de pluie,

K = Erodibilité du sol,

LS = Facteur topographique intégrant la pente et la longueur de pente,

C = Facteur du couvert végétal,

P = Facteur exprimant la protection du sol par les pratiques agricoles.

D'après Kalman, ces cinq facteurs servent à calculer les pertes de sol en un endroit donné.

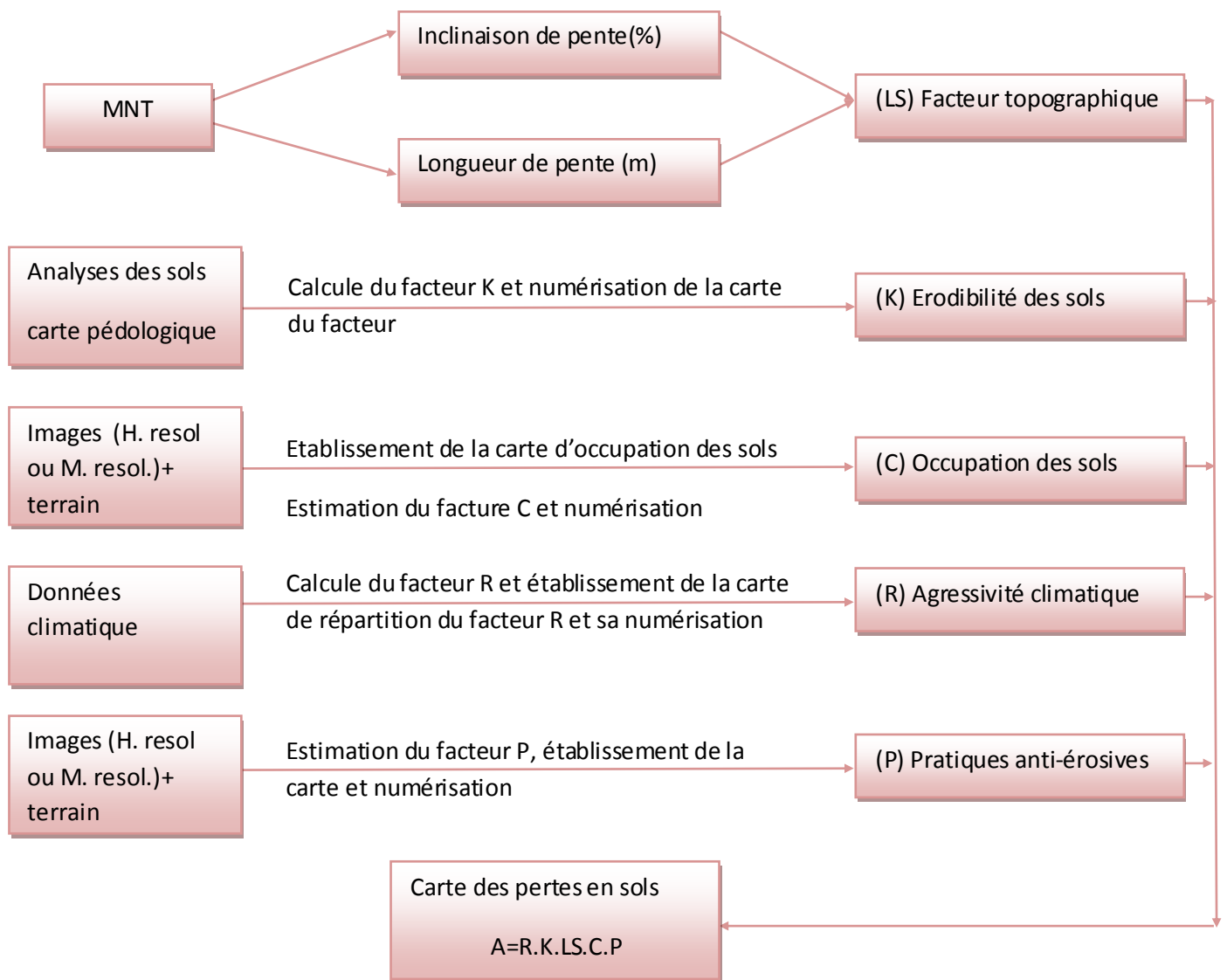


Figure 3.2.: Schéma méthodologique représentant les différentes étapes de l'USLE [GAR 05]

3.1.2. Détermination des paramètres

a. Indicateur de l'érosivité des pluies (l'agressivité climatique) :

Le premier facteur R de l'équation est égal à l'énergie cinétique des pluies, que multiplie l'intensité maximale des pluies durant 30 minutes exprimée en cm par heure. Cet indice correspond aux risques érosifs potentiels dans une région donnée où se manifeste l'érosion en nappe sur une parcelle nue de 9 % de pente. Certains auteurs (Kalman 1967 et Arnoldus 1980) ont développé des formules alternatives qui n'impliquent que les précipitations mensuelles et annuelles pour déterminer le facteur R, donc on calcule le facteur R en utilisant le modèle de Kalman qui a travaillé dans la zone nord-africaine :

$$R_{kal} = 143 \cdot \text{Log}(P \cdot P_{24} \cdot 10^{-6}) + 89,7$$

Où :

P_{24} : Pluviométrie maximale de 24 heures d'une période de retour de 10 ans ;

P : Pluviométrie annuelle moyenne.

L'absence de données exhaustives a empêché de générer une carte d'iso-valeurs de cet indice nécessaire lorsque l'étude se fait sur de grands territoires où sa variation n'est pas négligeable. R est donc considéré comme étant constant.

A partir des données climatiques disponibles [PET11] pour une pluie annuelle moyenne de 425 mm, l'indice R a été calculé en se basant sur la formule de Kalman. Ainsi l'agressivité des pluies est estimée à 56.3.

Stations	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Année
sikkak	17,0	25,5	51,0	42,5	46,8	63,8	68,0	55,3	38,2	8,5	4,2	4,2	425

Tableau.3.3 Répartition mensuelle des pluies

On distingue:

- Une saison humide qui dure huit (8) mois (d'octobre en mai) où la pluviométrie atteint 93% des précipitations totales annuelles avec des maximums répartis entre février et mars qui dépassent les 15% et des minimums qui ne descendent pas au-dessous de 6% en octobre.
- Une saison sèche de quatre (4) mois (juin – septembre) avec des minimums en juillet et août généralement 1% des pluies annuelles.

b. Erodibilité du sol (K) :

C'est une fonction des matières organiques et de la texture des sols, de la perméabilité et de la structure du profil. Il varie de 0.70 pour les sols les plus fragiles à 0.01 sur les sols les plus stables.

On a évalué l'indice K des différents types de sols à l'aide du Nomogramme de Wischmeier en utilisant la carte pédologique du bassin. Les valeurs du facteur K, situées entre 0,22 et 0,46 montrent une nette fragilité des sols et leur susceptibilité à l'érosion

Le tableau suivant définit pour chaque type de sol son code et son coefficient de perméabilité K qui le convient. Cette donnée doit être définie pour chaque cellule (pixel) de l'image de la zone d'étude.

Code	Type de sol	Sensation au toucher	Constante K (perméabilité)
1	Sable	Matière granuleuse, peu farineuse	0.15 - 0.20
2	Sable limoneux	Matière quelque peu farineuse	0.37 - 0.50
3	Limon	Matière très farineuse	0.45 - 0.50
4	Argile limoneuse	Matière fortement granuleuse	0.26 - 0.27
5	Argile	Matière lisse	0.21 - 0.24

Tableau.3.4. Tableau de quelques types de sols.

c. Le facteur topographique (LS):

Il dépend à la fois de la longueur de pente et de l'inclinaison de la pente. Le calcul du facteur LS du bassin versant de Sikkak, est effectué en utilisant le MNT (Modèle Numérique de Terrain) pour calculer le degré de la pente et la longueur cumulative de la pente puis enfin calculer le facteur LS.

$$LS = (L/22,15)^m (65,41 \sin^2 S + 4,56 \sin S + 0,065)$$

Où

L = longueur de pente (mètre);

S = Degré de pente; et

m = 0,2 si S < 1%;

m = 0,3 si 1% < S < 3,5%;

m = 0,4 si 3,5% < S < 5% ;

m = 0,5 si S > 5%.

d. Facteur du couvert végétal (C):

Le couvert végétal est - après la topographie – le second facteur le plus important qui contrôle le risque d'érosion des sols . Dans le modèle USLE. La valeur de C dépend principalement du pourcentage de couverture végétale et de la phase de croissance. La carte du facteur C pour le bassin versant d'oued sikkak a été déduite à partir des cartes d'occupation du sol. Ces dernières ont été déterminées à partir de l'exploitation des données de la télédétection (de Moyenne résolution : M.résol) et des observations de terrain. Les valeurs affectées aux différents modes d'utilisation des sols se situent entre 0.08 et 0.75 [GAR 08].

e. Facteur de la protection du sol par les pratiques agricoles (P):

Ce facteur tient compte des pratiques purement antiérosives comme par exemple le labour en courbe de niveau ou le buttage, ou le billonnage en courbe de niveau.

Il varie entre 1 sur un sol nu sans aucun aménagement antiérosif à 0.1 environ, lorsque sur une pente faible, on pratique le billonnage cloisonné (Roose, 1996). Vu l'état des aménagements anti-érosifs dans la région, la valeur 1 est affectée au facteur P [FAN 09].

3.2. Le modèle sédimentation

Selon Auzet (1987), la principale critique à faire à l'USLE est qu'elle ne tient pas compte des interactions entre facteurs. En effet, elle se présente sous la forme d'un produit et fait intervenir les facteurs par leur poids statistique sans tenir compte de leur liaison causale, négligeant alors des relations complexes. Or, dans les régions peu accidentées, à climat peu agressif, les relations entre les facteurs sont sans doute plus déterminantes que les facteurs eux-mêmes. L'équation ne prend en compte les interactions entre facteurs que de manière sommaire puisqu'elle les suppose linéaires.

Afin de mettre en avant la variabilité spatiale et temporelle des paramètres d'érodibilité, on utilise une approche plus déterministe basée sur la description des processus physiques de la sédimentation et du transport au travers de modèles mathématiques.

3.2.1. Méthodologie

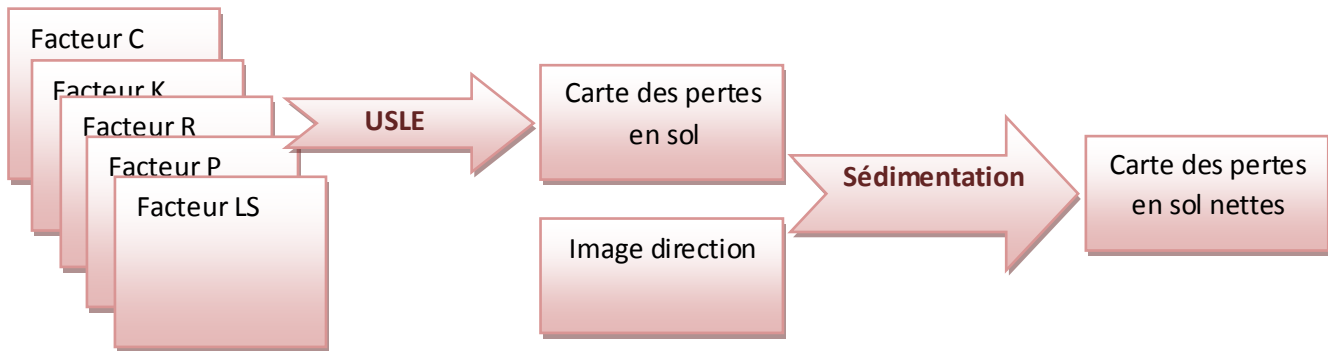


Figure 3.5. Schématisation de modèle sédimentation

Le modèle Sédimentation est basé sur les résultats du modèle USLE pour calculer le bilan d'érosion dans chaque parcelle élémentaire considérée homogène. Il utilise des polygones homogènes résultant du calcul du module USLE pour évaluer le mouvement net du sol (érosion ou dépôt) dans des parcelles ou des sous bassins versants (Lewis et al, 2005). Si les données sont analysées à l'échelle du bassin versant, un rapport de la délivrance du sédiment peut être entré pour déterminer la quantité du sédiment à la sortie du bassin. L'exécution de ce module vient après celle du module USLE et nécessite le recours à un modèle numérique du terrain (MNT) ou plus précisément à l'image Direction, aux images d'identification de polygones homogènes et à celle des pertes en sol résultant du calcul fait par USLE.

La détermination de l'érosion ou du dépôt net commence par le calcul du total des pertes en sol pour chaque polygone homogène produit à partir du module USLE. Le module Sédimentation détermine d'abord l'altitude moyenne pour chaque polygone puis la localisation de la plus grande altitude dans le bassin versant ou dans la parcelle considérée. La direction du mouvement du sol est alors établie par les différences relatives des altitudes entre les polygones contigus.

Ainsi le mouvement est toujours dans la direction de la pente descendante. La quantité de perte du sol qui entre dans les polygones inférieurs environnants est proportionnelle à la longueur de la frontière commune entre le polygone en amont et celui en aval (Eastman, 2006). La figure 3.6. Résume cette procédure.

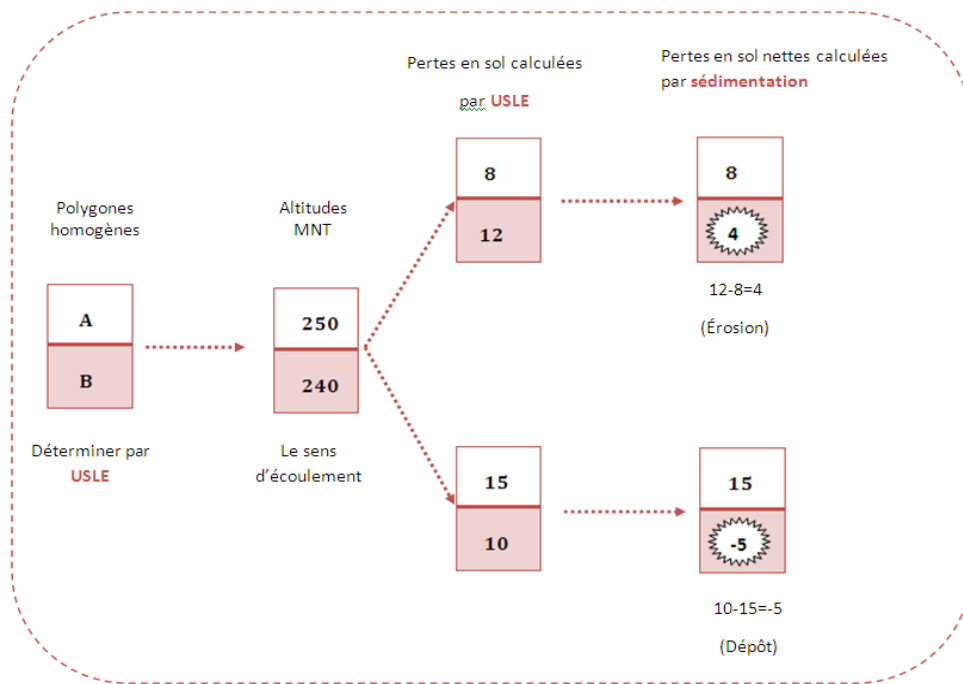


Figure 3.6. Le calcul de la perte en sol nette.

Ce modèle a été conçu en deux versions :

- Dans la première version de ce modèle « Poly_pixel », un polygone homogène est représenté par un pixel, qui lui, est une région homogène.
- Dans la deuxième version « Poly_Sous_Bassin », un sous bassin représente un polygone homogène. L'homogénéité étant alors l'appartenance au même sous bassin et donc avoir le même code sous bassin.

Ces deux versions du modèle sédimentation suivant les mêmes étapes décrites ci-dessus en spécifiant les polygones qu'elles utilisent.

3.3. Le modèle Onstad et Foster (OF)

Dans ce modèle, nous essayons d'améliorer l'estimation du flux de sédiments d'un bassin versant à l'échelle d'une averse en décomposant l'érosion en ses mécanismes fondamentaux : le détachement, le transport et la sédimentation.

Le principe est de discrétiser les bassins versants en plusieurs sous bassins. Le flux de sédiments est calculé à l'exutoire de chaque sous bassin en comparant le détachement et la capacité de transport. Si le transport dépasse le détachement dans le sous bassin plus la contribution du sous bassin amont, le sol est érodé. Sinon les particules de sol érodées se déposent dans le sous bassin. Le calcul commence dans le sous bassin le plus amont et se poursuit jusqu'au canal. Le flux de sédiments total à l'exutoire est la somme des flux de sous bassins contigus au canal.

Le détachement dans un sous bassin j est calculée en utilisant les formules suivantes :

$$A = \frac{R_{OF} K S C P}{47} (X_j^{1,5} - X_{j-1}^{1,5})$$

$$R_{OF} = 0,5 R + 3,42 Q Q_p^{1,3}$$

Où

- ✓ A est le détachement dans le sous bassin j en kg/m (de largeur).
- ✓ R_{OF} est l'indice de l'érosivité d'Onstad et Foster en (MJ mm)/(ha h)/averse.
- ✓ K, S, C et P sont les paramètres de l'USLE.
- ✓ x est l'abscisse le long de la pente en m.
- ✓ R est l'indice d'érosivité des pluies de l'USLE.
- ✓ Q_p est le débit de pointe mm/h et elle est calculée par :

$$Q_p = K1 * C * i * A$$

avec :

- K1 : est égal à 1/360.
 - C : est le coefficient de ruissellement, compris entre 0 et 1.
 - i : est l'intensité de la pluie incidente en mm/h, et est égale à S/t.
 - A : est la surface du bassin versant pris en considération en Ha.
- ✓ Q est le volume ruisselé en mm, il est calculé en utilisant la formule ci-dessous :

$$Q = 3600 \times T_c \times Q_p$$

Où

- T_c : Temps de concentration en h.
- Q_p : Débit de pointe du bassin versant en mm/h.

La capacité de transport est calculée par :

$$T = \frac{R_{OF} K S C P}{47} X_j^{0,5}$$

Où

- ✓ K est un indice de transportabilité de sédiments et estimé par la moyenne des K des zones amont.
- ✓ C, P et S sont constants et prennent la même valeur pendant les phases de transport et de détachement.

4. Modélisation UML

Afin de bien présenté les modèles conçus dans le présent travail, nous utilisons l'approche objet UML (Unified Modeling Language) qui présente un grand nombre d'avantages, essentiellement: la construction itérative, la réutilisation des composants et la facilité de compréhension des représentations abstraites complexes.

UML n'est, toutefois, qu'un langage de modélisation et il doit être accompagné d'un processus qui devra guider la modélisation, étape par étape, jusqu'à la réalisation.

4.1. Identification des acteurs

Un acteur est l'identification d'un rôle joué par une personne externe, un processus ou une chose qui interagit avec un système [AUD 08]. Il peut consulter et/ou modifier directement l'état du système en émettant et/ou recevant des messages susceptibles d'être porteurs de données [ROQ 92].

A partir des besoins et fonctionnalités de notre système, nous apercevons qu'il existe un seul acteur. Cet acteur (utilisateur) peut être du domaine d'agriculture, d'hydrologie et même de l'économie qui sont préoccupés par la prédiction et la gestion des pertes de productivité des sols et d'usage d'eaux de surfaces. Ils s'intéressent à prévoir une gestion agroenvironnementale du bassin versant et de prédire l'impact des activités agricoles et des mesures de conservation sur la qualité de l'eau.

4.2. Spécification des besoins

Suite à l'identification des acteurs de notre système, nous passons maintenant à la définition des besoins et les fonctionnalités offertes. Nous utilisons pour montrer cela le diagramme des cas d'utilisation, ensuite le diagramme de séquence qui sert à décrire les scénarios pertinents liés aux cas d'utilisation.

4.2.1. Diagramme des cas d'utilisation

Le diagramme des cas d'utilisation représente la structure des grandes fonctionnalités nécessaires aux utilisateurs du système, c'est le premier diagramme d'UML, celui où s'assure la relation entre l'utilisateur et les objets que le système met en œuvre [AUD08].

La figure ci-dessous présente le diagramme des différents cas d'utilisation de notre acteur qui intervient dans les fonctions suivantes :

- Calcule des pertes en sol dans la zone d'étude en utilisant un des quatre modèles:
 - USLE
 - Sédimentation_POLYGONE_PIXEL
 - Sédimentation_POLYGONE_SOUS BASSIN
 - OF
- Simuler l'érosion selon le résultat de l'un des modèles:
 - USLE
 - MDS_POLYGONE_PIXEL
 - Sédimentation_POLYGONE_SOUS BASSIN
 - OF
- Consulter les cartographies de pertes en sol résultant des modèles cités ci-dessus.

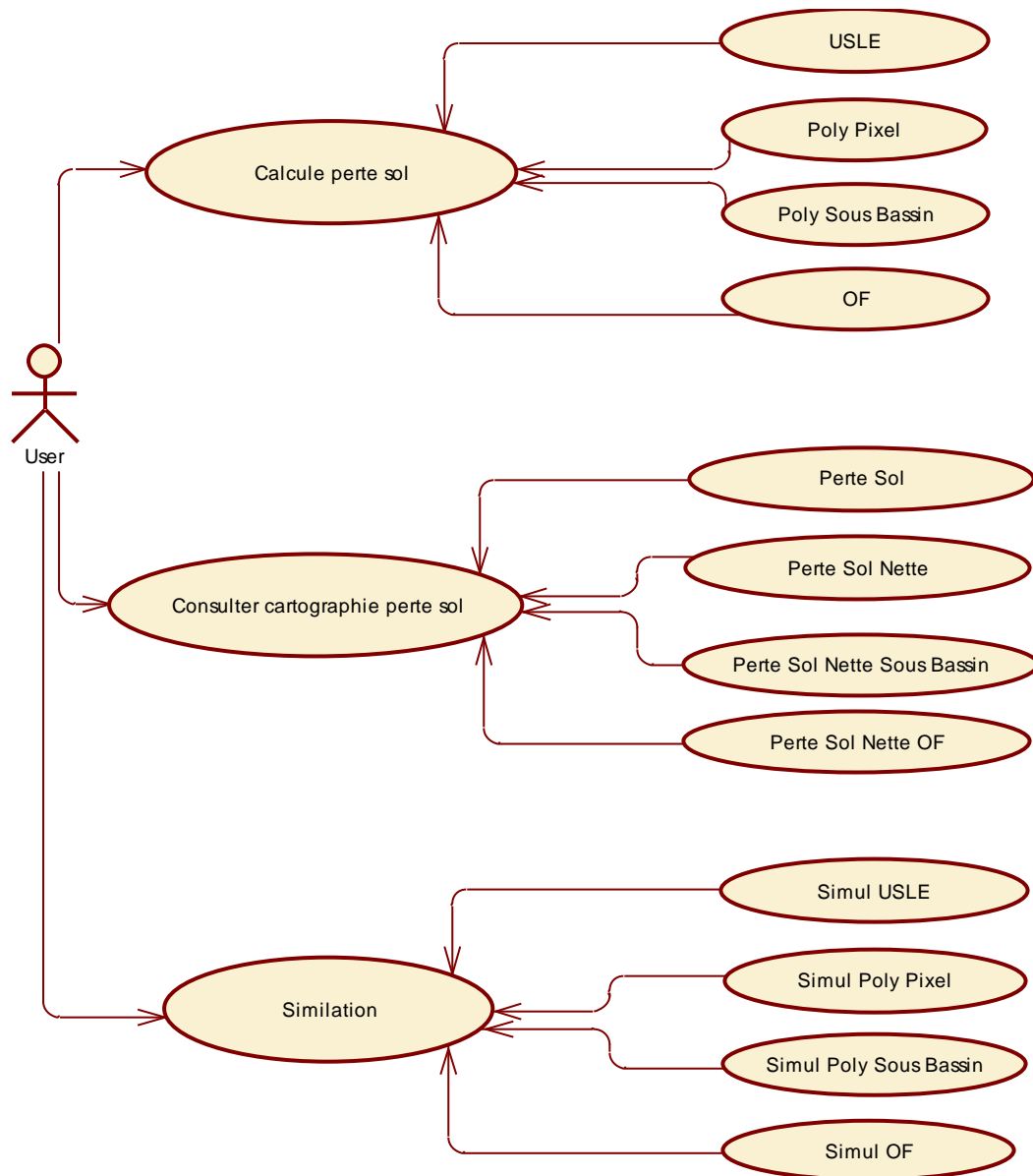


Figure 3.7. Diagramme de cas d'utilisation de l'utilisateur

4.2.2. Diagramme de séquence métier

Les diagrammes de séquences sont une représentation séquentielle du déroulement des traitements et des interactions entre les éléments du système et/ou de ses acteurs [SYC 08].

Nous présentons ci après les scénarios possibles dans notre système.

a. Calculer la perte en sol:

Lorsque l'utilisateur choisit le calcul de la perte en sol, il doit choisir un des quatre modèles cités en 3. Le diagramme de séquence pour chaque modèle est présenté ci-dessous (Figure 3.8.).

Nous présentons ci-dessous le scénario qui se déroule lorsqu'un utilisateur demande le calcul de la perte en sol en utilisant un modèle.

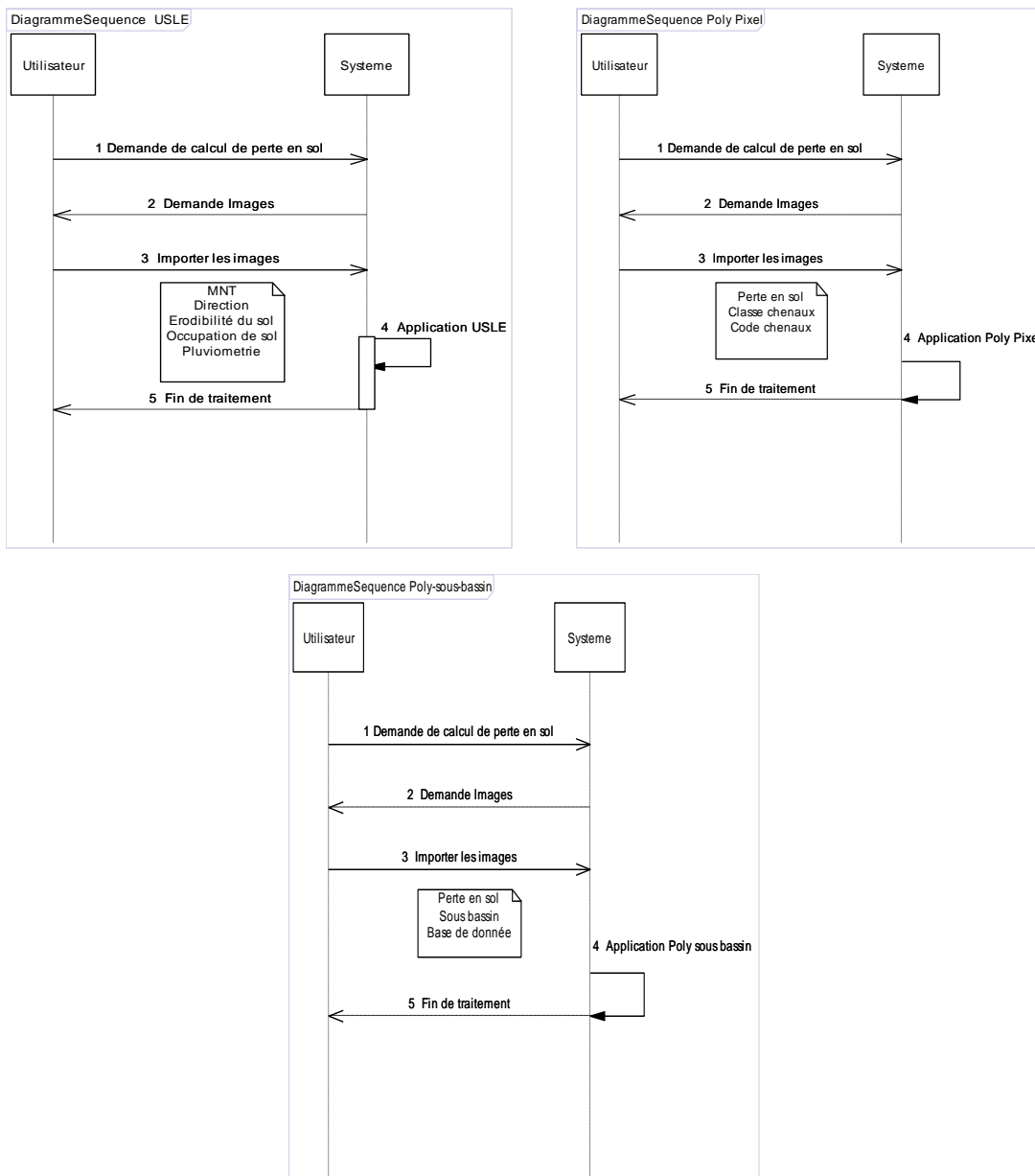


Figure 3.8. Diagrammes de séquence du calcul de perte en sol.

b. Simuler l'érosion hydrique :

L'utilisateur peut choisir la simulation de l'érosion hydrique dans la zone d'étude en utilisant le résultat d'un des quatre modèles.

Figure 3.9. Diagramme de séquence de la simulation de l'érosion hydrique.

Utilisateur	Système
1) L'utilisateur demande de simulation	
	2) Le système demande le Choix de la méthode
3) L'utilisateur sélectionne la méthode	
	4) Le système Importe images résultat de la méthode
	5) Le système demande le temps de simulation et la fréquence de sauvegarde
6) L'utilisateur introduit le temps et la fréquence	
	7) Le système demande la valeur initiale des sédiments
8) L'utilisateur introduit la valeur initiale des sédiments	
	9) Le système lance la simulation
	10) Le système donne les images résultats à chaque fréquence

Tableau 3.10. Scénario de la simulation

c. Consulter une cartographie :

L'utilisateur peut choisir la visualisation et la consultation de différentes cartographies résultantes de simulation ou de calcul de perte en sol.

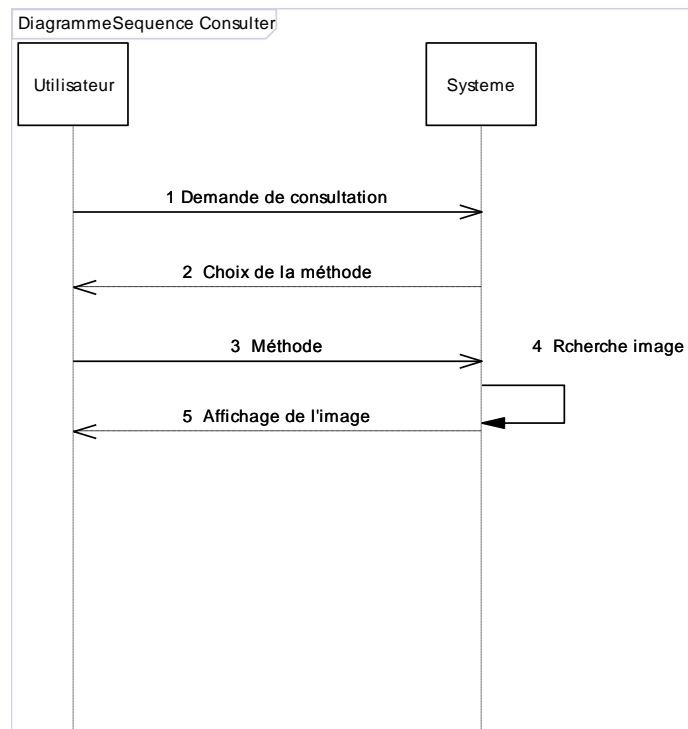


Figure 3.11. Diagramme de séquence de la consultation des images

Utilisateur	Système
1) L'utilisateur demande la consultation	
	2) Le système demande le choix de la méthode
3) L'utilisateur sélectionne la méthode	
	4) Le système cherche des images
	5) Le système affiche les images

Tableau 3.12. Scénario de la consultation

4.3. Diagramme d'état

En définissant le diagramme d'état, nous illustrons les principaux changements de notre système.

À l' lancement, le système se met à un état d'attente du choix de l'utilisateur. Il passe dans un état final si l'utilisateur choisit de quitter le système (le système est alors éteint), sinon il passe en état de fonctionnement lorsque l'utilisateur choisit une action (un cas d'utilisation) et le système effectue le traitement correspondant pour revenir ensuite à l'état d'attente.

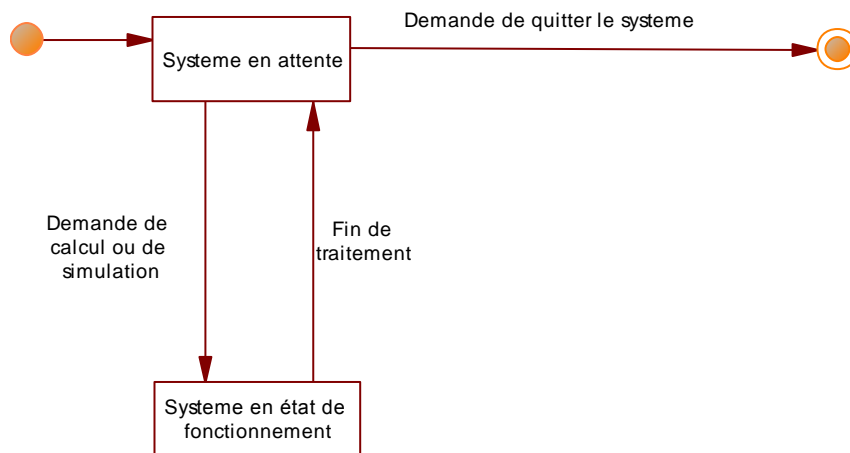


Figure 3.13. Diagramme d'état du système

4.4. Diagramme de classe

Avant de donner le diagramme de classe métier de notre système il s'avère utile de décrire ses différentes classes :

- ✓ **Région** : cette classe représente la région objet d'étude et définie par son nom.
- ✓ **Image** : cette classe représente une image qui est définie par un nombre de lignes, un nombre de colonnes, la résolution du pixel ainsi que la valeur de chaque pixel. Cette dernière est égale à l'altitude dans un MNT, et à d'autres paramètres comme l'érodibilité et l'occupation du sol, la pluviométrie, la topologie et les pratiques agricoles. Chaque paramètre représente en fait un type d'image qui tous héritent de cette classe mère.
- ✓ **USLE** : est la classe qui contient la méthode qui calcule la perte en sol dans la région d'étude en utilisant l'équation universelle de perte de sol (USLE).
- ✓ **Poly_Pixel** : est la classe qui contient la méthode qui calcule la perte en sol nette dans la région d'étude en utilisant le modèle sédimentation telle que: un polygone est représenté par un pixel.

- ✓ **Poly_Sous_Bassin**: est la classe qui contient la méthode qui calcule la perte en sol nette dans la région d'étude en utilisant le modèle sédimentation telle que: un polygone est représenté par un sous bassin.
- ✓ **OF** : est la classe qui contient la méthode qui calcule la perte en sol nette dans la région d'étude en utilisant le modèle OF qui prend en compte les deux processus de transport et de détachement. Paramètres: est la classe utilisée conjointement avec la classe OF qui précède. Elle contient les différents paramètres nécessaires au calcul de la perte en sol nette par le modèle OF, à savoir : le débit de ruissellement et celui de pointe, ainsi que l'abscisse le long de la pente.
- ✓ **Parametres_Simulation** : cette classe contient les trois paramètres principaux qui interviennent dans la simulation (les quatre classe qui suivent) : le temps de simulation, la fréquence de sauvegarde des images résultats de simulation et la valeur initiale des sédiments dans la zone d'étude.
- ✓ **Simuler_USLE** : cette classe est responsable sur la simulation de l'érosion hydrique selon l'estimation de l'USLE.
- ✓ **Simuler_Poly_Pixel** : cette classe est responsable sur la simulation de l'érosion hydrique selon l'estimation de la méthode EDM avec un polygone homogène qui est égal à un pixel.
- ✓ **Simuler_Poly_Sous_Bassin** : cette classe est responsable sur la simulation de l'érosion hydrique selon l'estimation de la méthode EDM avec un polygone homogène qui est égal à un sous bassin.
- ✓ **Simuler_OF** : cette classe est responsable sur la simulation de l'érosion hydrique selon l'estimation du modèle d'OF.

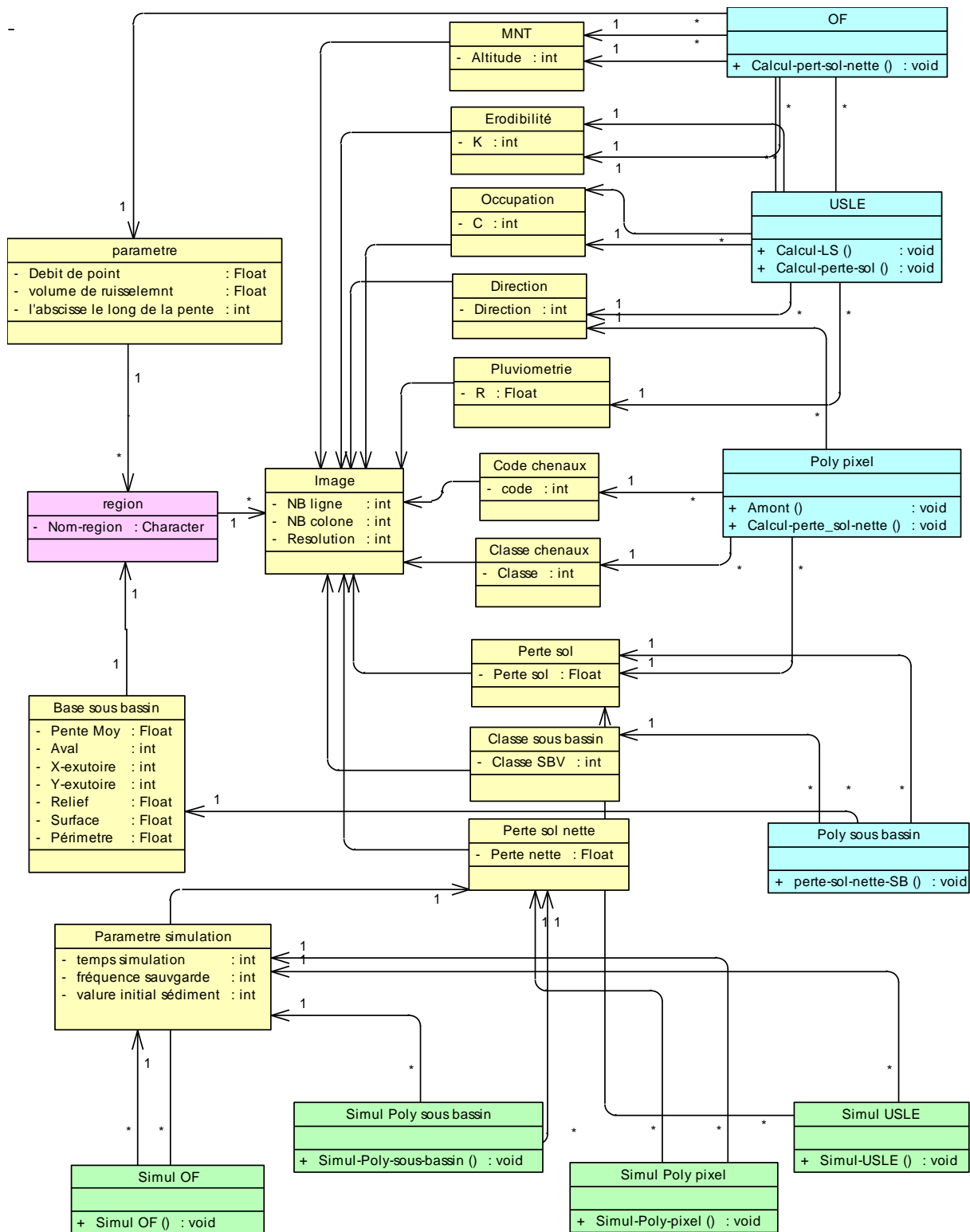


Figure 3.14. Diagramme de classe métier

Conclusion

Dans le présent chapitre, nous avons présenté les trois modèles d'érosion que nous avons utilisé afin d'estimer les quantités des sédiments érodés à l'intérieur d'un bassin versant. Le premier est le modèle empirique de base (USLE) auquel se réfèrent les deux autres modèles, qui eux sont des modèles conceptuels. Une représentation UML a été utilisée afin de bien présenter l'implémentation de ces quatre modèles.

Dans le chapitre suivant, nous appliquerons les quatre modèles d'érosion implémentés à notre zone d'étude, à savoir le bassin de Sikkak. Cette application servira en premier lieu à tester l'efficacité de ces modèles et de choisir le mieux adapté à notre zone. Elle servira également à prévoir les interventions nécessaires pour réduire l'érosion hydrique dans la zone d'étude.

Chapitre 4

Tests et

Résultats

Introduction

Dans ce chapitre nous allons exposer notre zone d'étude, les données utilisées et les résultats obtenus pour chaque modèle implémenté dans le chapitre qui précède. Nous allons, ainsi, comparer ces résultats afin de choisir le meilleur modèle et nous menons une analyse multicritère pour étudier l'impact de chaque paramètre d'entrée du modèle sur les résultats.

1. Présentation générale du bassin versant

1.1. Caractéristiques physiques

Le bassin versant de Sikkak est un sous bassin de la Tafna, situé au nord-ouest de l'Algérie. Il est le prolongement de l'Oued N'chef qui est coupé par le barrage Meffrouche en amont des cascades. Il s'étend sur une superficie de 218 km², pour un périmètre de 65 km. (Tableau 4.1).

Superficie (km ²)	218
Périmètre (km)	65
Longueur du thalweg principal (km)	55,7
Indice de compacité	1,23
Indice de pente de roche	0,36
Indice de pente global (m/km)	0,037
Altitude	
Minimale (m)	200
Maximale (m)	1400
Moyenne (m)	475

Tableau 4.1. Caractéristiques morphométriques du bassin versant de Sikkak.

Affluent rive gauche de l'oued Isser (lui même affluent rive droite de la Tafna) avec lequel il conflue au Nord d'Aïn Youcef, prend naissance sur le plateau de Terny au Sud de Tlemcen à la source d'Aïn Rhannous. (Figure 4.1), le bassin de Sikkak s'écoule sur une longueur de 55,7 km.

2.1. Application du modèle USLE

2.1.1. Données de départ

Pour l'application du modèle USLE, nous avons besoin de cinq paramètres: R, K, LS, C, P.

K est l'érodibilité du sol, C est le facteur du couvert végétal, R est l'érosivité de pluie, P est le facteur exprimant la protection du sol par les pratiques agricoles et LS est le facteur topographique intégrant la pente et la longueur de pente.

- Les indices K et C sont représentés chacun par une image dans laquelle la valeur de chaque pixel correspond au paramètre dans la parcelle correspondante (voir Figure 4.3.).

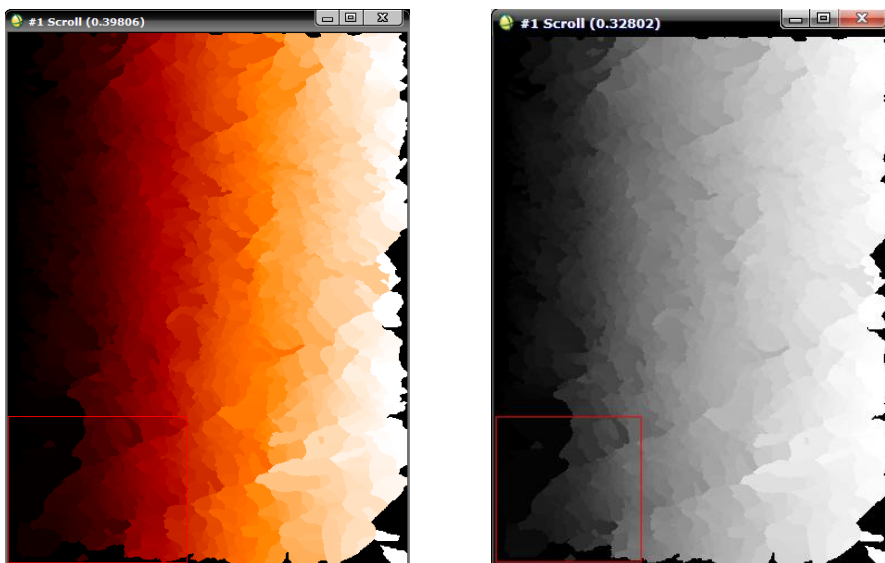


Figure 4.3. Images «Erodibilité (R)», «Occupation du sol (C)» du bassin Sikkak

- Etant donné l'absence de données exhaustives de la pluviométrie, le paramètre R est donc considéré comme étant constant pour les petits bassins et une image avec des valeurs aléatoires pour les grands bassins. A partir des données climatiques disponibles [PET 2011] pour une pluie annuelle moyenne de 425 mm, l'indice R a été calculé en se basant sur la formule de Kalman. Ainsi l'agressivité des pluies est estimée à 56.3.
- L'indice P tient compte des pratiques purement antiérosives. Vu l'état des aménagements anti-érosifs dans la région, la valeur 1 est affectée au facteur P [FAN 09] (un sol nu sans aucun aménagement antiérosif).
- L'indice LS dépend à la fois de la longueur de pente et de l'inclinaison de la pente. Le calcul du facteur LS du bassin versant de Sikkak, est effectué en utilisant le MNT (Modèle Numérique de Terrain) pour calculer le degré de la pente et la longueur cumulative de la pente en utilisant l'image direction (voir Figure 4.4.). L'image de la pente est extraite directement de l'image MNT en utilisant la fonction prédéfinie «Topo_Doit» de l'IDL et qui génère la pente surfacique du bassin défini par son image MNT. La longueur de pente entre deux pixels dépend de la direction du premier pixel. Si la direction est égale à 2, 8, 32 ou 128 alors la longueur de pente est égale à la résolution de l'image. Cependant, si la direction est vaut 1, 4, 16 ou 64 alors la longueur de pente est égale à $(2 * \text{la résolution})^{1/2}$.

En utilisant les images Pente et Longueur de pente, le facteur LS est calculé selon la formule suivante :

$$LS = (L/22,15)^m (65,41 \sin^2 S + 4,56 \sin S + 0,065)$$

Où

L = longueur de pente ;

S = Degré de pente ;

m = 0,2 si S < 1% ;

= 0,3 si 1% < S < 3,5% ;

= 0,4 si 3,5% < S < 5% ;

= 0,5 si S > 5%.

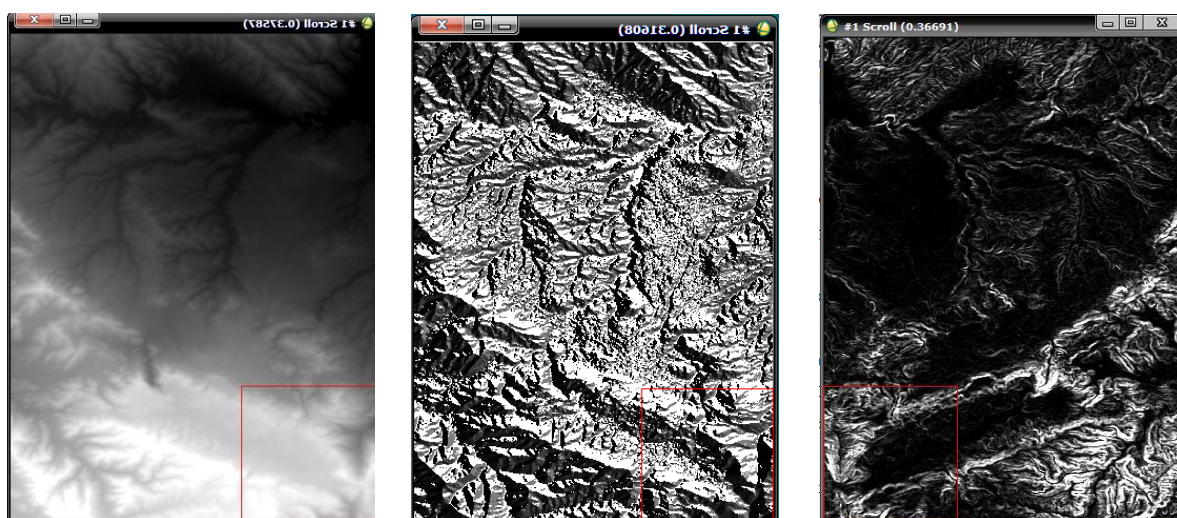


Figure 4.4. Images «MNT», «Direction» et «facteur LS» du bassin Sikkak

2.1.2. Réalisation de la carte d'érosivité

Le croisement des cartes des principaux facteurs intervenant dans l'érosion hydrique des sols permet d'obtenir la carte des pertes en sols en tout point de notre bassin versant. L'application de la formule de Wischmeier & Smith (1978) en tenant compte des valeurs numériques des cinq facteurs donne la perte en sol pour chaque point du bassin versant. Ce traitement permet de subdiviser le territoire du bassin Sikkak en 1560244 unités distinctes d'une surface de 900 m² en moyenne. Chaque unité possède des valeurs homogènes des cinq facteurs de l'USLE, avec une perte en sol, moyenne de tous les pixels de l'unité exprimée en t/ha/an.

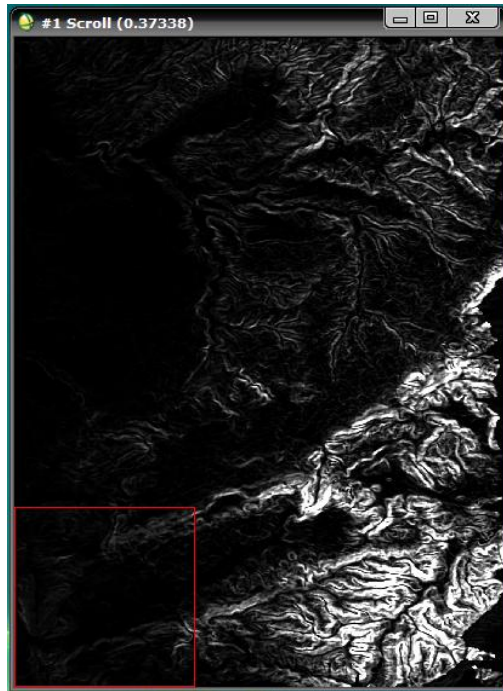


Figure 4.5. La cartographie de la perte en sol du bassin Sikkak en utilisant USLE.

La perte moyenne par érosion hydrique surfacique pour l'ensemble des unités est d'environ 13.6468 t/ha/an. Les pertes maximales et minimales par unité sont respectivement de 58.4841 t/ha/an et de 0 t/ha/an.

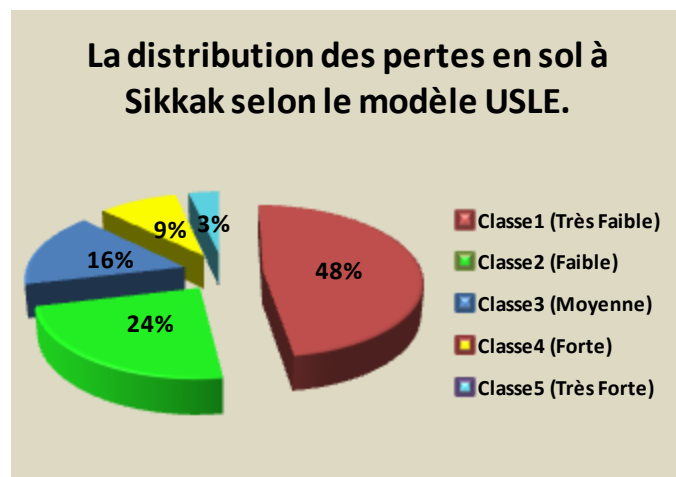


Figure 4.6 La classification et la distribution des pertes en sol évaluées par l'USLE.

Les taux d'érosion diffèrent d'une zone à l'autre du bassin versant, selon l'influence des différents facteurs qui

contrôlent l'érosion. La répartition des pertes en terre n'est pas proportionnelle aux surfaces ; en effet, 12% de la surface du bassin subit les fortes pertes en sol (Figure 4.6.).

Les valeurs obtenues, malgré leur apparente hétérogénéité, présentent une structure spatiale définie par les caractéristiques topologiques des différentes parcelles. Les parties les plus en aval sont des zones de dépôts de sédiments et non des zones d'érosion (Renard et al, 1997) comme en témoigne le comblement des ravines de versants (Revel et al, 1990).

La carte du risque érosif devrait donc fournir en ces lieux des «valeurs négatives d'érosion» pour figurer le fait que les sédiments s'y déposent. Le modèle USLE ne permet pas de réaliser ce type de distinctions ni de quantifier la proportion de sol susceptible de se déposer dans ces secteurs. Cependant, puisqu'ils apparaissent sur la carte comme présentant de faibles risques de détachement des sédiments, l'erreur introduite n'affecte pas l'identification des zones à fort risque. Le modèle qui suit, permet de mieux représenter le dépôt des sédiments en permettant les valeurs négatives d'érosion.

2.2. Application du modèle Sédimentation1 (Polygone= pixel)

Ce modèle est empirique et prend en compte les deux processus hydriques : l'érosion et la sédimentation (ou le dépôt). Il utilise les résultats de l'USLE pour en servir dans le calcul des pertes en sols nettes, et donc différencier les parcelles dans lesquelles les sédiments se déposent et celles dont les sédiments s'érodent. Cette méthode s'intéresse seulement aux zones appartenant au réseau hydrographique, aucun calcul ne se fait en dehors de ces zones.

2.2.1. Données de départ

En plus des cinq paramètres de l'USLE, nous avons besoin de deux images : les classes et les codes des chenaux.

Ces deux images sont des résultats du travail de [BES 10] qui consiste à l'extraction du réseau hydrologique d'un bassin versant et sa vectorisation en sous bassin.

- Dans l'image « Classe chenaux », une classification des tronçons constituant le réseau est donnée telle que chaque type de chenal est identifié par une classe. L'objectif est de donner une vision globale sur le bassin versant du réseau. La classification utilisée ici est celle de Strahler (Strahler, 1952) (pour plus de détails, se référer à [BES 10]).
- Dans l'image « Code chenaux », à chaque chenal est attribué un code pour différencier les chenaux feuilles et non feuilles de chaque classe.

Notons que, Les pixels appartenant au chenal dans l'image « classe chenaux » (respectivement « code chenaux ») ont une valeur égale à la classe (respectivement code) attribué au chenal [BES 10] (voir Figure 4.7. et Figure 4.8.).

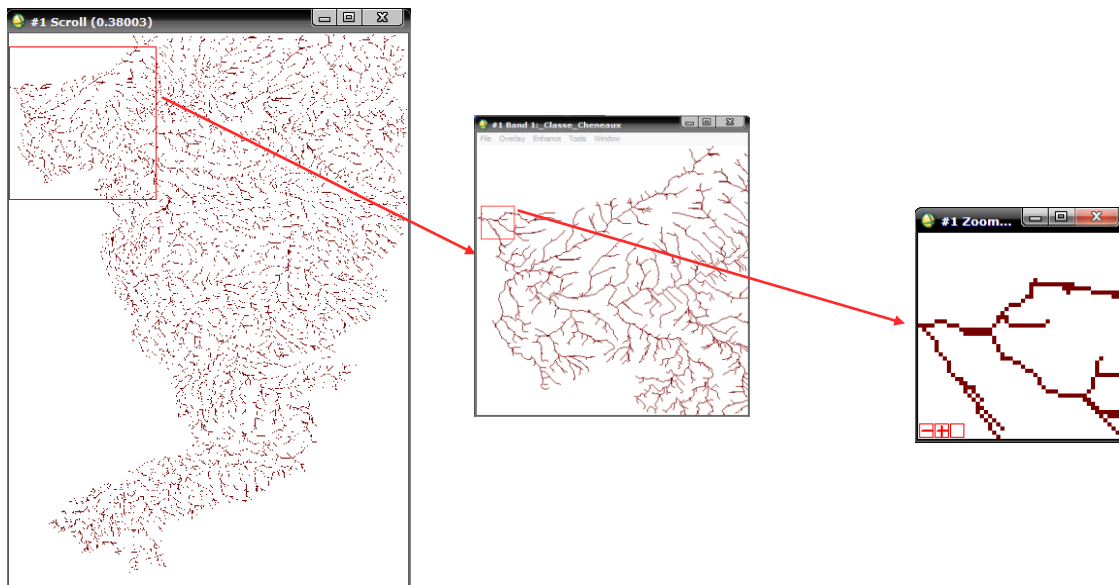


Figure 4.7. Image « Classe Chenaux » du bassin Sikkak

Pour notre bassin, l'image « Classe chenaux » montre l'existence de sept (7) classes différentes des chenaux. La majorité des pixels de l'image appartiennent à la classe 0 avec un pourcentage de 96.1540 % (chenaux feuilles). Ce pourcentage décroît en augmentant la classe jusqu'à arriver à la dernière classe (classe 7 qui contient l'exutoire du bassin) avec un pourcentage de 0.0117 % (équivalent à 183 pixels).

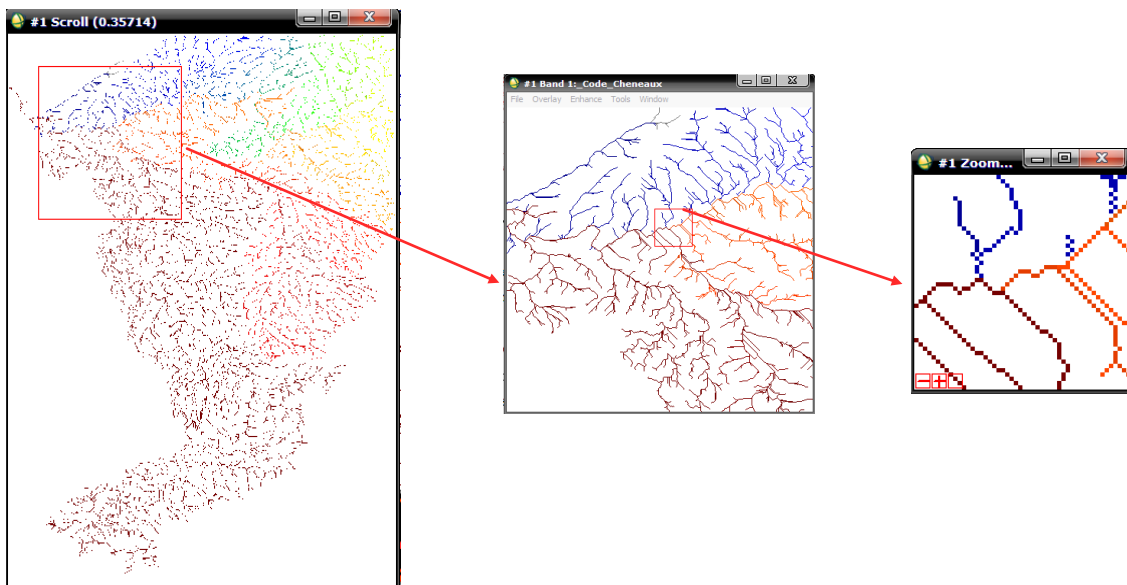


Figure 4.8. Image « Code Chenaux » du bassin Sikkak

Pour le bassin de Sikkak, l'image « Code chenaux » présente 8107 codes différents pour les chenaux. La majorité des pixels de l'image appartiennent à la classe 0 qui coïncide avec le code unique 0 avec un pourcentage de 96.1696 %.

2.2.2. Réalisation de la carte d'érosivité

On applique la méthode Sedimentation1 en utilisant les résultats de perte en sol trouvés en 2.1. Les polygones sont représentés par les pixels. En comparant les pertes en sol du pixel amont et du pixel aval, on conclut s'il s'agit d'une érosion ou d'un dépôt. La figure ci-dessous présente la cartographie des pertes en sol de notre bassin.



Figure 4.9. La perte en sol nette du bassin Sikkak en utilisant le modèle Sédimentation avec un polygone = un pixel.

La perte moyenne par érosion hydrique surfacique pour l'ensemble des unités est d'environ 24.3 t/ha/an. Les pertes maximales et minimales par unité sont respectivement de 35.5 t/ha/an et de -28.3 t/ha/an.

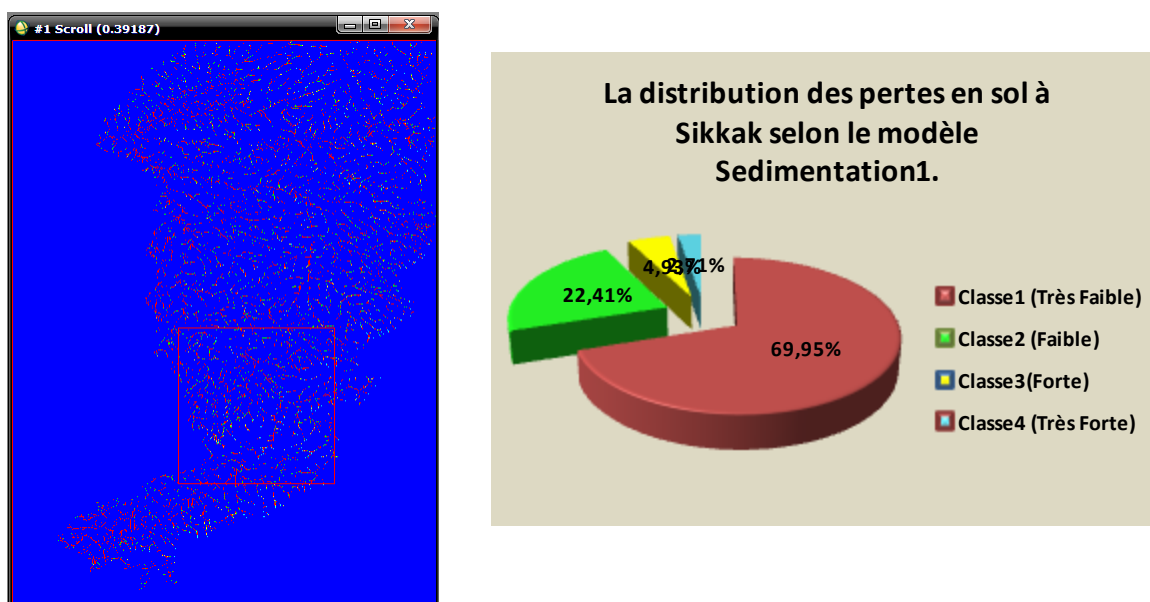


Figure 4.10. La classification et la distribution des pertes en sol nette du bassin Sikkak en utilisant le modèle Sédimentation avec un polygone = un pixel.

Nous remarquons que la classe dominante sur le réseau hydrologique est la classe 1 qui présente un taux très

faible d'érosion. Les taux élevés sont remarquables dans 7,62% du réseau (ce qui représente environ 0,0031 du sous bassin complet). Ces taux sont observés dans les parcelles à forte pente (Figure 4.10.).

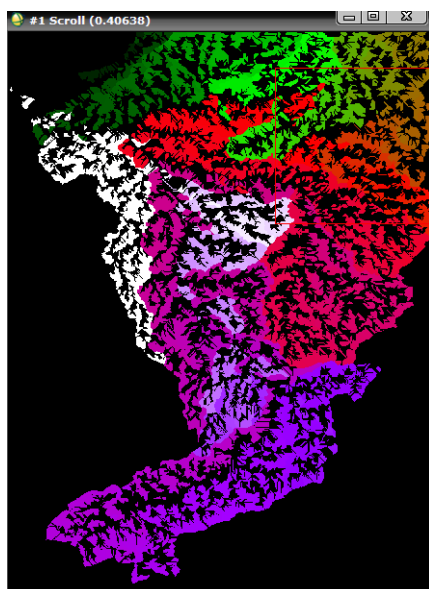
2.3. Application du modèle Sédimentation2 (polygone= sous bassin)

Dans ce modèle empirique, on utilise les résultats d'USLE afin de calculer les pertes en sol nettes du bassin. Pour cela on définit chaque polygone de pixels homogènes comme un l'ensemble des pixels appartenant à un même sous bassin.

2.3.1. Données de départ

Nous utilisons dans ce modèle les mêmes données que les deux modèles précédents, sauf qu'ici tout calcul s'effectuera plutôt sur des sous bassins que sur des pixels. Pour cela, on considère pour chaque sous bassin les valeurs moyennes des paramètres des pixels appartenant à ce sous bassin. Ce traitement subdivise le bassin de Sikkak en 9151 unités distinctes (polygones) de surfaces différentes (environ 23823 m² en moyenne). Chaque unité possède une valeur de la perte en sol totale résultats de l'USLE (décrite en 2.1.), qui est égale à la somme des pertes en sol des pixels appartenant à cette unité.

En plus, nous avons besoin de l'image sous bassin, qui attribue à chaque pixel la valeur de son sous bassin. Nous utilisons également, une base de données contenant quelques données relatives aux sous bassin, principalement : le numéro du sous bassin, la surface, le périmètre, la pente moyenne, la longueur de pente, le sous bassin aval ainsi que ses coordonnées (x et y). (voir Figure 4.11.(a) et Figure 4.11.(b)). Ces données sont aussi des résultats du travail de [BES10].



(a) Image « Sous Bassin »

	CODE	PERIM	SURFACE	PENTE_MOYEN	RELIEF	X_EXUTOIRE	Y_EXUTOIRE	AVAL
1	9151	0.00000000	7.7160500e-007	44.991135	3.0000000	1	140	-1
2	1	0.00000000	7.3302470e-006	72.923378	6.0000000	3	139	9151
3	9150	0.00000000	1.1574070e-006	53.987656	3.0000000	3	140	9151
4	9149	0.00000000	4.5524690e-006	86.924309	10.000000	6	141	9150
5	9148	0.000833333333	8.7962960e-006	66.298576	9.0000000	6	140	9150
6	38	0.001111111111	7.5617280e-006	72.529060	7.0000000	15	142	9148
7	9147	0.0025000000	1.1342590e-005	61.616147	10.000000	15	143	9148
8	42	0.00000000	5.0154320e-006	81.685009	5.0000000	30	196	9136
9	56	0.00000000	1.0185185e-005	87.936142	13.000000	27	297	77
10	57	0.00000000	5.9413580e-006	86.478195	18.000000	27	288	77
11	9146	0.00000000	4.0123460e-006	10.381292	1.0000000	24	156	9147
12	41	0.00000000	3.8580200e-007	17.986494	0.0000000	24	155	9147
13	24	0.000277777778	1.8518520e-006	89.969139	8.0000000	25	143	38
14	37	0.000277777778	2.3688272e-005	89.691246	39.000000	25	144	38
15	43	0.000655555556	6.7901230e-006	33.740913	4.0000000	30	198	9136
16	9138	0.000277777778	6.5586420e-006	80.450218	9.0000000	35	177	9144
17	93	0.0013888889	4.3209877e-005	88.705414	102.00000	50	231	114
18	77	0.000177777778	0.2161100e-006	88.717099	10.000000	36	209	87

(b) Base de données « Sous Bassin »

Figure 4.11. Image « Sous Bassin » et la base de données du bassin Sikkak

Dans notre bassin, l'image « Sous Bassin » montre un nombre de sous bassin qui vaut 9151. Ces sous bassins ont des surfaces, des pentes et des longueurs de pente différentes. Ces données sont toutes regroupées dans la base de données, ainsi que le bassin exutoire de chaque sous bassin, sauf pour le sous bassin dont le code est

9151 qui lui désigne le sous bassin exutoire de tout le bassin de Sikkak. Ses coordonnées sont dans l'ordre: 1 et 140.

2.3.2. Réalisation de la carte d'érosivité

Le même processus précédent est appliqué sur les sous bassin. Pour établir l'image des pertes en sol nettes, chaque pixel prend la valeur de la perte en sol nette de son sous bassin. La figure ci-dessous montre les pertes en sol nettes évaluées avec cette méthode.

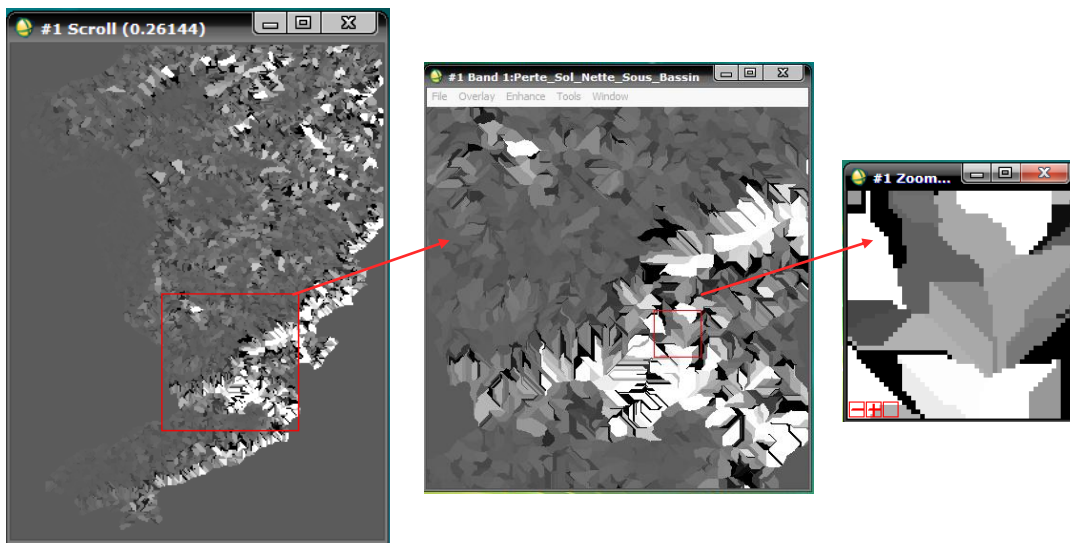


Figure 4.12. La perte en sol nette du bassin Sikkak en utilisant le modèle Sédimentation avec un polygone = un sous bassin.

L'image des pertes en sol nettes résultant de cette application présente une perte en sol nette maximale égale à 485.42564 dans le sous bassin 6993 et un dépôt maximal égal à 675.962 .

Les cas de dépôt de sédiments se présentent dans 67.6101 % des zones de notre bassin tandis que les cas d'érosion sont présents dans 32.39 %.

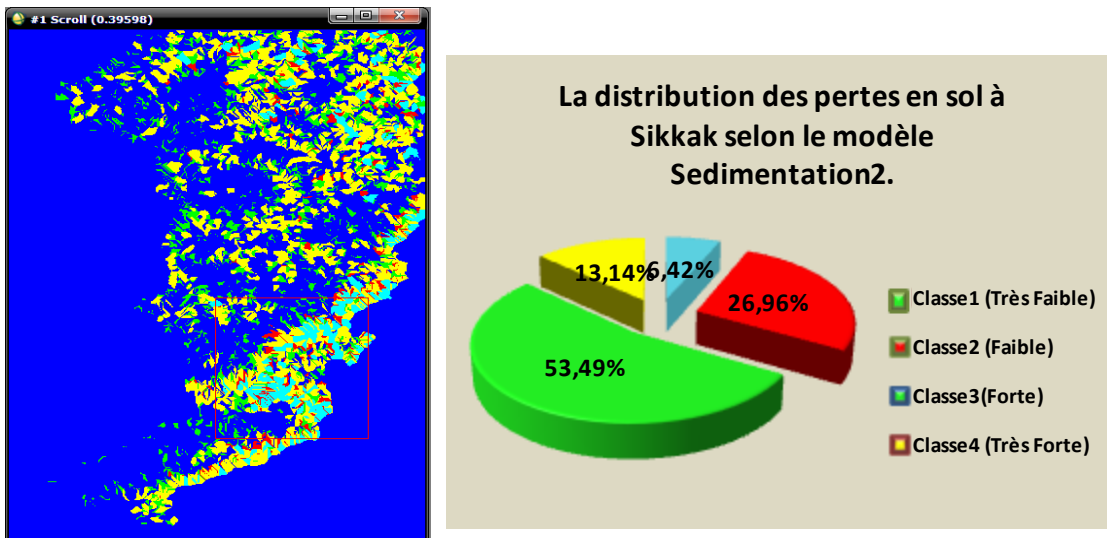


Figure 4.13. La classification et la distribution des pertes en sol nettes du bassin Sikkak en utilisant le modèle Sédimentation avec un polygone = un sous bassin.

La figure 4.13. montre que la classe2 est la classe dominante dans le bassin de Sikkak, cette classe correspond dans sa majorité au dépôt des sédiments. Cependant, une érosion forte est remarquée dans 6,42% du bassin.

2.4. Application du modèle OF

Dans ce modèle, on n'utilise pas les résultats d'USLE mais on utilise ses mêmes facteurs, à savoir K, S, C et P afin de calculer les pertes en sol nettes de notre bassin Sikkak. Cette méthode conceptuelle prend en considération les deux processus érosifs : le transport et le détachement.

Nous définissons chaque polygone de pixels homogènes comme un l'ensemble des pixels appartenant à un même sous bassin et nous calculons sa valeur de détachement et de transport pour décider ensuite sa situation (érosion ou dépôt).

2.4.1. Données de départ

Nous utilisons les mêmes données que le modèle précédent. On considère pour chaque sous bassin les valeurs moyennes des paramètres des pixels appartenant à ce sous bassin pour calculer ensuite les valeurs de détachement et du transport relatives aux différents sous bassin. Ce traitement nécessite l'utilisation de l'image sous bassin ainsi que la base de données contenant les données relatives aux sous bassin.

2.4.2. Réalisation de la carte d'érosivité

Pour le calcul des pertes en sol nettes dans chaque sous bassin, nous comparons la valeur de transport de ce sous bassin avec sa valeur de détachement plus la contribution des bassins amonts.

Si la somme des détachements dépasse le transport dans un sous bassin, alors la quantité des sédiments détachés est toute érodée. Dans le cas inverse, juste la quantité des sédiments transportés est érodée. Le calcul s'effectue en commençant par les sous bassin les plus en amonts et continue jusqu'arriver aux sous bassins les

plus en aval.

Pour établir l'image des pertes en sol nettes, chaque pixel prend la valeur de la perte en sol nette de son sous bassin. La Figure 4.14. Montre les pertes en sol nettes évaluées avec cette méthode.

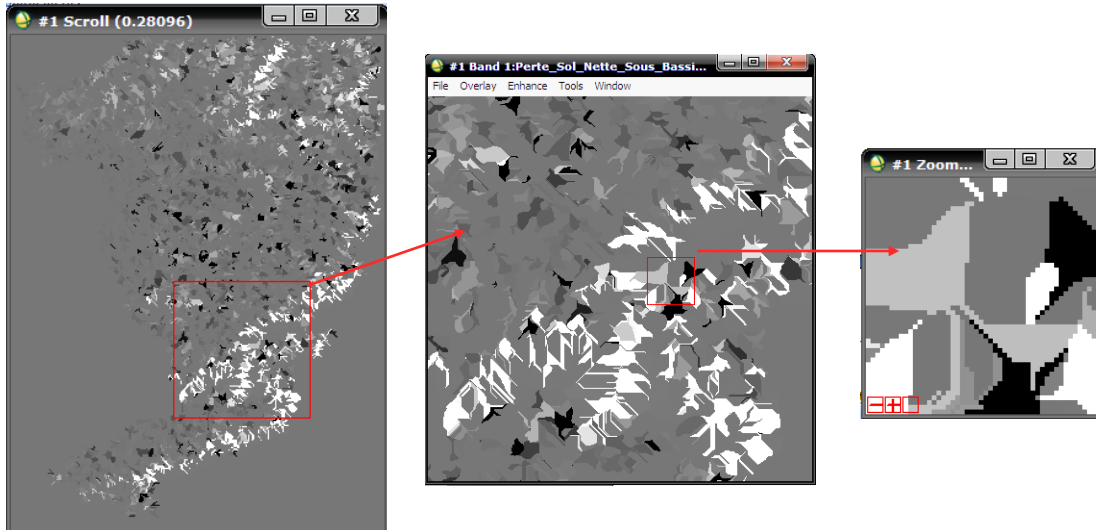


Figure 4.14. La perte en sol nette du bassin Sikkak en utilisant le modèle OF.

L'image des pertes en sol nettes résultant de l'application du modèle OF présente une perte en sol nette maximale égale à 411.825 dans le sous bassin 6993 (couvrant ainsi 0.0024 % du bassin de Sikkak) et un dépôt maximal égal à 703.210 (avec un pourcentage de 0.0052 %).

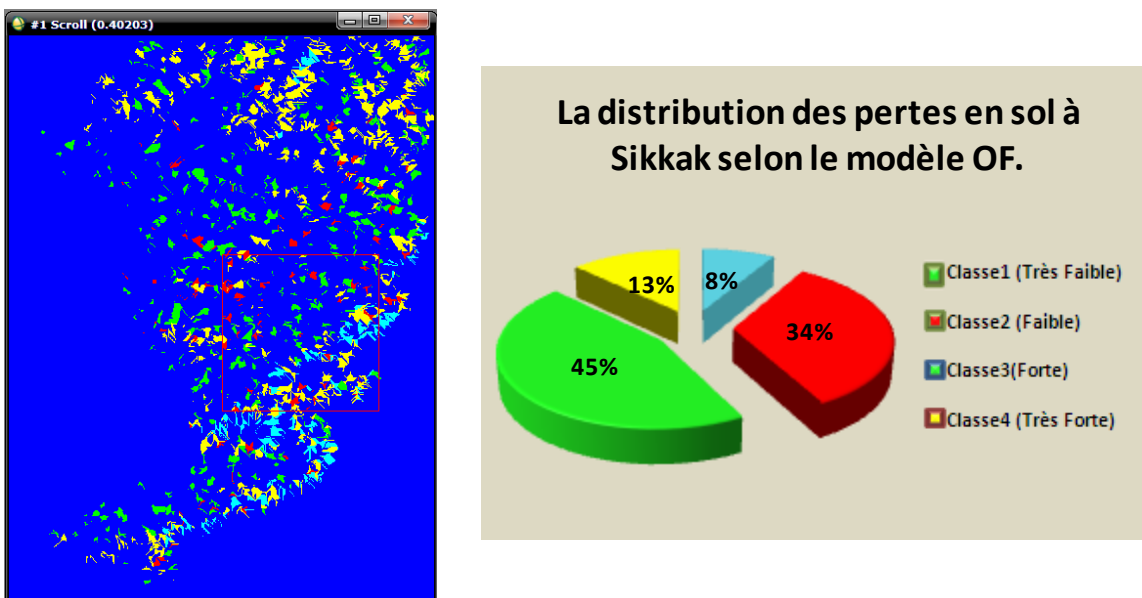


Figure 4.15. La classification et la distribution des pertes en sol nettes du bassin Sikkak en utilisant le modèle OF.

Dans la figure 4.15. les classes 1 et 2 représente le dépôt tandis que les deux classes qui restent représentent le transport des sédiments par l'eau. La sédimentation est donc repérée dans environ 88% et l'érosion dans 21%

du bassin de Sikkak.

3. Interprétation des résultats

Les modèles que nous avons implémentés présentent quelques limites à leur applicabilité. Outre le fait qu'ils ne s'appliquent qu'à l'érosion surfacique et que les quantités de pertes estimées n'incluent pas les pertes par les autres types d'érosion (linéaire, solifluxion, ...).

Le modèle USLE considère que toutes les surfaces sont soumises à l'érosion si aucun des facteurs n'est nul. Cependant, les autres modèles utilisés considèrent des cas d'érosion et d'autres de dépôt sur toute la surface du bassin objet d'étude (Sauf le modèle Sedimentation1 qui ne considère que la surface du réseau hydrologique).

Ces limites étant admises, l'intégration de ces modèles dans un SIG a présenté en revanche beaucoup d'avantages, surtout ceux liés au grand nombre de résultats relatifs aux facteurs impliqués dans l'érosion.

Cette intégration nous a permis de :

- Gérer d'une façon rationnelle une multitude de données qualitatives et quantitatives relatives aux différents facteurs de la dégradation des sols. Ceci permet de conclure les facteurs décisifs de l'érosion dans les bassins versants objet des études. C'est sur ces facteurs que les interventions doivent être focalisées pour lutter contre l'érosion hydrique en nappes.
- Démêler la complexité et l'interdépendance des facteurs déterminant de l'érosion par croisements successifs des couches informatiques relatives aux cartes thématiques.
- Introduire la notion d'évolutivité à travers l'enrichissement et l'actualisation permanente des données puisque le SIG offre la possibilité de mise à jour continue des données.
- Etablir une carte synthétique de répartition des degrés de sensibilité à l'érosion des différentes zones du bassin versant ; chaque zone du bassin versant est analysée à travers la combinaison des facteurs intervenant dans le processus érosif.

La figure ci-dessous représente les différentes classes des pentes et de l'érodibilité dans notre bassin.

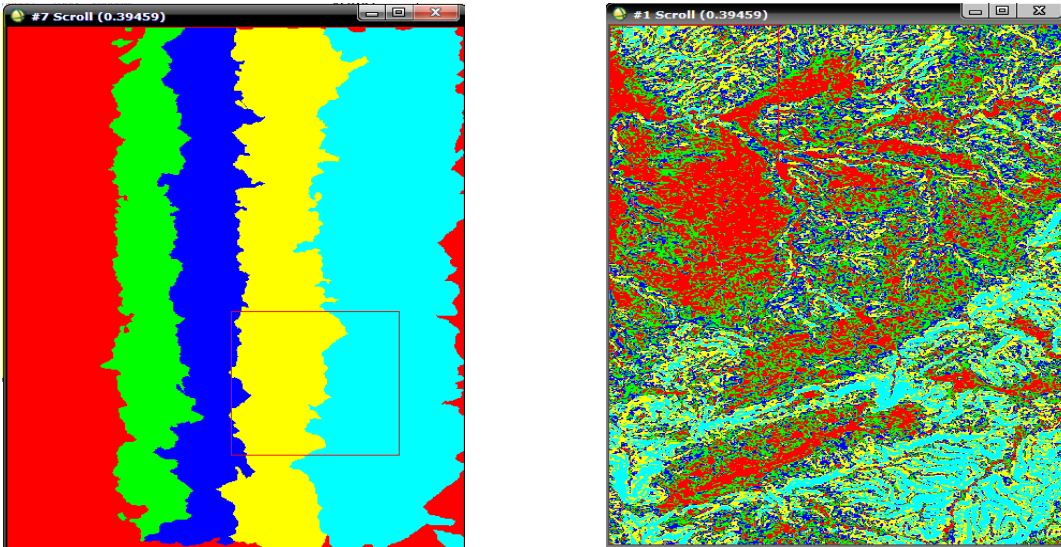


Figure 4.16. La classification des pentes et de l'érodibilité du bassin de Sikkak.

En superposant ces deux cartes avec chacune des cartographies des pertes en sol résultant des différents modèles implémentés ici, nous observons un grand impact du facteur topographique (la pente). Dans les quatre modèles, les parties amont du versant subissent toujours une érosion plus forte. Des valeurs moyennes s'observent pour les versants et les valeurs les moins élevées se trouvent sur les zones les plus en aval. Ces derniers sont généralement des zones de dépôts de sédiments et non des zones d'érosion.

Ces résultats sont confirmés par l'étude menée selon la variation des différents facteurs de l'érosion hydrique sur un petit échantillon démonstratif, notamment : la pente, l'érodibilité et le couvert végétal. Les figure 4.17. et 4.18. montrent le résultat de cette étude pour un modèle par approche par pixel (USLE) et un autre modèle par approche de sous bassin (Onstad & Foster).

Impact des paramètres sur les pertes en sol évaluées par USLE

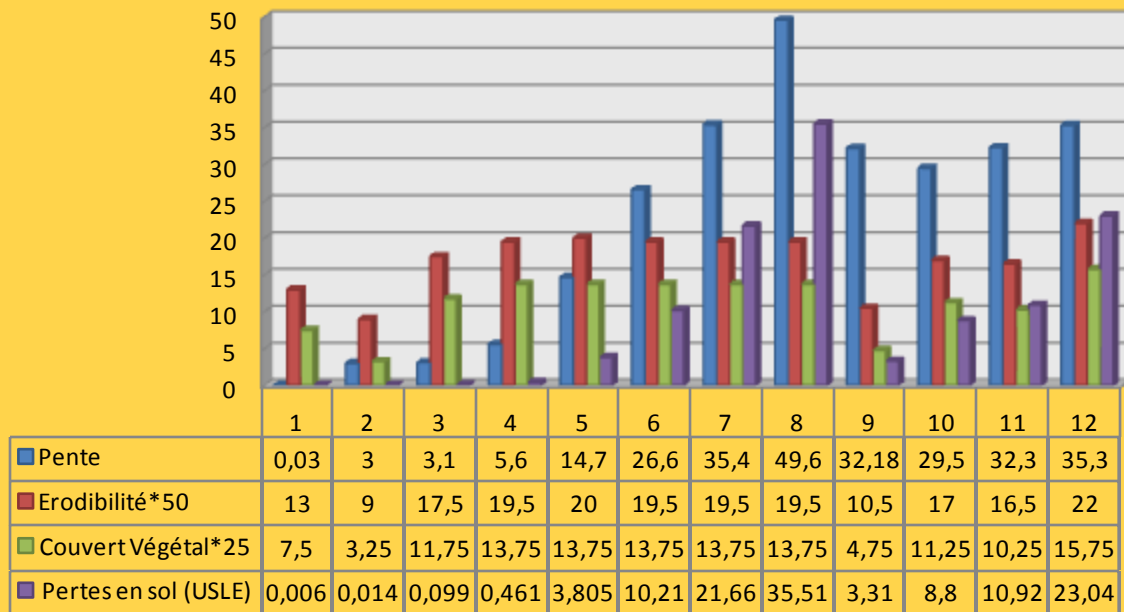


Figure 4.17. Impact des paramètres sur les pertes en sol évaluées par USLE.

Impact des paramètres sur les pertes en sol évaluées par OF (Onstad & Foster)

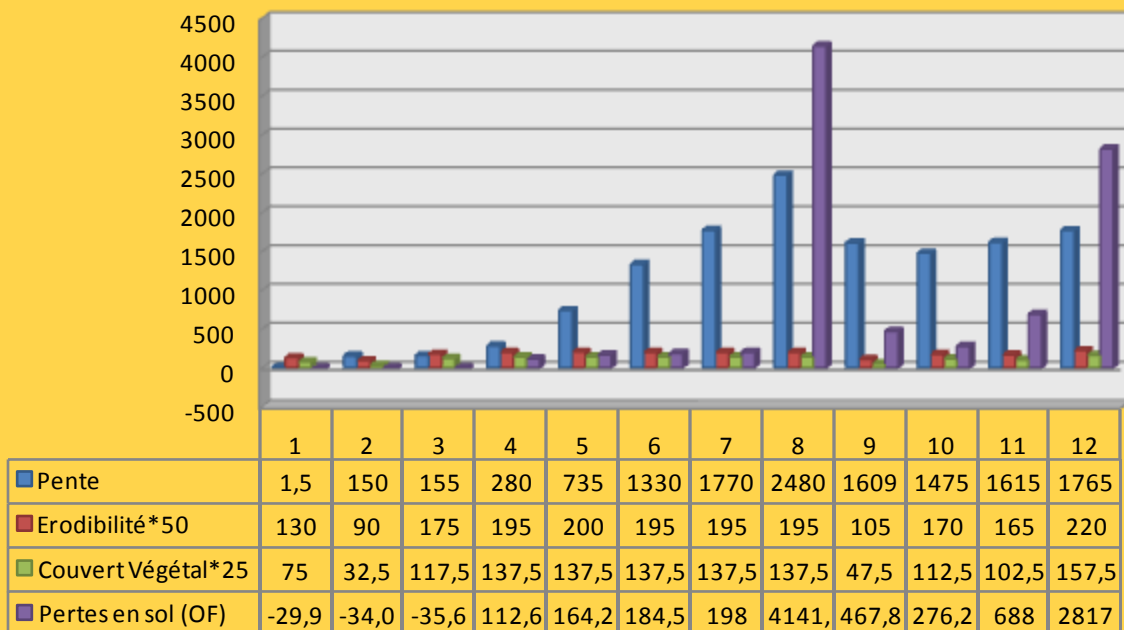


Figure 4.18. Impact des paramètres sur les pertes en sol évaluées par OF (Onstad & Foster)

Dans la plupart des cas nous remarquons que l'augmentation de la valeur de pente entraîne une augmentation considérable de la quantité des sédiments érodés (cas 4, 5, 6, 7, 8 et 9). Une pente trop faible ne présente

presque plus d'érosion même en variant les valeurs de l'érodibilité et du couvert végétal. L'augmentation de la valeur de l'érodibilité augmente aussi le taux d'érosion mais pas autant de la pente. L'effet du couvert végétal n'est pas trop observé.

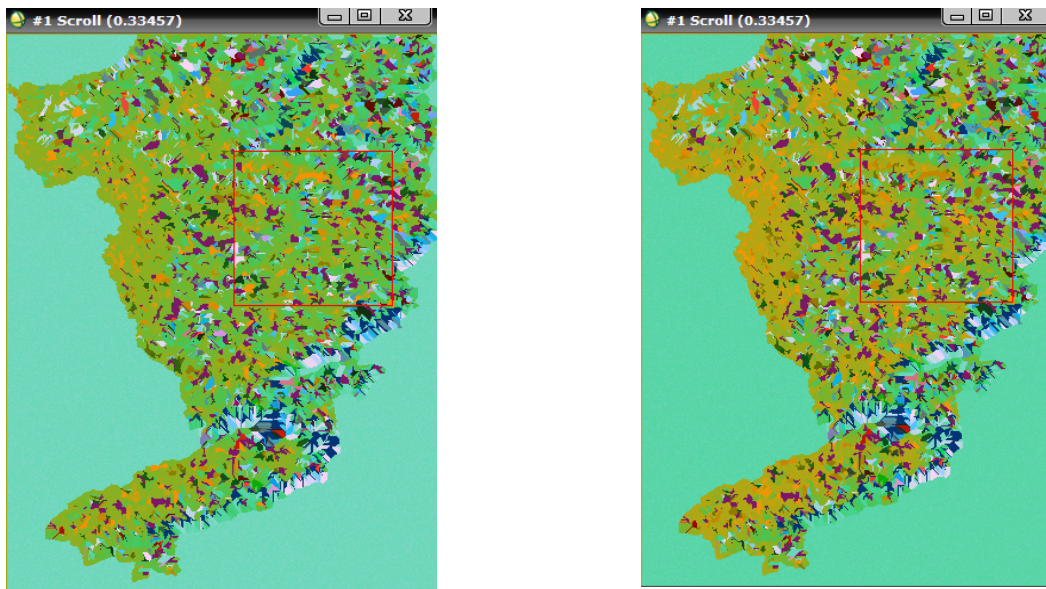
Pour le modèle Onstad & Foster (OF), lorsque la pente est trop faible, nous observons des cas de dépôts des sédiments expliqués par les valeurs négatives de l'érosion (cas 1,2 et 3).

4. Simulation du processus de l'érosion hydrique dans le bassin de Sikkak

En se basant sur les résultats des quatre modèles, nous avons procédé à une simulation du processus de l'érosion hydrique dans notre bassin. Pour cela, nous suivons trois étapes principales :

- Nous créons d'abord la cartographie des quantités des sédiments dans le bassin. Ces quantités des sédiments sont générées aléatoirement dans le voisinage d'une valeur initiale introduite par le simulateur (l'utilisateur).
- Ensuite, l'utilisateur doit introduire les paramètres de simulation, à savoir : le temps de simulation et la fréquence de sauvegarde des cartographies qui montre la variabilité des quantités des sédiments avec le temps, et donc l'effet de l'érosion hydrique sur le sol.
- Finalement, nous lançons le processus de simulation. La dégradation du sol et sa transportation sont visiblement observés à travers les cartographies sauvegardées fréquemment.

Un exemple de simulation du modèle OF sur 300 unités de temps et avec une fréquence de sauvegarde égale à 50 est illustré dans la figure 4.18. Le nombre des cartographies sauvegardées est donc Six (6).



(a) Quantités des sédiments à l'instant 5

(b) Quantités des sédiments à l'instant 30

Figure 4.19. Exemple de simulation de l'érosion selon l'évaluation du modèle OF.

D'après la figure, nous remarquons que les zones dans lesquelles un dépôt de sédiments se produit, sont plus renforcés à l'instant 30 qu'à l'instant 5. Par contre, les zones où une érosion se produit sont plus éclaircies.

Bien que nos modèles d'évaluation des pertes en sols ne soient encore validés, notre outil apporte une aide importante aux décideurs et aux aménageurs pour simuler des scénarios d'évolution de n'importe quelle région et planifier les interventions de lutte contre l'érosion, surtout dans les zones où l'érosion est très forte. Elle permet aussi de suivre l'impact de l'utilisation des sols et des aménagements.

Conclusion

Le présent chapitre décrit quatre modèles d'érosion hydrique qui ont été conçus et implémentés, et expose les résultats de leur application à l'aide d'un Système d'information géographique dans le bassin versant de Sikkak. L'étude a montré que le bassin versant perd en moyenne 136.468 t/ha/an. Cependant, les zones concernées par cette perte représentent 3% de la surface totale du bassin.

Cette situation est favorisée par les différents facteurs de l'érosion qui se conjuguent aussi pour accélérer l'érosion. Nous parlons principalement des pentes fortes (11,60 % de la surface du bassin versant de Sikkak présente des pentes supérieures à 15%) et des sols très érodables (28,77 % des sols montre un facteur $K > 0.43$) ainsi que la dégradation du couvert végétal dans 28% de la surface du bassin (dont le facteur $C > 0,60$).

Conclusion

générale

Conclusion générale

Le travail que nous avons effectué a pour but la mise en œuvre d'un simulateur d'érosion hydrique des sédiments, dans un bassin versant. Les impacts de l'érosion sur les ressources en sol et en eau, les activités économiques (particulièrement l'agriculture) et l'environnement, ainsi que les conséquences sociales, revêtent une importance primordiale dans de nombreuses régions. En conséquence, l'évaluation de l'érosion fait partie intégrante du processus de gestion intégrée de ces ressources.

Dans ce travail, nous avons implémenté quatre modèles d'érosion hydriques afin d'évaluer les quantités des sédiments érodés à l'intérieur d'un bassin versant. Le choix de ces modèles est fortement lié à l'objectif à atteindre et aux conditions d'utilisation. L'utilisation conjointe d'un SIG et de ces modèles nous a permis d'intégrer les différents facteurs pour aboutir à une délimitation des zones sujettes à une dynamique érosive intense et d'estimer les pertes en sols générées dans différents secteurs du bassin afin de mettre en évidence une classification des surfaces en fonction de l'importance de risque de l'érosion.

Les cartographies des risques, en particulier celles des surfaces de plus forts taux d'érosion, faciliteront les décisions d'intervention ainsi que le choix et la planification des mesures de conservation. Les résultats de l'opération de la cartographie de l'érosion et la mesure de l'infiltration mettent en évidence l'importance de la topologie de la zone objet d'étude, de la structure du sol, de type d'occupation du sol et du mode de travail des terres sur les transferts de l'eau et les conséquences sur les pertes en sols.

L'utilisation de ces quatre modèles relève cinq classes d'érosion hydrique : une érosion très faible (classe1), érosion faible (classe2), érosion moyenne (classe3), érosion forte (classe4) et une érosion très forte (classe5). Les classes 1 et 2 sont les classes dominantes dans notre bassin. L'érosion très forte est repérée dans environ 3% de la surface du bassin de Sikkak, pour les quatre modèles. Des interventions humaines doivent avoir lieu dans ces régions afin de réduire les risques de dégradation du sol et de diversification.

Les résultats des calculs des pertes en sols annuelles nettes montrent que les régions de faibles (respectivement fortes) pertes en sol ou de déposition correspondent à des zones de faible pente ou à des plaines (respectivement grande pente).

Concernant la simulation sur une période donnée, un ensemble d'images montrant l'évolution de l'érosion hydrique des sédiments est généré.

Bien que les méthodes utilisées soient fondées sur une approche qualitative, leur pertinence a pu être justifiée lors de notre étude du bassin de Sikkak. Elle est cependant destinée à évoluer grâce à la poursuite d'expérimentations qui vont permettre de mieux caractériser les critères de diagnostic. En outre, pour améliorer les résultats de cette étude, nous formulons les perspectives de recherche suivantes :

- D'autres études semblables doivent être faites mais avec le simulateur de pluie.
- Tenir compte de l'érosion par ravinement et essayer de l'intégrer dans les modèles globaux des pertes en sol.
- Faire des mesures à l'échelle de la parcelle et étudier le phénomène dans son contexte naturel au niveau du paysage et du bassin versant, pour mieux identifier la nature des risques liés au ruissellement et préconiser une solution adaptée au problème.

- Mener une optimisation des interventions à prendre afin de diminuer les risques d'érosion, nous proposons d'utiliser des heuristiques ou méta-heuristiques avec les modèles implémentés ici afin d'optimiser ces interventions telle que les risques d'érosion soient diminués et pourquoi pas éliminés.
- Intégrer à nos modèles les interventions de l'homme concernant l'aggravation de l'érosion (incendies de forêts, urbanisation, travaux culturels inadaptés aux conditions climatiques) ou la conservation des sols (terrasses, planches, cycle cultural adapté, reforestation). La sortie correspond alors à une base de données permettant une consultation, ponctuelle ou spatialisée, relative à un système d'aide à la gestion territoriale de l'érosion.

Références

Bibliographique

- [AUZ92] **Auzet.A** : «L'agriculture et l'érosion des sols : importance en France de l'érosion liée aux pratiques agricoles »1992 VOL 208.
- [AUD06] **L.AUDIBERT**, « UML 2 », institut universitaire de technologie de Villetaneuse, édition 2006..
- [AUD08] **L.AUDIBERT**, « UML 2 », institut universitaire de technologie de Villetaneuse, édition 2008
- [BAR08] **Sonia BARON** : «Caractéristique de l'érosion hydrique sur le bassin versant de Roufach(HAUT-RHIN, ALSACE) et conséquences sur le bassin versant d'orage associé», Mémoire de fin d'études2008, Ecole Nationale du Génie de l'Eau et de l'Environnement de Strasbourg
- [BER02] **Denis BERVILLE** : «these de recherche Compréhension des phénomènes de transferts particuliers en zone d'élevage»2002.
- [BES09] **Y. BESKRI, M. BELHADJ-AISSA, F. HOCINE & A. BELHADJ-AISSA** : «Extraction des indices géomorphologiques des bassins versants à partir du MNT. Application : Bassin versant de Oued M'zab, Algérie», Troisièmes Journées d'Animation Scientifique (JAS09) du réseau de télédétection de l'AUF, Alger du 8 au 11 Novembre 2009.
- [BES10] **Y. BESKRI**: «Traitement du MNT et extraction du réseau hydrologique d'un bassin versant'»: Thèse de magister (N° d'ordre : 17/2010-M/INF).Université de l'U.S.T.H.B.
- [BOG83] **LBOGARDI** : «Scientific Procedures Applied to the Planning, Design and Management of Water Resources Systems», Proceedings of the Hamburg Symposium. August 1983. IAHSI'ubl. no. 147. Estimation of sediment loading into agricultural reservoirs with scarce data.
- [BIS02] **BISSONNAIS.Y, MONTIER.C, JAMAGNE.M, DAROUSSIN.J, KING.D** : « Mapping erosion risk for cultivated soil in France». Catena 2002, 46, pp. 207-220.
- [CRA95] **CRAVE A** : « Quantification de l'organisation des réseaux hydrographiques», Thèse de l'Université de Rennes., 1995, I. 210 pp , Géosciences Rennes publication
- [CHE05] **Xiaomin CHE** : « Extraction, reconstruction du réseau hydrographique à partir du modèle numérique de terrain»,Thèse Pour obtenir le grade de Docteur de l'Université de la Méditerranée en Informatique, Faculté des sciences de Luminy 2005.
- [CHA01] **CHARLEUX-DEMARGNE Julie**: « Qualité des Modèles Numériques de Terrain pour l'Hydrologie Application à la Caractérisation du Régime de Crues des Bassins Versants» thèse spécialité de l'information géographique, université de Marne La Vallée 2001
- [COS00] **COSANDEY.C, ROBINSON.M** : « Hydrologie continentale Armand Colin», Paris, 2000, 368 p.
- [CHA05] **CHAPONNIERE Anne**: « Fonctionnement hydrologique d'un bassin versant montagneux semi-aride», Thèse pour obtenir le grade de Docteur de l'Institut National Agronomique Paris-GrignonDisciplines : Hydrologie et télédétection, Ecole Doctorale ABIES Centre d'Etudes Spatiales de la BIOSphère 2005.
- [DAN07] **DANGERMOND Jack**: « Concepts et spécificités des SIG2007 ».
- [FLA72] **Flaxman.E.M** : « Predicting sediment yield in western United States». J. Hydraul. ASCE 98 (HY12)1972, 2073-2085.
- [FLO97]. **FLOISSAC.L** : «Traitement automatique des modèles numériques de terrain pour l'analyse géomorphologique» Application aux Afars et à Taïwan. Thèse de l'Université Toulouse II,1997, 250 p.

- [FAN09] **JOUASSILA FANDI, Abderrezak BOUANANI, Kamila BABA HAMED, Abdelmalek BEKKOUCHE** : «Modélisation du Transport des Particules du Sol en suspension dans L'oued Sikkak (Nord Ouest Algérien) », Colloque International Sols Non Saturés et Environnement « UNSATlemcen09 » Tlemcen, 27 et 28 Octobre 2009.
- [FLI05] **Nicolas FLIPO, Michel POULIN, Stéphanie EVEN, Emmanuel LEDOUX** : «Modélisation intégrée du bassin du Grand Morin Choix conceptuels », 1CIG, ENSMP, 35 Rue saint Honoré, 77305 Fontainebleau 2005. flipo@cig.ensmp.fr.
- [GEO08] **Yvio GEORGES** : « Evaluation de l'Erosion dans le bassin versant de la rivière Grise (Haïti) » Master en gestion des Risques Naturels 2008
- [GAR08] **Abdelkader EL GAROUANI, Hao CHEN, Laurence LEWIS** : «Cartographie de l'utilisation du sol et de l'érosion nette à partir d'image satellitaires et du SIG IDRIS au Nord-Est du Maroc » Revue Télédétection, 2008, vol. 8, n° 3, p. 193-201.
- [GAN97] **GANDOLFI.C & BISCHETTI.G.B** : «Influence of the drainage network identification method on geomorphological properties and hydrological response». Hydrological Processes 1997, 11, pp. 353-375.
- [GAR05] **ABDELKADER EL GAROUANI, ABDELAZIZ MERZOUK, RAOUF JABRANE et MOHAMED RACHED BOUSSEMA** : «Analyse spatiale de l'érosion en nappe et de l'infiltrabilité des sols dans le pré-rif Marocain», Télédétection, 2005, Vol. 5, n°(1-2-3), p 69-80
- [HAM99] **Suzanne HAMEL, Richard LEFRANÇOIS, Gilbert LECLERC** : « La transcendance de sol, une tentative de définition » Revue québécoise de psychologie, vol. 20, n° 3, 1999
- [HAS00] **HASSANE Sebbab** : « Application des S.I.G.'Systèmes d'information géographique' à l'étude de l'impact de la voirie et des structures linéaires sur l'écoulement et l'érosion hydrique des sols viticoles de Champagne » 2000.
- [HAB00] **Élisabeth HABERT** : «Laboratoire de cartographie appliquée ,2000 »
- [HER03] **HERBRETEAU.V** : «évaluation de la sensibilité à l'érosion des zones viticoles. Influence des pratiques culturales (exemple du Fronsadais) » Mémoire ENITA, Bordeaux., 2003, 71 p.
- [HER05] **HERVE Brunel** : « Etat de l'art des systèmes d'information géographique 2005 ».
- [JEN88] **JENSO.S.K. & DOMINGUE.J.O** : «Extracting topographic structure from Digital Elevation data for geographic information system analysis». Photogrammetric Engineering & Remote Sensing 1988, 54(11), pp 1593-1600.
- [KAU10] **KAUARK LEITELuiz Augusto** : «REFLEXIONS SUR L'UTILITÉ DES MODÈLES MATHÉMATIQUES DANS LA GESTION DE LA POLLUTION DIFFUSE D'ORIGINE AGRICOLE » Mémoire présenté pour l'obtention du titre de Docteur de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, tel-00529963, version 1 - 27 Octobre 2010.
- [LIE04] **Marie LIEGEOIS** : «Réflexions sur la vulnérabilité à l'aléa érosion Cahiers Agricultures», Volume 13, Numéro 4, 355-61, Juillet-Août 2004

- [LIN82]LINSLEY.R. K: «Rainfall-runoff models - An overview. In: Rainfall-runoff relationship, V. P. Singh», Water Ressources Publications, 3-22,Hydrology for engineers, McGraw-Hill, New York,Water resources engineering, McGraw-Hill, New York 1982.
- [LIN06]LIN.W.T, CHOU.W.C, LIN.C.Y, HUANG.P.H.& TSAI.J.S: «Automated suitable drainage network extraction from digital elevation models in Taiwan's upstream watersheds». Hydrological Process2006. 20, 289–306.
- [LUI03]LUIBerardo Borda: «Apports des systèmes d'information géographique et l'évaluation de la qualité des eaux côtières. Une contribution à la gestion intégrée de la zone côtière Colombienne» Thèse pour l'obtention du grade de Docteur en Sciences techniques 2003,Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- [MON88] MONTGOMERY.D.R. & DIETRICH.W.E: «Where do channels begin Nature», 1988, 336, pp 232-234.
- [MAR98] MARTZ.L.W. &GARBRECHT.J: «The treatment of flat areas and depressions in automated drainage analysis of raster digital elevation models'. Hydrological Processes»1998 , 12, pp 843- 855.
- [MOU02]MOUSSA.R, VOLTZ.M.& ANDRIEUX.P: « Effects of the spatial organization of agricultural management on the hydrological behaviour of a farmed catchment during flood events», Hydrol. Process2002, Vol. 16, pp. 393-412.
- [ONS76]ONSTAD.C.A , FOSTER.G.R : « Erosion modeling on a watershed»Trans. Amer. Soc. Civ1975, Engrs18, 288-292.
- [ONS84]C.A.ONSTAD.R , F.PIEST, K.E.SAXTON: «Watershed erosion model validation for southwest IOWA», Proceedings of the Third Federal Inter-Agency Sedimentation Conference 1976 March 22-25, 1976 Denver, Colorado Pages 1-22 to 1-34.
- [ONS84]ONSTAD et al: «évolution de la résistance hydraulique de la croûte de battance», 1984 , Volume 9, Issue 1,Pages 1–20.
- [PET11] PETROV Krasimir : Etude d'aménagement hydro-agricole du perimetre Tafna-Isser-Hennaya» Université d'Architecture, Construction et Géodésie1 bull. Hristo Smirnenski, Sofia2011,ISBN 978-954-724-044-5
- [ROC63]ROCHE.M :«Hydrologie de Surface», Gauthier-Villars 1963, Paris, 429 p.
- [ROO84] ROOSE.E : «Erosion et conservation des sols. Place de la recherche française en régions tempérées et tropicales. Association Française pour l'Etude du Sol», Livre jubilaire du cinquantenaire 1934-1984, 321-333.
- [ROQ02]ROQUES Pascal «Les cahiers du programmeur UML(modéliser un site e-commerce)EYROLLES,2002.
- [STR57]STRAHLER A.N: «Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography», *Bulletin of the Geological Society of America (BGSA)* 1957, vol. 63, 117-142.
- [SYC08]SYLVAIN Cherrier«diagramme de séquence UML», 2008.
- [TRI04]TRIBOUILLARD Caroline : «Construction et validation d'un indicateur, Ruissellement' (IRU) basé sur un modèle dans le cadre de la méthode INDIGO »Memoire de fin d'études2004.

[TRI09] **Abdellatif TRIBAK, Abdelkader EL GAROUANI, Mohamed ABAHROUR**: « évaluation quantitative de l'érosion hydrique sur les terrains marneux du Pre Rif oriental (Maroc) » : cas du sous-bassin de l'oued Tlata » Article de recherche Sécheresse 2009 ; 20 (4) : 333-7.

[WIL72] **WILLIAMS.J. R, BERNDT.H. D** : «Sediment yield computed with universal equation » ,Hydraul 1972. Div., Proc. Amer. Soc. Civ. Engrs 98, no. HY12, 2087-2098.

[WIL75b] **WILLIAMS.J.R** : « Sediment routing for agricultural watersheds ». Wat. Resour. Bull, Amer. Wat. Resour. Assoc 1975. 11, no.5, 965-974.

[WEB76] **WEBER.J, FOGEL.M & DUCKSTEIN.L** : «The use of multiple regression models in predicting sediment yield». Wat. Resour. Bull 1976. 12 (1), 1-17.

[WIS78] **WISCHMEIER.W.H, SMITH.D.D**: «Predicting rainfall erosion losses-a guide to conservation planning» U. S. Department of Agriculture Handbook 1978, 537, 58p.

[WOO90] **WOOLHISER.D.A, SMITH.D.R.E ,GOODRICH.D.C, KINEROS**: «A Kinematic Runoff and Erosion Model » Documentation and User Manuel 1990. US Department of Agriculture, Agriculture Research Service. ARS-77, 130p.

- **Références Webographiques :**

[ESRI 07] <http://www.esrifrance.fr>, Site officiel des produits ESRI France 'consulter le 15/11/2011'.

[MUS 12] **André MUSY**, <http://echo2.epfl.ch/e-drologie/>, Cours "Hydrologie générale" Laboratoire d'Hydrologie Aménagements (HYDRAM), Institut des Sciences et Technologies de l'Environnement (ISTE) Ecole Polytechnique Fédérale (EPFL) 'consulter le 08/01/2012'.

[MUS 05] **André MUSY**, <http://echo2.epfl.ch/e-drologie/>, Cours "Hydrologie générale" Laboratoire d'Hydrologie Aménagements (HYDRAM), Institut des Sciences et Technologies de l'Environnement (ISTE) Ecole Polytechnique Fédérale (EPFL) 'consulter le 08/01/2012'.

[RES 12] **Mathieu RESCAN**, http://www.notre-planete.info/terre/outils/sig_1.php, 2011, Pratique de la méthode rationnelle pour la détermination des débits de pointe d'un bassin versant 'consulter le 15/01/2012'.

