

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT D'HYDRAULIQUE

N° :



DOMAINE : SCIENCE ET TECHNIQUE
FILIERE : HYDRAULIQUE
OPTION : OUVRAGES HYDRAULIQUES

**Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique**

Par : DRISSI Houssam Eddine

Intitulé

**Evaluation et la cartographie des risques
d'érosion par l'utilisation de SIG et le modèle
EPM Cas du bassin versant du barrage de
Beni Haroun**

Soutenu devant le jury composé de :

.....	Université de M'sila	Président
MOKHTARI Elhadj	Université de M'sila	Rapporteur
.....	Université de M'sila	Examineur

Année universitaire : 2019/2020

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

قال الله ﷻ : ﴿ وَمَا بِكُمْ مِنْ نِعْمَةٍ فَمِنَ اللَّهِ ثُمَّ إِذَا مَسَّكُمُ الضُّرُّ فَإِلَيْهِ تَجَارُونَ ﴾ [النحل: 53]،

وقال ﷻ : ﴿ وَمَا تَوْفِيقِي إِلَّا بِاللَّهِ عَلَيْهِ تَوَكَّلْتُ وَإِلَيْهِ أُنِيبُ ﴾ [هود: 88]،

وقال ﷻ : ﴿ وَإِذْ تَأَذَّنَ رَبُّكُمْ لَئِن شَكَرْتُمْ لَأَزِيدَنَّكُمْ وَلَئِن كَفَرْتُمْ إِنَّ عَذَابِي لَشَدِيدٌ ﴾ [إبراهيم: 7]

فله المعطي الشكر أولاً وآخرأً على نعمائه وآلائه وتوفيقه لنا لإتمام الدراسة الجامعية.

وَ عَن أَبِي سَعِيدٍ الْخَدْرِيِّ رضي الله عنه أَنَّ رَسُولَ اللَّهِ صلى الله عليه وسلم قَالَ : " مَنْ لَمْ يَشْكُرِ النَّاسَ لَمْ يَشْكُرِ اللَّهَ "

[الترمذي: 2082، حسن صحيح]

فلا يفوتنا أن نعرف لأهل الفضل فضلهم ولأهل المعروف معرفتهم فننتقدم بالشكر والعرفان

إلى كل من:

Dédicace

*C'est avec profonde gratitude et sincères mots, Que je dédie ce
modeste travail de fin d'étude :*

*À mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur
soutien et leurs prières tout au long de mes études,*

*À mes chers frères et sœurs pour leurs encouragements permanents,
et leur soutien moral,*

*À ma femme Qui n'a jamais cessé de me soutenir pour que je puisse
finir mes études,*

*À tous mes professeurs depuis le primaire jusqu' à l'enseignement
universitaire,*

A tous mes amis sans exception,

À tous ceux qui m'ont aidé dans l'élaboration de ce travail.

DRISSI HOUSSAM EDDINE



Remerciement

Nous remercions Dieu Tout Puissant de nous avoir donné la patience et la force pour terminer ce travail.

*Nos vifs remerciements vont particulièrement à **nos parents** pour leurs soutiens et confiance.*

*Notre plus grande reconnaissance va à l'égard de notre promoteur Mr **MOKHTARI Elhadj**, et tous ceux qui nous ont aidés.*

Nous adressons aussi nos remerciements aux membres du jury qui ont bien voulu analyser et évaluer ce travail.

*Et enfin, nous remercions, également, tous les enseignants et responsables du département d'hydraulique ainsi que nous camarades de la **promotion de l'an 2020***

Sommaire

Table des matières

Dédicace.....	ii
Remerciement	iii
Sommaire	iv
Liste des Tableaux.....	vi
Liste des Figures.....	vii
Résumé	xi
Liste des abréviations.....	Error! Bookmark not defined.
Introduction générale.....	1
Chapitre I. Recherche bibliographique sur l'érosion et l'envasement des barrages	
I.1. Introduction.....	2
I.2. L'érosion [02]	2
I.2.1. L'érosion hydrique	2
I.2.2. Le transport solide.....	3
I.2.3. La sédimentation	4
I.2.4. Causes et des conséquences de l'érosion des sols [01].....	5
I.2.5. Les processus de l'érosion hydrique	6
I.2.6. Erosion et dépôt dans un bassin versant[03].....	6
I.2.7. Quantification de l'érosion	7
I.3. L'envasement	7
I.3.1. Problématique de l'envasement des barrages en Algérie	7
I.3.2. Etat d'envasement de quelques barrages <i>en Algérie du Nord</i> en 2004	8
.....	8
I.3.3. Alluvionnement et envasement d'une retenue	9
I.3.4. Conséquence de l'envasement	9
I.3.5. Étapes de l'envasement d'un barrage.....	11
I.3.6. Quantification de l'envasement d'un barrage	12
I.4. Conclusion	13

Chapitre II. Description du bassin versant de Beni Haroun	14
II.1. Introduction.....	14
II.2. Notion du bassin versant.....	14
II.3. Etude et présentation du bassin versant	15
II.4. Morphologie du bassin	16
II.4.1. Caractéristiques climatiques	16
II.4.2. Caractéristiques physiques.....	19
II.4.3. Caractéristiques hydrographiques du bassin [8,11]	20
II.5. Paramètres du réseau hydrographique [11]	28
II.5.1. Densité de drainage Dd	28
II.5.2. Coefficient de torrentialité (C_t)	28
II.6. Conclusion	30
Chapitre III. Cartographie de l'érosion hydrique par l'utilisation du modèle EPM et SIG	
III.1. Introduction	31
III.2. Méthodologie.....	32
III.3. Résultats et discussion	33
III.3.1. Coefficient de la température (T).....	33
III.3.2. Précipitation moyenne annuelle en (H).....	37
III.3.3. Coefficient de protection du sol (Xa)	40
III.3.4. Coefficient d'érosion du sol (Y).....	49
III.3.5. Coefficient de type et étendue de l'érosion (φ)	53
III.3.6. Les pentes de la zone d'étude en Ja (%).....	58
III.3.7. Coefficient d'érosion (Z).....	58
III.3.8. Volume annuel moyen des sédiments érodés (W)	63
III.4. Quantité annuelle des sédiments érodés arrivant à l'exutoire de bassin versant. (G1)	71
III.5. Comparaison avec les études réalisées sur le bassin versant de Kebir Rumel	72
III.6. Conclusion.....	72
Conclusion générale.....	73
Bibliographie	74

Liste des Tableaux

<i>Tableau I-1</i>	<i>Pertes de la capacité due à l'envasement dans certains pays du monde -----</i>	<i>9</i>
<i>I-2</i>	<i>effet de l'envasement sur la capacité utile des barrages en algérie (anbt). -----</i>	<i>9</i>
<i>Tableau II-1</i>	<i>Températures moyennes mensuelles à la station Ain El Bey Constantine (Données ANRH 20 ans). -----</i>	<i>17</i>
<i>Tableau II-2</i>	<i>Pluviométrie (en mm et nombre de jours de pluie j) de septembre 2013 à mars 2014 de 5 stations du bassin versant KEBIR-RHUMEL (ANRH 2014). -----</i>	<i>19</i>
<i>Tableau II-3</i>	<i>Hypsométrie du bassin versant-----</i>	<i>24</i>
<i>Tableau II-4</i>	<i>Classification ORSTOM du relief à partir de l'indice de pente global I_g. -----</i>	<i>27</i>
<i>Tableau II-5</i>	<i>Classification des reliefs d'après l'O.R.S.T.O.M. -----</i>	<i>28</i>
<i>Tableau III-1</i>	<i>(X_a) en fonction d'occupation des sols par les végétaux. [12] -----</i>	<i>40</i>
<i>Tableau III-2</i>	<i>Répartition des classes de l'NDVI dans le bassin versant pour les années (2019, 2015, 2005, et 1995). -----</i>	<i>45</i>
<i>Tableau III-3</i>	<i>Répartition des classes du facteur (X_a) dans le bassin versant pour les années (2019, 2015, 2005, et 1995).-----</i>	<i>48</i>
<i>Tableau III-4</i>	<i>Codification de la structure des sols (C_s) (Wischmeier et Smith, 1978) -----</i>	<i>49</i>
<i>Tableau III-5</i>	<i>Codification de la perméabilité du sol (bp) (Wischmeier et Smith, 1978) -----</i>	<i>49</i>
<i>Tableau III-6</i>	<i>Type de sol en fonction de Y (Gavrilovic S., 1962 ; 1970) -----</i>	<i>52</i>
<i>Tableau III-7</i>	<i>Type d'érosion du sol en fonction de (ϕ) (Gavrilovic S., 1962 ; 1970) -----</i>	<i>54</i>
<i>Tableau III-8</i>	<i>Répartition des classes du facteur (ϕ) dans le bassin versant pour les années (2019, 2015, 2005, et 1995). -----</i>	<i>57</i>
<i>Tableau III-9</i>	<i>La classe d'érosion en fonction de (Z) (Gavrilovic S., 1962; 1970) -----</i>	<i>59</i>
<i>Tableau III-10</i>	<i>Répartition des classes du coefficient d'érosion annuelle (Z) dans le bassin versant pour les années (2019, 2015, 2005, et 1995). -----</i>	<i>63</i>
<i>Tableau III-11</i>	<i>Classement des pertes en sols en cours des années (1995, 2005, 2015 et 2019)---</i>	<i>70</i>

Liste des Figures

<i>Figure I-1 modes de transport solide [13]</i> -----	4
<i>Figure I-2 Mode d'envasement du barrage [14]</i> -----	4
<i>Figure I-3Processus de l'érosion HYDRIQUE [1]</i> -----	6
<i>Figure I-4 envasement du barrage de bakhadda tiaret (2008).[06]</i> -----	8
<i>Figure I-5Carte de sensibilité des barrages à l'envasement (2007).</i> -----	8
<i>Figure I-6Processus d'envasement d'un barrage Réservoir.[04]</i> -----	11
<i>Figure II-1Distinction entre bassin versant réel et bassin versant topographique. [1]</i> -----	14
<i>Figure II-2Carte de situation géographique et localisation changer cette carte</i> -----	15
<i>Figure II-3Carte de situation du bassin versant</i> -----	16
<i>Figure II-4Variations interannuelles des précipitations 2003-2016 station de Beni Haroun (donnée ANBT).</i> -----	18
<i>Figure II-5L'évaporation ou niveau de barrage Beni Haroun (2003-2016) (donnée ANBT).</i> ----	18
<i>Figure II-6Carte d'altitude du bassin versant.</i> -----	23
<i>Figure II-7La répartition des classes d'altitude en fonction de surface</i> -----	23
<i>Figure II-8La Courbe hypsométrique du bassin versant</i> -----	24
<i>Figure II-9Carte des pentes du bassin versant</i> -----	25
<i>Figure II-10La répartition des classes de pentes en fonction de surface</i> -----	25
<i>Figure II-11Réseau hydrographique du bassin versant.</i> -----	29
<i>Figure II-12Caractéristiques géométriques et hydro morphométriques du bassin</i> -----	30
<i>Figure III-1Organigramme générale du modèle Gavrilovic « EPM »</i> -----	33
<i>Figure III-2Le facteur de la température "T" du bassin versant en 2019</i> -----	34
<i>Figure III-3 Le facteur de la température "T" du bassin versant en 2015</i> -----	35
<i>Figure III-4Le facteur de la température "T" du bassin versant en 2005</i> -----	35
<i>Figure III-5Le facteur de la température "T" du bassin versant en 1995</i> -----	36
<i>Figure III-6Le facteur moyenne de la température "T" pour les années (1995, 2005, 2015 et 2019)</i> -----	36
<i>Figure III-7Le facteur H pour l'année 2019</i> -----	37
<i>Figure III-8Le facteur H pour l'année 2015</i> -----	38
<i>Figure III-9Le facteur H pour l'année 2005</i> -----	38
<i>Figure III-10Le facteur H pour l'année 1995</i> -----	39

<i>Figure III-11</i>	<i>Le facteur H moyen pour les années (1995, 2005, 2015, et 2019)</i>	<i>39</i>
<i>Figure III-12</i>	<i>Carte des valeurs annuelle de l'NDVI générée à partir de la transformation de l'image satellite LANDSAT-8 de l'année 2019</i>	<i>42</i>
<i>Figure III-13</i>	<i>Carte des valeurs annuelles de l'NDVI générée à partir de la transformation de l'image satellite LANDSAT-8 de l'année 2015</i>	<i>43</i>
<i>Figure III-14</i>	<i>Carte des valeurs annuelles de l'NDVI générée à partir de la transformation de l'image satellite LANDSAT-5 de l'année 2005</i>	<i>43</i>
<i>Figure III-15</i>	<i>Carte des valeurs annuelle de l'NDVI générée à partir de la transformation de l'image satellite LANDSAT-5 de l'année 1995</i>	<i>44</i>
<i>Figure III-16</i>	<i>Carte des valeurs du NDVI moyenne générée à partir de la transformation des images satellites pour les années de (2019, 2015, 2005 et 1995)</i>	<i>44</i>
<i>Figure III-17</i>	<i>Répartition des classes de l'NDVI dans le bassin versant pour les années (2019 2015, 2005, et 1995).</i>	<i>45</i>
<i>Figure III-18</i>	<i>Carte des valeurs annuelle du (Xa) générée à partir de la transformation de NDVI de l'année 2019</i>	<i>46</i>
<i>Figure III-19</i>	<i>Carte des valeurs annuelle du (Xa) générée à partir de la transformation de NDVI de l'année 2015</i>	<i>47</i>
<i>Figure III-20</i>	<i>Carte des valeurs annuelles du (Xa) générée à partir de la transformation de NDVI de l'année 2005</i>	<i>47</i>
<i>Figure III-21</i>	<i>Carte des valeurs annuelle du (Xa) générée à partir de la transformation de NDVI de l'année 1995</i>	<i>48</i>
<i>Figure III-22</i>	<i>Carte des valeurs du (Xa) moyenne générée à partir de la transformation de NDVI pour les années de (2019, 2015, 2005 et 1995).</i>	<i>48</i>
<i>Figure III-23</i>	<i>Répartition des classes du facteur (Xa) dans le bassin versant pour les années (2019, 2015, 2005, et 1995).</i>	<i>48</i>
<i>Figure III-24</i>	<i>Nomogramme de l'érodibilité des sols (Foster., 1981, Foster, 1982).</i>	<i>50</i>
<i>Figure III-25</i>	<i>Code Structure basée sur la texture (Ontario Centre for Soil Resource Evaluation, 1993)</i>	<i>51</i>
<i>Figure III-26</i>	<i>Codes de perméabilité basés sur la classification des textures (Ontario Centre for Soil Resource Evaluation, 1993)</i>	<i>51</i>

<i>Figure III-27</i> Carte du facteur Y à partir de la relation de (WISHMEIER W.H. et SMITH D.D. 1978) -----	52
<i>Figure III-28</i> Répartition en classes du facteur Y par rapport le pourcentage de la surface. -----	53
<i>Figure III-29</i> Carte du facteur (ϕ) générée à partir de la moyenne des mois des images satellitaire LANDSAT-8 de l'année 2019.-----	54
<i>Figure III-30</i> Carte du facteur (ϕ) générée à partir de la moyenne des mois de les images satellitaire LANDSAT-8 de l'année 2015.-----	55
<i>Figure III-31</i> Carte du facteur (ϕ) générée à partir de la moyenne des mois de les images satellitaire LANDSAT-8 de l'année 2005.-----	55
<i>Figure III-32</i> Carte du facteur (ϕ) générée à partir de la moyenne des mois de les images satellitaire LANDSAT-8 de l'année 1995.-----	56
<i>Figure III-33</i> Carte du facteur (ϕ) générée à partir de les images satellitaire LANDSAT-8 et 5 de la moyenne pour les années (2019, 2015, 2005, et 1995). -----	56
<i>Figure III-34</i> Répartition des classes du facteur (ϕ) dans le bassin versant pour les années (2019, 2015, 2005, et 1995). -----	57
<i>Figure III-35</i> Carte des pentes J_a (%) -----	58
<i>Figure III-36</i> Carte du Coefficient d'érosion annuelle (Z) du bassin versant en 2019 -----	59
<i>Figure III-37</i> Carte du Coefficient d'érosion annuelle (Z) du bassin versant en 2015 -----	60
<i>Figure III-38</i> Carte du Coefficient d'érosion annuelle (Z) du bassin versant en 2005 -----	60
<i>Figure III-39</i> Carte du Coefficient d'érosion annuelle (Z) du bassin versant en 1995 -----	61
<i>Figure III-40</i> Carte du Coefficient d'érosion moyenne annuelle (Z) de la moyenne du (2019, 2015, 2005, et 1995). -----	61
<i>Figure III-41</i> Carte Classification d'érosion moyenne annuelle pour les années (2019, 2015, 2005, et 1995) -----	62
<i>Figure III-42</i> Répartition des classes du coefficient d'érosion annuelle (Z) dans le bassin versant pour les années (2019, 2015, 2005, et 1995). -----	62
<i>Figure III-43</i> Volume annuelle des sédiments érodés (W) en 2019.-----	64
<i>Figure III-44</i> Volume annuelle des sédiments érodés (W) en 2015.-----	65
<i>Figure III-45</i> Volume annuelle des sédiments érodés (W) en 2005.-----	65
<i>Figure III-46</i> Volume annuelle des sédiments érodés (W) en 1995.-----	66

<i>Figure III-47</i>	<i>Volume moyenne annuelle des sédiments érodés (W) pour les années (2019, 2015, 2005, 1995).</i>	66
<i>Figure III-48</i>	<i>Carte de la masse volumique M du bassin versant. Source : Site SoilGrid.org.</i>	67
<i>Figure III-49</i>	<i>Quantités annuelles des sédiments érodés (G) du 2019.</i>	67
<i>Figure III-50</i>	<i>Quantités annuelles des sédiments érodés (G) en 2015.</i>	68
<i>Figure III-51</i>	<i>Quantités annuelles des sédiments érodés (G) en 2005.</i>	68
<i>Figure III-52</i>	<i>Quantités annuelles des sédiments érodés (G) en 1995.</i>	69
<i>Figure III-53</i>	<i>Quantités annuelles moyenne des sédiments érodés (G) pour les années (2019, 2015, 2005 et 1995).</i>	69
<i>Figure III-54</i>	<i>Répartition des classes de la quantité annuelle moyenne (G) pour les années (2019, 2015, 2005, et 1995).</i>	70

ملخص

مشكلة التآكل (التعرية) هي موضوع يتم فرضه يوماً بعد يوم على مستوى السياسات البيئية. هذه الظاهرة بحجمها تُفهم اليوم من حيث المخاطر الطبيعية. إنها ظاهرة مكانية للغاية لأن قابليتها للتنبؤ الزمني تظل عملية صعبة وخطيرة بشكل خاص في الحالة الحالية للمعرفة. من ناحية أخرى ، يمكن تحديد الدقة التاكليّة و المكانية بدقة كبيرة.

تم تنفيذ هذا العمل في مستجمع مياه سد بني هارون الذي يمثل أكبر سد في الجزائر والذي يقع شرق ولاية الجزائر العاصمة. ونظرًا لأبعاده ومكوناته المادية وأهمية التحديات الاجتماعية والاقتصادية التي تقع هناك ، يخضع هذا الحوض لديناميكية تآكل وتعرية حية بشكل خاص قد تنقلب في نهاية المطاف إلى حالة تصحر لا رجعة فيها. الغرض من هذه الدراسة هو تحليل ورسم خريطة التعرض للتآكل. لأنه عمل منهجي يعتمد على طريقة متعددة المعايير مما يجعل من الممكن رسم خرائط التعرية على أساس العلاقة بين العوامل المختلفة التي لها تأثير على ظاهرة التعرية (هطول الأمطار ، التضاريس ، الغطاء نباتي ، الانحدار ، حساسية التربة للتعرية ، حالة التعرية ، حماية التربة ، درجة الحرارة وهطول الأمطار ،) للتعبير عن مستوى الضعف في هذه المنطقة. والنتيجة هي وثيقة تشكل أداة لدعم القرار من حيث إدارة وحماية الموارد الطبيعية.

Résumé

Le problème d'érosion 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.

Ce travail a été mené dans le bassin versant du barrage de Benni Haroun qui représente le plus grand barrage en Algérie (Est la wilaya Alger). De par ses dimensions, ses composantes physiques et l'importance des enjeux socioéconomiques qui s'y localisent, ce bassin est soumis à une dynamique érosive particulièrement animée qui à terme peut basculer dans une situation irréversible de désertification. Cette étude a pour objet l'analyse et la cartographie de la vulnérabilité à l'érosion. Il s'agit d'une approche systémique basée sur une méthode multicritère permettant de dresser des cartes indicelles numérisées basées sur la relation entre les différents paramètres ayant une influence sur le phénomène d'érosion (pluviométrie, topographie, couvert végétal, la pente, la sensibilité des sols à l'érosion, l'état érosif, la protection des sols, la température et les précipitations,) permettant d'exprimer le niveau de vulnérabilité dans cette région. Le résultat est un document qui constitue un outil d'aide à la décision en termes de gestion et de protection des ressources naturelles.

Abstract:

The problem of erosion is a theme that is imposed day by day at the level of environmental policies. The phenomenon by its magnitude is today understood in terms of natural risk. It is a highly spatialized phenomenon because its temporal predictability remains a difficult and especially hazardous exercise in the current state of knowledge. On the other hand, the spatial predictability which is the subject of this work can be established with great precision.

This work was carried out in the watershed of the Benni Haroun dam, which represents the largest dam in Algeria (east of the wilaya of Algiers). Because of its dimensions, its physical components and the importance of the socio-economic challenges that are located there, this basin is subject to a particularly lively erosive dynamic which may ultimately tip over into an irreversible desertification situation. The purpose of this study is to analyze and map vulnerability to erosion. It is a systemic approach based on a multi-criteria method making it possible to draw up digital index maps based on the relationship between the various parameters having an influence on the erosion phenomenon (rainfall, topography, plant cover, slope, sensitivity of soils to erosion, erosive state, soil protection, temperature and precipitation,) to express the level of vulnerability in this region. The result is a document that constitutes a decision support tool in terms of management and protection of natural resources.

Introduction générale

Dans le monde, l'érosion est une menace environnementale majeure pour la durabilité et la capacité productive de terres. Elle constitue le processus de dégradation des terres le plus actif et elle dégrade également la ressource la plus importante pour la survie de l'humanité.

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 ces facteurs (très fortes pluies...), soit par l'action directe ou indirecte de l'homme.

Parmi les zones exposées à l'érosion au nord d'Algérie, on peut citer le bassin versant KebirRhumel et le sous bassin du barrage de Beni Haroun, qui est connu par ses reliefs et variés.

L'estimation de l'érosion des sols à l'aide des modèles empiriques et des systèmes d'Information géographiques (SIG), par l'intégration des différents facteurs qui sont mis en jeu par le processus est une approche qui a fournie de bons résultats à travers le monde. C'est pour cette raison que nous avons opté pour cette méthode à travers l'application de l'équation de Gavrilovic connue sous l'acronyme EPM qui prend en compte les différents types d'érosion.

Le but principal de ce mémoire donc est la quantification d'érosion dans le sous bassin versant de barrage de Beni Haroun, en appliquant le modèle EPM "Erosion Potentiel Method", la télédétection et le SIG.

Ce document comprend les chapitres suivants :

- Le premier chapitre est consacré à recherche bibliographique sur l'érosion et envasement des barrages.
- Le deuxième chapitre présente la zone d'étude, l'accent a été mis particulièrement sur les caractéristiques du bassin versant étudier ;
- Le troisième chapitre concerne l'estimation de l'érosion dans le bassin versant du barrage de Beni Haroun par utilisation du modèle EPM, la télédétection et les SIG et les résultats obtenus seront comparés avec ceux obtenus par la quantification par l'utilisation des modèles statistique ;

En fin la conclusion générale fait une synthèse des principaux résultats, et propose des perspectives de recherche.

CHAPITRE I

***« Recherche bibliographique sur
l'érosion et envasement des barrages »***



Chapitre I. Recherche bibliographique sur l'érosion et l'envasement des barrages

I.1. Introduction

L'érosion du sol est un phénomène naturel ou géologique dans lequel les particules du sol sont détachées et déplacées par plusieurs principaux facteurs qui sont : la pluie, la végétation, le sol, la géomorphologie (pentes en particulier) et les impacts de l'utilisation des sols par l'homme. Ce phénomène naturel a un impact très néfaste au niveau régional, dépend d'une multiplicité de facteurs interagissant entre eux, ce qui nécessite beaucoup d'études et de mesures sur le terrain. L'érosion peut prendre différentes formes qui se combinent dans le temps et dans l'espace : l'érosion en nappe ou en rigoles et l'érosion linéaire ou ravinaient elle a de graves conséquences sur notre environnement, sur nos activités et peut causer des dommages importants.

Et parmi les conséquences les plus graves liées au problème d'érosion et du transport sédimentaire, c'est le phénomène d'envasement par alluvionnement des retenues de barrages.

Chaque barrage est construit dans le but de remplir sa fonction (stocker de l'eau), au moment de la conception, cependant, il se peut que le barrage soit mis hors service avant même d'atteindre la durée de vie. L'envasement d'une retenue peut engendrer des désordres de stabilité dans le corps du barrage pouvant induire un arrêt ou une exploitation partielle de la capacité du réservoir.

I.2. L'érosion [02]

Le terme érosion vient du latin « ERODERE » qui signifie « Ronger », donc l'érosion est le détachement des particules du sol de leur emplacement initial pour les transportés en aval.

Malgré que l'érosion ait un effet néfaste sur les zones amont, elle enrichit les plaines qui constituent les principaux terrains agricoles.

Il y a plusieurs formes de l'érosion : l'érosion chimique, éolienne, mécanique, thermique etc... Ce qui nous concerne dans ce sujet-là, est l'érosion hydrique. [02]

I.2.1. L'érosion hydrique

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

I.2.1.1. Origine et mécanisme de l'érosion hydrique

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

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

a) Impact de la goutte de pluie

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

- La dégradation de la structure.
- La formation d'une pellicule de battance.
- L'érosion par rejaillissement.[02]

b) Le ruissellement

Comme les précipitations, le ruissellement agit sur le sol par des actions de détachement et de transport.

I.2.1.2. Les facteurs de l'érosion hydrique

- c) Les précipitations
- d) La texture du sol
- e) La pente du terrain
- f) L'état hydrique initial
- g) La couverture végétale

I.2.2. Le transport solide

Ce phénomène est le principal élément moteur après l'érosion, conduisant au processus d'envasement des barrages. Ce processus fait le lien entre les sols du bassin versant et la retenue du barrage. Il est défini par un écoulement biphasique caractérisé par deux phases l'une liquide (eau) et l'autre solide (granulats, sol) dans les cours d'eau naturels, les particules solides vont être transportées en suspension ou en charriage.

Dans le transport en suspension les particules solides élémentaires se déplacent en suspension au sein de l'écoulement avec une vitesse de même ordre de grandeur que celle du fluide, ou la turbulence maintient les éléments fins en suspension.

Dans le transport par charriage une partie de gros granulats se déplace sur le fond des lits des cours d'eau, soit par glissement (ou roulement), soit par saltation.[02]

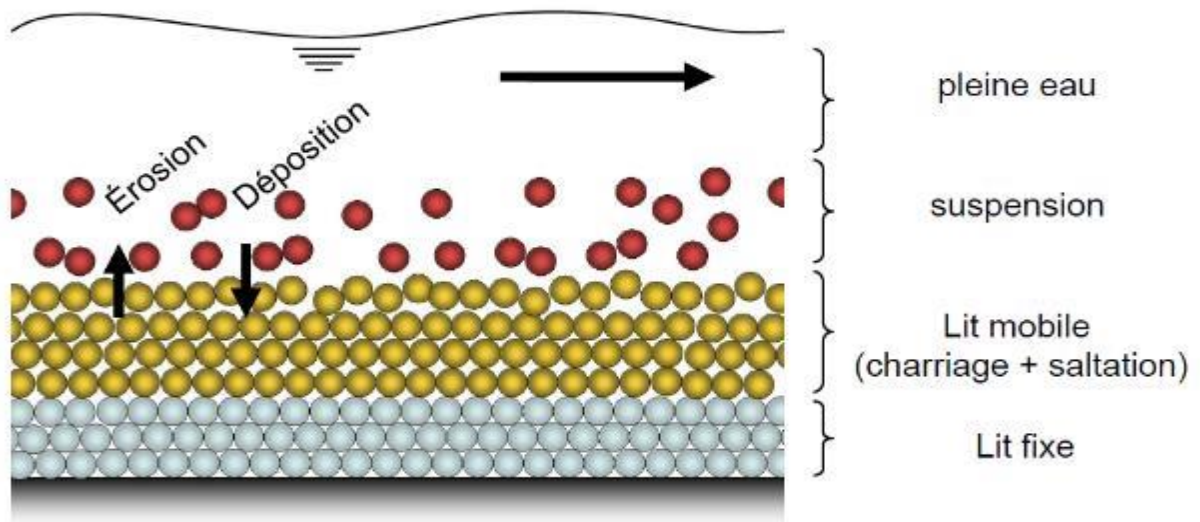


FIGURE I-1 MODES DE TRANSPORT SOLIDE [13]

I.2.3. La sédimentation

C'est l'étape finale de l'envasement des retenues, à l'état naturel les oueds transportent progressivement des quantités importantes de sédiments, soit par charriage soit en suspension, les eaux chargées de matériaux fins forment un courant de densité qui s'écoule sur le long de la retenue et transporte ainsi la vase jusqu'au pied du barrage. Dans ce trajet, les sédiments se déposent, des plus grandes aux plus petites, de l'amont vers l'aval de la retenue (Ben Aicha 2011).

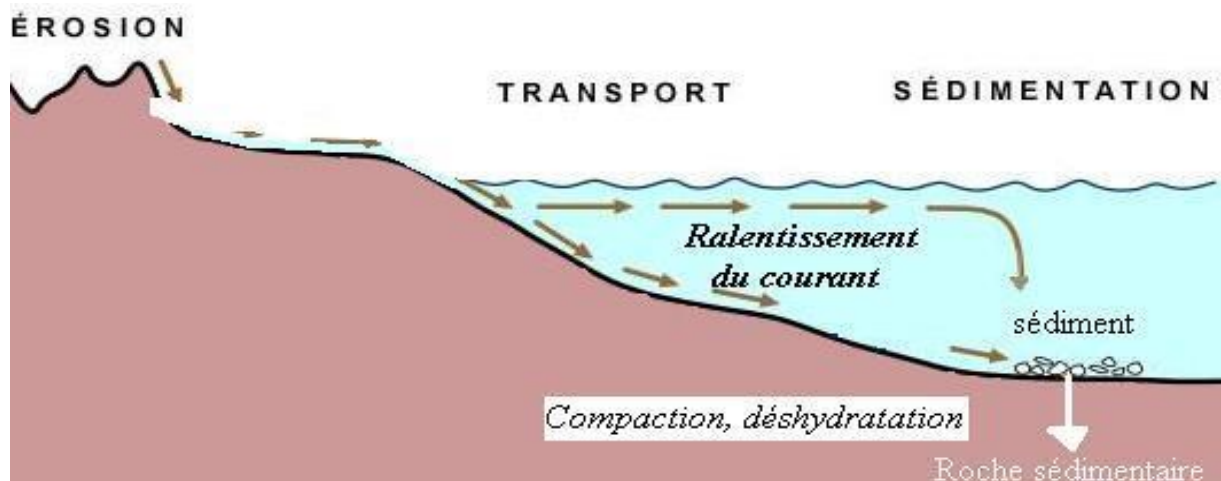


FIGURE I-2 MODE D'ENVAISEMENT DU BARRAGE [14]

I.2.4. Causes et des conséquences de l'érosion des sols [01]

I.2.4.1. Les Causes

- La texture des sols est un des facteurs principaux de l'érosion des sols. Les sols limoneux sont très propices à la battance, phénomène qui les rend imperméables et qui augmente le ruissellement des eaux.
- L'agrandissement des parcelles agricoles suite aux nombreux remembrements accroît les risques d'érosion des sols en créant des conditions favorables au ruissellement des eaux (augmentation de la vitesse d'écoulement des eaux notamment).

La diminution des surfaces toujours en herbe participe au phénomène d'érosion des sols.

Les prairies assurent un couvert permanent qui tamponne efficacement les eaux de ruissellement.

- La disparition des fossés qui accompagne souvent l'agrandissement des parcelles exacerbe le problème d'érosion des sols. Les fossés permettent de maîtriser la circulation des eaux de ruissellement et d'éviter leur accumulation sur les parcelles agricoles.
- La destruction du maillage bocager, telles les haies ou les talus a souvent accompagné les anciens remembrements agricoles. Ces éléments paysagers jouent pourtant un rôle primordial dans la gestion des eaux et représentent des obstacles naturels au ruissellement des eaux sur un versant.
- Les traces de roues générées par des passages d'engins répétés et des outils non adaptés (pneumatiques par ex.) créent des chemins préférentiels pour les eaux de ruissellement, augmentent les risques d'accumulation sur la parcelle et donc de formation de ravines.
- Le labour parallèle à la pente accroît fortement la vitesse de ruissellement des eaux.
- Les sols laissés nus l'hiver favorisent l'érosion des sols en diminuant les capacités d'infiltration des sols.
- Une urbanisation mal maîtrisée augmente l'imperméabilisation des sols et donc les vitesses de ruissellement des eaux. Les constructions dans les zones à risques de coulées de boue et d'inondations doivent parfois supporter des dégâts matériels importants.

I.2.4.2. Les conséquences

- L'érosion des sols qui peut se manifester par la formation de ravines et provoquer des coulées de boues sur la voirie et dans les villages.
- La rivière brune chargée en limons provenant des versants. La qualité de l'écosystème s'en trouve dégradée (colmatage des frayères, diminution de l'oxygène dissout nécessaire à la vie aquatique etc.)
- L'augmentation des crues des rivières avec l'arrivée massive des eaux de ruissellement provenant du bassin versant.

I.2.5. Les processus de l'érosion hydrique

L'érosion hydrique est un phénomène complexe qui résulte de trois phases : détachement, transport et dépôt (Fig. I.3), 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, couvert végétal, techniques culturales) et de la topographie. Quelle que soit l'échelle d'étude, du mètre Carré au bassin versant de centaines de km², on retrouve partout ces trois phases de l'érosion mais avec des intensités différentes ; d'où la diversité des facteurs de l'érosion en fonction des phases dominantes.[1]

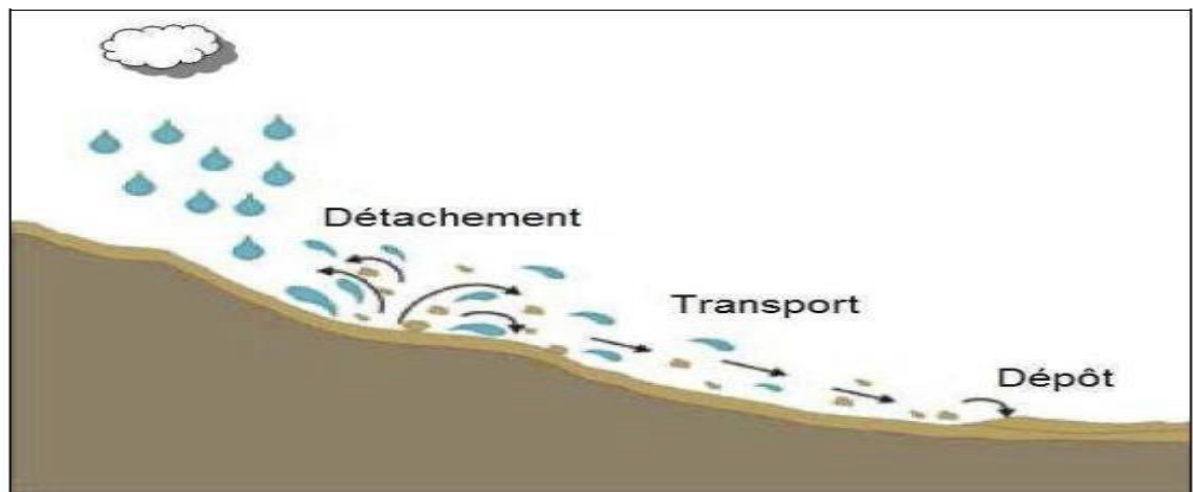


FIGURE I-3 PROCESSUS DE L'ÉROSION HYDRIQUE [1]

I.2.6. Erosion et dépôt dans un bassin versant [03]

L'érosion et détachement des particules du sol, leurs transports et finalement leurs dépôts dépend de plusieurs caractéristiques dont on cite morphologique, hydrologique et climatique du bassin versant, ou alors des zones géographiques.

On regroupe ces caractéristiques en deux grandes familles appelées physiques et hydrologiques.

I.2.6.1. Les caractéristiques physiques

Les caractéristiques de nature physique influant sur l'érosion, le transport solide et dépôt sont : le relief, la nature géologique, les sols, la végétation, l'occupation des terres, la morphologie du réseau de drainage.

Ceci dit, il existe d'autres caractéristiques physiques extrêmes, dues à des phénomènes naturels tels que les tremblements de terres, avalanches, éruptions volcaniques, coulées de lave et glissements de terrains.[1]

I.2.6.2. Les caractéristiques hydrologiques

Elles comprennent tout d'abord les éléments importants au développement de la végétation dont on cite le climat, la précipitation et la température.

L'écoulement joue aussi un rôle majeur dans l'érosion et le transport solide.

Le volume et l'intensité des précipitations jouent un rôle important dans les processus d'érosion par leurs effets sur la dynamique du détachement des particules des sols sans protection et du maintien en mouvement des particules par l'écoulement.[1]

I.2.7. Quantification de l'érosion

L'importance de l'érosion hydrique et ces préjudices pour l'activité humaine d'un côté (pertes en sol), ont poussé l'homme à chercher et à proposer les méthodes pour y remédier à ce phénomène crucial. Pour ce faire, il a été procédé à la quantification de cette érosion par des méthodes empiriques.

Plusieurs formules et méthodes qui impliquent tous les paramètres physiques sont utilisées pour la quantification de l'érosion hydrique.[1]

I.3. L'envasement

L'envasement des barrages est l'un des grands problèmes hydrauliques qui menace l'existence de l'infrastructure hydrotechnique en Algérie. Suite à la forte érosion hydrique dans les bassins versants, des quantités considérables des sédiments sont drainées directement dans les retenues de barrages. Ces dépôts posent des problèmes aux barrages, tel que la déstabilisation de la digue, la diminution du volume utile d'eau, l'obturation des pertuis de vidange et le colmatage des canaux d'irrigation.

Le présent chapitre a pour objet de donner un aperçu sur l'envasement des barrages, et les problèmes posés par l'envasement.[1]

I.3.1. Problématique de l'envasement des barrages en Algérie

De nombreux pays dans le monde sont touchés par le problème de l'envasement et non seulement l'Algérie. En Afrique, Le Maghreb est considéré comme le plus touché par le problème d'envasement, les barrages des pays du Maghreb enregistrent une perte annuelle de capacité de 125 Hm³. La situation s'aggrave encore dans les zones arides et semi-arides où le manque d'eau est très préoccupant.

En 1890, il existait en Algérie neuf barrages, d'une capacité de 61 Millions m³ et un volume de vase de 2,7 Millions m³. Cette capacité a atteint 1 milliard de m³ en 1962, à partir de cette date le nombre des barrages ont augmentés considérablement.

Le phénomène de l'envasement réduit progressivement le volume de stockage d'un barrage d'eau, non seulement cet effet direct, mais encore l'enlèvement de la vase déposée au fond au cours de plusieurs années nécessite des techniques spécifiques et coûteuses. Au niveau de la digue du barrage, la vase déposée peut présenter un risque considérable sur la stabilité de l'ouvrage et ces équipements hydrauliques, les études de dimensionnement doivent donc bien estimer le volume mort.[06]



FIGURE I-4 ENVASEMENT DU BARRAGE DE BAKHADDATIARET (2008).[06]

I.3.2. Etat d'envasement de quelques barrages en Algérie du Nord en 2004

Le taux d'envasement en Algérie ne est pas bien réparti surtout au nord d'Algérie, nous observons une variation remarquable, et indique plusieurs types d'envasement (Faible envasement, Moyenne envasement, Fort envasement, et Très fort envasement)

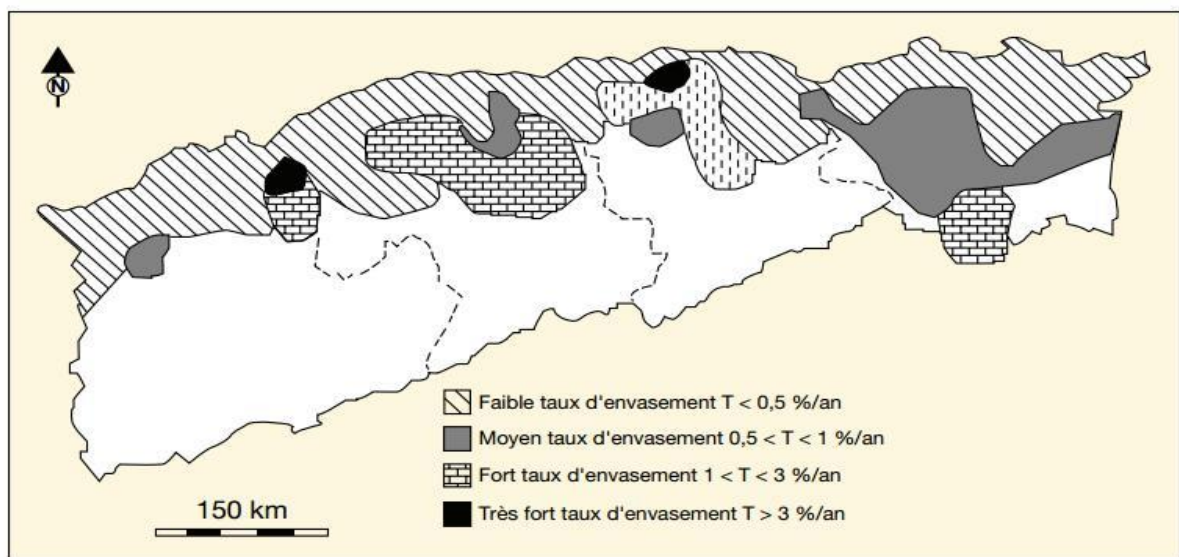


FIGURE I-5 CARTE DE SENSIBILITE DES BARRAGES A L'ENVASEMENT (2007).

I.3.3. Alluvionnement et envasement d'une retenue

L'envasement est défini comme étant le dépôt de sédiments dans la retenue d'un barrage réservoir, réduisant ainsi sa capacité de stockage. Il est principalement causé par le phénomène de l'érosion et du transport des sédiments détachés du sol, qui finissent généralement par se décanter dans une retenue d'un barrage.[03]

I.3.4. Conséquence de l'envasement

L'envasement est un processus complexe qui engendre des conséquences multiples à des niveaux différents, distinguent essentiellement six (6) conséquences définies comme suit :[03]

1. Sur les volumes régularisés et les performances du barrage

L'envasement de la retenue d'un barrage affecte sa capacité de stockage et par conséquent réduit son volume utile disponible (Tableau I.1) et (Tableau I.2).

TABLEAU I-1 PERTES DE LA CAPACITE DUE A L'ENVASEMENT DANS CERTAINS PAYS DU MONDE

Pays	Barrages	Capacité initiale Hm ³	P% annuel de perte de capacité
	K'sob	31,0	3,5
Algérie	Cheurfa	14,4	2,0
	Foum el gherza	47,0	1,7
	Ghrib	280,0	1,1
Autriche	Bachenta	0,7	3,0
Chine	Hesenglin	8,6	6,5
Espagne	Pedromarin	19,0	5,9
France	Beauvoir	11,0	3,0
Maroc	Mohamed V	567,0	2,0
Etat unis	Imperial	104,0	11,2

I-2 EFFET DE L'ENVASEMENT SUR LA CAPACITE UTILE DES BARRAGES EN ALGERIE (ANBT).

Barrages	Capacité initiale (Hm ³)	Capacité en 2004 (Hm ³)	Quantité de vase en 2004 (Hm ³)
Fergoug	18,00	0,40	17,60
Oued Fodda	228,00	102,85	125,15
Ghrib	280,00	115,30	164,7
K'sob	31,00	12,34	18,66
Foum El Gherza	47,00	14,89	32,11

2. Sur la capacité de laminage des crues

Du fait de l'envasement de la retenue d'un barrage, le volume de la partie réservée au laminage des crues subit une réduction progressive. Cette réduction se traduit par une augmentation du risque de déversement ce qui constitue une menace pour la sécurité de l'ouvrage et les zones inondables à l'aval et se traduit par les pertes d'eau pour l'alimentation en eau potable, l'irrigation et la production énergétique.

3. Sur la sécurité des barrages

L'envasement des barrages affecte leurs sécurités de par :

- La mise en danger de la stabilité de l'ouvrage du fait de l'augmentation de la poussée hydrostatique causée par le remplacement progressif des volumes par les sédiments et l'accroissement de la densité des eaux stockées dû à la suspension.
- L'opposition à l'ouverture des vannes nécessaires à la diminution du plan d'eau dans les cas d'urgence.
- Le gêne de l'auscultation de l'ouvrage. En effet, les sédiments déposés peuvent empêcher la mise en œuvre des moyens d'inspection subaquatiques et masquer le parement amont face aux inspections visuelles après vidange.

4. Sur les ouvrages annexes des barrages

Les dimensions des matériaux qui sont transportés par la rivière dans la retenue et dont une partie rentre en contact avec les organes de restitution constituent un danger permanent pour la sécurité du barrage. Ces dangers sont de deux types selon la taille des sédiments ;

- Danger dû aux matériaux fins, provient de l'effet statique de ces matériaux qui en s'accumulant devant l'entonnement des prises d'eau et de vidange de fond ou encore des évacuateurs de crues risquent de créer un bouchon de vase qui devient problématique avec sa consolidation et qui affecte la fonctionnalité de l'ouvrage.
- Danger dû aux matériaux grossiers pouvant du fait de leur taille endommager les vannes ou leurs étanchéités, s'opposer à la fermeture des vannes et provoquer une perte d'eau importante.

5. Sur les infrastructures aval

Les problèmes posés par les sédiments ne se limitent pas au niveau du barrage, mais ils s'étendent bien à l'aval. Ainsi, les sédiments en suspension dans l'eau distribuée par des canaux à partir des barrages se déposent dans ces ouvrages.

L'envasement des canaux d'irrigation impose leur entretien et leur curage d'une manière régulière.

6. Sur la qualité de l'eau

Un des plus importants effets de l'érosion sur la qualité des eaux des retenues des barrages est sa dégradation due au phénomène d'eutrophisation. Ce phénomène est lié à un aspect particulier du transport solide dans les bassins versants, à savoir, sa charge en phosphore, en manganèse et en azote et à l'effet des sédiments sur la modification du chimisme de l'eau et la stratification thermique de la retenue.

Un autre effet, tout aussi important de l'érosion réside dans la difficulté d'éliminer les quantités importantes de matières en suspension au niveau des oueds où existent des prises d'alimentation en eau potable au fil de l'eau.

I.3.5. Étapes de l'envasement d'un barrage

Le processus de l'envasement d'un barrage débute dans la première phase par l'arrachage des particules fines de leurs positions initiales par le ruissèlement. Dans la seconde phase, les sédiments seront drainés par les cours d'eau jusqu'au barrage. Enfin dans la troisième partie, les particules seront pièges pour se décanter et se tasser au fond du lac du barrage.[04]

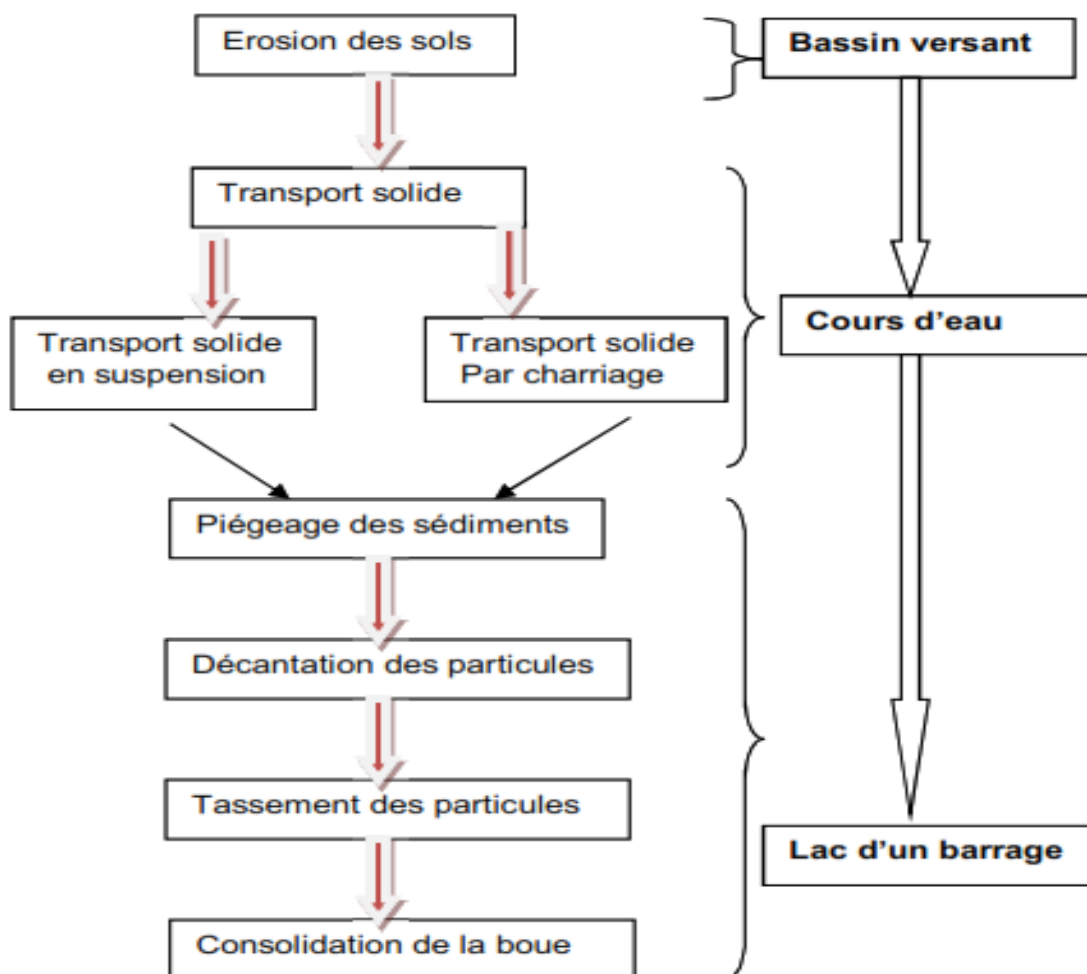


FIGURE I-6 PROCESSUS D'ENVAISEMENT D'UN BARRAGE RESERVOIR.[04]

I.3.6. Quantification de l'envasement d'un barrage

Face aux conséquences très importantes de l'envasement particulièrement au niveau de la retenue, il est nécessaire d'examiner et suivre le taux d'envasement des barrages afin de pouvoir prendre les mesures de protections adéquates.

Pour cela il existe plusieurs méthodes de mesure à savoir : [03]

a. Mesure à l'échosondeur

Le principe est de déterminer le volume de la vase suite à une comparaison entre le profil en travers d'origine et celui réalisé à partir des données relevées par échosondeur à ultra-son.

b. Méthode de turbidimétrie

Cette méthode est basée sur la relation qui nous donne le débit massique instantané d'une station donnée en multipliant le débit liquide instantané par la turbidité instantanée.

Par la suite on trace le diagramme de turbidité fournissant la masse solide instantanée véhiculée en fonction de la durée de la crue.

c. Méthode de stéréophotogrammétrie

L'un des procédés actuels le plus précis pour établir les données de base est la stéréophotogrammétrie ancienne complétée au sol par un travail topographique, l'erreur commise par ce procédé dans l'évaluation des coordonnées des points particuliers, et de l'ordre de 0.1 m, une telle précision permet l'utilisation de photographie semblable, à des intervalles de temps suffisant de l'ordre de cinq (5) ans ou même de deux (2) ans.

d. Méthode bathymétrique

Consiste en la réalisation d'un levé hydrographique qui mesure la profondeur de l'eau de la retenue, en relevant la forme des fonds marins, en le comparant aux données initiales, on obtiendra le taux de sédiments dans la retenue.

I.4. Conclusion

Le phénomène d'érosion et de transport solide, est un phénomène qui peut parvenir de façon naturelle ou provoquée suite aux actions extérieures et aussi aux agents anthropiques induisant des conséquences non négligeables. Parmi ces conséquences l'alluvionnement (l'envasement) des barrages-réservoirs provoquant des pertes considérables de la capacité utile d'un réservoir.

La revue bibliographique sur le phénomène de l'envasement et le rôle de la dégradation du sol par ce phénomène, nous a permis de cerner la complexité du problème et de mettre en évidence les nombreuses lacunes sur leur compréhension. Ainsi de prévoir des actions de gestion ainsi que des solutions préventives ou curatives pour atténuer l'ampleur du phénomène.

CHAPITRE II

*« Description du bassin versant
de Beni Haroun »*

Chapitre II. Description du bassin versant de Beni Haroun

II.1. Introduction

Préalable et indispensable à toute étude efficace, la connaissance du milieu naturel du bassin doit s'acquérir dans de multiples domaines (topographie, géologie, climatologie, hydrologie et la biogéographie, etc.). Pour ces raisons, un choix a été fait le bassin versant de Beni Haroun a été choisi comme bassin d'application de notre travail pour la diversité des données qui y sont disponibles, et malgré la diminution d'études sur ce bassin.

Dans ce chapitre, notre étude nous a montré la situation géographique et toutes les caractéristiques de site de bassin versant sous étude localise au Beni Haroun, la géologie (la structure du sol), l'hydrologie et le climat...etc. Ces caractéristiques affectent sur le taux d'envasement et taux d'érosion. Donc l'insuffisance de l'eau nous oblige à protéger toutes les ressources disponibles contre toutes pertes et à l'utiliser d'une manière rationnelle et scientifique, et ce, pour satisfaire les besoins des différents secteurs (AEP, l'industrie, l'irrigation).

II.2. Notion du bassin versant

Le bassin versant est la surface réceptrice des eaux précipitées qui alimentent une nappe souterraine, un lac, une rivière ou un réseau complexe ; on le définit par sa morphométrie, ses caractères climatiques, sa géologie, sa végétation, ses sols.

Plus précisément, le bassin versant qui peut être considéré comme un " système " est une surface élémentaire hydrologiquement close, c'est-à-dire qu'aucun écoulement n'y pénètre de l'extérieur et que tous les excédents de précipitations s'évaporent ou s'écoulent par une seule section à l'exutoire.[1]

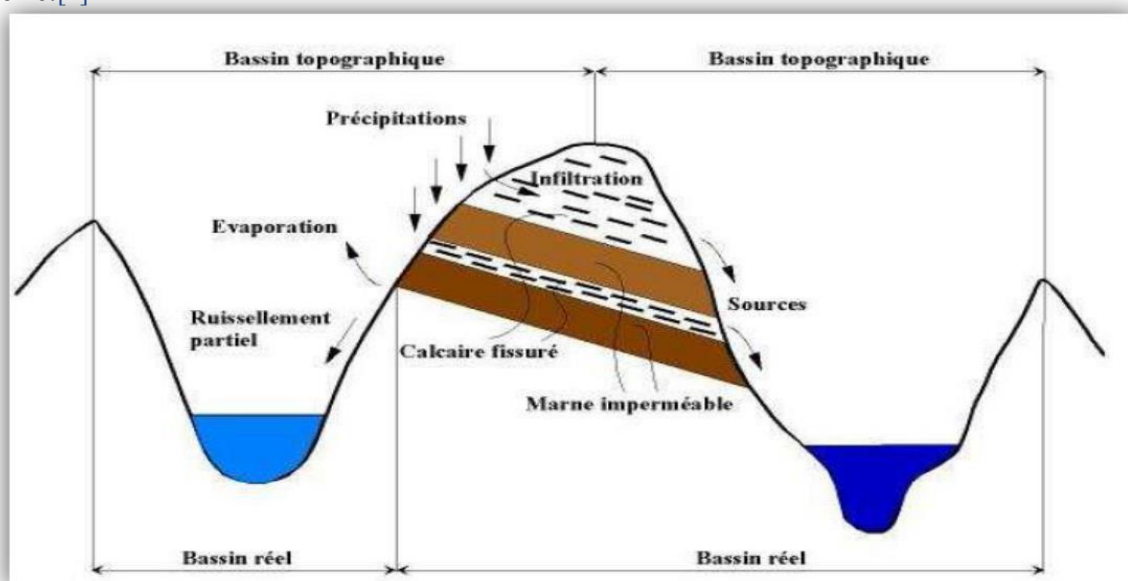


FIGURE II-1DISTINCTION ENTRE BASSIN VERSANT REEL ET BASSIN VERSANT TOPOGRAPHIQUE. [1]

II.3. Etude et présentation du bassin versant

Le bassin versant Kèbir-Rhumel centré à 36° de latitude Nord et à 7° de longitude, est l'un des plus important et grands bassins d'Algérie, s'étendant sur une superficie de 8815Km², il se compose de 7 sous-bassins hydrographiques et possède une façade maritime d'environ 7 Km². Le bassin est limité :

- Au Nord par les deux bassins côtiers Constantinois Ouest et Centre.
- Au Sud, le bassin des hauts plateaux constantinois.
- À l'Ouest les bassins de l'Algérois-Hodna-Soummam
- Est à l'Est le bassin de la Seybouse.

L'oued Kebir-Rhumel est le cours d'eau qui draine le bassin depuis la ville d'Ain M'lila (hautes plaines constantinoises) jusqu'au réservoir du barrage de Beni-Haroun. Plusieurs villes importantes sont situés dans le bassin versant tels que Constantine et El Khroub a l'Est, Mila au Nord, AM El Kebira a l'Ouest et Ain M'Lila au Sud.

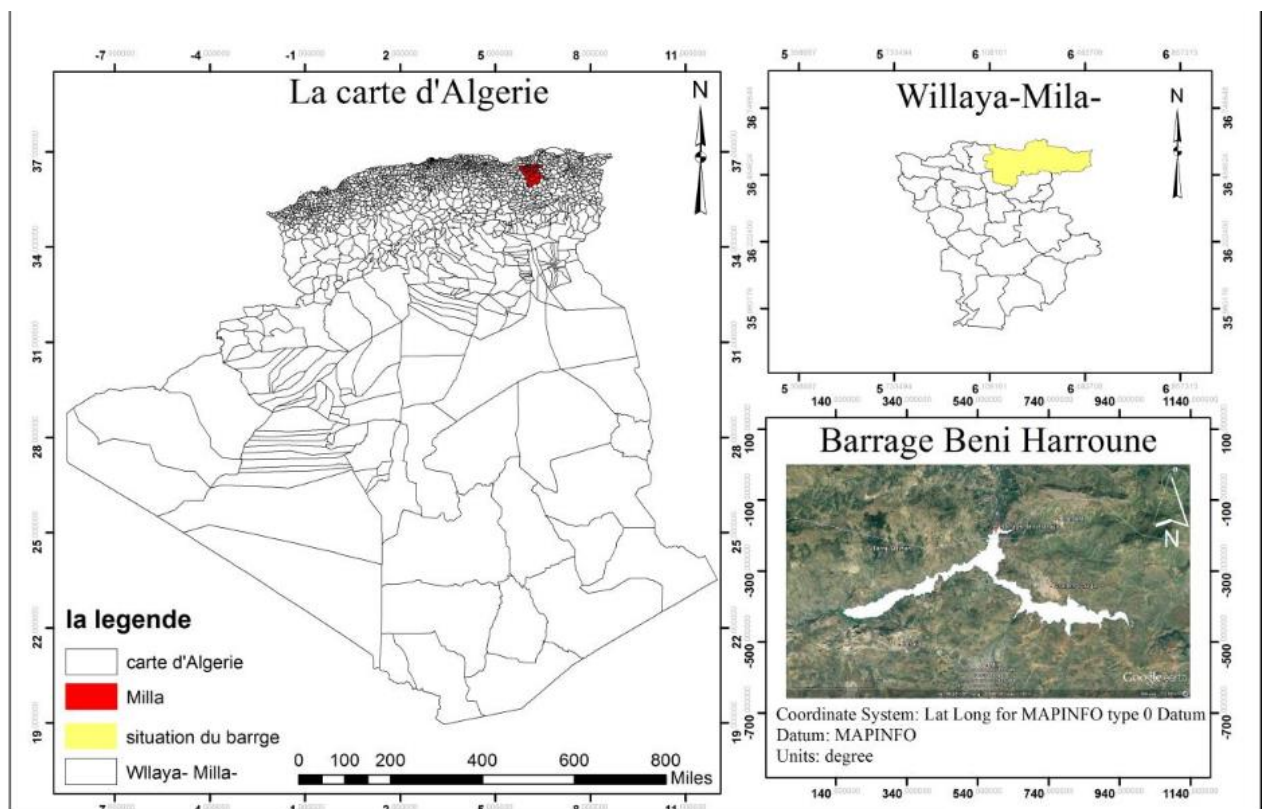


FIGURE II-2CARTE DE SITUATION GEOGRAPHIQUE ET LOCALISATION CHANGER CETTE CARTE

Le bassin versant sous étude couvre une superficie de près de 2193 km² s'étendant sur des milieux naturels et socio-économiques d'une grande diversité (Agence Nationale des Barrages et des transferts, Beni-Haroun 2006).

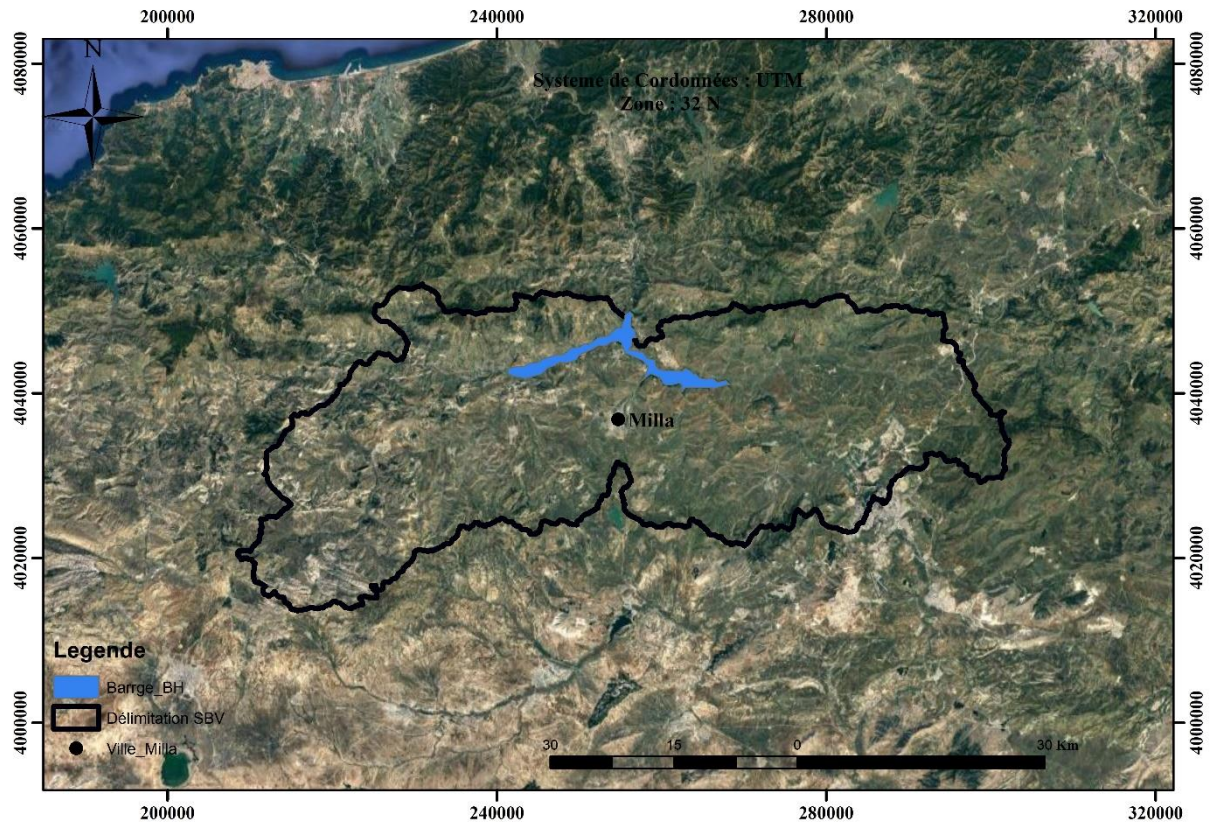


FIGURE II-3 CARTE DE SITUATION DU BASSIN VERSANT

II.4. Morphologie du bassin

II.4.1. Caractéristiques climatiques

Le climat est l'ensemble des actions de l'atmosphère : humidité, pluie, température et vents. C'est l'élément naturel sur lequel l'homme n'a aucune influence directe (sauf les cas particuliers des irrigations). C'est un facteur essentiel du développement des plantes, de la formation et de l'évolution des sols. Ses principales composantes ont une influence importante sur l'érosion. La connaissance des conditions climatiques de notre zone d'étude et de ses caractéristiques va nous permettre de mieux comprendre le comportement hydrologique des cours d'eaux. D'une manière générale, le climat de la région est de type continental, semi-aride au Sud et subhumide au Nord avec un hiver pluvieux et froid et un été Sec et chaud. [02]

Le climat d'une région est influencé par de nombreux paramètres climatologiques qui sont :

- La température
- La précipitation
- L'humidité et le vent
- Pluviométrie

La climatologie a essentiellement pour but :

- L'analyse complète des éléments météorologiques qui déterminent le climat
- La recherche des causes qui expliquent les différents climats et les fluctuations qui les accompagnent.

II.4.1.1. La température

C'est l'un des éléments les plus importants de la radiation solaire. Un certain nombre de phénomènes physiques tels-que l'évaporation, le dégel de l'eau, la gelée blanche. La dilatation et la concentration de certains matériaux : phénomène physiologique ou pathologique tel que la transpiration sont liées à la température de l'air. La température dont il s'agit est la température de l'air mesuré à l'ombre dans un abri météorologique.

Les données de température se limitent à celles fournies à l'ANRH par la station météorologique de l'aéroport d'Ain El Bey à Constantine. La température moyenne saisonnière varie entre 10°C en hiver et 25°C en été. Par contre la moyenne annuelle est de l'ordre de 17.06 °C Tableau.

TABLEAU II-1TEMPERATURES MOYENNES MENSUELLES A LA STATION AIN EL BEY CONSTANTINE (DONNEES ANRH 20 ANS).

MOIS	Sept	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Août
Température °C	22.6	18.82	14.8	11.7	10.89	11.35	12.3	14.4	17.7	21.1	24.1	24.74

II.4.1.2. La précipitation

La pluie est un facteur climatique très important qui conditionne l'écoulement saisonnier et influence directement le régime des cours d'eau ainsi que celui des nappes aquifères. La région d'étude est considérée parmi les régions les plus arrosées. Elles sont relativement importantes, variables et irrégulières d'une année à une autre.

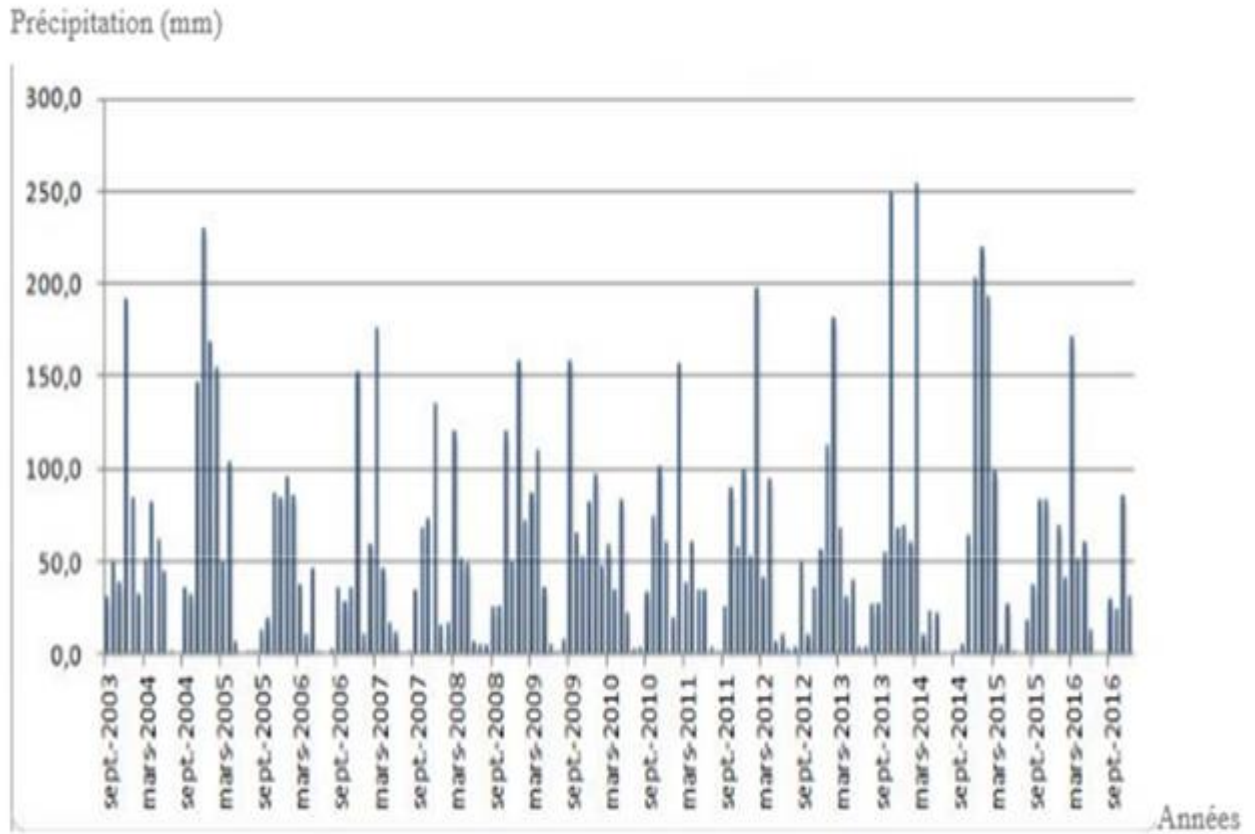


FIGURE II-4 VARIATIONS INTERANNUELLES DES PRECIPITATIONS 2003-2016 STATION DE BENI HAROUN (DONNEE ANBT).

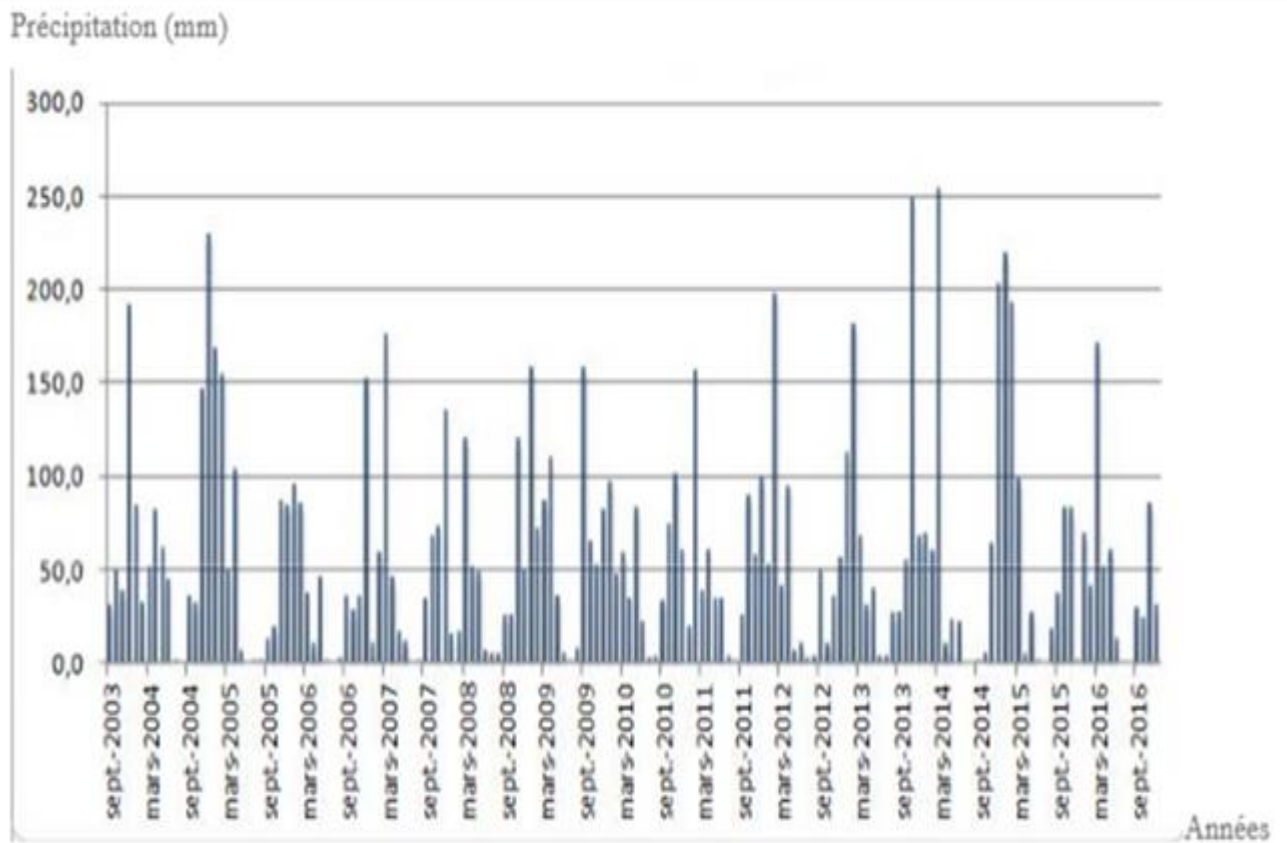


FIGURE II-5 L'EVAPORATION OU NIVEAU DE BARRAGE BENI HAROUN (2003-2016) (DONNEE ANBT).

II.4.1.3. L'humidité et le vent

L'humidité est plus élevée de l'année, s'étalent de juin jusqu'à septembre qu'en été, le taux d'humidité moyen au cours de l'année est de 70%. Le vent est un facteur important du climat, il influe sur la température, l'humidité et l'évaporation. La direction, la fréquence et la vitesse des vents sont variables au cours de l'année. En générale, la connaissance de la vitesse et de la direction des vents est primordiale pour la mise en place d'un ouvrage quelconque. Les vents dominants dans la région sont ceux du Nord-Ouest avec une vitesse assez constante au cours de l'année, entre 1.9 et 2.5 m/s.

II.4.1.4. Pluviométrie

L'intensité, la continuité et la périodicité de la pluviométrie représentent l'origine même de l'écoulement, notre zone d'étude est caractérisée par des précipitations à la fois faibles et irrégulières à forte variabilité inter-mensuelle et interannuelle.

Le tableau 2 représente la pluviométrie mensuelle en (mm) et le nombre de jours de pluie pour chaque mois de quelques stations pluviométrique sur l'oued Rhumel considérées comme le plus proches de barrage Beni Haroun de septembre 2013 au mois de mars 2014. [02]

TABLEAU II-2 PLUVIOMETRIE (EN MM ET NOMBRE DE JOURS DE PLUIE J) DE SEPTEMBRE 2013 A MARS 2014 DE 5 STATIONS DU BASSIN VERSANT KEBIR-RHUMEL (ANRH 2014).

Mois mm/j ///Station	Sept	Oct	Nov	Dec	Janv	Fev	Mars
ATHMANIA	14.5/4j	18.4/3j	39.9/6j	18.8/8j	24.4/4j	14.4/4j	112.1/6j
AIN SMARA	16/3j	2.7/3j	52.3/9j	1.1/2j	1.7/2j	1.8/2j	5.5/6j
CONSTANTINE	20.5/5j	27/7j	154.2/17j	44/10j	27.4/14j	52.1/14j	158/21j
HAMMA BOUZIANE	41.9/4j	57.7/6j	137.2/16j	44/9j	53.5/13j	42.5/11j	158.2/18j
BOUMALEK	35.5/3j	14.5/2j	104.1/7j	14.6/2j	25/5j	12.5/3j	107.7/13j

II.4.2. Caractéristiques physiques

II.4.2.1. La géologie du bassin

Ce site localise dans une zone à relief accidenté, montrant des contrastes topographiques remarquables, avec des massifs culminants à des hauteurs élevées (Djebel Msid Aicha : 1462 m) et des ravins et talwegs sur creusés

Sa géologie est particulièrement mouvementée et marquée par un empilement d'unités structurales du Nord au Sud.

En outre, de la rive droite à la rive gauche (de barrage beniharoun), les pendages se redressent progressivement jusqu'à être verticales et même se renverser avec un léger pendage vers le Nord. Les terrains meubles sont constitués principalement de dépôts alluviaux sablo- graveleux dans le lit des oueds et sur plusieurs niveaux de terrasses, de colluvions provenant en grande partie de l'érosion des formations terrigènes et d'éboulements au pied des formations rocheuses. Par ailleurs, il est clair que l'activité tectonique à rejeu continu dans le temps affecte aussi bien les formations du substratum.[07]

II.4.2.2. Impact de la géologie sur l'hydrologie

Le type de formations géologiques qui affleurent dans les bassins versants a une influence sur la répartition des écoulements superficiels. En effet, un bassin formé de matériaux très perméables avec une couverture végétale continue aura en général une densité de drainage faible assurant une meilleure infiltration des eaux superficielles. Par ailleurs, un bassin formé de roches imperméables mais meubles et érodables, comme des marnes et des argiles, avec une végétation moyenne, présente souvent une densité de drainage élevée, ce qui favorise le ruissellement des eaux superficielles aux dépens de l'infiltration.

II.4.2.3. Végétation du bassin

Le couvert végétal de la région d'étude est réduit. Il se résume à des surfaces recouvertes majoritairement d'herbes et quelques arbres d'eucalyptus, ce faible couvert végétal a considérablement favorisé le phénomène d'érosion du sol.

II.4.3. Caractéristiques hydrographiques du bassin [8,11]

Le milieu physique dans lequel évolue le cycle hydrologique varie d'un bassin à l'autre en fonction d'un certain nombre de paramètres physiques, morphologiques et géométriques qui interviennent, et souvent de façon combinée, dans les modalités de l'écoulement fluvial. L'analyse de ces paramètres permet une meilleure compréhension des causes de variation des régimes hydrauliques d'un bassin. Le bassin de Kèbir-Rhumel se compose de Sept 7 sous bassins dont les limites correspondent à celles des unités hydrologiques contrôlées par des stations hydrométriques, c'est pourquoi l'étude des caractéristiques physique se fait pour chaque partie contrôlée par les stations de jaugeage.

II.4.3.1. Caractéristiques morphométriques

Les paramètres morphologiques d'un bassin versant (forme, altitudes, pente, relief, etc.) jouent un rôle essentiel dans son comportement hydrologique. Ils ont l'avantage de se prêter à une analyse quantifiée qu'il convient de préciser autant que possible, dès le début de toute étude. La forme des bassins versant qui peut être traduite par l'indice de compacité de Gravelius a également une influence certaine sur l'écoulement. Les différentes grandeurs déterminantes de la forme d'un bassin versant sont les suivantes :

* L'indice de compacité de Gravelius

C'est la relation entre le périmètre du bassin et celui d'un cercle de la même surface. Il est déterminé par la relation suivante :

$$Kc = 0,28 \frac{P}{\sqrt{S}} \dots\dots\dots (II.1)$$

Avec :

P : Périmètre du bassin en Km

S : Surface du bassin en Km²

Si, Kc tend vers 1 : Le bassin est ramassé

Si, $Kc > 1$ le bassin est allongé

Plus ce coefficient s'approche de 1, plus la forme de bassin versant sera ramassée et plus le temps de concentration des eaux seront courts. Elle sera allongée dans le cas contraire.

* Rectangle équivalent

Il est défini par sa longueur "L" et sa largeur "l" et par la même surface du bassin versant "S".

Les dimensions de ce rectangle sont données par les formules suivantes :

$$\text{La longueur} : L = \frac{Kc\sqrt{S}}{1,12} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{Kc}\right)^2} \right] \dots\dots\dots (II.2)$$

$$\text{La largeur} : l = \frac{Kc\sqrt{S}}{1,12} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{Kc}\right)^2} \right] \dots\dots\dots (II.3)$$

* Coefficient d'allongement Ca :

Ce coefficient est obtenu par la relation

$$Ca = L_{cp}^2 / S \dots\dots\dots (II.4)$$

Avec :

L : la Longueur du cours d'eau principal (km).

S : la surface du bassin versant (km²).

II.4.3.2. Caractéristiques du relief

La région fait partie de l'Atlas tellien. Le relief est constitué de plaines et de vallées fertiles irriguées par des cours d'eaux, de collines à pentes régulières, de montagnes (Djebel Elgrar 1078 m, Djebel Bouaslouge 879 m etc..).

** Hypsométrie du bassin versant*

La variation d'altitude à l'intérieur d'un bassin ainsi que l'altitude moyenne sont des données essentielles aux études de la température et des précipitations.

La description détaillée de l'élévation d'un bassin est donnée par les courbes hypsométriques, et à partir de celles –ci, nous pouvons déterminer les caractéristiques de relief, à savoir :

- L'altitude maximale (H_{\max}).
- L'altitude minimale (H_{\min}).
- L'altitude médiane correspond à 50% de la surface ($H_{50\%}$).
- L'altitude moyenne (H_{moy}) déterminée par l'expression 2.6.
- L'altitude correspond à 5% de la surface ($H_{5\%}$).
- L'altitude correspond à 95% de la surface ($H_{95\%}$).
- La dénivelée ($D= H_{5\%} - H_{95\%}$).

La carte d'altitudes

La carte d'altitudes est obtenue suite au traitement effectué en utilisant la carte MNT téléchargées gratuitement à partir du site <http://glovis.usgs.gov/> de l'USGS.

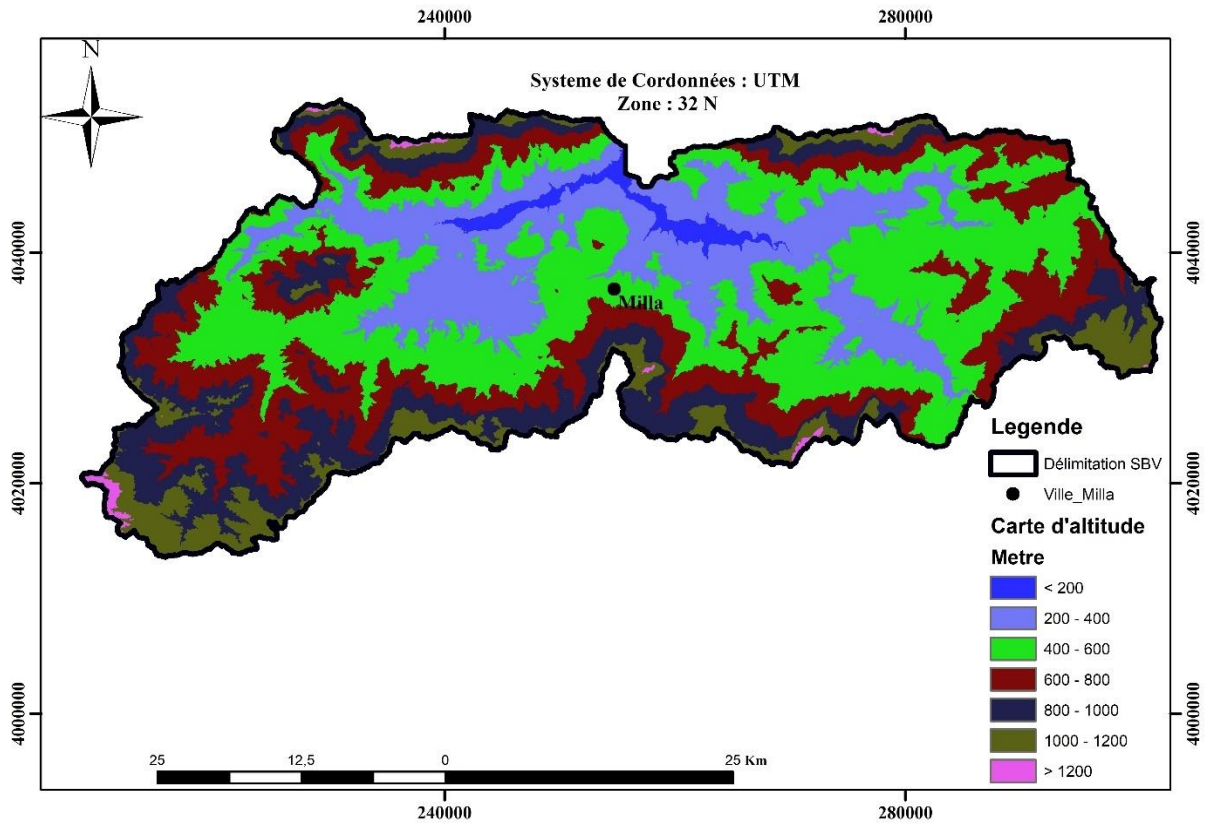


FIGURE II-6 CARTE D'ALTITUDE DU BASSIN VERSANT.

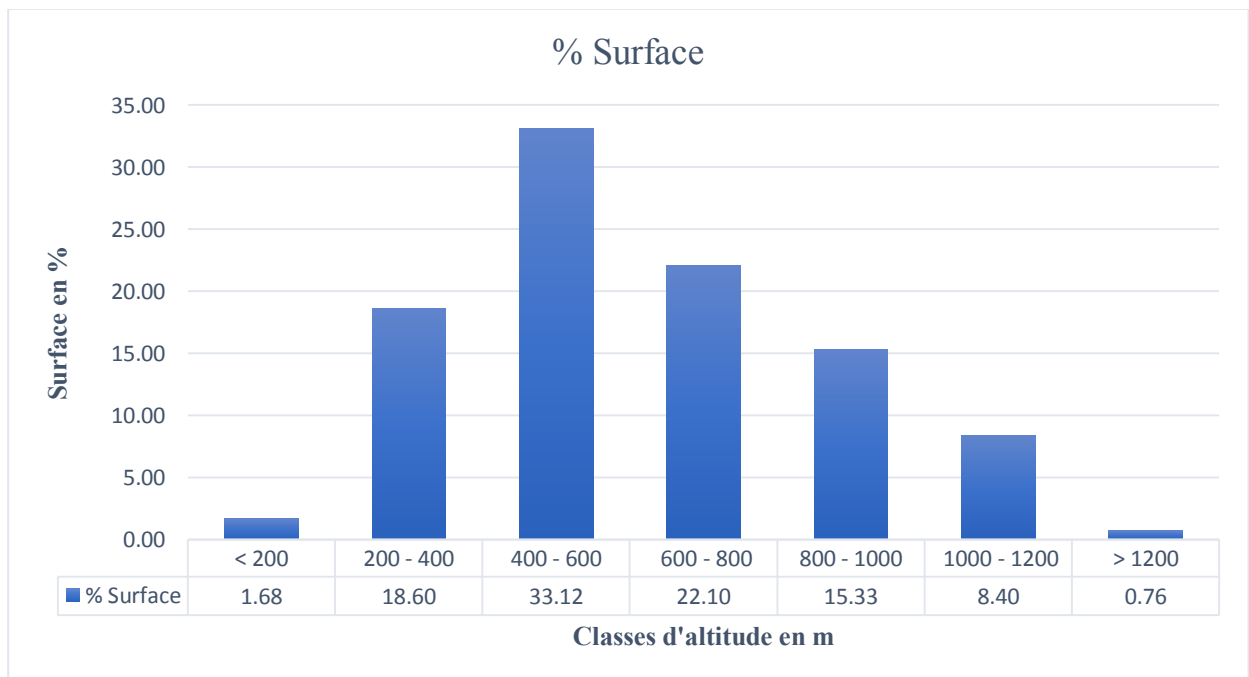


FIGURE II-7 LA REPARTITION DES CLASSES D'ALTITUDE EN FONCTION DE SURFACE

Pour estimer ces paramètres on doit présenter la répartition hypsométrique après planimétrie des aires partielles comprises entre les courbes de niveau maîtresses et les différentes cotes.

TABLEAU II-3 HYSOMETRIE DU BASSIN VERSANT

Altitude	Si (Km2)	S Cum (Km2)	S Cum %	Dénivelée Dn	Hi (m)
> 1200	16,75	16,75	0,76	266,00	1333,0
1000 - 1200	184,20	200,95	9,17	200,00	1100,0
800 - 1000	336,21	537,16	24,50	200,00	900,0
600 - 800	484,60	1021,76	46,60	200,00	700,0
400 - 600	726,04	1747,80	79,72	200,00	500,0
200 - 400	407,71	2155,51	98,32	200,00	300,0
< 200	36,92	2192,43	100,00	87,00	156,5

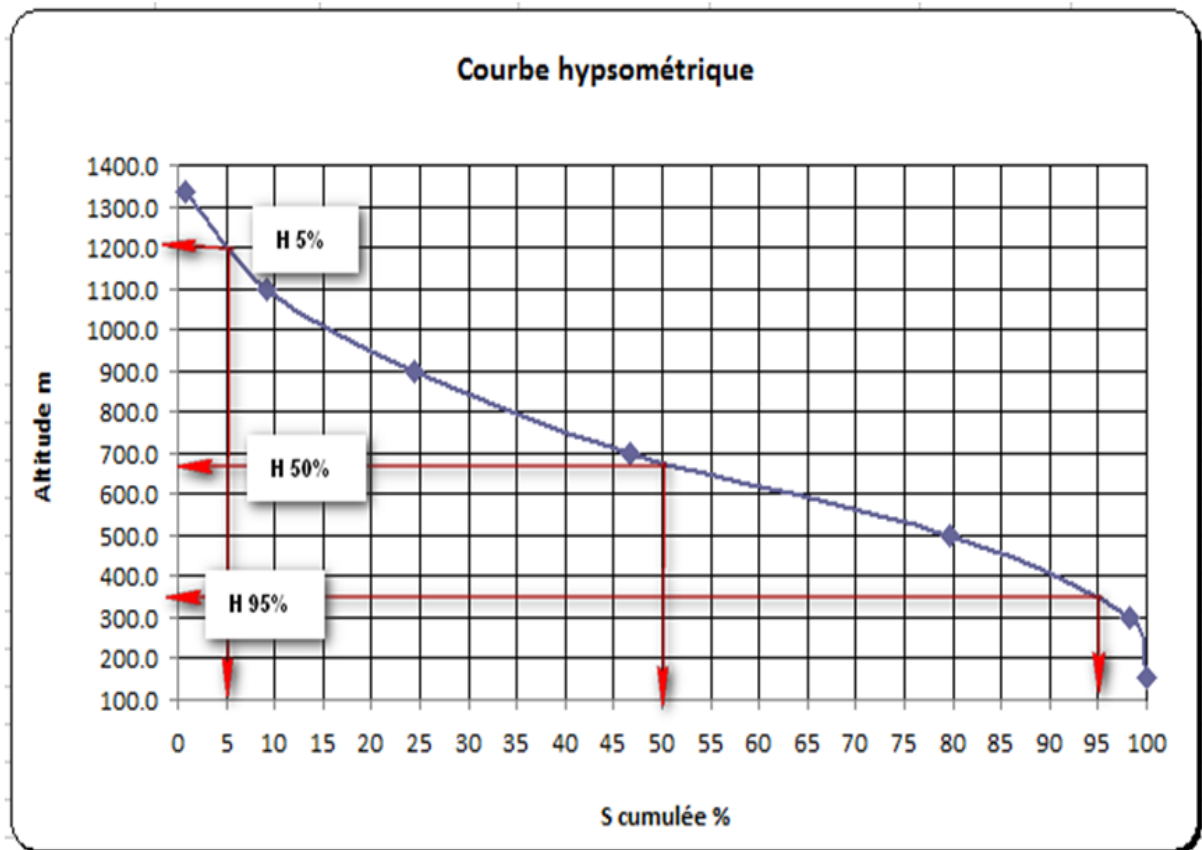


FIGURE II-8LA COURBE HYSOMETRIQUE DU BASSIN VERSANT

La carte des pentes

A partir du modèle numérique de terrain on a déduit la carte des pentes. En tenant compte de l'effet de la pente, le bassin versant de montre une forte susceptibilité à l'érosion. En effet, est assez contrasté avec des déférentes pentes (fortes et moyennes).

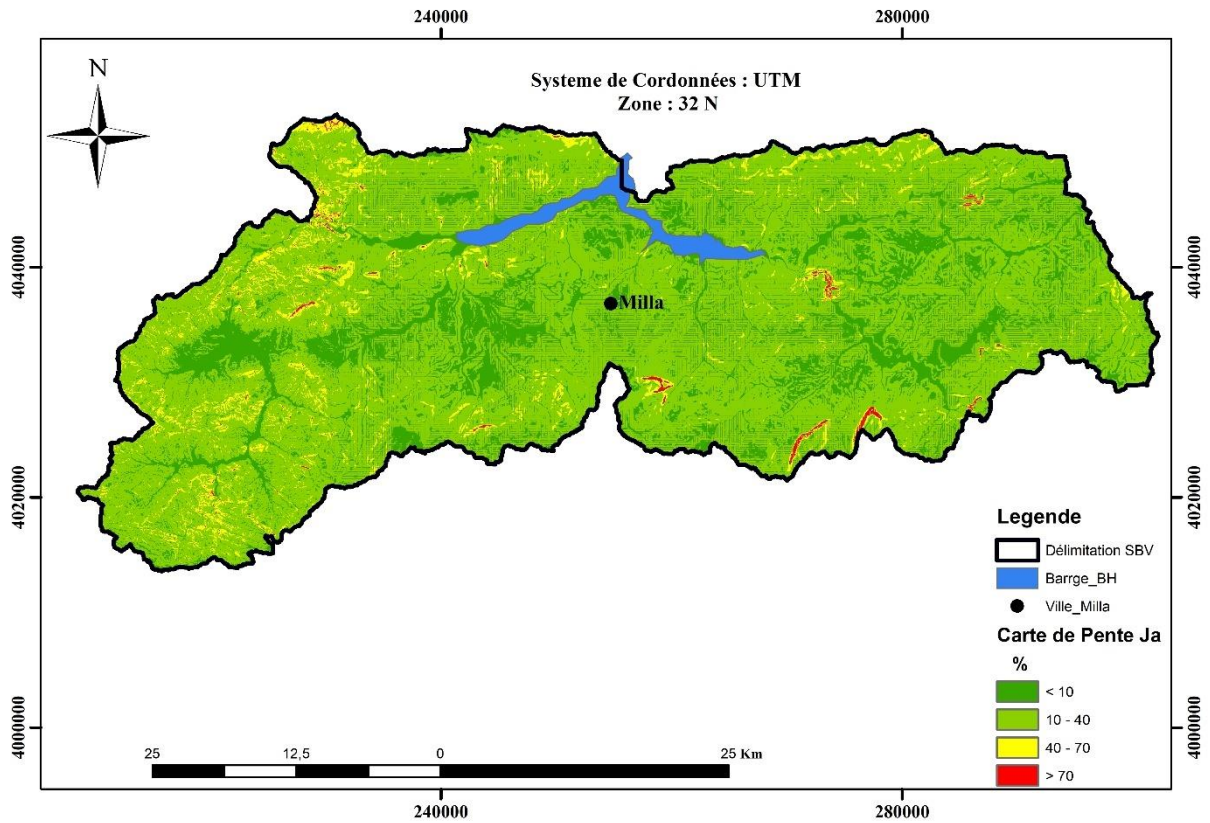


FIGURE II-9 CARTE DES PENTES DU BASSIN VERSANT

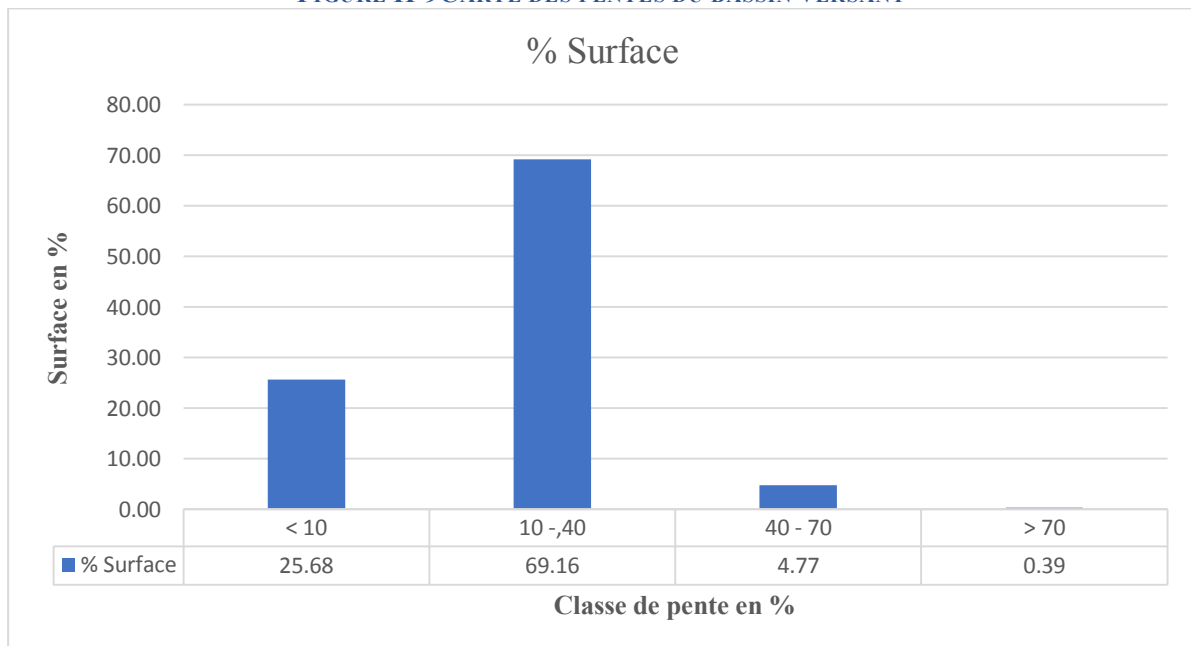


FIGURE II-10 LA REPARTITION DES CLASSES DE PENTES EN FONCTION DE SURFACE

* **Dénivelée simple**

On définit comme étant la différence de cote entre $H_{5\%}$ et $H_{95\%}$

$$D = H_{5\%} - H_{95\%} \dots \dots \dots (II.5)$$

* **Altitude moyenne de BV**

$$H_{Moy} = \sum_{i=1}^n \frac{S_i H_i}{A} \dots \dots \dots (II-6)$$

Avec :

H_{moy} : altitude moyenne du bassin (m).

S_i : Surface comprise entre deux courbes de niveaux i et $i+1$ (Km²).

H_i : Altitude entre ces deux courbes de niveaux (m).

A : Surface totale du bassin versant en Km².

* **Indice de pente**

Selon [Dubreuil \(1974\)](#), le but de ces indices est de caractériser les pentes d'un bassin versant pour permettre des comparaisons et des classifications entre bassins. Ils sont déterminés à partir de la connaissance des courbes hypsométriques.

* **Indice de pente de roche I_p**

Il permet de déterminer la pente moyenne avec les données réelles du bassin versant, il est calculé par l'expression 2.8 :

$$I_p = \frac{1}{\sqrt{L}} \sum_{i=1}^n \sqrt{S_i (H_i - H_{i-1})} \dots \dots \dots (II.7)$$

Avec :

I_p : indice de pente de roche en %.

H_i : fraction de surface comprise entre l'altitude a_i et a_{i+1} (a_i, a_{i+1}) altitude des courbes de niveau du bassin (m).

L : longueur du rectangle équivalent en Km.

H_{i+1}, H_i : Côtes de ligne de niveaux du bassin en m.

* **Dénivelée brute**

On définit comme étant la différence de cote entre H_{max} et H_{min}

$$D_b = H_{max} - H_{min}$$

* **Indice de pente globale I_g**

Il est utilisé pour la classification des bassins versants, cet indice est déterminé par la formule :

$$I_g = \frac{D}{L} \text{ en } \% \dots\dots\dots (II.8)$$

Avec :

D : Dénivelée en m.

L : Longueur du rectangle équivalent en Km.

TABLEAU II-4 CLASSIFICATION ORSTOM DU RELIEF A PARTIR DE L'INDICE DE PENTE GLOBAL I_g .

Relief	Valeur de I_g
Très faible	$I_g < 0.002$
Faible	$0.002 > I_g > 0.005$
Assez faible	$0.005 > I_g > 0.01$
Modéré	$0.01 > I_g > 0.02$
Assez Modéré	$0.02 > I_g > 0.05$
Fort	$0.05 > I_g > 0.1$
Très fort	$0.1 < I_g$

* **Pente moyenne d'un bassin versant I_m**

La pente moyenne d'un bassin versant peut se calculer par l'expression 2.9 :

$$I_m = \frac{H(0,5L_1 + L_2 + L_3 + \dots + 0,5L_n)}{S} \dots\dots\dots (II.9)$$

Avec : **I_m** : pente moyenne du bassin en (%).

H : hauteur entre deux courbes de niveaux consécutives (m).

L_i : longueur de la courbe de niveau en (Km).

S : superficie du bassin versant (Km²).

L : longueur du rectangle équivalent en (Km).

II.5. Paramètres du réseau hydrographique [11]

II.5.1. Densité de drainage D_d

C'est le rapport de la longueur totale des talwegs à la surface du bassin versant, elle est exprimée en Km/Km², soit :

$$D_d = \frac{\sum_{i=1}^n l_i}{S} \dots\dots\dots (II.10)$$

Avec : $\sum_{i=1}^n l_i$: Longueur totale cumulée des talwegs (km).

S : Surface du bassin versant (Km²).

II.5.2. Coefficient de torrentialité (C_t)

$$C_t = F_t \cdot D_d \dots\dots\dots (II.11)$$

Avec :

F_t : Fréquence des talwegs élémentaires : $F_t = \frac{N}{S}$

N: Nombre des talwegs d'ordre 1.

II.5.2.1. Dénivelée spécifique D_s

L'indice « I_g » décroît pour un même bassin lorsque la surface augmente, il était donc difficile de comparer des bassins de tailles différentes. La dénivelée spécifique « D_s » permet d'utiliser la classification de l'O.R.S.T.O.M. qui permet définir les différents types de relief des bassins versants quelque soient leurs superficies. La dénivelée spécifique est donnée par la formule suivante :

$$D_s = I_g * \sqrt{S_{bv}} \dots\dots\dots (II.12)$$

TABLEAU II-5 CLASSIFICATION DES RELIEFS D'APRES L'O.R.S.T.O.M.

R1	$D_s < 10$ m	Relief très faible
R2	$10 \text{ m} < D_s < 25$ m	Relief faible
R3	$25 \text{ m} < D_s < 50$ m	Relief assez faible
R4	$50 \text{ m} < D_s < 100$ m	Relief modéré
R5	$100 \text{ m} < D_s < 250$ m	Relief assez faible
R6	$250 \text{ m} < D_s < 500$ m	Relief fort
R7	$500 \text{ m} < D_s$	Relief très fort

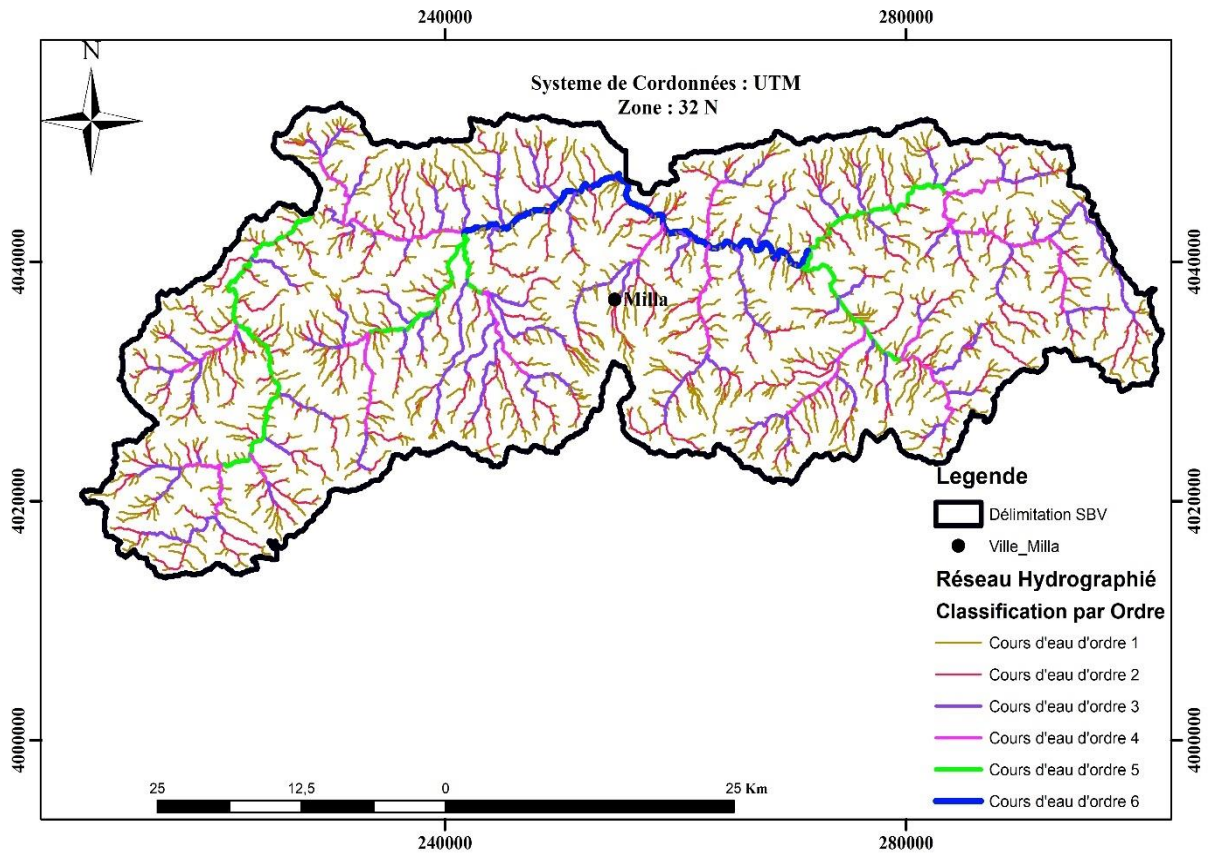


FIGURE II-11 RESEAU HYDROGRAPHIQUE DU BASSIN VERSANT.

FIGURE II-12 CARACTERISTIQUES GEOMETRIQUES ET HYDRO MORPHOMETRIQUES DU BASSIN

Paramètres	Symbole	Unité	Valeur
Superficie	A	Km ²	2192.4
Périmètre	P	Km	416,11
Indice de compacité	K _c	/	2.49
Longueur du rectangle équivalent	L _R	m	197.07
Largeur du rectangle équivalent	l _R	m	11.13
Indice de pente de Roche	I _p	%	4.16
Indice de pente global	I _g	%	4.31
Dénivelée spécifique	D _s	m	201.96
Type de relief	/	/	Relief assez faible
Altitude moyenne	H _{moy}	m	619
Altitude maximale	H _{max}	m	1466
Altitude minimale	H _{min}	m	113
Altitude à 5%	H _{5%}	m	1200
Altitude à 95%	H _{95%}	m	350
Longueur de cours d'eau principale	L _{cp}	Km	44.75
Longueur des thalwegs totales	L _{pt}	Km	2488.98
Nombre de thalwegs Ordre 1	∑L ₁	Km	5399
Densité de drainage totale	D _d	Km/Km ²	1.14
Pente moyenne	I _{cmoy}	%	28.90
Coefficient de torrentialité	C _t	/	2.80
Temps de concentration	T _c	Heures	11.00
Vitesse de propagation de crue	V _e	Km/h	42.03
Classification de Horton	Ordre	/	6

II.6. Conclusion

L'étude des différentes caractéristiques de sous bassin nous avons pu tirer les synthèses suivantes :

- Un climat n'est pas uniforme, car nous avons pu distinguer trois types de climat : climat littoral tempéré, climat de l'Atlas Tellien et climat des hautes plaines.
- Un réseau hydrographique très développé (ordre 6). Oued principale et leurs affluents constituent son squelette hydrographique.
- Une altitude maximum est de 1466 m au pic et un temps de concentration de 11 heures.

CHAPITRE III

***« Cartographie de
l'érosion hydrique par
l'utilisation du modèle
EPM et SIG »***

Chapitre III. Cartographie de l'érosion hydrique par l'utilisation du modèle EPM et SIG

III.1.Introduction

Le modèle EPM "Erosion Potentiel Method", a été développé dans les années 50 par Gavrilovic dans les bassins versants d'Ex-Yougoslavie. Il a pu être appliqué avec succès à des bassins alpins en Italie. La méthode a pour objectif de quantifier les risques d'érosion hydrique et de développer des pratiques adaptées pour la réduction des pertes des sols. Elle est applicable à divers types d'érosion (érosion en nappes, érosion en rigoles et en ravins et sapement de berges). Il se base sur la cartographie et la combinaison de six paramètres qui sont :

- La pente.
- La sensibilité des sols a l'érosion.
- L'état érosif, la protection des sols.
- La température et les précipitations.

Nous allons tester ce modèle pour la quantification de l'érosion dans le sous bassin versant de BENNI HAROUN sachant que toutes les données sur les paramètres du modèle et la similitude des conditions physiques du bassin versant sont disponibles.

Dans le présent travail, L'application du modèle de Gavrilović a nécessité la cartographie et l'intégration dans le Système d'Information Géographique (SIG) des différents paramètres qui rentrent en ligne dans le phénomène de l'érosion hydrique et qui sont nécessaire au fonctionnement du modèle EPM. Ce couplage permet, d'évaluer les pertes en sols et d'estimer le poids de chaque facteur et de leurs effets combinés d'une manière rapide et efficace. Il permet ainsi de démêler la complexité et l'interdépendance des facteurs responsables de l'érosion. L'équation exprime l'érosion comme étant le produit des six facteurs suivants : les pentes, les précipitations, les températures, la sensibilité des sols à l'érosion, les types d'érosion et la protection des sols, ces paramètres utilisés ont été étudiés grâce à la télédétection et aux données collectées sur le terrain puis intégrés dans le SIG.

Ces paramètres sont :

- A- Les facteurs permanents de l'érosion hydrique sont :
- La sensibilité à l'érosion,
 - La pente et l'état érosif.

- B- Les facteurs dynamiques sont :
- Les précipitations.
 - Les températures.
 - L'utilisation des sols.
- C- Les processus et formes de l'érosion réelle et leur hiérarchisation en fonction du degré du risque.

III.2.Méthodologie

Le volume annuel moyen des sédiments érodés désigné par la lettre (**W**) est déterminé de la manière suivante : [12]

$$W = T * H * \pi * \sqrt{Z^3} \text{ (III-1)}$$

Où :

W : volume annuel moyen des sédiments érodés (m³/km²/an)

T : Coefficient de la température

$$T = \sqrt{\frac{t_0}{10} + 0.1} \text{ (III-2)}$$

Avec :

t₀ : Température moyenne annuelle en (C°)

H : Précipitation moyenne annuelle en (mm)

Z : Coefficient d'érosion

$$Z = X_a * Y * (\varphi + \sqrt{J_a}) \text{ (III-3)}$$

X_a : Coefficient de protection du sol du bassin versant, se rapportant à la protection des sols par la couverture végétale, des influences des phénomènes atmosphériques des forces érosives liées aux conditions naturelles.

Y : Coefficient d'érosion du sol, indique la sensibilité des sols à l'érosion dépend de la géologie du bassin versant

φ : Coefficient de type et d'étendue de l'érosion équivalent numérique des processus visibles et nettement prononcés dans le bassin versant

J_a : Pente moyenne de la zone d'étude en (%)

L'organigramme (Figure (III.1)) présente la méthodologie adoptée pour préparer la carte des pertes en sols (W) à partir du modèle de Gavrilovic (**EPM**).

Ces facteurs sont calculés à partir des images satellites, des cartes géologique, pédologique, de fichier DEM (Modèle d'élévation numérique), cartes de précipitation moyenne annuelle et la carte de la température.

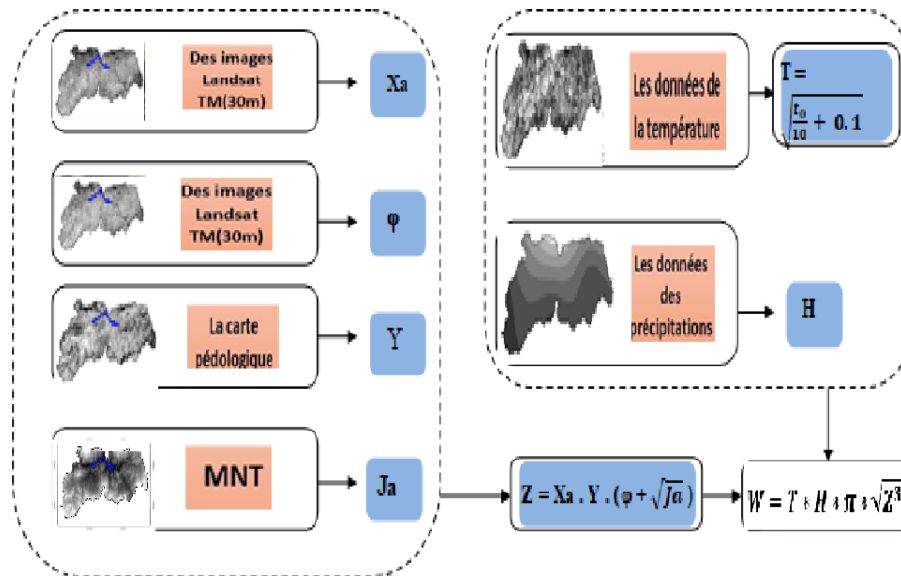


FIGURE III-1 ORGANIGRAMME GENERALE DU MODELE GAVRILOVIC « EPM »

III.3. Résultats et discussion

III.3.1. Coefficient de la température (T)

La température est un facteur d'érosion très important dans ce modèle, car elle a un effet évident sur l'eau dans le sol. La température maximale permet d'augmenter l'évaporation et la transpiration et conduit à l'apparition des fissures qui permettent de démanteler les formations argileuses en particulier, et les variations thermiques successives permettent le démantèlement des composants des roches et des formations de surface.

Gavrilovic a cherché à adopter la température comme facteur d'érosion dans le modèle **EPM**. Les valeurs du coefficient de température sont déterminées par une formule spéciale qui prend la température moyenne annuelle comme variable de base pour calculer le coefficient.

$$T = \sqrt{\frac{t_0}{10} + 0.1} \quad (\text{III-4})$$

Avec :

t_0 : Température moyenne annuelle en (C°)

Devant l'absence des données de la température dans le bassin versant de Benni Haroun nous avons travaillé avec les données disponibles comme les images satellitaires téléchargées à partir de site « Earth explorer » pour les 12 mois des années « 1995, 2005, 2015 et 2019 ».

Le facteur de température sont présentés respectivement dans les figures suivantes :

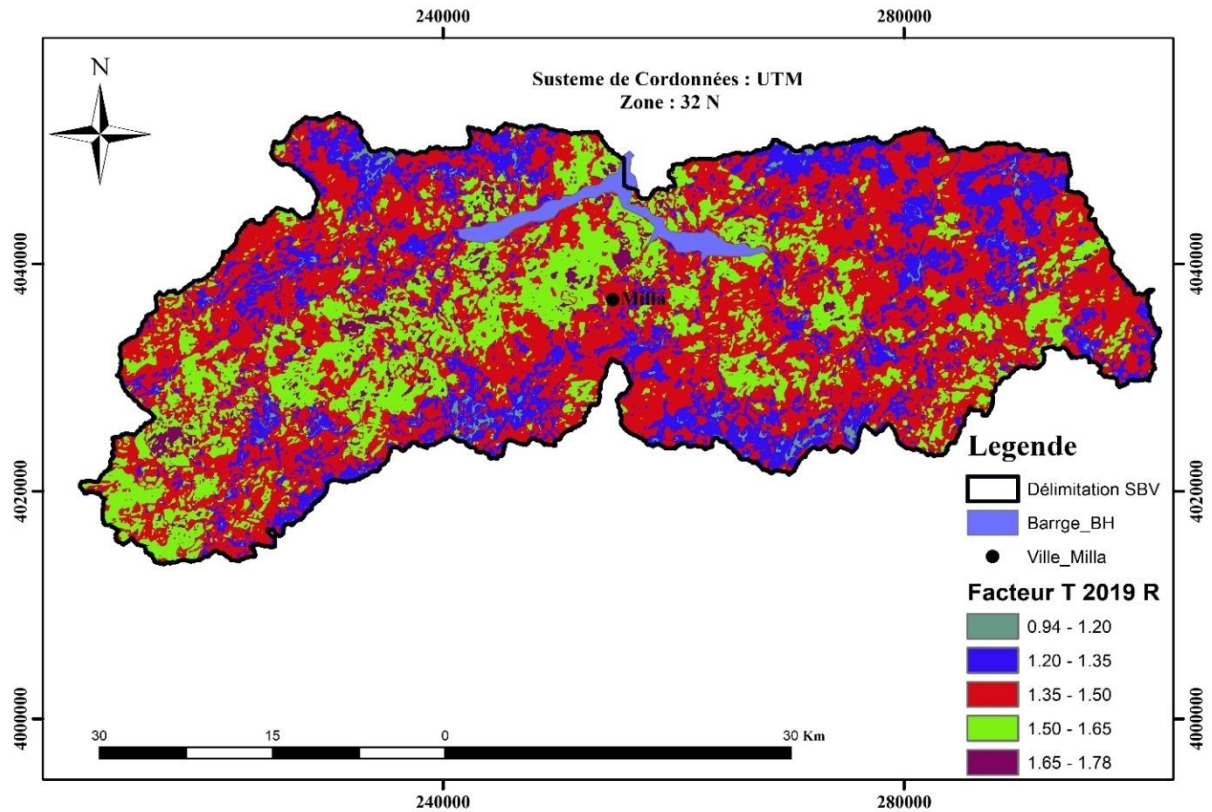


FIGURE III-2 LE FACTEUR DE LA TEMPERATURE "T" DU BASSIN VERSANT EN 2019

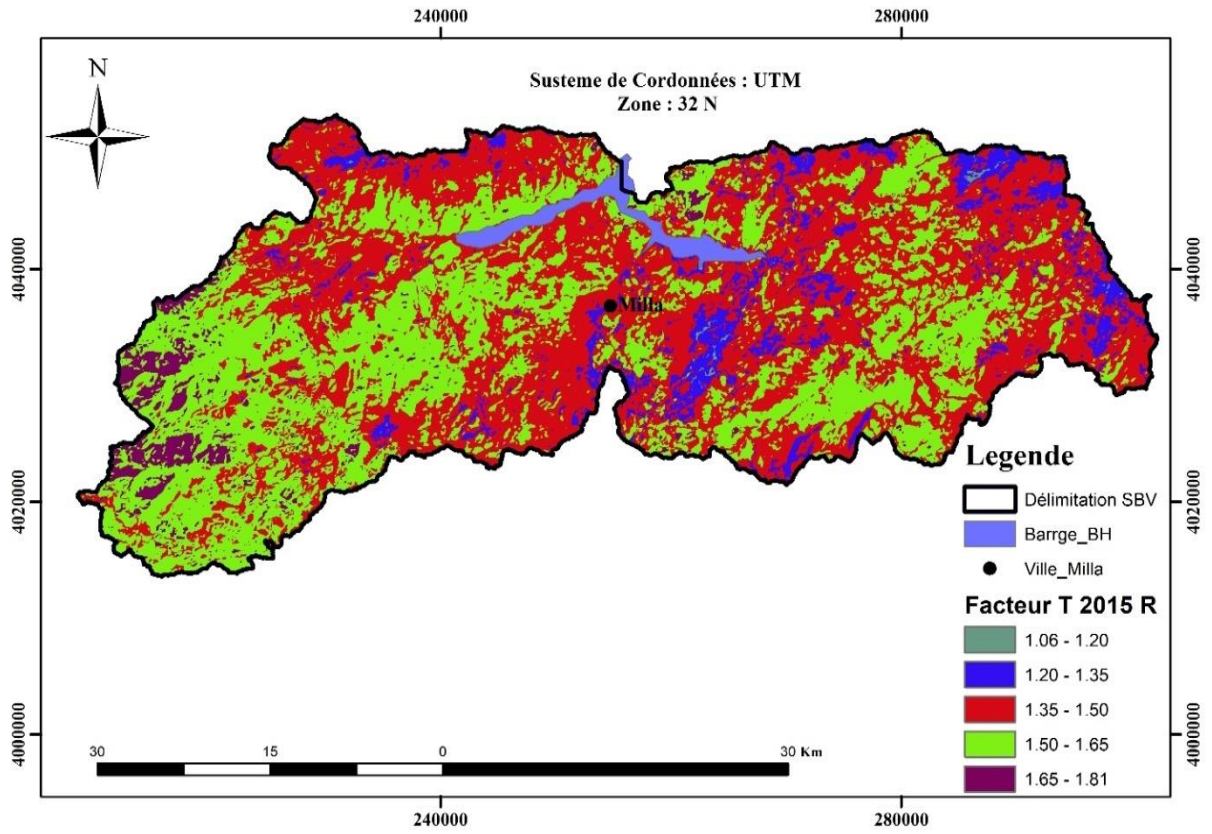


FIGURE III-3 LE FACTEUR DE LA TEMPERATURE "T" DU BASSIN VERSANT EN 2015

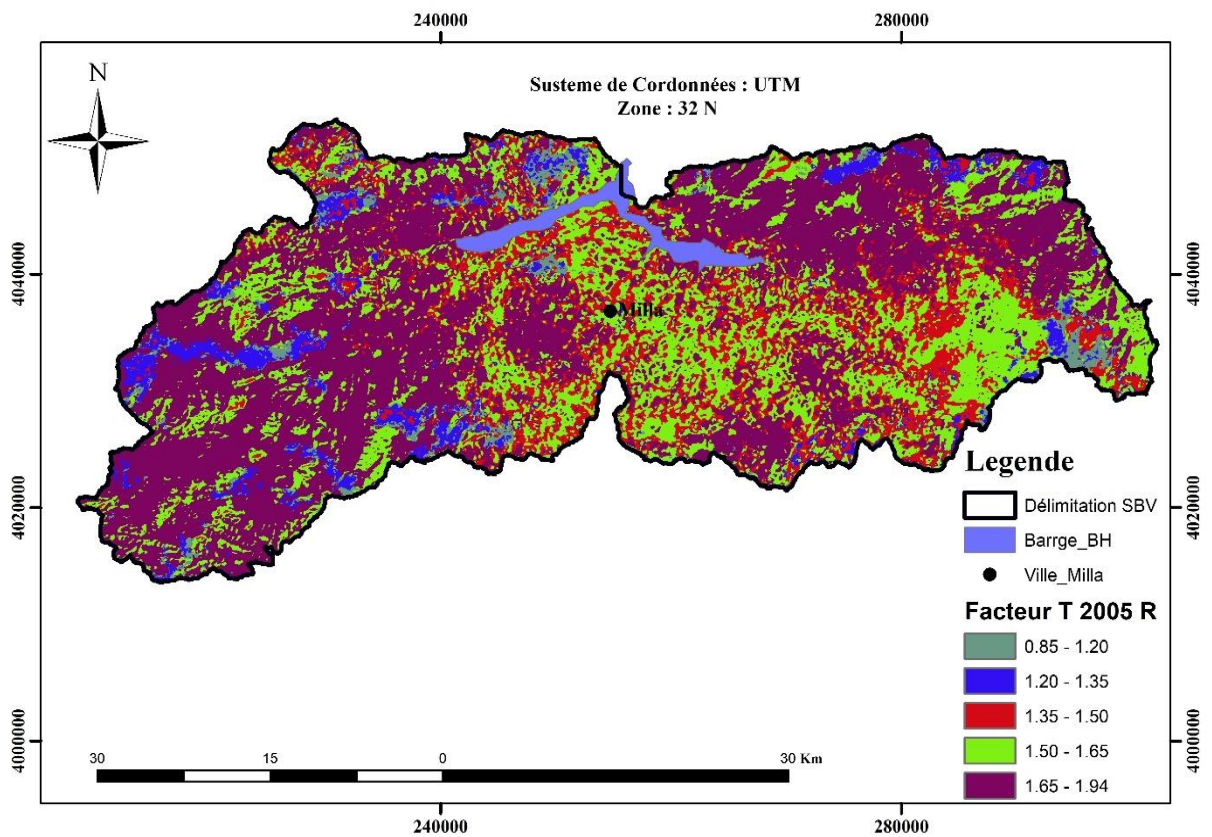


FIGURE III-4 LE FACTEUR DE LA TEMPERATURE "T" DU BASSIN VERSANT EN 2005

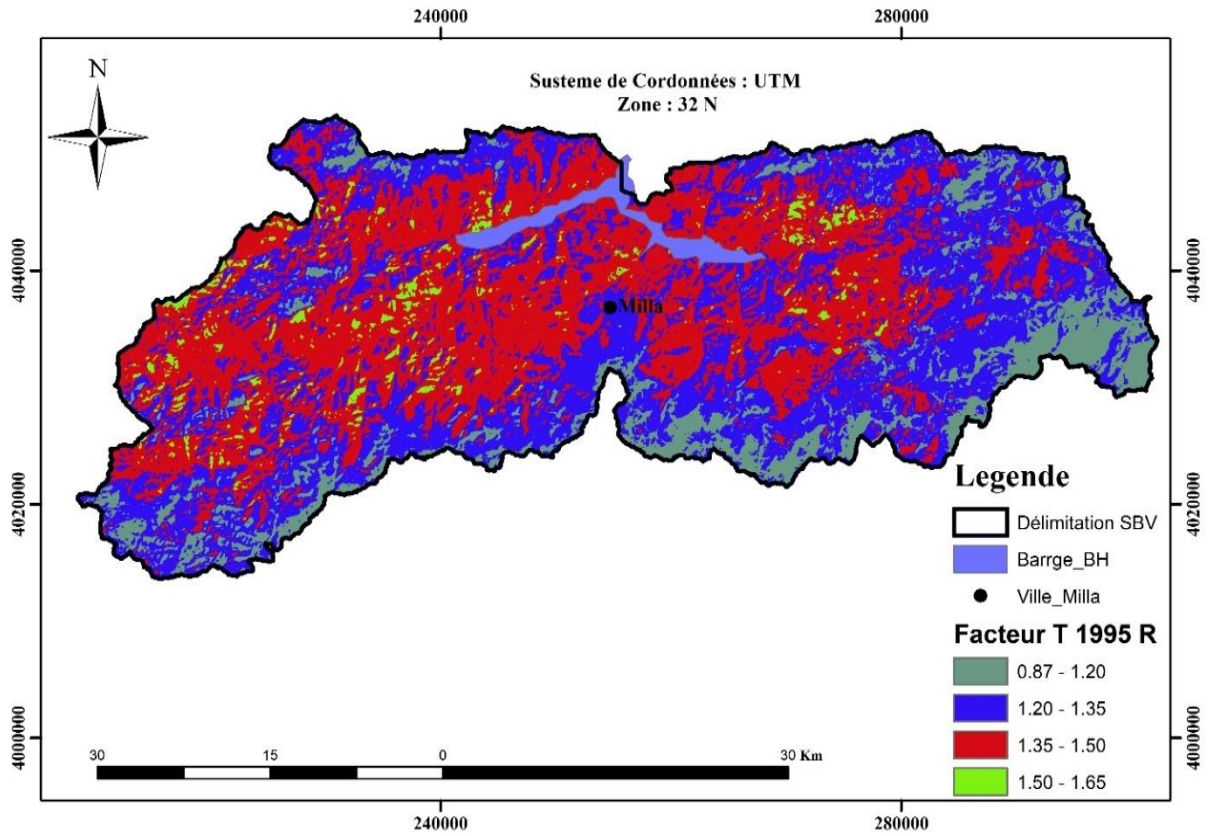


FIGURE III-5 LE FACTEUR DE LA TEMPERATURE "T" DU BASSIN VERSANT EN 1995

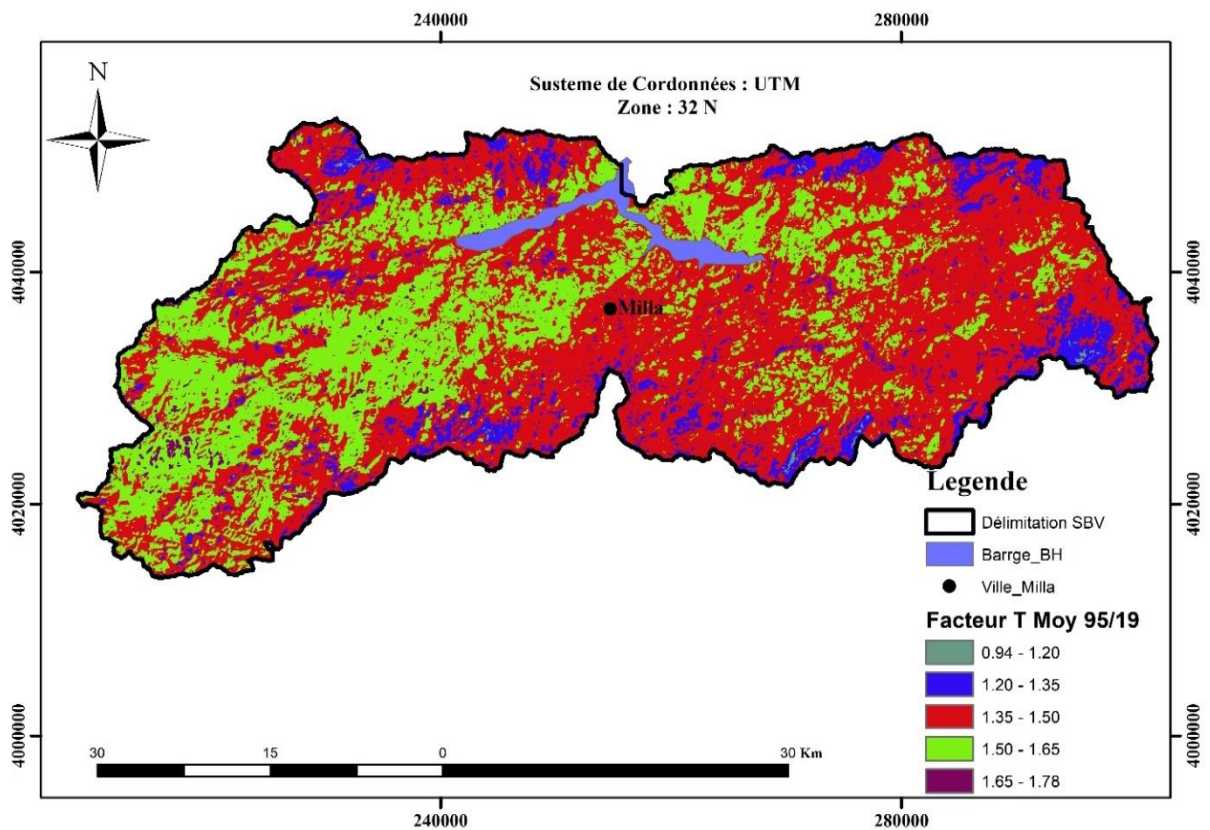


FIGURE III-6 LE FACTEUR MOYENNE DE LA TEMPERATURE "T" POUR LES ANNEES (1995, 2005, 2015 ET 2019)

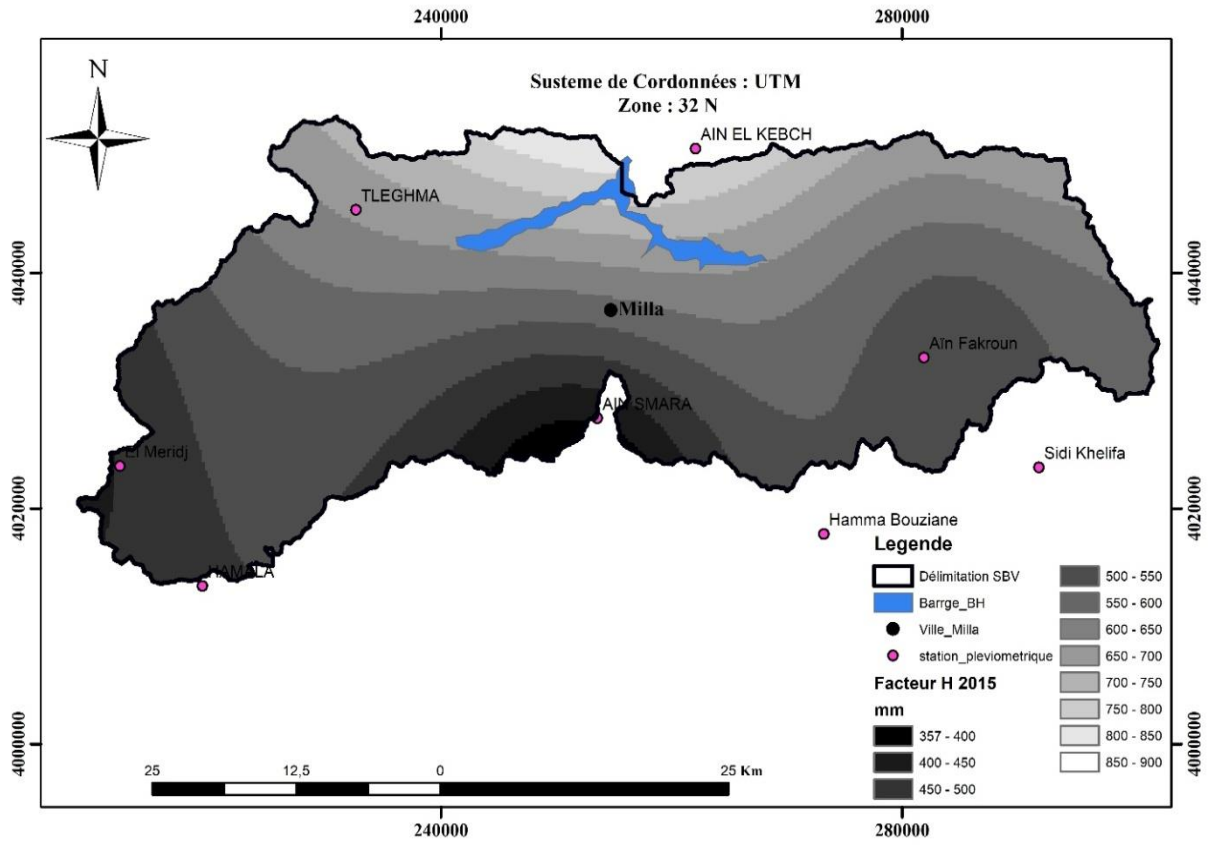


FIGURE III-8 LE FACTEUR H POUR L'ANNEE 2015

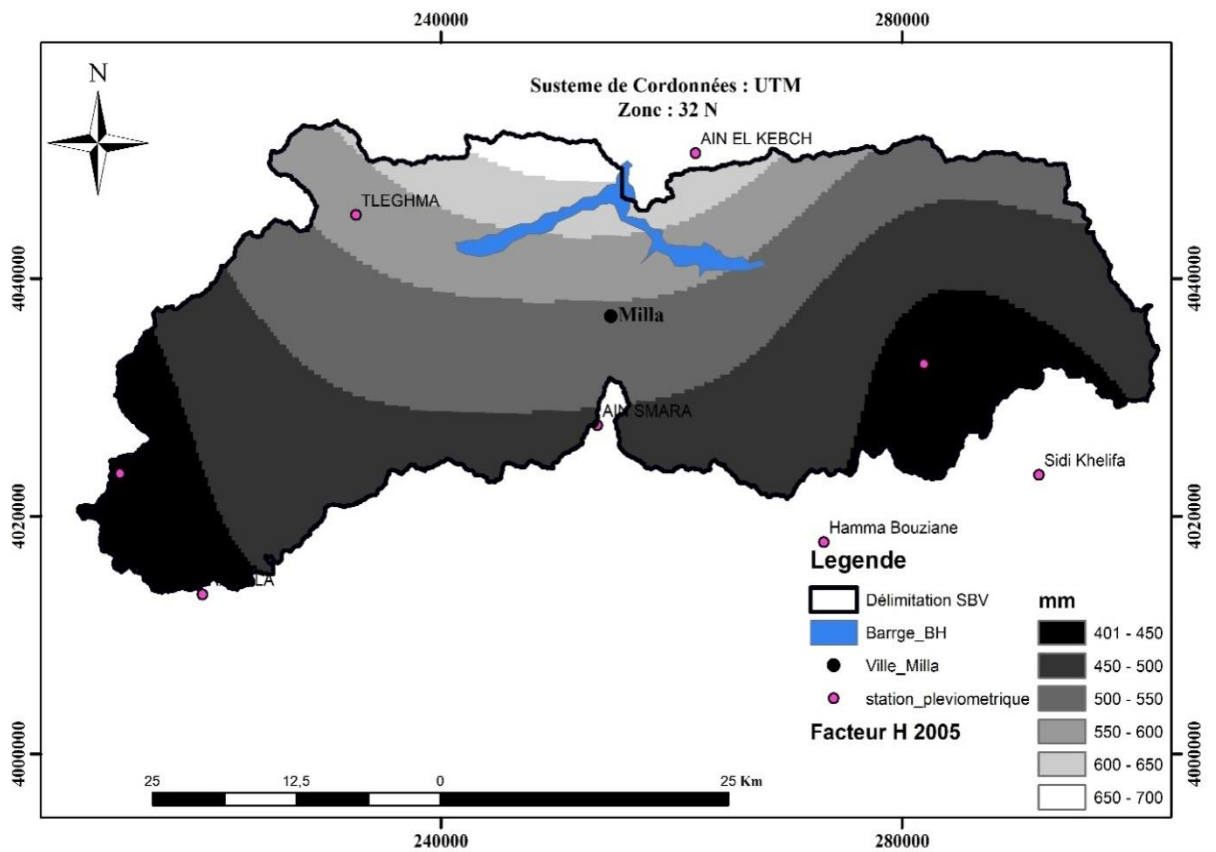


FIGURE III-9 LE FACTEUR H POUR L'ANNEE 2005

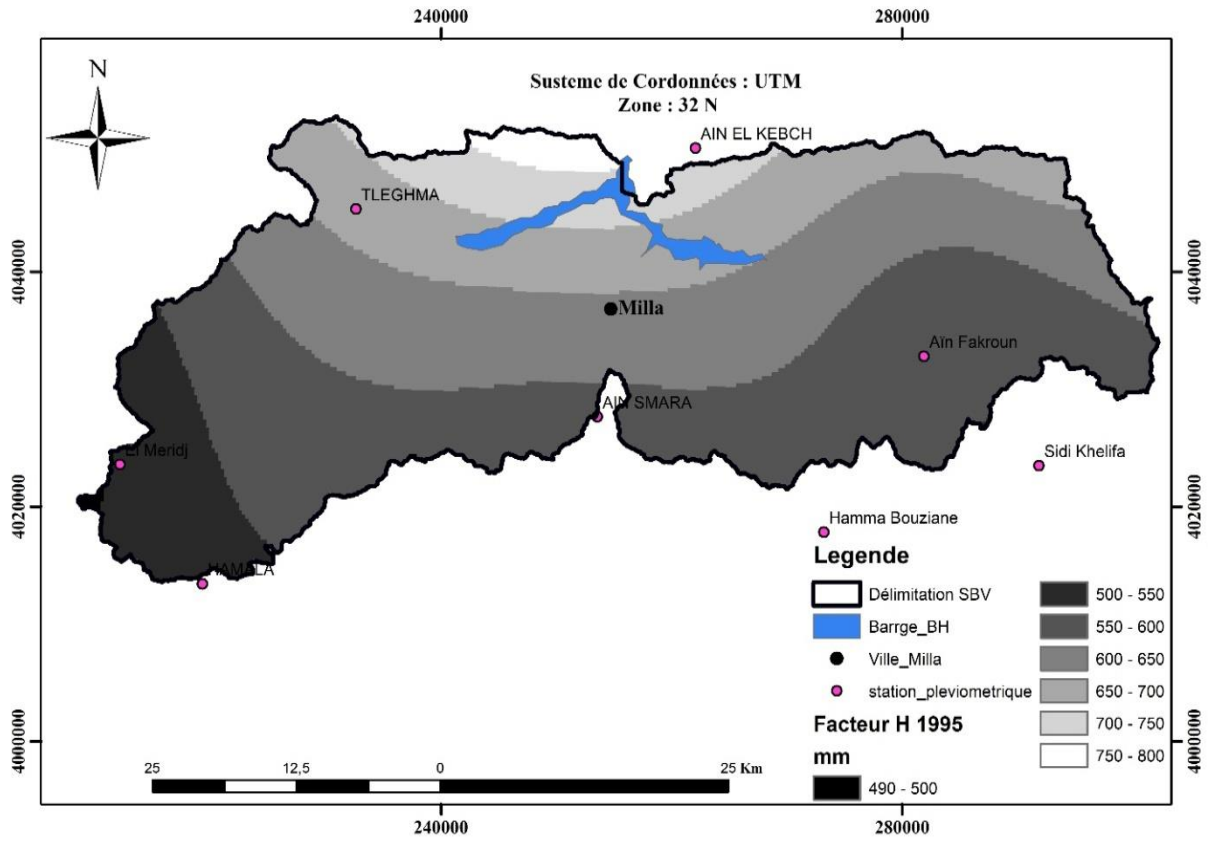


FIGURE III-10 LE FACTEUR H POUR L'ANNEE 1995

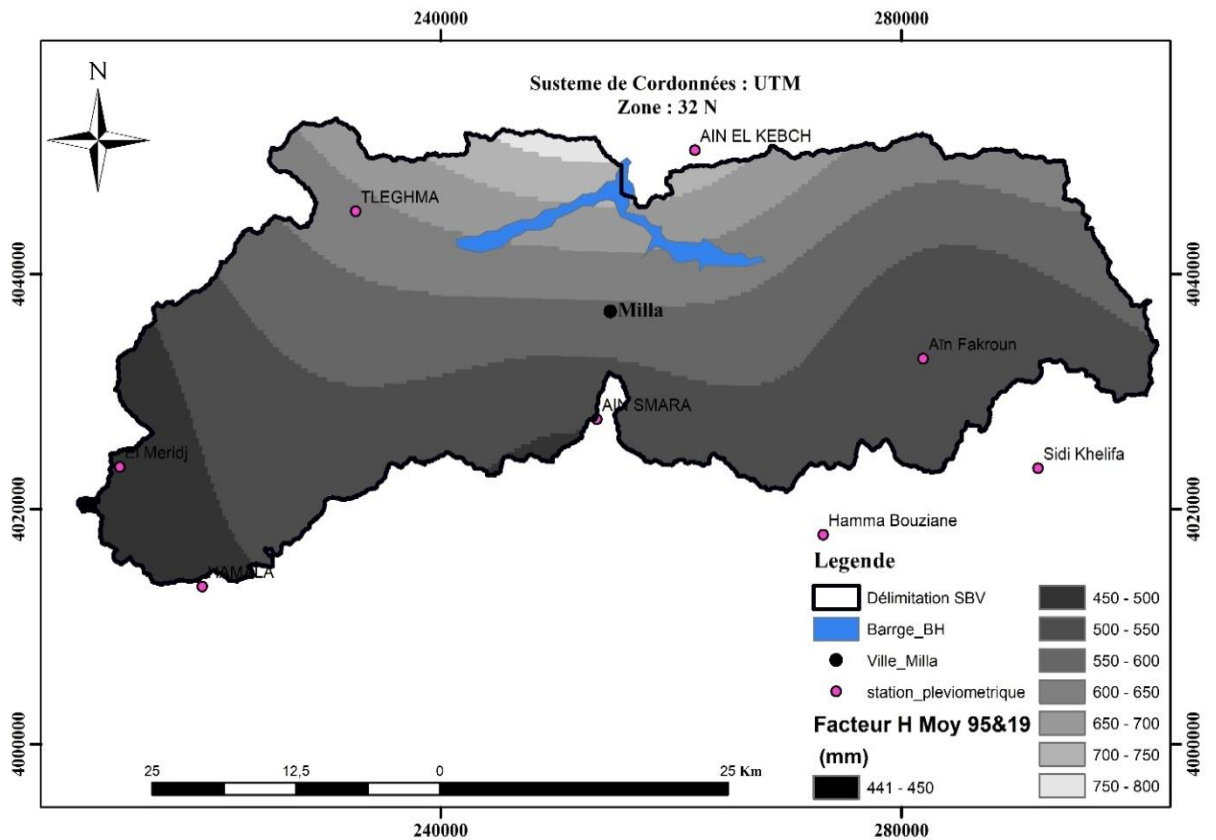


FIGURE III-11 LE FACTEUR H MOYEN POUR LES ANNEES (1995, 2005, 2015, ET 2019)

La mesure de la quantité annuelle totale et la répartition spatiale de pluie érosive aux stations, montre que le bassin versant de Beni Haroun est soumis à une précipitation interannuelle importante. Les valeurs de H subissent un gradient croissant de l'amont du bassin versant vers l'exutoire. Avec une variation entre 450 mm à 800 mm. Ce résultat permet de déduire que le bassin est subit à un pouvoir érosif important.

III.3.3. Coefficient de protection du sol (X_a)

Le coefficient de protection du sol (X_a) liée directement à la couverture végétale qui joue un rôle important dans la réduction de l'érosion en protégeant le sol pendant les pluies et l'augmentation de la perméabilité du sol. L'indice de couverture végétale est lié au type d'arbres, d'arbustes et des herbes ainsi de leur hauteur et à leur densité. Dans les terres cultivées, plantées ou pâturées, la couverture varie selon les variétés cultivées, le cycle agricole, ainsi que la quantité et la qualité des résidus végétaux après la récolte. L'état de surface varie selon les saisons et les travaux agricoles, car il y a des étapes où le sol est plus sensible à l'érosion et d'autres qui sont protégés par un couvert végétal dense.

TABLEAU III-1(XA) EN FONCTION D'OCCUPATION DES SOLS PAR LES VEGETAUX. [12]

Type de sol	Coefficient de protection du sol (X_a)
Les forêts denses, et moyennement denses	0.05 – 0.20
Les forêts de pins et des herbes à côté des cours d'eau	0.20 – 0.40
Pâturages et fermes	0.60 – 0.80
Terrain nue sans couverture	0.80– 1.00

Les valeurs de (X_a) varient en fonction d'occupation des sols par les végétaux. Ce facteur sans dimension est estimé à partir de l'indice de végétation normalisé dérivé (NDVI) déterminé à partir des images satellitaire, l'approche basée sur le (NDVI) a été utilisée pour obtenir des valeurs approximées du facteur (X_a).

Le **NDVI** (en anglais Normalized Difference Vegetation Index) L'indice de végétation par différence normalisé il permet de mesurer l'intensité de vert des forêts d'une zone donnée.

Les images satellitaires sélectionnées dans cette étude sont celle du LANDSAT-8 pour les 12 mois des années (2015 et 2019) et LANDSAT-5 pour les 12 mois des années (1995 et 2005), et en calcule le NDVI pour chaque mois, et par la suite l' NDVI moyen annuel.

Par l'utilisation de la fonction de transformation entre NDVI et X_a , nous avons réalisé les cartes de coefficient de protection du sol (X_a) pour chaque mois et par la suite le coefficient de protection X_a moyen annuel pour les années 1995, 2005, 2015 et 2019.

a-Correction et traitement des images satellitaires

- 1- Télécharger une image Landsat 8 à partir du site **Earth Explorer**.
- 2- Une fois décompressée vous aurez un répertoire contenant une série de fichiers
- 3- Les images dont le nom se termine par B1 à B11 correspondent aux onze bandes du satellite. Elles contiennent des valeurs de radiance. Pour le NDVI on utilise les bandes 4 (rouge) et 5 (proche infrarouge).
- 4- Les données nécessaires aux différentes corrections sont contenues dans le fichier dont le nom se termine par MLT.
- 5- Pour le calcul du NDVI on utilise généralement une correction en TOA (Top-of-Atmosphere) en réflectance.
- 6- Pour convertir les données d'une bande (radiance) en TOA réflectances on utilise la méthode suivante :

$$pA' = Mp * Q_{cal} + Ap$$

Où:

pA' = réflectance TOA, non corrigée de l'angle d'incidence solaire;

Mp = Facteur de redimensionnement multiplicatif spécifique à la bande à partir des métadonnées : REFLECTANCE_MULT_BAND_x, où X est le numéro de bande.

Ap = Facteur de redimensionnement additif spécifique à la bande à partir des métadonnées : REFLECTANCE_ADD_BAND_x, où X est le numéro de bande.

Q_{cal} = valeur fournie dans la bande X du pixel.

Pour avoir une correction de la réflectance en fonction de l'angle d'incidence solaire, on utilise la formule suivante :

$$pA = pA' / \sin(\theta_{se})$$

Où pA est la réflectance TOA corrigée de l'incidence solaire

θ_{se} = angle d'élévation du soleil au centre de l'image, fourni dans les métadonnées : SUN_ELEVATION.

5. Calculer la correction atmosphérique de la Bande rouge (B4), nous aurons besoin des deux valeurs correspondantes à cette bande : REFLECTANCE_MULT_BAND_4 et REFLECTANCE_ADD_BAND_4 et la valeur de SUN_ELEVATION pour la correction finale.

6. Nous chargeons la bande n°4 dans ArcMap

7. On ouvre la calculatrice raster (à partir de la Toolbox **Spatial Analyst Tools ->MapAlgebra -> Raster calculator**)

On rentre la formule de calcul suivante, qui correspond aux formules décrites plus haut avec les valeurs obtenues du fichier de métadonnées :

$((\text{Reflectance_multi_band_PRI} * \text{La_band...PRI.TIF}) + \text{Reflectance_add_band_PRI}) / \text{Sun}(\text{Sun_Elevation})$

$((\text{Reflectance_multi_band_R} * \text{La_band...R.TIF}) + \text{Reflectance_add_band_R}) / \text{Sun}(\text{Sun_Elevation})$
Avec

PIR = band 5 et R = band 4 Landsat 8

PIR = band 4 et R = band 3 Landsat TM 5 et 7

8. Une fois exécutée la commande, nous retrouvons une nouvelle image avec des valeurs de réflectance au lieu de radiances.

9. Nous répétons l'opération pour la bande 5.

10. Une fois les deux bandes corrigées en TOA, on calcule le NDVI avec la calculatrice raster

b-Calcul de l'NDVI

Après la correction nous avons calculé de l'NDVI

Avec

$$\text{NDVI} = (\text{PIR} - \text{R}) / (\text{PIR} + \text{R})$$

Où : PIR : Réflectance dans la bande proche infrarouge.

R : Réflectance dans la bande rouge.

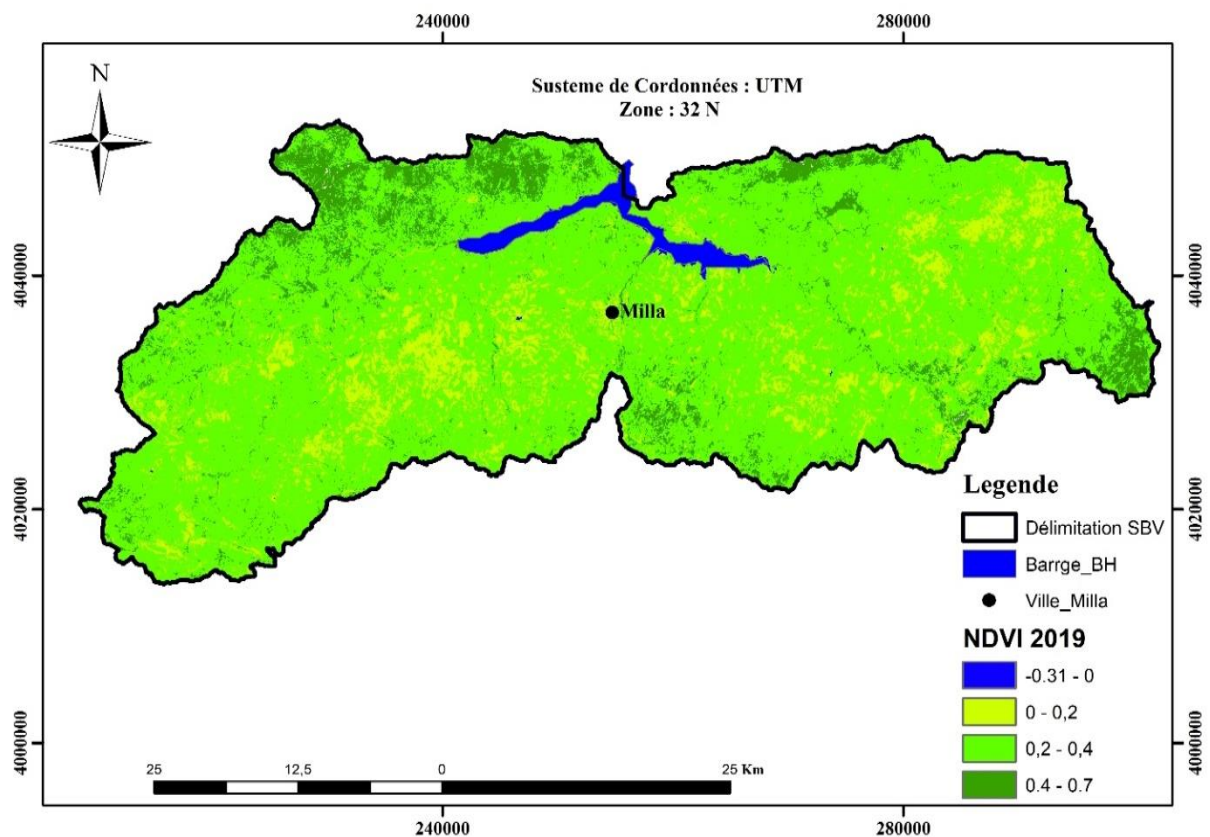


FIGURE III-12 CARTE DES VALEURS ANNUELLE DE L'NDVI GENEREE A PARTIR DE LA TRANSFORMATION DE L'IMAGE SATELLITE LANDSAT-8 DE L'ANNEE 2019

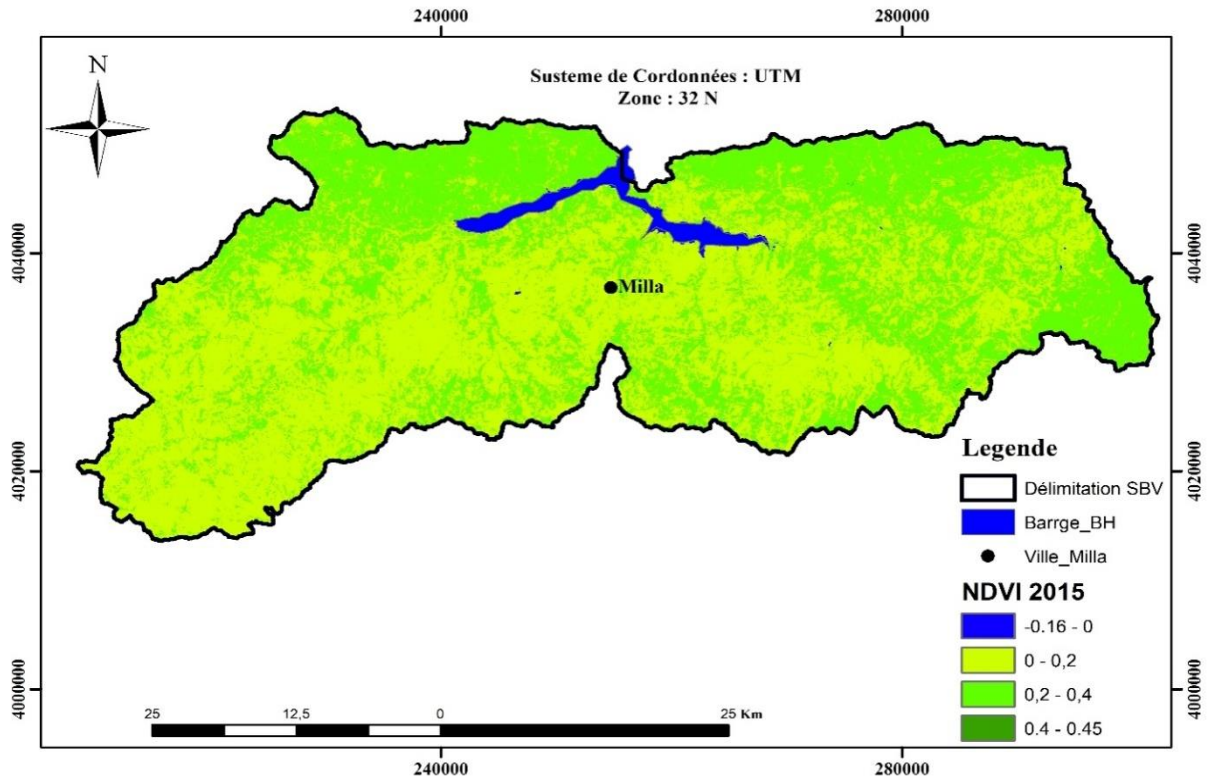


FIGURE III-13 CARTE DES VALEURS ANNUELLES DE L'NDVI GÉNÉRÉE À PARTIR DE LA TRANSFORMATION DE L'IMAGE SATELLITE LANDSAT-8 DE L'ANNÉE 2015

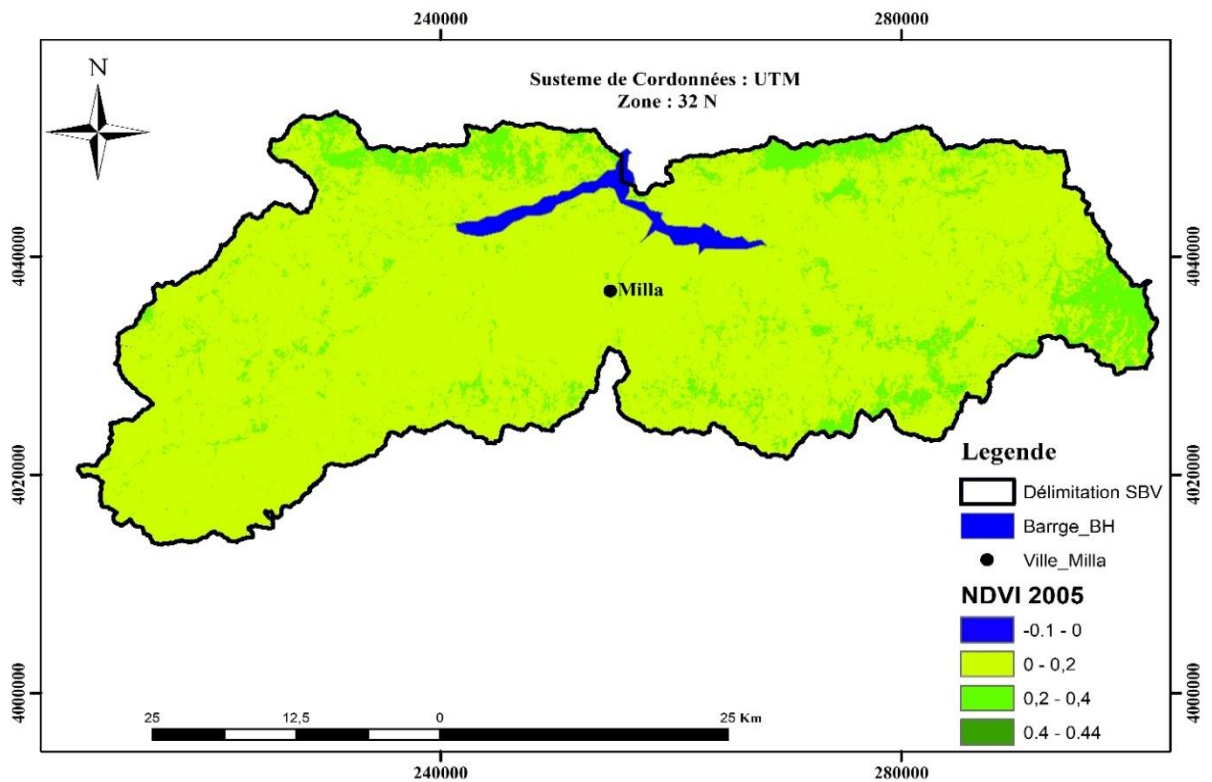


FIGURE III-14 CARTE DES VALEURS ANNUELLES DE L'NDVI GÉNÉRÉE À PARTIR DE LA TRANSFORMATION DE L'IMAGE SATELLITE LANDSAT-5 DE L'ANNÉE 2005

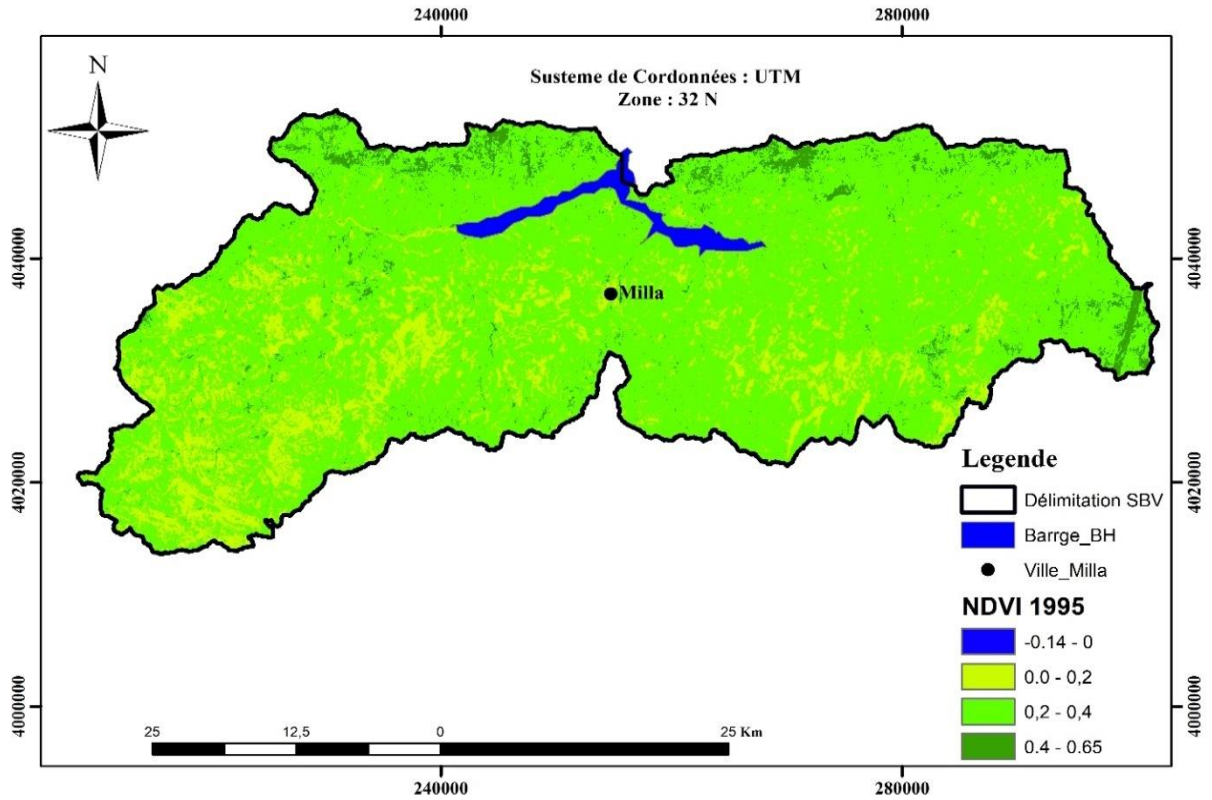


FIGURE III-15 CARTE DES VALEURS ANNUELLE DE L'NDVI GENEREE A PARTIR DE LA TRANSFORMATION DE L'IMAGE SATELLITE LANDSAT-5 DE L'ANNEE 1995

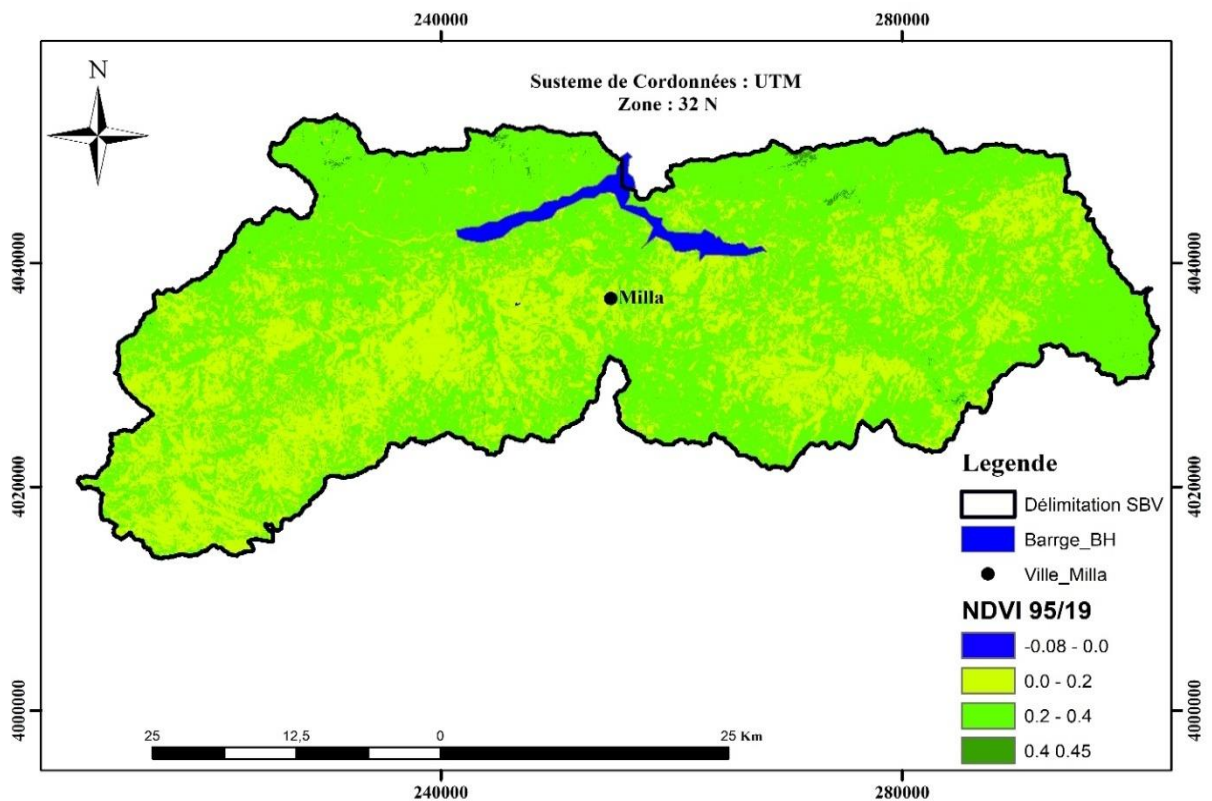


FIGURE III-16 CARTE DES VALEURS DU NDVI MOYENNE GENEREE A PARTIR DE LA TRANSFORMATION DES IMAGES SATELLITES POUR LES ANNEES DE (2019, 2015, 2005 ET 1995)

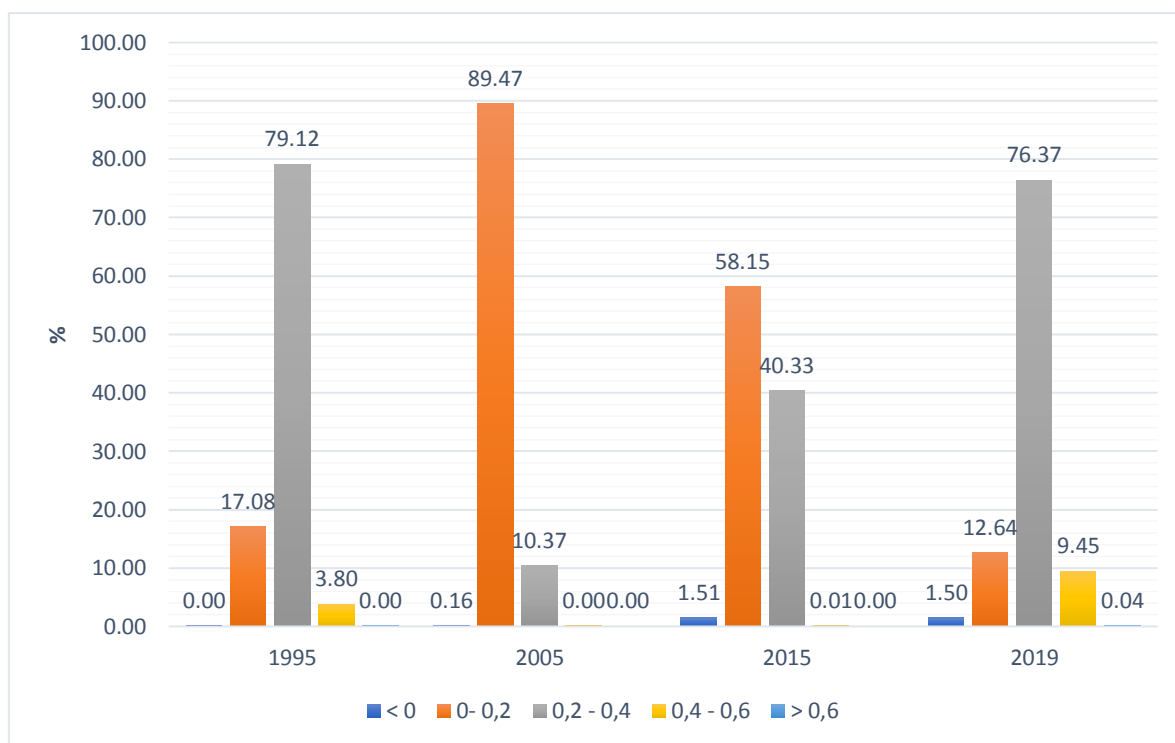


FIGURE III-17 REPARTITION DES CLASSES DE L'NDVI DANS LE BASSIN VERSANT POUR LES ANNEES (2019, 2015, 2005, ET 1995).

TABLEAU III-2 REPARTITION DES CLASSES DE L'NDVI DANS LE BASSIN VERSANT POUR LES ANNEES (2019, 2015, 2005, ET 1995).

Classes NDVI	1995		2005		2015		2019		Moyenne	
	S (km ²)	%	S (Km ²)	%	S (Km ²)	%	S (Km ²)	%	S (Km ²)	%
< 0	0,0	0,0	3,6	0,2	33,1	1,5	32,9	1,5	17,4	0,8
0- 0,2	374,7	17,1	1962,7	89,5	1275,6	58,2	277,2	12,6	972,6	44,3
0,2 - 0,4	1735,7	79,1	227,5	10,4	884,7	40,3	1675,3	76,4	1130,8	51,5
0,4 - 0,6	83,3	3,8	0,0	0,0	0,2	0,0	207,4	9,5	72,7	3,3
>0,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,9	0,0	0,2	0,0

La valeur maximale de l'NDVI reflète le pourcentage le plus élevé de la couverture végétale et représente aussi le bon état de la végétation. Les régions sans végétation (sol nu et plans d'eau) ont une faible valeur du NDVI.

Selon la figure III.17 et le tableau III.2, une variation remarquable de pourcentage de classes NDVI d'une année à l'autre, à titre indicatif pour la classe (0 – 0.2) représente 44.3 % et de la classe (0.2 – 0.4) représente 51.5% du surface du bassin versant pour la moyenne des années (1995, 2005, 2015, 2019) ce qui montre une variation dans le couvert végétal.

c-Calcul du coefficient de protection du sol (X_a) En effet le (X_a) c'est l'inverse de (NDVI).

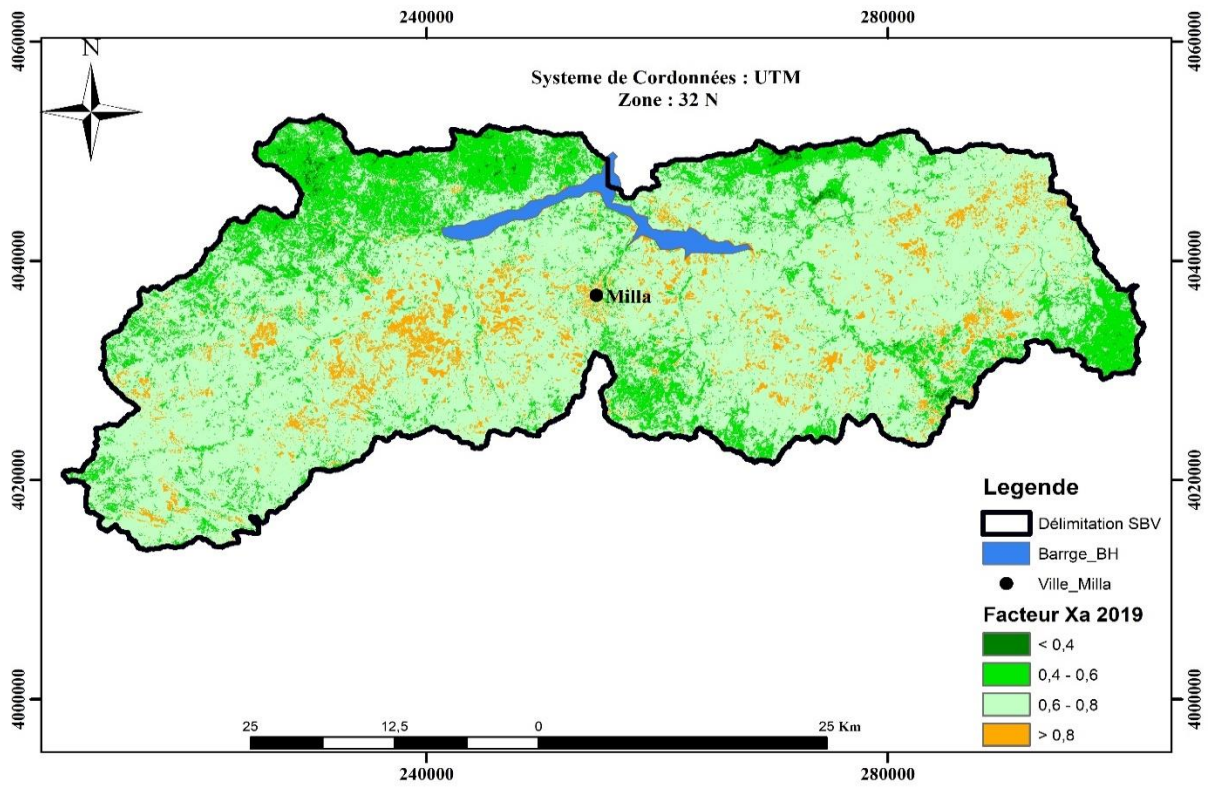


FIGURE III-18 CARTE DES VALEURS ANNUELLE DU (X_a) GENERE A PARTIR DE LA TRANSFORMATION DE NDVI DE L'ANNEE 2019

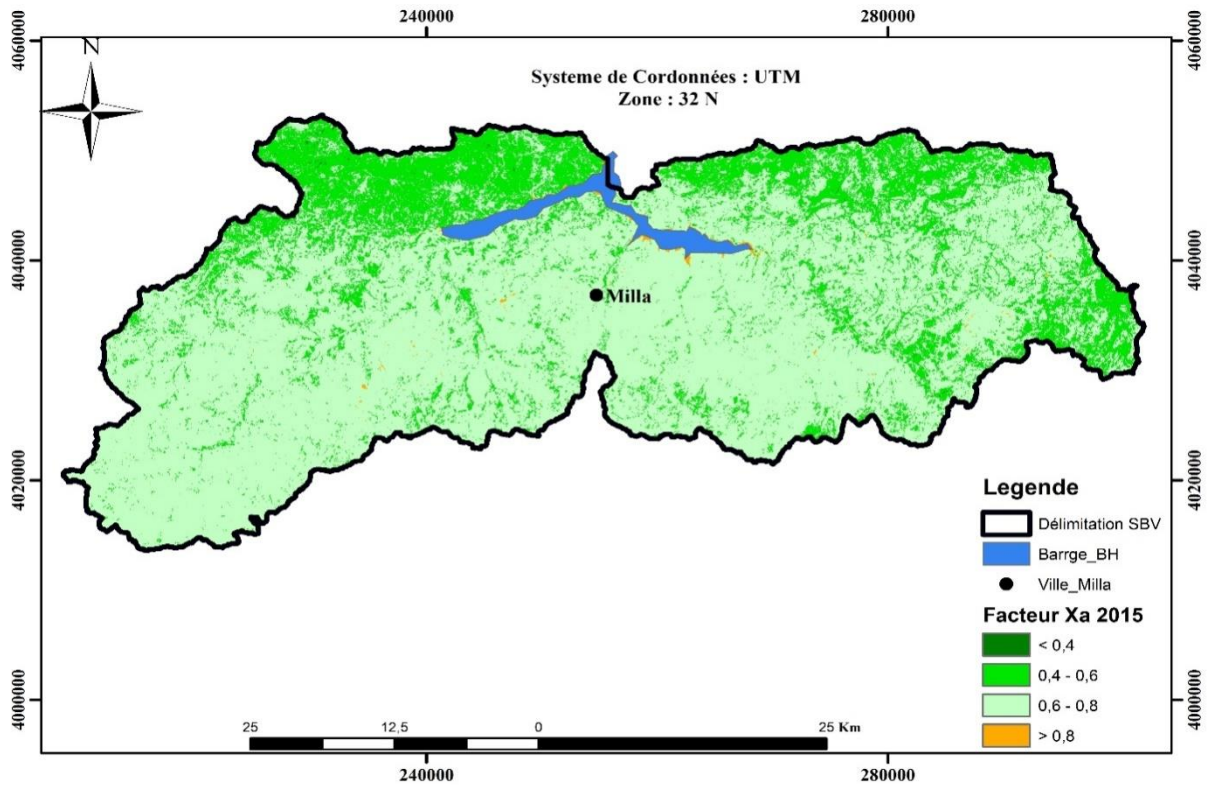


FIGURE III-19 CARTE DES VALEURS ANNUELLE DU (Xa) GENERE A PARTIR DE LA TRANSFORMATION DE NDVI DE L'ANNEE 2015

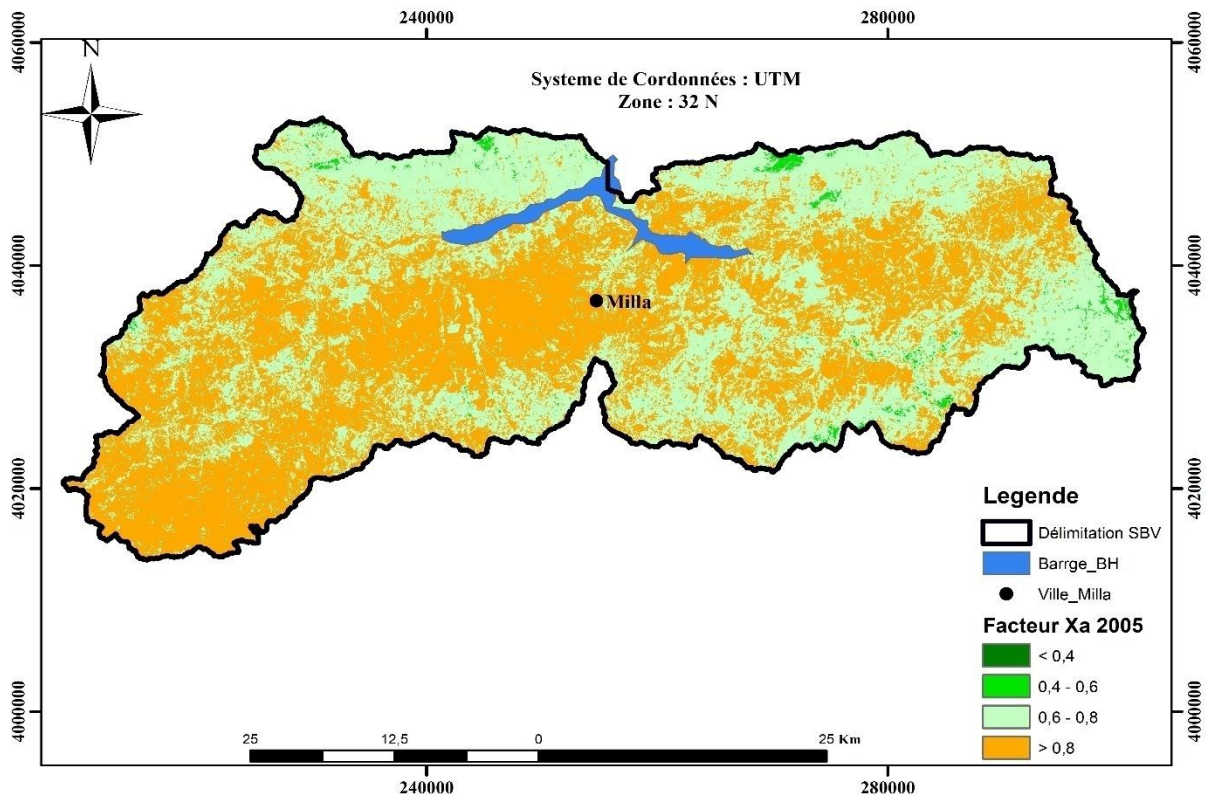


FIGURE III-20 CARTE DES VALEURS ANNUELLES DU (Xa) GENERE A PARTIR DE LA TRANSFORMATION DE NDVI DE L'ANNEE 2005

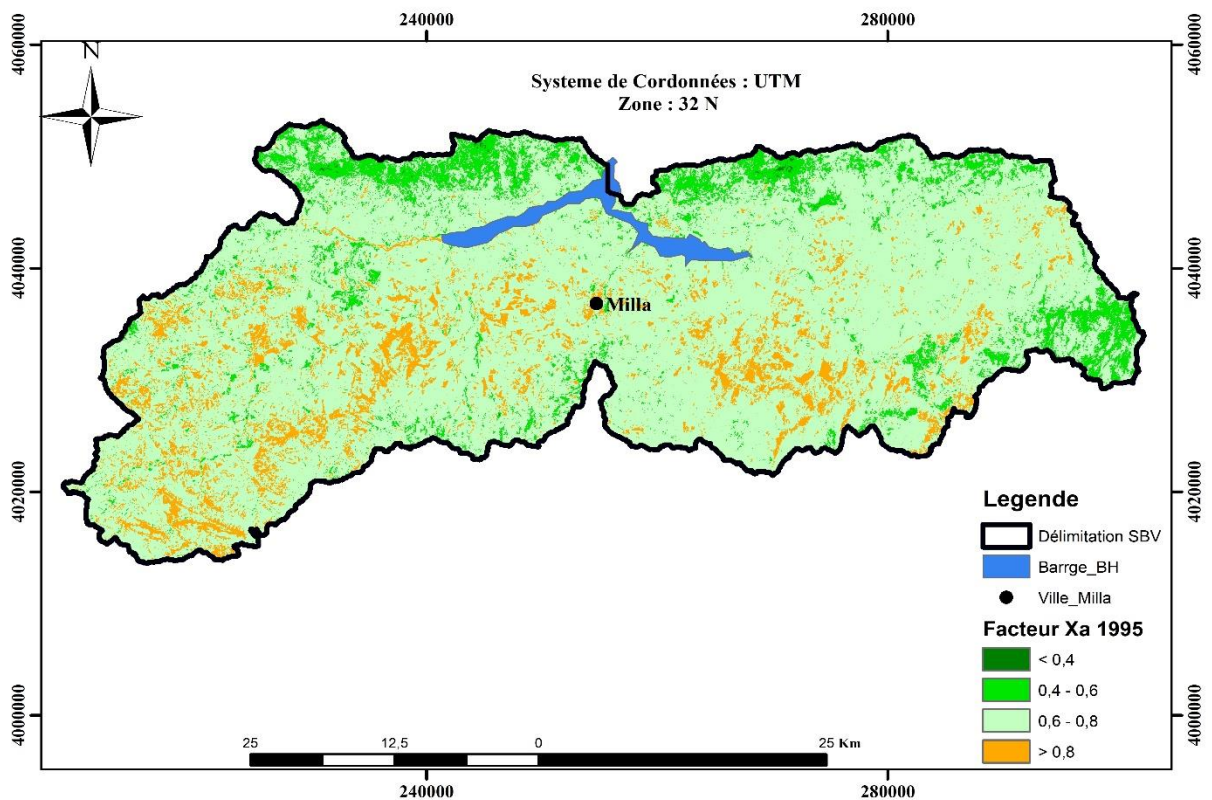


FIGURE III-21 CARTE DES VALEURS ANNUELLE DU (Xa) GENERE E A PARTIR DE LA TRANSFORMATION DE NDVI DE L'ANNEE 1995

FIGURE III-22 CARTE DES VALEURS DU (Xa) MOYENNE GENERE E A PARTIR DE LA TRANSFORMATION DE NDVI POUR LES ANNEES DE (2019, 2015, 2005 ET 1995).

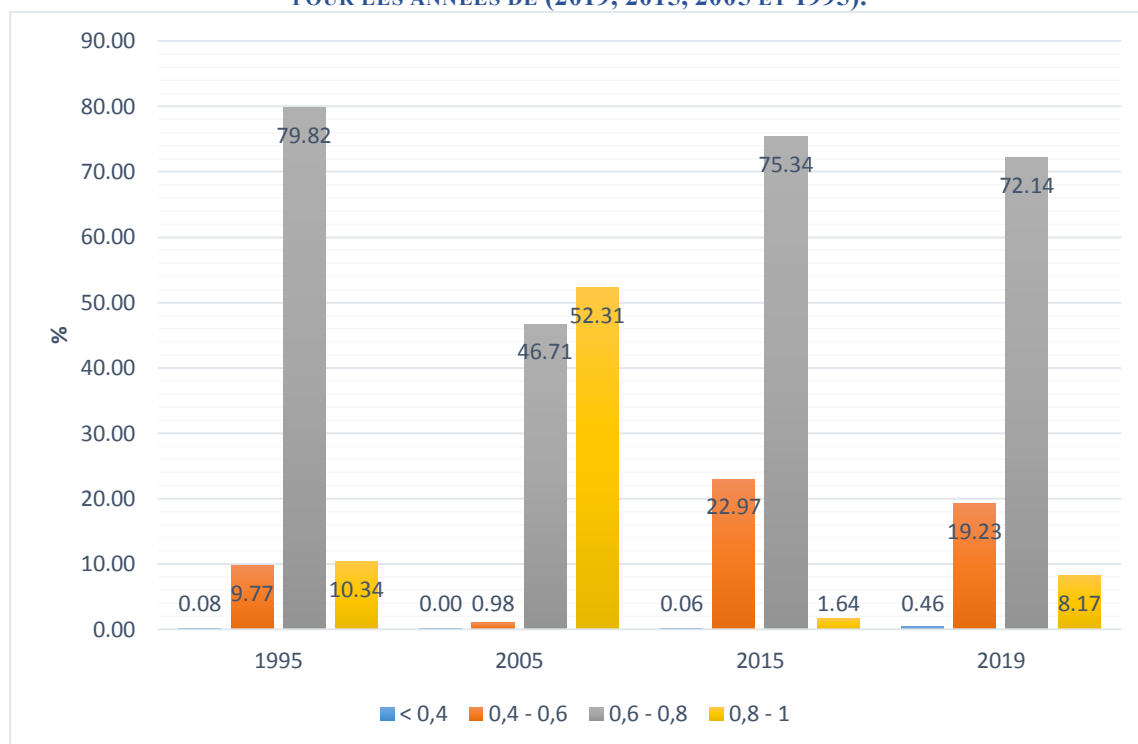


FIGURE III-23 REPARTITION DES CLASSES DU FACTEUR (Xa) DANS LE BASSIN VERSANT POUR LES ANNEES (2019, 2015, 2005, ET 1995).

TABEAU III-3 REPARTITION DES CLASSES DU FACTEUR (Xa) DANS LE BASSIN VERSANT POUR LES ANNEES (2019, 2015, 2005, ET 1995).

Classes Xa	1995		2005		2015		2019		Moyenne	
	S (km ²)	%	S (Km ²)	%	S (Km ²)	%	S (Km ²)	%	S (Km ²)	%
< 0,4	1,7	0,1	0,0	0,0	1,2	0,1	10,1	0,5	3,3	0,2
0,4 - 0,6	214,3	9,8	21,4	1,0	503,8	23,0	421,9	19,2	290,4	13,2
0,6 - 0,8	1751,0	79,8	1024,7	46,7	1652,8	75,3	1582,5	72,1	1502,8	68,5
0,8 - 1	226,7	10,3	1147,6	52,3	35,9	1,6	179,2	8,2	397,4	18,1

D'après la figure et le tableau de la répartition des classes du facteur (Xa), nous constatons que la classe Pâturages et fermes (0.6 – 0.8) occupe la majorité de la surface totale du bassin versant pour tous les années avec (79.8% de la surface en 1995, 46.7% de la surface en 2005, 75.3% de la surface en 2015 et 72.1% en 2019).

III.3.4. Coefficient d'érosion du sol (Y)

Le facteur d'érosion (Y) d'un sol exprime sa sensibilité à l'érosion hydrique et dépend de ses propriétés intrinsèques à savoir sa texture, sa structure et sa perméabilité. Il se détermine pour un sol donné par la relation de (*WISHMEIER W.H. et SMITH D.D. 1978*) :

$$Y = \frac{2.1 * M^{1.14} * 10^{-4} * (12 - a) + 3.25 * (b - 2) + 2.5 * (c - 3)}{100} \dots\dots\dots(III-5)$$

Avec

M = Est le produit des fractions de particules primaires (% sable fin + % limon) x (100 – % argile).

a : Est le pourcentage de matière organique. Le taux de matière organique dans le sol.

b : Est le code de la perméabilité.

c : Est le code de la structure.

Télécharger les paramètres de facteur Y à partir de site suivant :

https://soilgrids.org/#/!/?layer=ORCDRC_M_sl2_250m&vector=1

TABLEAU III-4 CODIFICATION DE LA STRUCTURE DES SOLS (Cs) (WISCHMEIER ET SMITH, 1978)

Nature de la structure	Code de la structure Cs
Très structuré ou particulière	1
Assez structuré	2
Peu structuré	3
Non structuré	4

TABLEAU III-5 CODIFICATION DE LA PERMEABILITE DU SOL (BP) (WISCHMEIER ET SMITH, 1978)

Degré de perméabilité	Code de perméabilité bp
Rapide	1
Modérée à rapide	2
Modérée	3
Modérée à lente	4
Lente	5
Très lente	6

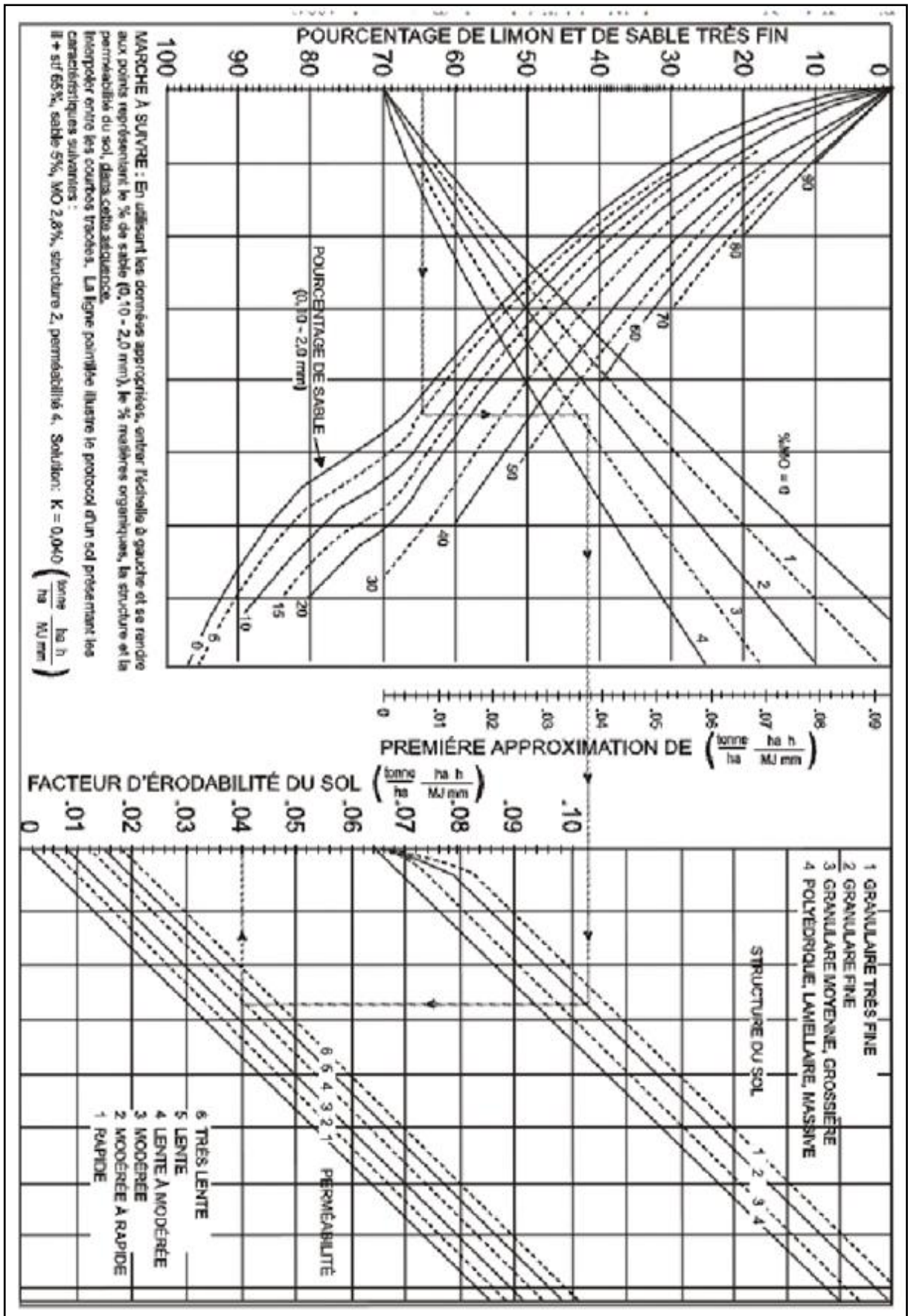


FIGURE III-24 NOMOGRAMME DE L'ÉRODIBILITÉ DES SOLS (FOSTER., 1981, FOSTER, 1982).

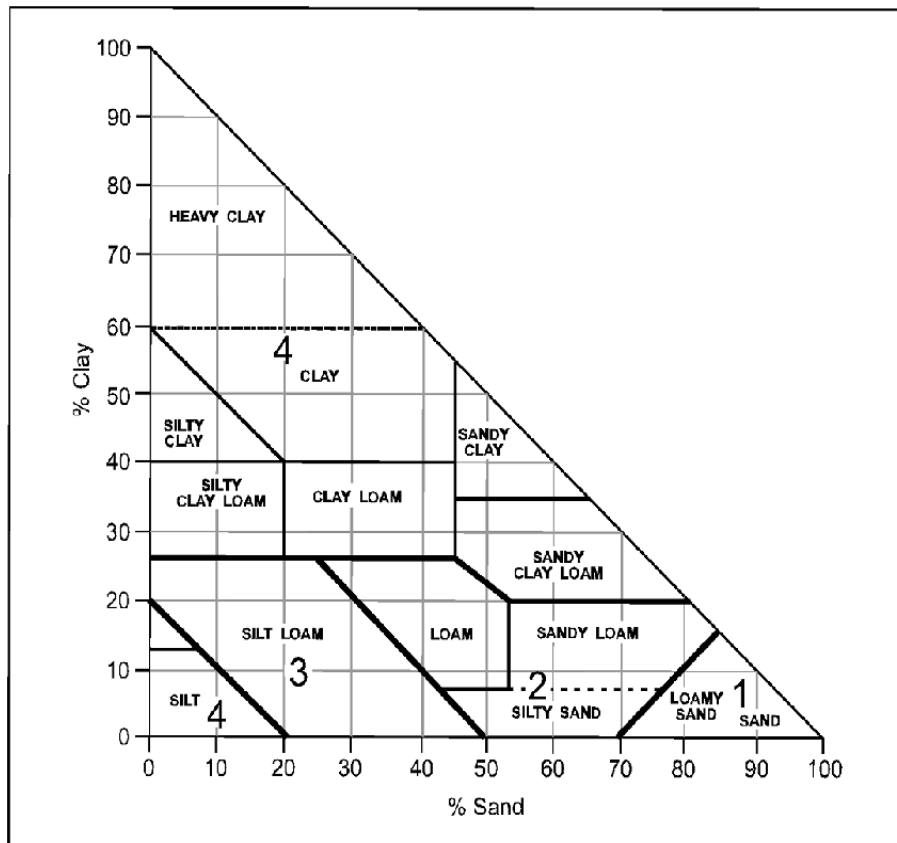


FIGURE III-25 CODE STRUCTURE BASEE SUR LA TEXTURE (ONTARIO CENTRE FOR SOIL RESOURCE EVALUATION, 1993)

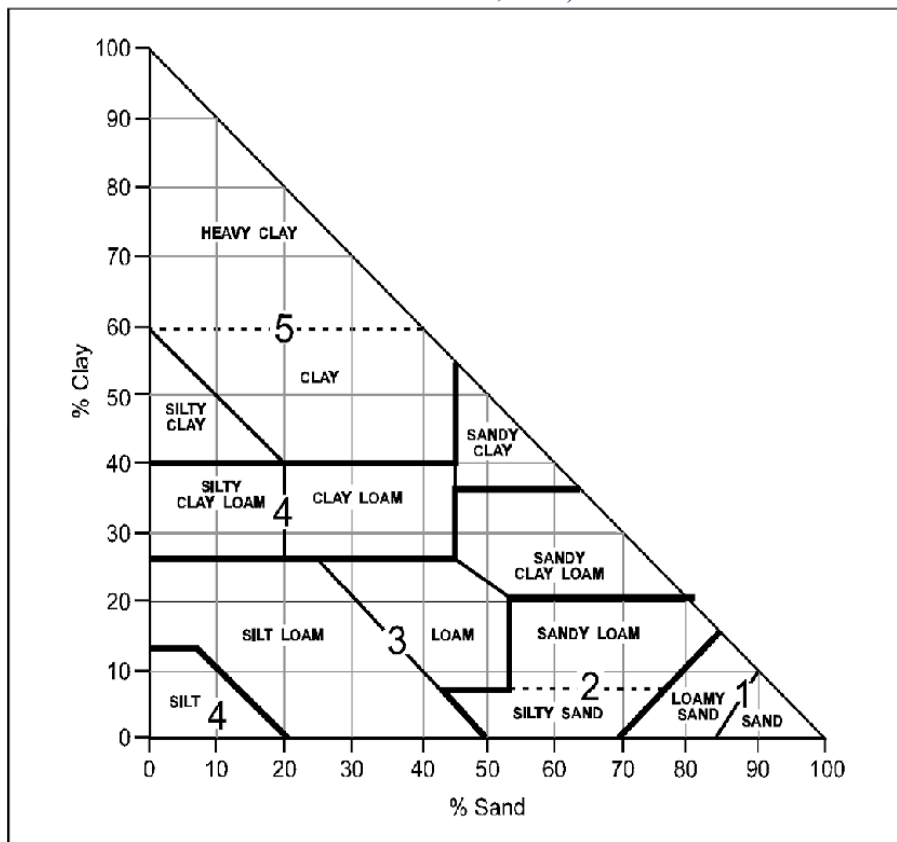


FIGURE III-26 CODES DE PERMEABILITE BASES SUR LA CLASSIFICATION DES TEXTURES (ONTARIO CENTRE FOR SOIL RESOURCE EVALUATION, 1993)

D'après Gavrilovic le sol est classé selon le facteur Y comme le tableau suivant :

TABLEAU III-6TYPE DE SOL EN FONCTION DE Y (GAVRILOVIC S., 1962 ; 1970)

Type de sol	Le facteur Y
Très bon résistance et cohésion	0.1 – 0.3
Moyen résistance et cohésion	0.3 – 0.5
Faible résistance	0.5 – 0.6
Débris d'agrégats et dépôts des sédiments grossiers	0.6 – 0.8
Sable fin, sol très faible résistance	> 0.9

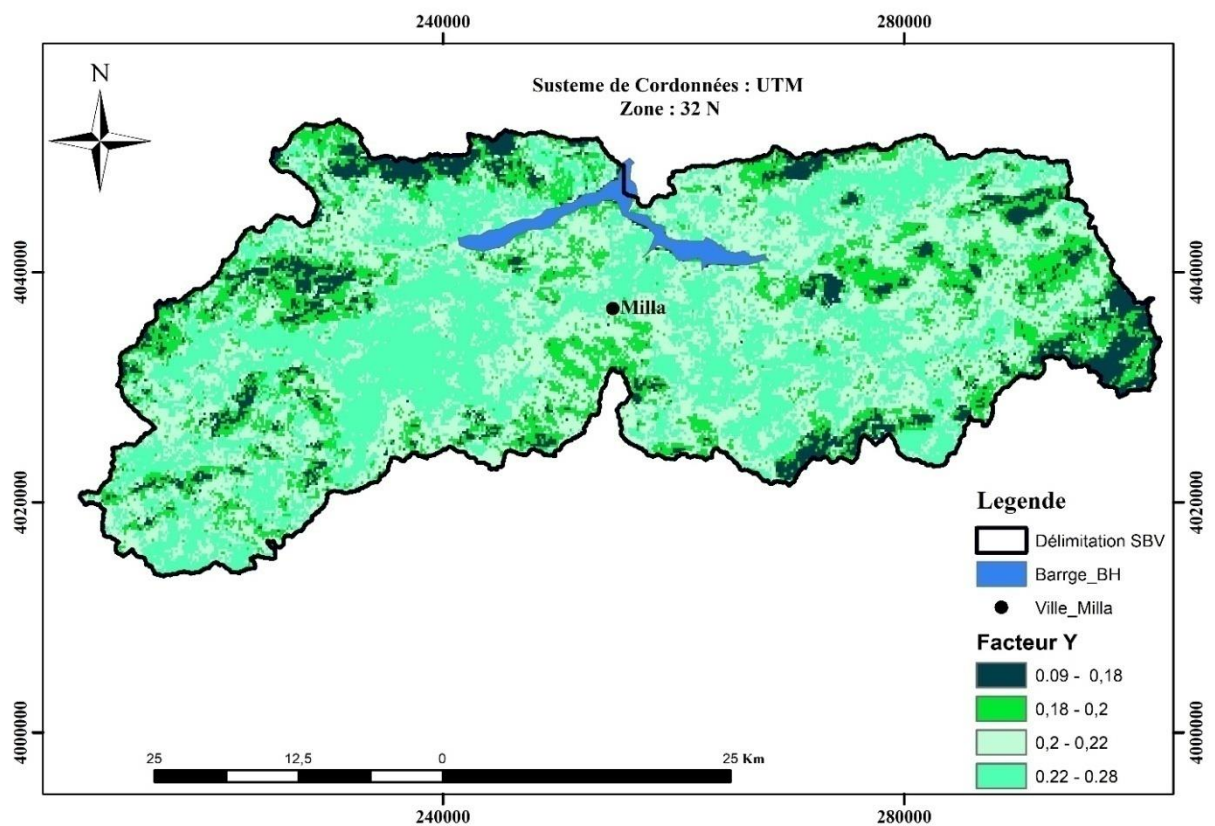


FIGURE III-27CARTE DU FACTEUR Y A PARTIR DE LA RELATION DE (WISHMEIER W.H. ET SMITH D.D. 1978)

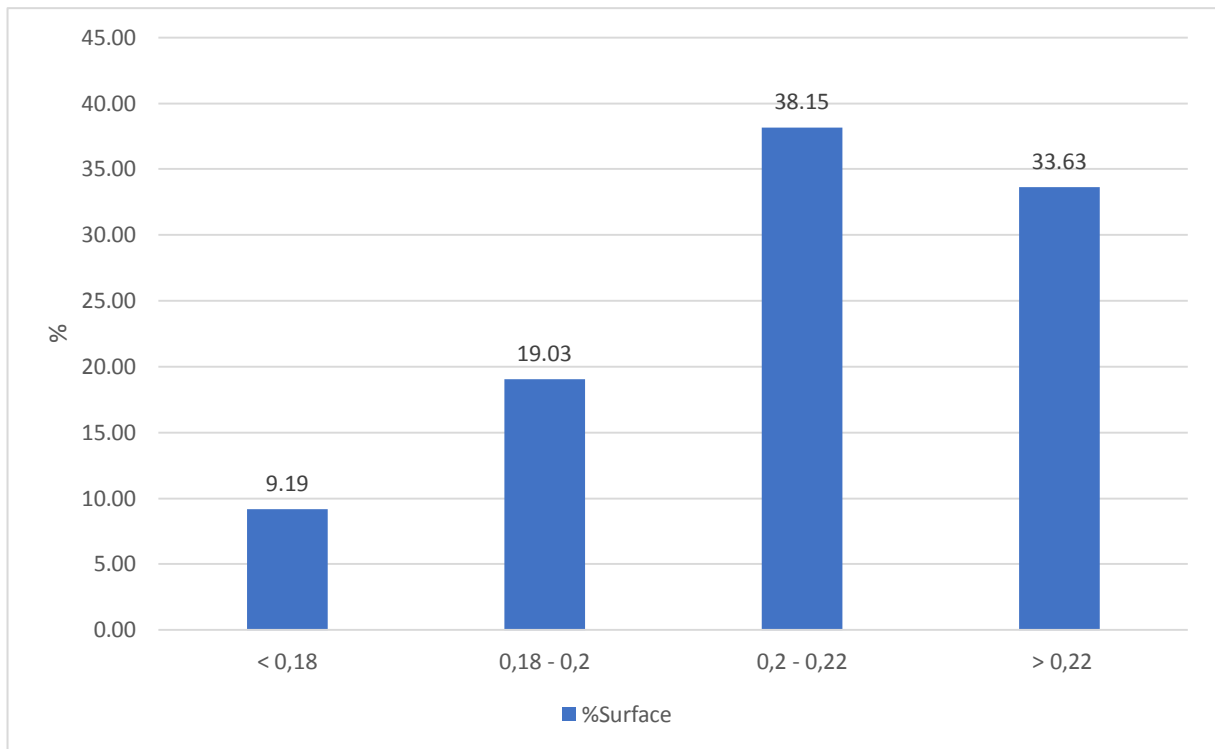


FIGURE III-28 REPARTITION EN CLASSES DU FACTEUR Y PAR RAPPORT LE PERCENTAGE DE LA SURFACE.

D'après la figure III.28, nous constatons que la classe de la Répartition du facteur Y (>0.2) occupe la majorité de la surface totale du bassin versant (71,78 % de la surface).

III.3.5. Coefficient de type et étendue de l'érosion (φ)

Les valeurs du coefficient de type de l'érosion φ et leur développement varient en fonction de la taille des bassins hydrographiques.

Ce facteur précise et identifie les zones touchées par l'érosion dans le bassin versant, (les cours d'eau, les rivières, les ravins, les dépôts alluviaux ou tout le bassin versant). Cela nécessite un certain nombre de visites du bassin versant.

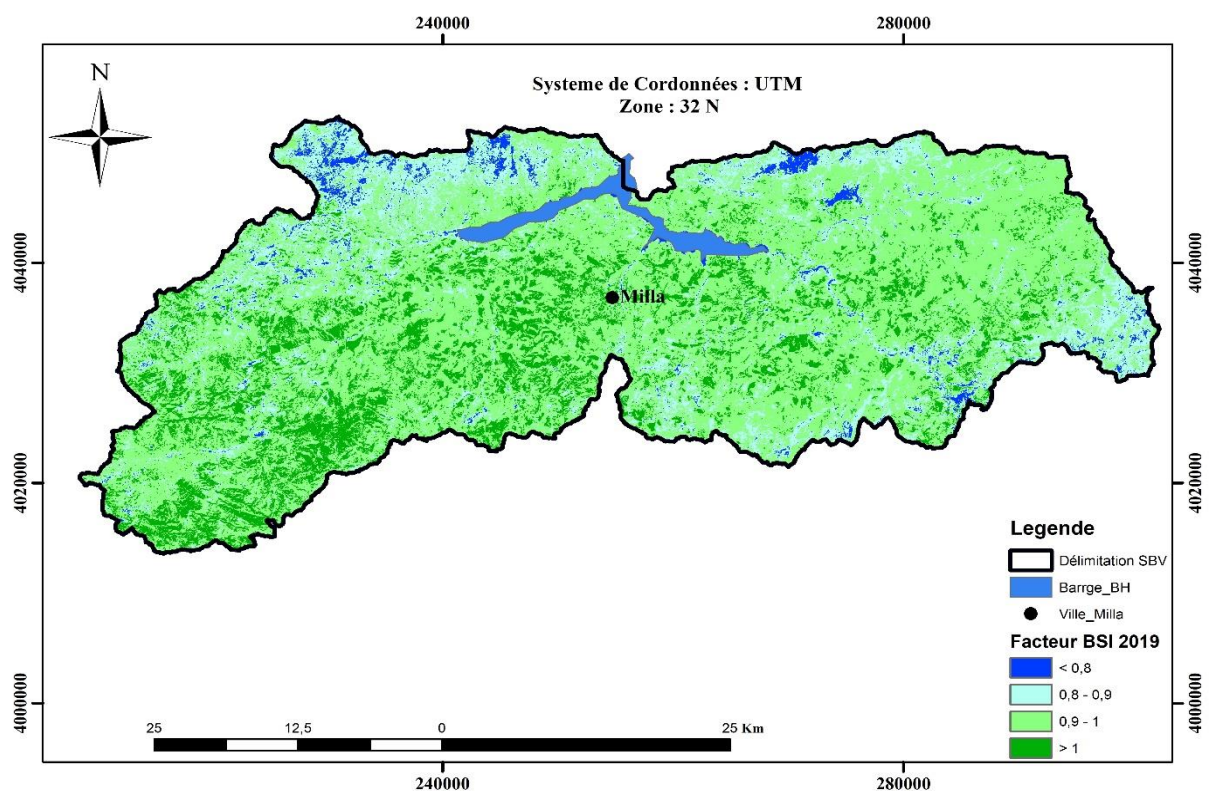
Ces valeurs sont venues du travail de terrain par des observations sur le développement de l'érosion dans le bassin ainsi que des images satellitaires à haute résolution (1 m en moyenne).

En l'absence de ce genre d'images on a adopté l'équation donnée par (MILEVSKI, I 2008) pour calculer ce facteur à partir des images satellitaires Land sat-8 et Land sat-5. Dont chaque image satellitaire a des bandes et un fichier « MTL » qui donne des informations sur l'image pour la correction, et après la correction de ces images on calcule le coefficient de type de l'érosion φ à partir de l'équation suivante :

$$\varphi = \frac{(B6+B4)-(B5+B2)}{(B6+B4)+(B5+B2)} + 1 \dots\dots\dots(III-6)$$

TABLEAU III-7 TYPE D'ÉROSION DU SOL EN FONCTION DE (Φ) (GAVRILOVIC S., 1962 ; 1970)

Coefficient de type et étendue de l'érosion	Le facteur (Φ)
Peu d'érosion dans le bassin versant	0.1-0.2
Érosion dans les cours d'eau entre 20-50% du bassin versant	0.3-0.5
Erosion dans les rivières, les ravins et les dépôts alluviaux	0.6-0.7
50-80% du bassin concerné par l'érosion de surface et les glissements de terrain	0.8-0.9
Bassin versant entier concerné par l'érosion	1.0

FIGURE III-29 CARTE DU FACTEUR (Φ) GÉNÉRÉE À PARTIR DE LA MOYENNE DES MOIS DES IMAGES SATELLITAIRES LANDSAT-8 DE L'ANNÉE 2019.

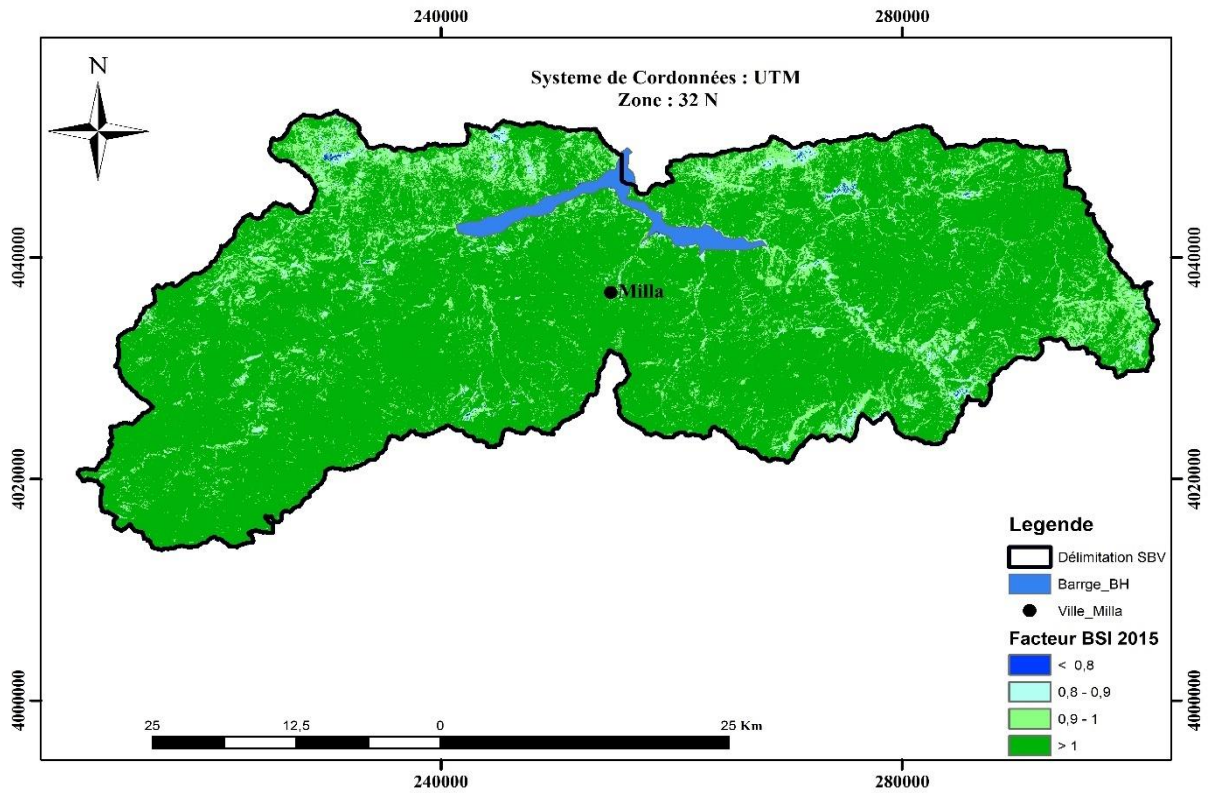


FIGURE III-30 CARTE DU FACTEUR (Φ) GÉNÉRÉE À PARTIR DE LA MOYENNE DES MOIS DE LES IMAGES SATELLITAIRE LANDSAT-8 DE L'ANNÉE 2015.

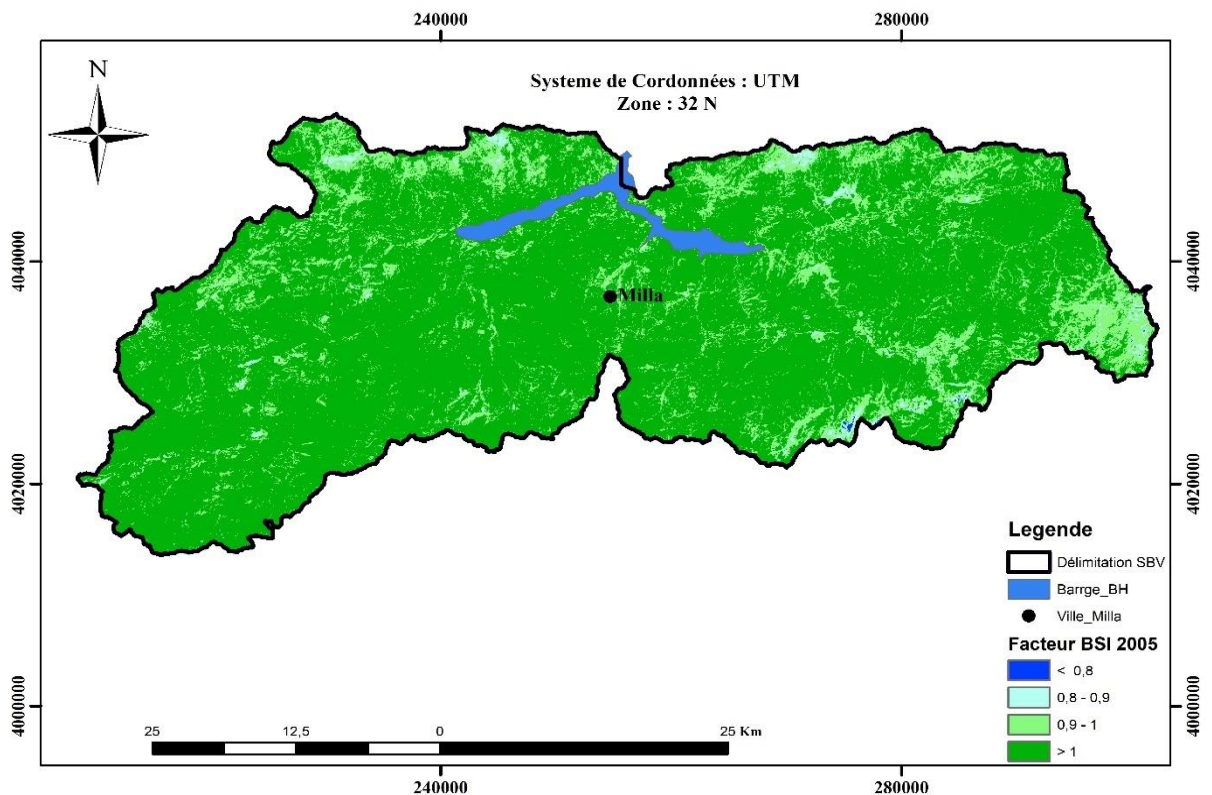


FIGURE III-31 CARTE DU FACTEUR (Φ) GÉNÉRÉE À PARTIR DE LA MOYENNE DES MOIS DE LES IMAGES SATELLITAIRE LANDSAT-8 DE L'ANNÉE 2005.

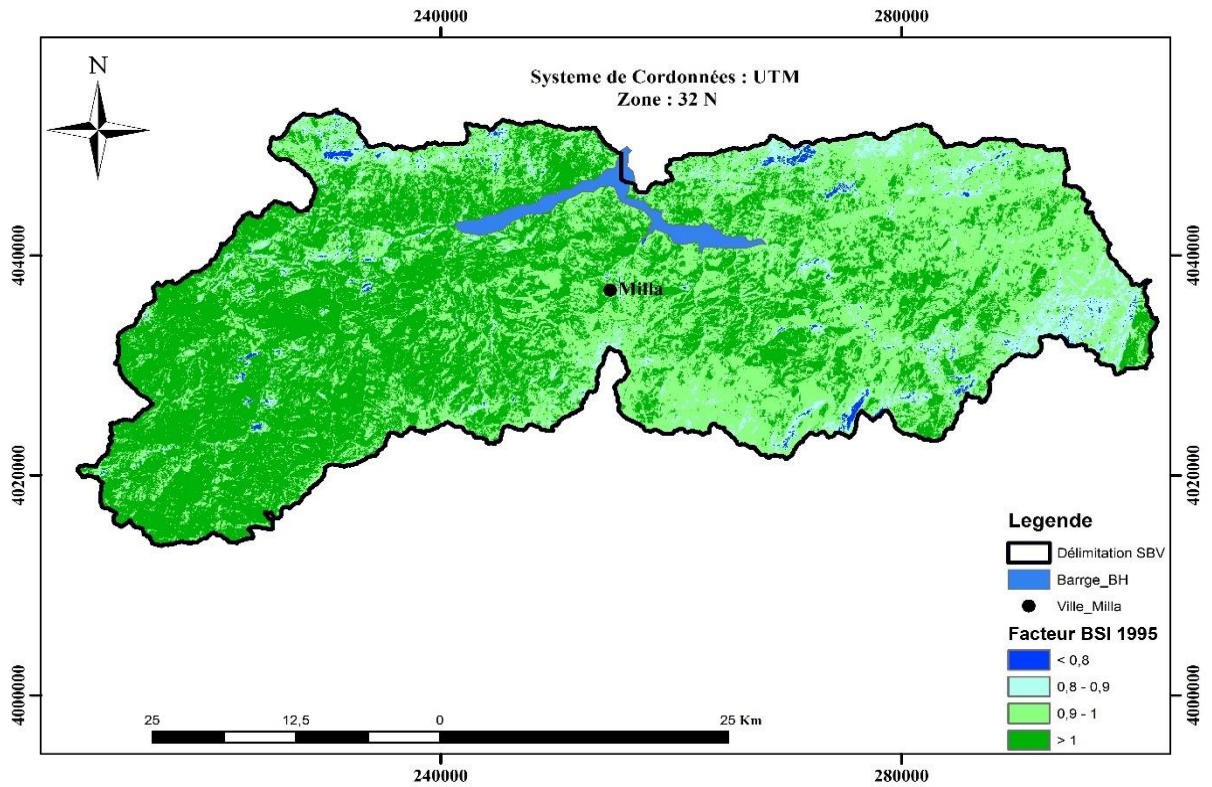


FIGURE III-32 CARTE DU FACTEUR (Φ) GÉNÉRÉE À PARTIR DE LA MOYENNE DES MOIS DE LES IMAGES SATELLITAIRE LANDSAT-8 DE L'ANNÉE 1995.

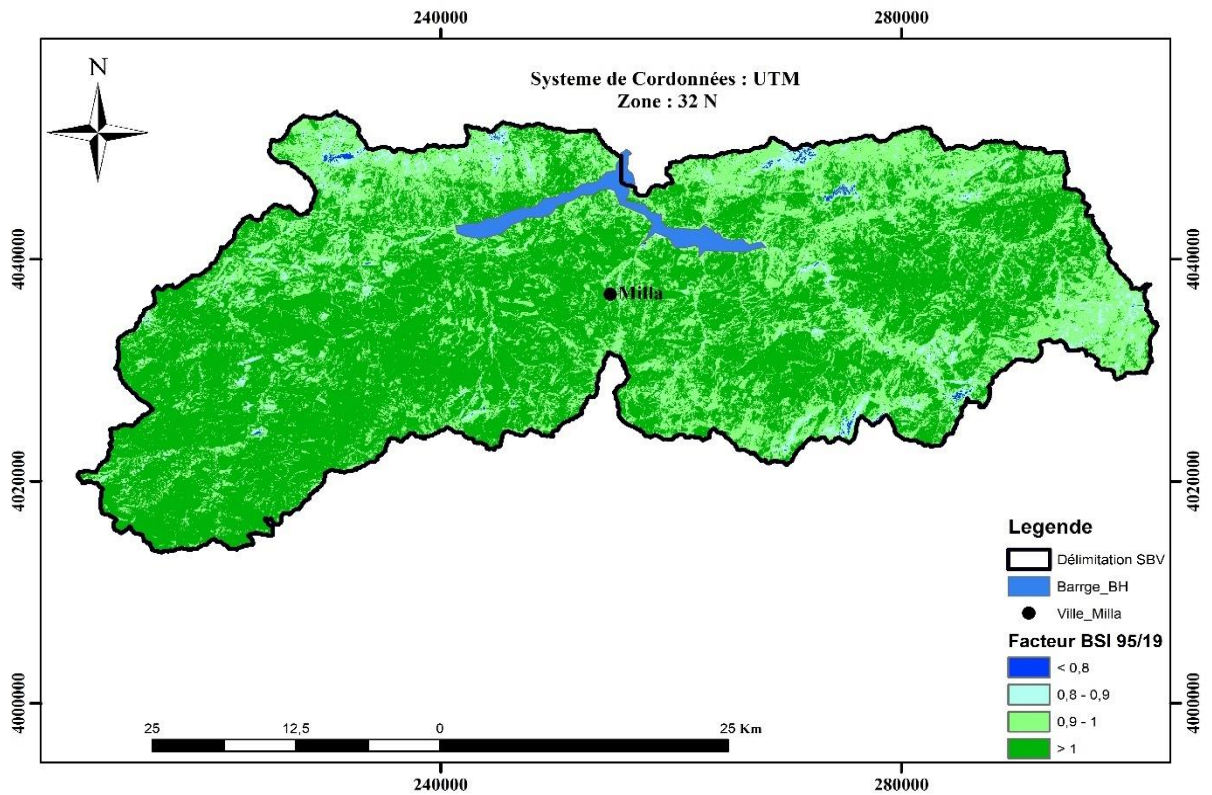


FIGURE III-33 CARTE DU FACTEUR (Φ) GÉNÉRÉE À PARTIR DE LES IMAGES SATELLITAIRE LANDSAT-8 ET 5 DE LA MOYENNE POUR LES ANNEES (2019, 2015, 2005, ET 1995).

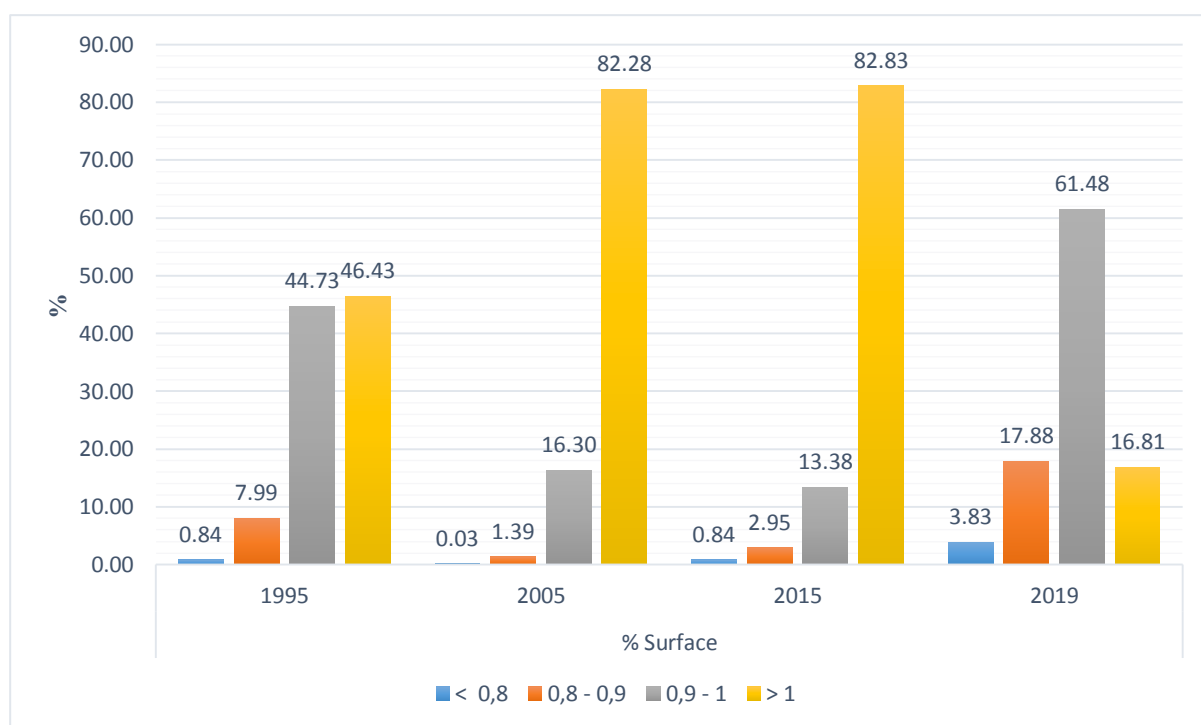


FIGURE III-34 REPARTITION DES CLASSES DU FACTEUR (Φ) DANS LE BASSIN VERSANT POUR LES ANNEES (2019, 2015, 2005, ET 1995).

TABLEAU III-8 REPARTITION DES CLASSES DU FACTEUR (Φ) DANS LE BASSIN VERSANT POUR LES ANNEES (2019, 2015, 2005, ET 1995).

Classes Bsi	1995		2005		2015		2019		Moyenne	
	S (km ²)	%	S (Km ²)	%	S (Km ²)	%	S (Km ²)	%	S (Km ²)	%
< 0,6	0,01	0,00	0,73	0,03	0,00	0,00	0,01	0,00	0,19	0,01
0,6 - 0,8	18,52	0,84	30,40	1,39	18,47	0,84	83,98	3,83	37,84	1,73
0,8 - 0,9	175,20	7,99	357,55	16,30	64,63	2,95	392,27	17,88	247,42	11,28
0,9 - 1	981,35	44,73	1805,05	82,28	293,56	13,38	1348,81	61,48	1107,19	50,47
1 - 1,3	1018,65	46,43	0,00	0,00	1817,07	82,83	368,66	16,81	801,09	36,52

D'après la figure III.34 et le tableau III.8 de la répartition des classes du facteur (φ), nous observons une variation spatiotemporelle du facteur (φ) dans le bassin versant pour les années (2019, 2015, 2005, et 1995). La classe (0.9- 1) occupe la majorité de la surface totale du bassin versant, de 44.73% en 1995, 16.30 en 2005, 13.38% en 2015 et 61.48% en 2019, ce qui montre que 50.47% pour la totalité de la surface du bassin concerné par l'érosion de surface et les glissements de terrain.

III.3.6. Les pentes de la zone d'étude en J_a (%)

Les pentes constituent un paramètre très important dans le modèle EPM. L'augmentation de la vitesse d'écoulement sous l'effet des pentes provoque fortement l'érosion.

Les pentes sont calculées à partir du fichier MNT

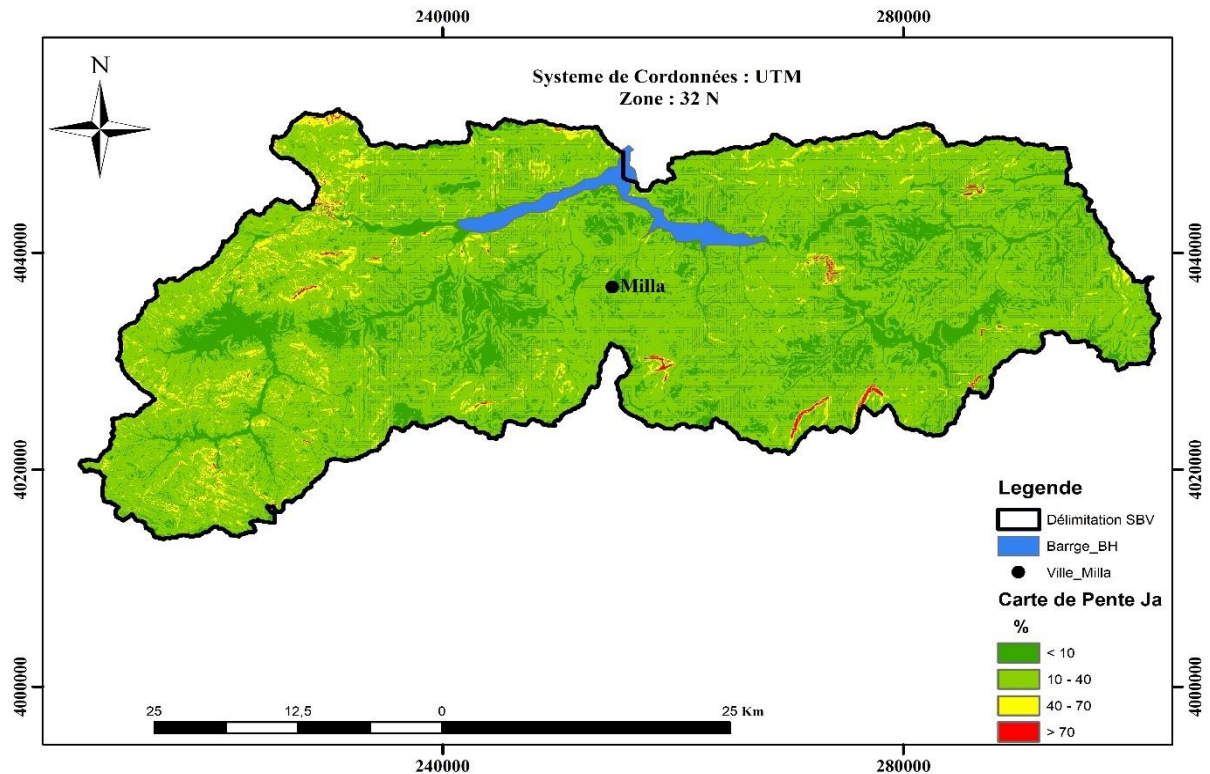


FIGURE III-35 CARTE DES PENTES JA (%)

III.3.7. Coefficient d'érosion (Z)

Le coefficient d'érosion (Z) est un paramètre sans dimension qui indique la sévérité ou l'intensité d'érosion dans le bassin versant. Sa valeur (Z) définit la classe d'érosion selon le tableau de Gavrilovic (Tableau IV-6).

$$Z = X_a * Y * (\varphi + \sqrt{J_a}) \dots \dots \dots (III-7)$$

X_a : Coefficient de protection du sol du bassin versant, se rapportant à la protection des sols par la couverture végétale, des influences des phénomènes atmosphériques des forces érosives liées aux conditions naturelles.

Y : Coefficient d'érodibilité du sol, indique la sensibilité des sols à l'érosion dépend de la géologie du bassin versant

φ : Coefficient de type et d'étendue de l'érosion équivalent numérique des processus visibles et nettement prononcés dans le bassin versant

J_a : Pente moyenne de la zone d'étude en (%)

TABLEAU III-9 LA CLASSE D'ÉROSION EN FONCTION DE (Z) (GAVRILOVIC S., 1962; 1970)

La classe d'érosion	Valeur de (Z)
Érosion très élevée	>1.00
Elevée érosion	0.70 - 1.00
Érosion moyenne	0.40 - 0.70
Faible érosion	0.20 - 0.40
Très Faible érosion	0 - 0.20

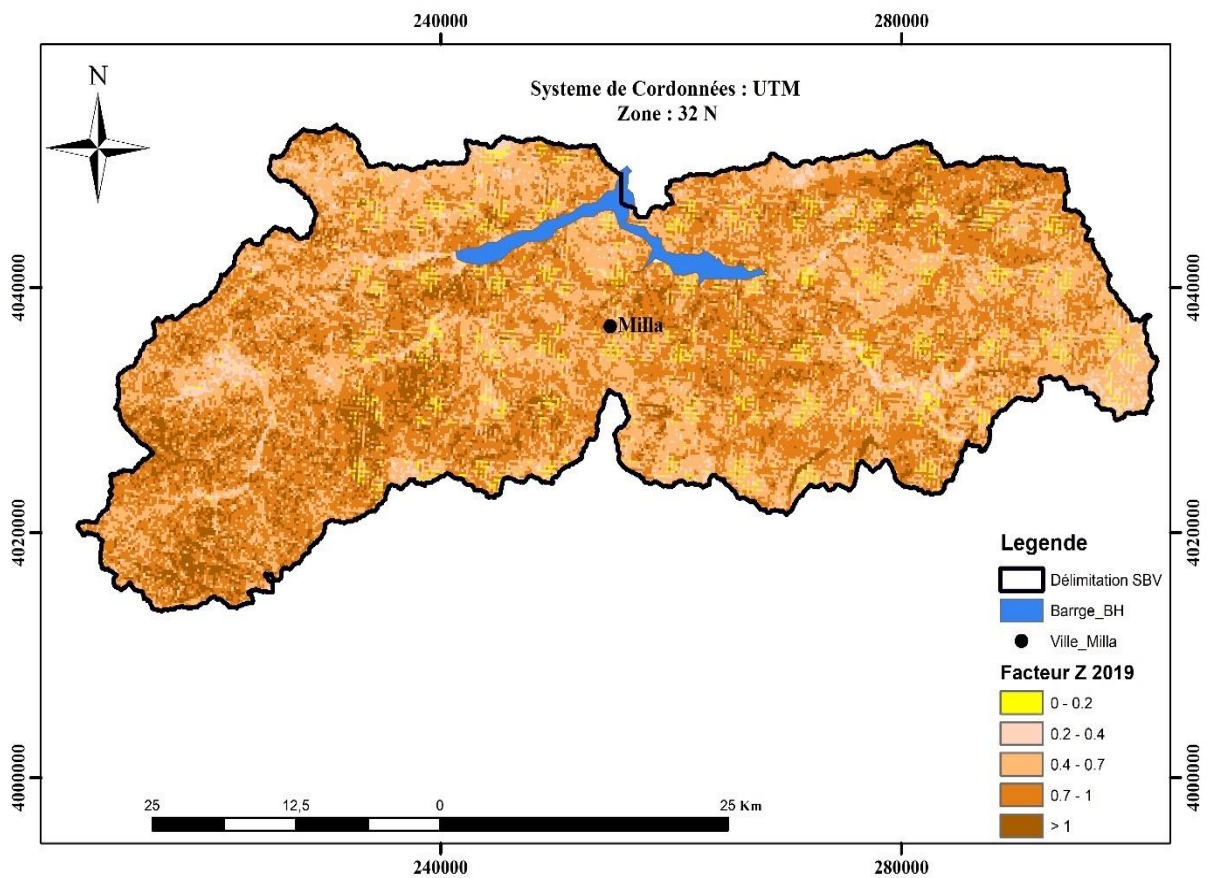


FIGURE III-36 CARTE DU COEFFICIENT D'ÉROSION ANNUELLE (Z) DU BASSIN VERSANT EN 2019

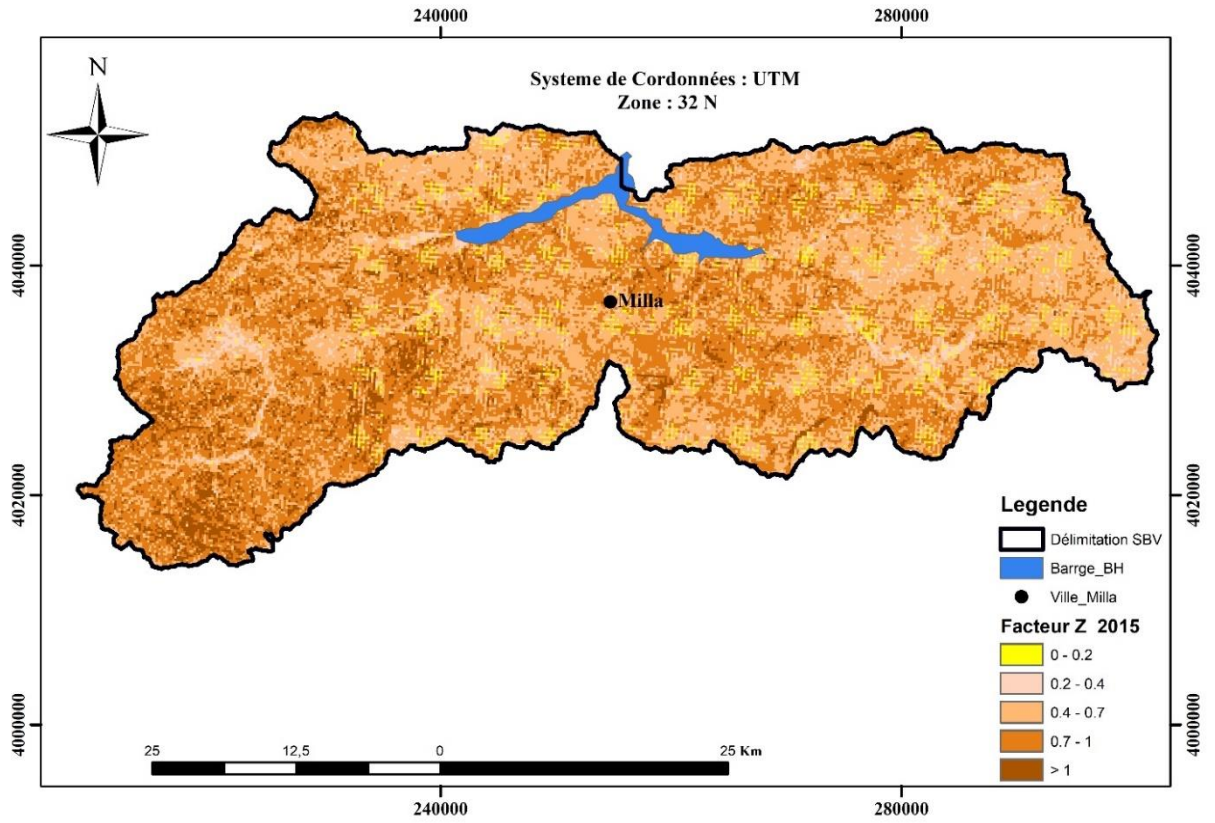


FIGURE III-37 CARTE DU COEFFICIENT D'ÉROSION ANNUELLE (Z) DU BASSIN VERSANT EN 2015

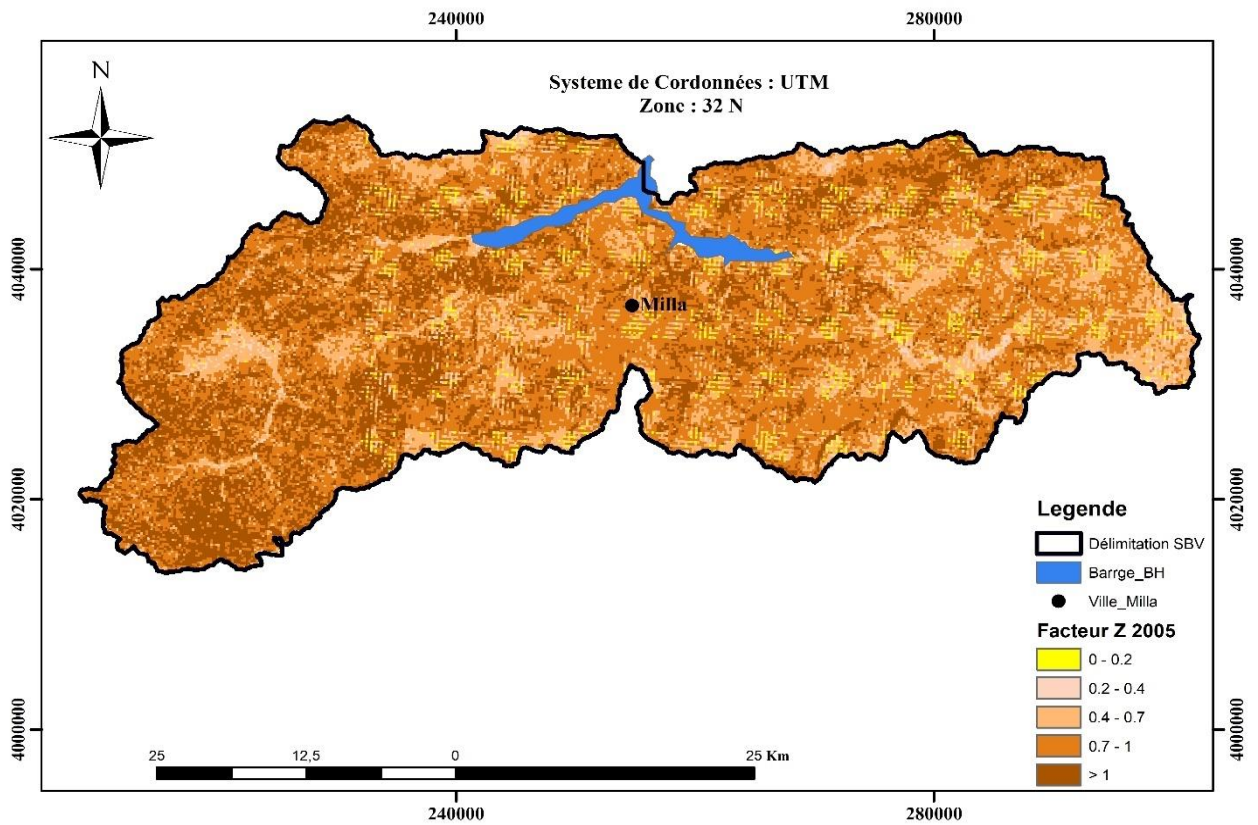


FIGURE III-38 CARTE DU COEFFICIENT D'ÉROSION ANNUELLE (Z) DU BASSIN VERSANT EN 2005

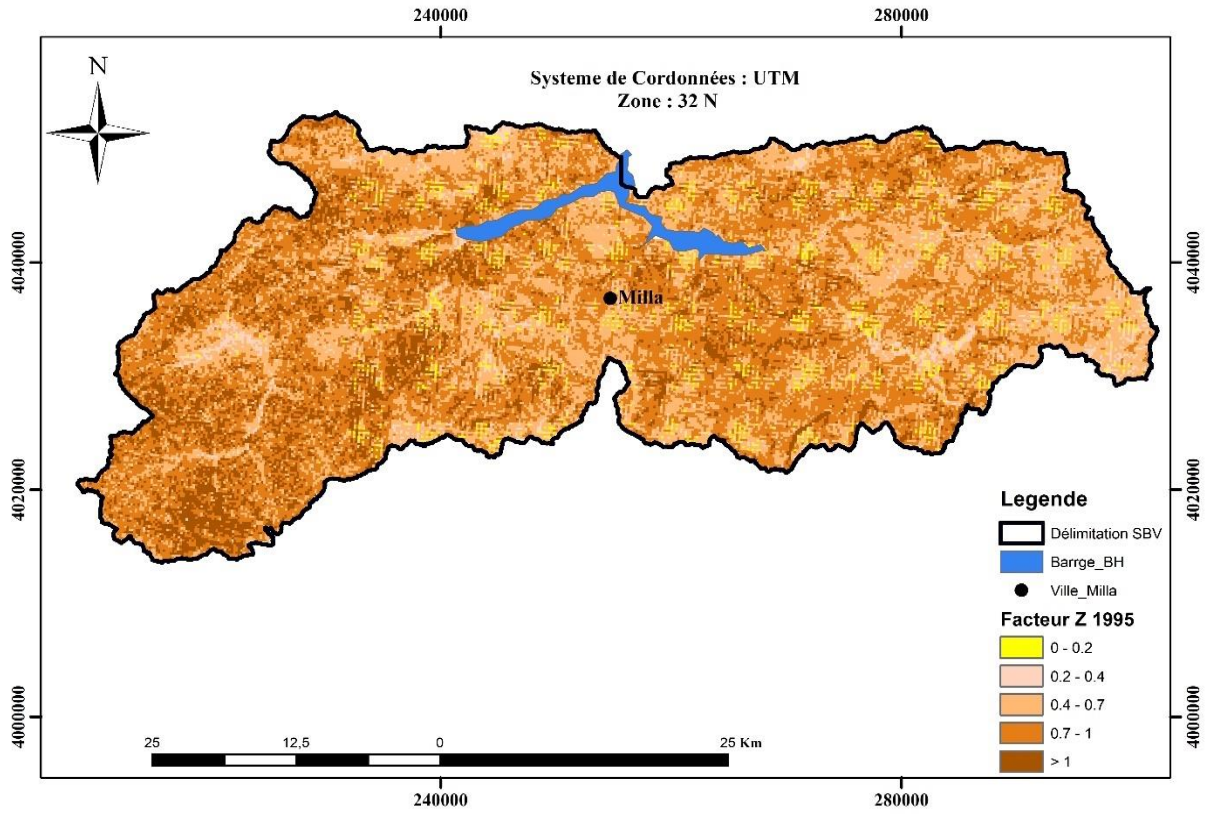


FIGURE III-39 CARTE DU COEFFICIENT D'ÉROSION ANNUELLE (Z) DU BASSIN VERSANT EN 1995

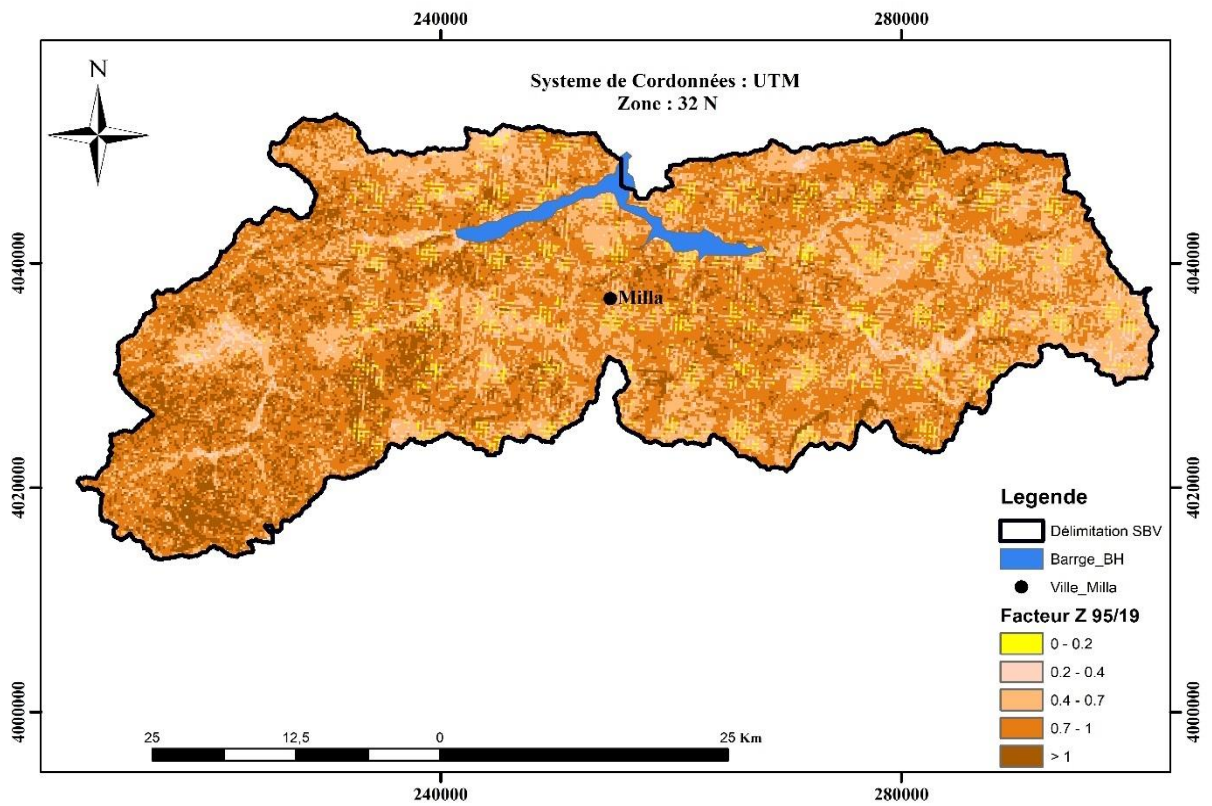


FIGURE III-40 CARTE DU COEFFICIENT D'ÉROSION MOYENNE ANNUELLE (Z) DE LA MOYENNE DU (2019, 2015, 2005, ET 1995).

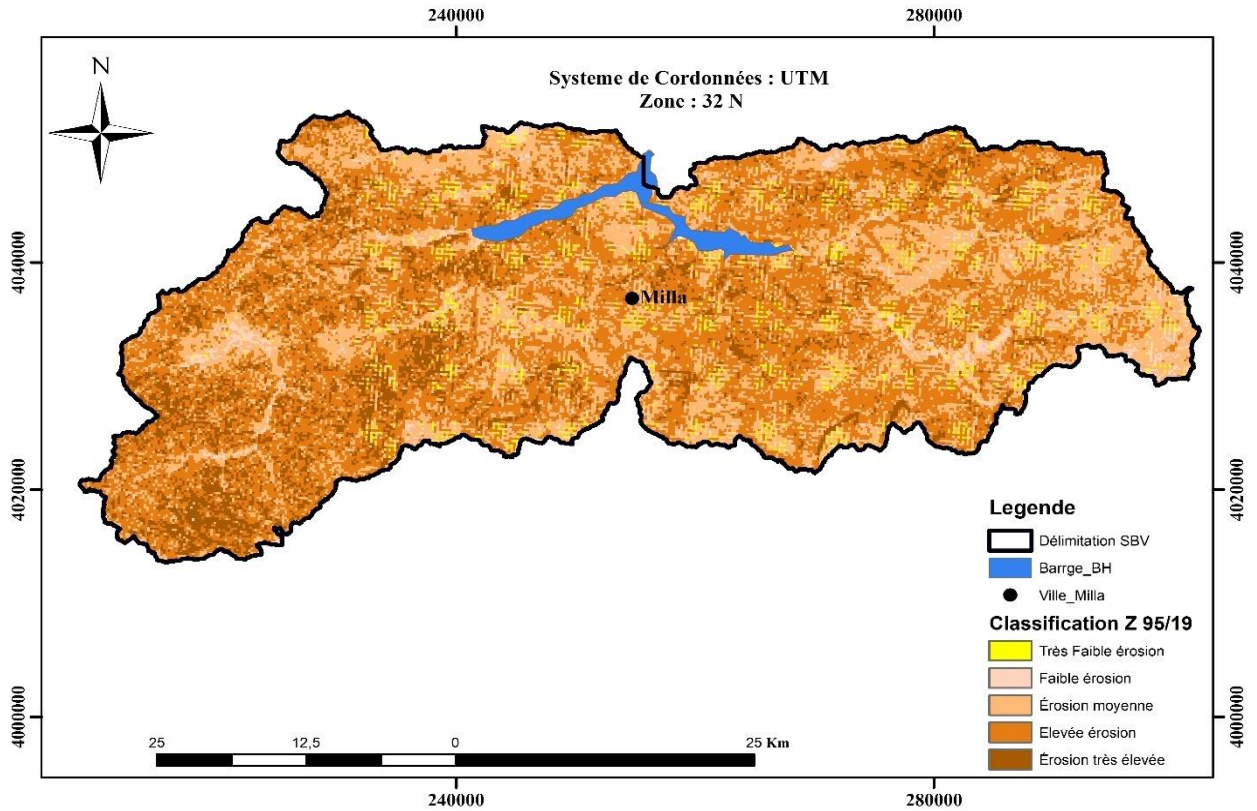


FIGURE III-41 CARTE CLASSIFICATION D'EROSION MOYENNE ANNUELLE POUR LES ANNEES (2019, 2015, 2005, ET 1995)

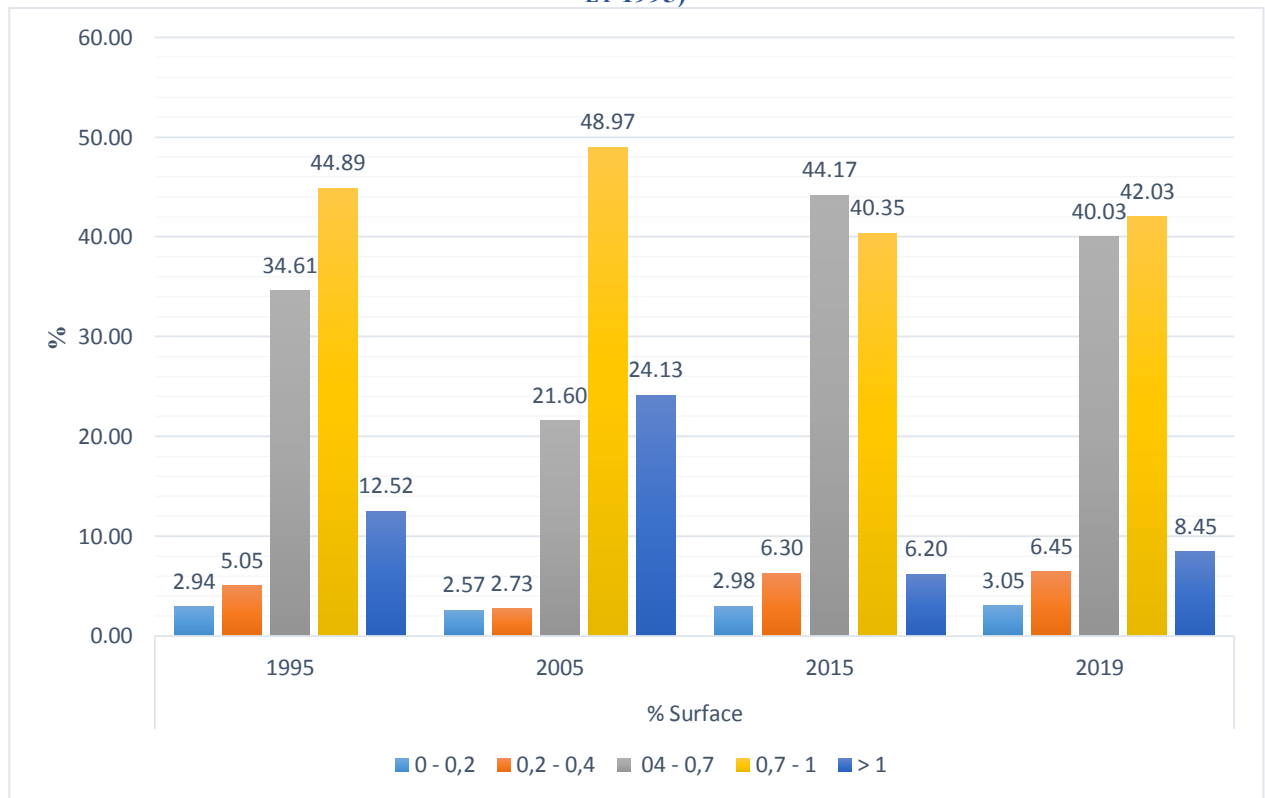


FIGURE III-42 REPARTITION DES CLASSES DU COEFFICIENT D'EROSION ANNUELLE (Z) DANS LE BASSIN VERSANT POUR LES ANNEES (2019, 2015, 2005, ET 1995).

TABLEAU III-10 REPARTITION DES CLASSES DU COEFFICIENT D'ÉROSION ANNUELLE (Z) DANS LE BASSIN VERSANT POUR LES ANNEES (2019, 2015, 2005, ET 1995).

Classes Z	1995		2005		2015		2019		Moyenne	
	S (km ²)	%	S (Km ²)	%	S (Km ²)	%	S (Km ²)	%	S (Km ²)	%
< 0,4	172,7	8,0	114,5	5,3	200,5	9,3	205,2	9,5	173,2	8,0
0,4 - 0,7	747,7	34,6	466,7	21,6	954,3	44,2	864,9	40,0	758,4	35,1
0,7 - 1	969,9	44,9	1058,1	49,0	871,9	40,4	908,0	42,0	952,0	44,1
1 - 1,2	200,5	9,3	380,7	17,6	110,0	5,1	144,2	6,7	208,8	9,7
> 1,2	69,9	3,2	140,7	6,5	24,0	1,1	38,5	1,8	68,2	3,2

D'après la figure III.42, nous observons une variation spatiotemporelle du coefficient d'érosion annuelle Z dans le bassin versant, à titre indicatif pour la classe (0.7 - 1), le coefficient d'érosion Z représente les pourcentages 44.89%, 48.97%, 40.35% et 42.03% respectivement pour les années 1995, 2005, 2015 et 2019.

III.3.8. Volume annuel moyen des sédiments érodés (W)

Après l'élaboration de toutes les cartes représentant les différents facteurs du modèle EPM nous obtenons la carte de volume annuel moyen (W).

$$W = T * H * \pi * \sqrt{Z^3} \quad (\text{III-8})$$

Où :

W : volume annuel moyen des sédiments érodés (m³/km²/an)

T : Coefficient de la température

$$T = \sqrt{\frac{t_0}{10} + 0.1} \quad (\text{III-9})$$

t₀ : Température moyenne annuelle en (C°)

H : Précipitation moyenne annuelle en (mm)

Z : Coefficient d'érosion

$$Z = X_a * Y * (\varphi + \sqrt{J_a}) \quad (\text{III-10})$$

X_a : Coefficient de protection du sol du bassin versant

Y : Coefficient d'érosion du sol, indique la sensibilité des sols à l'érosion

φ : Coefficient de type et d'étendue de l'érosion

J_a : Pente moyenne de la zone d'étude en (%)

Dans le but d'estimer les quantités (masses) totales des sédiments érodés en (Tonne/Km²/an), nous utilisons la formule :

$G \text{ en (T/km}^2\text{/an)} = W \text{ en (m}^3\text{/km}^2\text{/an)} * \text{masse volumique (T/m}^3\text{)}$

$$G = W * M \dots\dots\dots (III-11)$$

M : La masse volumique (Tonne/m³)

Pour la densité (masse volumique), nous exploitons les données au site : Soilsgrid.org

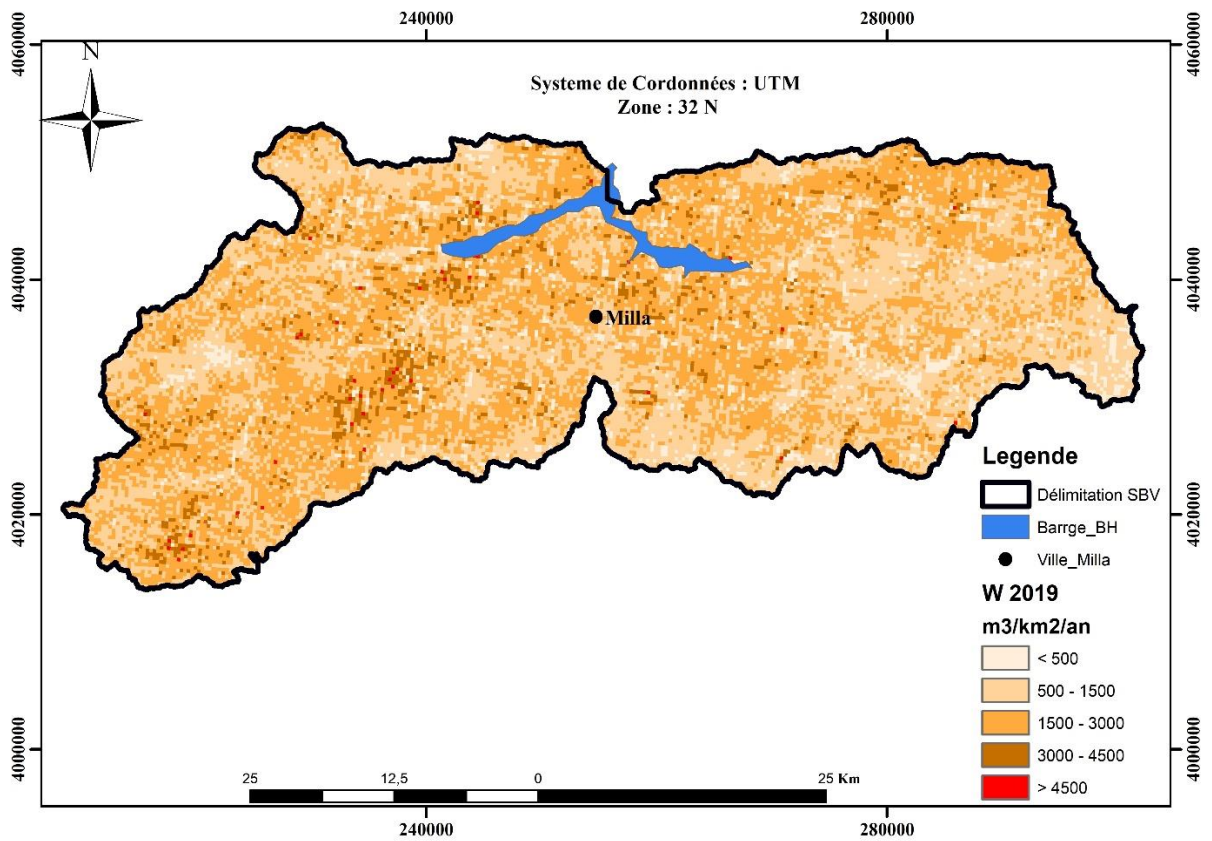


FIGURE III-43 VOLUME ANNUELLE DES SEDIMENTS ERODES (W) EN 2019.

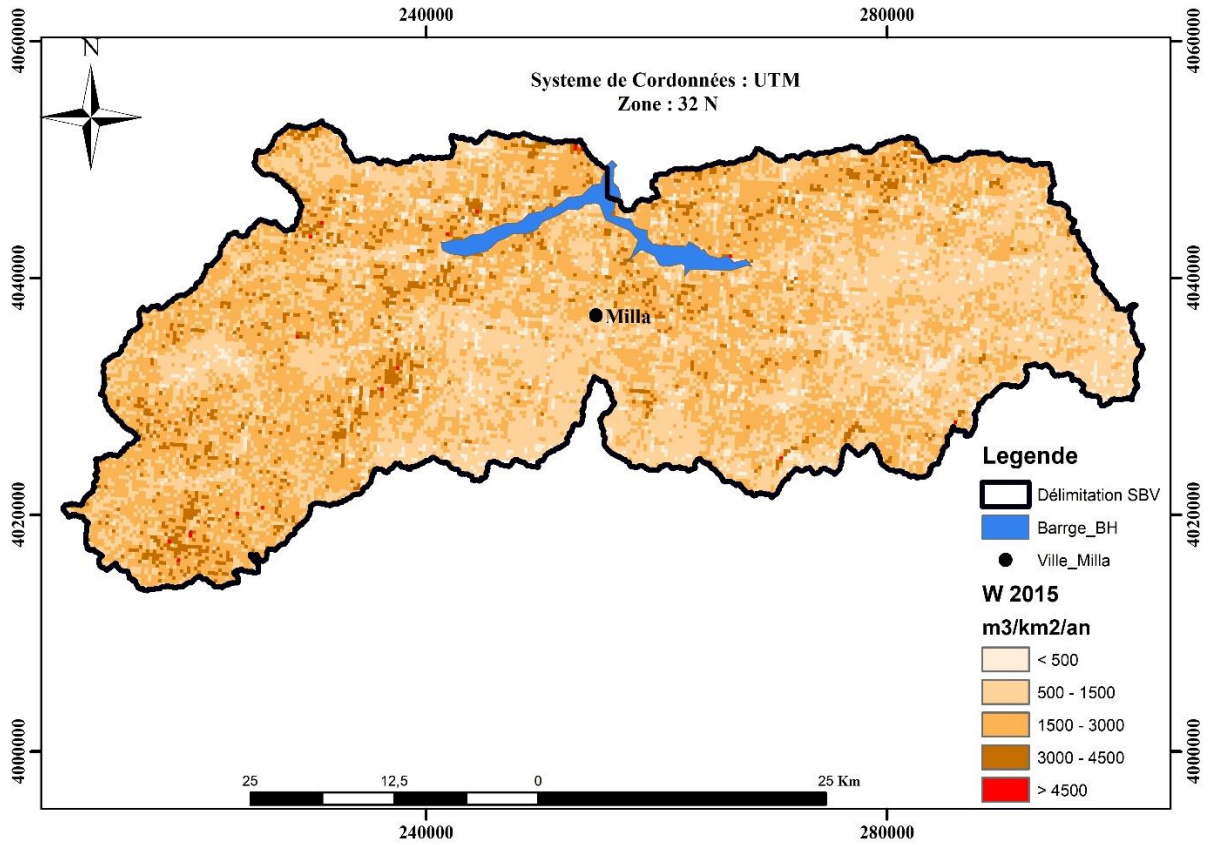


FIGURE III-44 VOLUME ANNUELLE DES SEDIMENTS ERODES (W) EN 2015.

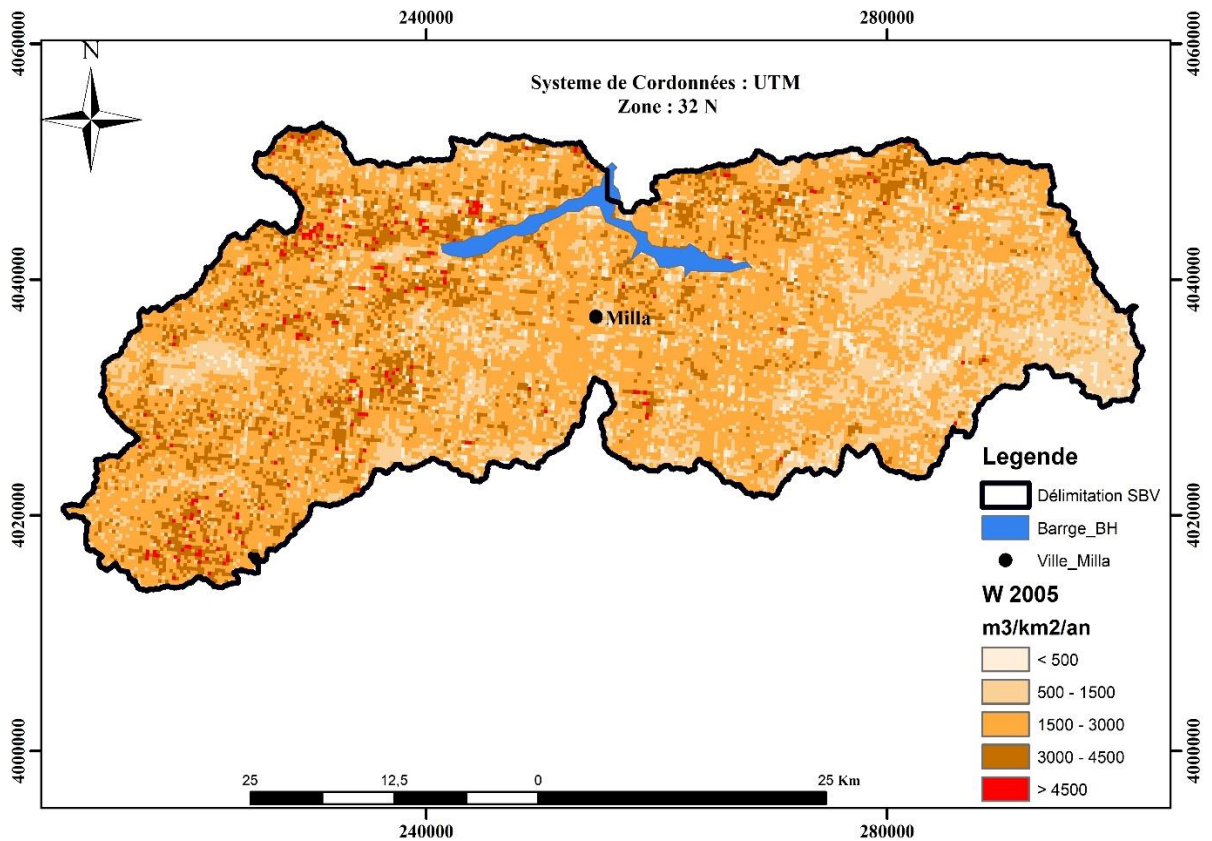


FIGURE III-45 VOLUME ANNUELLE DES SEDIMENTS ERODES (W) EN 2005.

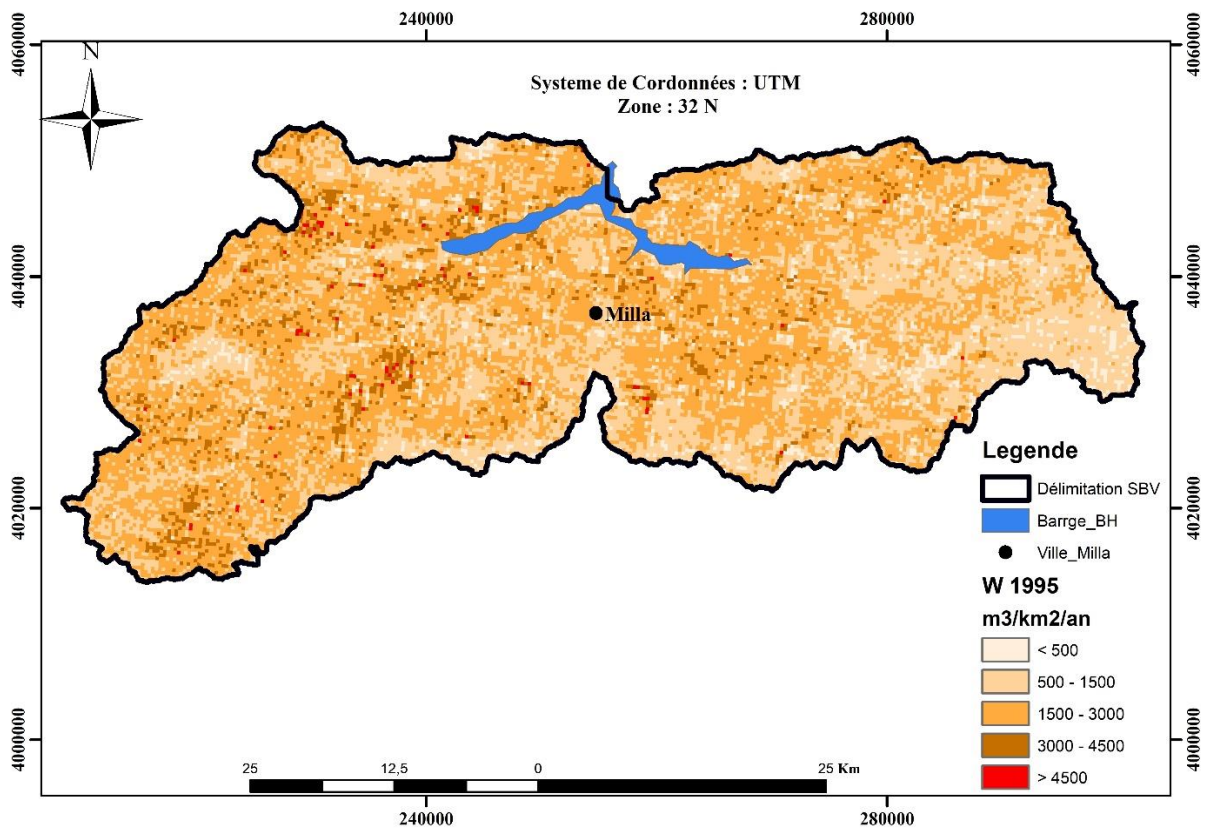


FIGURE III-46 VOLUME ANNUELLE DES SEDIMENTS ERODES (W) EN 1995.

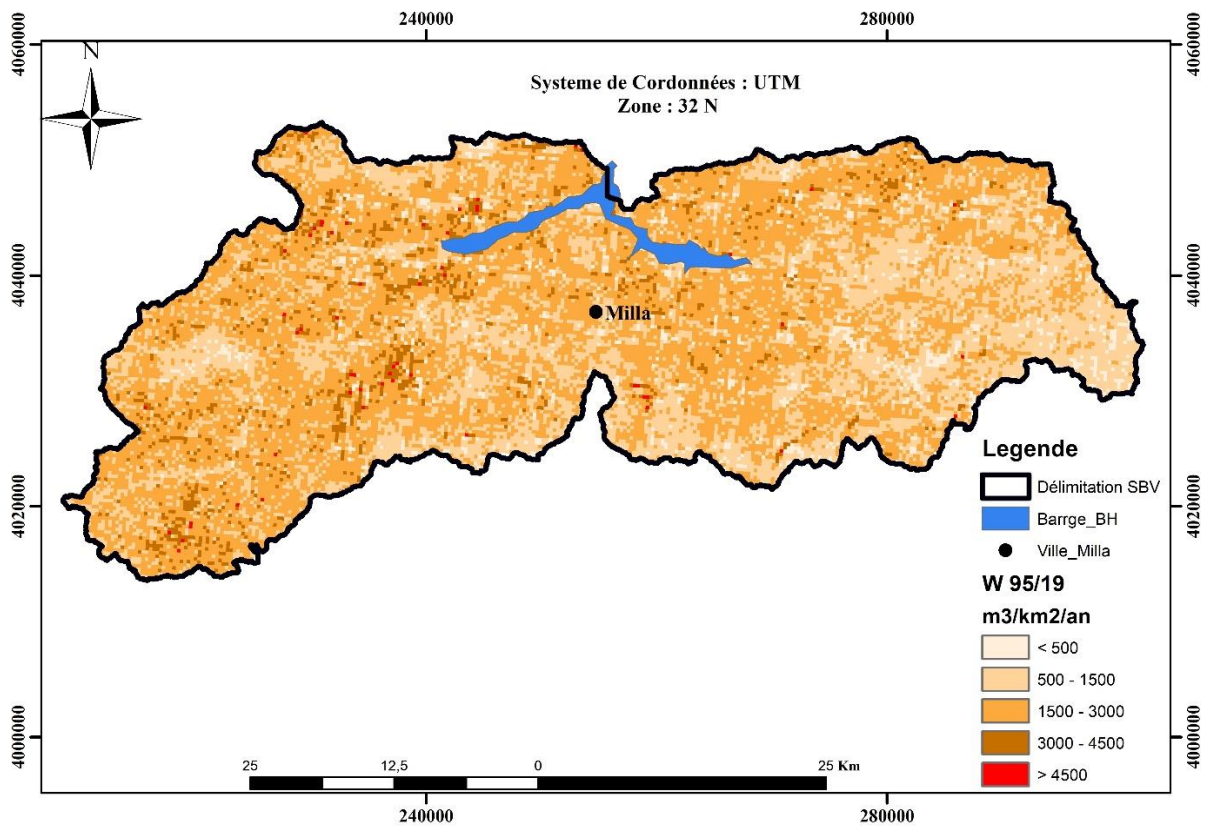


FIGURE III-47 VOLUME MOYENNE ANNUELLE DES SEDIMENTS ERODES (W) POUR LES ANNEES (2019, 2015, 2005, 1995).

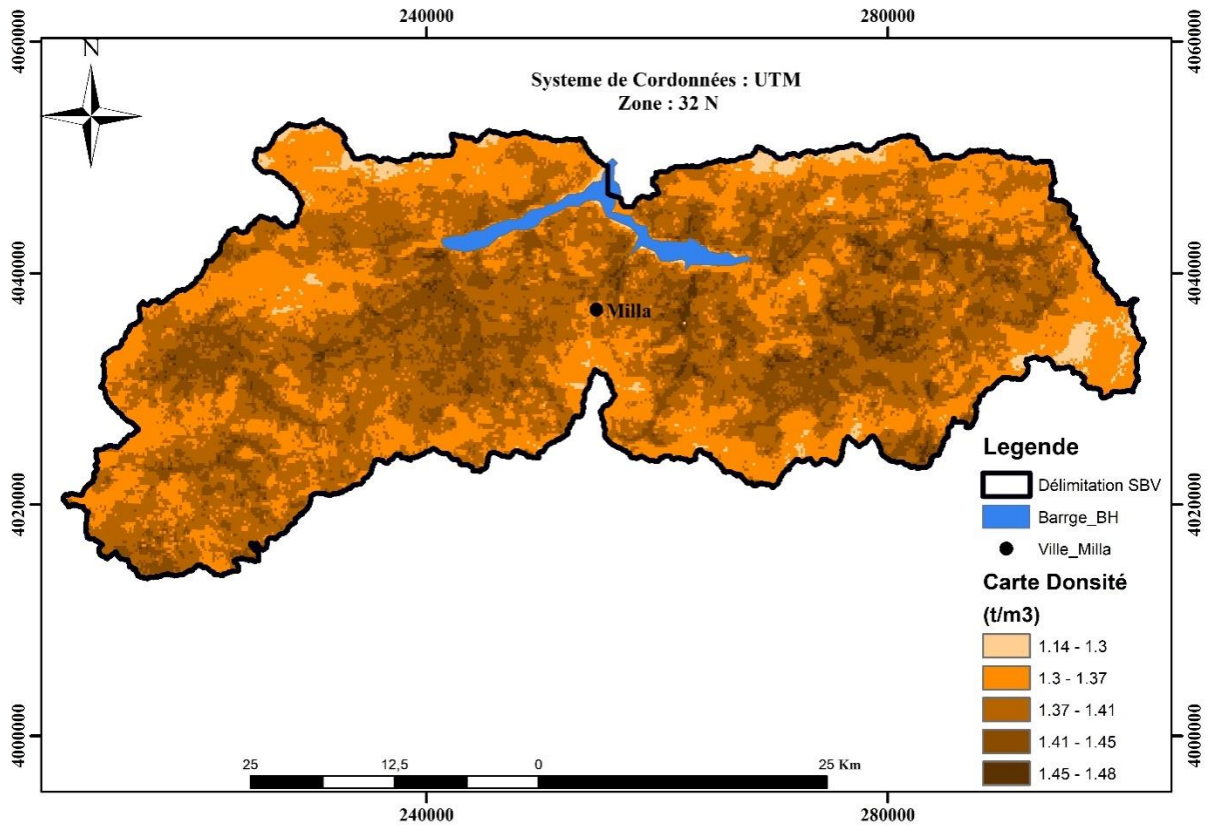


FIGURE III-48 CARTE DE LA MASSE VOLUMIQUE M DU BASSIN VERSANT. SOURCE : SITE SOILGRID.ORG.

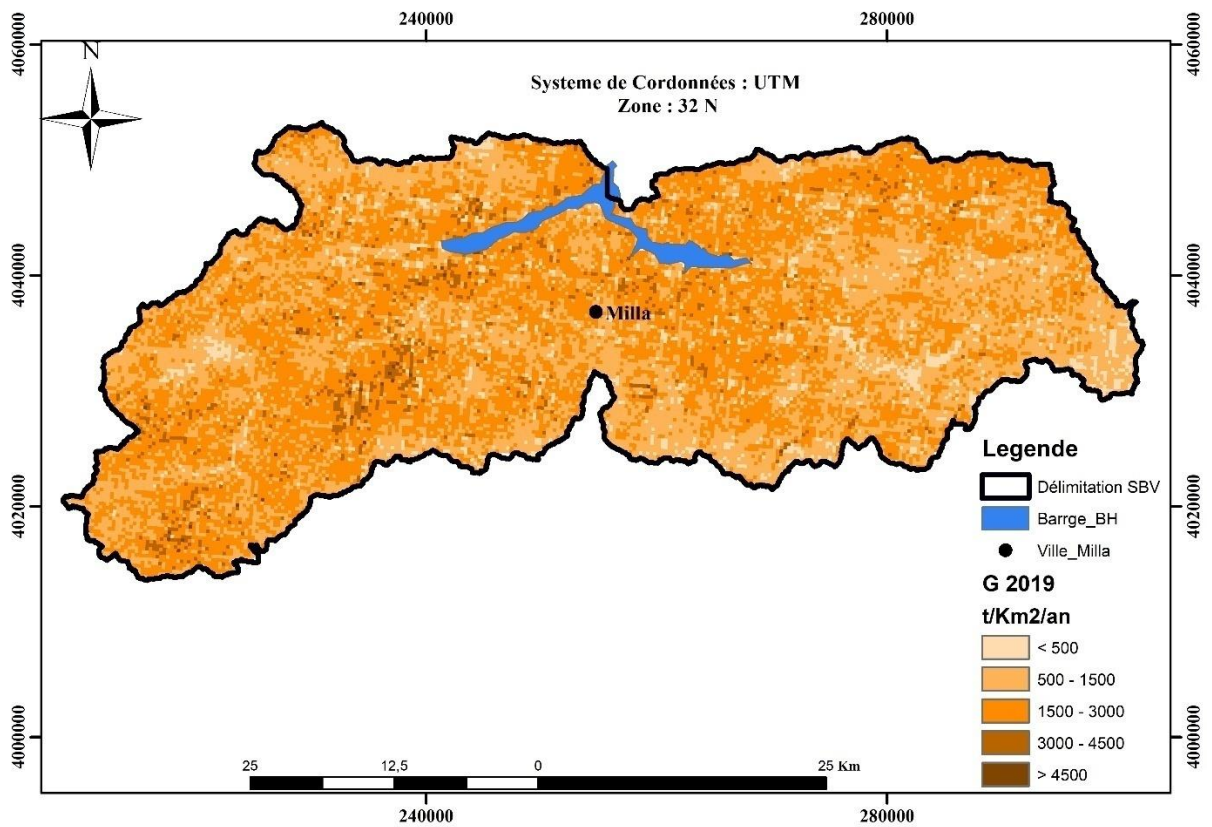


FIGURE III-49 QUANTITES ANNUELLES DES SEDIMENTS ERODES (G) DU 2019.

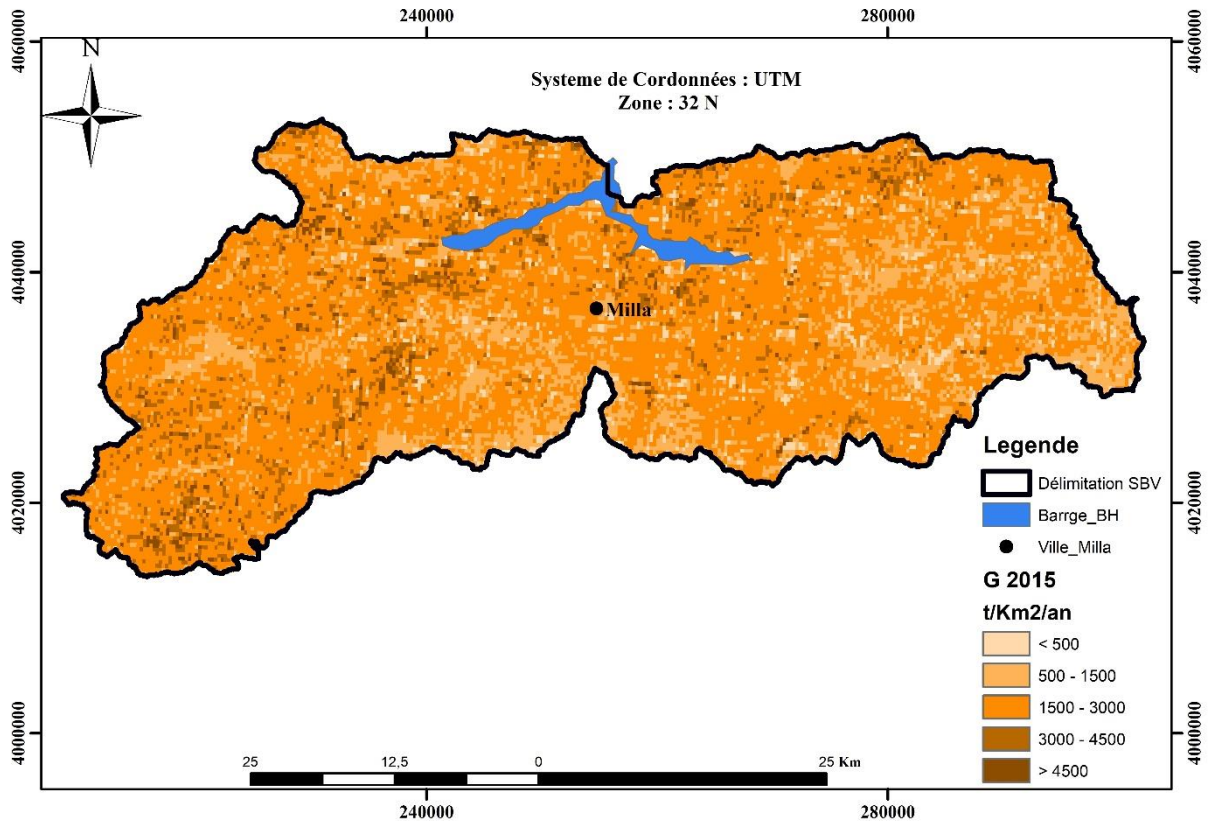


FIGURE III-50 QUANTITES ANNUELLES DES SEDIMENTS ERODES (G) EN 2015.

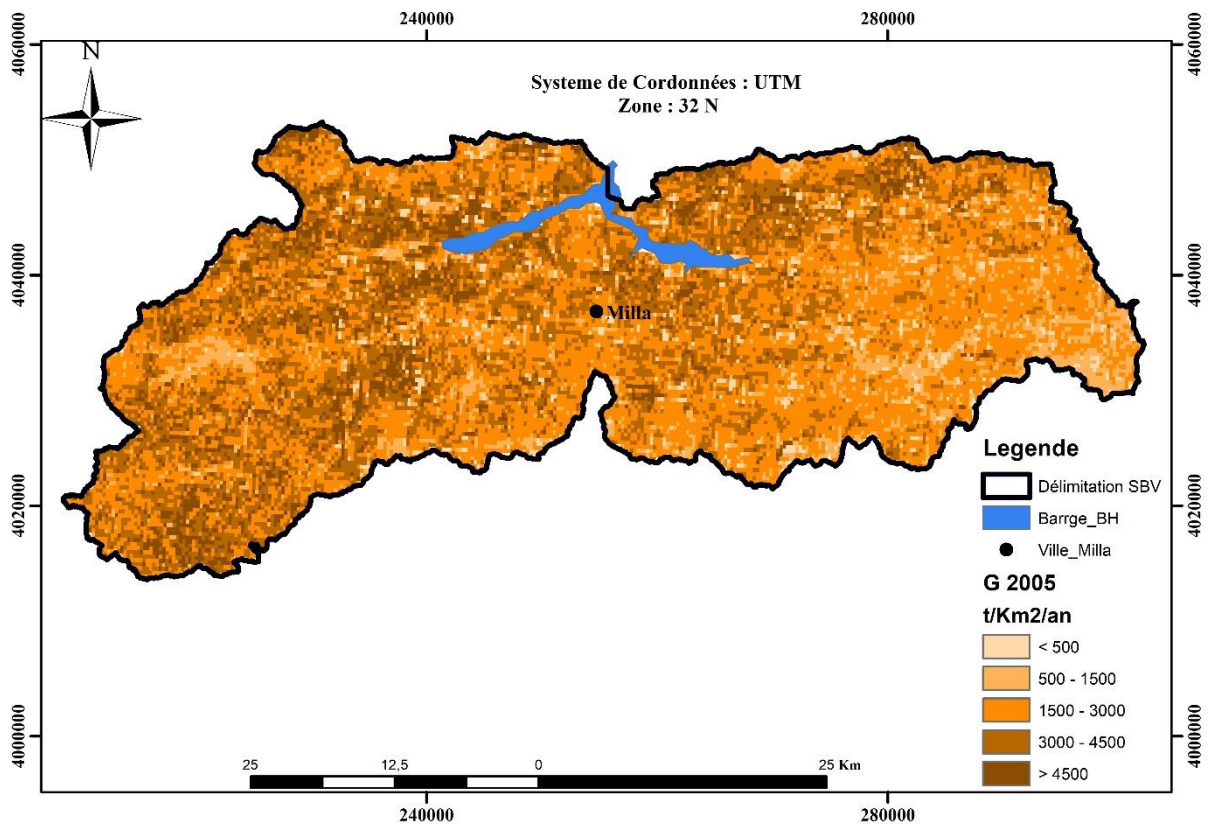


FIGURE III-51 QUANTITES ANNUELLES DES SEDIMENTS ERODES (G) EN 2005.

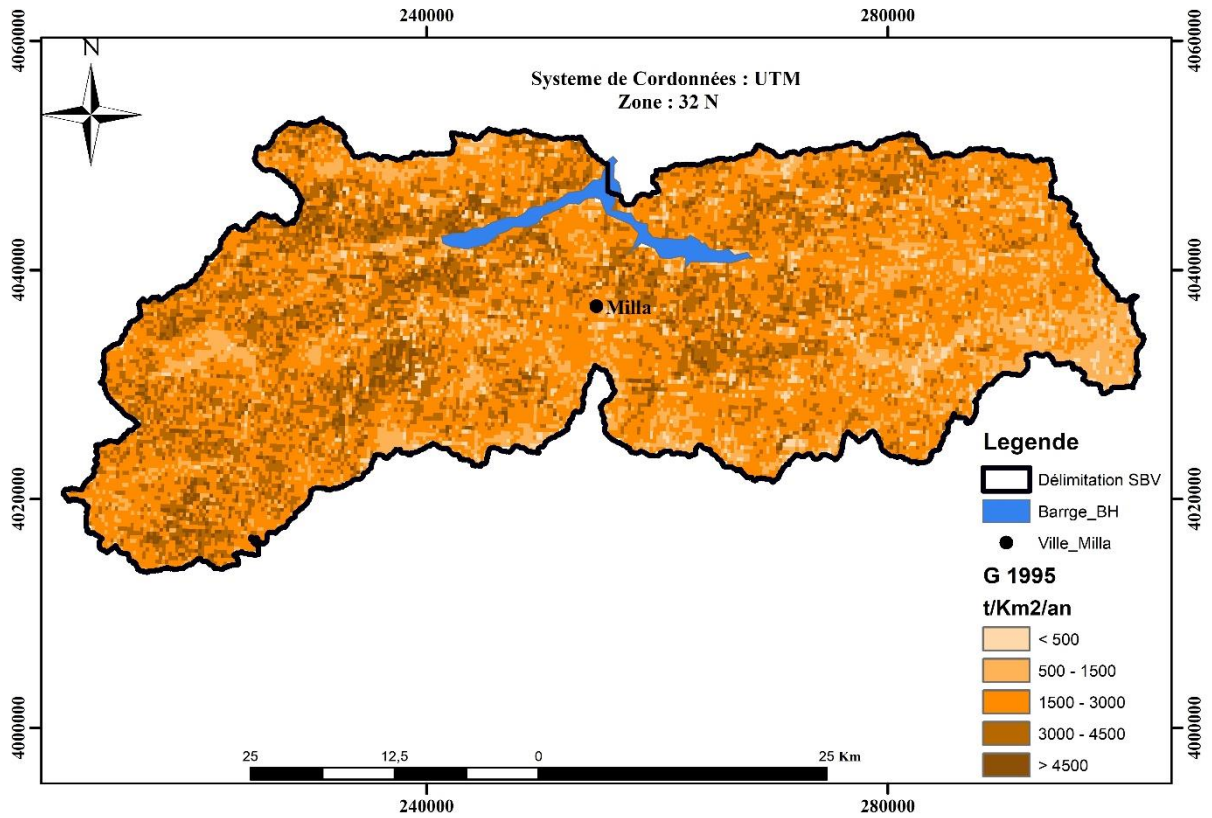


FIGURE III-52 QUANTITES ANNUELLES DES SEDIMENTS ERODES (G) EN 1995.

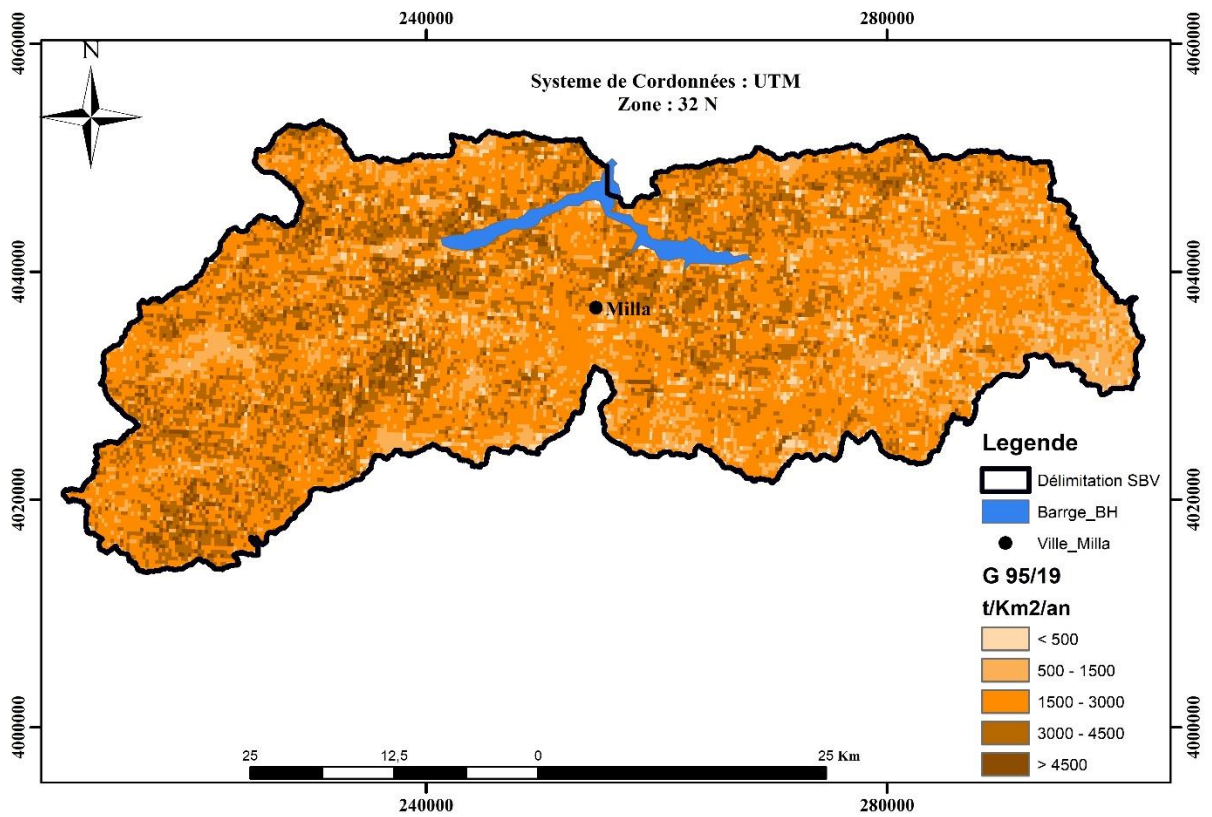


FIGURE III-53 QUANTITES ANNUELLES MOYENNE DES SEDIMENTS ERODES (G) POUR LES ANNEES (2019, 2015, 2005 ET 1995).

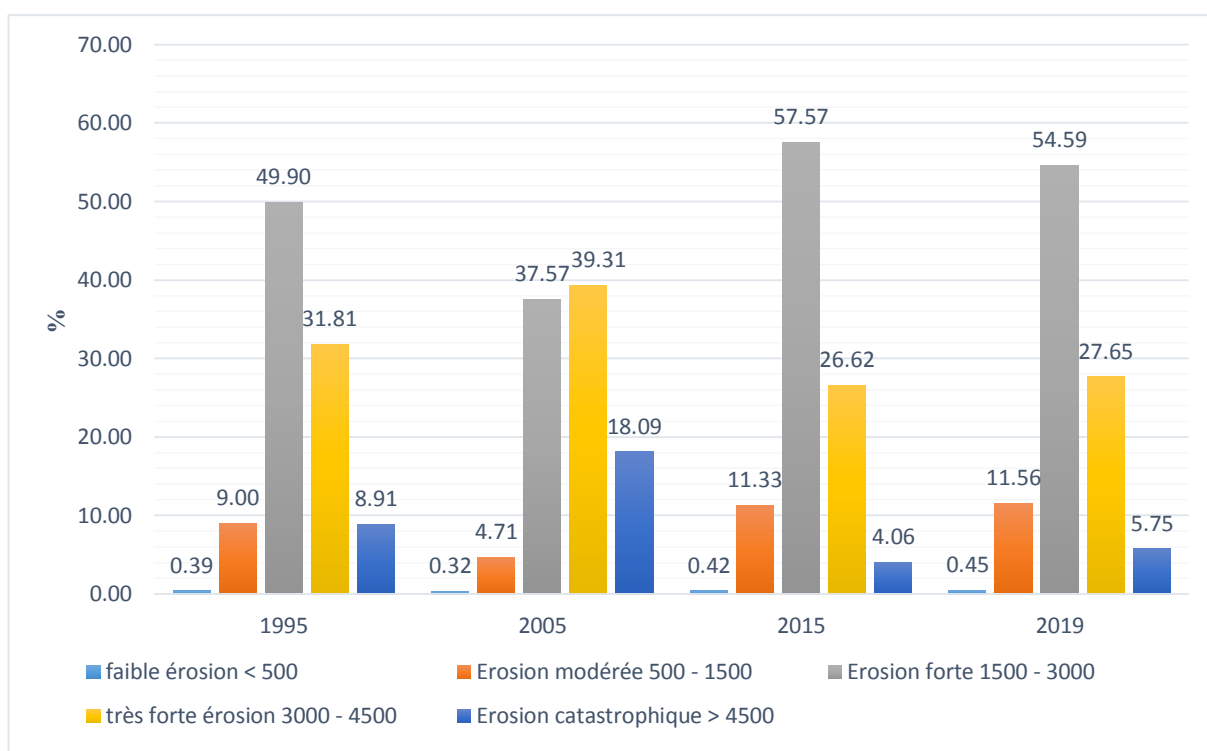


FIGURE III-54 REPARTITION DES CLASSES DE LA QUANTITE ANNUELLE MOYENNE (G) POUR LES ANNEES (2019, 2015, 2005, ET 1995).

TABLEAU III-11 CLASSEMENT DES PERTES EN SOLS EN COURS DES ANNEES (1995, 2005, 2015 ET 2019)

Type d'érosion	Classes (T/km ² /an)	1995		2005		2015		2019		Moyenne	
		S (km ²)	%	S (Km ²)	%	S (Km ²)	%	S (Km ²)	%	S (Km ²)	%
Erosion faible	< 500	70,4	0,4	80,1	0,3	78,7	0,4	85,9	0,5	78,8	0,4
Erosion modérée	500 - 1500	258,4	9,0	416,3	4,7	480,2	11,3	499,3	11,6	413,5	9,2
Erosion forte	1500 - 3000	995,5	49,9	1152,3	37,6	1240,4	57,6	1183,0	54,6	1142,8	49,9
Erosion très forte	3000 - 4500	660,7	31,8	456,5	39,3	355,5	26,6	371,6	27,7	461,1	31,3
Erosion catastrophique	> 4500	207,4	8,9	87,2	18,1	37,7	4,1	52,6	5,8	96,2	9,2

D'après le tableau III.11 de classement des pertes en sols et la figure III.54 de la répartition des classes de la quantité annuelle moyenne (G) nous observons une variation remarquable des pertes en sols en cours des années (1995, 2005, 2015 et 2019), classé au type d'érosion nous remarquons deux types d'érosion une érosion fort pour la classe 1500 – 3000 égales à 49,91 %, et une érosion très forte pour la classe 3000 – 4500 égales à 31,35 %

L'érosion moyenne sur l'ensemble du bassin versant est égale à 2338 t/km²/an en 1995, 2775 t/km²/an en 2005, 2150 t/km²/an en 2015 et 2167 t/km²/an en 2019.

L'érosion moyenne interannuelle sur l'ensemble du bassin versant durant les quatre périodes 1995, 2005, 2015 et 2019 est de l'ordre de 2357.5 t/km²/an.

III.4. Quantité annuelle des sédiments érodés arrivant à l'exutoire de bassin versant. (G1)

Seule une fraction du volume total des sédiments, produite dans un bassin versant en raison de l'érosion du sol, aboutit à la sortie du bassin versant, car une grande partie de cette quantité se dépose à l'intérieur, pendant le parcours des sédiments vers les plans d'eau.

Le sédiment efficace transporté par le cours d'eau à la sortie du bassin versant {rendement réel des sédiments, G1 (m³ an⁻¹)} est déterminé par le coefficient de rétention (DR), introduit par l'EPM (équation).

$$G1 = DR \cdot G$$

G1 : le sédiment efficace transporté par les cours d'eau en m³/an.

Le DR est estimé à l'aide de l'équation suivante [15] :

$$DR = \frac{\sqrt{O \cdot D} \cdot (L + L_i)}{F \cdot (L + 10)} \quad (III.12)$$

Où

- **O** est le périmètre du bassin (km),
- **D** est la dénivelée moyenne du bassin (km),
- **L** est la longueur cours d'eau principale (km),
- **L_i** est la longueur des cours d'eaux secondaires (km)
- **F** est la surface du bassin versant (km²).
- **D=H_r - H_{min} = (H_{max} - H_{min}) - H_{min}(Globevnik et al., 2003)**

Où

H_r : (m) est la dénivelée maximale du bassin versant (définie comme la différence entre l'altitude maximale (H_{max}) et l'altitude minimale (H_{min})).

- L_i= 2429.83 km
- L=44.75 km
- L+ L_i= 2489.83 Km
- H_{max}= 1466 m H_{min}=113 m D= (1466-113) -113 = 1,240 Km
- O= 416.11 Km
- F= 2192.43 km²
- Dr= 0.47

TABLEAU III-12 QUANTITE ANNUELLE DES SEDIMENTS ERODES ARRIVANT A L'EXUTOIRE DURANT LES ANNEES (1995, 2005, 2015 ET 2019)

Années	G (m ³ /an)	DR (%)	G1 (m ³ /an)	E (t/km ² /an)
1995	3661358.1	0.47	1720838.31	1098.86
2005	4345709.5		2042483.47	1304.25
2015	3366946.1		1582464.67	1010.5
2019	3393568.43		1594977.16	1018.49
La moyenne	3691895.53		1735190.9	1108.025

La quantité annuelle des sédiments érodés arrivant à l'exutoire est **1735190.9 m³/an** pour le sous bassin étudié, avec une érosion moyenne de **1108.025 t/km²/an**.

III.5. Comparaison avec les études réalisées sur le bassin versant de KebirRumel

Selon l'étude de *Marouf nadir en 2012*, les apports solides estimés au niveau de la station hydrométrique en amont du barrage de Beni Haroun sont de 7414992.10 (t/an) correspondant à une érosion moyenne de **850 t/km²/an**.

Selon le dernier levé bathymétrique en **2013** le volume annuel d'envasement du barrage de Beni Haroun est estimé à 8.3 Million de m³, une surface drainée de 7472 Km² avec une masse volumique moyenne de **1.4 t/m³**, donc l'érosion moyenne est égale à **1555.14 t/an/km²**.

Dans notre zone d'étude l'érosion spécifique moyenne déterminée par le modèle EPM est de **1108.025 t/km²/an**. Donc ce résultat montre l'efficacité de modèle EPM pour la quantification de l'érosion hydrique.

III.6. Conclusion

L'analyse statistique des résultats du modèle EPM de Gavrilovic à l'aide d'un système d'information géographique a permis de déterminer les facteurs causaux décisifs qui contrôlent l'érosion hydrique qui sont par ordre d'importance la sensibilité des sols à l'érosion, les pentes, la densité du couvert végétal, la protection des sols, les précipitations, les types d'érosion, et la température.

Les résultats montre que les pertes moyennes des sols durant les années d'étude (1995, 2005, 2015, 2019) sont estimées à 20 % de la surface totale. Les pertes maximales moyennes sont de 49,9 %, indiquent une érosion forte de classe (1500 – 3000) t/km²/an. Les pertes minimales annuelles moyenne sont de l'ordre de 0,4 % de la surface totale, qui indique une érosion faible de classe < 500 t/km²/an. Donc le type d'érosion dans le bassin versant de Beni Haron de type fort et de classe (1500 à 3000 t/km²/an).

Conclusion générale

Dans ce travail nous avons étudié le bassin versant du barrage de Beni Haroun. La quantification des pertes en sol au niveau de ce bassin versant a été réalisée à l'aide de modèle Erosion Potential Method (EPM) intégrée dans un Système d'Information Géographique sous le logiciel Arc GIS.

Du point de vue altimétrie, le bassin est caractérisé par des altitudes variant de 113m à 1466 m avec une altitude moyenne de 611 m. Un réseau hydrographique très développé (ordre 6).

L'érosion spécifique moyenne déterminée par le modèle EPM sur l'ensemble de sous bassin durant les années 1995, 2005, 2015 et 2019 sont respectivement **1098.86 t/km²/an**, **1304.25 t/km²/an**, **1010.5 t/km²/an** et **1018.49 t/km²/an**.

Le volume annuel d'envasement du barrage de Beni Haroun est estimé à 8.3 Million de m³ selon le levé bathymétrique réalisé en 2013. Une surface drainée de 7472 Km² avec une masse volumique moyenne de 1.4 t/m³, donc l'érosion moyenne est égale à **1555.14 t/an/km²**.

La comparaison entre les résultats des sédiments érodés du bassin (estimés par EPM) arrivant à l'exutoire déterminé par la fonction de rétention (DR), et les sédiments mesurés au niveau du barrage de Beni Haroun à l'aide de levé Bathymétrique réalisé en 2013 est jugée satisfaisante. Ce qui montre l'efficacité du modèle EPM pour l'évaluation de l'érosion.

Les techniques de SIG ont été utilisées avec succès pour déterminer les différents paramètres qui rentrent en ligne dans le phénomène de l'érosion et qui sont nécessaire au fonctionnement du modèle EPM. Il se base sur la cartographie et la combinaison de six paramètres: la pente, la sensibilité des sols à l'érosion, l'état érosif, la protection des sols, la température et les précipitations. Ce couplage permet, d'évaluer les pertes en sols et d'estimer le poids de chaque facteur et de leurs effets combinés d'une manière rapide et efficace. Dans l'ensemble, le modèle donne des résultats acceptables permettant d'identifier les zones les plus sensibles à l'érosion, et les zones nécessitant une action prioritaire dans le bassin. Il présente un outil d'amélioration de la gestion du phénomène.

En perspective :

- Etude de suivi des eaux superficielles au niveau des barrages à l'aide de télédétection.
- Estimation de la capacité des barrages et la quantité d'envasement par l'utilisation des images satellitaires.

Bibliographie

- [1] : Mémoire, Modélisation de l'érosion hydrique des sols dans le bassin versant de l'Oued Sahel (Soummam) 2016/2017 (université M'sila)
- [2] : Mémoire, Perte de capacité de stockage en eau dans quelques barrages de l'est Algérien (université 8 Mai 1945 de Guelma) Juin 2017
- [3] : Mémoire, Contribution A L'étude Prédictive De L'envasement Et La Durabilité Du Barrage Du Ghrib (ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'HYDRAULIQUE -ARBAOUI Abdellah-) Avril 2017
- [4] : Journal, Envasement Des Barrages Dans Les Régions Arides Exemples Algériens (Université Blida1) 2016
- [5] : Article, Les mesures préventives de lutte contre l'envasement des barrages Kara Benyekhlefl et Nemdili Ali2 (M'sila les 23-24 Juin 2014)
- [6] : Mémoire, Mesures préventives contre l'envasement des barrages en Algérie avec étude de cas barrage k'sob, (université aklimohandoulhadj-bouira) 2017/2018
- [7] : Article, Le Système « Beni-Haroun » (Oued Kebir-Rhumel, Algérie) : Aménagements Hydrauliques Et Contraintes Morpho-Géologiques, (AZZEDINE MEBARKI, CHAOUKI BENABBAS, FLORINA GRECU)
- [8] : A. Bechroune, Elaboration d'une base de données hydrologique du bassin versant de la Soummam via le modèle hydrologique HEC-HMS, Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme de Magister, (2011).
- [9] : F. Nalouf, Estimation du bilan hydrologique à l'échelle du bassin versant de la Soummam, Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme de Master II, (2010-2011).
- [10] : Mémoire, L'envasement Des Barrages De Beni-Haroun (Mila) Et De KoudiatAcerdoune (Bouira), 2016 – 2017
- [11] : Thèse de doctorat, Impact de l'érosion hydrique sur l'envasement du barrage Cheliff-Ghrib. 2017
- [12] : Mémoire, Estimation de l'érosion dans le bassin versant d'oued labiod par le modèle de gavrilovic "érosion potentiel méthode -EPM-", 2018.