

Département des sciences de la terre

Licence en sciences et techniques

Eau et environnement

Projet de fin d'étude

*Caractérisation morphométrique du
bassin versant de N'fis*

Réalisé par : ID LAMINE AICHA

Soutenu le : 10/06/2024

Devant le jury composé de :

- Mr. Brahim IGMOULLAN, Encadrant, FST Marrakech
- Mr. Hassan Ait Naceur, Encadrant
- Mr. Abdelfattah AZIZI, Examineur, FST Marrakech
- Mme.Samira ESSARAJ, observatrice, FST Marrakech

ANNEE UNIVERSITAIRE : 2023/2024

Remerciement

Avant de présenter mon projet de fin d'étude, je tiens à remercier

الله

Qui m'a donnée la force, la volonté et le courage pour réussir ce travail.

Mes chaleureux remerciements à mes très chers parents pour leurs sacrifices matériels et moraux qu'il m'a accordés le long de mes années d'études.

Je remercie également monsieur **BRAHIM IGMOLLAN** mon encadrant pédagogique, qui m'a fait part de son savoir-faire et qui est toujours à l'écoute.

J'adresse mes plus vifs remerciements à mon encadrant monsieur **AIT NACEUR HASSAN**, pour la qualité de son encadrement exceptionnel, pour sa patience, sa rigueur, sa disponibilité, ses conseils éclairés et les encouragements durant ma préparation de ce projet

Mes remerciements sont adressés à l'examineur pour sa présence en donnant la peine d'examiner ce travail.

Enfin j'adresse mes remerciements à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail au département de géologie de la faculté des sciences et techniques.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

Ma famille ID LAMINE surtout mes parents qui m'ont aidée et soutenu à
poursuivre mes études dans des meilleures conditions.

Mon frère qui m'a encouragée durant toute ma vie scolaire

Mes enseignants pour leurs efforts déployés pour que je peux avoir une bonne
formation.

Mes chères amies avec qui j'ai passé des meilleurs moments.

Résumé

Les bassins versants jouent un rôle crucial dans l'économie des pays, ce qui justifie l'importance de leur étude approfondie sous tous les aspects. Le bassin versant de l'oued N'fis est un sous bassin du grand bassin de Tensift qui se situe à une cinquantaine de Kilomètres au sud-ouest de la ville de Marrakech, sur le flan nord du Haut Atlas, et occupe une superficie de 1712,22Km².

Notre objectif principal est de mener une étude de caractérisation morphométrique de ce bassin afin de déterminer ses caractéristiques géométriques et topographique, à l'aide de télédétection et l'outil SIG, en calculant plusieurs indices de compacité, l'indice d'Horton, l'indice de pente et la densité de drainage. Grâce à ces études, nous avons pu observer et interpréter la forme du bassin et le type de son réseau hydrographique, et savoir ses altitudes et sa pente.

Les différents calculs des paramètres ont montré que le bassin versant de N'fis a une forme allongée, marqué par un relief très fort, un réseau hydrographique dendritique avec un ensemble de cours d'eau ramifiés et par une végétation dense.

Liste des abréviations

- **Dd** : densité de drainage.
- **Ds** : la dénivelée spécifique.
- **Du** : la dénivelée utile.
- **Ig** : Indice global de pente.
- **Ir** : Indice de roche.
- **KG** : Indice de compacité.
- **KH** : Indice de Horton.
- **MNT** : Modèle Numérique Terrestre.
- **NDVI** : Normalized Différence Végétation Index (indice de végétation par différence normalisé).
- **Ni** : nombre de cours d'eau.
- **PIR** : proche infrarouge.
- **SIG** : Système d'Information Géographique.
- **TC** : Temps de concentration.

Table des matières

| | |
|--|-----------|
| REMERCIEMENT | 2 |
| DÉDICACE | 3 |
| RESUME | 4 |
| LISTE DES ABREVIATIONS..... | 5 |
| TABLE DES MATIERES | 6 |
| LISTE DES FIGURES | 8 |
| LISTE DES TABLEAUX..... | 9 |
| INTRODUCTION GENERAL..... | 10 |
| CHAPITRE1 : ZONE D'ETUDE ET MATERIELS UTILISES | 12 |
| .I CADRE GENERALE DE LA ZONE D'ETUDE | 13 |
| I.1 Situation géographique : | 13 |
| I.2 Cadre litho-stratigraphique | 13 |
| I.2.1 Le socle..... | 14 |
| I.2.2 Les terrains de couverture | 14 |
| I.3 La tectonique :..... | 15 |
| I.4 Contexte climatique :..... | 16 |
| II. MATERIEL ET METHODOLOGIE : | 19 |
| II.1 Supports et documents de base :..... | 19 |
| II.1.1 Supports télé-déTECTÉS : | 19 |
| II.1.2 Supports cartographiques..... | 22 |
| CHAPITRE 2 : MORPHOMETRIE DU BASSIN VERSANT DE N'FIS..... | 24 |
| I. L'ETUDE MORPHOMETRIQUE DE BASSIN VERSANT DU N'FIS : | 25 |
| I.1 Définition d'un bassin versant : | 25 |
| I.2 La morphométrie et son objectif :..... | 25 |
| I.3 Les caractéristiques morphométriques du bassin versant de N'fis | 26 |
| I.4 Indices de forme | 26 |

| | | |
|-----------------------------|---|-----------|
| I.4.1 | La surface..... | 27 |
| I.4.2 | Le périmètre..... | 27 |
| I.4.3 | Indice de compacité..... | 27 |
| I.4.4 | Rectangle équivalent..... | 28 |
| I.4.5 | Indice de Horton :..... | 29 |
| I.5 | Les caractéristiques topographiques (le relief) | 30 |
| I.5.1 | L'altitude :..... | 30 |
| I.5.2 | Les indice de pente | 35 |
| I.5.3 | Exposition des versants..... | 43 |
| I.6 | Caractéristiques du réseau hydrographique..... | 45 |
| I.6.1 | Type du réseau hydrographique du bassin versant du N° fis. | 46 |
| I.6.2 | Ordre d'écoulement | 48 |
| I.6.3 | La densité de drainage | 50 |
| I.6.4 | La densité hydrographique..... | 50 |
| I.7 | Indice de végétation | 52 |
| CONCLUSION | | 55 |
| BIBLIOGRAPHIE :..... | | 56 |

Liste des figures

| | |
|--|----|
| Figure 1: Localisation géographique de la zone d'étude..... | 13 |
| Figure 2: Carte géologique du bassin versant de N'fis extrait de la carte Maroc 1/1000000000. | 15 |
| Figure 3: Précipitations annuelles du bassin de N'fis. | 19 |
| Figure4 : Exemple de satellite à capteur actif dans son orbite. | 20 |
| Figure 5: Bloc-diagramme montrant la forme générale d'un bassin versant..... | 25 |
| Figure 6: Rapport de forme d'un bassin versant selon Strahler (Namous, 2012)..... | 27 |
| Figure 7: Classification des bassins versants en fonction de l'indice KG (in Elaloui, 2017). .. | 28 |
| Figure 8 : Carte d'altitudes du bassin versant de N'fis..... | 31 |
| Figure 9: Diagramme des tranches d'altitude en fonction de leurs pourcentages de surface. .. | 33 |
| Figure 10: Courbe hypsométrique du bassin versant de N'fis..... | 33 |
| Figure 11: Carte des pentes topographiques du bassin versant de N'fis. | 36 |
| Figure 12: Répartition des pentes topographiques dans le bassin versant du N'fis en pourcentage de la superficie totale du terrain. | 37 |
| Figure 13: Profil en long de l'Oued N'fis montrant des ruptures de pente..... | 41 |
| Figure 14: Origines des ruptures du profil en long des cours d'eau. (a) : contrôle lithologique ; (b) : contrôle hydrologique ; (c) : contrôle tectonique ; (d) : contrôle eustatique (Namous 2011)..... | 42 |
| Figure 15: Carte d'expositions des versant au bassin versant du N'fis. | 43 |
| Figure 16: Diagramme des versent du bassin versant de N'fis selon leurs expositions en pourcentage des surfaces. | 45 |
| Figure 17: Classification du réseau hydrographique selon Howard 1967 (Ait Naceur, 2023).. | 46 |
| Figure 18: Carte de réseau hydrographique du bassin versant du N'fis. | 47 |
| Figure 19: Oued N'fis avec des sections rectilignes et d'autres méandriformes. | 48 |
| Figure 20: Carte d'ordre d'écoulement du bassin versant de N'fis. | 49 |
| Figure 21: Carte de densité du réseau hydrographique du bassin versant de N'fis. | 51 |
| Figure 22: Carte d'NDVI au bassin versant du N'fis (en utilisant des images multi spectrales Sentinel 2). | 53 |
| Figure 23: les classes de l'Indice NDVI en pourcentage de surface..... | 54 |

Liste des Tableaux

| | |
|--|----|
| Tableau 1: Précipitations annuelles dans trois stations pluviométriques du bassin de N'fis. | 16 |
| Tableau 2: Caractéristiques des image multispectrales Sentinel 2. | 21 |
| Tableau3 : Classification des sous bassins selon l'indice. | 29 |
| Tableau4 : Quelques indice morphométriques de forme du bassin versant de N'fis. | 30 |
| Tableau5 : Surface et pourcentage correspondants des tranches d'altitude au bassin versant de N'fis. | 32 |
| Tableau6 : Calcule de l'altitude moyenne au bassin versant de N'fis. | 35 |
| Tableau 7: Classification du relief en fonction de la dénivelée spécifique (Amaya, 2015) | 39 |
| Tableau 8: Surface et pourcentage correspondants des versants selon leurs expositions au soleil. | 44 |
| Tableau 9: tableau récapitulatif des indice morphometriques du bassin versant du N'fis. | 55 |

INTRODUCTION GENERAL

Dans le cadre de l'aménagement de territoire et la gestion des ressources en eau en but de développement durable, l'étude des caractéristiques morphométriques d'un bassin versant est d'une importance capitale, car le bassin versant est le principal système naturel responsable de la collecte et du transport de l'eau dans les rivières, ruisseaux et autres cours d'eau. La quantité de l'eau qui s'écoule dépend des précipitations qui se produisent, de la capacité d'absorption, d'infiltration et de saturation du sol, de la forme du terrain (plat, en pente, etc.), de la transpiration des plantes, de l'évaporation et d'autres facteurs. En outre, l'utilisation excessive des eaux de surface par les humains réduira la quantité d'eau dans le bassin.

Autrefois, l'étude des caractéristiques morphologiques des bassins versants est une tâche délicate et demande énormément d'efforts, en effet c'est l'analyste qui fait l'ensemble du travail. Actuellement, le développement de l'outil informatique et l'amélioration de sa performance, ainsi que la disponibilité des données nécessaires a rendu cette tâche plus facile avec des résultats améliorés qualitativement et quantitativement.

Le présent travail consiste à réaliser une étude morphométrique du bassin versant de l'oued N'fis qui fait partie du Haut Atlas de Marrakech. Deux barrages ont été construit sur l'oued N'fis, à savoir celui de de Lalla Takerkoust et celui de Ouirgane, et font une source importante d'eau pour la ville de Marrakech et son entourage. Cette étude a permis de déduire les caractéristiques morphométriques de ce cette zone, ce qui est essentiel pour la gestion des ressources en eau, la prévision et la prévention des risque naturel tel que les inondations, la protection de l'environnement et le développement durable.

Cette étude est basée sur le traitement, à l'aide des outilles SIG, d'un ensemble de données couvrant cette zone. Elle s'organise en deux chapitres comme suit :

- ✓ Le premier chapitre est réservé à la situation géographique du bassin versant de N'fis, décrire ses caractéristiques géologiques et son contexte climatique. Ensuite nous avons met en évidence l'ensembles des données et du matériels utilisé dans cette étude.

- ✓ Le deuxième chapitre concerne l'étude morphométrique du bassin versant de N'fis, ses caractéristiques géométriques, topographiques et la géométrie de son réseau hydrographique.

Chapitre1 : Zone d'étude et matériels utilisés

I. Cadre générale de la zone d'étude

I.1 Situation géographique :

Le bassin versant de l'oued N'fis est un sous bassin appartient au grand bassin hydraulique de Tensift qui est l'un des principaux bassins du Maroc, L'accès se fait par la route régionale 203 reliant Marrakech à Taroudant à travers le col de Tizi n'Test. Il se localise à environ 50 Km au sud -ouest de la ville de Marrakech. Plus précisément, il se situe sur le flan nord du Haut Atlas entre les longitudes 7°55 et 8°40 W et entre les latitudes 30°5 et 31°20 N, avec une superficie d'environ 1712Km² au niveau du barrage Lalla Takerkoust. Ce bassin-est limité au nord par l'oued Tensift, et au sud par les chaines montagneuses du Haut Atlas, à l'ouest par Assif Elmal et à l'est par l'oued Rhéraya (figure1).

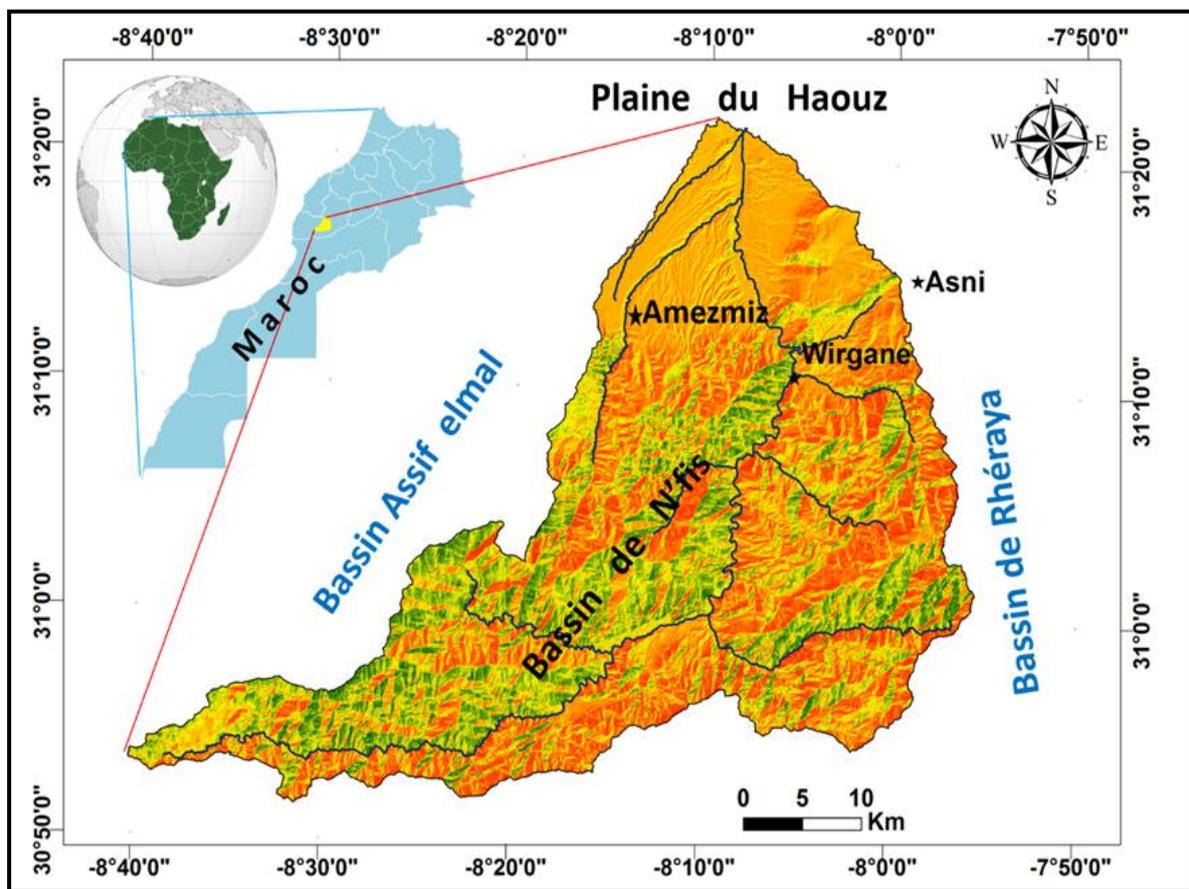


Figure 1: Localisation géographique de la zone d'étude.

I.2 Cadre litho-stratigraphique

Le bassin versant du N'fis se compose essentiellement d'un socle précambrien et Paléozoïque affecté par l'orogénèse hercynienne dont la couverture est d'âge Mésozoïque et Cénozoïque (Figure2).

I.2.1 Le socle

➤ **Le précambrien** : La série du précambrien est formée essentiellement de laves d'andésites, dacites et de rhyolites, auxquelles s'ajoutent des granites, microgranites, diorites, granodiorites, brèches volcaniques, tufs, alors que les quartzites et les schistes sont peu représentés.

➤ **Le Paléozoïque** : Il est représenté par une dominance des terrains grésos-schisteux qui vont du Cambro-Ordovicien au Viséen supérieur. Le Silurien est formé par des terrains schisteux et quartziques, localisés dans la zone de confluence avec l'oued Tensift. Le Cambro-Ordovicien est constitué par un ensemble monotone de grès et de schistes de plateforme correspondant au Cambrien moyen et en grande partie à l'Ordovicien. Le Viséen est faiblement représenté dans le bassin du l'oued N'fis. Il est formé en grande partie par des schistes et des conglomérats, des grès et du calcaire (Amaya 2015).

I.2.2 Les terrains de couverture

➤ **Le Trias** : La série triasique est formée d'une alternance de conglomérats, grès, marnes ou argiles, repose sur le bâti hercynien en discordance angulaire. Au-dessus, vient une série de siltites souvent évaporitiques qui s'étend un peu au Lias. Les siltites sont coiffées par un niveau de basaltes fini-triasiques qu'on observe au nord-est du bassin.

➤ **Le Jurassique-Crétacé-Eocène** : Au-dessus des basaltes fini-triasiques, affleure une série rouge Gréseuse qui correspondrait aux couches rouges évaporitiques du Lias et au Jurassique moyen. Sur laquelle repose une série formée de grés et de silt à évaporite, qui est séparée de la première par des dépôts marno-calcaires de l'Apto-Albien.

➤ **Le Crétacé** est généralement formé d'une barre carbonatée du Turonien sur laquelle repose un Sénonien évaporitique qui est beaucoup représenté dans le nord du bassin.

➤ **L'Eocène** est formé par des calcaires phosphatés.

➤ **Le Mio-Pliocène** : il repose sur les calcaires phosphatés de l'Eocène en discordance cartographique. Il est constitué par des dépôts d'accumulation gréseuse et conglomératique, s'organisant en méso-séquences grano-décroissantes.

➤ **Le Quaternaire** ancien formé par des dépôts encroûtés, des limons anciens, de glacis terrasses et coulées de solifluxion. Tandis que le quaternaire récent composé par des formations modernes (d'éboulis et alluvions) et des terrasses limoneuses avec des galets de différente nature (Amaya 2015).

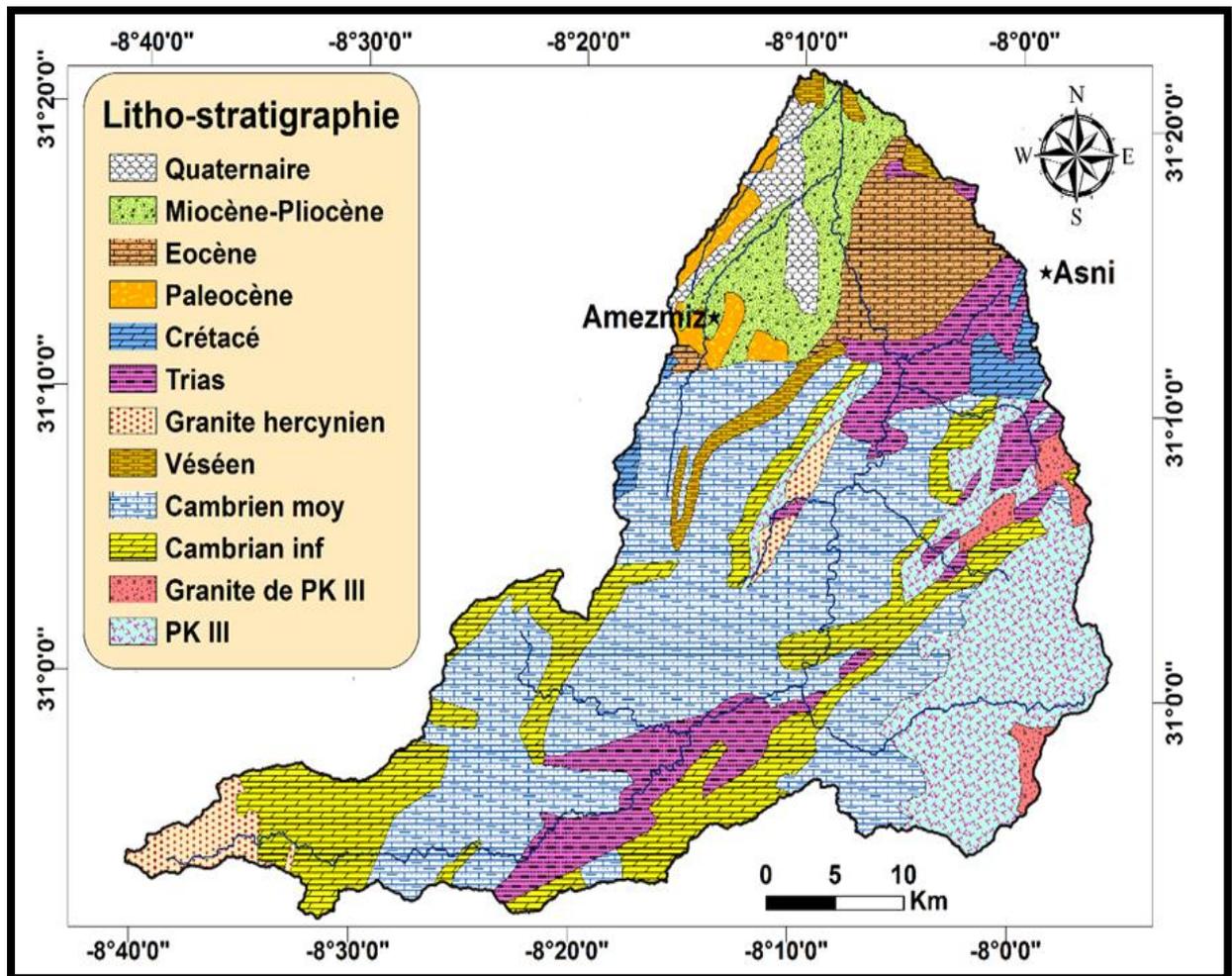


Figure 2: Carte géologique du bassin versant de N'fis extrait de la carte Maroc 1/1000000000.

I.3 La tectonique :

Les terrains paléozoïques qui constituent le socle sont affectés par la déformation hercynienne. Cette déformation est caractérisée par des failles dont la direction est NNS-SSW. La chaîne atlasique est affectée par les mêmes failles que le socle. Ces failles ont joué un rôle dans l'ouverture des bassins triasiques.

L'oued N'fis est adapté aux failles méridiennes. La réactivation des failles préexistantes en relation avec la surrection haut-atlasique, contrôle localement la sédimentation de type fluo-torrentiel et gravitaire dans la vallée le long de l'oued N'fis (Amaya2015).

I.4 Contexte climatique :

Le bassin versant du N'fis se trouve dans l'aire subtropicale couverte souvent par l'anticyclone des Açores. Cette position lui confère un climat continental de type semi-aride, influencé par la présence du relief du Haut Atlas.

Les précipitations sont en général, faibles et caractérisées par une variabilité spatiotemporelle. La pluviométrie moyenne annuelle est de l'ordre de 300 mm dans la plaine, contre 500 mm à 600 mm sur les sommets du Haut Atlas. L'importance des précipitations à ce niveau est liée aux baisses des températures et à l'orographie.

La température à l'inverse des précipitations est assez régulière à l'échelle du temps. Les mesures prises le long de la période de 1973 à 2012 au barrage de Lalla Takerkoust, situé à une cinquantaine de kilomètre au sud-est du Marrakech montrent une variation saisonnière forte. La température moyenne est de **18,6 °C**, avec une température maximale absolue de **46°C** et une température minimale absolue de **-7.5°C**. Les mois les plus froids au cours de l'année sont décembre et janvier et les plus chauds sont juillet et Aout (Amaya 2015).

I. 5 Les précipitations annuelles

Pour avoir une idée sur les précipitations au niveau de la région du bassin versant de N'fis, nous avons exploité les données pluviométriques enregistré dans trois stations à savoir celui d'Iguir Nkouris, celui Imin El Hammam et celui barrage Takerkoust.

Le tableau1 suivant résume les précipitations enregistrées dans ces trois stations depuis 1975 jusqu'à 2021(Données de l'ABHT).

Tableau 1: Précipitations annuelles dans trois stations pluviométriques du bassin de N'fis.

| Période | Iguir N'kouris | Imi n'lhmmam | Barrage Takekoust |
|-----------|----------------|--------------|-------------------|
| 1975-1976 | 128 | 458,4 | 227 |
| 1976-1977 | 203 | 359,7 | 201 |
| 1977-1978 | 222 | 396,5 | 259 |
| 1978-1979 | 176 | 205,1 | 130 |
| 1979-1980 | 212 | 471,5 | 233 |
| 1980-1981 | 158 | 254,4 | 195 |
| 1981-1982 | 167 | 500,6 | 270 |
| 1982-1983 | 106 | 239,1 | 95 |

| | | | |
|------------------|-------|-------|-------|
| 1983-1984 | 139 | 287,5 | 133 |
| 1984-1985 | 261 | 405,7 | 220 |
| 1985-1986 | 106 | 202,2 | 174 |
| 1986-1987 | 129 | 230,3 | 200 |
| 1987-1988 | 284 | 487,4 | 278 |
| 1988-1989 | 422 | 485,6 | 303 |
| 1989-1990 | 402 | 309,2 | 165 |
| 1990-1991 | 155 | 393 | 279 |
| 1991-1992 | 320 | 397,6 | 180 |
| 1992-1993 | 76 | 225,9 | 103 |
| 1993-1994 | 249 | 374,9 | 213 |
| 1994-1995 | 196 | 309,8 | 321 |
| 1995-1996 | 419 | 553,3 | 360 |
| 1996-1997 | 271 | 522 | 441 |
| 1997-1998 | 222 | 401,8 | 270 |
| 1998-1999 | 133 | 393,6 | 211 |
| 1999-2000 | 247 | 319,7 | 174 |
| 2000-2001 | 38 | 161,6 | 157 |
| 2001-2002 | 155 | 379,9 | 194 |
| 2002-2003 | 140 | 221,1 | 312 |
| 2003-2004 | 188 | 482,6 | 228 |
| 2004-2005 | 151 | 276,7 | 110 |
| 2005-2006 | 186 | 389,6 | 276 |
| 2006-2007 | 278 | 373,7 | 181 |
| 2007-2008 | 185 | 206,8 | 120 |
| 2008-2009 | 350 | 523,1 | 327 |
| 2009-2010 | 372,7 | 397,4 | 209 |
| 2010-2011 | 425,7 | 562,6 | 296,6 |
| 2011-2012 | 165,2 | 320 | 183,3 |
| 2012-2013 | 211,3 | 404,2 | 254,8 |
| 2013-2014 | 164,2 | 308,5 | 212,1 |
| 2014-2015 | 405,6 | 473,2 | 307,7 |
| 2015-2016 | 205,8 | 400,5 | 169,8 |

| | | | |
|------------------|-------|-------|-------|
| 2016-2017 | 220 | 354 | 201,7 |
| 2017-2018 | 133,8 | 253,1 | 251,7 |
| 2018-2019 | 205,5 | 318 | 278,6 |
| 2019-2020 | 97,9 | 227,2 | 130,1 |
| 2020-2021 | 222,4 | 325,6 | 198,6 |

L'analyse des courbes des précipitations annuelles montre une évolution temporelle et spatiale des précipitations avec une alternance d'années humides et d'années sèches. On remarque que les précipitations maximales ont été enregistrées pendant les années hydrologiques 1988-1989, 1995-1996 et 2010-2011 à Iguir N'kouris, avec 420 mm, 1995-1996 avec 570 mm et 2010-2011 avec 575 mm à Imin El Hammam et 1995-1996 à barrage Takerkoust avec 430 mm.

Les années 1982-1983, 2000-2001 sont les plus sèches selon les stations respectives : barrage Takerkoust, Iguir N'kouris et Imin El Hammam (Figure 3). La station Imin El Hammam présente une pluviosité plus élevée par rapport aux deux autres stations. Cela est dû à l'altitude élevée caractérisant un milieu humide et pluvieux à effet d'un écoulement plus important. La station d'Iguir N'kouris présente la pluviosité la plus faible malgré qu'elle soit installée à une altitude de 1100m. cela peut s'expliquer par sa situation dans une dépression abritée par le relief montagneux.

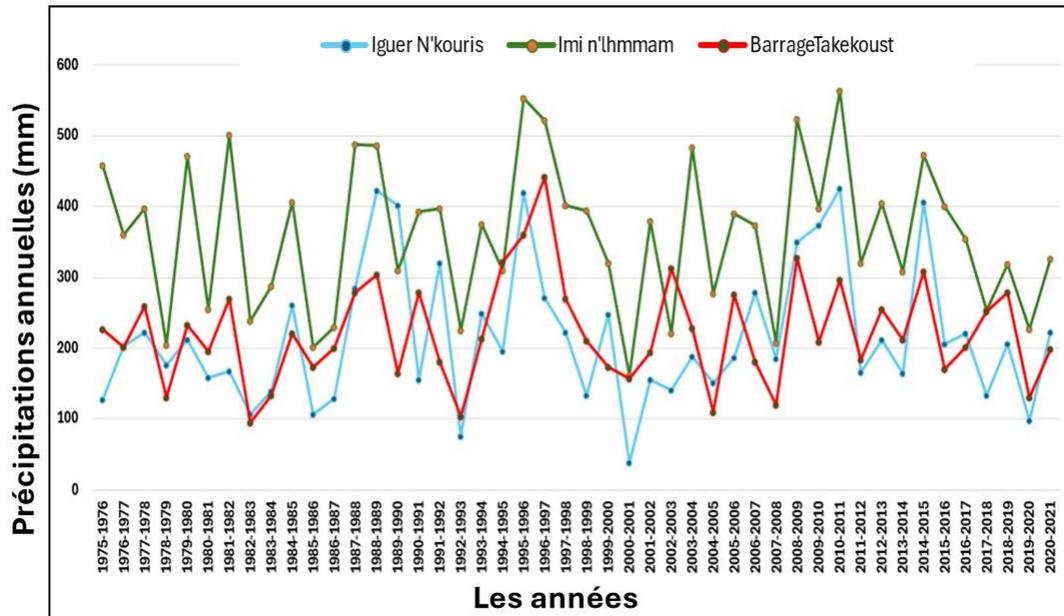


Figure 3: Précipitations annuelles du bassin de N'fis.

II. Matériel et méthodologie :

II.1 Supports et documents de base :

L'étude morphométrique du bassin versant de N'fis nécessite l'utilisation des données extraites de plusieurs supports télé-détectés et d'autres extraites à partir de divers supports cartographiques.

II.1.1 Supports télé-détectés :

La télédétection est l'ensemble des techniques utilisées pour collecter des images de la surface de la Terre (y compris l'atmosphère et les océans) et détecter leurs caractéristiques physiques, sans entrer en contact direct avec celle-ci. De plus elle englobe tous processus qui permet la collecte et l'enregistrement de l'énergie d'un rayonnement électromagnétique émis ou réfléchi, ainsi que le traitement de l'information qu'il représente, avant de la transposer. Pour appliquer cette méthode on utilise des capteurs embarqués et satellitaires (Albouhouari 2023). Un capteur enregistre l'énergie électromagnétique qui est renvoyée par la cible. Il peut s'agir d'une caméra, d'un radiomètre, d'un lidar, d'un radar, etc., selon la région du spectre électromagnétique étudiée. Ces capteurs sont de deux types :

Les capteurs passifs : Les capteurs passifs de télédétection sont des instruments qui détectent et mesurent la lumière naturelle réfléchié ou émise par les objets ou

les zones observées. Ils ne produisent pas leur propre énergie, contrairement aux capteurs actifs. Exemple le visualisateur à infrarouge, les radiomètres.

Les capteurs actifs : sont des instruments qui émettent eux-mêmes les rayonnements pour illuminer les objets en mesurant l'énergie réfléctée par la cible. Le capteur actif le plus utilisé en télédétection est le radar. Les données recueillies par la télédétection sont ensuite traitées par des logiciels informatiques (Figure 4).

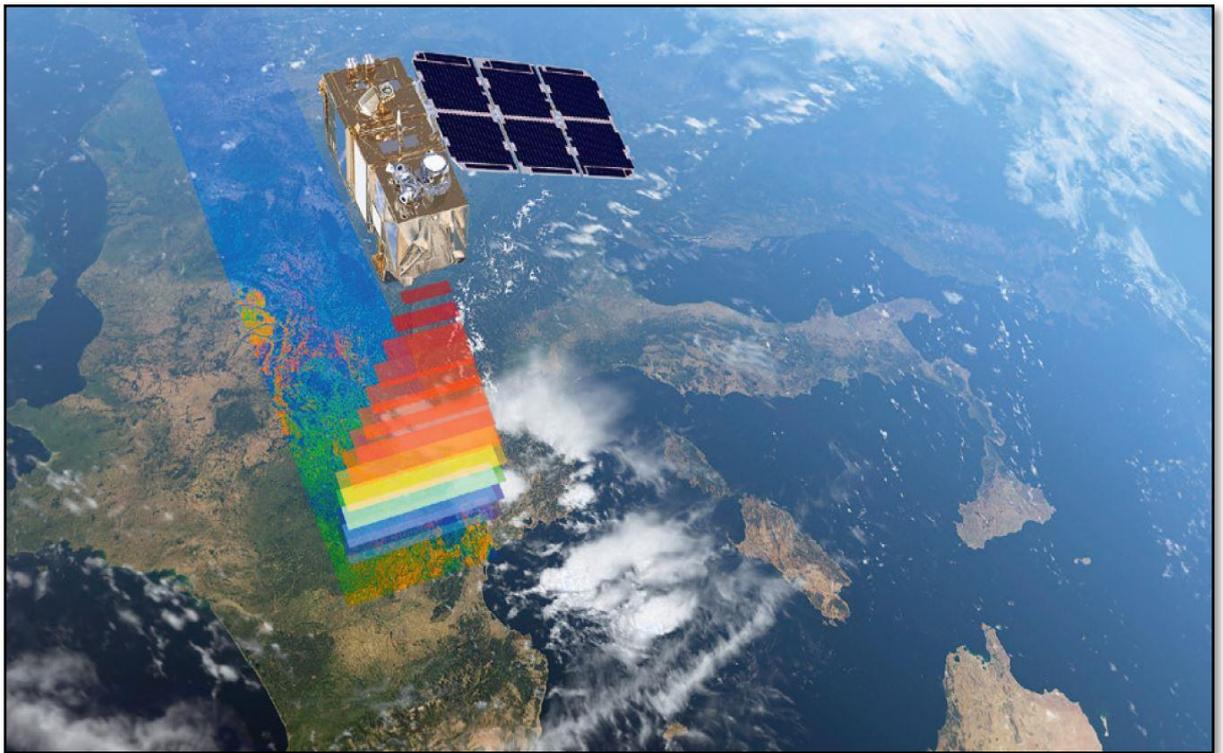


Figure 4: Exemple de satellite à capteur actif dans son orbite.

(<https://www.reussir.fr/lait/la-teledection-pour-piloter-le-paturage.>)

II.1.1.1 Les images satellitaires :

Les images satellitaires sont des images qui sont obtenues grâce à des appareils photographiques qui sont placés dans des satellites qui orbitent autour de la terre. Ces images sont très utiles dans de nombreux domaines exemple : la cartographie, la géologie, l'agriculture, la foresterie, la défense et bien d'autres. Ces images satellitaires permettent aux chercheurs scientifiques de surveiller et d'étudier l'environnement terrestre de manière plus efficace et à une plus grande échelle.

Pour notre étude nous avons utilisés les bands multispectrales Sentinel-2 pour leurs résolutions convenables à notre échelle d'étude. Le satellite Sentinel-2 fournit des images

optiques haute résolution, avec une résolution de 10 m, et une couverture mondiale de la surface terrestre tous les 5 jours. Cela en fait un outil efficace pour la surveillance environnementale et la gestion de la dégradation des sols. De plus, Sentinel-2 fournit des bandes spectrales dans une large gamme du spectre électromagnétique – y compris le visible, le NIR, l'infrarouge à ondes courtes et quatre bandes rouges.

La résolution des images optiques est assurée par deux satellites : Sentinel-2A et Sentinel-2B lancés en orbite polaire respectivement le 23 juin 2015 et le 7 mars 2017. Le tableau suivant montre quelques caractéristiques des bandes multispectrales Sentinel-2 (Ait Naceur2023 tableau 2).

Tableau 2: Caractéristiques des image multispectrales Sentinel 2.

| Bande | Résolution (m) | Longueur d'onde centrale (nm) | Largeur de bande (nm) | Objectif |
|--------------|-----------------------|--------------------------------------|------------------------------|--------------------------------------|
| B01 | 60 | 443 | 20 | Détection d'aérosols |
| B02 | 10 | 490 | 65 | Bleu |
| B03 | 10 | 560 | 35 | Vert |
| B04 | 10 | 665 | 30 | Rouge |
| B05 | 20 | 705 | 15 | Classification de la végétation |
| B06 | 20 | 740 | 15 | Classification de la végétation |
| B07 | 20 | 783 | 20 | Classification de la végétation |
| B08 | 10 | 842 | 115 | Proche infrarouge |
| B08A | 20 | 865 | 20 | Classification de la végétation |
| B09 | 60 | 945 | 20 | Vapeur d'eau |
| B10 | 60 | 1375 | 30 | Cirrus |
| B11 | 20 | 1610 | 90 | Discrimination neige / glace / nuage |
| B12 | 20 | 2190 | 180 | Discrimination neige / glace / nuage |

II.1.1.2 Modèle numérique terrestre (MNT).

Un MNT est une représentation de la surface d'une zone terrestre créée à partir de données d'altitude du terrain sous une forme adaptée à son utilisation par un ordinateur. En cartographie les altitudes sont habituellement représentées par des courbes de niveaux et des

points cotés. Suivant la taille de la zone couverte la plupart des MNT utilisent, pour les petites zones, un maillage régulier carré ou, pour les grandes zones, un maillage pseudo carré dont les côtés sont des méridiens et des parallèles. Ce modèle ne prend pas en compte le relief, les sommets des arbres et l'élévation des bâtiments. Il est indispensable pour la délimitation et la détermination des caractéristiques géométriques, de manière numérique, d'un bassin versant.

Dans le cas de bassin versant de l'oued N'fis nous avons trois scènes d'MNT ALOS-PALSAR, qui couvrent toute la zone, téléchargés depuis site : <http://vertex.daac.acf.alaska.edu> ayant une résolution spatiale égale à 12,5 m avec les références suivantes :

- ✓ AP_07642_FBD_F0600_RT1.dem.tif,
- ✓ AP_07394_FBD_F0610_RT1.dem.tif
- ✓ AP_07394_FBD_F0600_RT1.dem.tif.

Pour exploiter ces trois fichiers, il faut les rassembler en une seule mosaïque.

II.1.2 Supports cartographiques

Les cartes topographiques au 1/100 000 : le bassin de N'fis est couvert par cinq feuilles à savoir : Amezmiz, Toubkal, Taliwine, Tizi n'test et celle d'Igli.

La carte géologique Maroc au 1/ 500 000 : C'est une carte géopositionnée en fonction de la projection conique conforme de Lambert nord Maroc. Cette carte permettra de déduire les unités géologiques qui affleurent dans le secteur étudié (Ait Naceur 2023).

II.1.2.1 Préparation des données :

II.1.2.1.1 Logiciels utilisés :

Le traitement des données dans notre étude a été effectué avec les logiciels suivants :

- **Arc GIS 10.4.01, Global Mapper**, pour le traitement, le géo-positionnement, l'extraction et la mise en forme des cartes.
- **Google Earth** pour vérifier la fiabilité des résultats.
- **Excel** pour le traitement et l'analyse statistique des données et génération des graphiques.
- **PowerPoint** pour créer des dessins et effectuer des rectifications.

II.1.2.1.2 Prétraitement des données :

Les supports de données collectées pour cette étude sont en différents formats avec des échelles hétérogènes, donc le prétraitement de ces données est indispensable pour la

construction d'une base de données, vectorielle ou sous format raster, avec les mêmes références spatiales et exploitable sous SIG. Les prétraitements effectués sur ces supports sont:

➤ **Le calage (géoréférencement) des supports :** Permet de les mettre sous les mêmes références des coordonnées géographiques. Tous ces supports sont géoréférencés, pour notre zone d'étude, en fonction de la projection conique conforme de Lambert nord Maroc à l'aide de logiciel ArcGIS. Les cartes topographiques ont été géoréférencées séparément avant d'être assemblées en une seule mosaïque pour éviter le décalage entre les cartes qui pourrait se produire lors du géoréférencement sur la mosaïque. La fiabilité de la projection est justifiée par la superposition exacte de l'ensemble des couches de données utilisées.

➤ **L'extraction de la zone d'étude :** les supports de base couvrent une grande surface, et notre étude concerne que le territoire du bassin versant du N'fis, donc il est utile de délimiter cette zone d'intérêt en se basant sur les fichiers MNT mise en une seule mosaïque. La superficie délimitée pour un bassin versant dépend de l'emplacement du point d'exutoire. Pour cette étude nous avons choisi l'emplacement du Barrage Lalla Takerkoust.

➤ **Digitalisation des cartes :** la carte géologique utilisée dans cette étude est transformée en format vectorielle par digitalisation sous le logiciel ArcGIS. Cette digitalisation concerne uniquement le secteur du bassin versant du N'fis.

➤ **Standardisation de résolutions spatiales :** les diverses sources d'information citées précédemment ont des résolutions spatiales différentes. Vu que les méthodes souhaitées pour la présente recherche exigent la superposition des couches de données, il a fallu mettre les résolutions spatiales de la carte géologique, générée, et celle des images satellitaires pour qu'elles soient de l'ordre de 12,5 m, soit la même résolution que possèdent les différentes couches produites à partir du fichier MNT.

Chapitre 2 : Morphométrie du bassin versant de N'fis

I. L'étude morphométrique du bassin versant de N'fis :

I.1 Définition d'un bassin versant :

Le bassin versant est une surface délimitée par un contour qui passe par les crêtes des montagnes ou ligne de partage des eaux superficielles, à l'intérieur duquel tous les ruissellements se dirigent vers un point appelé exutoire. Ce point peut être un cours d'eau, une rivière ou un fleuve.

Les précipitations qui tombent à l'intérieur du bassin versant s'écoulent vers les parties les plus basses, formant des ruisseaux et des rivières qui se rejoignent pour former le cours d'eau principal (Figure5).

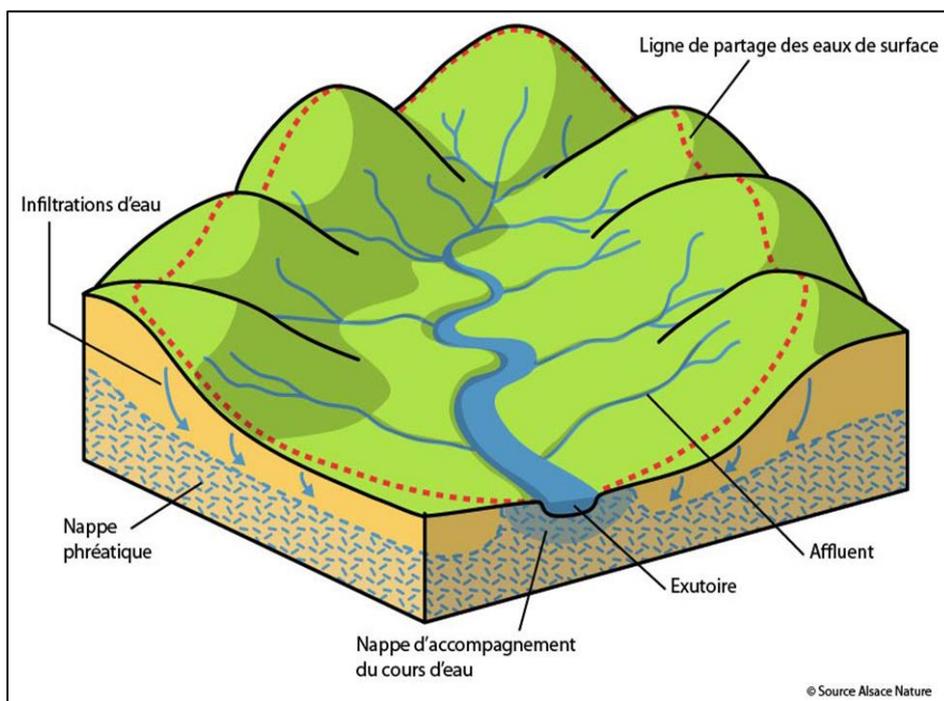


Figure 5: Bloc-diagramme montrant la forme générale d'un bassin versant.

I.2 La morphométrie et son objectif :

En géologie, la morphométrie est une science essentielle qui permet d'analyser et de quantifier les caractéristiques géométriques et topographiques des bassins versants. Les paramètres mesurés incluent la surface, le périmètre, la forme, la pente, la densité de drainage, et d'autres indices morphométriques. Ces mesures aident à comprendre la structure physique des bassins versants, leur comportement hydrologique, ainsi que l'évolution des paysages naturels.

L'objectif principal de la morphométrie appliquée aux bassins versants est de fournir une base quantitative pour l'étude des processus hydrologiques et géomorphologiques. En mesurant et en analysant des caractéristiques telles que la forme du bassin, l'organisation du réseau hydrographique, et les variations de pente, les scientifiques peuvent prédire comment l'eau se déplace à travers le bassin versant. Cela inclut la capacité du bassin à gérer les flux d'eau, la susceptibilité à l'érosion, et le potentiel de formation des crues.

De plus, la morphométrie aide à évaluer l'impact des changements environnementaux et anthropiques sur les bassins versants. Par exemple, l'urbanisation, la déforestation, et les changements climatiques peuvent modifier les paramètres morphométriques d'un bassin versant, influençant ainsi son hydrologie et sa stabilité écologique. En utilisant des outils de télédétection et des systèmes d'information géographique (SIG), les chercheurs peuvent surveiller ces changements de manière efficace et détaillée.

La morphométrie fournit des données cruciales pour la gestion durable des ressources en eau, la planification de l'utilisation des terres, et la prévention des catastrophes naturelles. Elle permet de développer des modèles prédictifs qui peuvent aider à la prise de décisions éclairées concernant l'aménagement du territoire et la conservation des écosystèmes aquatiques.

I.3 Les caractéristiques morphométriques du bassin versant de N'fis

La forme d'un bassin versant est déterminée par sa superficie, son relief, ses pentes et la configuration de son réseau hydrographique. Ces caractéristiques purement géométriques sont obtenues grâce à une étude morphométrique et cartographique. Il est essentiel de déterminer les caractéristiques morphométriques afin d'évaluer et d'analyser le comportement hydrologique d'un bassin versant.

I.4 Indices de forme

Selon (Strahler, 1952), un bassin versant peut être schématisé sous forme d'une ellipse qui représente son degré d'allongement. Les deux axes de cette ellipse pour un bassin versant donné, permettent de calculer son rapport de forme (figure 6). Cette forme est contrôlée par ses caractéristiques structurales ainsi que l'organisation et l'évolution de son réseau hydrographique.

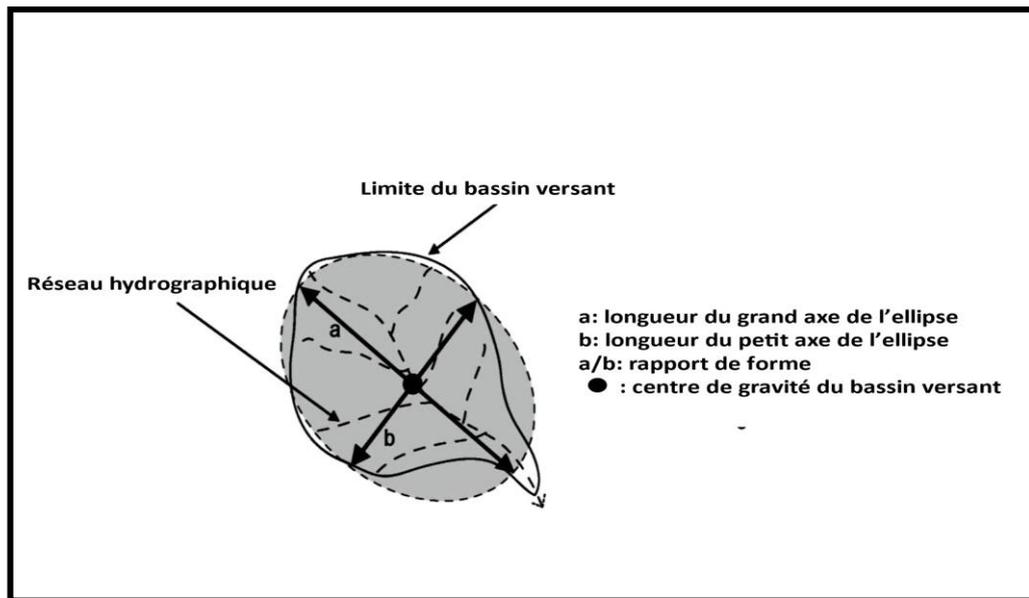


Figure 6: Rapport de forme d'un bassin versant selon Strahler (Namous, 2012).

I.4.1 La surface

La surface du bassin correspond à l'aire délimitée par l'ensemble des points les plus hauts qui constituent la ligne de partage des eaux. La surface du bassin versant, exprimée en km^2 , est calculée à partir d'un modèle numérique du terrain (MNT) et à l'aide du logiciel ArcGIS. Pour le bassin versant de N'fis, il s'étale sur une superficie de **1712,22 Km^2** .

I.4.2 Le périmètre

Exprimé en km, représente toutes les irrégularités du contour ou de la limite du bassin versant. Le contour du bassin est constitué par une ligne joignant tous les points les plus élevés. Il n'influence pas l'état d'écoulement du cours d'eau au niveau du bassin versant et peut être mesuré à l'aide d'un curvimètre ou automatiquement par des logiciels SIG. Le périmètre du bassin versant N'fis est de l'ordre de **259,82 km**.

I.4.3 Indice de compacité

L'indice de compacité de GRAVELIUS (KG) est admis par hydrologues afin de caractériser la forme d'un bassin versant. Il faut comparer la forme du bassin versant à celui d'un cercle pour lequel KG est égal à 1 (NACIRI 2022).

L'indice de compacité influence sur l'écoulement global. Ce paramètre est calculé selon la formule suivante :

$$KG = 0,28 \times \frac{P}{\sqrt{A}} \approx \frac{P}{2\sqrt{\pi A}}$$

Avec : P : Périmètre du bassin versant en (km),

A : Surface du bassin versant en (Km²)

π est la constante mathématique pi (environ égal à 3,14159).

- Si KG est supérieur à 1, la forme du bassin est allongée.
- Si KG est inférieur ou proche de 1, le bassin est de forme compacte. (Figure 7).

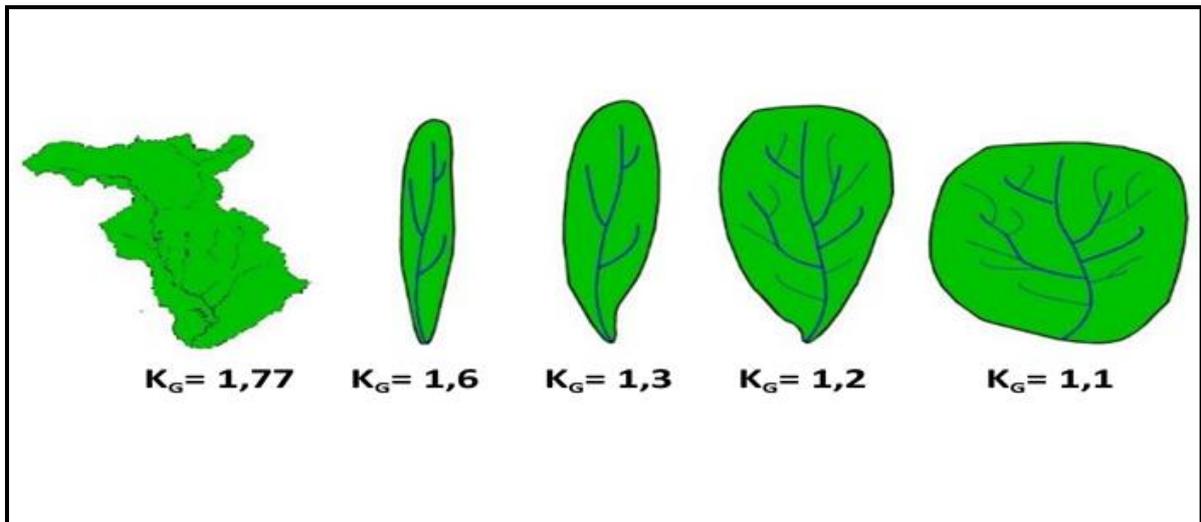


Figure 7: Classification des bassins versants en fonction de l'indice KG (in Elaloui, 2017).

Pour le bassin versant de N'fis $KG = 1,76 > 1$ donc il est de forme allongée.

I.4.4 Rectangle équivalent

Il s'agit d'une transformation géométrique du bassin versant en un rectangle de dimensions L et l, ayant la même surface et le même périmètre que le bassin. Ce paramètre permet de comparer les bassins versant du point de vue de l'écoulement (NACIRI 2022).

$$\text{Longueur du rectangle : } L = \frac{KG\sqrt{A}}{1,12} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{KG}\right)^2} \right]$$

$$\text{Largeur du rectangle : } l = \frac{KG\sqrt{A}}{1,12} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{KG}\right)^2} \right]$$

Avec :

L : Longueur du rectangle équivalent (km),
l : Largeur du rectangle équivalent (km),
KG : indice de compacité.
A : surface du bassin

I.4.5 Indice de Horton :

Indice de Horton (KH) exprime le rapport de la surface du bassin versant à la longueur du cours d'eau principal. (Ait Naceur 2023)

On le calcule par la formule suivante :
$$\mathbf{KH} = \frac{\mathbf{A}}{\mathbf{L}^2}$$

Avec :

A : Surface du bassin versant (Km²).
L : Longueur du cours d'eau principal (Km).

- ◆ Si KH est inférieur 1 cela indique que le bassin est de forme allongée.
 - ◆ Si KH est supérieur à 1 le bassin aura une forme plus ramassée.
- Pour le bassin versant de N'fis, **KH= 0,101** < 1 donc ce bassin a une forme allongée (Tableau 3).

Tableau 3: Classification des sous bassins selon l'indice.

| | Type de bassin Intervalle |
|-------------------------|---------------------------|
| $KH > 1$ et $KG < 1.15$ | Ramassé |
| $KH < 1$ et $KG > 1.5$ | Allongé |

Les différents indices de forme du bassin versant sont récapitulés dans le tableau suivant (Tableau4) :

Tableau 4 : Quelques indice morphométriques de forme du bassin versant de N'fis.

| | |
|-------------------------------|----------------|
| La surface (Km ²) | 1712,22 |
| Le périmètre (km) | 259,82 |
| Longueur équivalent Léq (Km) | 115,02 |
| Largeur équivalent léq (Km) | 14,89 |
| L'indice de Gravelius KG | 1,76 |
| L'indice de Horton KH | 0,101 |

I.5 Les caractéristiques topographiques (le relief)

Le relief présente l'ensemble des irrégularités qui caractérisent la surface de la terre. Il existe trois types de relief (les montagnes, les plaines, les plateaux) avec des critères principaux tel que : les altitudes et les pentes. Le relief influence sur le débit à cause des paramètres hydrométéorologiques tels que précipitations, température, humidité et autres.

I.5.1 L'altitude :

L'altitude est un facteur important influence l'intensité et la nature des précipitations et donc le débit au niveau de l'exutoire du bassin. De ce fait il est important d'étudier l'altimétrie des bassins versants à travers plusieurs paramètres dont les plus importants sont : la courbe hypsométrique, altitude maximale et minimale, altitude moyenne et altitude médiane.

I.5.1.1 La carte hypsométrique

La carte hypsométrique est une représentation de la distribution des différentes altitudes dans le bassin versant. La carte de la (figure 8) illustre l'orographie du bassin versant d'Oued N'fis. Elle a été réalisée en effectuant une reclassification, sous ArcGIS, des valeurs d'altitude d'un MNT de la zone selon des intervalles de 300 m. La valeur maximale d'altitude atteint 4146 m à Tizi Mlloul située à l'Est du bassin près du sommet Toubkal. La valeur minimale, quant à elle, ne dépasse pas 610 m d'altitude enregistrée au barrage de Lalla

Takerkoust. Les zones d'altitudes les plus élevées sont situées dans les parties sud-est et à sud-ouest du bassin, cependant celles les moins élevées occupent la partie septentrionale.

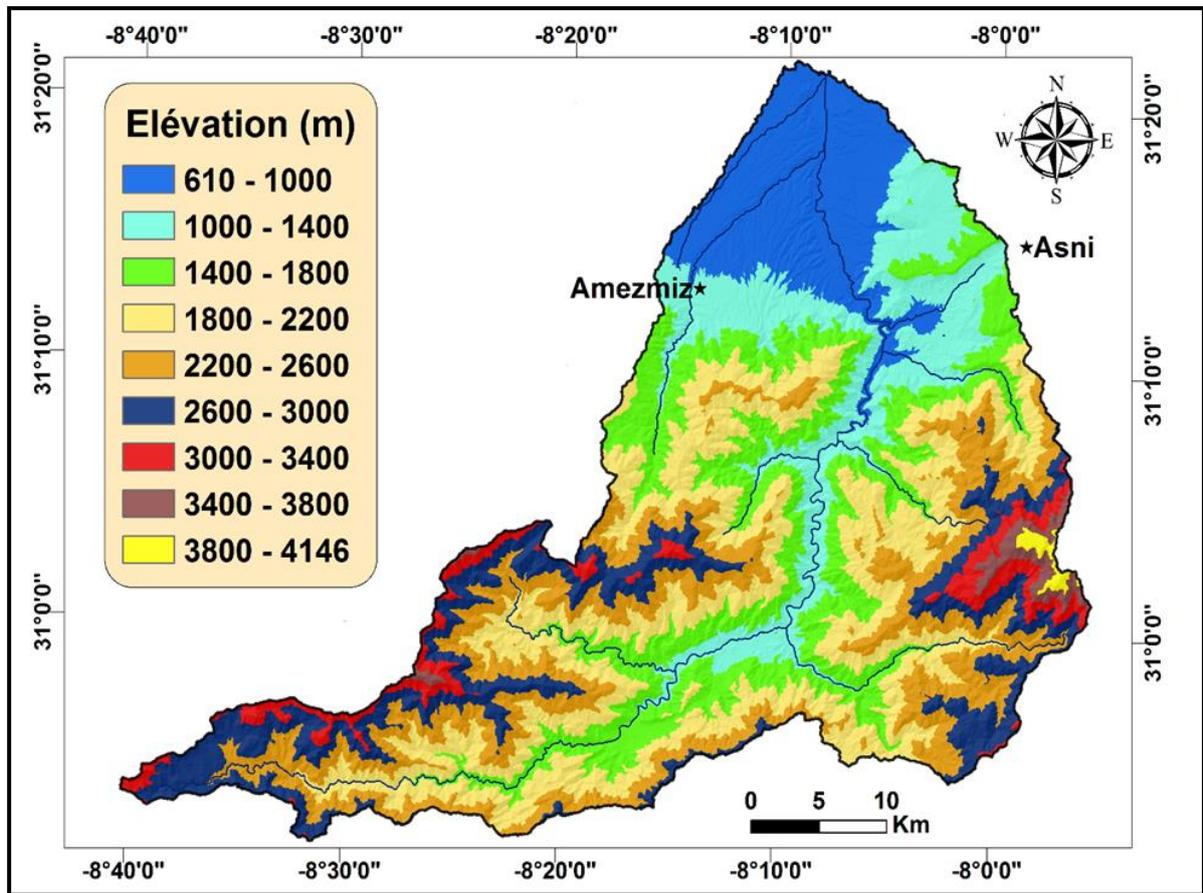


Figure 8 : Carte d'altitudes du bassin versant de N'fis.

L'analyse des données de la carte hypsométrique du bassin versant de N'fis, nous a permis de calculer les surfaces et le pourcentage de chaque tranche d'altitude (tableau 5). Ce tableau indique que plus de 40 % de la surface du bassin versant du N'fis, soit 687,10 Km², se situe au-delà de 2100 m d'altitude. Cette portion importante du territoire, située à une telle hauteur exercera une grande influence sur la quantité des précipitations que reçoit le bassin ainsi que sur la nature et la distribution, qualitative et quantitative, du couvert végétal. De ce fait, elle a une incidence indirecte sur les processus de stabilisation des versants.

Tableau 5: Surface et pourcentage correspondants des tranches d'altitude au bassin versant de N'fis.

| Classe d'altitude (m) | Surface (km²) | Pourcentage % | Pourcentages à la limite inférieure |
|------------------------------|---------------------------------|----------------------|--|
| 610-900 | 130,75 | 7,64 | 100 |
| 900 – 1200 | 166,08 | 9,70 | 92,36 |
| 1200 - 1500 | 203,46 | 11,88 | 82,66 |
| 1500 - 1800 | 233,90 | 13,66 | 70,78 |
| 1800 - 2100 | 290,91 | 16,99 | 57,12 |
| 2100 - 2400 | 259,25 | 15,14 | 40,13 |
| 2400 - 2700 | 200,90 | 11,73 | 24,99 |
| 2700 - 3000 | 136,40 | 7,97 | 13,25 |
| 3000 - 3300 | 54,57 | 3,19 | 5,29 |
| 3300 - 3600 | 23,11 | 1,35 | 2,10 |
| 3600 - 3900 | 10,02 | 0,59 | 0,75 |
| 3900 - 4146 | 2,85 | 0,17 | 0,17 |

La figure 9 présente un hypsogramme de ce bassin sur lequel on remarque que les terrains dont l'altitude comprise entre 1800 et 2100 m sont les plus dominants et représentent presque 17 % de la surface totale du bassin. De plus 69% de la surface du bassin est située entre 1200 m et 2700 m d'altitude.

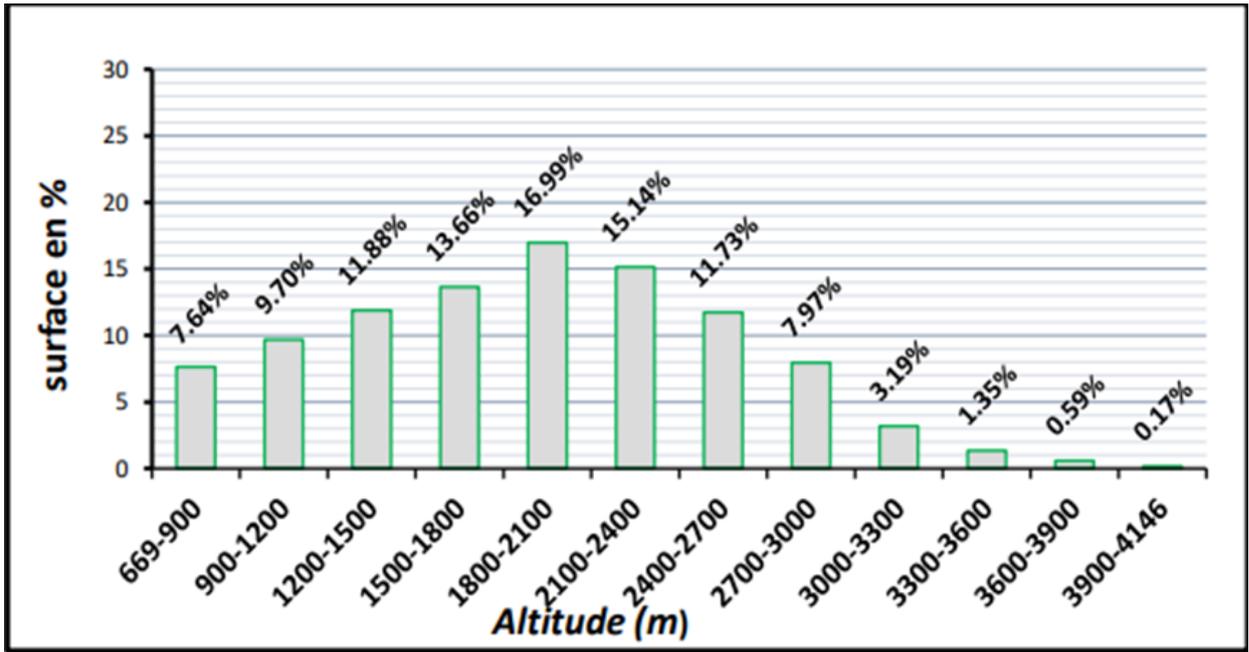


Figure 9: Diagramme des tranches d'altitude en fonction de leurs pourcentages de surface.

I.5.1.2 Courbe hypsométrique

Pour mieux visualiser la distribution des altitudes, nous avons tracé la courbe hypsométrique de ce bassin (figure 10) sur laquelle nous avons pu déterminer les altitudes caractéristiques. L'allure de cette courbe révèle une évolution vers un stade de maturité du bassin versant du N'fis.

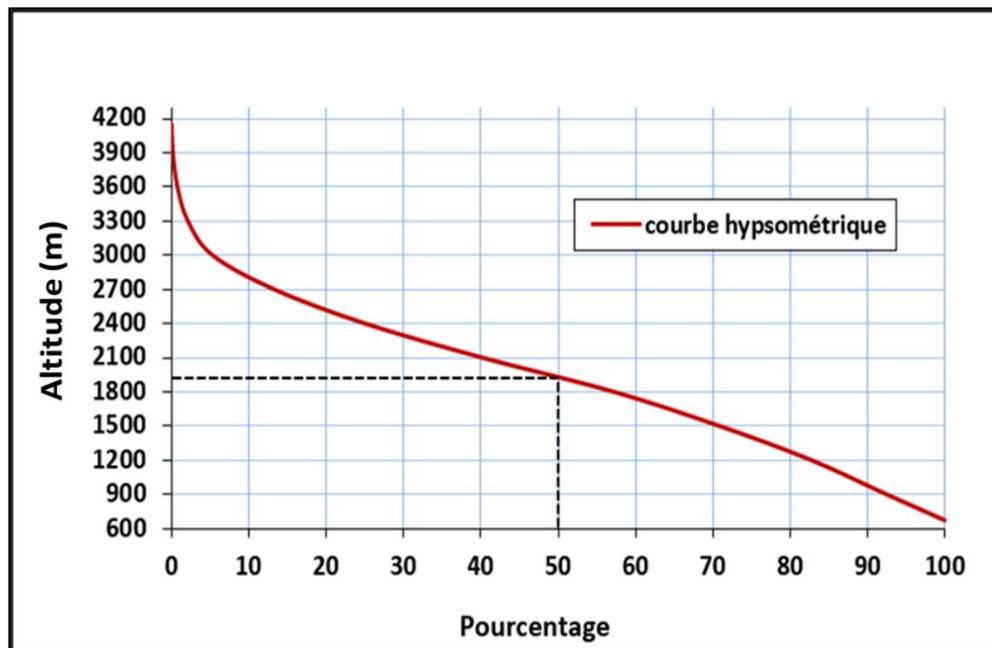


Figure 10: Courbe hypsométrique du bassin versant de N'fis.

La forme de la courbe hypsométrique et largement contrôlée par la lithologie du bassin versant de N'fis. En amont la courbe est relativement concave, ce qui peut s'expliquer par la résistance contre l'érosion des massifs granitiques et métamorphiques, d'âge précambrien, qui affleurent dans cette zone. Vers l'aval du bassin, la courbe montre une convexité dont l'origine pourrait être l'effet d'érosion sur les formations de couverture relativement tendres.

I.5.1.3 Les altitudes maximales et minimales

Elles sont obtenues directement à partir de cartes topographiques. L'altitude maximale (Hmax) représente le point le plus élevé du bassin tandis que l'altitude minimale (Hmin) considère le point le plus bas, généralement à l'exutoire. Ces deux données deviennent surtout importantes lors du développement de certaines relations faisant intervenir des variables climatologiques telles que la température, la précipitation et le couvert neigeux. Elles déterminent l'amplitude altimétrique du bassin versant et interviennent aussi dans le calcul de la pente. (<https://echo2.epfl.ch>)

D'après la carte d'altitude nous avons :

$$\mathbf{H_{max} = 4146 \text{ m} \quad \text{et} \quad \mathbf{H_{min} = 610 \text{ m}}$$

I.5.1.4 L'altitude moyenne

(Hmoy) se déduit directement de la courbe hypsométrique ou de la lecture d'une carte topographique. On peut la définir comme suit :

$$\mathbf{H_{moy} = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^n \left[A_i \times \frac{h_i + h_{i+1}}{2} \right]}$$

$$\mathbf{H_{moy} = \frac{\sum A_i \times h_i}{A}}$$

Avec :

Hmoy : altitude moyenne du bassin (m)

Ai : aire comprise entre deux courbes de niveau (km²)

hi : altitude moyenne entre deux courbes de niveau (m)

hi, hi+1 : Altitudes haut et bas qui délimite la surface Si en (m).

D'après le tableau 6, l'altitude moyenne est égale à **1921,42 m**.

Tableau 6: Calcul de l'altitude moyenne au bassin versant de N'fis.

| Altitudes | H moy (Hi) | Surface (Ai) | Hi * Ai | Hi * Ai/A |
|------------------|------------|--------------|------------|----------------|
| 610-900 | 785 | 130,75 | 102571,92 | 59,91 |
| 900-1200 | 1050 | 166,08 | 174386,88 | 101,85 |
| 1200-1500 | 1350 | 203,46 | 2746665,46 | 160,42 |
| 1500-1800 | 1650 | 233,90 | 385938,81 | 225,40 |
| 1800-2100 | 1950 | 290,91 | 567281,05 | 331,32 |
| 2100-2400 | 2250 | 259,25 | 583315,90 | 340,68 |
| 2400-2700 | 2550 | 200,90 | 512296,77 | 299,20 |
| 2700-3000 | 2850 | 156,40 | 388728,96 | 227,03 |
| 3000-3300 | 3150 | 54,57 | 171903,18 | 100,40 |
| 3300-3600 | 3450 | 23,11 | 79737,78 | 46,57 |
| 3600-3900 | 3750 | 10,02 | 37575,72 | 21,95 |
| 3900-4146 | 4023 | 2,85 | 11461,89 | 6,69 |
| | | | Somme | 1921,42 |

I.5.1.5 L'altitude médiane :

Correspond à l'altitude lue au point d'abscisse 50% de la surface totale du bassin, sur la courbe hypsométrique. Cette grandeur se rapproche de l'altitude moyenne dans le cas où la courbe hypsométrique du bassin concerné présente une pente régulière.

D'après la courbe hypsométrique, l'altitude médiane, qui correspond au point d'abscisse 50 % est d'environ **1920 m**. Donc elle est pratiquement égale à l'altitude moyenne qu'est égale à **1921,42 m**.

I.5.2 Les indice de pente

I.5.2.1 Carte des pentes topographiques du bassin versant de N'fis

La pente est l'un des paramètres les plus importants qui influencent l'écoulement hydraulique et les phénomènes d'érosion et donc la déstabilisation des versants. La carte des pentes topographiques du bassin versant de N'fis (figure 11) a été générée à partir d'MNT de

la région sous le logiciel ArcGIS. Les valeurs de pentes, qui varient de 0° à 40°, ont été regroupées en sept classes en se basant sur notre connaissance de terrain.

Les pentes modérées à faibles (0 à 20°) apparaît dans la partie septentrionale, qui correspond à la zone des collines atlasiques, et au fond des vallées où elles forment parfois de 30 larges dépressions plus aux planes comme celle de Talat N'yaakoub. Les terrains de faible pendage se retrouve aussi à l'extrémité amont du bassin, à environ 3000 m d'altitudes sous forme de plateau sur le socle granitique de Tichka. Les pentes moyennes et fortes (20° à 40°) quant à elles sont largement répondues dans les parties médianes et méridionales ce qui prouve que le bassin est fortement escarpé.

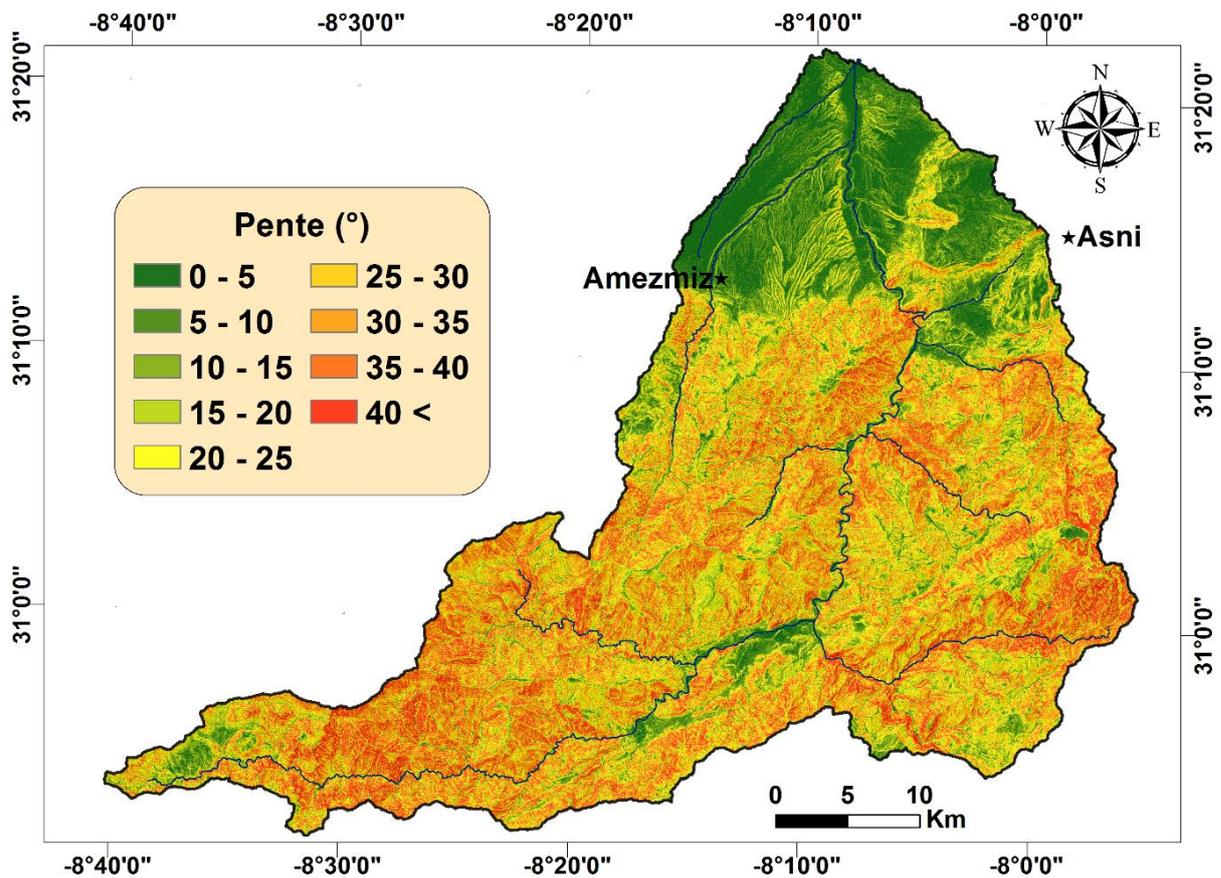


Figure 11: Carte des pentes topographiques du bassin versant de N'fis.

Pour mieux percevoir l'importance de chaque classe de pente, une analyse géométrique a été effectuée sur cette carte dont les résultats sont donnés par le tableau en dessous (figure 12).

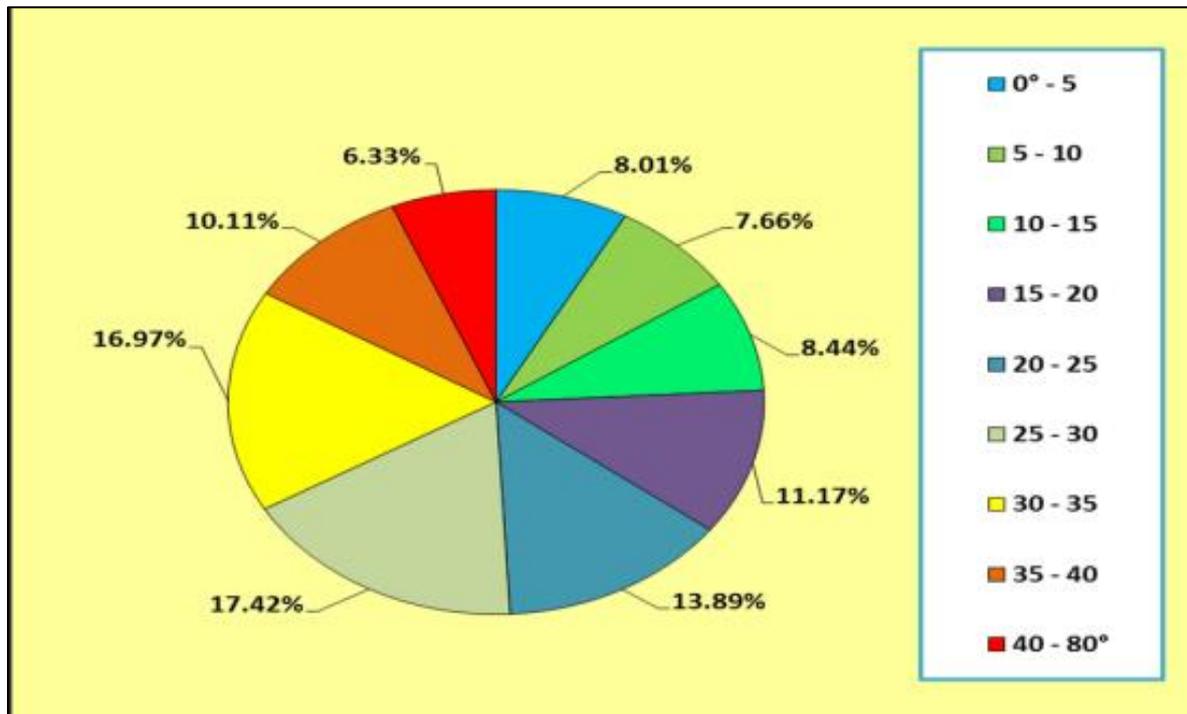


Figure 12: Répartition des pentes topographiques dans le bassin versant du N'fis en pourcentage de la superficie totale du terrain.

Les terrains plats ne représentent que 7,98 % et la moitié de la surface du bassin est occupée par des terrains ayant une pente qui dépasse 25°. Ces caractéristiques auront, sans doute, une influence directe sur les paramètres hydrographiques et sur la vitesse d'écoulement.

I.5.2.2 La pente moyenne du bassin versant

C'est une caractéristique importante qui renseigne sur la topographie du bassin. Elle est considérée comme une variable indépendante et donne une bonne indication sur le temps de parcours du ruissellement direct, donc sur le temps de concentration, et influence directement le débit de pointe lors d'une averse. En effet, les pentes raides accélèrent le temps de réponse d'un bassin. On estime la pente moyenne d'un bassin à partir de sa courbe hypsométrique (Amaya, 2015). Elle est donnée par la formule suivante :

$$Pent\ moy = \frac{2H_{moy}}{L}$$

Avec :

Hmoy : l'altitude moyenne du bassin (m).

L : Longueur du talweg (cours d'eau) le plus long (en km).

L'altitude moyenne du bassin versant de N'fis est de 1921,42 m et son cours d'eau principal a une longueur d'environ 130,03 km ce qui donne une pente moyenne :

$$\text{Pente moy} = 29,55 \text{ m/km}$$

La valeur élevée de l'indice de pente moyenne annonce que le relief du bassin versant du N'fis est accidenté ce qui peut favoriser l'occurrence de mouvements de terrain.

I.5.2.3 Indice global de pente

Sert à classer le relief des bassins pour éviter les valeurs extrêmes. Il s'exprime par la relation :

$$\mathbf{I_g} = \frac{\mathbf{Dut}}{\mathbf{L}}$$

Où :

Dut est la dénivelée utile : $\text{Dut} = \text{H95\%} - \text{H5\%}$,

H5% : altitude correspondant à 5% de la surface totale du bassin au-dessus de H5%.

H95% : altitude correspondant à 95% de la surface totale du bassin au-dessus de H95%

La dénivelée utile est l'altitude entre laquelle s'inscrit 90% de la surface du bassin.

Pour notre secteur d'étude le calcul donne :

$$\mathbf{Dut} = 3000 - 840 = 2160 \text{ m}$$

Alors pour le bassin versant de N'fis : $\mathbf{I_g} = 2160 / 115,02 = 18,78 \text{ m /km}$

I.5.2.4 La dénivelée spécifique

Permet de déterminer et de classer les reliefs. Il est défini par la relation suivante :

$$\mathbf{Ds} = \mathbf{I_g} \sqrt{\mathbf{A}} \text{ (m)}$$

Avec : $\mathbf{I_g}$: Indice globale de la pente.

\mathbf{A} : superficie du bassin.

Pour le bassin versant N'fis on a : $\mathbf{I_g} = 18,78$ et $\mathbf{A} = 1712,22 \text{ Km}^2$.

$$\mathbf{Ds} = 777,10 \text{ m}$$

La classification du relief en fonction de la dénivelée spécifique Ds est illustrée par le tableau 7 qui montre clairement que le bassin versant de N'fis a un relief très fort.

Tableau 7: Classification du relief en fonction de la dénivelée spécifique (Amaya, 2015)

| Type de relief | Intervalle |
|----------------|----------------------------------|
| Très faible | $D_s < 10$ m |
| Faible | $10 \text{ m} \leq D_s < 25$ m |
| Assez faible | $25 \text{ m} \leq D_s < 50$ m |
| Modéré | $50 \text{ m} \leq D_s < 100$ m |
| Assez fort | $100 \text{ m} \leq D_s < 250$ m |
| Fort | $250 \text{ m} \leq D_s < 500$ m |
| Très fort | $D_s \geq 500$ m |

I.5.2.5 L'indice de pente de Roche

Il existe une relation entre l'indice global de pente et l'indice de Roche (I_r), avec un coefficient de corrélation de 0.99, dont :

$$I_g = 0,8I_r^2 \quad \text{donc} \quad I_r = \sqrt{\frac{I_g}{0,8}}$$

Ainsi pour le bassin versant de N'fis on a :

$$I_r = \sqrt{\frac{18,78}{0,8}} = 4,85$$

I.5.2.6 Le temps de concentration

Il dépend essentiellement de la superficie du bassin, des pentes, de la longueur et de la densité du réseau hydrographique. C'est durée nécessaire à une goutte d'eau pour parcourir le chemin hydrologique entre le point du bassin le plus éloigné de l'exutoire et celui-ci. Le temps de concentration d'un bassin versant peut se calculer en utilisant la formule de Giandotti :

$$T_c = \frac{1,5L + 4\sqrt{S}}{0,8\sqrt{H_{moy} - H_{min}}}$$

Avec :

TC : Temps de concentration en heures.
S : Surface du bassin en km².
L : Longueur du rectangle équivalent en km.
H moy : Altitude moyenne en m.
H min : Altitude minimale de l'exutoire en m.

Pour le bassin versant de N'fis on a :

$$S = 1712,22 \text{ km}^2 \quad L = 115,02 \text{ km}$$

Avec $H \text{ moy} = 1921,42 \text{ m}$ $H \text{ min} = 669 \text{ m}$

Donc le temps de concentration est : **Tc= 11,94 h.**

I.5.2.7 Le profil longitudinal du cours d'eau

Le profil en long d'un réseau hydrographique, également appelé pentes hydrographiques, est une représentation graphique qui porte en abscisses les longueurs développées à partir d'un point donné de référence et en ordonnées les altitudes du cours d'eau principal. Ce profil permet de mettre en évidence les ruptures de pente qui perturbent l'écoulement d'une rivière. En utilisant un MNT traité sous ArcGIS, nous avons pu extraire les altitudes du cours d'eau principal avec une longueur de 130,03km. Ces données nous ont permis de dresser son profil longitudinal, qui est schématisé sur le graphique de la (figure 13).

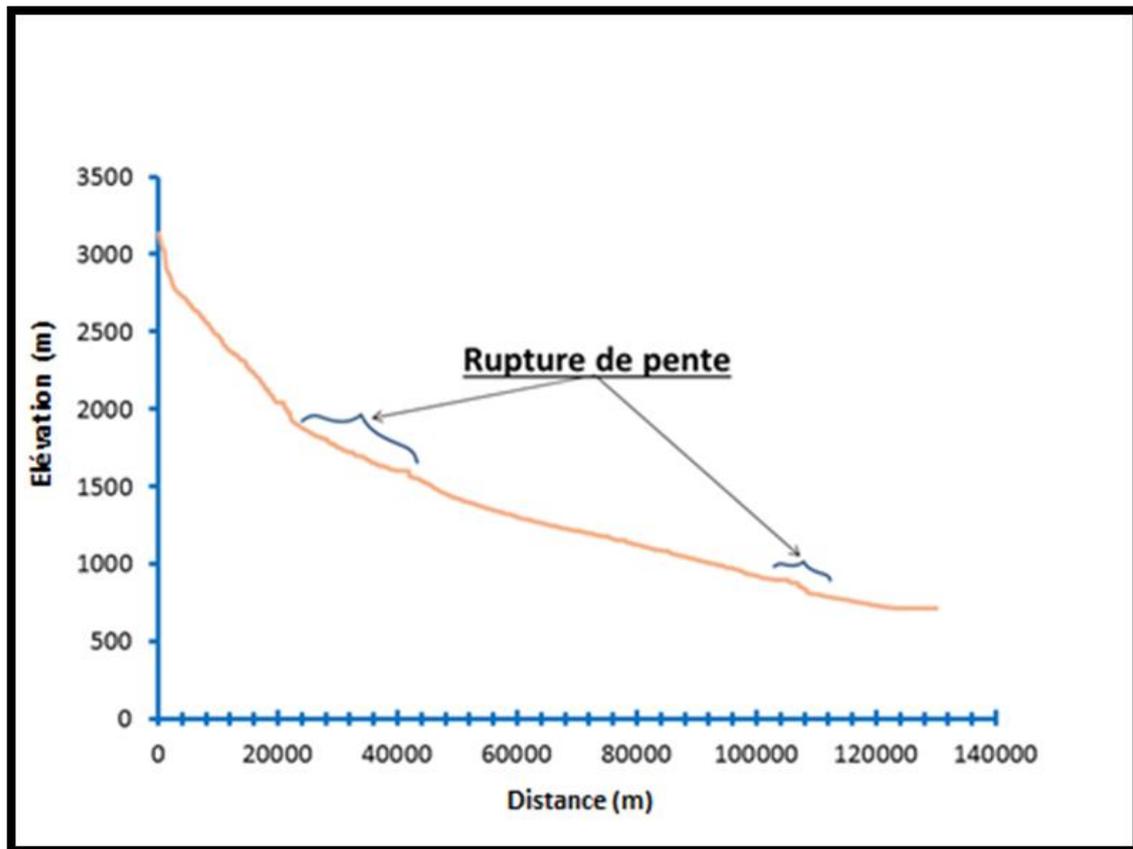


Figure 13: Profil en long de l'Oued N'fis montrant des ruptures de pente.

Le cours principal de l'Oued N'fis prend naissance à une altitude qui dépasse les 3100 m. Son profil longitudinal montre clairement des zones de rupture de pente, qui peuvent avoir comme origines quatre facteurs schématisés par la figure 14 (Namous, 2012).

- **Changement lithologique** : la lithologie contrôle la pente des profils en long des rivières. En effet, les cours d'eau présentent un profil plus penté dans les terrains résistants à l'érosion que ceux moins résistants.

- **Contrôle hydrologique** : dans les zones de confluence des tributaires, la pente du profil change en fonction du volume d'eau et de la charges solides des affluents.

- **Contrôle tectonique** : lorsqu'une rivière recoupe une faille active, la pente de son profil en long change en fonction du compartiment soulevé. Après l'activité tectonique, la rupture de pente recule vers l'amont par érosion régressive. Des indications précises sur les mouvements tectoniques différentiels au sein d'un même bassin versant peuvent être tiré de l'étude des pentes hydrographiques des cours actuels et des plaines alluviales anciennes. L'évolution tectonique explique pour une large part l'inégal encaissement des cours d'eau dans l'espace et dans le temps (Ait Naceur,2023).

• **Contrôle eustatique** : les ruptures de pente de la courbe d'équilibre d'une rivière liées à l'eustatisme sont facilement détectables dans les bassins versants non éloignés des côtes marines. Dans les zones plus éloignées la trace de cet impact est difficile à déceler.

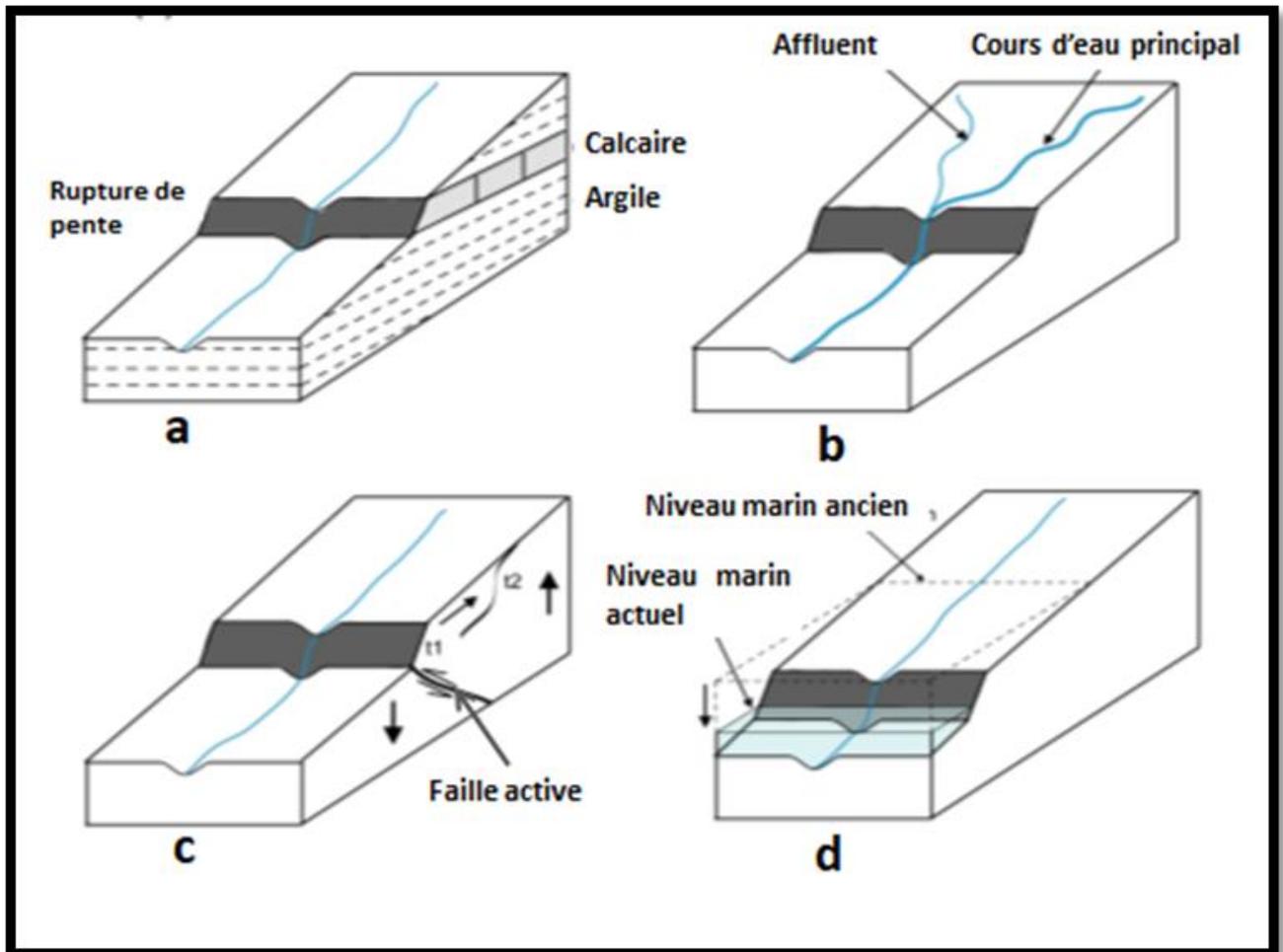


Figure 14: Origines des ruptures du profil en long des cours d'eau. (a) : contrôle lithologique ; (b) : contrôle hydrologique ; (c) : contrôle tectonique ; (d) : contrôle eustatique (Namous 2011)

I.5.3 Exposition des versants

L'exposition d'un versant signifie son orientation par rapport au nord, c'est-à-dire à la manière dont sa surface est orientée par rapport au rayonnement solaire. L'exposition est considérée comme un facteur important influençant la stabilité des pentes. En effet, elle détermine non seulement le taux d'ensoleillement, mais aussi les vents desséchants et les précipitations qui contrôlent le degré de saturation du sol et donc son taux d'humidité.

L'exposition d'un versant est mesurée en degrés dans le sens des aiguilles d'une montre, de 0 (plein nord) à 360 (toujours plein nord), correspondant à un cercle complet. La valeur de chaque cellule dans un ensemble de données d'aspect indique la direction de la pente de la cellule. Les zones plates n'ayant aucune direction de pente descendante reçoivent une valeur de (-1). Pour notre zone d'étude, un module d'ArcGIS a permis la génération automatique de la carte d'exposition des versants à partir d'un MNT. En suite cette carte a été reclassée en huit classes directionnelles en plus des terrains plat : Nord (337,5-360 ° et 0-22,5 °) ; Nord-Est (22,5 - 67,5 °) ; Est (67,5- 112,5 °) ; Sud (157,5 – 202,5 °) ; Sud-Ouest (202,5-247,5 °) ; Ouest (247,5-292,5 °) et Nord-Ouest (292,5-337,5 °) (figure15).

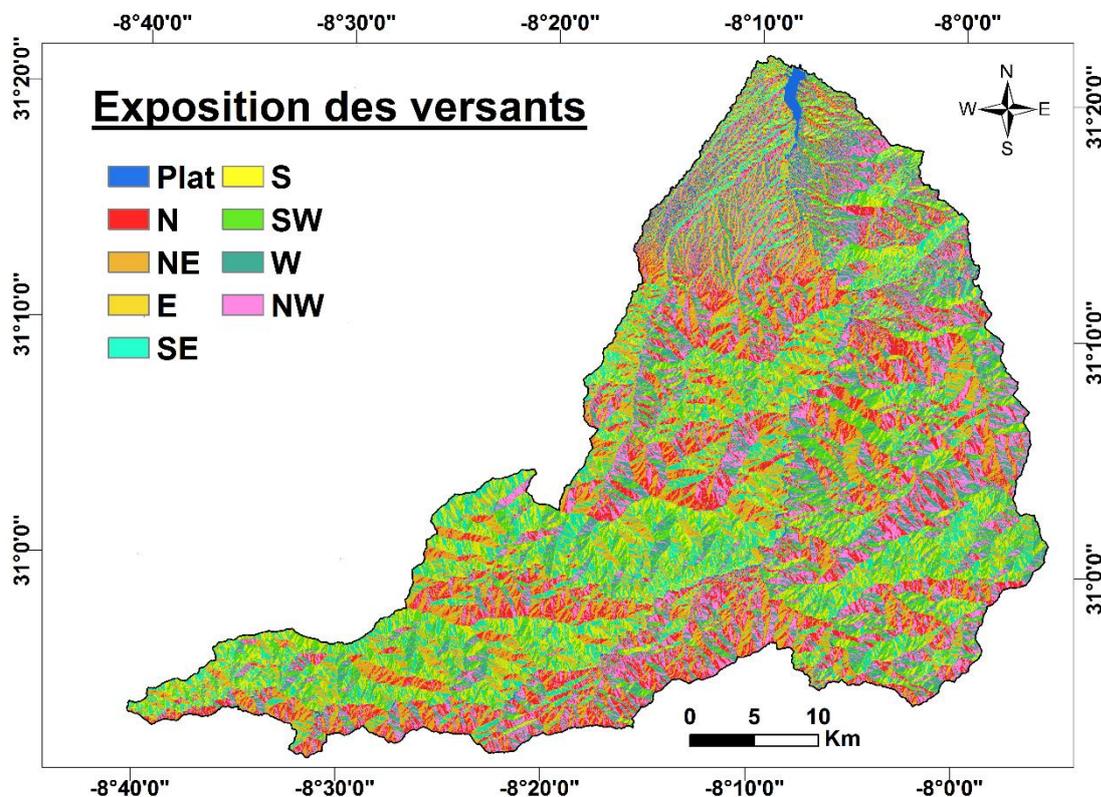


Figure 15: Carte d'expositions des versant au bassin versant du N'fis.

Le tableau 8 est le résultat de l'analyse de la carte d'exposition des versants citée précédemment. Il montre que les terrains plats, considérés sans orientation, de ce bassin ne représente de point de vue surface que 1,15% et que l'exposition des versants est relativement homogène et varie entre 10,53 et 14,71%. Les versants exposés vers le nord et ses dérivés constituent plus de 40,24 % de la superficie total du bassin. Ces versants est faiblement exposé au soleil, ce qui permet la prolifération des forêts. Cependant les versants sud, plus de 35,45% de la superficie du secteur, sont plus ensoleillés et par conséquent ils sont exposés à une évapotranspiration intense et donc une dégradation de la végétation (figure 16).

Tableau 8: Surface et pourcentage correspondants des versants selon leurs expositions au soleil.

| Exposition des versants | Surface (Km) | Pourcentage % |
|--------------------------------|---------------------|----------------------|
| plat | 19,70 | 1,15 |
| N | 235,55 | 13,78 |
| NE | 200,87 | 11,75 |
| E | 180,01 | 10,53 |
| SE | 214,12 | 12,52 |
| S | 198,81 | 11,63 |
| SW | 193,19 | 11,30 |
| W | 215,94 | 12,63 |
| NW | 251,53 | 14,71 |

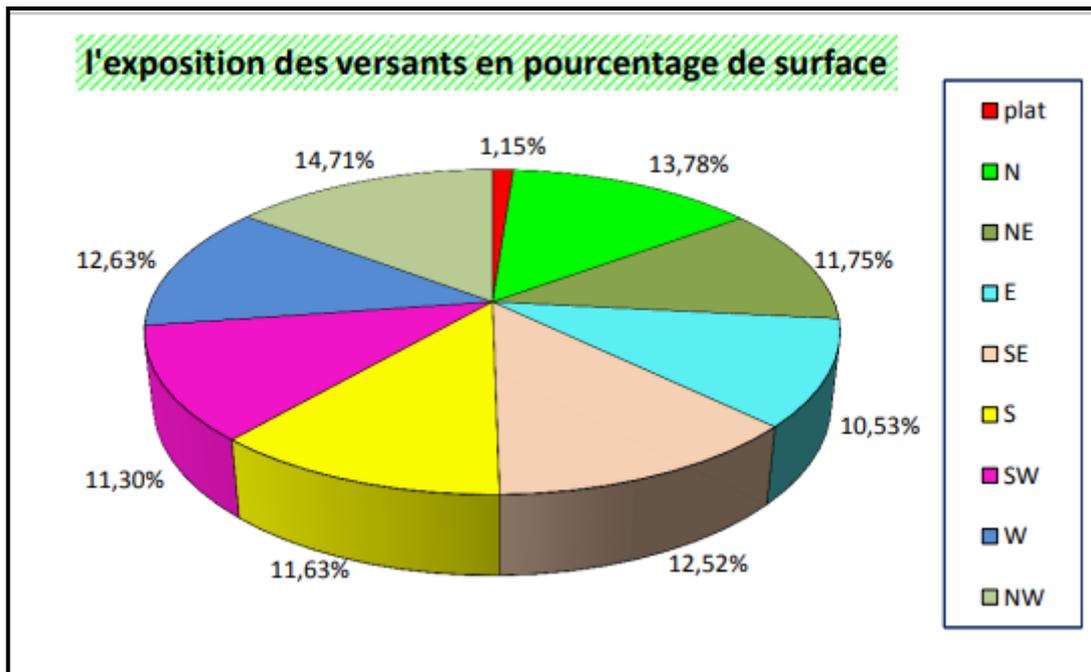


Figure 16: Diagramme des versant du bassin versant de N'fis selon leurs expositions en pourcentage des surfaces.

I.6 Caractéristiques du réseau hydrographique

Le réseau hydrographique est l'ensemble des chenaux qui collectent les eaux de surface et les acheminent vers l'exutoire du bassin versant. Il est l'une des caractéristiques la plus importante des bassins versants. La forme et la densité du réseau hydrographique d'un bassin versant dépendent de certains facteurs, notamment : (Amaya, 2015)

- **Le climat** : le réseau hydrographique des bassins versants dans les régions montagneuses humides est généralement plus dense que dans les régions désertiques.
- **La géologie** : par la sensibilité du substratum à l'érosion, et dont la lithologie influence la forme du réseau hydrographique. La structure de la roche, sa forme et les structures tectoniques présentes forcent le courant à changer de direction, ce qui conduit à une adaptation du réseau de drainage par modification de sa géométrie.
- **La pente des versants** : détermine si les cours d'eau sont en phase d'érosion ou de sédimentation. Dans les zones les plus élevées, les cours d'eau participent souvent à l'érosion de la roche sur laquelle ils s'écoulent. Au contraire, en plaine, la sédimentation est prédominante sur les lits des cours d'eau
- **L'activité humaine** : les activités humaines peuvent modifier le réseau hydrographique, par exemple, le drainage des terres agricoles, la construction des barrages et l'irrigation peut réduire le débit des cours d'eau.

I.6.1 Type du réseau hydrographique du bassin versant du N'fis.

Il existe plusieurs types de réseaux hydrographiques, qui se classent en fonction de leur forme et de leur structure. Les plus courant sont distingués dans la figure17.

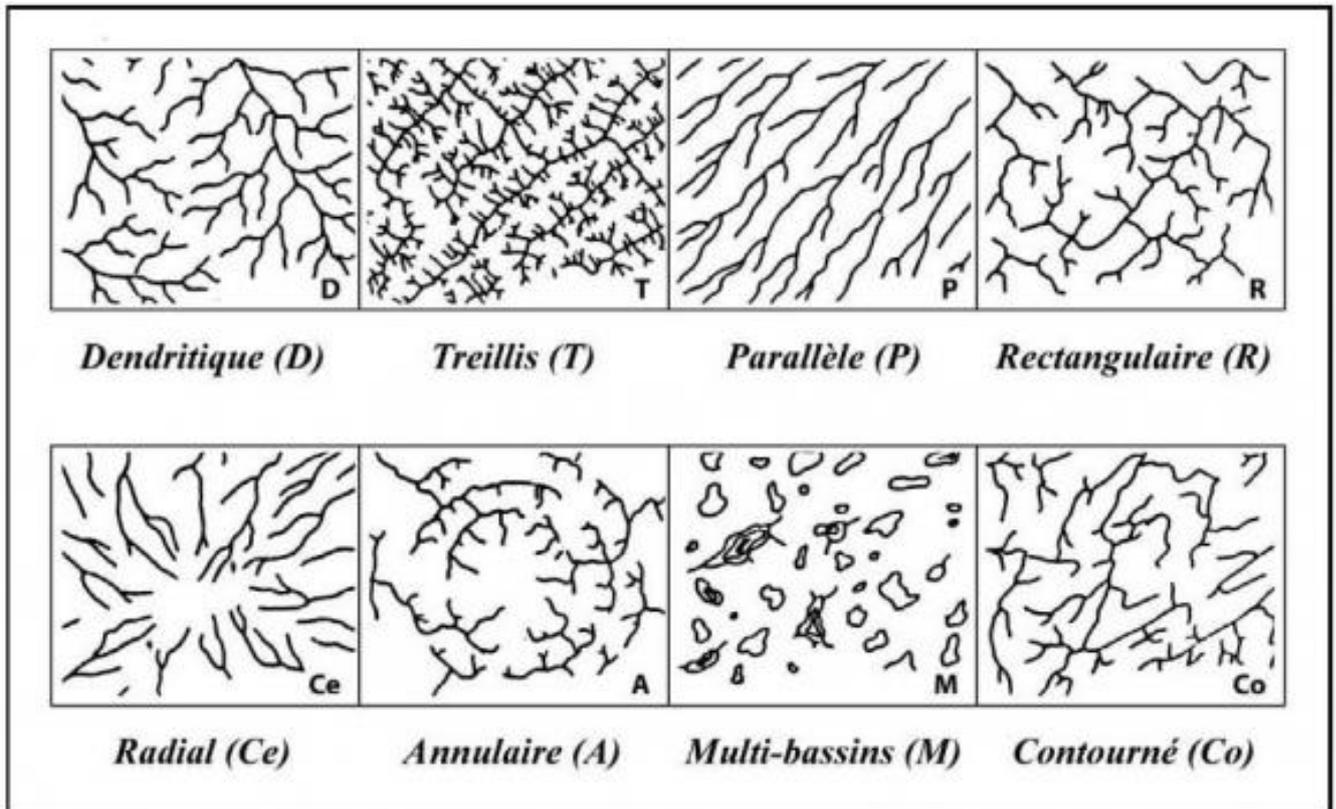


Figure 17:Classification du réseau hydrographique selon Howard 1967 (Ait Naceur, 2023).

Le réseau hydrographique du bassin versant du N'fis est de type dendritique avec un ensemble de cours d'eau ramifiés comme les branches d'un arbre (Figure18).

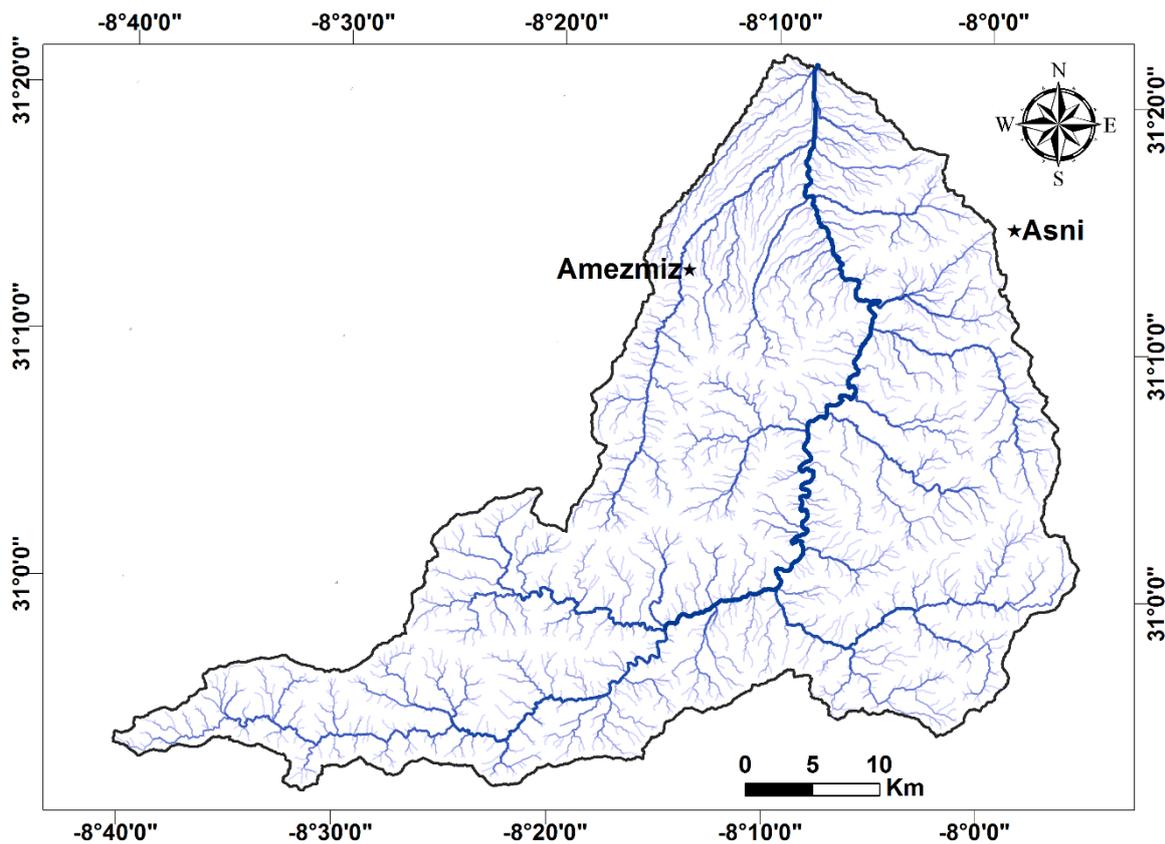


Figure 18: Carte de réseau hydrographique du bassin versant du N'fis.

D'un point de vue morphologique, le réseau hydrographique de ce secteur présente à la fois des aspects rectiligne et méandrique. Cela peut s'expliquer par l'influence de plusieurs paramètres essentiellement géologiques. La (figure 19) montre un tronçon de du réseau hydrographique où l'on peut observer l'oued N'fis, principal cours d'eau de ce bassin, en forme rectiligne dans la région de Talat N'yaakoub et un aspect méandrique au voisinage du village de Toug elkhir.

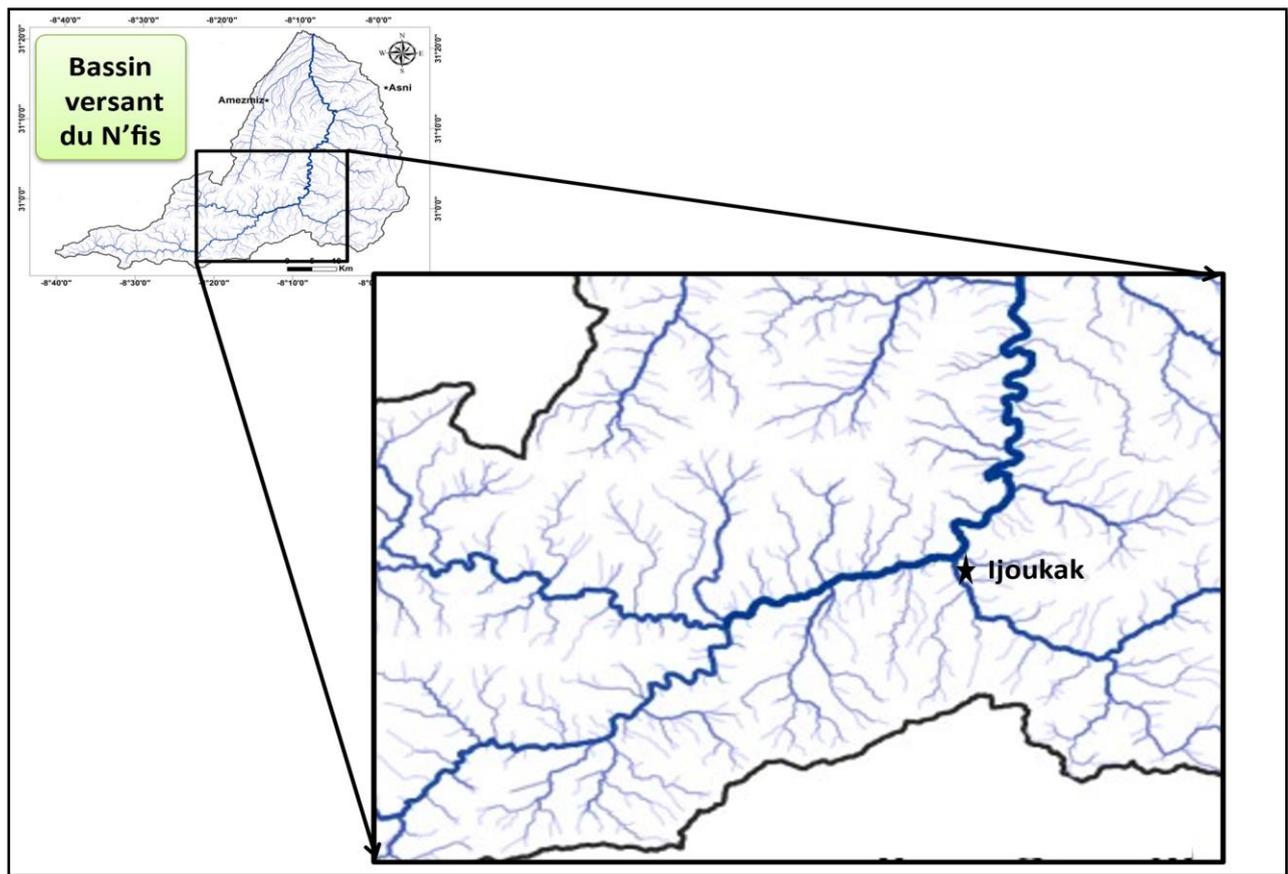


Figure 19: Oued N'fis avec des sections rectilignes et d'autres méandriformes.

I.6.2 Ordre d'écoulement

L'ordre d'écoulement est une méthode de classification des cours d'eau en fonction de leurs positions dans le réseau hydrographique. Il s'agit d'un système hiérarchique qui attribue un nombre à chaque segment de cours d'eau, en commençant par les plus petits ruisseaux (ordre 1) et en augmentant à mesure que les cours d'eau se rejoignent pour former des cours d'eau plus importants.

Pour déterminer l'ordre d'écoulement, la méthode la plus utilisée est celle de **Strahler**, qui est basée sur les principes suivants :

- Tout cours d'eau dépourvu de tributaires est d'ordre un.
- Le cours d'eau formé par la confluence de deux cours d'eau d'ordre différent prend l'ordre du plus élevé des deux.
- Le cours d'eau formé par la confluence de deux cours d'eau du même ordre est augmenté d'un. (Lamrani,2021)

Le réseau hydrographique du bassin versant du N'fis est relativement dense, ses cours d'eau atteignent l'ordre 6 (figure 20). L'oued N'fis, principal cours d'eau reçoit, des deux côtés plusieurs affluents dont les principaux sont :

- Oued **Ouirgane** qui prene naissance à la région de **Tizi oussern**.
- Oued **Imigdal** qui prene naissance à la région de **Tisgui**.
- Oued **Hssain** qui prene naissance à la région de **Warti**.
- Oued **Agoundis** qui prene naissance à la région d'**Azrou Izouggahne**.

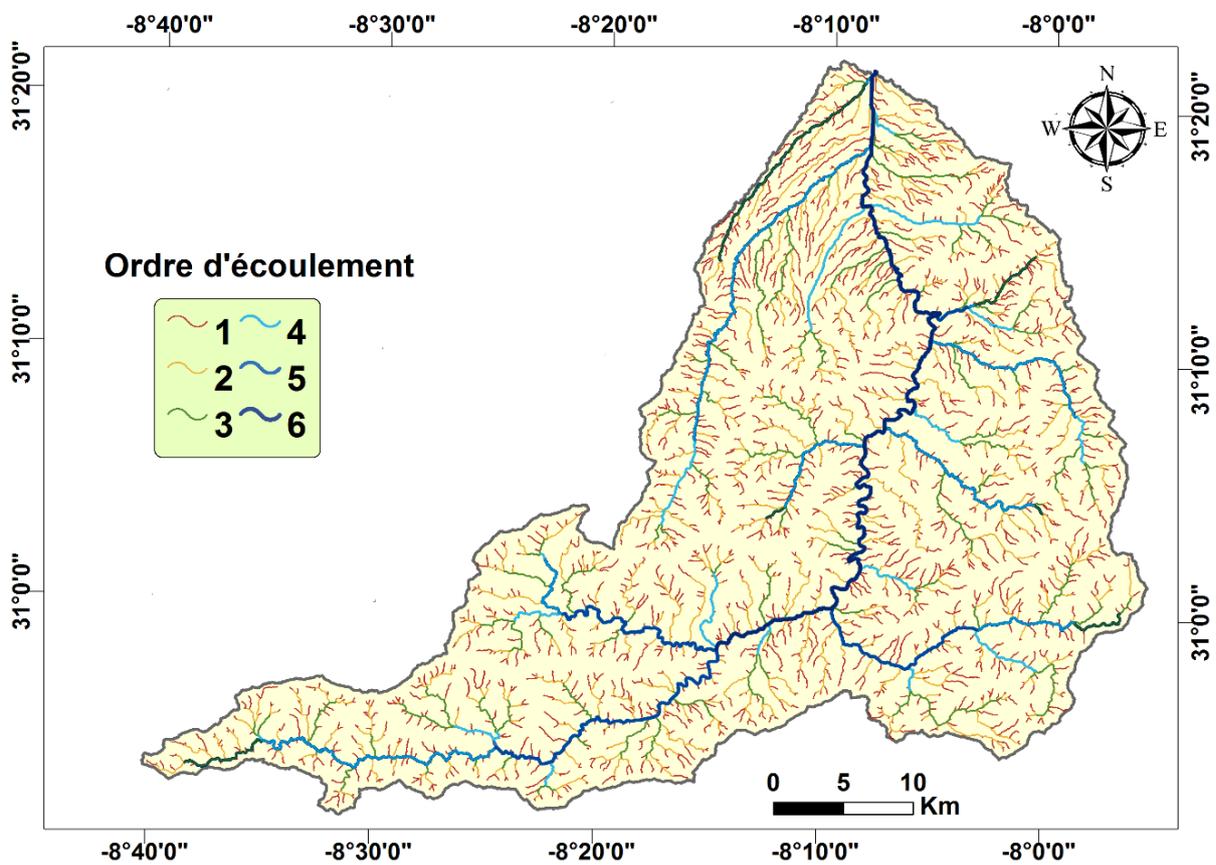


Figure 20: Carte d'ordre d'écoulement du bassin versant de N'fis.

I.6.3 La densité de drainage

Elle est exprimée par le rapport de la longueur totale des cours d'eau (somme des L_i) permanents et temporaires à la surface du bassin versant (A). C'est un paramètre qui reflète la dynamique du bassin et le type de ruissellement (Ait Nacreur,2023).

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

Avec :

Dd : densité de drainage [km/km^2]

L_i : longueur de cours d'eau [km]

Dans le cas du bassin versant de N'fis la somme des longueurs des cours d'eau est égal à **2556,77 Km** sachant qu'on s'est intéressé juste au cours dont la longueur est supérieure à 1.2 km. Dans ces conditions la densité de drainage de ce bassin est égal à :

$$Dd = 2556,77 / 1712,22$$

$$Dd = 1,49 \text{ Km} / \text{Km}^2$$

I.6.4 La densité hydrographique

Elle représente le nombre de cours d'eau par unité de surface. Elle est calculée par la formule suivante :

$$F = N_i / A$$

Avec :

F : densité hydrographique [km^{-2}]

N_i : nombre de cours d'eau

A : superficie du bassin [km^2]

D'après la carte du réseau hydrographique du bassin de N'fis dont la Superficie est d'ordre de 1712,22 Km^2 , le nombre des cours d'eau est égal à **596 cours**.

Donc :

$$F = 596 / 1712,22 \quad \longrightarrow \quad F = 0,34 \text{ Km}^{-2}$$

Cette valeur relativement élevée peut s'expliquer par la topographie très accidentée du bassin avec des pentes importantes qui favorisent l'écoulement des eaux dans des régimes de haute énergie ce qui conduit au creusement et donc au développement du réseau hydrographique. La nature lithologique des terrains intervient aussi par la résistance des roches qui les constituent ainsi que par leur perméabilité.

La carte de densité du réseau hydrographique a comme but de mieux visualiser la distribution spatiale du réseau hydrographique, de point de vue densité, dans bassin versant du N'fis. Les valeurs élevées, qui varient de 2,92 à 6,31, appartiennent en aval et à la région d'Ouirgane- Marigha où affleurent des formations triasiques à dominance silteuse (figure 21). Cela nous permet de conclure que le façonnement des cours d'eau est largement lié aux caractéristiques lithologiques des terrains.

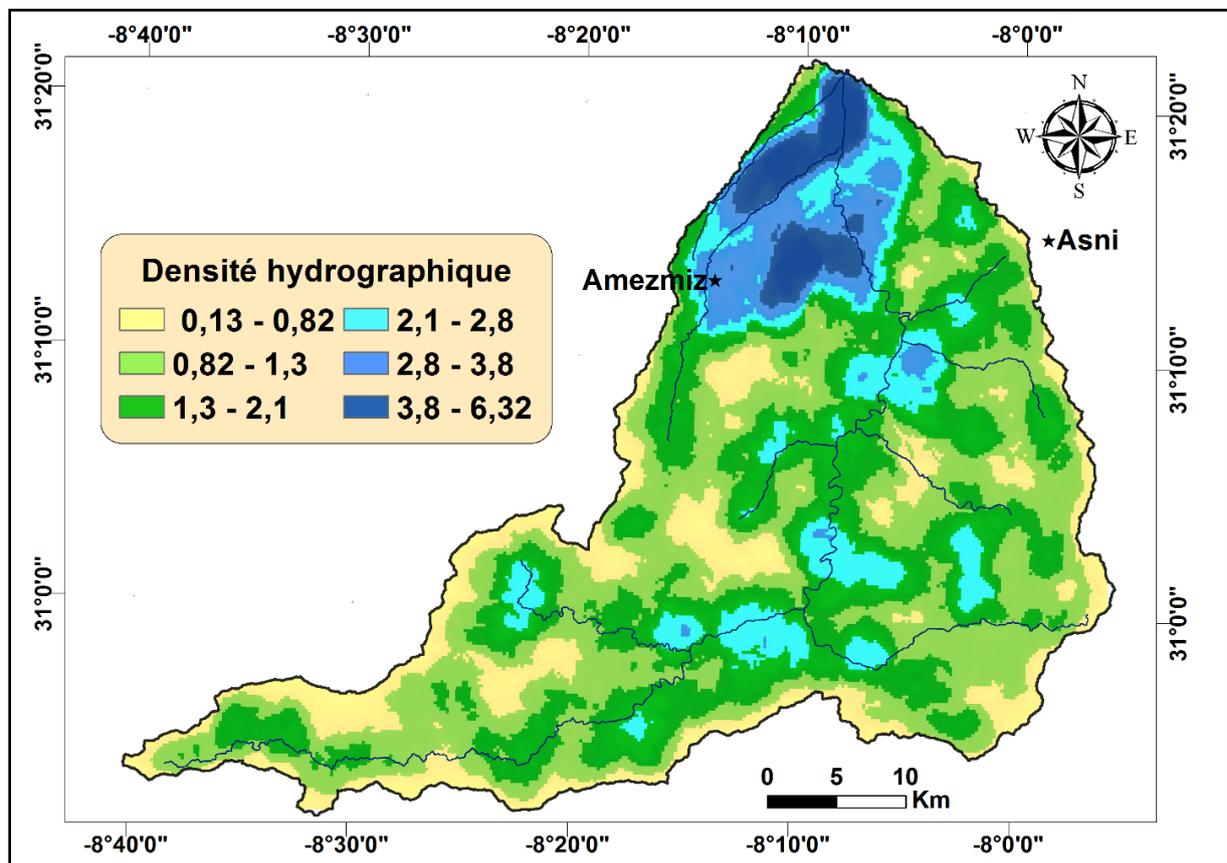


Figure 21: Carte de densité du réseau hydrographique du bassin versant de N'fis.

I.7 Indice de végétation

L'indice de végétation par différence normalisé (NDVI) permet d'évaluer la densité de végétation sur un territoire à partir de données de télédétection en comparant la réflectance spectrale dans le proche infrarouge (réfléchi fortement par la végétation) et la lumière rouge (absorbée par la végétation).

$$\text{NDVI} = \frac{\text{PIR} - \text{R}}{\text{PIR} + \text{R}}$$

Où R et PIR sont les mesures de réflectance spectrale acquises dans les régions rouge visible et proche infrarouge, respectivement.

Les valeurs de NDVI sont comprises entre -1 et +1. Les valeurs négatives représentent des surfaces qui ne correspondent pas au couvert végétal, telles que la neige, l'eau ou les nuages et pour lesquelles la réflectance du rouge est supérieure à celle du proche infrarouge. Pour les sols nus, dont la réflectance est approximativement du même ordre dans le rouge et le proche infrarouge, NDVI a des valeurs proches de 0. La densité de végétation est d'autant importante quand la valeur d'NDVI tend vers 1.

La carte NDVI de notre zone d'étude, illustrée par la figure 22, a été produite à partir d'images satellitaires multispectrales, Sentinel 2, acquises le 2 janvier 2019. Ensuite, Les valeurs NDVI ont été divisées en sept classes : (1) -1-0. (2) 0-0.2. (3) 0.2-0.3. (4) 0.3-0.4. (5) 0.4-0.5. (6) 0,5-0,7 et (7) 0,7-1). Les valeurs minimales de NDVI dans ce secteur correspondent à des zones couvertes par la neige ou à des barrages. Les valeurs maximales reflètent des zones de forêts denses et des terres cultivées au voisinage des cours d'eau (Ait Naceur 2023).

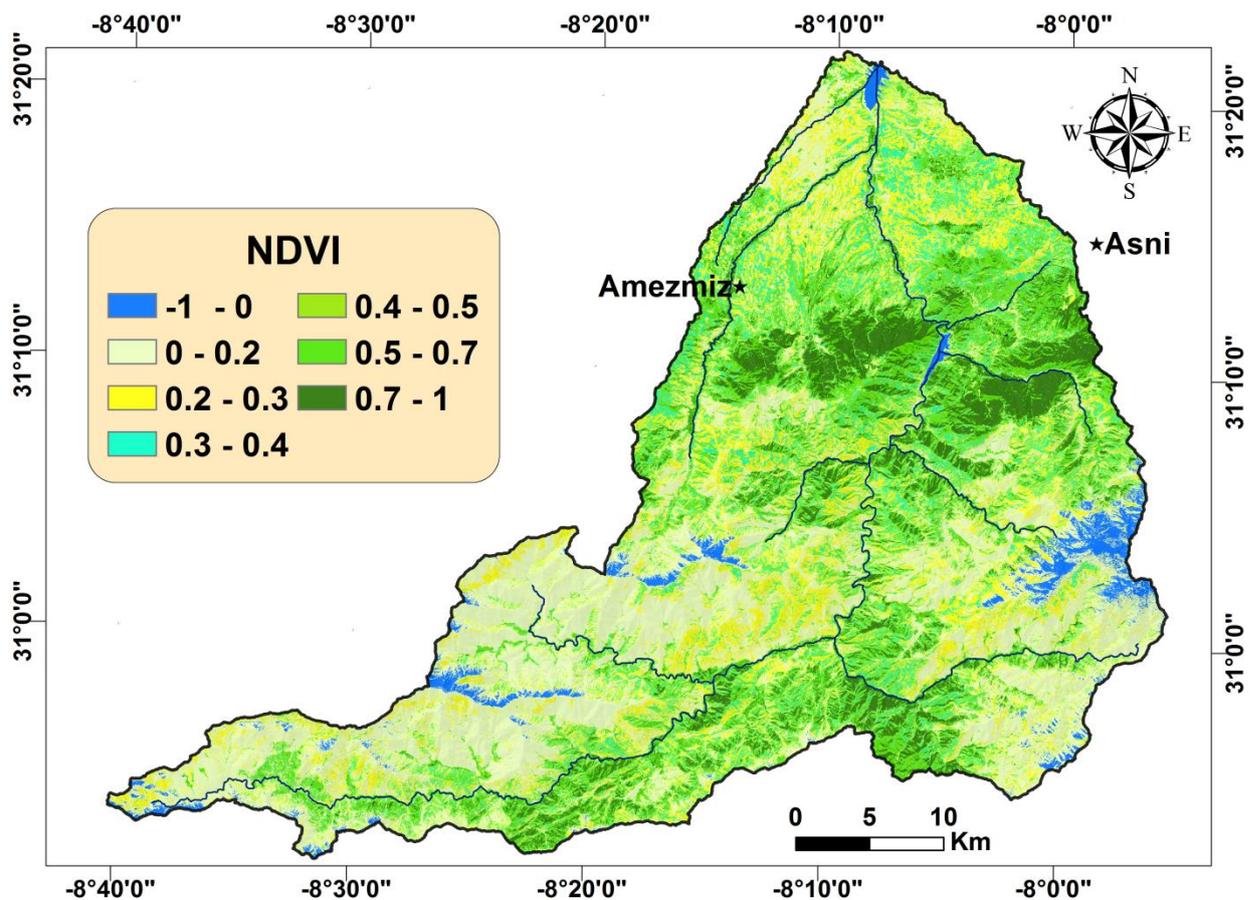


Figure 22: Carte d'NDVI au bassin versant du N'fis (en utilisant des images multi spectrales Sentinel 2).

L'indice de végétation est une méthode d'imagerie satellite qui permet de mettre en évidence la végétation verte par rapport au sol et d'analyser son état. Différentes techniques ont été mises au point afin de calculer cet indice. Étant donné que les bandes rouges et proche infrarouge renferment plus de 90% de l'information spectrale sur un couvert végétal, ces deux bandes sont généralement utilisées pour calculer les indices de végétation. (Amaya 2015)

L'NDVI est une mesure de la végétation d'une zone basée sur des données de télédétection. Une bonne valeur de NDVI témoigne d'une végétation abondante et saine, tandis qu'une faible valeur indique une zone avec peu ou pas de végétation.

On se référant aux résultats d'analyse illustrés par le graphique (figure 23), on peut conclure que la végétation a un effet important sur la susceptibilité au mouvement de terrain. Les zones avec une végétation dense et saine, à valeurs élevées de NDVI, ont moins de chance de subir un mouvement de terrain, à l'inverse des zones avec des valeurs faibles de NDVI (0 - 0,3). On peut expliquer cela par le fait que la végétation est un facteur de stabilité des sols. Les racines des plantes jouent un rôle essentiel dans la préservation de la structure des sols en

limitant l'érosion et en favorisant l'infiltration d'eau. De cette manière, une végétation épaisse et saine peut jouer un rôle dans la prévention des mouvements de sol (Ait Naceur,2023).

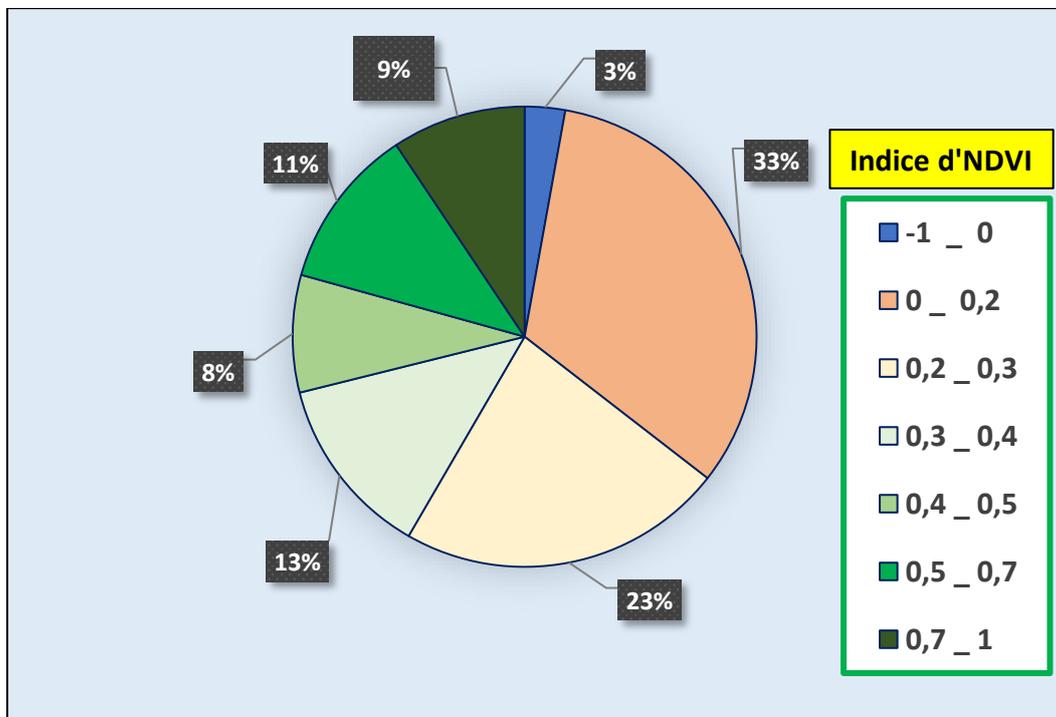


Figure 23: les classes de l'Indice NDVI en pourcentage de surface.

Conclusion

Le travail réalisé dans le cadre de projet de fin d'étude a pour objectif l'étude morphométrique du bassin versant de l'oued N'fis. Ce dernier appartient au système fluvial du Tensift qui est l'un des principaux bassins du Maroc. Il est caractérisé par un climat continental de type semi-aride, influencé par la présence du relief du Haut Atlas, et d'une faible pluviométrie.

Cette étude est basée sur l'application de logiciel ArcGIS, qui nous a permis de délimiter le bassin et déterminer ses indices de forme, ses indices topographiques et le type de son réseau hydrographique.

Les caractéristiques morphométriques du bassin versant de N'fis, récapitulées dans le tableau ci-dessous (tableau 9), montre que ce dernier a une forme allongée avec des altitudes très importantes et des versants souvent pentus. Ces caractéristiques ont abouti, en relation avec les conditions climatiques de la zone et les propriétés géologiques des terrains, au façonnage d'un réseau hydrographique dense et relativement très ramifié.

Tableau 9: tableau récapitulatif des indices morphométriques du bassin versant du N'fis.

| | |
|---|---------------------------------|
| La surface (A) | 1712,22 Km² |
| Le périmètre (P) | 259,82 km |
| L'indice Gravelius (KG) | 1,76 |
| Longueur équivalent (L_{éq}) | 115,02 Km |
| Largeur équivalent (l_{éq}) | 14,89 Km |
| L'indice de Horton (KH) | 0,101 |
| L'altitude médiane | 1920 m |
| L'altitude moyenne | 1921,42 m |
| Pente moyenne | 29,55 m/km |
| L'indice global de pente. | 18,78 |
| La dénivelée utile | 2160 m |
| L'indice de pente de Roche | 4,85 |
| Le temps de concentration | 11,94 h. |
| La densité de drainage | 1,49 Km / Km² |
| La densité hydrographique | 0 ,34 Km⁻² |

Bibliographie

AIT NACEUR.H (2023) : Optimisation de l'évaluation de la susceptibilité aux mouvements de terrain : Approche intégrée de la géomatique et l'intelligence artificielle, Cas du bassin versant du N'fis, Maroc, Marrakech, (Maroc), thèse, faculté des sciences Semlalia- Marrakech.

AMAYA, A. (2015). Analyses sédimentaires, gestion et approche par télédétection et SIG des risques naturels du bassin versant semi-aride de l'oued N'fis, Maroc. Marrakech : thèse de 3ème cycle.

ALBOUCHOUARI. A, ASBAA. N et AOUZIOU H, (2023) : Les caractéristiques hydrologiques et géomorphologiques du bassin versant d'Oued Amlen, Marrakech, (Maroc), mémoire de fin d'étude de licence, Faculté des Sciences et Techniques, Marrakech, p17

LAMRANI. K, OUDOOR. K et EL HARRAB .C, (2021) : Etude hydrologique du bassin versant de Tnine Ourika (Haut Atlas, Maroc), mémoire de fin d'étude de licence, Faculté des sciences et techniques, Marrakech, p27

NACIRI .H et OUZAKRI. S (2022) : Etude hydrologique du bassin versant du Tensift à Zaouit Sidi Hssayn (Maroc), Marrakech, (Maroc), mémoire de fin d'étude de licence, Faculté des Sciences et Techniques, Marrakech, p18

NAMOUS, M. (2012) : Evolution quaternaire et dynamique actuelle d'un système Géomorphologique de front de chaine active : l'exemple du bassin versant de l'Ourika (Maroc).

Web site

- <https://www.reussir.fr/lait/la-teledetection-pour-piloter-le-paturage>
- <https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/univers-image-satellitale-4977/>
- <https://echo2.epfl.ch>