

# THESE

En vue de l'obtention du : **DOCTORAT**

**Centre de Recherche : Centre Eau, Ressources Naturelles, Environnement et Développement Durable**

**Structure de Recherche : Laboratoire de Géosciences, Eau et Environnement**

**Discipline : Sciences de la Terre**

**Spécialité : Hydrologie, Géostatistique, Géomatique**

Présentée et soutenue le 21/11/2020 par :

**Tarik BOURAMTANE**

**Une nouvelle approche dans le déterminisme des types de réseaux de drainage par des méthodes multifactorielles spatialisées, en conditions géologiques, hydrologiques et climatiques contrastées sur trois régions mondiales : Maroc, France et Angola**

## JURY

Anas EMRAN	PES, Institut Scientifique, Université Mohammed V, Rabat	Président
Ilias KACIMI	PES, Faculté des Sciences, Université Mohammed V, Rabat	Directeur de Thèse
Vincent VALLES	PES, INRAE, Université d'Avignon, Avignon, France	Co-directeur
Mohammed ACHAB	PES, Institut Scientifique, Université Mohammed V, Rabat	Rapporteur/Examineur
Roger MOUSSA	PES, INRAE, Université de Montpellier, Montpellier, France	Rapporteur/Examineur
Larbi BOUDAD	PES, Faculté des Sciences, Université Mohammed V, Rabat	Rapporteur/Examineur
Anatoly ZEILIGUER	PES, Université d'Agricole d'Etat de la Russie MTA, Moscou, Russie	Examineur
Abdessamad EL ADRAOUI	PES, Faculté des Sciences, Université Mohammed V, Rabat	Examineur
Laurent BARBIERO	PH, IRD CNRS, Université de Toulouse, Toulouse, France	Examineur
El Bachir JAAIDI	PES, Faculté des Sciences, Université Mohammed V, Rabat	Invité

Année Universitaire : 2020/2021

# Dédicace

*Je dédie ce travail à :*

*A la mémoire de ma grand-mère adorée 'Maa', ton amour, ta douceur, ta tendresse, tes prières, ton soutien et tous les valeurs que tu as su m'inculquer marqueront ma vie à tout jamais. Maa, tu n'es plus là où tu étais, mais tu es partout là où je suis.*

*A ma très chère maman, tu t'es tant battu seule pour nous élever mes frères et moi, ton amour, ton soutien, tes conseils et même tes punitions étaient toujours là pour nous mettre sur le droit chemin, j'espère un jour être à ta hauteur, marcher la tête haute, ne rien craindre dans la vie et toujours être le meilleur de moi-même.*

*A ma chère épouse, un don du dieu, tu m'as toujours soutenu, compris et réconforté, merci pour ta tendresse, ton attention, ta patience et tes encouragements, merci pour tout. Aucune dédicace, aussi expressive qu'elle soit, ne saurait exprimer la profondeur de mes sentiments et l'estime que j'ai pour vous.*

*A mes très chers beaux-parents en reconnaissance de l'amour que vous m'avez offert, de tous les sacrifices que vous vous êtes imposés pour nous. A mes frères Anas et Khalil, qui n'ont cessé d'être pour moi une source de soutien et de courage. A Mon père, qui ne peut être que fier.*

*A toute ma famille, qui ont été toujours présents à mes côtés, je ne trouverais pas les mots pour décrire ma reconnaissance et ma gratitude à votre égard.*

*A mes amis, Yassir, Hatim, Mohammed et toute personne qui m'a soutenue de près ou de loin. J'espère qu'ils trouvent dans ce travail ma reconnaissance et ma gratitude.*

# Avant-Propos

Le présent travail a été réalisé dans le cadre d'une collaboration entre le laboratoire Géosciences, Eau et Environnement de la Faculté des Sciences de Rabat au Maroc, et le laboratoire d'hydrogéologie, UMR EMMAH, UFR-ip de l'Université d'Avignon en France, sous la direction du **Pr. Ilias KACIMI** et **Pr. Vincent VALLES**.

Je remercie très vivement mon directeur de thèse **Mr. Ilias KACIMI**, Professeur à la Faculté des Sciences de Rabat et Chef de département des Sciences de la Terre, de m'avoir accepté au sein du laboratoire « Géosciences Eau et Environnement (LGEE) », il m'a permis d'intégrer l'équipe image en me proposant un sujet très intéressant et m'a laissé la liberté de le réorienter au cours du déroulement de ma thèse. C'est également grâce à ces multitudes collaborations avec des laboratoires internationaux, notamment le laboratoire d'hydrogéologie de l'université d'Avignon que j'ai eu la chance de travailler avec plusieurs équipes de recherche. Au cours de ce travail, il a souvent attiré mon attention sur certaines questions scientifiques et m'a consacré beaucoup de temps, entre-autres pour s'occuper de l'organisation du jury de thèse. Je le remercie énormément, pour sa sympathie et ses qualités scientifiques et surtout humaines. Cette thèse lui doit beaucoup.

Je voudrais remercier tout particulièrement **Mr. Vincent VALLES**, Professeur et Directeur de recherche à l'Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement (INRAE) à l'Université d'Avignon en France, Co-directeur, de ma thèse, pour m'avoir dirigé tout au long de ce parcours de thèse. Il a toujours été disponible, à l'écoute de mes nombreuses questions, et s'est toujours intéressé à l'avancée de mes travaux. Les nombreuses discussions que nous avons eues ainsi que ses conseils sont pour beaucoup dans le résultat final de ce travail. Sa capacité d'analyse et son enthousiasme m'ont montré que le monde de la recherche pouvait être un univers passionnant. Enfin, ses nombreuses relectures et corrections de cette thèse ont été très appréciables. Pour tout cela merci.

Je remercie infiniment, **Mr Anas EMRAN**, Professeur à l'institut Scientifique de Rabat et directeur du Centre Régional Africain des Sciences et Technologies de l'Espace en Langue Française (CRAS-T-LF) à Rabat, d'avoir accepté de présider le jury de cette soutenance et ainsi d'examiner mon travail. Je le remercie surtout pour son esprit de partage et pour ses efforts déployés afin de mener cette thèse dans le bon sens.

Mes vifs remerciements vont à **Mr Mohammed ACHAB**, Professeur à l'Institut Scientifique de Rabat, rapporteur interne et examinateur de ma thèse, pour avoir accepté de faire partie des membres de Jury et pour l'ambiance de travail très agréable qu'il a su créer dans le laboratoire de Géo-biodiversité et de Patrimoine Naturel à l'Institut Scientifique, grâce à sa très grande ouverture d'esprit.

De même, Ma profonde gratitude va au **Mr Larbi BOUDAD**, Professeur à la Faculté des Sciences de Rabat, rapporteur interne et examinateur de mon travail de thèse, pour avoir aussi accepté d'être membre de Jury et en me permettant de bénéficier de ses conseils et expériences scientifiques.

Je remercie sincèrement **Mr Roger MOUSSA**, directeur de recherche au laboratoire d'étude des interactions des interactions Sol Agrosystème et Hydro système à l'Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (INRAE) de l'université de Montpellier, rapporteur externe et examinateur de ma thèse, pour avoir accepté d'examiner mon travail et de l'avoir enrichi par ses remarques, conseils et commentaires, afin de mettre ce travail dans sa vraie valeur.

Je remercie vivement **Mr. Abdessamad EL ADRAOUI**, Professeur à la Faculté des Sciences de Rabat et examinateur interne de ma thèse, pour avoir accepté d'examiner ce travail.

Mes remerciements vont aussi à **Mr Anatoly ZEILIGUER**, Professeur et chef du Centre de géo- et d'hydro-informatique à Université d'État de Moscou pour l'ingénierie environnemental et examinateur externe, pour l'intérêt qu'il a porté à mon travail et d'avoir accepté de faire partie des membres du jury et d'examiner le présent travail.

Je porte une grande reconnaissance à **Mr. Laurent BARBIERO**, chercheur à l'Institut de recherche pour le développement (IRD) et le Centre national de la recherche scientifique (CNRS), examinateur externe de cette thèse, dont le rôle dans la réalisation des différents articles scientifiques de ce travail est inestimable et qui n'a jamais ménagé, ni de son temps ni de ses efforts, pour m'aider à réaliser des publications scientifiques de haut niveau. Je le remercie particulièrement pour toutes les connaissances en recherche et méthodologie de publication scientifique qu'il a bien sus m'inculquer.

Mes vifs remerciements vont à **Mr El Bachir JAAIDI**, ancien professeur a la Faculté des Sciences de Rabat, pour avoir accepté notre invitation pour participer dans les membres de jury et pour être le premier à m'avoir accueilli à la Faculté des Sciences de Rabat, en m'acceptant en 2014 dans son Master de recherche en Géologie, Océanologie, Eau et SIG (GEOS). Qu'il trouve dans ce travail l'expression de ma gratitude.

Je remercie Professeur **Mohammed REGRAGUI**, doyen de la Faculté des Sciences de Rabat, de m'avoir donné l'opportunité de poursuivre mes études au sein de cette honorable faculté.

Je remercie le Directeur du centre d'études doctorales, d'avoir accepté ma demande de dérogation en 5ème année de doctorat.

Mes remerciements vont Syndicat Mixte d'Aménagement de la Vallée de la Durance (SMAVD) et particulièrement a Monsieur **Philippe PICON** et Monsieur **Pascal DUMOULIN** chargés des études ressource en eau, pour leur accueil durant les différents rencontres et réunions de travail ainsi que pour leur soutien et support pour l'avancement des travaux dans le bassin versant de la Durance.

Mes sincères remerciements vont aussi à Monsieur **Bernardo Mario ANDRÉ** Directeur de l'entreprise GHT - ATLAS en Angola pour son aide et son soutien à l'avancement des travaux dans le bassin du fleuve Cuanza.

Je remercie très particulièrement **Mme Amal SAIDI**, Professeure à l'Institut Scientifique de Rabat, pour les enseignements et expériences qu'elle a partagés avec moi en matière de Géologie Structurale et Télédétection et pour m'avoir supervisé dans plusieurs articles scientifiques durant la période de ma thèse. Ses qualités scientifiques et humaines m'ont beaucoup marqué.

Ma gratitude à **Mme Nadia KASSOU**, professeur à la faculté des Sciences de Rabat, pour m'avoir accompagné depuis mon Master jusqu'à la fin de ma thèse en portant un intérêt spécial à mes travaux et en me guidant pour réussir à publier dans des revues scientifiques de haut niveau, non seulement les travaux de thèse mais aussi le projet de Master.

Mes vifs remerciements à **Mme Jamila OUARDI** Professeur au Centre Régional pour les Professions de l'Éducation et de la Formation à El Jadida, sans qui une grande part de cette thèse n'aurait pas vu le jour. Je la remercie pour son soutien éminent à moi et aux autres doctorants du laboratoire pour l'avancement de leurs recherches.

Je remercie le **Mr. Vincent Marc**, professeur à l'Université d'Avignon, de m'avoir fourni les premières matérielles et méthodes potentielles pour la démarche scientifique de ce travail.

Spéciaux remerciements vont à notre chère **Mme Rachida**, secrétaire du département de géologie.

Je remercie tous les thésards de la Faculté des Sciences de Rabat et particulièrement mes collègues du département des sciences de la Terre pour la bonne ambiance de travail mais également pour les nombreux bons moments passés ensemble. Entre autres Amine, Meryem, Narjiss, Nourlhouda, Claver, Lahoucine, Abdellah, et Ismail,

## Résumé

En hydrologie, il est essentiel de comprendre les processus responsables du développement du réseau de drainage et de sa structuration, pour une meilleure prévision des risques hydrologiques et gestion des ressources en eaux. Ce travail a pour objectif d'étudier le déterminisme des types de réseaux de drainage dans trois pays, le Maroc, la France et l'Angola, afin d'identifier et de spatialiser, les mécanismes responsables de leur genèse au-delà de l'aspect régional. Les observations et les traitements réalisés sur les imageries satellitaires de haute résolution et sur plusieurs données de télédétection, ainsi que les observations dans le terrain, ont permis de distinguer des relations nettes qui semblent apparaître entre les types de réseaux de drainage et les propriétés des bassins, qui sont très semblables dans différents climats et environnements. Pour cela, une approche statistique multifactorielle traitant simultanément l'ensemble de ces paramètres permet de préciser les processus globaux qui contrôlent la distribution et la structuration des types de réseaux de drainage. Cette approche a également permis d'analyser les spécificités de chaque région, qui sont responsables de la variabilité hydrologique des bassins versants. L'aspect interrégional de cette étude a montré l'existence d'un processus global qui explique une part très importante de la variabilité des types de réseaux de drainage. Il concerne en premier degré la rugosité et la texture du relief, le type de roche et la structuration géologique, suivis des processus d'équilibres physiques du bassin versant (Infiltration, ruissellement et érosion). Ce travail a également permis d'identifier l'influence de l'occupation du sol dans la distribution des types de réseaux de drainage et l'impact de ces derniers sur le temps de concentration qui est une caractéristique très importante de la réponse hydrologique des bassins.

**Mots-clefs** : Type de réseau de drainage ; Structuration géologique; Statistiques multivariées ; Réponse hydrologique ; Anti-Atlas Oriental; Bassin versant de la Durance; Bassin du fleuve Cuanza

## **Abstract**

In hydrology, it is essential to understand the processes responsible for the drainage network development and structuring, in order to have a better prediction of the hydrological hazards and the management of water resources. This work is devoted to the study of the determinism of the drainage network patterns in three countries, Morocco, France and Angola, for the purpose of identifying and spatializing the general processes of their genesis beyond the regional aspect. Observations and processing of high-resolution satellite imagery and several remote sensing data, as well as field observations, have identified clear relationships that appear to emerge between drainage network patterns and basin properties, which are very similar in different climates and environments. Therefore, a multifactorial statistical approach was used to bring all these parameters into consideration in order to better understand the overall process that controls the distribution and structuring of drainage system patterns. This approach also made it possible to analyse the specificities of each region, which are responsible for the basins hydrological variability. The inter-regional aspect of this study has shown the existence of a global process that explains a very important part of the variability of the drainage network patterns. It concerns primarily the roughness and texture of the relief, rock types and geological structuring, followed by the processes of physical equilibrium in the catchment area (infiltration, runoff and erosion). This work has also made it possible to identify the influence of the land cover in the distribution of drainage network patterns and their impact on the watershed time of concentration, which is a very important characteristic of the basins hydrological response.

**Key words:** Drainage network pattern; geological structuring; multivariate statistics; hydrological response; Eastern Anti-Atlas; Durance river basin, Cuanza river basin.

# Sommaire

<b>Résumé</b> .....	6
<b>Abstract</b> .....	7
Introduction Générale : .....	11
Chapitre 1 : Bilan de l'état de l'art .....	17
I    Introduction : .....	17
1    Le réseau de drainage en interprétation géologique : .....	18
2    L'élaboration de la première classification des types de réseaux de drainage : .....	19
3    Structures et formes fluviales sur des surfaces planétaires : Analogie avec les structures terrestres .....	27
4    Les Classifications quantitatives des types de réseau de drainage : approche géométrique. ....	33
5    Influence de la structure de réseau de drainage sur la réponse hydrologique des bassins et l'acheminement et transport des sédiments .....	37
6    Conclusion : .....	39
Chapitre 2 : Matériels et Méthode .....	41
I    Introduction : .....	41
II   Présentation des zones d'étude: .....	41
1    Bassin du fleuve Cuanza- Angola : climat tropical .....	41
2    La région de l'Anti-Atlas Oriental : Climat Aride. ....	49
3    Le bassin versant de la Durance : Climat tempéré. ....	55
4    Justification du choix des trois zone d'études : .....	62
II   Matériels et méthodes: Sélection des paramètres et Outils mathématiques et statistiques: .....	63
1    Outils d'extraction et les paramètres du réseau de drainage : .....	64
2    Paramètres de Relief : .....	68
3    Les paramètres morfo-métriques : Paramètre Kg, Kh et Cl .....	70
4    Paramètre d'occupation de sol : Landcover .....	71
5    Paramètre de Temps de concentration : Tc .....	73
6    Paramètres géologiques et outils d'identification des structures géologiques : ....	75
7    Paramètres spécifiques : .....	83
8    L'analyse et exploration de données : .....	87
9    Outils mathématique : .....	92



III	Présentation et justification de la démarche retenue : .....	93
1	Présentation des principales étapes de la démarche retenue.....	93
2	Schéma synoptique de la démarche : .....	96
CHAPITRE 3 : Bilan des données et résultats des observations.....		98
I	Introduction:.....	98
II	Bilan des données acquises sur chacun de trois sites : Évaluation du volume d'information disponible pour chaque zone.....	98
1	Bilan des données et paramètres obtenus sur la région de l'Anti-Atlas Oriental : ...	98
2	Bilan des données et paramètres obtenus sur le bassin versant de la Durance.....	102
3	Bilan des données et paramètres obtenus sur le bassin du fleuve Cuanza : .....	104
III	Premières constatations et traitement des données : Approche unifactorielle descriptive .....	107
1	Introduction :.....	107
2	Distribution et caractérisations du réseau de drainage dans la région de l'Anti-Atlas Oriental :.....	108
3	Distribution et caractérisations du réseau de drainage dans le bassin du fleuve Cuanza .....	120
4	Distribution et caractérisation du réseau de drainage dans le bassin versant de la Durance .....	126
IV	Synthèse des résultats et analyse issues d'observations et descriptions .....	132
V	Conclusion: .....	134
CHAPITRE 4 : Traitement mathématique et étude de sensibilité.....		135
I	Introduction.....	135
1	Etude de la structure des données par ACP.....	135
2	Dimensionnalité de l'information : Approche comparative entre les trois zones	153
3	Analyse discriminante pour les trois zones .....	156
4	Mesure de similarité et différenciation entre type de réseau de drainage par la méthode de classification hiérarchique ascendante.....	185
II	Analyse de sensibilité .....	188
1	Analyse de sensibilité de l'analyse des composantes principales.....	189
2	Analyse de sensibilité sur l'Analyse discriminante linéaire .....	193
III	Synthèse générale du traitement mathématique.....	195
Conclusion générale et prospective .....		198
1	L'aspect multifactoriel du déterminisme des types de réseau de drainage .....	198

2	Complexité du processus de genèse des types de réseaux de drainage et réduction de la dimensionnalité de l'information .....	199
3	L'existence d'un processus global qui contrôle la genèse des types de réseaux de drainage, observés sur les trois méthodes.....	200
4	L'influence de l'occupation du sol/couverture végétale dans la caractérisation des types de réseau de drainage : .....	202
5	Impacte des différents types de réseau de drainage sur le Temps de concentration des bassins versants, vers une amélioration des modélisations hydrologiques.....	203
6	Perspectives :.....	203
	<b>Références bibliographiques.....</b>	<b>205</b>
	<b>Liste des figures .....</b>	<b>218</b>
	<b>Liste des tableaux .....</b>	<b>226</b>
	Annexe I : Algorithme de Transformée de Hough.....	228
	Annexe II : Anti-Atlas Oriental.....	229
	Annexe III : Bassin Versant de la Durance .....	239
	Annexe IV : Bassin du fleuve Cuanza.....	244

# Introduction Générale :

Afin de gérer les ressources en eau de plus en plus rares du monde, nous devons avoir une bonne compréhension de la façon dont l'eau se déplace sur la planète et de ce qui influence la qualité de l'eau. L'essentiel des applications pratiques de l'hydrologie au niveau mondial est la prévention des risques (inondations, destructions par les crues, probabilité d'événements extrêmes...) et non la gestion de la ressource. L'hydrologie moderne s'intéresse à la distribution de l'eau à la surface de la terre et à son mouvement au-dessus et au-dessous de la surface, et à travers l'atmosphère. Cette définition large suggère que toute l'eau relève de la compétence d'un hydrologue, alors qu'en réalité c'est l'étude de l'eau douce qui est primordiale. Les deux principales voies d'accès à l'étude de l'hydrologie viennent de l'ingénierie et de la géographie, en particulier le côté sciences de la terre de la géographie.

L'approche des sciences de la terre provient de l'étude des formes de terrain (géomorphologie) et s'enracine dans une histoire qui explique les processus qui conduisent à la circulation de l'eau autour de la terre et qui tente de comprendre les liens spatiaux entre ces processus. L'approche de l'ingénierie tend à être un peu plus pratique et cherche à trouver des solutions aux problèmes posés par l'eau qui se déplace (ou ne se déplace pas) autour de la terre (Beven et al., 2020). Les tendances scientifiques actuelles mettent en faveur des technologies de télédétection couplées avec les disciplines de l'analyse et l'exploitation des données qui sont aujourd'hui de plus en plus utilisées pour le suivi régional/global des variables hydrologiques et le forçage, le calibrage et l'assimilation dans les modèles hydrodynamiques, hydrologiques et hydrométéorologiques (Alsdorf et al., 2007; Rast et al., 2014; Lange et al., 2020).

Grâce aux réseaux de drainage, l'hydrologie s'est montrée d'une grande utilité, en offrant un grand avantage pour la prévention des risques et la gestion des ressources en eaux. Pour cela, différents auteurs ont noté l'utilité du réseau de drainage dans l'analyse des structures géologiques, la détermination de la nature lithologique et la géomorphologie du terrain tout en traçant l'histoire géologique de la zone étudiée (Twidale, 2004; Malik and Mohanty, 2007; Babault et al., 2012 ; Abdelkareem and El-Baz, 2015 ; Radaideh et al., 2016; Charizopoulos, et al., 2019, Bahrami et al., 2020). Les réseaux de drainage jouent un rôle fondamental dans les processus des bassins versants, étant donné qu'ils représentent les voies de transport de l'eau, des solides et des solutés dans les paysages et font l'objet d'analyses approfondies en termes de formation, évolution et de fonctionnement (Horton, 1945; Strahler, 1952; Rinaldo et al., 1991; Pereira-Claren et al., 2019), et exerçant un contrôle important sur la réaction hydrologique du bassin versant (Gupta et al. 1980 ; Rinaldo et al., 1991; Jung et al. 2017).

Dans cette étude on s'intéresse particulièrement aux types et modèles de réseaux de drainage, qui sont définis comme étant des schémas et des arrangements spatiaux du réseau de drainage très distincts dans le paysage. Les premiers travaux menés sur le réseau de drainage et ses types, ont définis ces derniers comme étant déterminés principalement par des inégalités de surface de pente et des inégalités dans la résistance des roches (Zernitz, 1932; Parvis, 1950; Howard, 1967). Sur cette base les types de réseaux basiques ont été définie à savoir les réseaux contrôlés par la pente : dendritique, parallèle, radiale et distributaire, et ceux contrôlés par la structuration géologique : angulaire/rectangulaire, treillis et annulaire (Zernitz, 1932) (Figure 1).

Grâce à l'intégration des photographies aériennes et leur interprétation, Parvis (1950) a révélé des modifications dans les types basiques de réseaux de drainage, en total 50 nouveaux types ont été identifiés par ce dernier, certains de ces types modifiés sont le réticulaire, le fantôme, chevron, barbelé et lacunaire. Howard (1967) a mené une étude plus approfondie, en ajoutant des nouveaux types basiques comme le réseau multi-bassinale et le réseau tordu, en présentant des types basiques modifiés qui se distinguent des simples types basiques par certains aspects régionaux assez évidents et qui peuvent être formés par le phénomène de transition qui représente le passage ou l'évolution d'un modèle de réseau à un autre soit dans l'espace ou dans le temps. Ce dernier auteur a aussi présenté les types de variétés qui sont caractérisés par des détails internes, souvent obscurs. Dans une vision plus large ces types basiques, modifiés ou de variétés, ont été observés comme évoluant par sélection naturelle sous l'effet de la pente et la structuration géologiques d'une façon analogues aux genres, espèces et variétés de la classification zoologique (Zernits, 1932; Howard, 1967; Twidale, 2004).

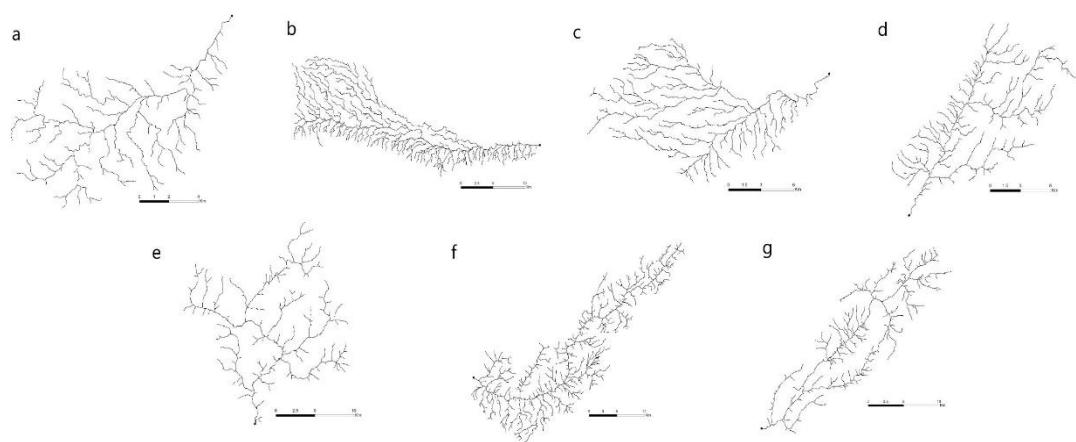


Figure 1 : Exemple des types de réseaux de drainage : (a) dendritique, (b) pinnate, (c) parallèle, (d) treillis, (e) rectangulaire, (f) chevron et (g) barbelé.

Différents auteurs ont observés que les types de réseaux drainage peuvent refléter la pente et la structuration géologiques initiale de la surface ou les épisodes successif par lesquels le relief a été modifié, particulièrement dans les zone d'activité tectonique, y compris les soulèvements, affaissements, plissements, les fractures, les jointures des failles, ainsi que le dépôt marins, fluviales, glaciers et volcaniques (Zernitz, 1932; Parvis, 1950; Melton, 1957; Twidale, 2004; Hodgkinson et al., 2006 ; Radaideh et Mosar, 2019). D'autres facteurs comme la lithologie, les caractéristiques géologiques héritées ou les captages fluviaux peuvent jouer un rôle important dans le développement des différents types de réseaux de drainage.

Le type de réseau de drainage a aussi été constaté qu'il influence potentiellement le transport des sédiments et la réponse hydrologique du bassin, particulièrement à travers le temps de concentration (Jung et al., 2017). Cependant, ces auteurs sont restés au stade des hypothèse issues d'observations, descriptions et classifications (Tableau 1). Ils n'ont jamais démontré les liens évoqués entre les propriétés physiques de l'environnement et les types de réseaux de drainage. Une des raisons possibles est que ce lien est partiel car le déterminisme du type de réseau de drainage pourrait être plus complexe qu'un lien de causalité à partir d'un paramètre unique. Ceci pourrait expliquer que ces auteurs n'ont jamais été plus loin d'une simple observation ou clasification. Il semblerait donc que la démonstration d'une telle relation constitue un verrou scientifique qu'il serait important de lever tout au moins en partie.

Ainsi dans ce travail, nous reprendrons les approches descriptives et d'observation initiés par les chercheurs précédents, mais nous essayerons de rechercher un lien plurifactoriel entre les différents descripteurs du paysage et le type de réseau de drainage. Ceci constituera notre hypothèse de travail. L'approche sera donc résolument plurifactorielle et nous tenterons non seulement d'évoquer les liens possibles entre telle ou telle caractéristique du milieu et le type de réseau, mais nous tenterons de quantifier ce lien et déterminer le rôle et la contribution de ces derniers descripteurs, ainsi que leur rang dans l'influence sur le développement des réseaux de drainage

Par ailleurs, dans les études conduites en science de la terre, il existe toujours le risque de se focaliser sur un fait local ou régional n'ayant pas de validité plus générale. Pour éviter cet écueil, il a été décider de travailler sur une grande diversité de régions et de situations à l'échelle planétaire. Ce travail a été donc conduit sur un ensemble de bassins versants qui répondent à des critères spécifiques, à savoir : une répartition sur une large gamme de climat répartis sur trois zones d'étude, le bassin versant de la Durance (climat tempéré), le bassin du fleuve Cuanza (Climat tropical humide) et l'Anti-Atlas Oriental (climat aride) (Figure 2). Ces zones présentent aussi une grande variété dans leurs proprietes physiques, de point de vue géologique (région d'intense activité tectonique, Craton tectoniquement stable), lithologique

(roche granitique métamorphique, roche volcanique, roche sédimentaire), et une couverture végétale diversifiée (forêt tropicale, forêt mixte, savane, savane boisée, oasis et désert).

A l'aide des imageries satellitaires de haute et moyenne résolution, et des autres types de données de télédétection, les SIG et les observations de terrain, on a d'une part, identifié et classer par interprétation visuelle les différents types de réseaux de drainage selon les classifications références de Zernitz (1932) et Howard (1967). D'autre part, différents paramètres ont été extrait sur les trois zones d'études, décrivent la topographie, la géologie, la morphométrie, les caractéristique hydrologiques, l'occupation du sol et le climat des bassins versants. Ces paramètres sont introduits comme des entrés dans le traitement mathématique d'algèbre linéaire, plus précisément les méthodes statistiques multivariées, qui représentent l'approche expérimentale de cette étude et qui permettra de valider ou de réfuter les hypothèses et constations réalisés par observations et descriptions.

Ce manuscrit est organisé en quatre chapitres. Le **chapitre 1** dresse un état de l'art des problématiques et hypothèse associées à l'étude des types de réseaux de drainage. Le **chapitre 2** sert a présenté les zones d'études en détail, les paramètres sélectionnées pour les différents traitements, les outils mathématiques utilisés et la démarche d'investigation expérimentale développée. Le **chapitre 3** est compose de deux parties, la première présente le bilan des données récoltée sur les trois zones d'études qui a permis la construction d'une base de données très fournie et diversifiée pour les différents traitements mathématiques.

La deuxième partie présente les premiers constations et résultats obtenus par observations de ces données et la construction des premières hypothèses sur les relations qui existe entre les différents types du réseau de drainage et les propriétés physiques des bassins versants. Le **chapitre 4** présente la partie expérimentale concernant le traitement statistique multivarié, et affiche les premiers résultats de la structuration des données par l'Analyse en Composante Principale (ACP), les facteurs de genèse et de discriminations des types de réseaux de drainage par l'analyse discriminante linéaire (AD) et les mesures de similarité entre ces derniers.

Ce chapitre présente aussi une analyse de sensibilité du modèle mathématique pour déterminer les variables d'entrée qui contribuent le plus aux mécanismes et processus identifiées par le traitement mathématique. Finalement, **la conclusion général et perspective** clôture ce travail en mettant en évidence les principaux résultats et enseignement acquises ainsi que les perspectives de recherche.

Tableau 1: Les plus important travaux réalisés sur les types de réseaux de drainage depuis 1932 jusqu'a 2019

Auteur	Années	Localisation	Climat	Nombre de bassins/reseaux de drainage	Methode d'étude
Emilie R. Zernitz	1932	Etat Unis	Aride/Semi-Aride	15	Observations cartographiques
Merle Parvis	1950	Etat Unis	Aride/Semi-Aride	50	Observations par Photographie aeriennes
Arthur David Howard	1967	Etat Unis	Aride/Semi-Aride	36	Observations cartographiques
Charles Ichoku and Jean Chorowicz	1994	Etat Unis	Aride/Semi-Aride	14	Géométrie planforme
C.R. Twidale	2004	Australie	Aride/Semi-Aride	40	Observations cartographiques et Photographie aeriennes
Alfonso I. Meji' and Jeffrey D. Niemann	2008	Etat unis	Aride/Semi-Aride	50	Géométrie planforme
Jung K and Ouarda TBMJ	2015	Oman	Aride	14	Géométrie planforme
Omar M.A.Radaideh et al	2016	Jordanie	Aride	Non Precisiee	Télédetection par satellite et les SIG
Jung K et al	2017	Etat Unis	Aride/Semi-Aride	68	Estimation du temps de concentration
Jung K et al	2019	Etat Unis	Aride/Semi-Aride	50	Géométrie planforme
Pereira-Claren A et al	2019	Chili	Humide	74	Géométrie planforme



Figure 2 : Carte de localisation des réseaux de drainage étudiés dans le cadre de cette thèse (Point rouge), et les réseaux de drainage étudiés dans les travaux antérieurs présentés dans le tableau 1 (Point jaune).



# Chapitre 1 : Bilan de l'état de l'art

## **I Introduction :**

La sensibilité du réseau de drainage aux perturbations externes géologiques, géomorphologiques et climatiques fait de lui un élément clé pour comprendre l'évolution passée et future dans le paysage (Twidale, 2004; Struth et al., 2019). Les types de réseaux de drainage constituent un des aspects les plus marquants dans cette interrelation, leurs diversité sur différentes échelles, que ce soit à l'échelle régionale des grands bassins (Alvarez, 1991; Moore et al., 2001; Brookfield, 2008) ou bien à l'échelle locale au niveau des sous bassins (Mejía and Niemann, 2008 ; Walley et al., 2018; Knight et al., 2018), ou encore que ce soit leur dispersion au niveau du globe terrestre et dans d'autre planètes et satellites telluriques de notre système solaire (Burr et al., 2013; Zaki et al., 2019) , justifie l'hypothèse de l'existence d'un processus complexe global responsable de ces configurations.

La structure du réseau a un grand contrôle sur la réponse hydrologique du bassin versant (Rinaldo et al., 1991; Pereira-Claren et al., 2019). Depuis les travaux pionniers de Rodriguez-Iturbe et Valdés (1979) et de Gupta et al (1980), la structure du réseau de drainage a été largement utilisée pour prévoir la réponse hydrologique du bassin versant. De plus, les types de drainage peuvent influencer sur les processus géomorphologiques, comme l'érosion fluviale, à court terme (Swanson et al., 1988), ce qui fait de l'étude de ces derniers un outil nécessaire permettant de mieux comprendre les processus de transport des sédiments. Ainsi, les progrès réalisés à cet égard sont pertinents pour l'élaboration d'approches améliorées de modélisation hydrologique, hydraulique et du transport des sédiments.

D'un cote par observation des cartes topographiques et photographies aériennes, des auteurs ont suggérés une relation Topographie-géologie-type de drainage, ce qui a constitué la base des premières classifications (Zernitz, 1932; Parvis, 1950; Howard, 1967), mais ceci n'a jamais été quantifié ou mesuré. D'un autre côté les caractéristiques géométriques comme l'angle de jonction des affluents, la sinuosité et l'allongement du bassin versant ont permis le développement de méthode de classification quantitative (Pereira-Claren et al., 2019 ; Jung et al., 2019). Mais le manque d'un déterminisme des types de réseaux de drainage en intégrant les paramètres topographique et géologiques, et climatiques rend obscur le processus qui se manifeste dans ces configurations de réseaux. Par ailleurs aucune théorie sur la nature, l'aspect, la hiérarchisation de ces paramètres et leurs degrés d'implications dans le déterminisme des types de réseau de drainage ne fait également foi.

Ainsi ce chapitre 1 a pour objectif de dresser un état de l'art des connaissances actuelles acquises dans le domaine de la caractérisation, la reconnaissance et la classification des types de réseaux drainage, leur importance en hydrologie et sur les différentes approches tentant de relier ces types de réseaux à différents facteurs responsables de leur structure, afin de rendre claire le fondamental de la thèse.

## **1 Le réseau de drainage en interprétation géologique :**

Le réseau de drainage d'une région est affecté par des facteurs tels que la structure du substratum rocheux, la texture du sol, la topographie, les cours d'eau artificiels, les précipitations, la végétation et l'évaporation. Étant donné que les voies de drainage et les formes de relief d'une région sont interdépendantes, elles existent ensemble en tant que caractéristiques interdépendantes de la région (Melton, 1957). Par conséquent, les sols et le substratum rocheux influencent l'évolution et le caractère des configurations des nombreux cours d'eau et affluents d'une région. Ces faits mènent à la prémisse que les types de réseaux de drainage peuvent être utilisés pour identifier les sols et les roches en place à l'échelle régionale. (Parvis, 1950; Howard, 1967).

Plusieurs études ont été effectuées sur les réseaux de drainage et ces différents types et configurations pour comprendre leurs modes de formation et leur évolution et les facteurs qui les contrôlent, dans différents endroits du globe qui ont marqué l'histoire géologique de la terre et qui contiennent les plus anciens et complexes édifices et paysages géologiques de la terre, afin d'extraire des indices et des informations qui peuvent renforcer des hypothèses sur certains événements géologiques majeurs (Robl et al., 2015; Ferrater et al., 2015; Swartz et al., 2018; Petit et al., 2019; Struth et al., 2019). Par exemple dans la chaîne de Flinders du Craton australien au sud de l'Australie le réseau de drainage du géosynclinal d'Adélaïde a été étudié pour déterminer sa distribution et l'identification des différents types de réseaux en relations avec les structures géologiques spectaculaires de cette région (Twidale, 1994 ; Twidale, 1997 ; Twidale, 2004). En Afrique de Sud des études ont été réalisées sur la réorganisation du réseau de drainage depuis la rupture du Gondwana, où les sédiments fluviaux continentaux de l'ère mésozoïque-cénozoïque reflètent les systèmes fluviaux qui existaient avant et immédiatement après cette rupture continentale (Bootsman, 1997; Moore et Larkin, 2001; Moore et Blenkinsop, 2003).

D'autres études ont été conduites sur l'effet de la collision cénozoïque de l'Inde-Asie sur l'évolution des grands systèmes fluviaux de l'Asie de sud, où le développement du réseau de drainage dans les chaînes de montagnes de collision est lié à des mouvements de plaque de grande échelle, ainsi qu'à des accidents structuraux et climatiques locaux tels que de grands glissements de terrain (Malik et Mohanty, 2007; Brookfield, 2008). Dans le même contexte

des chaînes de collisions, le contrôle de la tectonique active et passive sur le drainage transversal et le développement des gorges dans la chaîne de collision du Haut Atlas du Maroc a fait l'objet d'une étude (Stokes et al., 2008), où le mode d'incision fluviale, le positionnement et la distribution du réseau de drainage et l'évolution subséquente du drainage transversal sont directement liés à la tectonique active et au soulèvement de la chaîne du Haut Atlas dû à la collision de plaques en cours entre l'Afrique et l'Europe.

Ces études ont été réalisées sur la base de plusieurs approches. D'un côté l'évaluation des variations spatiales et temporelles de la lithologie et de la structure géologique, et d'un autre côté la géomorphologie des zones étudiées a été étudiée afin d'évaluer dans quelle mesure l'expression géomorphologique ainsi que le développement du réseau de drainage qui en résulte ont été influencés par la lithologie et la structure du substratum rocheux (Twidale, 2004; Stokes et al., 2008). D'autres études plus récentes ont adopté des approches plus modernes au niveau technologique qui intègrent la télédétection, par l'utilisation des imageries satellitaires optiques et radar, les modèles numériques de terrain (MNT), les photographies aériennes et les outils du système informatique géographique (Abdelkareem et El-Baz, 2015; Stokes et al., 2015; Radaideh et al., 2016; Bouramtane et al., 2018; El Janati, 2019; Bouramtane et al., 2020).

## **2 L'élaboration de la première classification des types de réseaux de drainage :**

Durant l'année, 1932, Emilie R. Zernitz, à cette époque assistante de recherche en physiographie à l'Université Columbia, a posé les premières bases des classifications des types de réseaux de drainage et qui sont largement considérées actuellement en plus d'autres travaux plus élaborés (Parvis, 1950; Howard, 1967) comme une source définitive de classification. Le travail de Zernitz (1932) se base principalement sur l'observation et l'analyse des cartes topographiques de plusieurs régions dans les États Unis d'Amérique et se fonde sur une étude assez détaillée des tendances des cours d'eau en vue de clarifier les principes fondamentaux de chaque type de drainage, en vue d'aboutir à des conceptions plus claires des différents types et qui augmenteront ainsi leur utilité en tant que critères diagnostiques préliminaires dans l'interprétation des formes terrestres et de la structure géologique.

Les observations de Zernitz (1932) ont conduit à l'hypothèse que la topographie et la structuration géologiques sont les facteurs contrôlant la formation des types de réseaux de drainage. La topographie induit la formation de motifs tels que les dendritiques parallèles, radiaux et distribués, tandis que la structure géologique produit des arrangements droits, rectangulaires, en treillis et annulaires.

Parvis (1950) a l'aide des photographies aériennes, en les considérant comme les premières données acquises par télédétection, à analyser les types de réseaux de drainage pour l'identification des sols, et le substrat rocheux. En effet, La relative facilité avec laquelle les réseaux de drainage peuvent être observés sur les photographies aériennes facilite la détermination des différents types de drainages qui traduisent les propriétés physiques du terrain. En plus des types identifiés par Zernitz (1932), Parvis (1950) revient à lui l'identification de 50 nouveaux types, subdivisés entre ceux qui sont des modifications des types de base (Howard, 1967) et ceux qui sont des types de réseaux typiques à leurs régions de développement.

Le travail de Howard (1967), est une élaboration de la classification de Zernitz (1932) en subdivisant les types de réseau de drainage en type basique et types basiques modifiés. A ces derniers, il a ajouté des variétés de type. Le type basique est un type de réseau dont les caractéristiques brutes le distinguent facilement des autres modèles de base, comme les types dendritique, parallèle, treillis, rectangulaire et annulaire. Par contre les types basiques modifiés diffèrent des types basiques dans certains aspects régionaux assez évidents comme, par exemple, une tendance au parallélisme des plus grands affluents dans une région de type dendritique. Ainsi, de nombreux types basiques modifiés ont un caractère transitoire entre eux et la désignation de ces modèles peut être une question de jugement.

Dans la partie qui suit on va présenter plus en détail les types de réseaux basiques et les types basiques modifiés, en donnant un aperçu sur leurs caractéristiques décrites dans la littérature sur base des observations. Il est à noter qu'il existe plus de 50 types de réseaux de drainage, nous allons ainsi présenter ici que ceux qui sont le plus souvent observés et qui font l'objet de cette étude.

## **2.1 Les types de drainage basique :**

### **2.1.1 *Le type dendritique :***

Le réseau de drainage dendritique est caractérisé par des ramifications irrégulières dans toutes les directions et des affluents rejoignant le cours principal à tous les angles. Le type est appelé "dendritique" car il se ramifie comme un arbre, mais cela ne signifie pas que le terme "dendritique" doit s'appliquer à tout système de drainage ramifié. Le réseau dendritique peut être comparé à la ramification d'un pommier, tandis que la ramification qui ressemble à un pin ou à un peuplier de Lombardie n'est pas dendritique (Zernitz, 1932). Le drainage dendritique se développe là où les roches offrent une résistance uniforme à l'érosion dans une direction horizontale, et on trouve de telles conditions dans les lits plats des plaines et des plateaux (Radaideh et al., 2016), ainsi que dans les roches cristallines massives (Zernitz, 1932; Parvis,

1950; Jung et Ourda, 2017). Des roches de composition différente mais de résistance égale peuvent se trouver dans des régions qui ont subi un métamorphisme intense.

Étant donné que le drainage dendritique se développe à la suite de plusieurs conditions structurelles, la structure dans un cas donné ne peut pas être déduite aussi facilement qu'elle peut l'être d'autres types de drainage (Howard, 1967). Elle peut suggérer des roches sédimentaires horizontales, un drainage superposé sur des roches sédimentaires plissées de résistance égale, des roches ignées massives ou des métamorphoses complexes. En général, le drainage dendritique implique un manque de contrôle structurel marqué. Plusieurs auteurs ont identifié des types de réseaux dendritiques dans différentes régions du globe (Figure 3), Aux États Unis d'Amérique (Zernitz, 1932; Parvis, 1950; Mejía et Niemann, 2008), en Jordanie (Rdaideh et al., 2016), en Émirats Arabes Unis et Oman (Jung et Ourda, 2015).

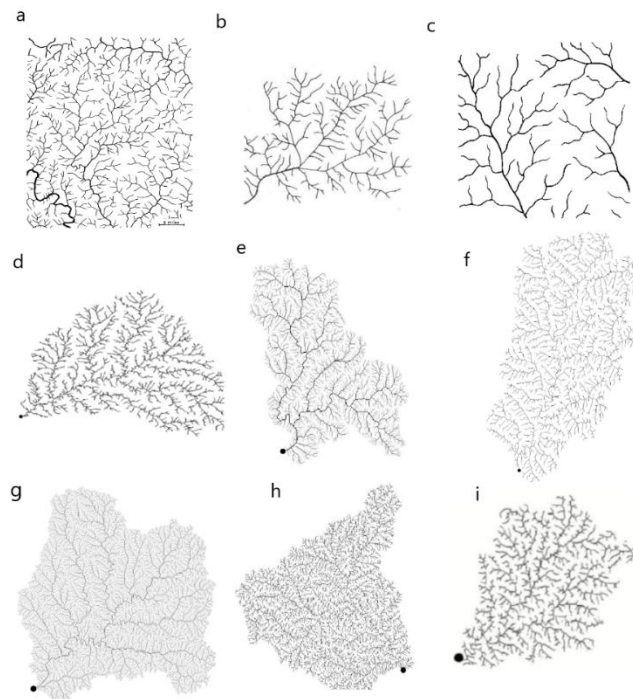


Figure 3: Exemple de type de réseau dendritique identifié par (a) Zernitz (1932) (b) Parvis (1950) (c) Howard (1967) (d) Mejía et Niemann (2008) (e) Jung et Ourda (2017) (f) Jung et al (2015) (g) Jung et al (2017) (h) Jung et al, (2019) (i) Pereira-Claret al (2019).

### 2.1.2 Le type parallèle :

Le type de drainage parallèle, se forme lorsque les cours d'eau s'écoulent presque parallèlement les uns aux autres et se rejoignent à des angles aigus (Figure 4). Le drainage parallèle implique soit une pente régionale prononcée, soit un contrôle de la pente par des caractéristiques topographiques parallèles telles que des surfaces remodelées glaciaires de type moraine de fond cannelée, ou un contrôle par des structures parallèles pliées ou faillées.

Ils se forme aussi dans les plaines côtières ou lacustres nouvellement émergées, sur les pentes abruptes des fossés glaciaires, sur les parois des jeunes vallées fluviales, sur les falaises lacustres ou maritimes et sur les falaises de failles, les cours d'eau seraient contrôlés par la pente (Zernitz, 1932; Twidale, 2004; Radaideh et al., 2016).

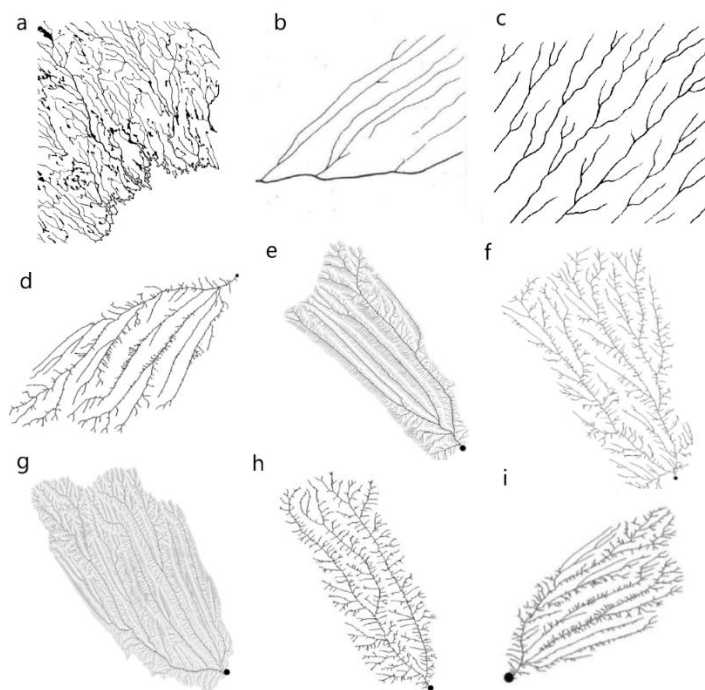


Figure 4: Exemple de type de réseau parallèle identifié par (a) Zernitz (1932) (b) Parvis (1950) (c) Howard (1967) (d) Mejía et Niemann (2008) (e) Jung et Ourda (2017) (f) Jung et al (2015) (g) Jung et al (2017) (h) Jung et al, (2019) (i) Pereira-Claren et al, (2019)

### 2.1.3 Le type treillis :

Le type de réseau en treillis implique un effet de grille que forment les affluents secondaires allongés et parallèles au cours d'eau principal (Figure 5). Ces affluents secondaires sont habituellement très allongés et se connectent à peu près à angle droit par rapport aux cours d'eau dans lesquels ils se déversent (Zernitz, 1932). Les types en treillis sont typiques des zones d'affleurements à peu près parallèles ou légèrement arqués associés aux flancs des anticlinaux et des synclinaux dans des séquences de formations sédimentaires plissées et dont la résistance varie, comme dans les Appalaches de l'est des États-Unis (Zernitz, 1932; Twidale, 2004).

Parfois, les affluents en forme de treillis ne pénètrent pas dans le cours d'eau principal avec un angle droit, cela peut se produire par les milliers d'anomalies ou de fractures mineures qui se produisent dans les roches provoquent des sinuosités qui sont aussi un facteur supplémentaire dans la prévention des assemblages à angle droit (Twidale, 2004). Le parallélisme des affluents dans le type en treillis peut induire en erreur à une interprétation d'un type de

drainage parallèle, il faut ainsi se mettre à l'évidence que le parallélisme dans le drainage en treillis se limite dans une large mesure à une relation parallèle entre les affluents, Dans le type parallèle simple, une telle relation n'est pas nécessaire, puisque le parallélisme peut être entre des cours d'eau non reliés entre eux ou il peut exister entre des affluents (Zernitz, 1932; Howard, 1967).

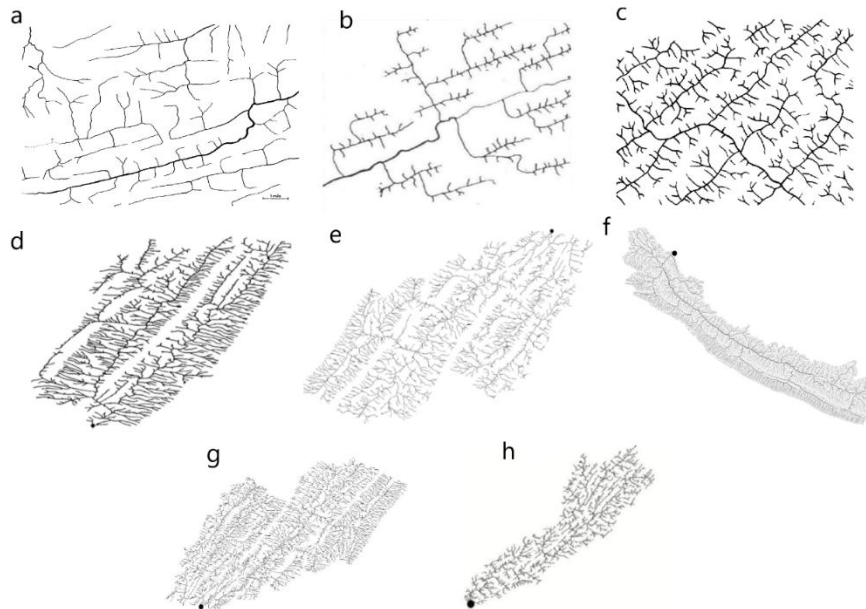


Figure 5: Exemple de type de réseau treillis identifié par (a) Zernitz (1932) (b) Parvis (1950) (c) Howard (1967) (d) Mejía et Niemann (2008) (e) Jung et al (2015) (f) Jung et al (2017) (h) Jung et al, (2019) (i) Pereira-Clarenet al, (2019).

#### 2.1.4 Le type rectangulaire :

Le type rectangulaire/angulaire est caractérisé essentiellement par de cours d'eau rectilignes qui se connectent à angle droit, soit entre affluents ou avec le cours d'eau principal et leurs chenaux ont tendance à être très sinueux (Figure 7). La disposition des divers éléments du type rectangulaire, reflète l'espacement et la disposition des fractures dans la roche encaissante (Zernitz, 1932). Ce type se distingue du type treillis par son aspect plus irrégulier, l'absence d'un parallélisme parfait des cours d'eau latéraux et le fait que ces derniers ne sont pas nécessairement aussi nettement allongés.

Le contrôle structural est proéminent dans ce type de drainage, car le motif est directement conditionné par les jointures à angle droit des failles (Zernitz, 1932; Howard, 1967; Twidale, 2004). L'un des plus célèbres réseaux rectangulaires est la gorge du Zambèze sous les célèbres chutes Victoria, qui montre une forme rectangulaire frappante (Figure 7). Les fractures du plateau basaltique traversé par la rivière ont été un facteur important dans la détermination du cours de la rivière. Le gouffre transversal de plus d'un kilomètre de long

dans lequel descendent les eaux des chutes a été creusé le long d'une des fractures verticales. Ces fractures sont indépendantes de l'assemblage en colonnes caractéristique du basalte. Quant aux affluents qui drainent les terrains basaltiques, ils se connectent aussi à angle droit, probablement en raison des plans de fracture orientées est et ouest (Zernitz, 1932; Twidale, 2004; Unrug, 1987; Key et al., 2015). Par observation de l'imagerie satellitaire cette assemblage de failles forme un réseau en zigzag.

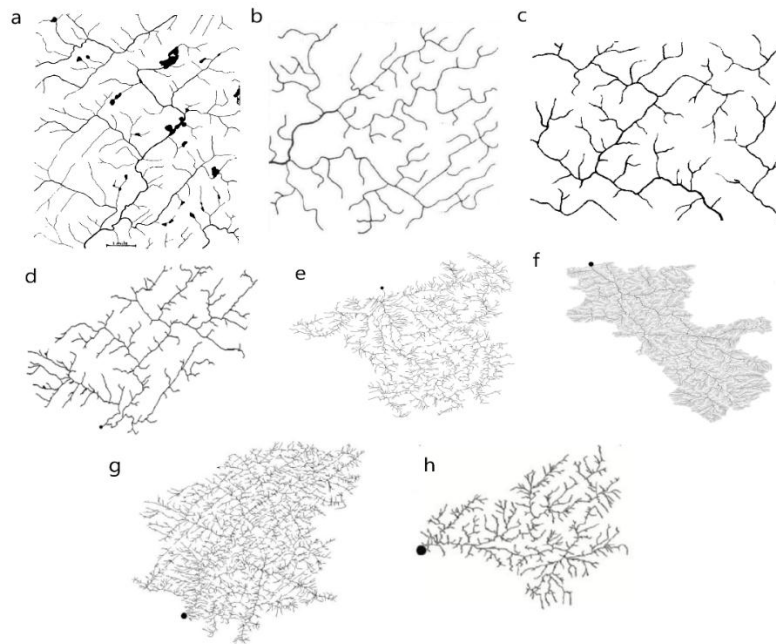


Figure 6: Exemple de type de réseau rectangulaire identifié par (a) Zernitz (1932) (b) Parvis (1950) (c) Howard (1967) (d) Mejía et Niemann (2008) (e) Jung et al (2015) (f) Jung et al (2017) (h) Jung et al, (2019) (i) Pereira-Claren et al, (2019).

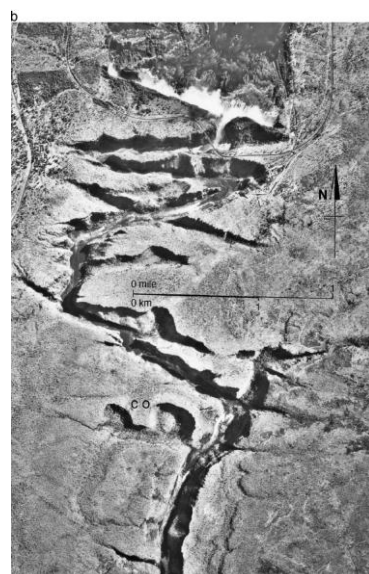




Figure 7: Photographie aérienne verticale de la vallée du Zambèze en aval des chutes Victoria, montrant un motif en zigzag contrôlé par des fractures dans le basalte jurassique (Twidale, 2004)

## **2.2 Les types basiques modifiés :**

Dans les paragraphes qui précèdent, nous avons discuté des quatre principaux types de réseaux de drainage qui sont actuellement communément reconnus, et qui ont été identifiés et étudiés en détail dans le cadres de cette thèse sur les trois zone d'études. Cependant, ceux-ci, n'incluent pas tous les types qui se forment plus ou moins couramment. Il existe d'autres types qui s'écartent à des degrés divers de la classification établie. On parle ici des types basiques modifiés, bien que généralement reconnus comme appartenant à l'un des types de base, ils diffèrent dans certaines caractéristiques régionales. Par exemple, le degré de parallélisme des principaux cours d'eau dans une région de drainage dendritique est généralement fonction de la pente régionale. Sur différentes déclivités, il peut donc y avoir toutes les transitions du drainage dendritique vers le drainage parallèle (Zernitz, 1932; Howard, 1967).

Zernitz (1932) a identifiée dix types basiques modifiés, cependant il a fallu attendre presque vingt années après pour obtenir une panoplie plus large de ces derniers, publiés par Parvis (1950). Les résultats de Parvis (1950) sont les fruits d'une recherche menée par des ingénieurs de recherche dans les laboratoires du Joint Highway Research Project de l'université Purdue, qui ont utilisés des photos aériennes pour construire des cartes détaillées du drainage de l'état l'Indiana.

Au cours des étapes progressives de la compilation de ces cartes, des types de drainage récurrents ont été observés. Cela a mené à l'étude des configurations de drainage sur les photographies aériennes de zones dont les caractéristiques topographiques et géologiques sont connues et qui se trouvent ailleurs aux États-Unis. Cette dernière recherche a permis de caractériser des nouveaux types de drainage et plus précisément des types basiques modifiés et des types de drainage typique de certaines régions. En total plus 50 types dont ceux observés par Zernitz (1932) ont été identifiés. Howard (1967) a donné par la suite une analyse plus fine de ces types basique modifiés, mais elle est jugée dans certains endroits trop élaborée et trompeuse (Twidale, 2004). Dans ce qui suit, on a présenté que deux types basiques modifiées qui ont été identifiés et étudié dans cette thèse.

### **2.2.1 Le type barbelé :**

Le type barbelé est un des types modifiés identifiés par Parvis (1950) à partir des photographies aériennes. Les réseaux barbelés ont tendance à avoir une structure éperonnée (Parvis, 1950), leurs affluents rejoignent le cours principal dans des jonctions en forme de

crochet pointant vers l'amont (Drummond et Erkeling, 2014; Pereira-Claren et al., 2019). C'est un type de réseau de drainage qui résulte de la capture des cours d'eau, où la tectonique, des couches de roches de faible résistance à l'érosion orientées obliquement le long de la trajectoire du cours d'eau, ou le retrait des glaciers dévient l'eau de son cours original, produisant des courants inversés (Calvache and Viseras, 1997; Clark et al., 2004; Pereira-Claren et al., 2019). Ce type est caractéristique des zones de hauts reliefs, il a été identifié par Pereira-Claren et al (2019) dans la cordillère côtière (Cordillère de la Costa), au centre et au sud du Chili dans les montagnes des Andes.

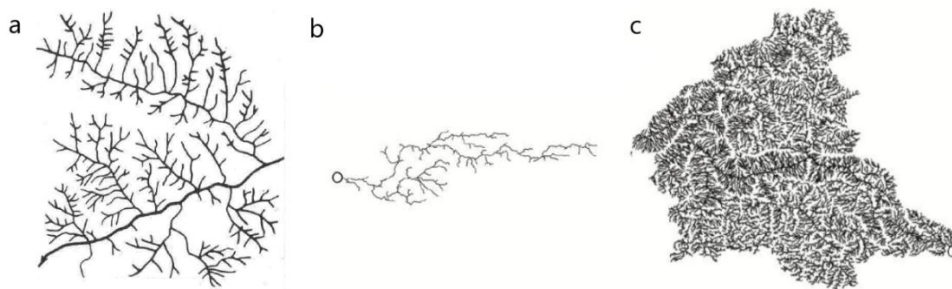


Figure 8: Exemple de type de réseau rectangulaire identifié par (a) Parvis (1950), (b) et (c) par Pereira-Claren et al. (2019).

### 2.2.2 *Le type Chevron :*

Les types chevrons, dans la traduction en anglais est chevron, qui tendent à présenter des chenaux principaux rectilignes et plusieurs affluents courts et régulièrement espacés qui se rencontrent à angle droit (Chougale et Sapkale, 2017 ; Walley, et al., 2018). Ils présentent des chenaux à faible sinuosité ainsi qu'une abondance d'angles presque droits là où les affluents secondaires courts et droits rencontrent les affluents principaux. De tels types de drainage sont observés dans les zones montagneuses et les environnements présentant des pentes latérales extrêmes qui dépassent l'influence de la pente régionale sur la géométrie du réseau, comme dans les hautes altitudes dans les Andes centrales du Chili (Pereira-Claren et al., 2019).

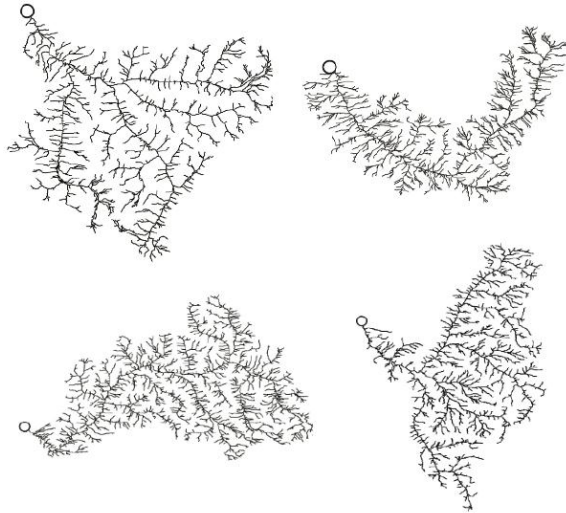


Figure 9: Exemple de type de réseau rectangulaire identifié par Pereira-Claret al, (2019).

### 3 Structures et formes fluviales sur des surfaces planétaires : Analogie avec les structures terrestres.

Les premières observations des surfaces planétaires extraterrestres par la télédétection de faible résolution ont prouvé l'existence d'anciens écoulement canalisés similaire a des terrains fluviaux sur les planètes et de certains satellites du système solaire. Dans certains cas, les écoulements fluviaux sont liés à une évolution planétaire qui implique le cycle global d'un composant volatil (l'eau pour la Terre et Mars ; le méthane pour Titan, la lune de Saturne).

Dans d'autres cas, comme sur Mercure, Vénus, la lune de la Terre et la lune de Jupiter Io, les écoulements étaient constitués de lave très fluide (Baker et al., 2015). La reconnaissance du caractère fluvial de ces surfaces planétaires a ouvert des questions fondamentales non résolues sur leur histoire et évolutions géologiques, notamment celle concernant l'eau sur Mars et la présence d'un océan ancien et le fonctionnement d'un cycle hydrologique au cours des premières phases de l'histoire planétaire (Skorov et al., 2001; Johnsson et al., 2014; Ivanov et al., 2015; Kite et Daswani, 2019; Palumbo et Head, 2019).

L'étude des surfaces planétaires extraterrestres et la complexité de phénomènes fluviales observés exige une investigation qui commence par des formes d'analogie avec des phénomènes terrestres similaires. Etant données que les formes fluviales sur Terre sont beaucoup plus susceptibles d'avoir leurs caractéristiques et leurs processus de formations acquis, contrairement à ceux sur les surfaces planétaires. Ainsi le partage de ces caractéristiques entre les analogues terrestres et les phénomènes extraterrestres peut suggérer

des causes possibles pour ces derniers et qui conduisent à des hypothèses qui doivent être testées (Baker et al., 2015).

Les canaux visibles par l'étude télescopique de la Lune terrestre semblaient initialement prometteurs comme candidats pour l'eau qui s'écoule sur cette surface planétaire (Firsoff, 1960).

Les excellentes images à haute résolution sont revenues en 1966-1967 des missions Lunar Orbiter a fourni des données pour des comparaisons détaillées entre les canaux lunaires sinueux et les rivières terrestres (Figure 10-a) (Peale et al., 1968). De plus, avant le retour des échantillons de roches de la Lune, les théories dominantes soutenaient que, comme la Terre, la Lune avait une hydrosphère potentiellement riche en eau.

Cependant, Les analyses géochimiques des échantillons de roche retournés des missions d'atterrissage d'Apollo ont montré les canaux observés sont les expressions superficielles d'immenses effusions de lave basaltique (Taylor, 1982). Comme la Lune de la Terre, Mercure et le satellite IO de Jupiter ont montrés des canaux de lave et des vallées plates et peu profondes associées à de vastes plaines volcaniques (Figure 10-b) (Keszthelyi et al., 2001; Head et al., 2011; Byrne et al., 2013; Hurwitz et al., 2013).

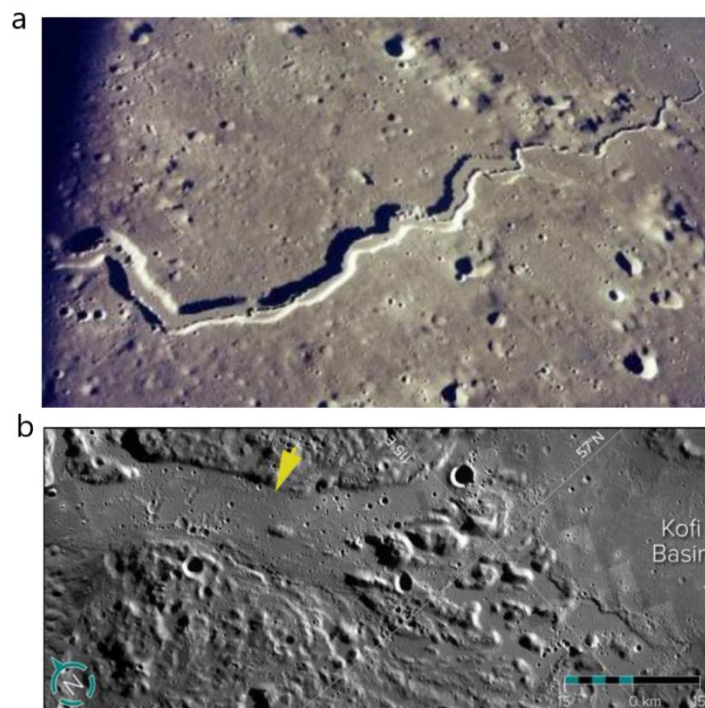


Figure 10: (a) Image d'Apollo 15 montrant la vallée de Schröter sur la Lune, typique des rides lunaires sinueuses (Baker et al., 2015) (b) Portion du canal de lave de la vallée d'Angkor de Mercure provient du système d'imagerie double Mercury (MDIS) de l'engin spatial MESSENGER et a une résolution de 250 m par pixel (Hurwitz et al., 2013).

Les réseaux de vallées sont les principales formes de relief d'érosion fluviale qui documentent la vaste histoire fluviale du début de Mars. Sur la terre une vallée fluviale contient ou contenait autrefois un ruisseau ou une rivière avec une sortie. Par contre sur Mars ou sur autres surfaces planétaires, une vallée est toute structure creuse, profonde et allongée sur des surfaces et qui est entourée d'une topographie élevée (Baker et al., 2015; Zaki et al., 2019). Les vallées observées sur la surface sont beaucoup plus grandes que leurs homologues sur la terre. Il est à noter que les vallées martiennes montrent clairement que des fluides se sont écoulés à grande échelle à travers leur sol et sur leurs murs ou leurs rives, ainsi ces derniers sont au fait des immenses canaux d'inondation d'échelle cataclysmique (Pacifici, et al., 2009; Bargery et al., 2011; Rodríguez et al., 2014).

Ces constatations ont conduit à une résurrection des hypothèses sur des processus similaires à l'origine des canaux d'inondation cataclysmiques de la Terre (Baker et al., 2015). Des éventuelles formes de dépôts deltaïques en éventail et les canaux et réseaux de vallées creusés dans la roche, reconnue à partir des anciennes données à basse résolution, ont constitué la principale preuve qui a été citée pour soutenir l'idée que Mars avait autrefois des conditions qui soutenaient un cycle hydrologique semblable à celui de la Terre (Ori et al., 2000; Pain et al., 2007). Par la suite, les images de haute résolution du MOC (0.5/12 m/pixel), THEMIS IR (100m/pixel), THEMIS VIS (18-36 m/pixel), CTX (~6 m/pixel), HiRISE (High Resolution Imaging Science Experiment), (~0.3 m/pixel), ont conduit à la découverte clé de caractéristiques deltaïques et des systèmes de paléo-chenaux similaires en termes de morphologie générale à ce qui se passe sur la Terre (Zaki et al., 2019). La Surface de la Terre et celle de Mars présentent une immense abondance et variété de formes de relief fluvial, bien que, dans le cas de Mars, celles-ci soient généralement liées à l'ancienne histoire géologique de la planète et ne se forment pas aujourd'hui (Baker et al., 2015).

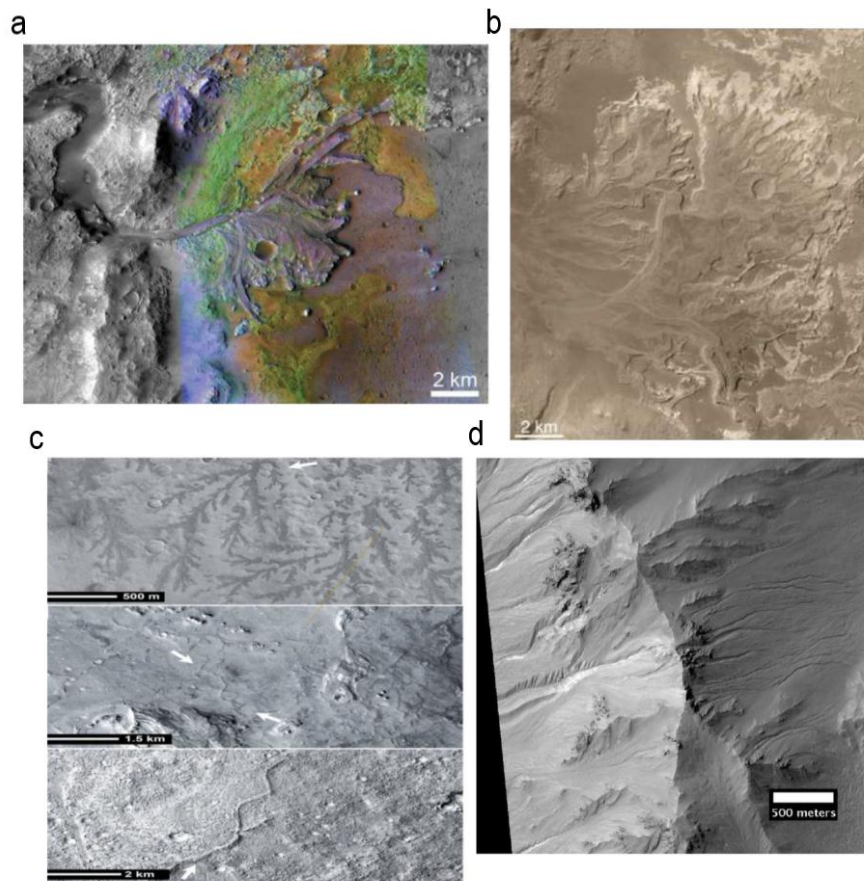


Figure 11: (a) Imageur composite généré à partir des données du spectromètre imageur compact de reconnaissance pour Mars (CRISM) du Mars Reconnaissance Orbiter (MRO) (Ehlmann et al., 2008) (b) La surface du delta est marquée par des paléocanaux alluviaux qui se sont déversés dans un lac qui occupait le cratère d'Eberswalde et les sédiments du canal, vraisemblablement du sable et/ou du gravier (Baker et al., 2015) (c) Parties d'une image HiRISE montrant en haut des branches courtes et tronquées inversées, au milieu un système de cours d'eau inversé et en bas un canal d'exhumation (Zaki et al., 2019) (d) Partie de l'image HiRISE montrant les ravines le long du bord est du cratère Hale (Baker et al., 2015).

Les vallées de Titan révèlent des propriétés et des caractéristiques géologiques très diverses, tant au niveau spectral que morphologique. La grande diversité morphologique des vallées de Titan est probablement due à une variété de processus causant et affectant l'érosion fluviale, tels que l'infiltration de liquides souterrains, les précipitations, l'influence de différents régimes de précipitations, de différents types de substrats ou la résistance variable à l'érosion du matériau du substratum rocheux. Ces conditions très variables, tant dans l'espace que dans le temps, ont donné naissance à des formes de relief complexes (Baker, 2008a; Langhans et al., 2012; Burr et al., 2013). Grace aux instruments à bord de la mission Cassini-Huygens dans le système Saturnien : le spectromètre de cartographie visuelle et infrarouge (VIMS), fonctionnant à 300-5100 nm, le sous-système scientifique d'imagerie (ISS), fonctionnant sur

200-1100 nm, et le radar de cartographie Cassini Titan (RADAR), émettant à 2,17 cm (Matson et al., 2003) permettant l'observation du cycle du méthane qui génère des nuages et des caractéristiques fluviales (Figure 12-a).

Burr et al., (2013) à identifier les types ou modèles fluviaux analogues à ceux observer par Zernitz (1932) sur les réseaux de drainages terrestres. Des réseaux fluviaux de type dendritique, rectangulaire et parallèles ont été classés sur la surface de Titan sur la base de la largeur et de la longueur des canaux ainsi que de caractéristiques visuelles telles que l'albédo SAR et le couplage clair-obscur (Figure 12-b).

Bien que certaines classifications sont douteuses, particulièrement pour les types rectangulaires dont certains sont plutôt treillis. Burr et al., (2013) a constaté que la distribution étendue de réseaux fluviaux rectangulaires sur Titan fournit la preuve d'une intense fracturation étendue de la croûte de Titan. Également l'orientation des réseaux fluviaux rectangulaire ont fournis des informations sur les orientations des contraintes tectoniques qui ont créé ces structures qui exercent un contrôle structurel sur les canaux d'écoulement du méthane.

Langhans et al (2012) ont observés par les images du radar à synthèse d'ouverture (SAR) et le spectromètre VIMS (visible et infrarouge) à bord de l'engin spatial Cassini Plusieurs types morphologiques distincts de vallées fluviales. Dans cette dernière études les réseaux de vallées dendritiques constituaient le type le plus dominant et semblent avoir beaucoup en commun avec les systèmes dendritiques terrestres en raison d'une disposition hiérarchique et arborescente des affluents qui indique une origine provenant des précipitations (Figure 13-a). Les vallées sèches constituent une autre classe de vallées observées ressemblant aux oueds terrestres, ce qui indique des forts événements de flux épisodiques (Figure 13-b). D'autres types de vallées, tels que les canyons présumés, n'ont pas été corrélés aux précipitations sur la seule base de leur morphologie, car ils puissent avoir pour origine l'action volcanique / tectonique ou l'assèchement des eaux souterraines (Figure 13-c).

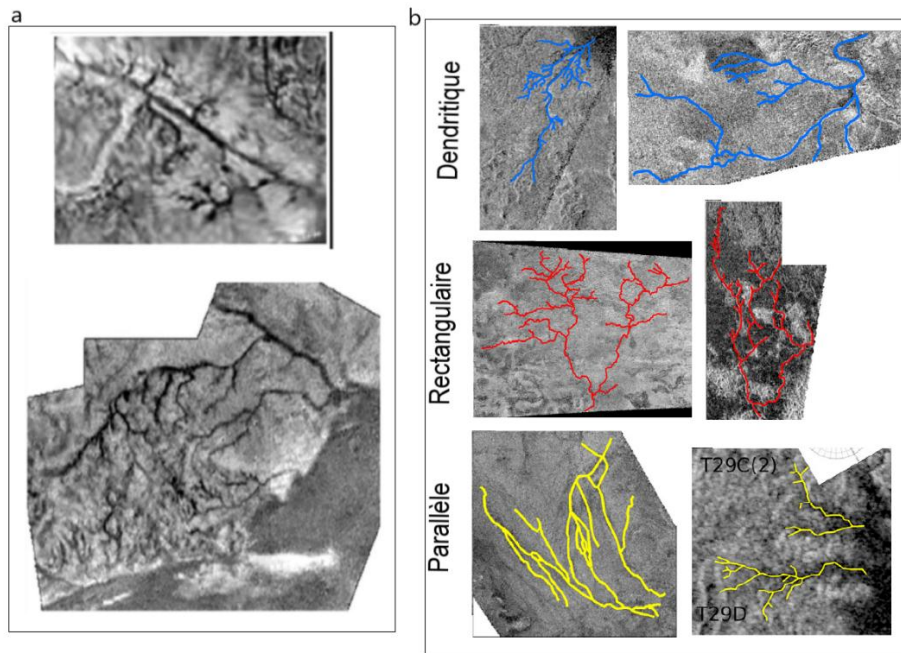


Figure 12: (a) images prises par le Descent Imager/Spectral Radiometer (DISR) sur la sonde Huygens lors de la descente à la surface de Titan montrant des réseaux fluviaux (b) Les types de réseaux identifiés sur la surface de Titan (Burr et al., 2013).

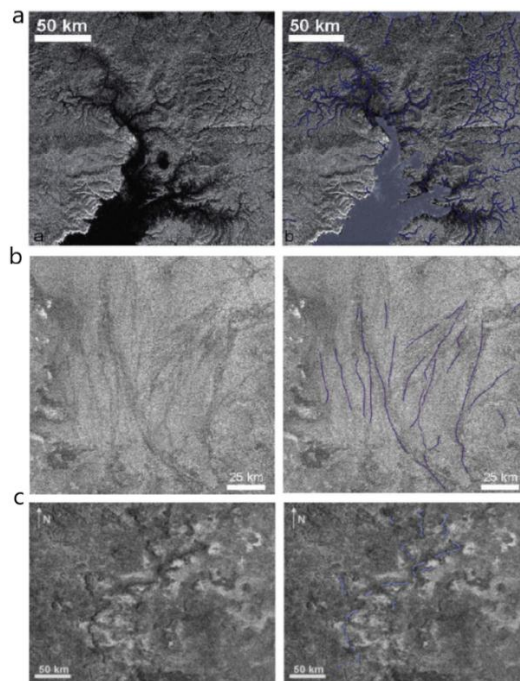


Figure 13: (a) Réseau de vallées dendritiques aux hautes latitudes septentrionales du Titan, capturé par radar-SAR (b) les vallées sèches à partir de l'observation radar (c) Système présumé de canyon à partir d'observations radar (Langhans et al., 2012)

L'étude des réseaux fluviaux planétaire ne se limite pas à la compréhension des processus générateurs et les géomorphologies étrangères, ils peuvent également être utilisées pour faire



progresser les connaissances terrestres (Sharp, 1980; Baker, 2008a). Actuellement, avec les perspectives croissantes de découvertes passionnantes de planètes extra-solaires potentiellement habitables et riches en eau, on peut considérer que cette vision globale s'applique particulièrement bien à la géomorphologie fluviale et que de nombreuses nouvelles découvertes de planètes semblables à la Terre amélioreront considérablement ce qui a déjà été appris des formes fluviales familières qui ont été étudiées sur Terre (Baker et al., 2015; Heller, 2015).

#### **4 Les Classifications quantitatives des types de réseau de drainage : approche géométrique.**

L'identification et la classification des types de drainage assistées par ordinateur est une approche qui s'est imposée au début des années 60 (Morisawa, 1963). D'une part, par le progrès que reconnaît l'automatisation des processus physiques (Dahlin, 1995; Merembayev et al., 2018) et d'autre part par le fait que l'identification des types de drainage par des photo-interprètes et imageries satellitaires s'est montrée coûteuse et prend beaucoup de temps, car les géologues et hydrologues doivent avoir une formation et de l'expérience dans l'identification des entités géologiques (Les structures géologiques et réseau de drainage...) sur les données de télédétection. Une approche assistée par ordinateur pour la classification des types peut atténuer ce problème et en même temps rendre une approche formelle, objective et reproductible. D'où l'intérêt de la classification quantitative et cet effort de développement d'une méthodologie.

La prémisse des premières recherches dans la classification quantitative des types de drainage était que les régimes de drainage peuvent être décrits et classés en fonction de leurs relations topologiques, géométriques et structurelles distinctes entre les cours d'eaux qui les composent. En particulier, ces recherches visaient la description et la classification de ces tendances au moyen d'une approche de reconnaissance structurelle. La reconnaissance structurale des formes fait référence aux méthodes de traitement d'images numériques qui représentent les formes en fonction de leurs structures intrinsèques. Souvent, cette structure intrinsèque a été représentée par des règles exprimant la juxtaposition d'éléments de motifs identifiables, leurs attributs et leurs interrelations (Argialas et al., 1988; Bouramtane et al., 2017).

Le premier développement de ces systèmes a montré qu'il était possible d'adopter des paramètres et des règles issues de travaux antérieurs d'hydrologie et d'en améliorer l'utilité grâce à une approche assistée par ordinateur. Il en est résulté des outils pratiques pour aider les utilisateurs à déterminer les types de réseaux de drainage en leur fournissant les renseignements appropriés sur les paramètres (Hadipriono, et al., 1990). Dans les 30 dernières années, des méthodes basées sur les théories quantitatives de la géométrie plane des réseaux

de drainage ont été utilisés pour distinguer les différents types de réseaux (Rodriguez-Iturbe et al., 1992b; Peckham, 1995; Rigon et al., 1996; Rodriguez-Iturbe and Rinaldo, 1997; Niemann and Hasbargen, 2005).

De nombreux résultats empiriques et théoriques suggèrent que les formes planes de nombreux réseaux de drainage sont approximativement auto-similaires. Dans cette approche, les réseaux dendritiques sont considérés comme le type de réseau de base unique parce qu'on sait qu'ils se développent lorsque peu de contraintes topographiques, lithologiques et tectoniques influencent le développement du réseau (Zernitz, 1932, Howard, 1967 ; Twidale, 2004, Radaideh et al., 2016 ; Bouramtane et al., 2018 ; Bouramtane et al., 2020). On a également observé que de tels réseaux sont conformes à l'autosimilarité des formes planes. (Niemann and Hasbargen, 2005; Mejía and Niemann, 2008 ; Pereira-Claren et al., 2019 ; Jung et al., 2019).

De façon plus claire, l'autosimilarité des formes planes signifie que les propriétés horizontales d'un petit sous-bassin semblent statistiquement identiques aux mêmes propriétés d'un grand bassin si le petit sous-bassin est isotropiquement redimensionné pour avoir la même taille que le grand bassin. Ce type d'auto-similarité se réfère principalement à la structuration du réseau de drainage et à la limite du bassin, qui sont des propriétés qui peuvent être représentées dans un plan horizontal.

En suivant le principe de la géométrie plane, Mejía et Niemann (2008) ont mis au point une méthode pour classer les types de réseau dendritique, parallèle, pinnate, rectangulaire et treillis, en fonction de leurs écarts par rapport à l'auto-similarité. Étant donné que la géométrie plane des réseaux dendritiques est à peu près auto-similaire, leur hypothèse stipulait que les réseaux parallèles, pinnates, rectangulaires et en treillis correspondent à des déviations distinctes de cette auto-similarité. Pour identifier ces déviations, trois mesures des réseaux de drainage ont été appliquées à 10 réseaux de chaque type (Figure 14).

Ces mesures sont, premièrement l'accumulation progressive de l'aire de drainage le long des cours d'eau, qui représente les longueurs moyennes des canaux entre les jonctions. En d'autre terme si un cours d'eau a de grandes longueurs ou des jonctions d'affluents très espacées, il a aussi des augmentations moins fréquentes dans son aire de drainage parce que la superficie est accumulée principalement là où les affluents se rejoignent (Ichoku and Chorowicz ,1994).

La seconde mesure est celle de l'irrégularité des tracés des cours d'eau, cette mesure a été développée par Veneziano et Niemann (2000b) et repose sur le fait que la sinuosité des cours d'eau varie selon les différents types de réseaux de drainage. En effet, les petits cours d'eau dans les réseaux parallèles et en treillis ont tendance à être exceptionnellement droits, tandis

que les cours d'eau dans les réseaux rectangulaires sont exceptionnellement sinueux. L'auto-similarité dendritique a également des implications sur l'irrégularité du cours d'eau.

La troisième et la dernière mesure est celle des angles de jonctions des cours d'eau, des différences dans les angles de jonction des affluents ont été observées pour différents types de réseaux. En particulier, les réseaux parallèles semblent avoir une abondance de très petits angles de jonction, tandis que les réseaux rectangulaires et en treillis semblent avoir une abondance d'angles de jonction droits et obtus, respectivement (Abrahams and Flint, 1983; Phillips and Schumm, 1987).

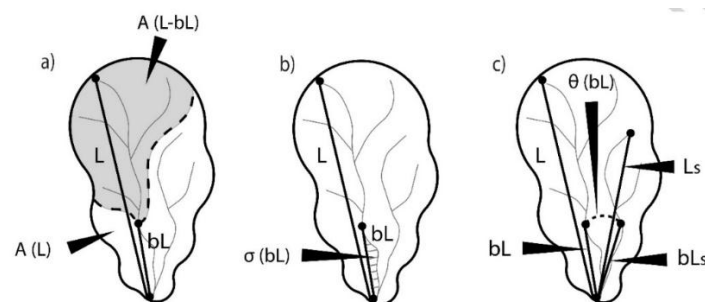


Figure 14: (a) l'accumulation progressive de l'aire de drainage (b) l'irrégularité des tracés des cours d'eau (c) angles de jonctions des cours d'eau (Pereira-Claren et al., 2019).

Les résultats de Mejía et Niemann (2008) confirment le caractère d'auto-similarité des réseaux dendritiques. Par ailleurs, ils constatent que les réseaux parallèles et les réseaux pinnates présentent une auto-affinité, qui signifie que les propriétés horizontales d'un petit sous-bassin semblent statistiquement identiques aux mêmes propriétés d'un grand bassin si le petit sous-bassin est 'anisotropiquement' redimensionné pour avoir la même taille que le grand bassin.

Dans un autre côté les réseaux rectangulaires et en treillis sont à peu près auto-similaires, bien que l'on observe des écarts par rapport à l'auto-similarité. Les réseaux rectangulaires ont des cours d'eau plus sinueux que les réseaux dendritiques ont toutes les échelles, et les réseaux en treillis ont un taux d'accumulation de superficie plus lent que les réseaux dendritiques aussi à toutes les échelles. De telles observations ont été utilisées pour construire et tester de simples arbres de classification, dont il a été constaté qu'ils donnent de bons résultats dans la classification des réseaux. Si ces arbres de classification sont autorisés à utiliser les valeurs moyennes pour l'irrégularité des cours d'eau pour tous les types de réseau, il classe avec succès les différents 50 réseaux (10 réseaux de chaque modèle). Toutefois, l'utilisation de cette mesure pour les réseaux auto-affinés rend la méthode dépendante de l'échelle. Si l'utilisation de ces mesures est refusée, alors la classification est invariante à l'échelle, mais elle ne classe avec succès que 44 réseaux sur 50 (Mejía et Niemann, 2008).

Des développements dans la méthode de classification des types de réseaux drainage à l'aide des indicateurs géométriques ont été effectués dans des études plus récentes comme le travail de Jung et al (2015), qui ont proposé une nouvelle méthodologie pour distinguer directement les différents types de réseaux de drainage en utilisant uniquement les angles de jonction des affluents avec les longueurs des affluents secondaires, contrairement aux méthodes précédentes qui exigent des caractéristiques des réseaux de drainage avec des processus complexes pour classer les différents types (Veneziano et Niemann 2000b; Mejía et Niemann, 2008). La méthode utilise la distribution directionnelle des longueurs des affluents secondaires pour estimer les exposants de la loi de puissance qui sont utilisés pour décrire et différencier les différents types de réseaux. Sur la base du système de classification, 10 réseaux d'oueds aux Emirats Arabes Unis et à Oman et cinq réseaux fluviaux aux États-Unis sont utilisés pour valider l'approche. Les 10 oueds localisés aux EAU et à Oman ont tous des valeurs similaires à celles des valeurs moyennes des réseaux rectangulaires, par contre trois réseaux fluviaux aux États-Unis sont classés comme dendritiques et les deux autres sont classés comme réseaux parallèles, les mêmes résultats ont été obtenus à l'aide de mesures géométriques (Mejía et Niemann, 2008), validant ainsi l'exactitude de l'équation méthode proposée par Jung et al (2015).

Dans une étude récente en mars 2019, Pereira-Claren et al (2019) ont caractérisés les types de réseau de drainage de 29 bassins dans les régions de haut relief dans le Chili en explorant d'un côté les propriétés contextuelles (géologiques, climatiques et de couverture terrestre) des bassins et d'un autre côté en calculant plusieurs paramètres géométriques décrivant leurs attributs horizontaux et verticaux des réseaux de drainages. Ce travail d'une part explore et caractérise pour la première fois les types de réseau formés dans les haut-reliefs, particulièrement les types Chevron, barbelé et les pinnates des haut-reliefs, qui diffèrent de types de réseaux dendritique, parallèle, treillis et rectangulaire qui se développent dans les bas-reliefs.

Le couplage des propriétés contextuelle et les calculs géométrique a permis aux Pereira-Claren et al (2019) de comprendre les caractéristiques et les milieux de développement des types de réseau de haut-relief et leur différenciation par rapport aux types de bas-relief. Pereira-Claren et al (2019) ont constatés que les types de réseaux de haut-relief se développent dans les régions de relief élevé avec une forte pente et des conditions de fortes activités tectoniques et intense déformation, que ceux des types de réseaux de bas-relief. Néanmoins, la présence dans des environnements à faible relief des types de réseaux que l'on trouve dans les régions en haut relief ne peut être exclue. D'après l'analyse de la géométrie plane, les réseaux en chevron et les réseaux barbelés ne font partie d'aucun des cinq groupes étudiés précédemment (dendritique, parallèle, treillis et rectangulaire) et en utilisant des

arbres de classification construits à l'aide uniquement des attributs horizontaux, ils ont pu différencier 100 % des réseaux de haut relief et 82 % des réseaux de bas-relief (avec des précisions de validation croisée de 89 % et 54 %, respectivement). Les arbres de classification construits à l'aide des attributs verticaux permettent de différencier 93 % des réseaux à haut relief et 84 % des réseaux à bas-relief (avec des précisions de validation croisée de 86 % et 62 %, respectivement).

## **5 Influence de la structure de réseau de drainage sur la réponse hydrologique des bassins et l'acheminement et transport des sédiments**

La réponse hydrologique d'un bassin versant est basée sur la relation entre la géomorphologie du bassin (zone de captage, forme du bassin, topographie, la géologie et la pente), le réseau de drainage et l'intensité des précipitation (Khaleghi et al., 2011). Les indices morpho-métriques ont été les toutes premières mesures créées en géomorphologie pour comparer les caractéristiques morphologiques des bassins versants et pour quantifier leur comportement hydrologique potentiel (Horton, 1932; Melton, 1957; Douvinet et al., 2008). Et c'est sur cette base qu'il a été définies que les caractères géomorphologiques du bassin semblent jouer un rôle important dans son fonctionnement hydrologique. La forme allongée d'un bassin génère des écoulements relativement repartis dans le temps, favorise la concentration des écoulements à son exutoire, donc l'apparition d'une crue plus soudaine et de plus grande intensité, qu'un bassin aux formes plus compactes (Serrat et Depraetere, 1997).

En plus de ces caractéristiques, la structuration d'un réseau de drainage dans un bassin versant a également été utilisée comme paramètre utile pour caractériser la réponse hydrologique. En particulier dans les bassins non jaugés, où l'information hydrologique est souvent dérivée empiriquement à l'aide des caractéristiques morpho-métriques d'un bassin et du réseau de drainage associé et elle joue un rôle crucial dans la prise de décision (Jung et al., 2017). Cependant, malgré la disponibilité de modèles hydrologiques distribués qui tiennent compte de la structure du réseau de drainage en modélisant explicitement les voies d'écoulement individuelles, les types semi-distribués sont encore largement utilisés en raison de leur simplicité et de leurs performances similaires aux types entièrement distribués (Haghnegahdar et al., 2015).

Quelques caractéristiques hydrologiques ont été examinées dans la littérature afin d'identifier leurs différences en fonction des différents types de réseaux, telle que la réponse hydrologique et l'intensité des précipitations. Rodríguez-Iturbe et Valdes (1979) ont étudié la réponse hydrologique d'un bassin aux précipitations en reliant l'hydrogramme unitaire instantané (IUH) à des paramètres géomorphologiques pour déterminer les propriétés hydrologiques de différents réseaux, comme le nombre, la longueur, et la superficie des cours

d'eaux. Rodríguez-Iturbe et al (1982) ont par la suite examiné le pic et le temps de pic de l'IUH en se basant sur différentes caractéristiques géomorphologiques avec l'intensité et la durée des précipitations. Jung et al, (2017) ont étudiés l'impact des types de réseaux de drainage sur la réponse hydrologique en se basant sur le temps de concentration ( $T_c$ ) comme paramètre hydrologique et leurs résultats ont montrés en effet que les types de réseaux présentent des  $T_c$  distinctes, particulièrement pour le type parallèle qui présentent les  $T_c$  les plus faibles.

Dans une étude récente Czyzyk et al, (2020) ont examiné si le type de réseau de drainage, tels que dendritique, parallèle, penné, rectangulaire et en treillis a un impact sur la forme de l'Unité Hydrographique (UH). L'objectifs de cette étude est de déterminer si ces cinq types de réseaux présentent des UHs distincts, et si la caractérisation du type de réseau est suffisante pour remplacer structure de la voie d'écoulement dans l'estimation des UH. En développant et appliquant un schéma d'UH, qui se base sur la théorie des ondes cinématiques, sur 10 bassins de chaque type. Les résultats montrent que les cinq types de réseaux présentent des UH instantanés distincts, mais le type de réseau ne permet une détermination précise de l'UH que pour les bassins de type pinnate.

Tout comme la configuration du réseau exerce un contrôle sur la réponse hydrologique du bassin aux apports de pluie des tempêtes (Kirkby, 1976 ; Rodriguez-Iturbe et Rinaldo, 1997; Jung et al., 2017). De nombreux chercheurs ont postulés qu'il doit y avoir aussi des contrôles du type de réseau sur le calibre et l'ampleur de la décharge de sédiments, provenant de perturbations à grande échelle comme les glissements de terrain épisodiques pendant les tempêtes majeures (Benda et Cundy, 1990 ; Benda et Dunne, 1997a, 1997b ; Hoffman et Gabet, 2007).

Le transport des sédiments est une fonction fortement non linéaire de l'intensité du transport (Walley et al., 2018), et de subtiles modifications de la mobilité du lit, ou des changements dans la structuration du réseau de drainage, par exemple par une transition spatiale ou temporelle d'un type de réseau a un autre (Howard, 1967; Bouramtane et al., 2020), peuvent entraîner de grands changements dans le transport des sédiments. Une diminution de la granulométrie de surface réduit la rugosité du lit, ce qui augmente la contrainte de cisaillement efficace du lit et sa mobilité (Mueller et Pitlick, 2013).

Ainsi, La structuration du réseau de drainage exerce un contrôle de premier ordre sur les flux d'eau et de sédiments dans les réseaux fluviaux (Benda et Dunne, 1997a, 1997b ; Benda et al., 2004a, 2004b). Une étude récente de Walley et al, (2018) démontre différents types et taux de transfert et de stockage des sédiments dans de deux bassins adjacents, un de types dendritique et l'autre de type chevron plus allongé. Le réseau dendritique a un taux plus élevé de transfert

de sédiments entre les sites de stockage dans les ordres successifs de Strahler, tandis dans le réseau plus allongé en chevron, la connectivité longitudinale le long de l'axe principal du quatrième ordre est perturbée par les apports latéraux de sédiments provenant de multiples affluents d'ordre inférieur.

Également, les impacts du type de réseau sur le régime sédimentaire ont été observé comme particulièrement prononcés dans les zones de confluence, ce qui reflète l'importance relative du débit, la granulométrie et de l'apport de sédiment. Ces constatations affirment que les sous-bassins hydrographiques voisins, situés dans les mêmes contextes environnementaux et climatiques, ont des relations de processus et de connectivité différentes en raison de la configuration différente de leur réseau de drainage.

## **6 Conclusion :**

À travers les premières cartes topographiques, et encore plus en détail via les photographies aériennes et les imageries satellitaires, les hydrologues et géomorphologues ont posés les premières hypothèses qui stipulent que la distribution, l'agencement et l'aménagement du réseau de drainage actuelle n'est que le produit et l'héritage de l'ensemble des événements géologiques et variations climatiques qui se sont déroulés sur une région donnée que ce soit sur la surface terrestre ou d'autres surfaces planétaires.

Le réseau de drainage contient des indices comme les différents types de cours d'eau et de réseau de drainage et la densité de drainage pour chaque structure géologique apparente et chaque phase tectonique majeure et se comporte différemment d'un secteur à un autre selon leur nature géologique et géomorphologique. Cependant, d'une part, ces premiers travaux se basent sur l'observation et l'analyse du réseau avec une approche uni-factorielle, c'est-à-dire en constatant le comportement du réseau de drainage avec un facteur ou paramètre à la fois dans des conditions climatiques fixes. D'autre part, les différentes méthodes de classification et caractérisation élaborées se basent sur des méthodes géométriques. Par conséquent, aucun mécanisme ou processus global n'a été déterminé dans ces études pour expliquer la distribution et le développement de ces types de réseau de drainage, que ce soit dans le même milieu ou dans des environnements et climats différents, ce qui constitue une lacune dans les connaissances hydrologiques concernant le réseau de drainage.

Ce dernier point a constitué la première source d'inspiration pour l'élaboration de cette thèse, en visant à donner plus d'éclaircissement sur les mécanismes et processus générateurs de ces types de réseaux, leur caractérisation et déterminisme à travers des mesures exactes de la variabilité de ces derniers en croisant une multitude de paramètres non seulement topographiques et géologiques, mais aussi Morpho-métriques et climatiques, ce qui représente

une approche multifactorielle. Également pour répondre à la question de généralisation, nous avons effectué cette étude sur trois zones d'environnement et climat très différents. Dans le chapitre suivant nous présentons ces trois zones d'études, les différents paramètres et sources de données, les méthodes utilisées et la démarche retenue pour l'élaboration de cette thèse.



# Chapitre 2 : Matériels et Méthode

## **I Introduction :**

Ce deuxième chapitre est consacré à la présentation des caractéristiques générales du bassin du fleuve Cuanza, l'Anti-Atlas Oriental et le bassin versant de la Durance. Ce chapitre a ainsi pour première objectif d'afficher la diversité et variabilité des propriétés et caractéristiques de l'environnement entre ces trois zones, particulièrement dans leur géologie, hydrologie, hydrogéologie et climat. Dans un deuxième temps, on présente dans ce chapitre les paramètres sélectionnés et les justifications de leur choix et les méthodes et outils mathématiques utilisées pour répondre à l'hypothèse de ce travail. Au final, ce chapitre présente et justifie la démarche adoptée.

## **II Présentation des zones d'étude:**

### **1 Bassin du fleuve Cuanza- Angola : climat tropical.**

#### **1.1 Caractéristiques générales du bassin du fleuve Cuanza :**

Le fleuve Cuanza est le plus long fleuve qui se développe exclusivement en Angola, et son bassin versant se trouve également entièrement sur le territoire national Angolais (Figure 15). La combinaison de ces aspects, ainsi que sa situation au centre du pays avec son ouverture sur l'Atlantique près de la capitale Luanda, justifient que ce fleuve a une très grande importance stratégique et économique pour le pays.

D'une longueur totale d'environ 1 190,55 km, le fleuve Cuanza prend sa source à Mumbué, municipalité de Chitembo, province de Bié, sur le plateau central de l'Angola. En allant vers le nord sur les 300 premiers kilomètres, le parcours tourne ensuite vers le nord-ouest pour atteindre son embouchure dans l'océan Atlantique, à Barra do Cuanza, à la frontière entre les municipalités de Quiçama et Belas, dans la province de Luanda, à environ 55 km au sud du centre de la capitale. Le bassin versant couvre une superficie de 151 397 km<sup>2</sup>.

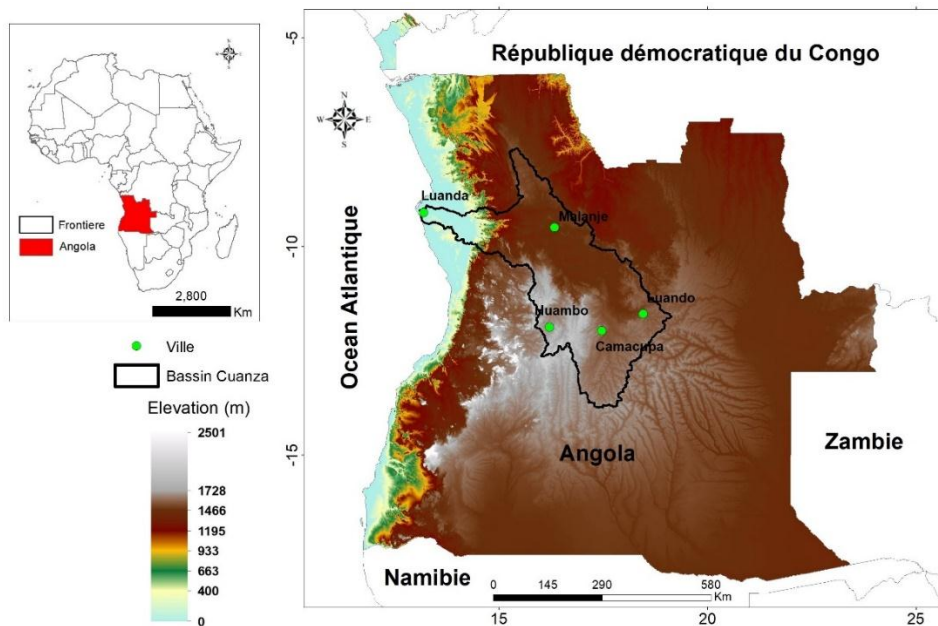


Figure 15: Localisation du bassin du fleuve Cuanza en Angola.

## 1.2 Contexte hydro-climatologique :

Selon la classification de Koppen qui est basée sur la répartition annuelle et le rapport entre les valeurs moyennes de la température de l'air et la hauteur de la pluie (Kottek et al., 2006), le climat du bassin du fleuve Cuanza présente plusieurs subdivisions (Figure 16) qui coïncident avec les principales régions géographiques de l'Angola (Montero, 1961). Les définitions des symboles utilisés pour la répartition du climat dans le bassin du fleuve Cuanza sont Aw, Csb, Csc BSh et BWh :

A : Climat équatorial-tropical humide dont la température moyenne de l'air, pendant le mois le plus froid de l'année, est supérieure à 18°C et le total de précipitations annuelles d'environ 1000 mm.

C : Climat mesothermique humide dont la température moyenne de l'air, pendant le mois le plus froid, est compris entre 3°C et 18°C.

B : Climat sec, évaporation annuelle supérieure aux précipitations annuelles

L'indication w signifie que la saison sèche se produit en hiver et que la hauteur de précipitation du mois le plus sec du semestre froid correspond à moins d'un tiers de celle du mois le plus pluvieux du semestre chaud et inférieure à 40 mm.

BWh : désigne un climat de steppe (semi-aride) avec des températures moyennes annuelles supérieurs à 18°C.

BSs : désigne un climat sec de Steppe : la hauteur annuelle de pluie en cm, exprimée par la formule  $(T + 14)$ , T représentant la température moyenne annuelle en degrés centigrades.

Aw : Climat de savane avec hiver sec avec précipitation hivernal du mois le plus sec inférieur à 60 mm.

Csc : Climat tempère chaud avec été court et frais.

Csb : Climat tempère chaud avec été tempéré.

D'après la classification de Koppen, on peut distinguer, dans le bassin du fleuve Cuanza mais aussi sur la totalité de l'Angola, d'Ouest en Est, les formations climatiques suivantes :

- Le type de climat BWh se rencontre dans les régions de Luanda, et sur la partie de la bande côtière, située au sud de 12° de latitude sud.
- La zone de climat BSh s'étend à l'Est de la zone précédente sur toute la bande littorale de l'Angola et sur la partie sud de la côte du Cabinda.
- La zone climatique Aw s'étend sur le reste du Cabinda, sur le nord de l'Angola, poussant un prolongement au Sud Est, jusqu'au pied de la chaîne de la chela, et un autre à l'Est dans la région du haut Zambèze
- Le type de climat Csc et Csb couvrent presque toute la région des plateaux au Sud du 11° de latitude sud.

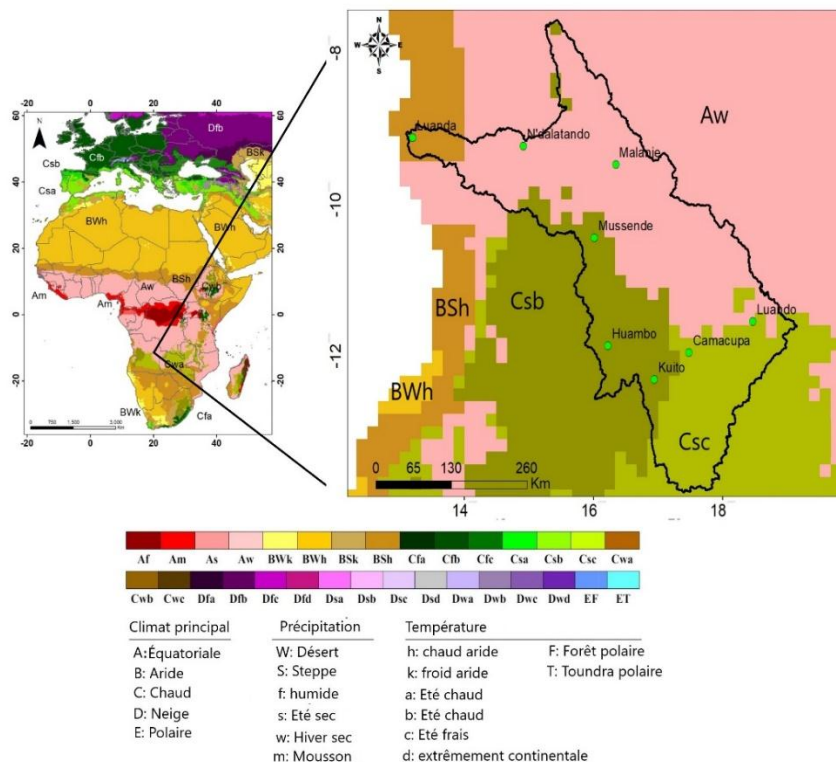


Figure 16: Répartition des types de climats dans le bassin du fleuve Cuanza, modifié après Kottek et al, (2006)

L'analyse climatique du bassin s'est appuyée sur des données recueillies à différents postes et stations météorologiques du territoire angolais. En ce qui concerne la variation des précipitations annuelles moyennes dans le bassin Cuanza, les données in-situ donnent des valeurs comprises entre 413 mm et 1 738 mm, tandis que la variation basée sur la mission de mesure des précipitations tropicales (TRMM), qui est une mission conjointe de la NASA et de l'Agence japonaise d'exploration aérospatiale (JAXA) visant à étudier les précipitations pour la recherche météorologique et climatique, est comprise entre 638 mm et 1 435 mm.

Les précipitations mensuelles moyennes dans la région du bassin du Cuanza sont indiquées dans le Tableau 2:

Tableau 2: Précipitations moyennes des stations du "Cacimbo" (aride) et des "Chuvas".

Domaine	Pluviométrie mensuelle moyenne (mm)	
	Cacimbo (aride)	Chuvas
Haut Cuanza	50,6	1 278,7
Moyen Cuanza	58,6	1 041,6
Bas Cuanza	64,0	965,8

Les valeurs moyennes mensuelles des précipitations dans le bassin Cuanza varient entre un minimum de 14,1 mm et un maximum de 166,0 mm. Pendant la saison des pluies, les valeurs des précipitations dans la zone plane vont d'un minimum de 398,9 mm à un maximum de 1 704,0 mm. Les précipitations maximales quotidiennes moyennes annuelles sont de 70,4 mm, avec une valeur maximale de 107,9 mm et une valeur minimale de 55,3 mm. La valeur la plus élevée est celle de l'UHP du bas Cuanza, qui a 77,7 mm, suivie de l'UHP du moyen Cuanza avec 69 mm et enfin, du haut Cuanza avec 68,1 mm.

Dans le bassin Cuanza, la température moyenne quotidienne est maximale en octobre (22,1°C) et minimale en juillet (18,5°C), avec une plage de températures annuelles de 3,6°C. En ce qui concerne l'humidité relative, ce n'est qu'en janvier et mars que les valeurs d'humidité relative dépassent 80 % dans la superficie totale du plan. C'est dans l'unité de drainage du bas Cuanza que l'on trouve les valeurs les plus élevées d'humidité relative mesurées à 9 heures du matin. Seuls les mois de mai, juin et juillet ont des valeurs inférieures à 80%. Dans cette unité de drainage, les plus grandes quantités d'humidité relative se retrouvent au mois d'avril (83,9 %), suivi du mois de mars (83,3 %).

L'évapotranspiration annuelle moyenne varie entre 1 539,8 mm et 1 572,0 mm, avec une valeur moyenne de 1 550,8 mm dans la zone du plan. Le taux d'évapotranspiration annuel potentiel varie entre 1 500 et 1 600 mm dans une grande partie de la zone du plan et, en particulier, dans les unités Cuanza supérieure et centrale. Les valeurs d'évapotranspiration

potentielle annuelle les plus basses, en moyenne, sont enregistrées à la limite nord-est de l'unité de drainage Baixo Cuanza, dans le bassin du fleuve Lucala. Les valeurs d'évapotranspiration les plus élevées sont également enregistrées dans cette unité de bassin de drainage. Potentiel annuel et, en particulier, pour la quantité d'exploitation hydroélectrique de Cambambe.

### **1.3 Géologie générale du bassin du fleuve Cuanza :**

La géologie du bassin du fleuve Cuanza est assez complexe, de même que l'ensemble de l'Angola, ayant dans sa constitution géologique les principaux cycles géologiques qui caractérisent la géologie angolaise (Figure 17). Selon la Carte géologique de l'Angola, à l'échelle 1/1 000 000 à la source du fleuve Cuanza, il est possible de vérifier les affleurements de l'Archéen inférieur, considérés comme les plus anciens du territoire de l'Angola, correspondant aux complexes de roches métamorphiques, ultramorphes et intrusives développés dans la zone des boucliers, désignés comme complexe de Base et sous-sol de l'Ouest de l'Angola, par exemple à Malanje, Dondo et au Sud de la rivière Cuanza près de Cariango, où les assemblages archéens montrent des tendances E-O et NE-SO et comprennent des enderbites, charnockites, kinzigites et gneiss granulite.

Au sud de Huambo, le groupe volcano-sédimentaire Jamba est également d'âge archéen. Des ceintures complexes de roches vertes du Paléo-protérozoïque sont présentes dans la partie centrale sud du pays (Schlüter, 2008). Il a été conclu (Cahen et al., 1984) qu'une orogénèse a affecté la majeure partie de cette région à environ 2,15 Ga, au cours de laquelle le métamorphisme principal, la granitisation et la déformation ont eu lieu, suivis par des intrusions granitiques tardives, post-tectoniques et anorogéniques et une activité volcanique entre 2,05 et 1,75 à 1,65 Ga. Les faibles rapports initiaux des isotopes du Sr dans les granites régionaux homogènes du sud de l'Angola suggèrent l'ajout de matériel crustal juvénile.

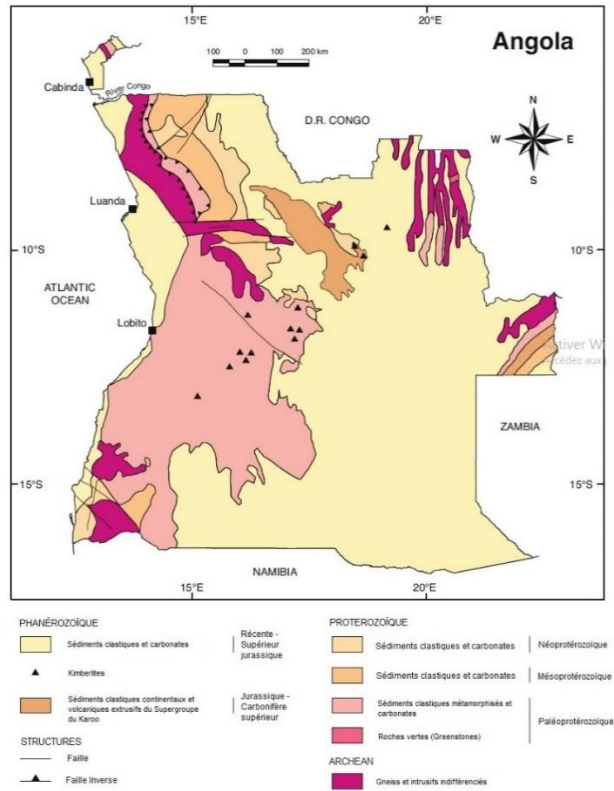


Figure 17: Carte géologique de l'Angola, modifier après Araujo et al, (1998).

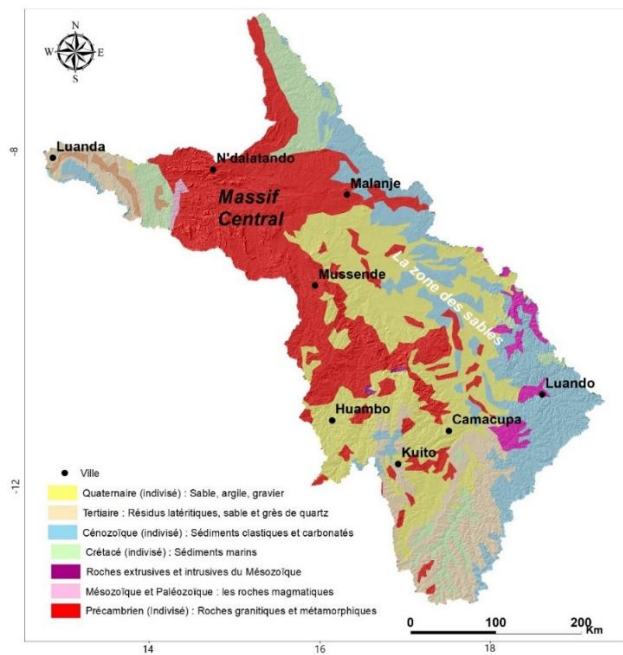


Figure 18: Carte géologique des principales unités géologiques dans le bassin versant du Cuanza, obtenue à partir des données géologiques de l'Afrique fournies par USGS.

Les sédiments du Paléozoïque au Mésozoïque sont principalement préservés dans la dépression géologique du centre nord au nord-ouest, appelée Cassanje Graben. Au cours de

cette période, des activités magmatiques ont causé la mise en place de divers corps sub-volcaniques à volcaniques, y compris des kimberlites, carbonatites, basaltes, dolérites, syénites, trachytes et phonolites. Les corps de kimberlite et de carbonatite sont situés le long d'une ligne de tendance majeure qui traverse l'Angola en diagonale du sud-ouest au nord-est. Les marges occidentales de l'Angola sont recouvertes de sédiments marins du Crétacé au Pléistocène (Figure 19). De nombreuses informations ont été recueillies sur ces bassins à partir de données de forage lors de l'exploration pétrolière en mer et sur terre (Schlüter, 2008).

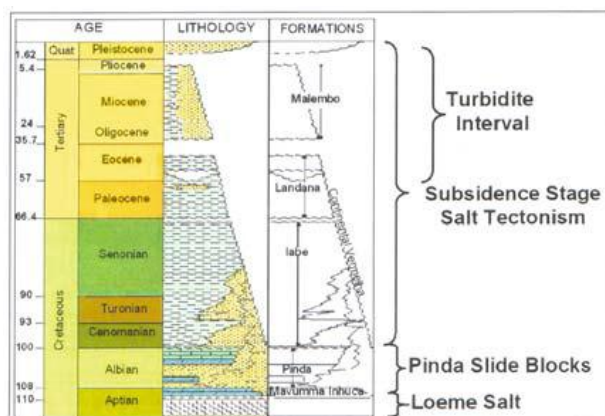


Figure 19: Colonne stratigraphique au large de Cabinda, où des roches mères d'hydrocarbures ont été découvertes dans les formations de Iabe, Landana et Malembo (Schlüter, 2008).

En Angola, on distingue trois types de roches du Tertiaire au Quaternaire, formant les unités géologiques les plus jeunes du pays. Il s'agit de dépôts alluviaux et colluviaux du Quaternaire, de sédiments continentaux du Tertiaire au Quaternaire du groupe Kalahari et de résidus latéritiques du Tertiaire précoce. Près de la moitié de l'Angola ainsi que la partie orientale du bassin de fleuve Cuanza sont couvertes par ces types de roches sédimentaires. Le groupe du Kalahari se compose principalement de sable et de grès quartzitiques, remplis la dépression de l'Okavango, où se trouve la partie sud et sud-est du bassin de drainage du fleuve Cuanza, avec une épaisseur pouvant atteindre 150 mètres, et c'est sur eux que se développent la plupart des affluents de la rive droite du fleuve Cuanza.

Dans la partie centrale et orientale de l'Angola, les résidus latéritiques forment le substrat du Groupe du Kalahari. Les dépôts alluviaux et colluviaux quaternaires sous forme de sables, d'argile, de gravillons et de graviers se trouvent principalement dans les dépressions et/ou les vallées fluviales. Dans la zone de la dépression côtière, la zone ouest de basse Cuanza, jusqu'à l'embouchure du Cuanza, les formations néo-génique, Cacucaco-Luanda et Bom Jesus et les formations paléo-génique (faciès marin), Cunga et Dande River, sont les plus fréquentes.

Les roches intrusives, qui se trouvent dans le bassin de la rivière Cuanza, ont été regroupées en complexes qui intègrent les différents cycles géologiques. Ainsi, les roches les plus

anciennes connues en Angola (Gabro-norito) sont antérieures au cycle archaïque (>3 000 MA) et les plus récentes (basaltes et dolerite) sont déjà d'âge cénozoïque (<60 MA). Les affleurements du granites biotritiques, granodiorites et diorites qui correspondent aux intrusions de l'archaïque tardif, étant nombreux dans le bassin de drainage en particulier dans la région de kuíto, Camacupa et Andulo (haut Cuanza). Les affleurements de granit de Quibala sont encore considérables, surtout sur la rive gauche de du haut et moyen Cuanza, formant parfois d'imposants reliefs. Par rapport aux autres intrusions représentatives du bassin, les roches hybrides qui remplissent les cheminées de kimberlite ne sont pas encore mises en évidence. Un ensemble de 12 cheminées mal étudiées sont référencées dans le cours moyen de la rivière Cuanza (Ministère de l'énergie et de l'eau, 2017).

#### 1.4 Géomorphologie :

Les principales formations géomorphologiques du bassin du fleuve Cuanza sont subdivisées comme suites :

- **La zone littorale** : Coprise entre l'océan Atlantique et le rebord de la plate-forme africaine, Atteint au point le plus élevé une altitude de 400 mètres. On y rencontre des marais salants, des formations littorales et lagunaires qui se sont déposées à partir du Mésozoïque (Montero, 1961).
- **Le massif continental** : Qui comprend la zone des plateaux intérieurs, fait partie du socle central africain. Il est constitué par des terrains anciens, des nappes provenant d'empêchements volcaniques, plus au moins recouverts par des dépôts continentaux d'origine récente. Trois principaux domaines tectoniques crustal sont identifiés dans le massif central : la zone du bouclier central à l'est et la zone centrale des Eburnéens et de Lubango à l'ouest. Cette dernière s'étend vers le sud jusqu'en Namibie sous la forme du complexe métamorphique d'Epupa et, plus au sud, est exposée dans les enclaves de Kamanjab et de Grootfontein (De Carvalho et al., 2000; McCourt et al., 2013; Jelsma et al., 2018).
- **La zone des sables** : c'est une vaste région située dans la partie orientale du bassin de fleuve Cuanza. Elle est recouverte par les mêmes types de sédiments qui entourent la dépression du Kalahari et par des dépôts superficiels postérieurs datant du Quaternaire. Cette vaste zone est orientée Nord-ouest Sud-est, à partir du Nord-ouest de Luando jusqu'au Nord de Malanje (Montero, 1961).
- **Les formations du Haut Zambeze** : recouvrant les limites est du bassin du fleuve Cuanza, sont constituées de roches éruptives et sédimentaires, appartenant au massif continental africain (Montero, 1961).



## 1.5 Hydrogéologie :

En ce qui concerne le contexte hydrogéologique du bassin du fleuve Cuanza, compte tenu des études disponibles ainsi que de la géologie et de la géomorphologie du bassin du fleuve Cuanza. L'interprétation du développement du réseau hydrogéologique, du comportement hydrogéologique attendu des différents types de matériaux géologiques et de l'hypothèse de prévision des modèles conceptuels du fonctionnement hydrogéologique, il est considéré que la zone du bassin du fleuve Cuanza peut être divisée en quatre unités aquifères dans lesquelles sont réparties les formations géologiques qui présentent un comportement hydrogéologique similaire, mais avec des lithologies différenciées.

Les unités aquifères (Figure 20) définies dans cette caractérisation sont : Systèmes alluviaux, milieux détritiques, milieux éruptifs et fissurés et milieux mixtes.

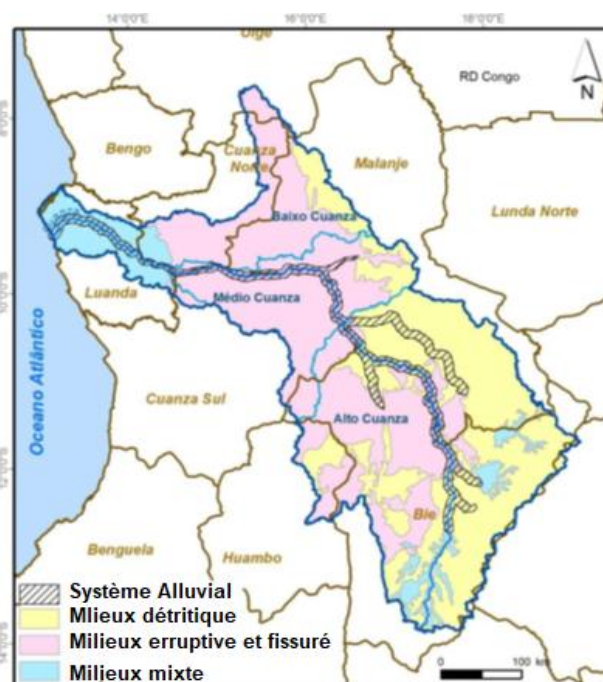


Figure 20: Unités aquifères du bassin de la rivière Cuanza (Ministère de l'énergie et de l'eau, 2017).

## 2 La région de l'Anti-Atlas Oriental : Climat Aride.

Le domaine de l'Anti-Atlas, situés au Nord-ouest du continent africain, est le domaine atlasique méridional du Maroc, c'est une région aride et semi-désertique localisé entre les 28<sup>ème</sup> et 32<sup>ème</sup> parallèles et les 4<sup>ème</sup> et 11<sup>ème</sup> méridiens. Avec une orientation Ouest-Sud-Ouest Est-Nord-Est. Sur une longueur d'environ 1000 Km, l'Anti-Atlas s'étendant de l'océan Atlantique vers le sud-ouest jusqu'au Hamada de Guir vers le nord-est, Il est limité au Nord

par la chaîne du Haut Atlas et, au Sud, par le bassin de Tindouf situé au Nord de la dorsale Réguibat.

La chaîne de l'Anti-Atlas se présente sous la forme d'un vaste bombement anticlinal comportant en son coeur des affleurements du socle appelés boutonnières, elles-mêmes bordées par une couverture sédimentaire paléozoïque plissée (Robert-Charrue, 2006). La zone d'étude, comme son nom l'indique, l'Anti-Atlas Oriental, recouvre la partie extrême Est du domaine Anti-Atlasique. Avec une superficie de 31400 Km<sup>2</sup>, elle est limitée au Nord par le Haut-Atlas, à l'Est par le Hamada de Guir, l'Ouest par l'oued Draa et le Sud par le Hamada de Kem kem. Les massifs de Saghro et de l'Ougnat constituent les points culminants de cette zone avec une altitude maximale de 2500 mètres.

## 2.1 Contexte hydro-climatique :

L'Anti-Atlas Oriental est caractérisé par un climat aride à présaharien (Figure 21). Les précipitations décroissent généralement depuis l'Anti-Atlas en direction du Sud. Cette faible pluviométrie au Sud est due d'une part au fait que la chaîne atlasique empêche toute influence océanique et d'autre part, à la présence des masses d'air chaud provenant du Sahara. Le régime annuel des précipitations est caractérisé par deux saisons humides d'automne et de printemps séparées par une brève saison d'hiver avec un minimum relatif faible, et par une longue saison d'été très marquée par la sécheresse (Hilali, 2015).

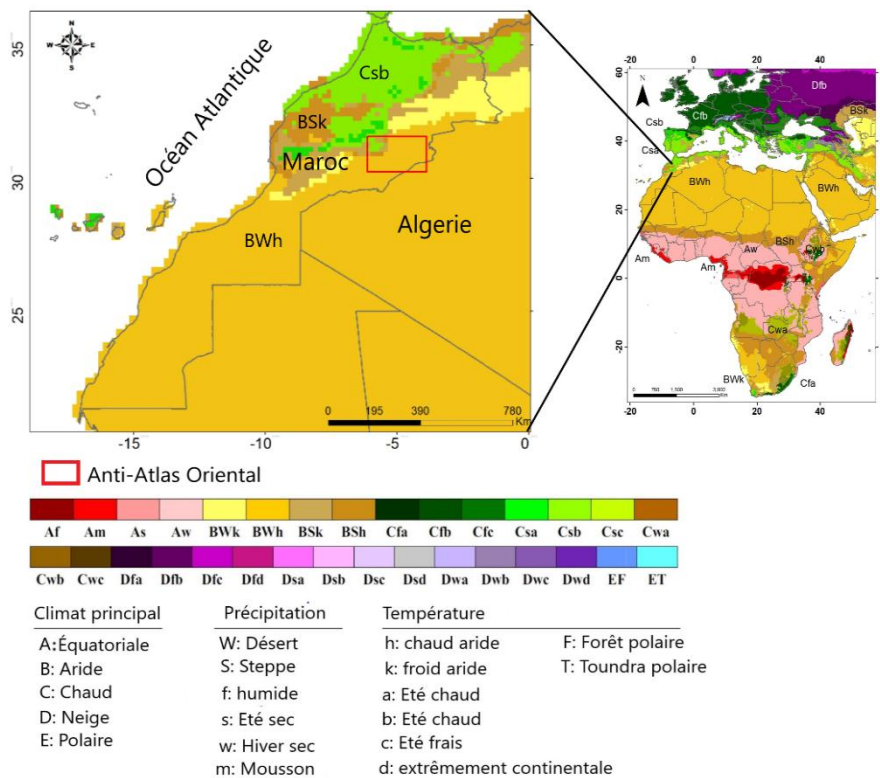


Figure 21: Répartition des types de climats dans le Maroc. Modifiée après Kottek et al, (2006)

La hauteur moyenne annuelle des précipitations calculées sur la période 2018 était de 265,2mm. Le gros des pluies se produit entre le mois de septembre et de février. Le mois de janvier étant le plus pluvieux avec 43,7 mm et le mois de juillet le moins pluvieux avec 1,3 mm. Les températures moyennes et les valeurs minimales (m) et maximale (M) calculées sur la période considérée sont récapitulées dans le tableau 02. Elles révèlent l'existence d'un hiver froid avec une moyenne des minimas de 8,5 C° en Janvier, et un été chaud, avec une moyenne des maximas (le mois le plus chaud) de 47,4C° en Juin.

L'évapotranspiration réelle de la zone d'étude estimée par les données de MODIS 2018, montre que l'évapotranspiration décroît du nord vers le sud de la zone d'étude. Les plus fortes valeurs d'évapotranspiration réelle se rencontrent essentiellement dans les piémonts et les plaines sud, et les valeurs les plus faible se rencontre dans les reliefs des Massif de Saghro et Ougnat. L'évaporation moyenne annuelle est de l'ordre de 3 553 mm avec des valeurs extrêmes en décembre (99 mm) et en juillet (542 mm). Par ailleurs L'humidité relative, la plus élevée, est enregistrée pendant le mois de décembre, soit 41% pour la station d'Alnif et en Décembre, soit 37% pour la station de Tazarine. L'humidité relative, la plus faible, est enregistrée au mois de juillet avec 14% pour Alnif et 11% pour Tazarine (Hilali, 2015)

## **2.2 Géologie générale de l'Anti-Atlas Oriental :**

Les formations géologiques qui constituent cette zone sont d'âges varies allant du Précambrien jusqu'au Quaternaire (Figure 22). Le Cambrien à dominante gréseuse, reste morphologiquement incorporé aux boutonnières précambriennes dont il forme la première cuesta monoclinale avant les dépressions faites par les argilites ou par les Feijas externes. Les séries ordoviciennes ont été classées en quatre grands groupes lithologiques définis dans l'Anti-Atlas central par Choubert (1943). Elles consistent en deux ensembles argileux (Schistes des Feijas externes à la base et les Schistes de Ketaoua au sommet) séparés par une première crête gréseuse : le Premier Bani. L'ensemble est couronné par une seconde crête gréseuse : le Deuxième Bani. Les affleurements du Dévonien sont bien exposés dans la région de Taouz en plis synclinaux. Les faciès sont très diversifiés, ils affleurent au sud de la crête ordovicienne du Jbel Bani et s'étendent jusqu'au Maïder et Tafilalt. Le Carbonifères formé d'une sédimentation argilo-gréseuse, continue avec celle du Dévonien supérieur, présente aussi des plissements synclinaux dans la région de Taouz. Dans l'extrême sud de l'Anti-Atlas oriental, ces formations paléozoïques sont recouvertes sous les hamadas d'âge crétacé et tertiaire-quaternaire, dont le Hamada de Kem kem, qui fait partie de la zone d'étude (Robert-Charrue, 2006, Baidder, 2007).

L'évolution géologique de l'Anti-Atlas oriental fait partie de l'histoire géologiques global du domaine Anti-Atlasique qui est largement contrôlée par sa position le long de la marge Nord-

ouest du Craton Ouest-Africain. Les différents cycles orogéniques successifs, panafricains, calédoniens, hercyniens et alpins prennent toujours place autour des marges de ce bouclier stable (Baidder, 2007). Le Précambrien de l'Anti-Atlas est caractérisé par un épisode de rifting vers 800 Ma qui s'est opéré le long de la bordure NE du craton ouest-africain. Une fermeture océanique s'est produite vers 685 Ma, dont la suture de Bou-Azzer et celle de Siroua (Saquaque et al., 1989) représentent une phase d'abduction. Au Néo-protérozoïque terminal, une subsidence post-panafricaine affecte globalement l'Anti-Atlas. Elle est caractérisée par le dépôt d'épaisses séries volcan-détritiques suivies, sans interruption, de carbonates à stromatolithes infracambriennes qui annoncent le début de la transgression paléozoïque. Cette subsidence, contrôlée par des failles profondes est accompagnée par une activité magmatique qui se maintient jusqu'à la fin du Cambrien supérieur à l'Anti Atlas oriental (Baidder, 2007).

Durant le Paléozoïque, l'histoire tectonique et sédimentaire de l'Anti-Atlas est celle d'une plate-forme stable interrompue par un épaulement du rifting cambrien qui correspond à une période d'érosion (Michard, 1976) et par des mouvements épi-orogéniques dont le principal soulèvement se situe au Caradoc (Baidder et al. 2007). A partir du Dévonien supérieur, la dislocation amorcée de la marge s'accroît au Dévonien inférieur (Wendt et Aigner, 1985, Baidder et al. 2007) ; des aires soulevées s'individualisent et la sédimentation, plus détritique, est alimentée par les domaines soulevés au Nord de l'Anti-Atlas (Baidder, 2007). Après l'orogénèse hercynienne, l'Anti-Atlas montre une stabilité générale lors du Trias. Des fractures NE-SO sont empruntées par des dykes dolomitiques jurassiques (Foum-Zguid, Irherm et Norites de Mecissi), probablement associés à l'ouverture de l'Atlantique au 175 Ma, (Sahabi et al. 2004). A partir du Crétacé supérieur, au cours de l'orogénèse alpine, l'Anti-Atlas est soumis à un soulèvement qui est à l'origine des principaux reliefs actuels. Cette tectonique est plus active dans sa partie nord qui se manifeste par des plis et des chevauchements qui accompagnent la formation du Haut Atlas (Baidder, 2007).

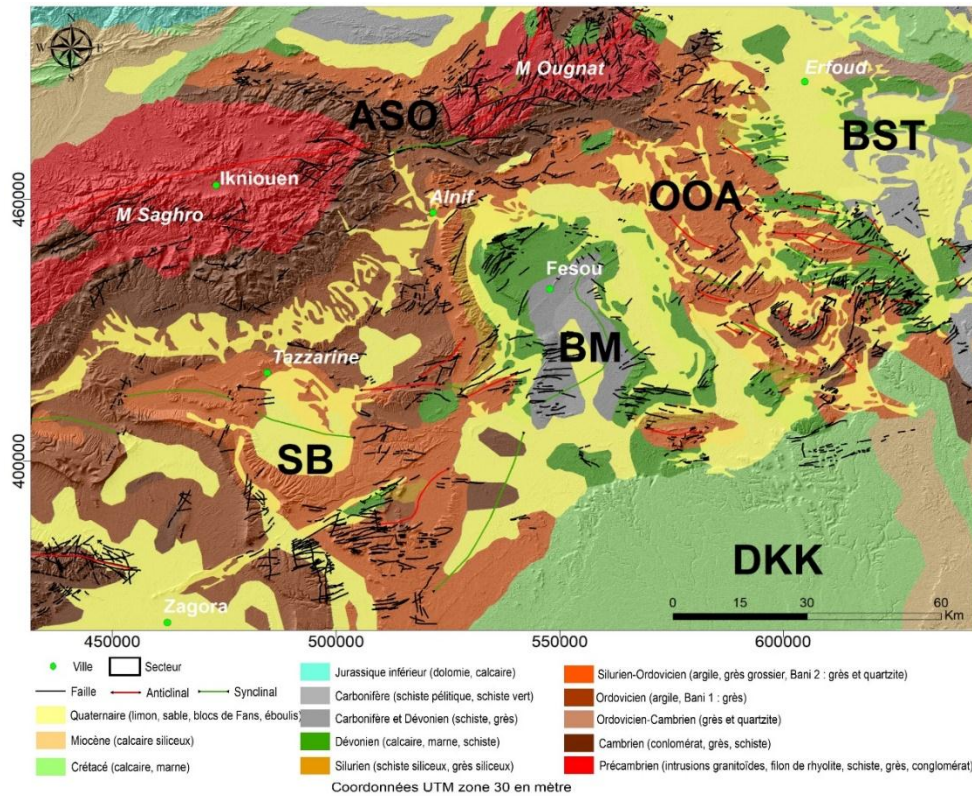


Figure 22: Contexte géologique de la zone étudiée et localisation des 6 secteurs géologiques. ASO : Axe Saghro-Ougnat, AOO : Axe Ougnat-Ouzina, BST : Bassin Sud-Tafilalt, BM : Bassin Maider, SB : Secteur des Banis et DKK : Domaine de Kem-Kem. Modifié après Baïdder et al. (2016).

### 2.3 Géomorphologie :

La région de l'Anti-Atlas Oriental se compose de six secteurs qui sont distinctes de part la géologie et géomorphologie (Figure 23):

**Le secteur de Bani (SB) :** c'est une couverture paléozoïque plissée située au sud-ouest de la zone d'étude. Le terme "Bani" désigne les structures monoclinales du Cambrien au Dévonien (Choubert, 1943 ; Colmenar et al., 2018 ; Ouanaïmi et al., 2018). L'Ordovicien couvre une vaste zone, avec deux crêtes de grès dur, à savoir le premier et le second Bani, séparées par deux niveaux de schiste-argileux, appelés respectivement schistes de Feija et de Ktaoua.

**Le secteur de l'axe Ougnat-Ouzina (AOO) :** il est également désigné comme l'anticlinorium de Taouz dans la littérature. Il s'agit d'une large zone de cisaillement de tendance NNW-SSE contenant des structures plissées anticlinales cambriennes (Jbel Taklimt, Jbel Renneg et Jbel Tijekht). Des unités structurales plissées de l'Ordovicien sont également observées dans la partie nord-est et sud-est de ce secteur (Bou Mays et Amelane-Mech Irdane, les unités anticlinales de Shayb Arras et Jbel Tazout), et sont séparées les unes des autres par des plis synclinaux d'âge dévonien et carbonifère (synclinaux d'Ottara et d'Amessoui) (Baïdder et al., 2016).

**Le secteur du bassin de Maider (BM) :** Situées autour du synclinal du Fesou du Carbonifère inférieur au centre de l'Anti-Atlas oriental, il est faiblement déformé par rapport aux autres secteurs. Sa limite ouest est une zone de plis monoclinaux, alors qu'au sud il est délimité par des plis anticlinaux de tendance E-O à ENE-WSW (Kaufmann, 1998 ; Robert-Charrue, 2006 ; Baidder et al., 2016).

**Le domaine de Kem-Kem (DKK) :** comprend une grande zone tabulaire pierreuse de dépôts crétacés, qui met en évidence l'érosion partielle de la couverture sédimentaire formée par les dépôts détritiques. Ces formations restent intactes, sans structures développées significatives (Robert-Charrue, 2006 ; Baidder et al., 2016).

**Le secteur du bassin sud-tafilaltique (BST) :** situé dans la limite Nord-est de la zone d'études, ce secteur est caractérisé par le large synclinal de Merzouga du Carbonifère inférieur avec un axe de tendance WNW-ESE, et parallèle à l'anticlinal Erfoud du Dévonien moyen situé au nord-est du secteur.

**Le secteur de l'axe Saghro-Ougnat (ASO) :** il comprend deux grands massifs précambriens, le Saghro et l'Ougnat, appelés aussi boutonnières, qui constituent les points les plus élevés de la zone d'étude, à plus de 2400 m d'altitude. Ce secteur est considéré comme un arc panafricain (Walsh et al., 2012), séparant deux domaines géologiques importants, à savoir le Haut Atlas au nord et le Sahara du Maroc au sud. Les boutonnières recouvrent des failles profondes réactivées à une échelle de plusieurs kilomètres, à savoir la faille d'Assif n'Oussif, la faille de Boulghzazil-Tinifift, la faille d'Akrouz et la faille de Tizi n'Ressas (Soulimani et al., 2014).

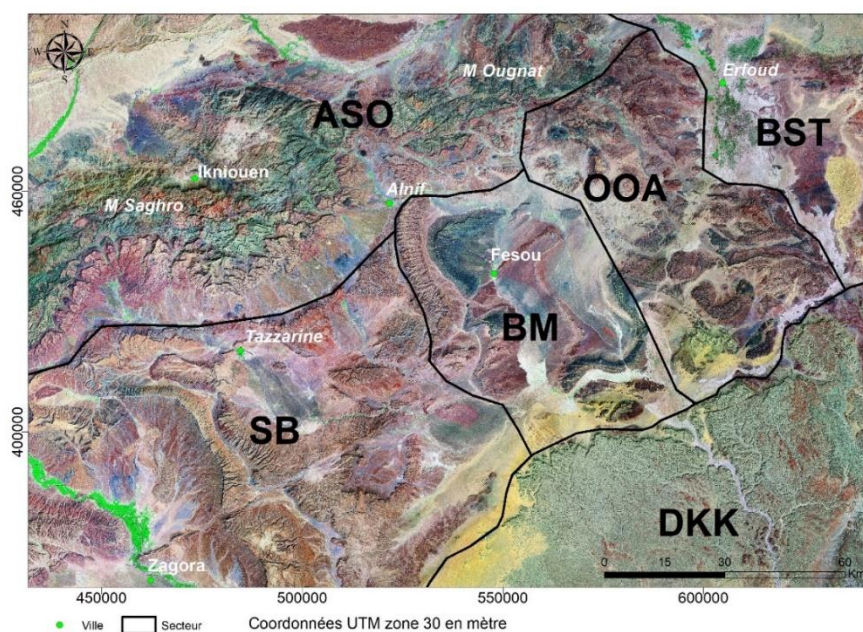


Figure 23: Représentation et délimitation des six secteurs géologiques identifier dans l'Anti-Atlas Oriental Modifier après Baidder et al. (2016).

## **2.4 Hydrogéologie :**

Vu leur faible porosité et leur minéralisation les aquifères paléozoïques de l'Anti-Atlas Oriental n'offrent pas de grandes potentialités. Cependant, ces réservoirs peuvent constituer une possibilité d'approvisionnement en eau non négligeable pour ces régions extrêmement arides, qui souffrant régulièrement de la pénurie d'eau. Deux types d'aquifères sont identifiés dans cette zone, indépendamment de leur faible potentiel (Hilali, 2015):

**Les aquifères de l'Ordoviens :** Ils sont représentés essentiellement par des grès et parfois de schistes peu perméables. Les réserves en eau sont faiblement importantes et limitées à une faible épaisseur ou à des zones fracturées très discontinues avec des coefficients d'emmagasinement très faibles et des perméabilités de l'ordre de  $10^{-4}$  à  $10^{-6}$  m/s. Les débits des ouvrages captant ces aquifères sont généralement inférieurs à 1 l/s (Hilali, 2015). Par ailleurs, ces aquifères présentent des fortes teneurs en sel, du au faible écoulement souterrain et le faible renouvellement des eaux.

**Les Aquifères du Dévonien :** Particulièrement carbonatés, les aquifères calcaires et calcaire marneux du dévonien sont karstique et leur affleurement constituent une zone d'infiltration des eaux. Les calcaires du dévonien formant ce réseau karstique concentrent parfois les écoulements souterrains vers certaines palmerais soutenant ainsi les niveaux d'eau dans les formations Plio-quadernaires sus-jacentes.

**Les aquifères Plio-quadernaires :** Ces aquifères sont situés particulièrement dans les vallées des principaux oueds de l'Anti-Atlas Oriental. Les formations réservoirs sont constituées essentiellement de sables argileux avec des horizons de marnes et marno-calcaires, leur épaisseur généralement ne dépasse pas 10 mètres mais peut atteindre exceptionnellement plus de 20 mètres. La perméabilité varie de  $10^{-2}$  m/s à  $10^{-4}$  m/s. Les eaux de crues des oueds correspondants assurent la recharge de ces nappes. Bien que le climat est aride, les peu de précipitation cette zone contribue à la recharge des nappes mais à faible taux par l'infiltration directe (Hilali, 2015).

## **3 Le bassin versant de la Durance : Climat tempéré.**

Localisé dans La région Provence-Alpes-Côte d'Azur (PACA), le bassin versant de la Durance représente une superficie d'environ 14 280 km<sup>2</sup>, soit la moitié de la superficie de cette région et s'étend sur les 6 départements de la région (04, 05, 06, 13, 83 et 84) et sur une petite partie du département de la Drôme. La région PACA est baignée au sud par la mer Méditerranée et limitrophe à l'est des régions italiennes de Ligurie et Piémont. Elle est bordée

au nord par la région Auvergne-Rhône-Alpes et à l'ouest par la région Occitanie, le Rhône formant la limite régionale. Son territoire couvre une grande partie des Alpes du Sud. La rivière de la Durance prend naissance au col de Montgenèvre et se rejette dans le Rhône 305 km plus loin sur la ville d'Avignon. En amont du barrage de Serre-Ponçon la Durance est une rivière torrentielle très peu perturbée par les aménagements, elle y présente des caractéristiques très différentes de la Basse et de la Moyenne Durance. Dans cette partie t du bassin, le cours d'eau principal est l'Ubaye, qui rejoint la Durance dans le lac de Serre-Ponçon. Elle se divise en six bassins secondaires : - le Calavon situé à l'extrême ouest du département, - le Jabron au nord-ouest qui longe la montagne de Lure, - l'Ubaye le principal affluent de la Haute Durance, au nord-est, - le Sasse, - la Bléone, - l'Asse, - le Verdon.

La Durance qui fut pendant bien des années un des fléaux de la Provence lorsqu'elle sortait de son lit, est aujourd'hui plus calme. Des barrages sur son cours ou sur ses affluents lui imposent un régime plus régulier. Divers canaux destinés à l'agriculture, aux usines hydroélectriques ou à l'alimentation en eau potable endiguent la majeure partie de ses eaux.

### 3.1 Hydro-climatologie

Selon la classification de Koppen-Geiger, La majorité de la région PACA présente un climat de latitudes moyennes au sein de la zone dite « tempérée », qui est intermédiaire entre la zone froide polaire et la zone chaude intertropicale (Figure 24). Il est ainsi à la fois méditerranéen et montagnarde, étroitement lié au relief et à la latitude (Lafaysse et al., 2011). La region PACA, connaît donc des étés et des hivers bien différenciés, et elle bénéficie d'un fort apport radiatif solaire, vu le climat méditerranéen se trouve en marge sud.

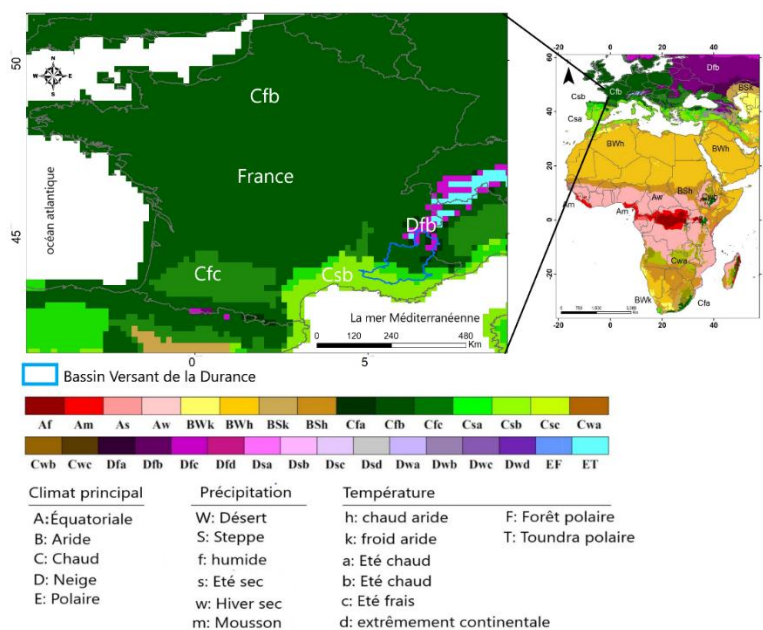


Figure 24: La répartition des types de climats en France, modifiée après Kottek et al, (2006)



La région Provence-Alpes-Côte d'Azur a connu 988 millimètres de pluie en 2018, mais varient fortement d'une année ou d'un mois sur l'autre : à de longues périodes sèches peuvent succéder des averses d'une intensité remarquable. Les pluies se concentrent majoritairement en automne. Dès le mois de septembre, les cumuls peuvent dépasser les 400 mm suite à des fortes précipitations qui se produisent le plus souvent sur de courtes durées, entre 24 et 72 heures. Au cours de l'été, les précipitations sont très faibles, le cumule ne dépasse pas les 100 mm (Figure 25).

Avec l'altitude élevée des montagnes et la chaleur méditerranéenne des vallées, cette région peut connaître les températures des étés les plus chauds, comme les températures des étés les plus froids en France. La température moyenne présente un minimum en février 2018 (1.3°C) et un maximum en juillet 2018 (31.3°C) (Figure 26).

Le vent fort survient plus souvent dans l'ouest du département exposé au mistral que dans l'est où le relief chaotique atténue la pénétration des courants d'air dans les vallées. Le Mistral, froid et sec, souffle toute l'année, mais particulièrement d'octobre à avril. Il provoque une diminution des températures atmosphériques et de l'humidité de l'air, ce qui accroît l'évaporation et favorise les remontées par capillarité de la nappe superficielle. La vitesse maximale du vent enregistré dans la région PACA atteint 133km en 2018

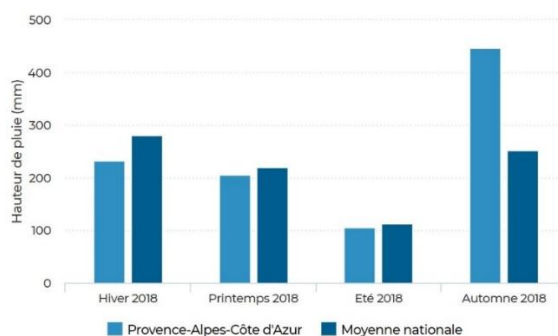


Figure 25: Précipitation en Provence-Alpes-Côte d'Azur en 2018 (Linternaute.com d'après Météo France).

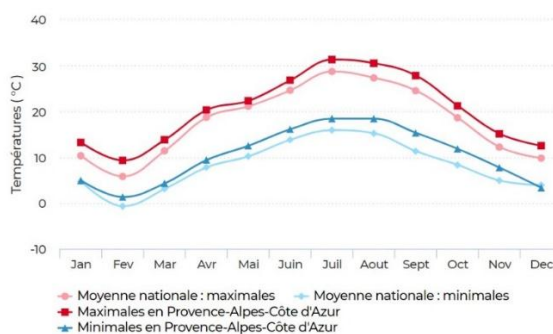


Figure 26: Températures en Provence-Alpes-Côte d'Azur en 2018 (Linternaute.com d'après Météo France)

### 3.2 Contexte géologique :

Le bassin versant de la Durance contient dans sa constitution géologique les principaux cycles géologiques de la région PACA (Figure 27), qui commence au Protérozoïque, les édifices qui restent de cette époque sont les gneiss de Bormes-les Mimosas -640 Ma. Dans l'ère Paléozoïque, précisément au Carbonifère, les mouvements tectoniques engendrent l'orogénèse de la chaîne Hercynienne appelée aussi la chaîne Varisque qui s'étendait de l'Europe centrale à l'Afrique de l'Ouest et à l'Amérique du Nord. Le Massif armoricain, le Massif central, les Vosges, les Ardennes et la chaîne Pyrénéo provençale sont d'origine hercynienne. De cette chaîne affleurent les massifs de Maures, de Tanneron et de l'Esterel. Ils forment la Provence cristalline avec son socle ancien composé de roches métamorphiques et granitiques (Figure 28) (Clauzon, 1979).

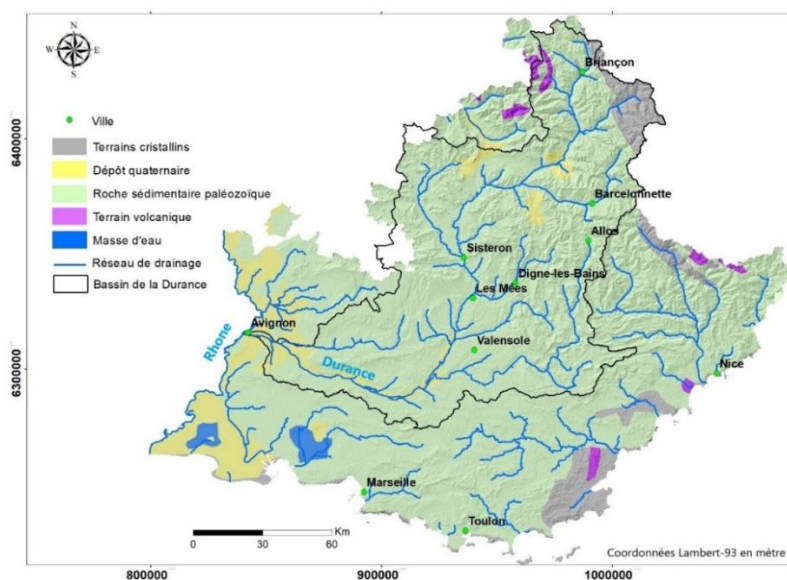


Figure 27: Représentation des principaux types de roches dans la région PACA

A la fin du Permien l'ensemble des massifs hercyniens, est arasée par l'érosion intense. Elle prend l'aspect d'une vaste pénéplaine. Les matériaux détritiques de l'érosion : sables et graviers s'accumulent dans les zones basses, dans les creux des reliefs, sur des épaisseurs de 2000 m et plus. Les matériaux se consolident en grès, couleur lie-de-vin. Ils vont former la dépression permienne. La dépression permienne entoure le massif des Maures d'Hyères à Saint-raphaël. Au Permien, une importante activité volcanique vers - 275 Ma déverse de grandes quantités de laves des rhyolites, roches volcaniques connues sous le nom de « porphyres rouges », qui vont donner naissance au massif de l'Esterel.

Au-dessus du socle hercynien et de son manteau détritique permien vient la couverture sédimentaire secondaire et tertiaire caractérisée par ses puissantes formations de calcaire. Les roches calcaires formant la plupart des massifs de PACA, proviennent de sédiments marins

déposés par la mer qui recouvrait toute la région. Ses formations s'étendent de la vallée du Rhône à l'ouest jusqu'au massif des Maures et du Tanneron à l'est, et de la mer Méditerranée au sud à la Durance et au Verdon au nord. Au Trias se déposent des grès, des calcaires dolomitiques, des marnes (Champion et al., 2000). Vers la fin du Trias, la mer se retire laissant derrière des zones lagunaires dans lesquelles se déposent des évaporites, des argiles et des gypses. Durant le Jurassique-crétacé, la mer revient, suivis par le dépôt de grand épaisseur de marnes, calcaire dolomitique. A l'Eocene-Oligocene, la partie de Provence de la région PACA émerge, les reliefs sont par la suite détruits par l'érosion, les dépôts sédimentaires vont être continentaux, détritiques (Clauzon, 1979; Champion et al., 2000).

Au Miocène, la convergence et la collision entre les plaques lithosphériques continentales européennes et africaine, cette dernière représentée par son promontoire adriatique, qui correspond à peu près à l'Italie actuelle, constituent la période Alpine qui résulte en la surrection de la chaîne des Alpes (BRGM-RP, 2009). Au Pliocène on assiste à la formation du bassin de Valensole qui se comble des alluvions, particulièrement la formation conglomératique typique du Valensole, charrié par la rivière de la Durance et constitue actuellement un paysage touristique spectaculaire dans le bassin de la Durance. La région se soulève, comme le plateau du Verdon dans lequel la rivière s'encaisse creusant les gorges du Verdon sous l'effet des derniers mouvements alpins. Durant le Quaternaire, l'érosion façonne le paysage sous un climat froid. La rivière de la Durance et le Rhône charrient de grandes quantités de matériaux, qui forment le paysage provençal actuelle, on y trouve des galets, graviers et sables (Champion et al., 2000).

### **3.3 Géomorphologie :**

La formation des Alpes avec une lithologie dominée par les formations sédimentaires carbonatées, a produit un paysage fortement affecté par la tectonique, disloqué par de nombreuses failles et une géologie très variée (Robl et al., 2008; Ribolini et al., 2008; Lafaysse et al., 2011; Petit et al., 2019). Les formes générales du paysage dépendent en partie de la nature lithologique qui déterminent l'architecture des paysages du bassin. Deux grandes zones géologiques structurent le bassin de la Durance (Figure 28) : la Provence au sud-ouest et les Alpes au-delà d'une grande zone de chevauchement.

Le domaine géologique provençal se distingue par trois unités géologiques et géomorphologiques distinctes. On trouve le plateau du Vaucluse dont les calcaires francs subissent des phénomènes karstiques typiques (Crétacé inférieur), la Durance et ses alluvions et le plateau de Valensole, formé de conglomérats issus de la très forte érosion des Alpes (Mio-pliocène). La zone alpine, sa partie sud et sud-est est caractérisée par des plis synclinaux et anticlinaux de style jurassien, dans sa partie Nord on trouve des barres calcaires surmontées

de calcaires marneux (Jurassique supérieur, Crétacé), le domaine de collines des terres noires constituées de marnes du Jurassique soumises à l'érosion. Les montagnes d'Allos, Séolane, Bachelard qui correspondent à une zone de flyschs de l'Autapie (calcschistes, schistes noirs et calcaires gréseux), le Parpaillon situés sur des flyschs à helminthoïdes. Le domaine de l'Ubaye constitué par une bande étroite de flyschs de base dont les terres noires caractérisent le paysage. Le secteur nord-est de l'Ubaye où l'on retrouve des gypses, des dolomies ou des quartzites du Trias. Finalement la zone septentrionale de l'Ubaye (col de Longet) qui est la partir la plus amont du bassin de la Durance correspond à des schistes lustrés intercalés de roches vertes.

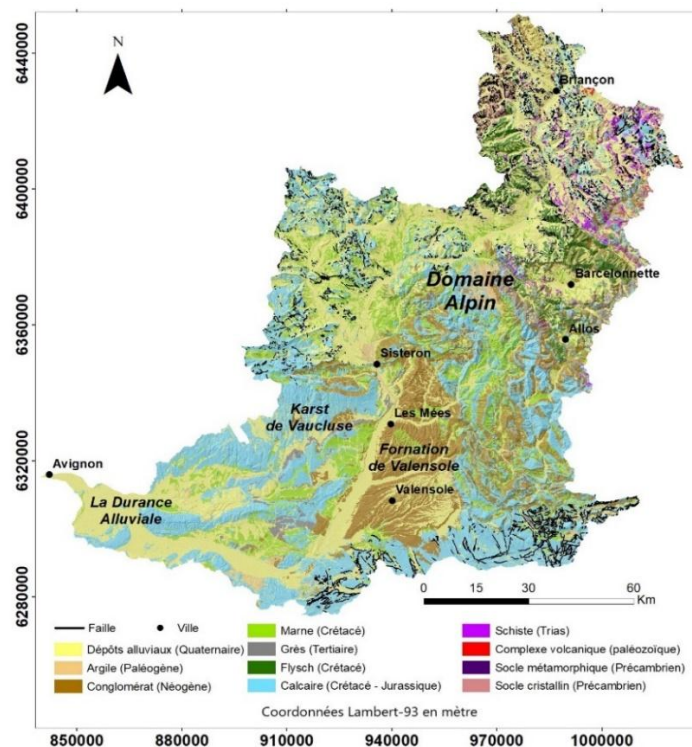


Figure 28: Représentation des principales formations et structures géologiques du bassin de la Durance

### 3.4 Hydrogéologie :

Le région PACA et à son cœur le bassin de la Durance se caractérisent par une grande diversité sur le plan de la géologie et de l'hydrogéologie (Figure 29). La formation des Alpes, les massifs anciens, la Provence alluviale et le Karst de Vaucluse ont conduit à la segmentation de ce territoire en de multiples unités morphologiques qui forment les reliefs ou délimitent des dépressions sédimentaires d'âge tertiaire. Les érosions intenses et les héritages climatiques glaciaires quaternaires ont ensuite favorisé la constitution de puissants aquifères alluviaux associés aux grands cours d'eau du bassin. Le résultat est une grande disparité dans la disponibilité des ressources en eaux souterraines suivant les régions et la nature des formations géologiques du sous-sol (Nicod, 1980). Cependant, l'essentiel des ressources en

eaux souterraines est contenu dans les alluvions des cours d'eau et dans les formations sédimentaires calcaires et détritiques (sables, grès), qui se trouve dans la partie méridionale du bassin de la Durance et l'ensemble de la région PACA. Les zones alpines, Les terrains de socle, les terrains peu perméables (marnes, argiles, schistes) ou encore les terrains constituant les séries plissées et compartimentées des régions de montagne qui alimentent les cours d'eau les plus importants du bassin, apparaissent plus démunies. Ces zones disposent néanmoins ponctuellement d'aquifères locaux qui alimentent des sources cruciales pour l'alimentation en eau de certains secteurs. Sur l'ensemble du bassin de la Durance on peut distinguer trois complexes hydrogéologiques (Nicod, 1980) :

**Les aquifères des bassins sédimentaires et des vallées :** Les alluvions fluviales récentes des cours d'eau sont constituées de sables, graviers et galets et renferment des nappes à faible profondeur sous la surface du sol, en relation avec les cours d'eau concernés (nappes d'accompagnement) (Nicod, 1980). Ces nappes sont souvent très vulnérables, et leur qualité est parfois altérée, particulièrement en aval de la Durance en raison des pressions qu'elles subissent (agriculture, activités urbaines et industrielles).

**Les aquifères calcaires et karstique :** dans la région Provençale, les régions karstiques sont très nombreuses mais présentent un caractère plus morcelé que dans les deux régions précédentes : montagne de Sainte Victoire, massif de la Sainte Baume, montagne du Cheiron, massif du Beausset et des Calanques. Le plateau de Vaucluse, est le plus caractéristique du bassin de la Durance et de la région provençale drainés par la source de Fontaine de Vaucluse de fort débit (Emblanch et al., 2003; Fleury et al., 2007).

**Les aquifères des massifs alpins :** Les massifs alpins se caractérisent par une très grande diversité de formations et de contextes, avec une géomorphologie profondément marquée par les fractures, les contraintes tectoniques et les glaciations quaternaires. Les conditions géologiques et structurales particulières aux massifs conduisent à la constitution d'une multitude d'unités à la perméabilité très variable. Il s'agit en général de nombreuses petites unités discontinues, compartimentées et de faible volume, particulièrement des formations morainiques de faible extension, alluvions torrentielles et cônes d'éboulis. Leur alimentation dépend des précipitations à leur surface mais aussi des apports de versant (Nicod, 1980).

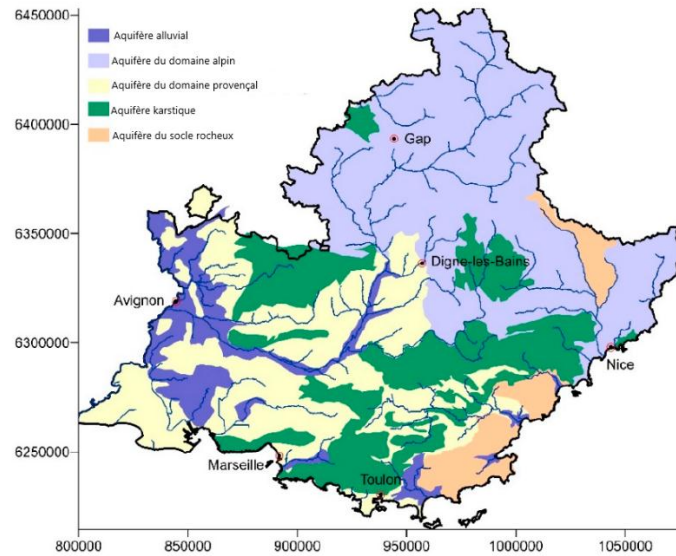


Figure 29: Représentation des principaux types d'aquifère dans la région PACA (Touiouine et al., 2020)

#### 4 Justification du choix des trois zones d'études :

Le Tableau 3 présente une synthèse et comparaison des principales caractéristiques physiques des trois zones d'études. On remarque que ces derniers présentent des aspects très distinctes, que ça soit dans la topographie, géologie, couverture végétale, climat... etc. Ces caractéristiques sont adéquates pour vérifier l'influence de plusieurs propriétés du paysage sur la distribution des types de réseaux de drainage dans des conditions très contractées. Par conséquent, on aura évité de se concentrer sur un fait local ou régional n'ayant pas de validité plus générale.

Par ailleurs, La surface des zones d'étude et des bassins est aussi un aspect très important dans la caractérisation des types de réseau de drainage. En effet, Mejia et Niemann (2008) ont stipulé que les méthodes d'interprétation visuelle ou empiriques de classification dépendent de l'échelle car elles sont conçues pour des réseaux d'une taille particulière et ont noté que le même réseau peut être classé comme rectangulaire ou en treillis si seule l'échelle de la carte est modifiée. Dans le cas de ce travail, la surface de l'Anti-Atlas Oriental fait deux fois celle du bassin de la Durance et la surface de bassin du fleuve Cuanza fait cinq fois la surface de l'Anti-Atlas Oriental. Cette large gamme de superficies est aussi remarquée sur les sous bassins de chaque zone d'étude, où la superficie moyenne de ceux du bassin du fleuve Cuanza fait dix fois celle des sous bassins de l'Anti-Atlas Oriental et le bassin versant de la Durance. Ainsi cette large variabilité de superficie, nous permettra de vérifier l'hypothèse de la dépendance du déterminisme des types de réseau de drainage à l'échelle d'étude ou d'analyse.

Tableau 3: Synthèse des principales caractéristiques des trois zones d'études

Caractéristiques	Bassin du fleuve Cuanza	Anti-Atlas Oriental	Bassin versant de la Durance
Surface (Km <sup>2</sup> )	151 397	31 477	14 280
Altitude moyenne (m)	1201	981	1142
Altitude Maximale (m)	1970	2300	4019
Altitude Minimale (m)	0	512	13
Pente Moyenne (°)	2.8	8.7	17.19
Nombre de sous bassins	88	220	94
Surface moyenne des sous bassins (Km <sup>2</sup> )	1480	126	140
Lithologie dominante	Gneiss, roche verte carbonatites, basaltes, dolérites, trachytes, phonolites, sable, grès quartzitiques, , argile, gravillons et de graviers	Granit, rhyolite, quartzite, basalte, schiste, calcaire, grès, conglomérat,	Calcaire, marne, terre noire, flysch, grès et conglomérat,
Climat Dominant	Tropical Humide	Aride	Tempéré
Occupation du sol dominante	Forêt mixte et savane boisée	Sol nu	Savane boisée et arbuste ouvert

## II Matériels et méthodes: Sélection des paramètres et Outils mathématiques et statistiques:

Au cours des trois dernières décennies, les technologies et les méthodes de télédétection ont évolués de façon spectaculaire pour inclure une série de capteurs fonctionnant à une large gamme d'échelles d'imagerie et présentant un intérêt et une importance potentiels pour les planificateurs et les gestionnaires du territoire. Associée à la disponibilité des données historiques de télédétection, à la réduction du coût des données et à l'augmentation de la résolution des plateformes satellitaires. La technologie de la télédétection semble prête à avoir un impact encore plus important sur les agences de planification et les initiatives de gestion des terres impliquées dans la surveillance de la couverture des terres, les changements d'utilisation des terres à diverses échelles spatiales, la gestion des ressources en eaux et la prévention contre les risques naturels.

La technologie actuelle de télédétection permet la collecte et l'analyse de données provenant de plateformes terrestres, atmosphériques et en orbite autour de la Terre, en lien avec les données GPS, les couches de données et les fonctions des SIG et les nouvelles capacités de modélisation (Franklin, 2001). La télédétection est ainsi devenue une source précieuse d'informations sur l'ensemble des phénomènes sur la surface de la terre. À mesure que la demande d'informations augmente en quantité et en qualité et que la technologie continue de s'améliorer, la télédétection deviendra de plus en plus essentielle à l'avenir. C'est pourquoi

cette partie du chapitre se concentre sur les paramètres et les sources des données obtenues par voie de télédétection qui vont constituer la base de données de toutes les observations et le traitement ainsi que les moyens et méthodes pour leur extraction.

Les données et les paramètres utilisés et exploités dans cette étude sont de nature variable et proviennent de sources très différentes. Mais ils sont principalement extraits à partir des données de télédétection, à savoir les images des satellites Landsat 8 OLI, Sentinel 1 et Sentinel 2, MODIS, les modèles numériques de terrain, et/ou numérisés et modélisés à partir des systèmes informatiques géographiques.

## **1 Outils d'extraction et les paramètres du réseau de drainage :**

### **1.1 Extraction du réseau de drainage**

L'extraction du réseau de drainage dans cette étude a été réalisée seulement sur la région de l'Anti-Atlas Oriental parce que qu'elle ne disposait pas d'une base de données hydrologiques. Par contre le réseau de drainage du bassin de la Durance est extrait de la base de données Carthage 2007 avec une échelle de 1/50000, qui a été fournie par le Syndicat Mixte d'Aménagement de la Vallée de la Durance (SMAVD) à travers le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM). Le réseau de drainage du fleuve Cuanza a été fourni par l'institut national des ressources hydriques (INRH) d'Angola avec un seuil de 450 Km<sup>2</sup>.

L'extraction automatique du réseau de drainage à partir des modèles numériques de terrain (MNT) est devenue chose nécessaire si non, cruciale, non seulement pour le gain de temps qu'elle offre et la qualité des résultats qui n'arrêtent d'accroître avec l'évolution technologique et informatique, mais aussi par l'aisée maniabilité des caractéristiques du réseau de drainage à savoir la densité et la distribution régionale et locale et les caractéristiques du bassin versant, la pente, la superficie et les indices de forme (Jenson et Domingue, 1988; Donker, 1992; García et Camarasa, 1999; Yuichi et Takashi, 2006). Les données d'élévation MNT utilisées dans ce travail ont été recueillies à partir du Radiomètre Spatial Avancé d'Emission et de Réflexion Thermique (ASTER) Modèle Global d'Élévation Numérique (GDEM). ASTER-GDEM a été lancé en 2009 par le ministre japonais de l'économie, du commerce et de l'industrie (METI) et l'Administration nationale de l'aéronautique et de l'espace (NASA). Les données d'élévation ASTER-GDEM ont été acquises le 17/10/2016, ils ont été téléchargés à partir du portail Global Visualization Viewer (GLOVIS) de l'United States Geological Survey (USGS) (<http://earthexplorer.usgs.gov/>), sous format GeoTif.

Dans ce travail, l'opération d'extraction automatique du réseau de drainage pour la région de l'Anti-Atlas Oriental a été effectuée par l'extension Arc hydro 2.0 du logiciel Arcgis 10.4, qui est un outil utilisé pour dériver du modèle numérique de terrain un ensemble de données qui



décrivent collectivement le réseau de drainage et son bassin versant en se basant sur la méthode d'accumulation de flux de Jenson et Domingue (1991), et la méthode analytique de Tarboton et al. (1991). Ces deux méthodes permettent de générer à partir du MNT, des données sur la direction de flux, l'accumulation du flux, définition du réseau, segmentation du réseau et la délimitation du bassin (Figure 30). Ces données sont ainsi utilisées pour créer une représentation vectorielle du réseau de drainage et de son bassin versant. Par ailleurs, l'étape la plus importante dans cette opération est la définition du réseau (Stream definition), qui consiste à donner un seuil au nombre de pixels qui sont pris en compte pour la représentation d'un cours d'eau. Elle faut savoir aussi que plus le seuil est faible plus le réseau de drainage est dense et plus détaillé.

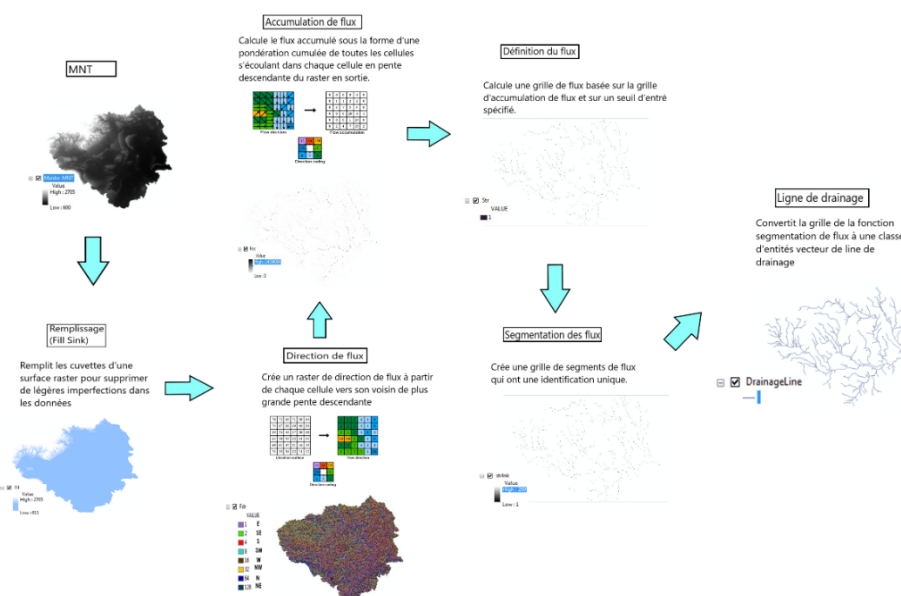


Figure 30: L'opération d'extraction automatique du réseau de drainage effectuée par l'extension Arc hydro sur exemple de bassin versant (Bassin versant de Maider, Anti-Atlas Oriental)

Étant donné qu'il n'y a aucune information sur comment choisir un seuil adéquat pour une zone ou région avec un climat particulier. On a testé plusieurs seuils de définition de réseau en prenant en considération la superficie et le climat. Ainsi pour la région de l'Anti-Atlas Oriental avec un climat aride à extrêmement aride et une superficie de 31477 Km<sup>2</sup> on a testé six seuils, 1000, 1500, 2000, 2500, 3000 et 3500 (Figure 31), qui ont été par la suite calibrés par rapport aux têtes des canaux réels obtenus à partir de cartes topographiques 1/100000 disponible sur l'ensemble de la zone d'étude. Ceci a pour objectif d'identifier le seuil qui sera le plus représentatif de l'environnement de la zone d'étude et de son échelle. En effet sur une échelle régionale, un réseau très dense sera compliqué dans son analyse et interprétation et par conséquent non significatif, mais aussi un réseau peu dense ne va pas représenter la réalité

du terrain et beaucoup d'information seront perdus dans le calcul. Il faut aussi se mettre à l'évidence que l'utilisation d'un seuil très faible n'est applicable que sur un MNT de haute résolution, dans le cas de son application sur un MNT à faible résolution il donnera des résultats inexacts avec beaucoup d'erreurs et de lacunes (Ariza Villaverde et al., 2015; Radaideh et al., 2016).

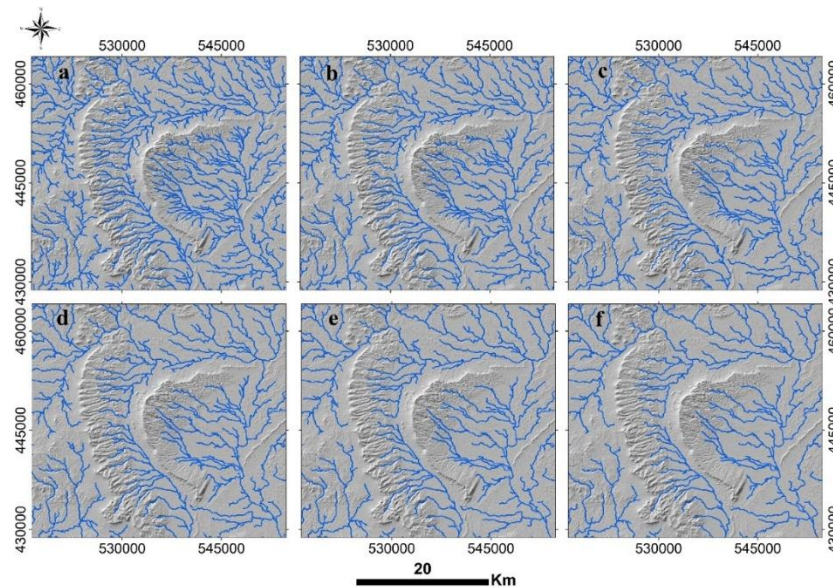


Figure 31: Portion du réseau de drainage avec différentes valeurs de seuil : (a) 1000, (b) 1500, (c) 2000, (d) 2500, (e) 3000, (f) 3500. Pixels.

## 1.2 Identification des types de réseau de drainage : Paramètre 'Type'

Après l'observation et l'analyse du réseau de drainage Sur les 402 bassins des trois zones d'études, le type de réseau de drainage dans chaque bassin a été identifié par interprétation visuelle selon plusieurs critères définis par Zernitz (1932), Parvis (1950) et Howard (1967): forme générale du réseau, orientation, angles de confluence des affluents, parallélisme entre affluents de même ordre et entre différents ordre etc... et en se basant sur les différentes classifications qui sont considérés comme les classifications de base et les plus utilisées (Zernitz, 1932 ; Parvis, 1950; Howard, 1967, Twidale, 2004, Radaideh et ., 2016, Pereira-Claren et al., 2019). Ensuite, un code est attribué à chaque type selon l'ordre des types basiques vers les types basique-modifiés et ceux qui reflètent le plus faible relief et contrôle structural au plus relief élevé et accidenté et fort contrôle structural. Finalement le paramètre 'Type' est définis comme suite : 0 = dendritique, 1 = parallèle, 2 = en treillis, 3 = angulaire, 4= Chevron et 5= Barbelés (Figure 32).

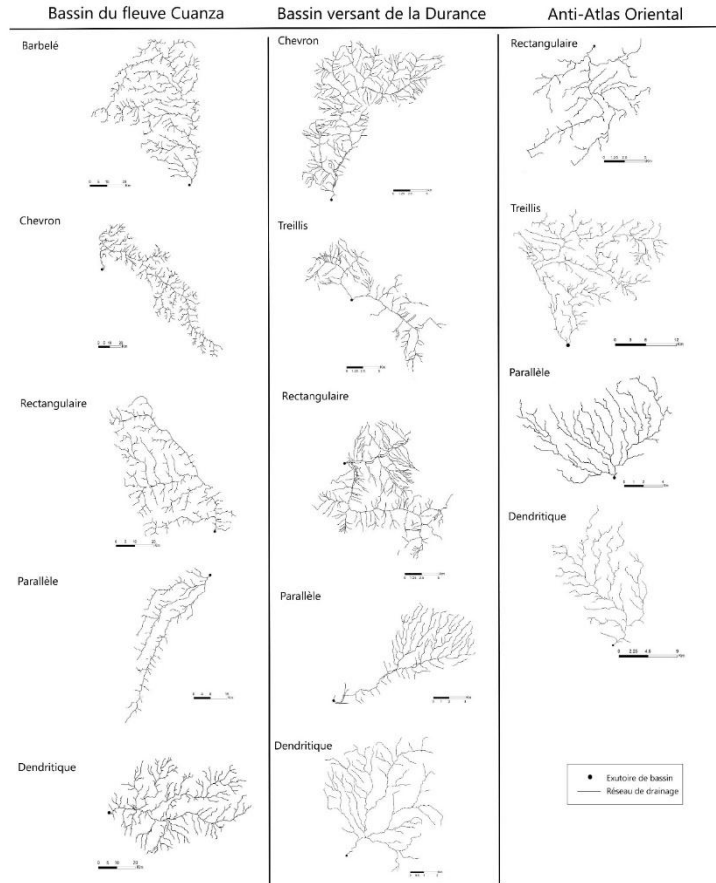


Figure 32: Représentation des exemples des types de réseaux de drainage identifiés dans chaque zone d'étude.

### 1.3 Densité de drainage : Paramètre Mean-Ddrain

En tant que propriété unique du paysage, la densité de drainage (Dd) met en relation les processus géomorphiques sous-jacents agissant dans un bassin versant avec sa topographie (Sangireddy et al., 2016). En tant que mesure statique, la densité de drainage est un bon paramètre de texture, utilisé dans la classification des surfaces terrestres. En tant qu'indicateur de la forme du paysage, elle fournit une base pour comprendre la réponse morphologique et hydrologique aux les processus qui se déroulent dans un bassin versant.

La densité de drainage, qui est une mesure de la longueur totale du cours d'eau par unité de surface (Figure 33), a été obtenue à l'aide de outils d'analyse spatial du logiciel ArcGis, qui utilise le réseau de drainage comme entre, et calcule la longueur totale des cours d'eau par unité de surface ( $\text{Km}/\text{Km}^2$ ). Le résultat est présenté sous format raster qui permet de produire une carte de classe de densité de drainage sur l'ensemble des zones d'études. Après l'extraction de la densité de drainage, la densité de drainage moyenne "**Mean-Ddrain**", qui représente la densité de drainage moyenne dans chaque bassin, a été extraite en utilisant l'outil "Zonal statistic" du logiciel ArcGis qui calcule les valeurs de la trame de densité de drainage

dans chaque bassin.

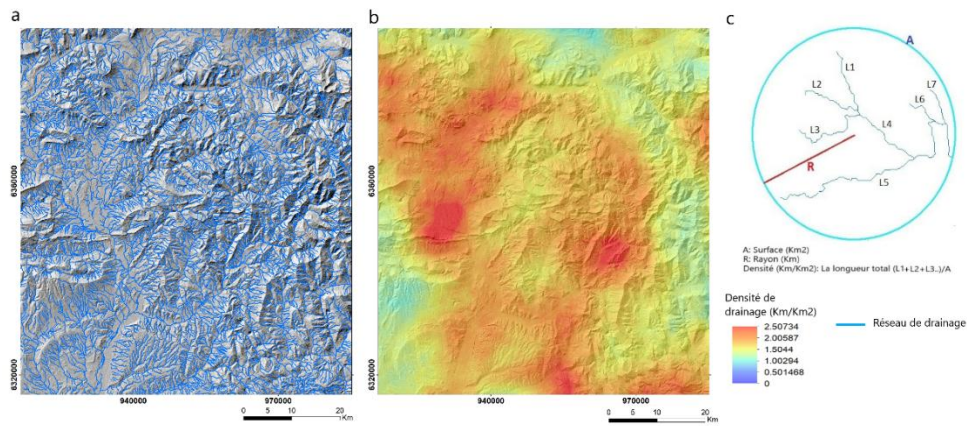


Figure 33: (a) représentation d'un réseau de drainage sur un fond d'image d'ombrage pour représente le relief(b) densité de drainage obtenus à partir du réseau de drainage sur un fond d'image d'ombrage (c)Méthode de calcul de densité de drainage

## 2 Paramètres de Relief :

Le relief et la topographie du terrain exercent un large control sur l'hydrologie du bassin et sur son réseau de drainage. Plusieurs chercheurs ont indiqué que le réseau de drainage et particulièrement sa densité sont fortement influences par le relief relatif et La pente, (Schumm, 1956; Melton, 1957; Oguchi, 1997 ; Twidale, 2004 ; Sangireddy et al., 2016). D'une part, l'importance du relief dans le conditionnement des taux d'érosion moyens du bassin a largement été étudié est observé suggérant que les rendements en sédiments sont largement régis par la topographie (élévation moyenne du bassin, la pente ou rugosité du relief) (Mueller and Pitlick, 2013). D'autre part, les pentes latérales des vallées des bassins versants varient en fonction de la lithologie, étant les plus abruptes sur les schistes et peut-être les calcaires, et les plus douces sur les lithologies volcaniques acides. Les pentes abruptes sont associées à un grand rapport de relief, un taux d'infiltration élevé, une faible résistance des sols humides, une faible intensité de ruissellement et un indice P-E élevé. Les relations entre le relief et les types de réseau de drainage ont été observé par Zernitz (1932) qui a déclaré que les types de réseau de drainage peuvent refléter la pente, puisque cette dernière induit la formation de modèles tels que les dendritiques, parallèles et pinnates. D'autre chercheurs ont suggère dans leurs études que les conditions de relief déterminent différents types de réseau de drainage, comme les types des haut-relief et les types de bas-reliefs (Chougale and Sapkale, 2017; Walley, et al., 2018).

### 2.1 La Pente Moyenne : paramètre Mean-Slope

Le paramètre de pente moyenne 'Mean-Slope' de chaque bassin a été calculée à partir du MNT de 30 mètre de résolution en utilisant l'outil 'Pente' disponible sur la boîte à outil

‘Outils d’analyse spatiale’ du logiciel Arcgis. L’opération consiste à calculer pour chaque cellule le taux de variation maximal des valeurs de cette cellule par rapport à ses voisines. D’une façon générale, la variation maximale de l’altitude sur la distance entre la cellule et ses huit voisines identifie la descente la plus raide depuis la cellule. L’outil ajuste un plan aux valeurs z d’un voisinage de 3 x 3 cellules autour de la cellule centrale de traitement. La valeur de pente de ce plan est calculée à l’aide de la technique maximale moyenne (Burrough et McDonnell,1998). La direction dans laquelle le plan est orienté est l’exposition de la cellule de traitement. Plus la valeur de la pente est faible, plus le terrain est plat, plus la valeur de la pente est élevée, plus le terrain est pentu (Figure 34). Le raster de pente en sortie peut être calculé dans deux types d’unités : degrés ou pourcentage (pourcentage d’élévation). Le pourcentage d’élévation peut être mieux compris si vous le considérez comme la hauteur calculée divisée par le parcours, multipliée par 100.

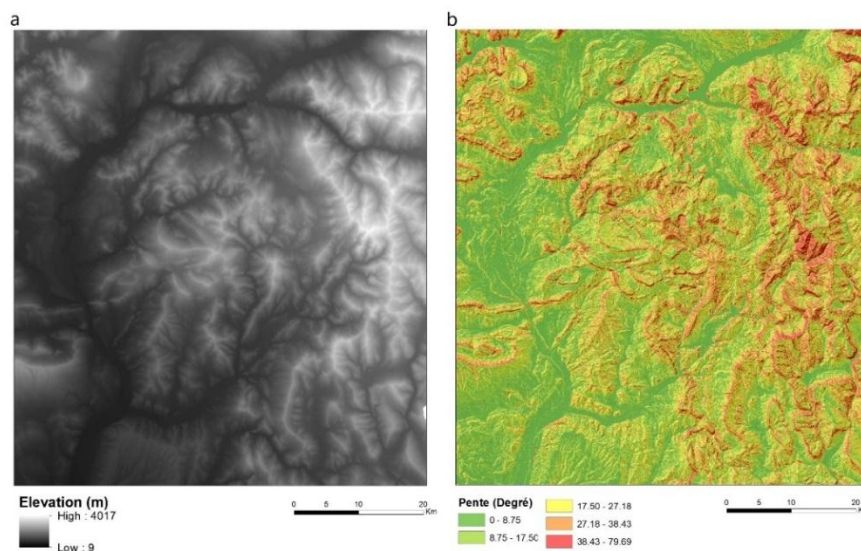


Figure 34: Représentation d'un modèle numérique de terrain (a) et la distribution de pente extraite de ce dernier (b)

## 2.2 Les rapports de relief : paramètres R1, R2 et H

Au sein d'une unité topographique ou entre des zones de lithologie dissemblables mais homogènes, le rapport de relief est un moyen précieux de comparer les caractéristiques géomorphiques. R1 est le rapport de relief décrit par Melton (1957) défini comme le rapport du bassin "r" est la différence d'altitude du relief entre le point culminant et l'exutoire du bassin, et le périmètre du bassin "p".

$$R1 = \frac{(ALT-Max-ALT-Min)}{P} = \frac{r}{p} \quad (3)$$

Où ALT-Max est l'altitude du point culminant et ALT-Min est l'altitude de l'exutoire.

R2 est le rapport de relief de Schumm (Schumm, 1956) défini comme le rapport entre le relief total d'un bassin "r" et la dimension la plus longue du bassin parallèle à la ligne de drainage principale "L". Ce rapport de relief est un rapport hauteur-longueur sans dimension et est égal à la tangente de l'angle formé par deux plans se coupant à l'embouchure du bassin ; l'un représentant l'horizontale, l'autre passant par le point le plus élevé du bassin (Schumm, 1956 ; Melton, 1957 ; Rawat et al., 2013; Sangireddy et al., 2016; Bouramtane et al., 2020) :

$$R2 = \frac{r}{L} \quad (4)$$

L est défini comme la longueur du rectangle équivalent :

$$L = \frac{K_G \sqrt{A}}{1,12} \left[ 1 + \sqrt{1 - \left( \frac{1,12}{K_G} \right)^2} \right] \quad (5)$$

Avec A la superficie du bassin et Kg, l'indice de forme de Gravius.

Le paramètre H est calculé comme le produit de la densité de drainage " Dd " et du relief du bassin " r ", tous deux dans les mêmes unités. Il fait référence au niveau de lissage et de rugosité de la surface du bassin et à sa vulnérabilité à l'érosion du sol. Des valeurs élevées de rugosité indiquent des zones à la topographie inégale et sensibles à l'érosion du sol (Strahler, 1954 ; Melton, 1957; Asfaw et Workineh, 2019).

$$H = r * D_d \quad (6)$$

### 3 Les paramètres morpho-métriques : Paramètre Kg, Kh et Cl

Les indices morphométriques ont été les tous premières mesures créées en géomorphologie pour comparer les caractéristiques morphologiques des bassins versants et pour quantifier leur comportement hydrologique potentiel. Les apports des indices sont considérables puisqu'ils ont constitué les premières formes de réflexion menées sur le transfert d'échelle en géomorphologie (Hauchard, 2001). Ils ont aussi posé les bases théoriques de tout un courant de pensée en hydrologie, notamment à la suite des travaux d'Horton (1945) qui montrent la tendance naturelle à la concentration de l'écoulement (Douvinet et al., 2007). Ces facteurs dépendent uniquement de la topographie des formes de terrain dont le bassin versant est composé et de la forme et de l'étendue du système de cours d'eau ou du réseau de drainage qui s'y trouve. Selon Horton (1945) l'objectif de ces indices est d'exprimer quantitativement les éléments de la topographie d'un bassin versant qui affectent le fonctionnement du cycle hydrologique, en particulier le ruissellement, et de fournir ainsi un moyen de décrire plus précisément les bassins versants. Les hydrologues ont exploité la morphométrie pour mieux comprendre la dynamique des processus hydrologiques, notamment à travers la classification des réseaux hydrographiques et des lois de développement des cours d'eau établis par Horton

(1945). La morphométrie est considérablement enrichie par les travaux de nombreux chercheurs américains (Strahler, 1952; Schumm, 1956; Melton, 1957; Morisawa, 1958; Scheidegger, 1966; Shreve, 1966 ; Smart, 1968...).

Cependant, jusqu'à maintenant aucune étude n'a été réalisée pour constater l'apport des indices morphométrique dans la caractérisation des types de réseau de drainage, et si la forme du bassin joue un rôle majeur ou secondaire dans le processus de genèse des types de réseaux de drainage. Egalement de déterminer si leur rôle varie d'importance d'un climat a un autre. Ainsi, Les caractéristiques morphométriques de chaque bassin dans les trois zones d'études ont été obtenus à partir de deux indices de forme très connus et largement utilisés vu leur simplicité dans les calculs et l'interprétation : L'indice de compacité Gravius ( $K_g$ ) qui reflète la forme étirée des bassins versants.  $K_g$  est élevée pour un bassin versant de forme quasiment circulaire et elle est faible pour le bassin est de forme allongée. L'indice de forme  $K_H$  d'un bassin versant est la relation entre la surface du bassin ( $km^2$ ) et la longueur du cours d'eau principal en Km (Horton, 1945). Il est proche de 1 pour un bassin versant de forme ramassée et plus la valeur est inférieure a 1, plus le bassin est de forme allongée.

$$K_g = \frac{P}{2\sqrt{\pi.A}} \quad (7)$$

$$K_H = \frac{A}{L^2} \quad (8)$$

L'indice de concavité 'CI' de Langbein (Langbein, 1964) indique la pente du canal, plus la valeur est élevée, plus le gradient du canal diminue rapidement. Il a été calculé comme le rapport de la différence entre ALT-Max et h, de l'altitude à 50 % de la distance entre la source et la sortie, et du relief d'un bassin " r ".

$$CI = \frac{ALTM_{ax}-h}{r} \quad (9)$$

#### 4 Paramètre d'occupation de sol : Landcover

Il est généralement admis que le changement et la variabilité climatique ont des grandes répercussions sur le processus et la réponse hydrologique des bassins versants. Bien que le climat ait certainement changé au cours de l'évolution des bassins, les conditions climatiques actuelles pourraient donner une indication sur les attributs des réseaux de drainage (Sangireddy et al., 2016). Le climat, agissant sur l'incidence de la couverture végétale et l'occupation du sol, qui est également un des facteurs majeurs déterminant les rapports infiltration-écoulement et la survie des petits canaux linéaires qui engendrent des cours d'eau plus importants (Twidale, 2004). L'impact des changements de la couverture végétale et l'occupation du sol sur les processus hydrologiques et particulièrement le réseau de drainage

sont depuis longtemps un sujet de préoccupation (Melton, 1957). D'une part, les modèles de végétation naturelle résultent de l'interaction entre le climat, les sols et la topographie, et d'autre part, la végétation exerce à son tour un contrôle important sur les processus hydrologiques et géomorphologiques du bassin et contribue à la formation de la morphologie du paysage à long terme (Istanbulluoglu et al., 2005).

La couverture végétale constitue une variable climatique dérivable de l'imagerie satellitaire multispectrale (Rogan and Chen, 2004; Zhu et al., 2019; Amarnath, Babar et Murthy, 2017). Pour déterminer la répartition des types de végétation et l'occupation du sol dans chaque bassin pour les trois zones d'études, nous avons exploités les données de MODIS Terra+Aqua Combined Land Cover qui intègre cinq systèmes différents de classification de l'occupation des sols, dérivés d'une méthode de classification par arbre de décision supervisé. On a utilisé particulièrement le produit MODIS Land Cover Type 1 : IGBP global végétation classification scheme, qui est une couche de données de classification de la couverture terrestre mondiale produite annuellement de 2001 à 2013 à une résolution de 500m dans des grille MODIS standard, ces dernières utilisent la projection sinusoidale et couvrent environ 1200 x 1200 km (~10° x 10° à l'équateur) distribuées par l'USGS (Grant et al., 2016). Le schéma de couverture terrestre MODIS Land Cover Type 1 identifie 17 classes définies par le programme international géosphère-biosphère (IGBP), dont 11 classes de végétation naturelle, trois classes de végétation altérée par l'homme et trois classes de couverture non végétale (Figure 35). Afin d'homogénéiser ce paramètre entre les trois zone d'études on a défini un codage qui se base sur les classes d'occupation de sol propres à chaque zone et décrit dans un ordre croissant l'état de la couverture végétale (Tableau 4).

Tableau 4 : Codage pour la classification des occupations de sol

Landcover	Code
Sol nu à végétation clairsemée	0
zones arbustives	1
Savane	2
paturage	3
Savanes boisées	4
Foret mixte	5
Foret	6



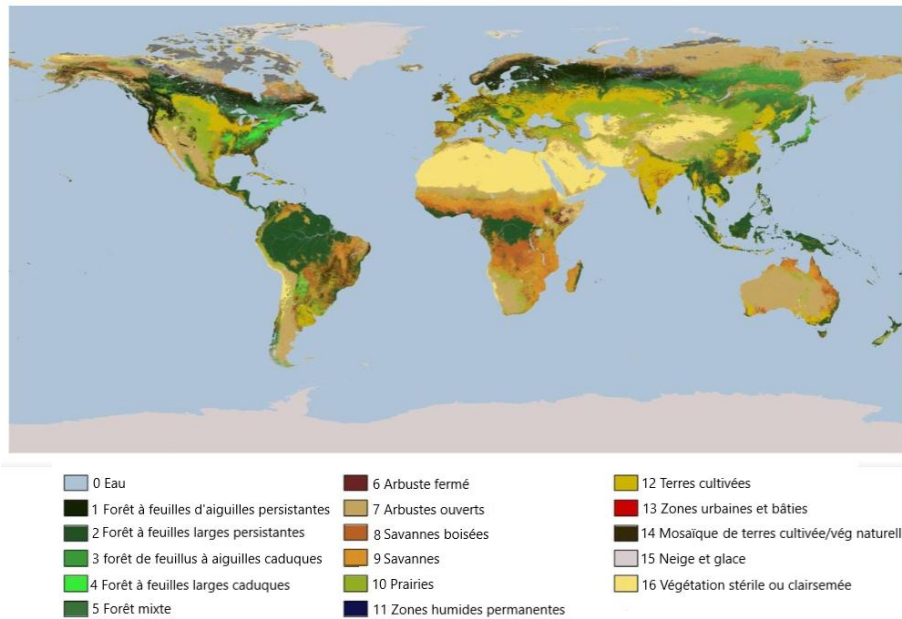


Figure 35: Mosaïques mondiales de la couverture terrestre standard MODIS pour 2012 (Tretyachenko et al., 2018)

## 5 Paramètre de Temps de concentration : Tc

Le paramètre Temps de concentration (Tc) ou le temps de réponse est utilisé comme un paramètre important dans le calcul des débits de pointe pendant les inondations (Bell et Kar 1969 ; McCuen et al. 1984; Jung et al., 2017). Il est généralement défini comme le temps de transport de l'eau depuis le point le plus éloigné du bassin versant jusqu'à l'exutoire ou le temps écoulé entre le début de l'excès de pluie et le moment où toute la zone contribue à l'écoulement à l'exutoire (Bell et Kar 1969; Jung et al., 2017).

Afin d'obtenir ce paramètre nous avons suivi la méthodologie de Jung et al (2017) qui se base sur la méthode de NRCS où le temps de concentration d'un réseau est estimé en utilisant le décalage du bassin versant, qui est défini comme une fonction de la longueur hydraulique du bassin versant (NRCS, 1972).

$$L = \frac{l^{0.8}(S+1)^{0.7}}{1900Y^{0.5}} \quad (10)$$

Avec L est le temps de propagation du bassin (h), l est la longueur du canal principal (ft), Y est la pente moyenne du bassin (pourcentage) et S est la rétention potentielle maximale (in). La rétention potentielle maximale liée aux conditions du sol et de la couverture terrestre représente la rétention potentielle maximale de l'humidité du sol et peut s'écrire comme suit :

$$S = \left(\frac{1000}{CN}\right) - 10 \quad (11)$$

Avec CN (Curve Number) est le numéro de courbe qui représentant les types de sols hydrologiques. Ce dernier est dérivée de la classification MODIS de la couverture terrestre et des groupes hydrologiques de sols (HSG) à une résolution de 250 m, dans des conditions hydrologiques équitables (Hong and Adler, 2008; Ross et al., 2018). Les groupes de sols hydrologiques A, B, C et D correspondent à un potentiel de ruissellement faible, modérément faible, modérément élevé et élevé (Figure 36). Les sols humides se voient attribuer un double HSG (par exemple, HSG A/D) et ont un potentiel de ruissellement élevé en raison de la présence d'une nappe phréatique à moins de 60 cm de la surface

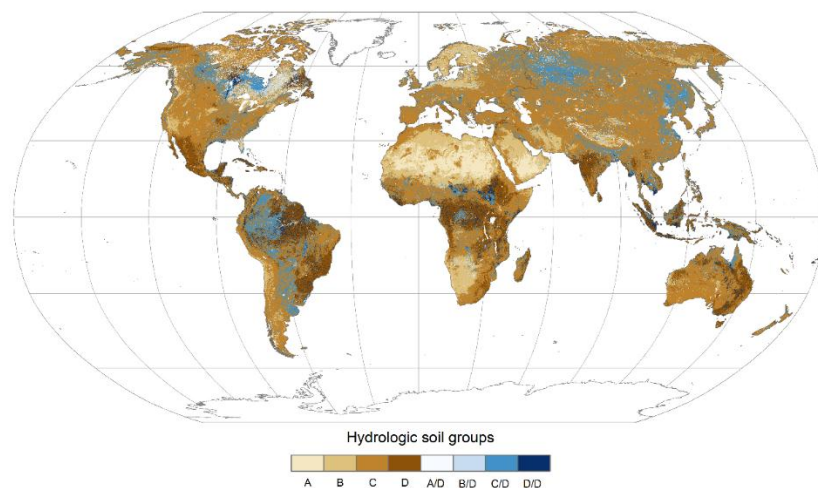


Figure 36: Distribution globale des groupes de sols hydrologiques à une résolution spatiale (Ross et al., 2018).

Une fois que les groupes hydrologiques de sols sont déterminés, le numéro de courbe CN est déterminé sur la base des données relatives au type de sol hydrologique et l'occupation de sol pour chaque bassin. Les valeurs de la CN utilisées pour estimer S pour les bassins analysés dans la présente étude sont obtenues à partir du Service de conservation des sols du ministère américain de l'agriculture (U.S. Department of Agriculture's SCS) (Cronshey, 1986; Kroner et Cozzie, 1999; Asante et al., 2008) (Tableau). Si la valeur CN est faible, les sols ont des taux d'infiltration élevés, et si la valeur CN est élevée, les sols ont des taux d'infiltration faibles.

Tableau : Valeur du numéro de la courbe de ruissellement du SCS utilisés pour différentes classes de sol et de couverture des terres (Jung et al., 2017). Finalement, le temps de concentration est estimé comme suite :

$$T_c = \frac{L}{0.6} \quad (12)$$

## **6 Paramètres géologiques et outils d'identification des structures géologiques :**

Cette partie du chapitre décrit les méthodes et les outils mathématiques et de traitement d'image utilisées afin d'extraire les paramètres géologiques nécessaires pour déterminer les caractéristiques géologiques et géomorphologique des sous bassins, particulièrement pour la région de l'Anti-Atlas Oriental et le bassin du fleuve Cuanza. En effet, Ces deux dernières zones d'études ne présentent pas une base de données et/ou une cartographie géologique détaillées qui recouvrent l'ensemble de leur territoire. Cela est dû d'une part, à leur grande superficie qui par endroit ne dispose pas de couverture cartographique et d'autre part, par manque de données ou difficulté des les acquérir. Par contre, la zone du bassin de la Durance dispose d'une base de données très développée et une cartographie géologique très détaillée et précise à une échelle de 1/50000 qui est aussi fourni par le SMAVD à travers les données publiques du BRGM.

L'ensemble de caractéristiques géologiques des bassins ont été définies sous trois paramètres : Densité de Fracturation/linéaments géologiques (**Mean-Line**), type de roche (**Rock-type**), Homogénéité lithologique (**Homogeneity**), le type de contrôle structurel (**Structural-control**) et le secteur géologique (**Area**). Les paragraphes qui suivent, décrivent les outils d'extraction de ces paramètres ainsi que leurs définitions.

### **6.1 Détection automatique des linéaments géologiques**

Les linéaments géologiques sont la manifestation des structures géologiques profondes à la surface de la terre, reflétant d'importantes unités tectoniques dans la croûte terrestre et des zones favorables à la formation de minéraux et influençant la distribution des eaux souterraines, les écoulements de surface, les géo-risques, la géothermie et les tremblements de terre souterraine (O'Leary et al., 1976 ; Corgne et al., 2010; Radaideh et al., 2016; Bouramtane et al., 2017; Han et al., 2018 ; Bouramtane et al., 2020). Pour les investigations à grande échelle, les cartes de linéaments géologiques fournissent des informations préliminaires pertinentes pour les gestionnaires de l'eau et les programmes de forage, puisqu'elles peuvent aider à identifier les failles hydrogéologiques qui indiquent la présence d'eaux souterraines (Corgne et al., 2010). Les images satellites sont largement utilisées pour l'identification, l'extraction et la cartographie rapides des linéaments structurels. En effet, l'identification des linéaments serait extrêmement difficile si elle ne dépendait que du travail de terrain (Jordan et al., 2005 ; Argyriou, 2012 ; Han et al., 2018). Sur les images de télédétection, les linéaments géologiques apparaissent sous la forme de lignes ou de structures linéaires qui sont nettement plus claires ou plus sombres que les pixels de fond (Bouramtane et al., 2017; Han et al., 2018).

Ainsi, les techniques d'identification des linéaments appartiennent au domaine du traitement d'image lié à la détection de limites (Edge Detection) et à la connexion de ces limites (Edge Linking). Il s'agit d'un processus qui peut être considéré comme un système d'opérations organisées, complémentaires et étroitement liées, qui consiste à détecter les pixels d'une image constituant une limite (Edges Pixels), puis à les relier (edge linking) afin de définir un ensemble de limites ayant une forme spécifique. L'une des principales utilisations de ces techniques est l'identification et l'analyse de linéaments géologiques, qui apparaissent comme des discontinuités dans les images (Karnieli et al 1996 ; Poncelet et Cornet 2010), ils correspondent à toutes les structures géologiques de forme linéaires (failles, dyke, lignes de partage des eaux, limites litho-stratigraphiques).

L'une des tâches fondamentales du traitement des images est la détection des limites (Schalkoff, 1989), en particulier dans le domaine de la télédétection appliquée à la géologie, où ces limites représentent des discontinuités qui sont dues à la présence de points qui marquent un changement soudain et formel de l'intensité de la lumière ou du niveau de gris de l'image satellite. A la surface de la terre, elles sont liées à un changement soudain de la lithologie ou plus souvent à un élément structural d'origine tectonique, qui peut se refléter dans le paysage par un trait linéaire. Ainsi, le traitement d'images de haut niveau, comme la reconnaissance d'objets, la segmentation, le codage d'images et la vision robotisée, dépend de la précision de la détection des discontinuités, puisque ces derniers contiennent des informations essentielles sur l'image (Zhu et al., 1999 ; Shrivakshan et Chandrasekar 2012).

Par exemple, l'application d'un détecteur de limites sur une photo d'une personne a réduit considérablement la quantité de données à traiter (Figure 37-a), facilitant ainsi la tâche pour l'identification des entités et objets majeurs de l'image et ses propriétés structurales importantes comme le contour du visage, les lunettes, l'aspect des habits, tout en filtrant les informations qui peuvent être considérées comme moins pertinentes et l'illimitation du reste de l'image qui ne contient pas d'information utile comme le mur blanc derrière la personne (Figure 37-b). Si l'étape de détection de limites est réussie, la tâche subséquente de l'interprétation du contenu de l'information dans l'image d'origine peut donc être considérablement simplifiée. Cependant il n'est pas toujours possible d'obtenir de tels contours idéals à partir d'image de complexité modéré, comme les images satellitaires montrant une surface terrestre avec des reliefs accidentés, dans ce cas le résultat peut ne pas être significatives pour une simple interprétation visuelle.

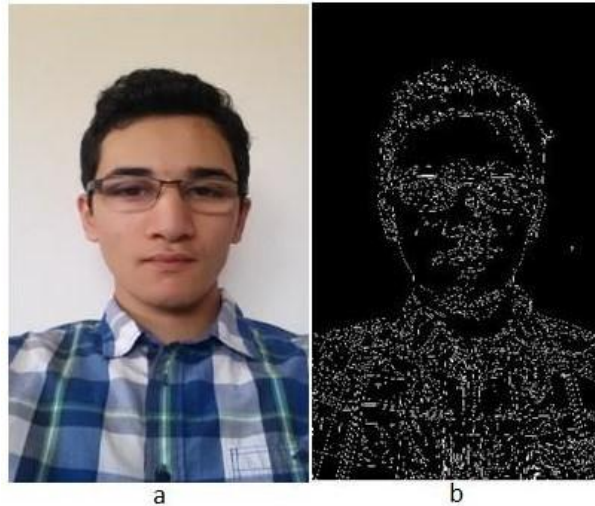


Figure 37: (a) image portrait (b) traitement de l'image portrait par un détecteur de limites

Le filtre Canny est l'un des détecteurs de limite les plus utilisés (Karnieli et al 1996, Mahot et Selmaoui, 2007 et Poncelet et Cornet, 2010 ; Bouramtane et al., 2017; Sahib, 2018 ; Bouramtane et al., 2020; Jordhana et al., 2020), et celui utilisé dans notre étude, c'est un filtre complexe qui offre le meilleur compromis possible entre la réduction du bruit et la localisation du bord. À titre indicatif, il convient de noter qu'une réduction excessive du bruit masque certaines limites intéressantes, mais qu'une sous-utilisation résulterait de la localisation de celles non significatives (Mahot et Selmaoui, 2007). Ce filtre a été conçu pour être optimal en fonction de trois critères, (i) Bonne détection et faible taux d'erreur dans la signalisation des contours ou limites. (ii) Bonne localisation en minimisant les distances entre les limites détectées et les contours réels. (iii) Clarté de la réponse, c'est-à-dire une seule réponse par limite (Mahot et Selmaoui 2007).

Ces critères reviennent à maximiser deux quantités et permettent d'obtenir un filtre  $f_c = ce^{-\alpha|x|} \sin \omega x$  qui peut être approximé par la première dérivée d'un filtre gaussien. Le filtre de Canny peut être utilisé en jouant sur le paramètre de seuil et le paramètre de filtre  $\sigma$ . Le seuil est une limite inférieure qui détermine la valeur à laquelle un pic est pris en compte comme une limite ou un contour. Le filtre gaussien est défini comme suit :

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (13)$$

Après l'étape de la détection des limites elle vient l'étape de la connexion de ces limites. Dans cet travail, nous avons utilisé la détection automatique des linéaments par la transformée de Hough (Muniz et al., 1999 ; Matas et al., 2000; Bouramtane et al., 2017). Cette transformé a été décrite pour la première fois par Paul Hough en 1962 et est utilisée comme une technique de reconnaissance de formes appliquée aux images numériques (Rampton et al., 2018), cette

méthode a l'avantage de ne pas être affectée par le bruit dans les images et les discontinuités linéaires. Elle appartient à la catégorie des techniques de connexion des limites, consistant en la recherche de pixels faisant partie d'une limite ou un contour, qui s'effectue sur la base d'une contrainte de similarité, c'est-à-dire des pixels appartenant à une structure dont la forme est décrite par la même équation (ligne, cercle ou ellipse) (Poncelet et Cornet, 2010, Molina-Cabello et al. 2018).

Le fonctionnement de la transformé de Hough est basé sur l'utilisation d'un espace paramétrique, appelé espace de Hough, pour simplifier le problème complexe de la détection de formes globales dans l'espace image. En fait, dans cet espace paramétrique, la détection est locale et donc plus simple et toute courbe qui peut être décrite par des paramètres est susceptible d'être détectée par la transformé de Hough. Comme les linéaments que nous souhaitons mettre en évidence ont un aspect rectiligne, le fonctionnement de la transformée de Hough a été limitée à la reconnaissance des lignes droites. L'espace de Hough sera donc constitué de deux dimensions, c'est-à-dire le nombre de paramètres nécessaires à l'expression analytique d'une ligne droite. Les deux paramètres utilisés sont ceux qui apparaissent dans l'équation normale d'une droite :

$$\rho = x \cos \theta + y \sin \theta \quad (14)$$

Où  $\rho$  est la longueur et  $\theta$  l'orientation du vecteur normal de la ligne droite à partir de l'origine d'un cadre de référence cartésien choisi pour être situé dans l'image de la figure (16, a), nous avons positionné son origine au centre de l'image, Ces deux paramètres vont définir le système de référence de l'espace paramétrique de Hough pour la reconnaissance des lignes droites. La formulation normale de l'équation de la ligne droite est préférable à sa formulation cartésienne ( $y = a x + b$ ), car contrairement à l'espace de l'image  $(x,y)$ , l'espace paramétrique de Hough  $(\theta,\rho)$  est limité et homogène (Poncelet. N et Cornet. Y 2010).

Ainsi, une ligne droite définie par un couple  $(\theta,\rho)$  passant par un point de coordonnées  $(x,y)$  dans l'espace image, peut être représentée dans l'espace de Hough par un seul point, avec  $(\theta,\rho)$  sont ses coordonnées dans la figure de l'espace paramétrique de Hough (Figure 38-a). Cependant, étant donné que nous sommes dans un espace, il y a un nombre infini de lignes droites passant par le même point  $(x,y)$  et dont seule leur orientation change, ainsi la représentation de ce faisceau de lignes droites dans l'espace de Hough donnera naissance à une ligne sinusoïdale, (Figure 38-b), en d'autres termes un point dans l'espace image traversé par un nombre infini de lignes droites est représenté par une ligne sinusoïdale dans l'espace paramétrique de Hough. Egalement, la transformé de Hough est basée sur un système de vote, c'est-à-dire qu'un point traversé par une seule ligne droite votera une fois pour ses couples  $(\theta,\rho)$  ; s'il est traversé par un nombre infini de lignes, ce point votera une fois pour les

couples  $(\theta, \rho)$  de ce nombre infini de lignes, cependant si nous avons une ligne qui croise deux points, ce dernier obtiendra deux votes. Étant donné que nous sommes dans une image, ces points sont les pixels de limites détectés par l'opération de détection des limites du filtre canny, donc la ligne qui passe par le plus grand nombre de pixels limites (points) est la ligne qui aura le plus de votes et c'est donc notre ligne d'intérêt. La représentation d'une ligne qui traverse un ensemble de points dans l'espace paramétrique de Hough est le point d'intersection de plusieurs lignes sinusoïdales (Figure 38 c).

La méthode de la transformé de Hough utilise ces propriétés pour détecter des ensembles de pixels alignés dans l'image des limites ou contours obtenue par le filtre Canny, via leur représentation dans l'espace bidimensionnel de Hough. Dans cet espace, le problème de la détection des lignes droites devient un simple problème d'identification des points d'intersection de plusieurs sinusoïdes qui correspondent à des pics de fréquence, appelés Maximas locaux. On peut également concevoir cette opération comme un système de vote, chaque élément de l'espace image votant pour un ensemble d'éléments de l'espace paramétrique de Hough (Poncelet et Cornet 2010). Les éléments de vote peuvent par exemple être tous les points ayant la valeur 1 dans une image binaire résultant du seuillage d'un détecteur de limite, lors de ce vote, chaque point peut également avoir un poids différent et proportionnel à la valeur du détecteur de limite. Egalement, l'espace des paramètres est une matrice d'accumulation où la valeur d'un point peut être incrémentée ou non à chaque itération, les points par lesquels passent les sinusoïdes, sont ceux qui seront incrémentés. La définition d'un seuil sur les fréquences obtenues permet de ne garder que les points auxquels correspondent les fréquences les plus élevées. La position de ces points, ou maxima locaux, donne les paramètres  $(\theta, \rho)$  des lignes droites qui croisent le plus grand nombre de pixels limites.

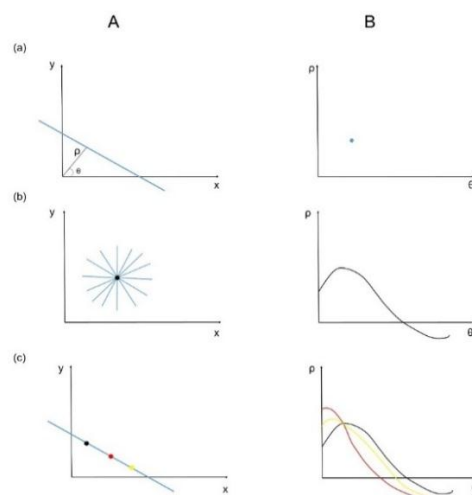


Figure 38: Correspondances géométriques entre (A) l'espace image (espace géographique), et (B) l'espace paramétrique de Hough.

Nous avons monté un algorithme informatique sous le logiciel Matlab qui contient les fonctions nécessaires permettant, dans un premier temps, la lecture de l'image, son traitement par le filtre Canny, puis l'utilisation de la transformé de Hough pour détecter les linéaments et enfin les superposer sur l'image initiale.

L'algorithme réalisé (Annexe I) a été appliqué sur différents données de télédétection. Pour la région de l'Anti-Atlas Oriental le filtre a été appliqué sur l'image satellitaire Landsat 8, vu que l'aridité de cette zone offre une meilleure identification des structures et affleurements géologiques, par contre dans le bassin du fleuve Cuanza, la densité de la couverture végétale typique du climat tropical ne permet pas l'observation directe de la surface (Abdelkareem et al., 2020), il a été ainsi préférable d'appliquer l'algorithme les images d'ombrages des MNT (Ibanez et al., 2014). Le bloc diagramme de l'application de l'algorithme est représenté ci-dessous (Figure 39).

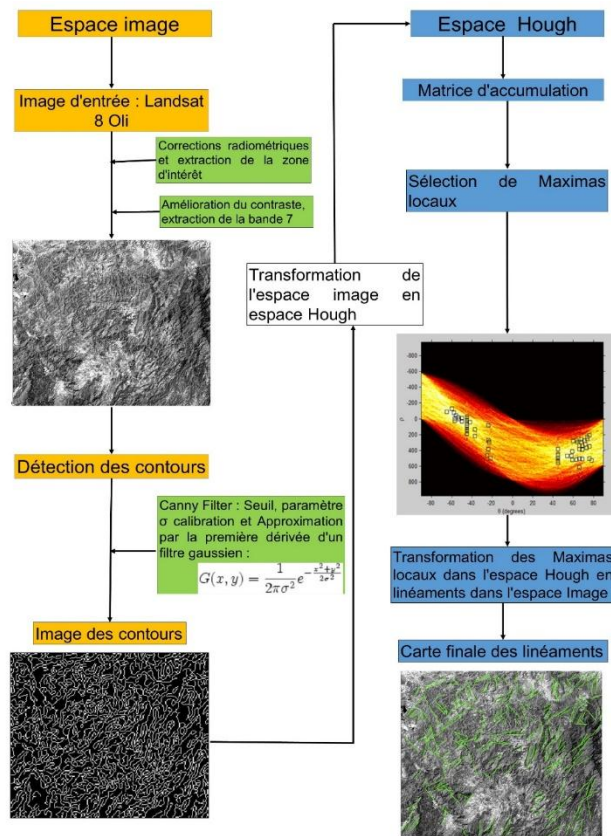


Figure 39: Bloc diagramme de la méthode de détection automatique des linéaments géologiques par la transformé de Hough.



## 6.2 Densité de fracturation/Linéament géologique

La densité des structures géologiques de forme linéaire (fracturation/linéament), après leur identification sur les zones d'études, est le meilleur moyen d'observer et d'analyser la distribution de la structuration géologique dans un bassin et l'intensité du contrôle structural (Radaideh et al., 2016). En effet, une forte densité de linéament ou de fracturation est généralement liée à un relief accidenté, et a des conditions d'activité tectonique et de déformation intenses (Figure 40-a) (Bouramtane et al., 2017; Saepuloh et al., 2018; Tagnon et al., 2018).

La carte de densité est créée par l'outil d'analyse spatiale du logiciel ArcGis 10.4 en mesurant la longueur totale des linéaments ou fracturations par unité de surface sur l'ensemble des zones d'études ( $\text{Km}/\text{km}^2$ ). Le résultat est obtenu sous format raster qui permet de produire une carte montrant les concentrations des linéaments sur une unité de surface (Figure 40-b). Egalement à l'aide de l'outil Zonal statistiques toujours sur le logiciel ArcGis, on extrait à partir du résultat raster la densité moyennes de ces structures géologiques dans chaque bassin, qui constitue l'entrée du paramètre 'Mean-line' dans la base de données pour le traitement statistique.

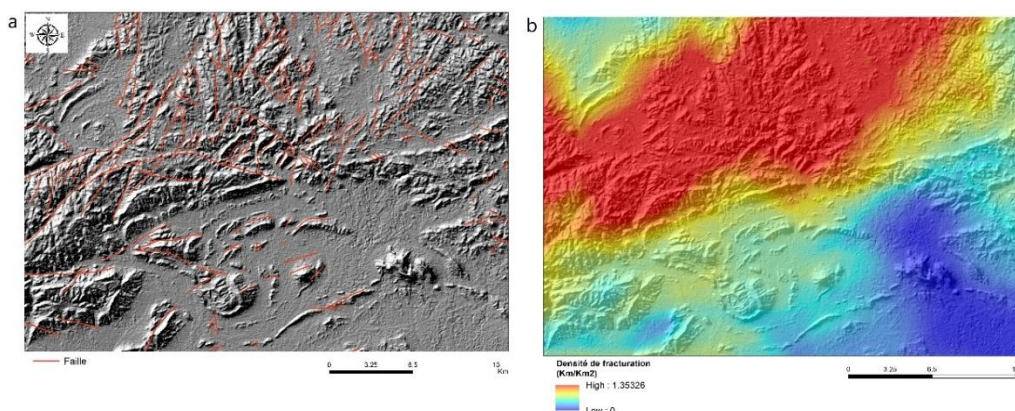


Figure 40: (a) Représentation de la distribution des fractures dans une région accidentée (b) densité de fracturation calculer à partir de la distribution des fractures de la même régions

## 6.3 Type de roche :

Plusieurs études ont constaté que la lithologie joue un rôle important dans le contrôle de la densité de drainage, l'étendue de la dissection du paysage, la résistance du substrat fluvial et les profils des flux de premier ordre (Mueller and Pitlick, 2013; Sangireddy et al., 2016; Buscher et al., 2017; Walley, et al., 2018). Chacune de ces études a utilisé une approche similaire où les types de roches ont été regroupés par résistance ou érodabilité en plusieurs catégories, puis cartographiés à travers la région d'intérêt pour déterminer la proportion de la surface du bassin reposant sur différentes lithologies. Nous avons adopté dans notre étude la

même approche sur les trois zones d'études pour obtenir le paramètre de type de roche '**Rock-Type**' qui est basé sur une lithologie simplifiée de bassin. Pour la région de l'Anti-Atlas Oriental et le bassin du fleuve Cuanza, les types de roches ont été regroupés en quatre grands groupes, auxquels des codes ont été attribués, 3= roche granitique-metamorphique, 2= roche volcanique, 1= roche sédimentaire et 0= formation superficielle-quaternaire, reflétant un changement de type de roche du plus dur et plus résistant au plus tendre et moins résistant. Par contre pour le bassin de la Durance comme décrit dans la partie précédente, recouverte en majorité par des formations sédimentaires, qui ont été groupées en classes des formations les plus tendres (Argile= 0) aux formations les plus dures (Socle cristallin= 4) (Tableau 5).

Tableau 5: Codage de classification pour les formations lithologiques du bassin versant de la Durance

LITHOLOGIE	Code
Argile	0
Marne	1
Conglomérat	2
Schiste	2
Flysch	2
Calcaire	3
Grès	3
Socle cristallin	4

#### 6.4 Homogénéité lithologique :

La composition des roches dans un bassin est un facteur déterminant dans le développement des types de réseau de drainage et définit le taux de contrôle structural exercé sur le réseau de drainage. (Zernitz, 1932; Howard, 1967). Souvent un bassin de lithologie homogène traduit un faible contrôle structural comparé à un bassin de lithologie hétérogène (Mueller and Pitlick, 2013; Pereira-Claren et al., 2019). Ce dernier aspect nous a permis d'obtenir le paramètre des caractéristiques géologiques qui reflète l'homogénéité ou l'hétérogénéité lithologique dans un bassin '**Homogeneity**', en adoptant la méthode de Mueller and Pitlick (2013), si un bassin a une surface recouverte à 75% par une formation lithologique de la même composition, il est qualifié d'homogène et on lui attribue le code 0, sinon, il est qualifié d'hétérogène et on lui attribue le code 1 (Figure 41).

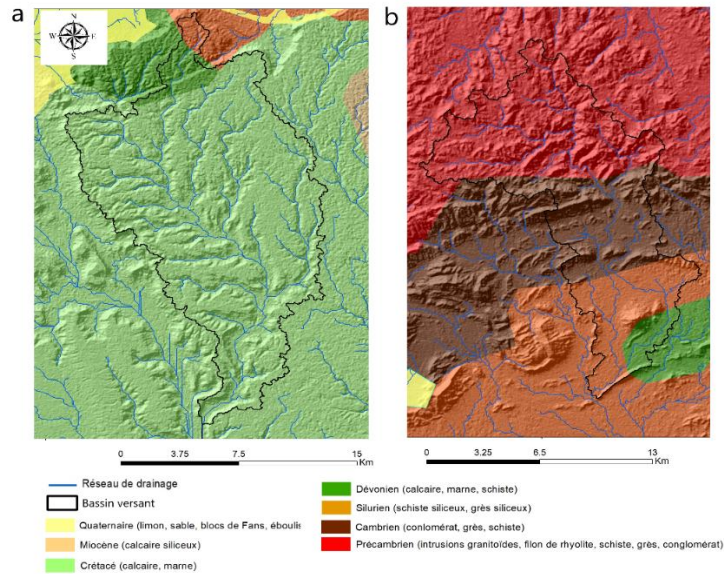


Figure 41: (a) Représentation d'un bassin versant avec une lithologie homogène (>75%) et (b) représentation d'un bassin versant de lithologie hétérogène (<75%).

## 7 Paramètres spécifiques :

L'ensemble des paramètres qu'on a décrit ci-dessus, sont les paramètres communs entre les trois zones d'études. Cependant il existe des paramètres spécifiques pour les zones d'études, mais uniquement pour la région de l'Anti-Atlas Oriental et le bassin versant de la Durance, étant les seules qui disposent de plus de données provenant de sources locales comme les agences de bassins et des travaux géologiques et hydrologiques antérieures disponibles et publier en libre accès, par rapport au bassin du fleuve Cuanza.

La région de l'Anti-Atlas Oriental contient deux paramètres spécifiques :

- Paramètre contrôle structural : **Structural-control**

Le climat aride et la qualité d'affleurement exceptionnel de l'Anti-Atlas Oriental ont optimisés l'observation, l'analyse et l'interprétation des imageries satellitaires Landsat 8 OLI et Sentinel 2, pour l'identification des structures géomorphologiques (Van der Meer et al., 2014; Adiri et al., 2017; Fal et al., 2019; El Janati, 2019). Les travaux antérieurs réalisés dans la régions ont aussi été de grande utilité (Robert-Charrue, 2006; Frizon de Lamotte et al., 2008; Soulaïmani et al., 2014 Baidder et al., 2016; Gouiza et al., 2017). Ceci a permet d'obtenir le paramètre "Contrôle structurel", qui reflète le type de structuration géologique qui contrôle le réseau de drainage et la géomorphologie du bassin. Quatre types de contrôle structurel ont été identifiés dans la zone d'étude (Figure 42) : Tabulaire, plissement, Fracture, et fracture et plissement. Pour chaque type on a attribuer un code dans un ordre qui de la

structure qui présente le moins de contrôle structural à la structure qui présente le plus de contrôle : Tabulaire = 0, plissement= 1, Fracture = 2, et plissement et fracture = 3.

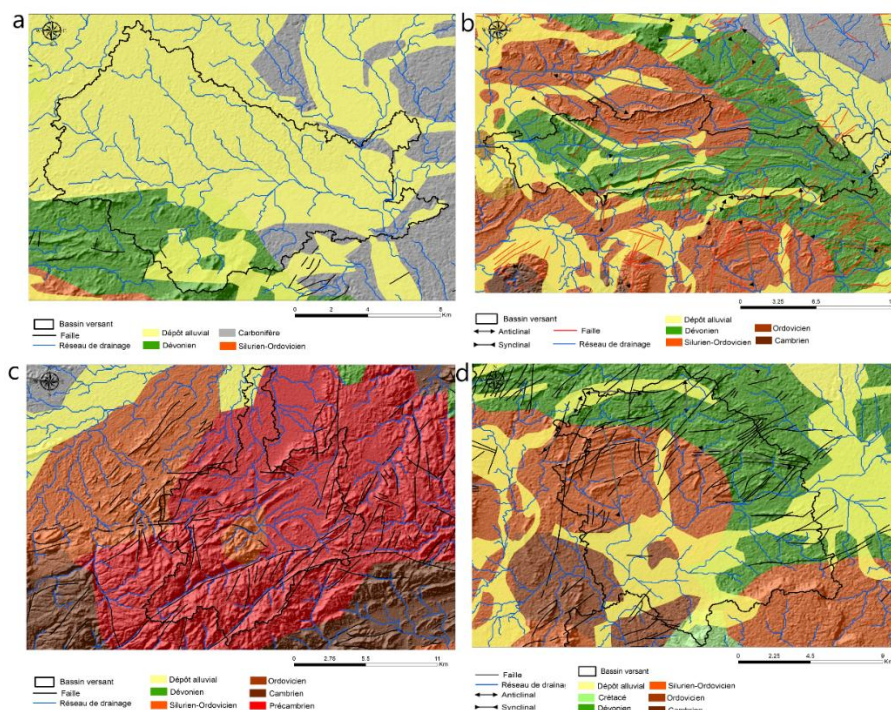


Figure 42:Représentation du paramètres contrôle structural (a) un bassin versant tabulaire montrant un très faible contrôle structural dans le secteur bassin sud-Tafilalt (b) un bassin versant montrant un contrôle structural par plissement dans le secteur axe Ougnat-Ouzina (c) bassin versant montrant un contrôle structural par fracturation dans le secteur axe Saghro-Ougnat (d) un bassin versant montrant un contrôle structural par couplage de plissement et fracturation dans le secteur axe Ougnat-Ouzina.

- Paramètre secteur géologiques : **Area**

La région de l’Anti-Atlas oriental comme elle a été décrit dans le début de ce chapitre, contient six secteurs avec des caractéristiques géologiques et géomorphologiques distinctes (Baidder et al., 2016). Nous avons ainsi créé un paramètre qui représenté le secteur géologique dans lequel chaque bassin est localisé. Egalement Avec la même approche que les paramètres précédent on a attribué un code pour chaque secteur : Axe Ougnat-Ouzina = 1, domaine Kem-kem = 2, secteur des Banis = 3, Bassin Maider = 4, bassin sud-Tafilalt = 5, and axe Saghro-Ougnat = 6 (Figure 23).

Le bassin de la Durance contient aussi deux paramètres spécifique :

- Indice de développement et de persistance des réseaux : IDPR

L’Indice de Développement et de Persistance des Réseaux (IDPR) : l’idée qui sous-tend l’IDPR découle de l’observation suivante : l’organisation du réseau hydrographique est dépendante des formations géologiques qui le supportent. Dans l’hypothèse d’un milieu

parfaitement homogène, seule la pente et la morphologie des reliefs guident la mise en place des cours d'eau (Zernitz, 1932 ; Twidale, 2004). Or dans le milieu naturel, les structures géologiques et la composition lithologique du sous-sol ont une influence significative sur l'établissement des réseaux hydrographiques. En effet, la nature des surfaces des bassins a un rôle primordial sur le comportement hydrologique de ceux-ci. Les paramètres qui interviennent sont la lithologie, la pédologie et la couverture végétale. Ces paramètres influencent grandement la perméabilité et la rugosité de la surface, qui conditionnent à leur tour la vitesse du ruissellement et le rapport de l'écoulement sur l'infiltration, appelé aussi coefficient d'écoulement (Sinan et Trouillard, 1993; Gogu et Dassargues, 2000).

Cet indicateur spatial a été créé par le BRGM pour réaliser des cartes nationales ou régionales de vulnérabilité intrinsèque des nappes aux pollutions diffuses (Figure 43). Il se fonde sur l'analyse du modèle numérique de terrain et des réseaux hydrographiques naturels, conditionnés par la géologie. L'IDPR est disponible à l'échelle de la France sous forme de grille, l'échelle de validité est le 1/50 000. Afin de calculer l'IDPR, les données suivantes ont été utilisées : - le réseau hydrographique naturel (réel/observé) issu de la Base de Données Carthage (BD Carthage, IGN) Les attributs exploités pour l'analyse sont la nature, le type, l'état, la position des cours d'eau et des plans d'eau. Toutes les voies d'eau artificielles sont écartées de l'analyse. - le réseau théorique des écoulements, fondé sur l'analyse des talwegs. Il s'établit à partir du modèle numérique de terrain (MNT) Seule l'altitude est fournie de manière "brute" par le MNT. Le calcul des pentes, des bassins versants et des talwegs font appel aux techniques de traitements spatiaux intégrés aux logiciels de Système d'Information Géographique.

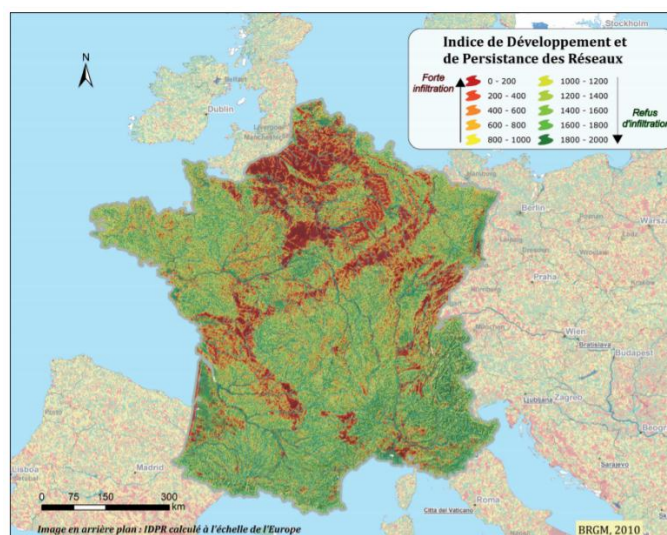


Figure 43: Distribution de l'indice IDPR sur la France et à l'échelle de l'Europe en arrière-plan (BRGM, 2010)

- Le paramètre géologique intensité de déformation : **Int-Defor**

La base de données géoréférencée La BD Charm-50 fournie par le BRGM, représenté des cartes géologiques à 1/50 000 vectorisées et harmonisées. Avec ses 6 couches d'informations détaillées et renseignées (format shape .shp), la carte de la géologie harmonisée restitue une information continue. Elle comprend les informations suivantes : formations géologiques, contours, éléments structuraux linéaires, éléments ponctuels (structuraux et divers), surcharges (mylonites...) (<http://www.geocatalogue.fr/>).

Ces données nous ont permis de créer une carte de la distribution de l'ensemble des structures géologiques particulièrement les structures sédimentaires plissées qui témoignent des conditions de déformation sur la zone du bassin de la Durance. Ceci a été réalisé en projetant les points des localisations de ces structures (Figure 44-a)), puis on a calculé à l'aide du logiciel ArcGis leur nombre par unité de surface (N (Nombre de point)/Km<sup>2</sup>) (Figure 44-b). Le résultat obtenue est une carte de densité de point des structures déformées, qu'on a appelés carte d'intensité de déformation, étant donné que les valeurs les plus élevées indiquent les zones qui présentent un grand nombre de structures plissées et les valeurs les plus faibles indiquent l'absence de ces derniers. À partir de ces résultats on crée le paramètre intensité de déformation noté Int-Defor, qui représente la densité moyenne des structures plissées dans chaque bassin calculée à l'aide de l'outil 'Zonal statistics' sur le logiciel ArcGis.

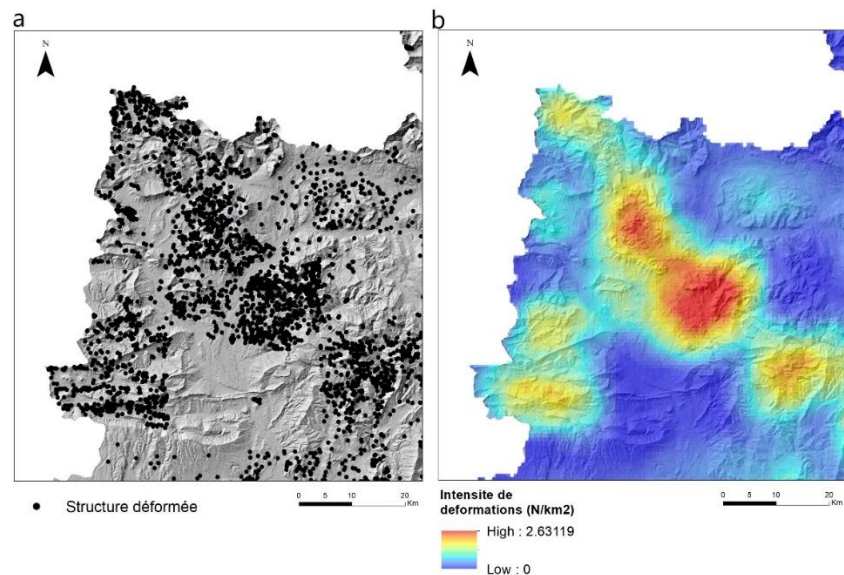


Figure 44: (a) Exemple de distribution des points de localisation des structures déformées dans le nord-ouest du bassin versant de la Durance (b) densité de déformation calculée par le nombre de points de structure déformée par unité de surface.

## 8 L'analyse et exploration de données :

L'analyse des données est une spécialité qui s'intègre dans le domaine de la statistique, elle est aussi considérée comme un sous-domaine de cette dernière, capable de générer de l'information à partir de données collectées systématiquement. On cherche par cette analyse à donner les liens pouvant exister entre les différentes données ainsi qu'à en tirer une information statistique qui sert à décrire de façon plus succincte les principales informations contenues dans ces données. On peut aussi chercher à classer les données en différents sous-groupes plus homogènes (Benzécri, 1976). En raison de la complexité croissante des données extraites de notre environnement, il devient de plus en plus compliqué de réaliser l'analyse de données, de sorte qu'elle est considérée comme une discipline à la frontière entre la statistique et l'intelligence artificielle. Quant à l'exploration de données, elle englobe l'ensemble de technologie capables d'extraire des connaissances à partir des informations générées par les données. Bien que l'analyse de données a vu le jour dans le 18ème siècle, il fallait attendre jusqu'au 20ème siècle pour que les technologies de l'exploration de données émergent, lors du développement des premiers outils mathématiques et informatiques et les nouveaux outils de l'intelligence artificielle qui ont pu être appliqués à des quantités énormes de données pour en extraire de l'information et de la connaissance (Belda, 2013).

L'exploration de données génère un modèle mathématique qui aide à expliquer les informations et les mécanismes d'un processus et les tendances observées dans ce dernier à partir des données collectées sur son environnement. Il permet aussi de prédire l'apparition de nouvelles tendances et ainsi contribuer à la prise de décision. En général, un processus typique d'exploration de données comprend les étapes suivantes (Belda, 2013) :

- 1) La sélection de l'ensemble des données. On sélectionne les paramètres que l'on souhaite segmenter, classer ou prévoir (dans notre cas se sont les bassins versants pour lesquels on veut caractériser le type de réseau de drainage) et les paramètres indépendants, qui sont les données à partir desquelles on construira les modèles.
- 2) L'analyse des propriétés statistiques des données. On réalise une première calcul simple des données afin d'identifier les valeurs aberrantes ou marginales situées à l'extérieur de la plage des valeurs raisonnables du processus ou les mécanismes que l'on souhaite étudier et comprendre.
- 3) La transformation des données d'entrée. Afin d'éviter des erreurs dans les étapes ultérieures en travaillant avec des données non standards, les données sont souvent normalisées ou bien dans cette étude, elles sont codées lorsqu'il s'agit de données qualitatives. Comme par exemple le cas des paramètres type de réseau de drainage,

Homogénéité lithologique, occupation de sol, type de roche... etc, qui ne sont pas exprimés en grandeur et unités et peuvent entraîner un dysfonctionnement des outils de modélisation.

4) La modélisation, c'est la phase primordiale de l'exploration des données. Les techniques d'exploration de données sont classées en fonction de la technologie ou de la méthodologie mise en œuvre à cette étape. Deux grandes procédures englobent ces techniques, le *soft computing*, qui sont des techniques informatiques conçues pour résoudre des problèmes qui traitent des données incomplètes ou inexacts et qui sont toujours orientées vers l'extraction d'information non triviale ou de connaissances, ou les réseaux neuronaux, les machines à vecteurs de supports.

5) l'extraction de la connaissance. L'outil utilisé dans l'étape de modélisation ne révèle pas forcément de connaissance, ainsi, on applique dans cette étape différents outils pour extraire de nouvelles connaissances à partir par exemple d'un réseau neuronal entraîné d'une manière, appropriée.

6) L'interprétation et l'évaluation des données. L'utilisation d'outils informatiques dans l'exploration des données est encore loin d'être un procédé scientifique entièrement automatisable, puisqu'il dépend de l'expérience et des connaissances du scientifique. C'est pour cette raison qu'une fois le traitement et le processus d'extraction des connaissances finalisés, il faut absolument vérifier que les conclusions obtenues sont correctes et qu'elles ne conduisent pas à des fausses évidences. Ainsi dans une situation réelle d'extraction de connaissances, comme le cas de cette présente étude, on exécute plusieurs méthodologies (ACP, AD, CHA) sur le même jeu de données et c'est à cette étape qu'on compare les résultats obtenus avec les différentes approches d'analyse et ceux de l'extraction des connaissances sur le phénomène étudié.

## **8.1 Analyse en composantes principales :**

L'analyse en composantes principales (ACP) est la méthode de sélection de variable la plus utilisée en analyse de données et dans la statistique multivariée. Elle permet d'identifier la projection pour laquelle les observations (par exemple les bassins versants) présentent la meilleure variabilité (Belda, 2013). L'ACP consiste à transformer des variables liées entre elles dites corrélées, en nouvelles variables indépendantes les unes des autres et ainsi non corrélées. Ces nouvelles variables sont appelées "composantes principales", ou axes factoriels ou aussi unité factoriel. Elle permet donc de réduire la dimensionnalité des données et diminuer l'information en un nombre de composantes plus limité que le nombre d'origine de variables (Benzécri, 1976). Il s'agit d'une approche à la fois géométrique qui se base sur la représentation des variables dans un nouvel espace géométrique des directions d'inertie



maximale, et statistique qui se fonde sur la recherche d'axes indépendants expliquant au mieux la variabilité ou la variance des observations. Quand on veut alors compresser un ensemble de N variables aléatoires, les n premiers axes de l'ACP (trois ou les quatre premier axes) sont un meilleur choix, du point de vue de l'inertie ou la variance expliquée (Benzécri, 1976).

L'analyse en composante principale recherche la transformation linéaire qui va constituer un nouveau système de coordonnées pour l'ensemble initial d'échantillons, où la première composante principale indique la meilleure variabilité est la seconde représente la meilleure variabilité suivante et cela pour autant de composante que l'on sélectionne. L'un des avantages de l'ACP est que chaque étape intermédiaire de la recherche des composantes de croissance maximale de variabilité permet d'obtenir la variabilité expliquée pour chaque nouvelle composante principale. Par exemple, la première composante principale peut expliquer 35%, la deuxième 15% et la troisième 12% et ainsi de suite (Figure 45) (Rezende-Filho et al., 2015; Bouramtane et al., 2020 ; Tiouiouine et al., 2020).

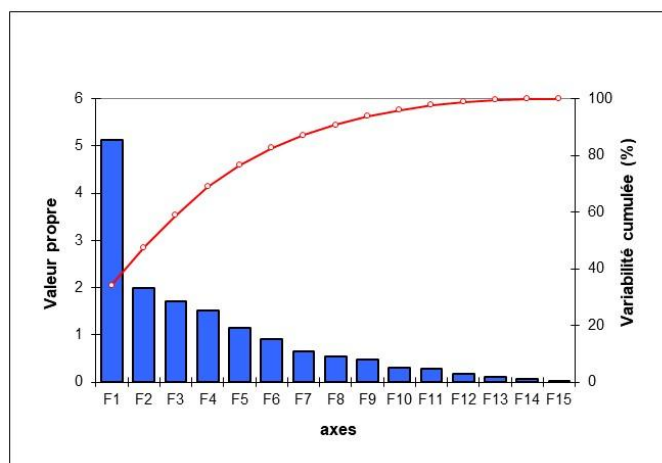


Figure 45: Exemple de distribution de la variance expliquée des composantes principales ou axes factoriels notés F, avec F1 est la première composante principale

Les champs d'application sont actuellement multiples, allant de la télédétection ou l'ACP a été largement utilisées pour la délimitation des unités lithologiques et la cartographie géologique dans le domaine de la géologie (El Janati, 2019), dans la biologie pour la classification des types de végétation et les associations de plantes par imagerie satellitaire (Pesaresiet al., 2020), la chimie de l'eau (Rezende-Filho et al., 2015; Tiouiouine et al., 2020) à la recherche économique et sociale, et plus récemment le traitement d'images. L'ACP est surtout utilisée pour (Benzécri, 1976) :

- Décrire et visualiser des données ;
- Les décorrélérer ; dans la nouvelle base, constituée des nouveaux axes, les variables ont une corrélation nulle ;

- Les débruiter, en considérant que les axes qu'on décide d'oublier sont des axes bruités.

## 8.2 L'analyse discriminante :

L'analyse discriminante est une technique statistique qui est un outil conventionnellement et largement utilisé pour étudier des groupes d'observations qui peuvent avoir des caractéristiques différentes. L'analyse discriminante (AD) est une généralisation de la méthode discriminante linéaire de Fisher (Welling, 2005), une méthode utilisée en statistique, en reconnaissance de formes et en apprentissage machine pour trouver une combinaison linéaire de caractéristiques qui caractérisent ou séparent deux ou plusieurs classes d'objets ou événements. L'AD vise à décrire, expliquer et prédire l'appartenance à des groupes prédéfinis (classes, modalités de la variable à prédire) d'un ensemble d'observations (individus, échantillons d'eau, bassin versant... etc) à partir d'une série de variables prédictives (paramètres descripteurs, variables exogènes, ... etc). La combinaison résultante peut être utilisée comme un classificateur linéaire ou, plus communément, pour réduire la dimensionnalité entre avant et après la classification.

L'analyse discriminante étudie des données provenant de groupes connus à priori. Elle vise deux buts principaux :

- Description : Parmi les groupes connus, quelles sont les principales différences que l'on peut déterminer à l'aide des variables mesurées ?
- Classement : Peut-on déterminer le groupe d'appartenance d'une nouvelle observation uniquement à partir des variables mesurées ?

L'analyse discriminante permet d'y parvenir en formant un ou plusieurs combinaisons plus linéaires des variables discriminantes dites fonctions discriminantes, représente sous la forme suivante :

$$D_i = d_0 + d_{i1}Z_1 + d_{i2}Z_2 + \dots + d_{ip}Z_p \quad (15)$$

Où  $D_i$  est le score (taux de discrimination qui peut être exprimée en pourcentage) de la fonction discriminante  $i$ , les  $d$  sont des coefficients d'échelle ou de pondération, et les  $Z$  sont les valeurs standardisées des  $p$  variables discriminantes (paramètres descriptives) utilisées dans l'analyse. Les fonctions sont formées de manière à maximiser la séparation des groupes tout en minimisant les variations au sein des groupes (Figure 46). Une fois que l'on a trouvé une combinaison de variables qui fournit une discrimination satisfaisante pour les cas (bassins versants) dont l'appartenance à un groupe est connue, un ensemble de fonctions de classification peut être dérivé qui permet de classer les nouveaux cas dont l'appartenance est inconnue. La procédure de classification utilise une combinaison linéaire distincte des

variables discriminantes pour chaque groupe. Celles-ci produisent une probabilité d'appartenance au groupe respectif et le cas est attribué au groupe ayant la probabilité la plus élevée (Wilson et al., 2018).

L'analyse discriminante est une technique connue et reconnue, elle est décrite environ de manière semblable par les différentes communautés du traitement de données : en exploration de données (exploratory data analysis), en analyse de données, en reconnaissance de formes (pattern recognition et traitement d'image), en apprentissage automatique (machine learning), en fouille de données (data mining) (Benzécri, 1976).

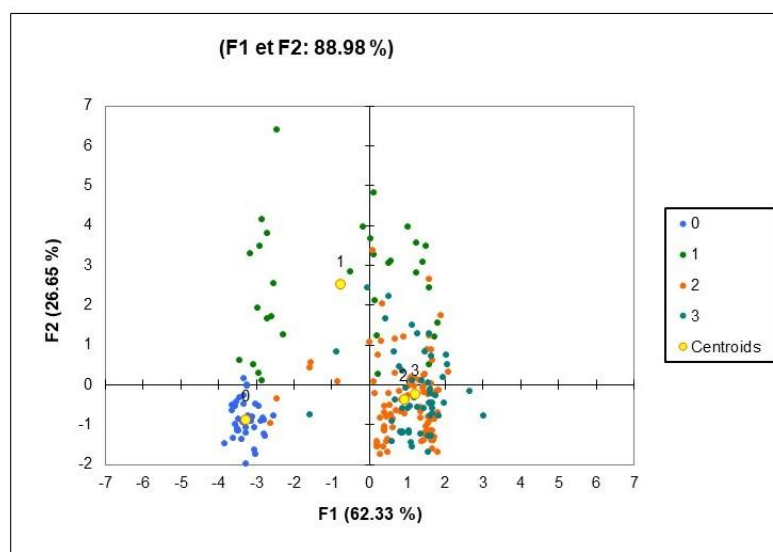


Figure 46: Exemple de discrimination des observations de bassin versant en 4 groupe avec F1 et F2 représente les fonction discriminantes dériver de l'AD. F1 présente un score ou un taux de discrimination de 62.33% et F2 un score de 26.55%.

### 8.3 Classification hiérarchique ascendante :

La classification hiérarchique ascendante (CHA) sa toponymie en anglais 'Agglomerative hierarchical clustering' est le type le plus courant de classification hiérarchique utilisé pour regrouper des objets en fonction de leur similarité. Il est également connu sous le nom 'Agglomerative Nesting'. L'algorithme commence par traiter chaque objet comme un groupe d'objets individuels. Ensuite, des paires de groupes sont successivement fusionnées jusqu'à ce que tous les groupes aient été fusionnés en un seul grand groupe contenant tous les objets. Elle est basée sur la classification de l'ensemble de données en un nombre déterminé de groupes et elle révèle la relation génétique entre chaque observation.

L'AHC classe l'ensemble de données en commençant par autant de groupes que d'observations, elle regroupe itérativement les observations "similaires" pour former un arbre hiérarchique, jusqu'à ce que toutes les observations soient rassemblées en un seul groupe. Le résultat est une représentation arborescente des objets, appelée dendrogramme (Figure 47), qui peut être visualisée à différents niveaux de l'arbre hiérarchique. L'arbre comprend à sa base les individus à classer et, aboutissant à ces individus, des branches se raccordant entre elles par des noeuds ; à ces noeuds aboutissent de nouvelles branches qui se raccordent entre elles par de nouveaux noeuds ; ainsi de suite jusqu'au sommet. Un tel arbre définit un système emboîté de classes : plus exactement un système dichotomique parce que de chaque noeud partent deux branches (Benzécri, 1985). Cette représentation fournit ainsi des vues synthétiques globales à détaillées de l'ensemble de données analysées, c'est-à-dire une analyse cartographique multi-échelle (Martelet et al., 2006).

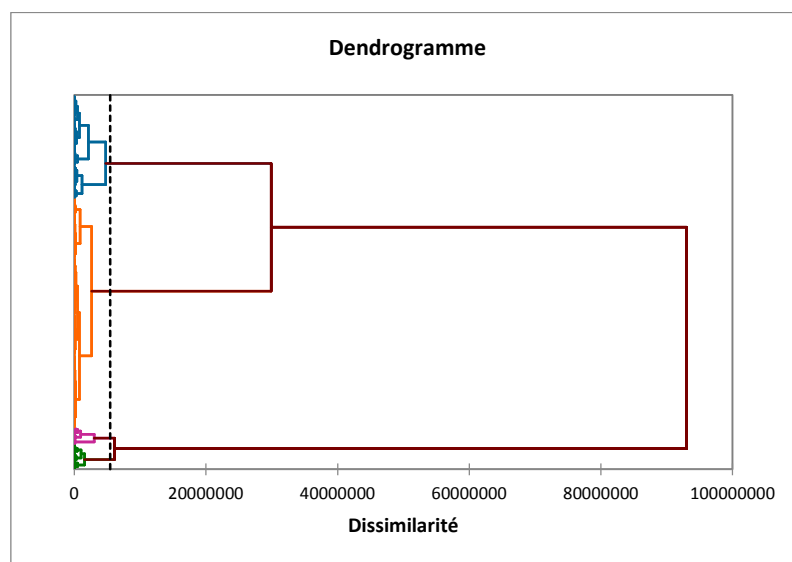


Figure 47: Exemple du dendrogramme résultats de l'CHA réalisé sur les observations des bassins versants subdivisés en quatre groupes, bleu :rectangulaire, orange :treillis, mauve :parallèle et vert :dendritique.

## 9 Outils mathématique :

L'analyse de composante principale, l'analyse discriminante et la classification hiérarchique ascendante ont été réalisées sous le logiciel XLStat. C'est un complément complet d'analyse et de statistiques pour Excel, il a été développé depuis 1993. XLStat comprend plus de 200 fonctionnalités dans des solutions générales ou spécifiques au domaine. L'utilisation d'Excel comme interface fait de XLStat un logiciel d'analyse de données statistiques et multivariées convivial et très efficace.

Il comprend la régression (linéaire, logistique, non linéaire), l'analyse de données multivariées (analyse en composantes principales, analyse discriminante, analyse des correspondances, mise à l'échelle multidimensionnelle, regroupement hiérarchique agglomératif, moyennes K, voisins immédiats K, arbres de décision), tests de corrélation, tests paramétriques, tests non paramétriques, ANOVA, ANCOVA, modèles mixtes et bien plus encore. Les solutions spécifiques au terrain permettent une analyse multivariée avancée (RDA, CCA, MFA), la cartographie des préférences et d'autres outils sensoriels, le contrôle statistique des processus, les simulations, l'analyse des séries chronologiques, les effets dose-réponse, les modèles de survie, l'analyse conjointe, la modélisation PLS, la modélisation des équations structurelles et les analyses de données OMICS.... Les modules optionnels incluent la visualisation 3D et les modèles de classes latentes.

### **III Présentation et justification de la démarche retenue :**

#### **1 Présentation des principales étapes de la démarche retenue**

La démarche et le protocole d'investigation mis en place comporte les huit étapes suivantes :

**Étape 1 :** Comme dans tous les études qui suivent une méthodologie scientifique, l'observation du phénomène étudié est une étape qui permet de mieux appréhender ce dernier et de poser des questions sur sa nature et composition. Ainsi on a commencé, d'une part cartographié et analysé la distribution de la densité du réseau de drainage, la densité des linéaments et fracturation géologiques et les types de réseaux identifiés dans chaque zone d'étude. D'autre part on a extrait les roses diagrammes de directions de ces derniers, qui sont des bons indicateurs du contrôle structural sur le réseau de drainage (Radeideh et al., 2016; Sangireddy et al., 2016). Les constations réalisées dans cette étape constituent des résultats préliminaires, qui sont certes très importantes puisqu'ils représentent les points de départ de cette étude, mais ils restent comme même basés sur des simples observations et ne peuvent pas ainsi satisfaire la méthodologie scientifique qui comporte l'observation du phénomène, l'expérience, l'explication et puis une hypothèse qui est finalement plus consistante.

**Étape 2 :** L'étape d'expérience, il a pour objectif de tester et valider les hypothèses et constations observées dans l'étape 1, qui suggèrent des liens potentiels entre la topographie, la structuration géologique et le déterminisme des types de réseau de drainage dans différentes conditions climatiques et environnementales, ou plutôt de les réfuter, c'est-à-dire, l'existence d'un processus plus complexe variable ou non dans chaque environnement. Pour arriver à cette fin, plusieurs paramètres ont été extraits à partir des données de télédétection et/ou calculés à l'aide de l'outil SIG pour constituer la base de données du traitement mathématique (Figure 48) (Annexe II, Tableau 32) (Annexe III, Tableau 33) et (Annexe IV,

Tableau 34). Il faut se mettre à l'évidence qu'on a deux types de base de données ou ce qu'on a appelé blocs des paramètres, à savoir, le bloc des paramètres communs entre les trois zones d'études et le bloc des paramètres spécifiques pour la région de l'Anti-Atlas Oriental et le bassin de la Durance. Par la suite on a utilisé des méthodes statistiques multivariés et des modèles qui prennent en compte l'aspect multifactoriel du phénomène qu'on essaie d'étudier et le caractère linéaire des relations entre les paramètres (Naghbi et Pourghasemi, 2015; Berkahn et al., 2019 ; Bouramtane et al., 2020 ; Tiouiouine et al., 2020).

OBJECTID	Type	B1	R2	H	F	CI	Kh	Kg	MEAN-Drain	Landcover	IDPR	Lithology	Homogeneity	MEAN-Fault
1	4	0.01842	0.064504	2.322747	15.740195	0.74867257	0.45315	1.391894	2.050086	9	1556.303768	0	1	0.734509
2	2	0.013384	0.041809	1.464966	17.541233	0.61357466	0.32886	1.536372	1.328165	9	1575.425962	3	0	0.604532
3	3	0.047777	0.169403	2.879047	24.888693	0.38988658	0.61797	1.27237	1.360608	10	1280.3147	0	0	0.749953
4	4	0.012107	0.034713	0.749388	9.330519	0.59731344	0.19743	1.820307	0.838242	10	1116.123816	3	0	0.945592
5	3	0.023549	0.081459	1.933539	19.344742	0.60197584	0.55132	1.2142	1.668282	8	1625.644078	3	1	0.354593
6	4	0.024782	0.072185	1.635637	22.256238	0.61313221	0.21834	1.758454	1.456489	8	1599.994532	3	0	0.186739
7	4	0.036347	0.123478	3.226004	28.004672	0.65325222	0.50597	1.34727	1.503683	8	1638.940839	3	1	0.514066
8	1	0.027737	0.047743	2.079271	8.969801	0.77450308	0.13271	1.333201	1.425134	9	1362.959784	0	0	0.153797
9	4	0.01839	0.053346	2.225358	15.106918	0.72478499	0.21279	1.773993	1.738561	8	1485.10912	3	1	1.729918
10	11	0.044401	0.169332	3.552104	24.647255	0.58953861	0.72383	1.21822	1.768976	10	1471.178659	0	1	1.151486
11	2	0.010981	0.039409	1.600324	16.255011	0.63880957	0.28333	1.612056	1.581248	8	1543.844217	3	1	0.522169
12	13	0.047848	0.154268	3.258767	22.412742	0.58890011	0.38953	1.457262	1.432425	10	1304.491148	0	1	1.350217
13	14	0.038161	0.125646	2.33118	23.943952	0.47616755	0.43375	1.410293	1.117536	10	1485.217746	0	1	1.236416
14	16	0.023323	0.073593	2.770666	17.309367	0.78029505	0.34751	1.509952	1.459782	8	1445.224638	0	1	0.664626
15	17	0.017059	0.051975	0.928414	9.51492	0.73153693	0.28999	1.607155	0.926561	9	1252.921262	3	1	0.850381
16	18	0.021783	0.06703	0.858785	11.481869	0.65242718	0.30258	1.578048	0.833772	9	1224.192713	3	1	1.052946
17	19	0.035836	0.114248	3.407281	26.080218	0.51101409	0.26717	1.48417	1.449907	10	1389.066445	0	1	0.813301
18	20	0.012071	0.042597	0.835032	9.891641	0.80745342	0.60476	1.280108	1.292619	9	1191.484441	0	0	0.345279
19	21	0.029376	0.100767	2.034642	24.906341	0.45538462	0.52993	1.329269	1.250548	10	1573.602146	1	1	0.428269
20	22	0.012191	0.033238	1.56543	11.665338	0.75647668	0.13943	2.059743	1.355351	9	1430.48349	0	1	0.624275
21	23	0.019897	0.063209	2.132761	17.574196	0.73085032	0.36037	1.492858	1.498778	8	1434.897592	3	1	0.435261
22	24	0.027985	0.090484	2.85118	25.448353	0.49399584	0.39953	1.450886	1.457033	10	1546.978656	2	1	1.000079
23	25	0.031314	0.108914	1.967923	24.262998	0.61877667	0.56558	1.304633	1.399661	10	1633.612321	3	0	0.300759
24	26	0.02646	0.083139	2.271245	15.364813	0.59516129	0.33967	1.520865	1.831649	9	1489.333762	3	1	1.16452
25	27	0.017339	0.055217	2.075724	17.577631	0.73472660	0.36504	1.486871	1.661909	9	1514.273662	0	1	0.49228
26	29	0.006152	0.019585	0.401035	8.197712	0.26265823	0.36457	1.487468	1.249329	9	1238.168404	3	1	0.421959
27	30	0.018173	0.063003	2.363613	16.496498	0.76517572	0.48229	1.366366	1.88787	8	1556.821954	1	1	0.266035

Figure 48: Exemple de Matrice de base de données ou le bloc de paramètre qui est construit pour chaque zone d'étude. OBJECTID représente le numéro du bassin versant.

**Étape 3 :** Avant de passer directement au traitement multifactoriel par les analyses statistiques multivariées, il a été nécessaire de calculer et analyser les corrélations du type de réseau de drainage avec chaque paramètre séparément, ce qui permet de vérifier l'aspect multifactoriel et la complexité du processus qui contrôle le développement des types de réseau de drainage. Ensuite le traitement statistique multivariée commence par l'étude de la structure des données par la méthode d'ACP dans chaque zone d'étude qui a pour objectif d'aboutir à des composantes principales, représentant des macro-paramètres qui traduisent les mécanismes, qui peuvent traduire un des facteurs ou l'interaction de plusieurs, qui potentiellement contrôlent la variation des types de réseau de drainage. L'ACP permet aussi de cartographier et d'avoir une distribution spatiale de ses macro-paramètres et d'analyser leur étendus pour chaque zone d'études. Ainsi cette méthode permet de déterminer s'il existe ou non un seul processus global identique dans tous les types de climats et environnements.

**Étape 4 :** Après l'identification des mécanismes et processus qui explique la variation des types de réseau de drainage dans chaque zone, il est nécessaire d'étudier de dimensionnalité de la structure d'ACP. Au début une étude comparative de dimensionnalité se fait entre les trois zones d'études sur base du bloc des paramètres communs, dont l'objectif étant d'analyser la complexité de la variance observée et le caractère homogène ou hétérogène entre les unités factorielles (composantes principales/macro-parametres) et la complexité du processus d'une zone a une autre. Puis une deuxième étude de dimensionnalité se fait entre le bloc des paramètres communs et le bloc des paramètres spécifique pour la région de l'Anti-Atlas Oriental et le bassin versant de la Durance qui a pour objectif d'analysée l'apport des paramètres spécifiques dans la distribution de la variance observée.

**Étape 5 :** Cette étape inscrit dans l'étape d'expérience, consiste à effectuer le traitement d'ADL. Cette dernière permet discriminer entre les types de réseau de drainage, en définissant des fonctions discriminantes qui discriminent avec un pourcentage précis entre les types de réseau. L'ADL permet aussi la possibilité d'observer la distribution des bassins versant dans des graphes bidimensionnels dont les axes sont les fonctions discriminantes. Ainsi elle permet de mieux appréhender la séparation de chaque type de réseau et les facteurs responsables de sa discrimination. Cette méthode a été calculé pour les trois zones d'études sur la base du bloc des paramètres communs afin d'observer les facteurs responsables de la discrimination dans chaque zone et s'il existe une ressemblance ont ces derniers. Puis il a été calculer sur la base du bloc des paramètres spécifiques toujours pour la région de l'Anti-Atlas Oriental et le bassin versant de la Durance, pour analyser l'apport de ces derniers paramètres dans le déterminisme et la discrimination.

**Étape 6 :** Le dernier calcule dans la série des méthodes statistiques multivariées est la CHA. En ayant pour données d'entré les coordonnées des valeurs moyennes des trois premières composantes principales de l'ACP du bloc des paramètres communs de chaque zone d'études. Elle permet de classer les types de réseau en se basant sur le caractère de similarité ou différenciation entre ces derniers. Cette méthode permet de vérifier les liens entre les types de réseau de drainage (les types formés par la pente et les types liés à la structuration géologique, les types de réseaux des hauts-relief et des bas-reliefs) et les transitions possible entre eux (du dendritique au parallèles, du treillis vers le parallèles) (Howard, 1967 ; Twidale, 2004; Pereira-Claren et al., 2019). Cette dernière méthode permet ainsi de voir si les types de réseaux de drainage gardent les mêmes relations dans des environnements différents.

**Étape 7 :** Avant de conclure les constatations obtenus à partir des traitements statistiques multivariées, il est primordial de faire une analyse de sensibilité du traitement mathématique. Cette analyse permet d'identifier les éventuelles fragilités du modèle face aux changements

des paramètres. Elle constitue aussi une aide utile pour définir la précision nécessaire pour les différents paramètres d'entrée du modèle. L'objectif principal de cette étape est d'identifier les paramètres qui auront une influence significative ou pas sur les mécanismes et processus identifiés. Cette analyse a été réalisée uniquement sur la région de l'Anti-Atlas Oriental étant donné que c'est notre zone pilote et de référence et les méthodes concernées sont l'ACP et l'ADL.

## **2 Schéma synoptique de la démarche :**

En s'appuyant sur plusieurs observations et analyses menées sur les images satellitaires ou sur terrain et par la conversion de ces observations en base de données pour les traitements mathématiques et statistiques, cette étude vise à mieux identifier et caractériser les types de réseaux de drainage et mettre en évidence les facteurs et processus qui contrôlent leur genèse et développement dans différentes conditions géologiques, géomorphologiques et climatiques et sur une grande variété d'échelles spatiales (Figure 49).



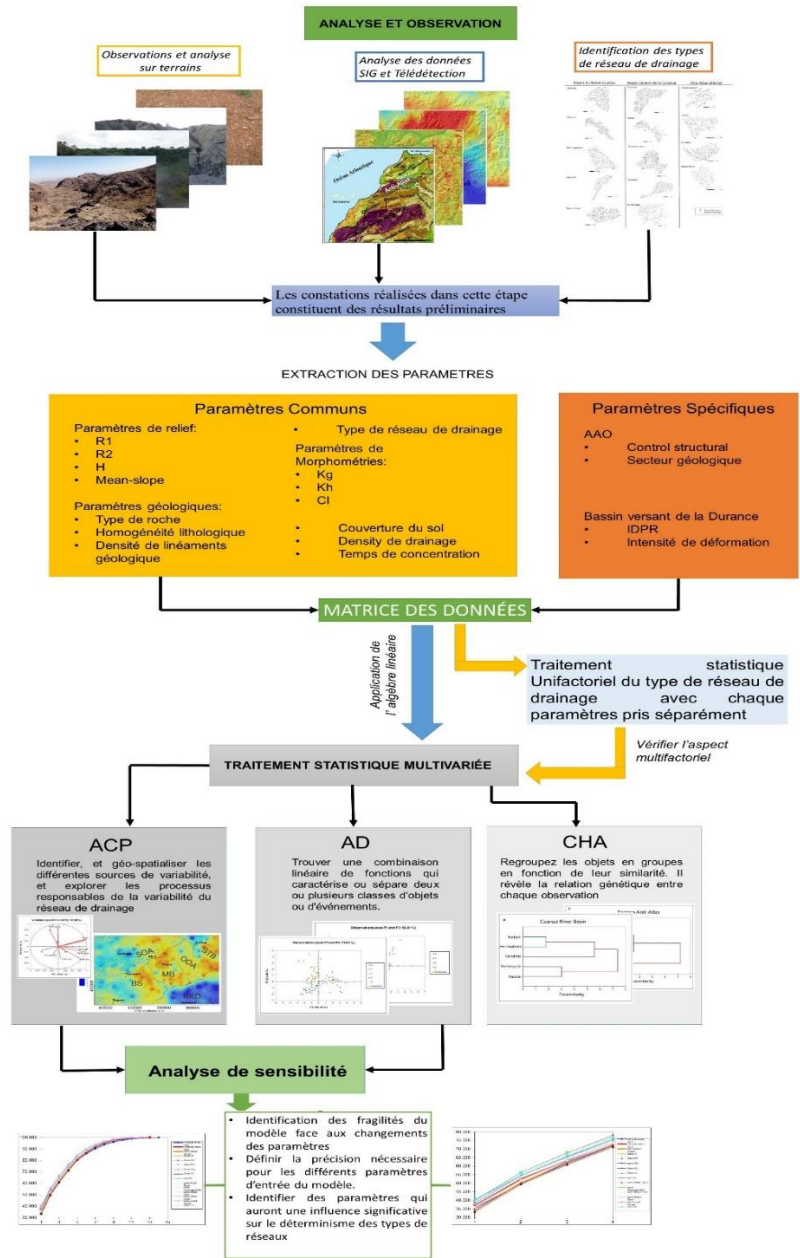


Figure 49: Méthodologie développée pour améliorer la compréhension des types de réseau de drainage et leur déterminisme.

# CHAPITRE 3 : Bilan des données et résultats des observations

## **I Introduction:**

Les observations réalisées sur les imageries satellitaires et ceux effectuées sur le terrain menées dans les Alpes de Haute Provence (juillet 2018- Décembre 2019) et le bassin du fleuve Cuanza (Janvier, 2020), ont permis d'aboutir, d'une part, à la construction d'une base de données très fournie et diversifiée pour les différents traitements mathématiques et d'autre part à la construction des premières hypothèses sur les relations qui existent entre la variation des types du réseau de drainage et les propriétés physiques des bassins versants. Ce chapitre a ainsi pour objectif de présenter le bilan de cette base de données dans chaque zone d'étude, afin d'obtenir un aperçu sur leur nature et de présenter les premiers constatations et résultats obtenus par observations de ces données, particulièrement ceux obtenus par l'analyse cartographiques des caractéristiques du réseau de drainage et les caractéristiques topographiques, géologiques et géomorphologiques.

## **II Bilan des données acquises sur chacun de trois sites : Évaluation du volume d'information disponible pour chaque zone**

### **1 Bilan des données et paramètres obtenus sur la région de l'Anti-Atlas Oriental :**

220 bassins ont été identifiés dans la région de l'Anti-Atlas Oriental qui recouvrent l'intégralité de sa surface et les six secteurs géologiques dont elle dispose. Le Tableau 6 résume les caractéristiques physiques de ces derniers secteurs. On peut y remarquer que ces derniers sont très distincts entre eux, en ce qui concerne le relief, la pente, la nature lithologique et les conditions géomorphologiques. Ceci se traduit sur le réseau de drainage qui affiche une diversification et une structuration complexe de ces caractéristiques et sa distribution. Les bassins identifiés présentent des surfaces allant de 9.5 Km<sup>2</sup> à 482 Km<sup>2</sup> avec une surface Moyenne de 123 Km<sup>2</sup>.

Tableau 6: Résumé des principaux caractéristiques physiques des six secteurs géologiques de l'AAO

Sector	Area (Km <sup>2</sup> )	Mean Elevation (m)	Mean Slope (°)	Dominant lithology	Geomorphological Characteristics
BS	7810	882	7,9	Sandstone and quartzite, micaceous sandstone clay, green shale	First and second Bani ridge: monoclinical structures, Tazzarine basin
OOA	3527	780	7,7	Green sandstone and quartzite, green sandstone and volcanic rock lenses, quartzite sandstone, green shale siliceous sandstone, marl limestone, sandstone and pelite	shear zone that consists of a succession of anticlines and synclines
MB	3120	780	6,2	Sandstone and quartzite, schist, pelitic schist	basin structures and depressions, such as the Fezou syncline, lowland area at the foothills of the high reliefs forming part of a sedimentary basin
KKD	5048	743	6,5	Limestone, Marl, Siliceous limestone	Tabular sector of Cretaceous deposit
STB	2717	795	5,4	pelite, sandstone and quartzite, limestone, alluvial conglomerate, coarse sand, limestone cement conglomerate	lowland area, plains, mostly synclinal in character, anticlinal structures in the northern and southern part of the area
SOA	9255	1412	12,2	Amphibole granite, Rhyolite, Basalt, shale, sandstone, conglomerate, pink sandstone, green shale.	Precambrian basement that outcrops in two large inliers, extremely fractured by important tectonic structures.

Le Tableau 7 résume les caractéristiques quantitatives des bassins, en représentant la valeur maximale, minimale et moyenne de chaque paramètre. A partir des valeurs obtenues, on peut constater l'existence d'une grande variation des caractéristiques de relief, géologie, géomorphologie et réponse hydrologique entre les bassins, ce qui constitue un terrain adéquat pour l'analyse du réseau drainage, ces types et ces interactions.

Pour ce qui est des paramètres issus des interprétations visuelles des entités visibles sur la surface de la terre et ceux obtenus à partir des données de télédétection, à savoir les paramètres type de roche, homogénéité, contrôle structurel, secteur géologique et l'occupation du sol (Landcover), ils présentent aussi une complexité et une variation significative entre bassins. Pour le paramètre type de roche (rock-type), 33 bassin dont la lithologie dominante est les dépôts Quaternaires, 122 recouverts de dépôts sédimentaires Paléozoïques, 2 bassins dominés par des roches de types volcaniques et 63 bassins présentant une lithologie de type granitique-métamorphique (Figure 50).

Pour le paramètre Homogénéité lithologique, 159 présente une lithologie hétérogène et 61 bassins présentent une lithologie homogène. Quant au contrôle structurel, 35 bassins ne présentent aucun contrôle structurel significatif, en d'autre terme, ils représentent des terrains planes ou tabulaires, 65 bassins présentent un contrôle structurel par des structures

sédimentaires plissées et monoclinales, 29 bassins présentent un contrôle structurel par des failles et des fractures et 91 bassins présentent un contrôle structurel par un couplage des structures plissées et des failles/fractures (Figure 51).

Le paramètre secteur géologique, a permis d'identifier 28 bassins localisés dans le secteur axe Ougnat-Ouzina, 33 bassins localisés dans le domaine Kem-Kem, 55 bassins dans le secteur des Banis, 26 bassins identifiés dans le secteur bassin Maider, 24 bassins dans le secteur bassin Sud-Tafilalt et 54 bassins localisés dans le secteur axe Saghro-Ougnat. En ce qui concerne l'occupation du sol de l'Anti-Atlas Oriental obtenus à partir des données extraites du produit MODIS (Figure 52), sept types d'occupation du sol ont été identifiés sur cette région, à savoir : terre arbustif fermé, terres arbustives ouvertes, végétation de type savane, terres herbacées, terres cultivées, terre aride ou à végétation clairsemée et les terrains urbain et bâti.

Par ailleurs, en ce qui concerne les types d'occupations de sol dominants pour les bassins, on a identifié 11 bassins qui présentent une occupation de sol dominée par les terres arbustives ouvertes, 2 bassins dominés par les types terres cultivées, et 207 bassins dominés par des terres arides ou à végétation clairsemée, ces caractéristiques d'occupation de sol reflètent pertinemment l'aridité du climat de l'Anti-Atlas Oriental (Figure 53).

Tableau 7 : les valeurs maximales, minimales et moyennes des caractéristiques quantitatives des bassins identifiés dans l'AAO

	Maximum	Minimum	Moyenne	Unité
Mean-slope	19.36727	3.870426	8.316526	Degré
H	1.177229	0.045271	0.364432	Sans unité
R1	0.023077	0.000907	0.005343	Sans unité
R2	0.062556	0.001524	0.01228	Sans unité
Kg	4.60334	1.487977	2.651606	Sans unité
Kh	0.73045	0.006421	0.068966	Sans unité
Cl	1.26455	0.052117	0.295409	Sans unité
Mean-Ddrain	0.966871	0.445275	0.738549	Km/Km <sup>2</sup>
Mean-Line	0.001708	0.00002	0.000718	Km/Km <sup>2</sup>
Tc	44.52857	2.949996	9.905564	h (heure)

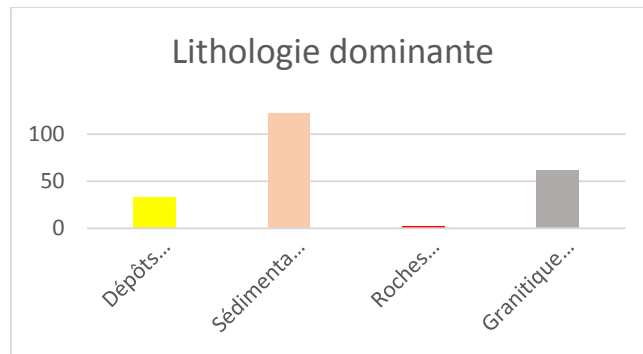


Figure 50: Distribution des types de roches par bassin versant dans de l'AAO

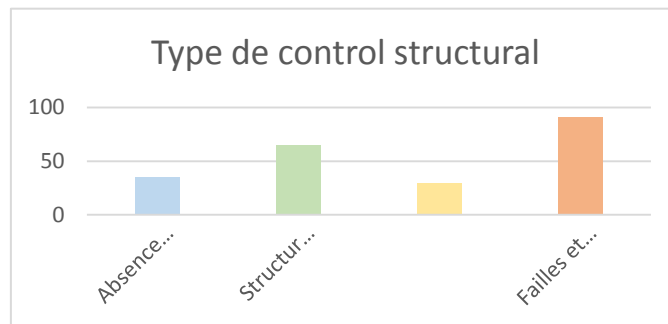


Figure 51: Distribution des type de contrôle structural par bassin versant de l'AAO

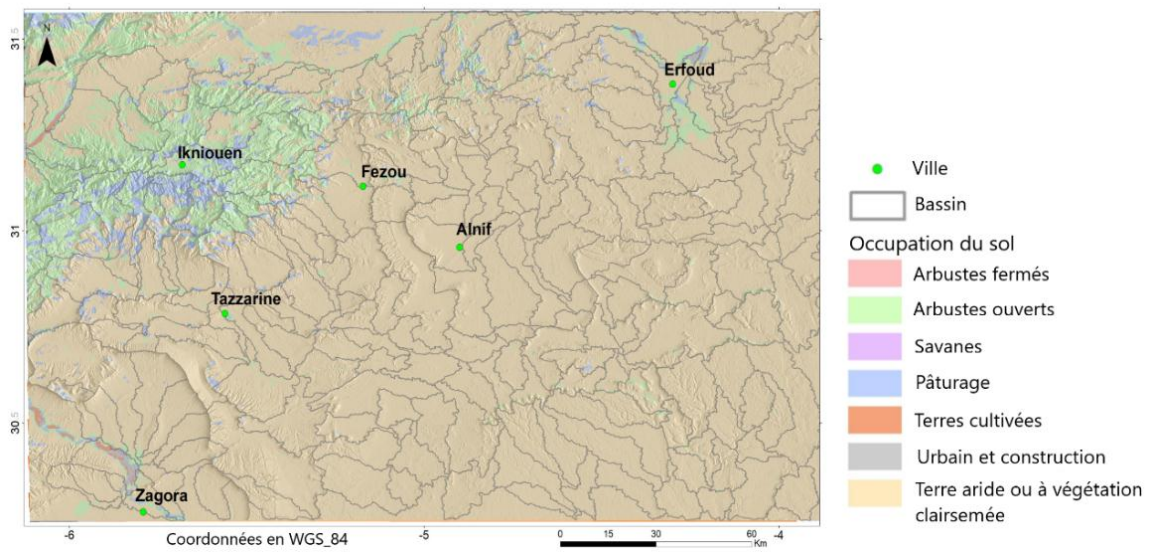


Figure 52: Distribution de l'occupation de sol dans la région de l'Anti-Atlas Oriental

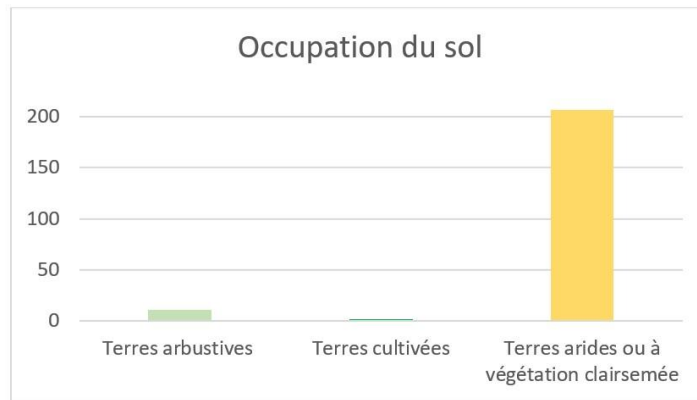


Figure 53: Distribution des type d'occupation de sol par bassin versant de l'Anti-Atlas Oriental

## 2 Bilan des données et paramètres obtenus sur le bassin versant de la Durance

Le bassin versant de la Durance contient 95 sous bassins dont la surface varie de 10.4 Km<sup>2</sup> à 475 Km<sup>2</sup> avec une surface moyenne de 139 Km<sup>2</sup>. Le Tableau 8 résume les caractéristiques quantitatives de ces bassins. On y remarque que ces derniers présentent une grande diversité et une variation dans les caractéristiques même avec le nombre relativement faible des bassins par rapport au la région de l'Anti-Atlas Oriental. La zone du bassin versant de la Durance contient trois paramètres extraits et interprétés à partir des données de télédétection, à savoir type de roche, homogénéité lithologique et l'occupation du sol.

En ce qui concerne le paramètre type de de roche, la majorité de la lithologie du bassin versant de la Durance est constituée de roches sédimentaires, on a ainsi identifié, 2 bassins dans la lithologie dominante est les argiles, 56 bassins sont dominés par les formations calcaires, 7 bassins dominés par les marnes, 18 bassins contiennent particulièrement les conglomérats, 2 bassins contenant des schistes, 7 bassins dominés par des flyshes et 2 bassins dont la lithologie est dominée par les formations granitiques du socle cristallin (Figure 54). Pour le paramètres de l'homogénéité lithologique, 33 bassins présentent une lithologie homogène et 71 bassins présentent une lithologie hétérogène.

L'occupation du sol dans le bassin de la Durance est très variée (Figure 55), on a identifié 14 types d'occupation de sol, à savoir : Forêt à aiguilles persistantes, forêt à feuilles larges persistantes, forêt à feuilles larges caduques, forêt mixte, savanes boisées, terres herbeuses, zones humides permanentes, terres cultivées, urbaines et bâties, Mosaïque de végétation naturelle des terres cultivées, neige et glace, terres arides ou à végétation clairsemée et eau de surface. Cependant on a identifié seulement 3 types d'occupation de sol qui présentent une dominance importante sur l'ensemble des bassins (Figure 56), ils sont repartis comme suite : 25 bassins présentent une occupation de sol dominée par le type savanes boisées, 41 bassins

présentent le type savanes et 28 bassins présentent une occupation de sol de type terres herbeuses. Cette occupation reflète plus au moins un climat tempéré influencé par des saisons sèches dû à l'influence de la méditerranée sur la région Provence-Alpes-Côte d'azur dont le bassin de la Durance en fait partie. Il faut noter ici que la végétation type savane signifie une formation végétale dominée par les plantes herbacées de la famille des Poacées (Graminées), elle est plus ou moins parsemée d'arbres ou d'arbustes.

Tableau 8: les valeurs maximales, minimales et moyennes des caractéristiques quantitatives des bassins identifier dans le bassin versant de la Durance

	Maximum	Minimum	Moyenne	Unité
Mean-slope	31.09014	6.937492	17.23933	Degré
H	4.332504	0.401035	1.988845	Sans unité
R1	0.047848	0.005656	0.022909	Sans unité
R2	0.169403	0.017124	0.07404	Sans unité
Kg	2.059743	1.163155	1.502907	Sans unité
Kh	0.862022	0.132712	0.388555	Sans unité
Cl	0.891068	0.262658	0.648654	Sans unité
Mean-Ddrain	2.10698	0.70189	1.463204	Km/Km <sup>2</sup>
Mean-Fault	1.785141	0.006826	0.719671	Km/Km <sup>2</sup>
Int-Defor	1.6466	0.078503	0.514578	N/Km <sup>2</sup>
Tc	22.47429	3.971765	10.2071	h (heure)
IDPR	1670.625	900.1192	1416.074	Sans unité

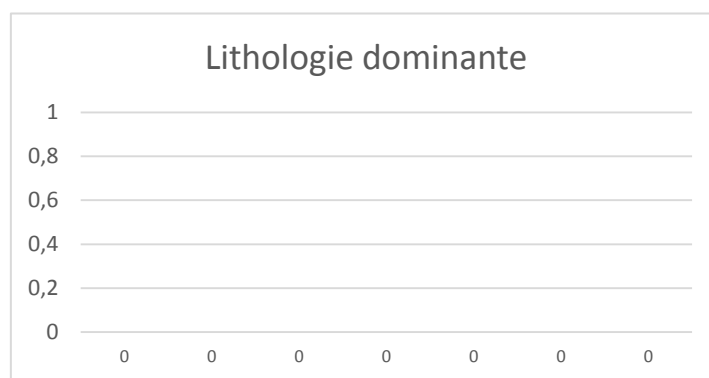


Figure 54: Distribution des formations lithologiques par sous bassin dans le bassin versant de la Durance

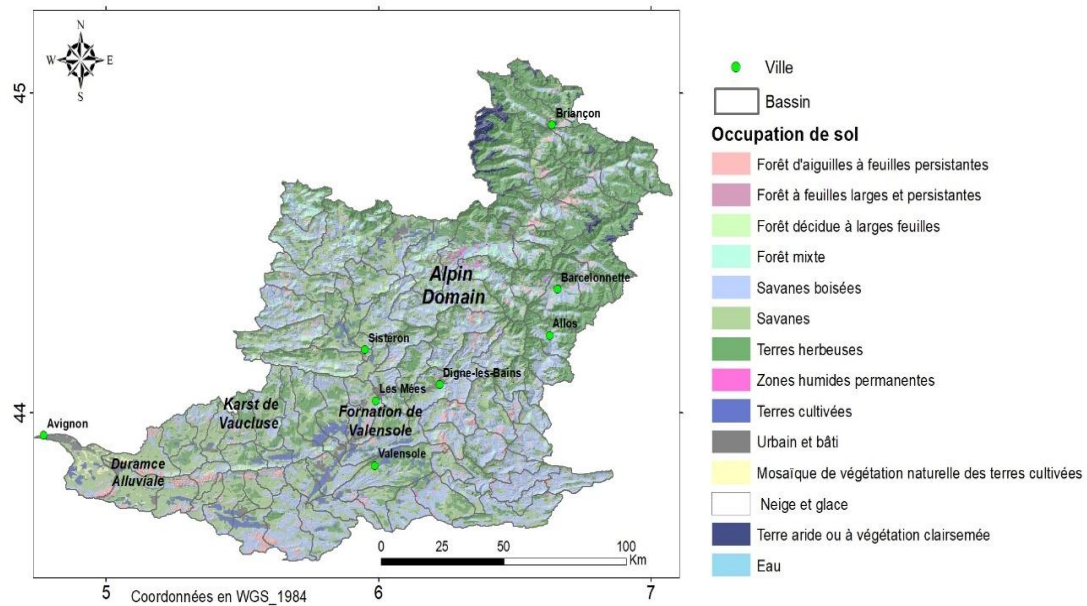


Figure 55: Distribution de l'occupation de sol dans le bassin versant de la Durance



Figure 56: distribution des types occupations de sol dominantes dans les sous bassins du bassin versant de la Durance

### 3 Bilan des données et paramètres obtenus sur le bassin du fleuve Cuanza :

Le bassin du fleuve Cuanza présente 88 sous bassins, avec des surfaces allant de 153 Km<sup>2</sup> à 6295 Km<sup>2</sup> avec une surface moyenne de 1600 Km<sup>2</sup>. Cette zone d'étude contient ainsi les bassins qui présentent les plus grandes surfaces sur l'ensemble de cette étude. Cette grande marge de surface entre les bassins permet de mieux analyser son influence sur la caractérisation des types de réseau de drainage, étant donné que cette question s'est toujours imposée dans les travaux antérieurs réalisés dans ce domaine de recherche (Mejía and Niemann, 2008).

Le Tableau 9 résume les caractéristiques quantitatives obtenus sur les sous bassins. On y remarque aussi une grande variation et hétérogénéités représentées par les valeurs maximales, minimales et moyennes. Pour les paramètres extraits et interprétés à partir des données de



téledétection, on a 3 paramètres obtenus sur le bassin du fleuve Cuanza : type de roche, homogénéité et occupation de sol. Comme la région de l'Anti-Atlas Oriental, quatre classes de type de roches ont été identifiées dans cette zone d'étude, les dépôts quaternaires, les dépôts sédimentaires paléozoïques, les roches volcaniques et les roches granitiques-métamorphiques. Au final 33 bassins présentent une lithologie dominée par des dépôts quaternaires, 33 bassins dominés par les dépôts sédimentaires paléozoïques et 22 bassins présentent une dominance des roches granitiques-métamorphiques, par contre aucun bassin ne présente une lithologie dominée par les roches volcaniques (Figure 57). En ce qui concerne l'homogénéité lithologiques, 44 bassins présentent une lithologie homogène, et 44 une lithologie hétérogène.

L'occupation du sol dans le bassin du fleuve Cuanza présente 12 types (Figure 55) : forêt à feuilles larges persistantes, forêt à feuilles larges caduques, forêt mixte, terrain arbustif fermé, terrain arbustif ouvert, savanes boisées, savanes, terres herbeuses, zones humides permanentes, terres cultivées, Mosaïque de végétation naturelle des terres cultivées, et terres arides ou à végétation clairsemée et eau de surface. Pour les occupations de sol dominantes sur les sous bassins, on a identifié 1 bassin qui présente une occupation de sol dominée par le type forêt à feuilles larges persistantes, 1 bassins qui présente le type forêt à feuilles larges caduques, 1 bassin qui présente la dominance du type Forêt mixte, 23 bassins qui présentent le type Savanes boisées, 51 bassins présentent une occupation de sole dominée par le types savane et 10 bassins dominés par le type terres herbeuses (Figure 59). On peut ainsi clairement voir que la répartition de cette occupation de sol reflète le climat tropical humide du bassin fleuve Cuanza.

Tableau 9: les valeurs maximales, minimales et moyennes des caractéristiques quantitatives des bassins identifier dans le bassin du fleuve Cuanza

	Maximum	Minimum	Moyenne	Unité
Mean-Slope	8.373802	0.724016	2.783114	Degré
H	0.275364	0.019647	0.085698	Sans unité
R1	0.004559	0.00033	0.001489	Sans unité
R2	0.011826	0.000851	0.003911	Sans unité
Kg	3.200186	1.862072	2.324593	Sans unité
Kh	2.75565	0.044989	0.163824	Sans unité
Cl	0.91582	0.180657	0.618913	Sans unité
Mean-Ddrain	0.227763	0.138301	0.182188	Km/Km <sup>2</sup>
Mean-line	0.001152	0.00003	0.000508	Km/Km <sup>2</sup>
Tc	88.78128	15.30423	40.30977	h (heure)

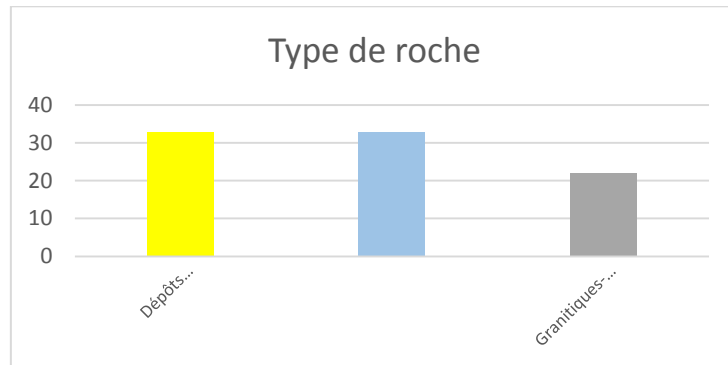


Figure 57: Distribution des types de roches par sous bassin dans le bassin du fleuve Cuanza

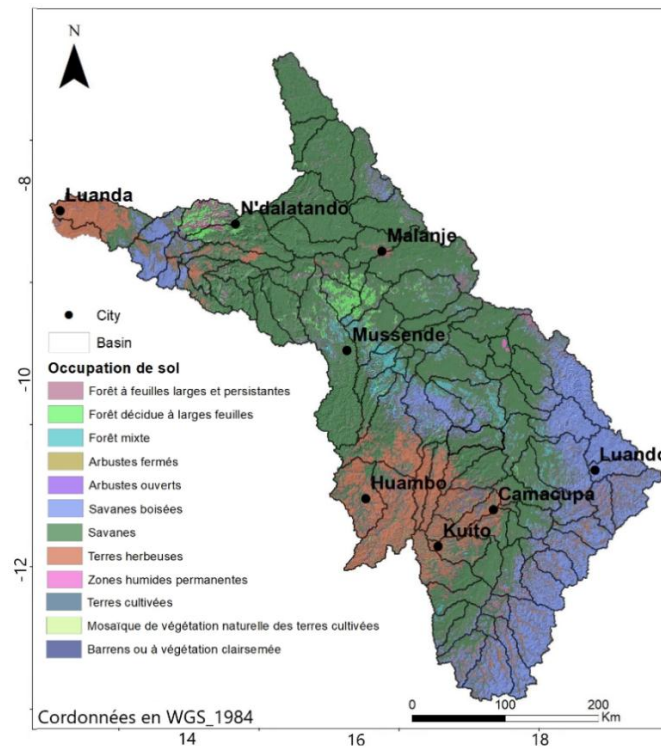


Figure 58: Distribution de l'occupation de sol dans bassin du fleuve Cuanza

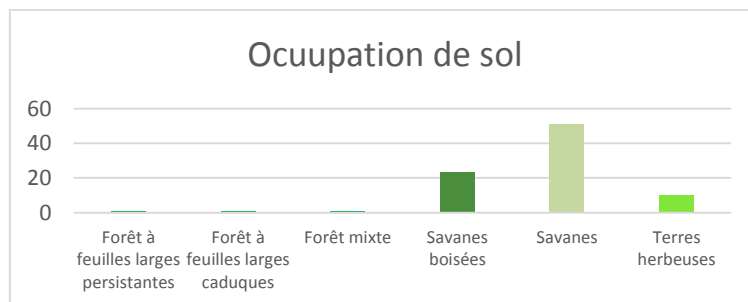


Figure 59: Distribution des occupations de sol dominantes par sous bassin dans bassin du fleuve Cuanza.

### **III Premières constatations et traitement des données : Approche unifactorielle descriptive**

#### **1 Introduction :**

Cette partie du chapitre concerne d'une part les analyses et les interprétations réalisées sur base de l'identification et l'observation des caractéristiques du réseau de drainage et ses relations avec le relief, géologie et géomorphologie des trois zone d'études. Et d'autre part, on présentera les types de réseau de drainage, leur distribution, structuration et caractérisation dans chaque zone d'études. L'analyse réalisée ici se base principalement sur l'observation de la distribution de la densité de drainage, vu que son importance dans la compréhension du paysage est reconnue depuis longtemps, au moins pour le fait qu'elle contrôle la texture du relief et en tant que propriété unique du paysage, qui met en relation les processus géomorphiques sous-jacents agissant dans un bassin versant avec sa topographie (Glock, 1932; Douglas, 1977; Dunne, 1980 ; Sangireddy et al., 2016).

L'interaction de la distribution du réseau de drainage avec les structures géologiques de surface et sous-sjacentes a été aussi étudiée à travers l'étude et l'interprétation de la densité des linéaments géologiques, la densité de fracturation et la densité de déformation, quand ces deux derniers paramètres sont disponibles. La confrontation de ces observations et analyses permet de nuancer les possibles relations entre le réseau de drainage et le relief, la géologie et géomorphologie des bassins.

Il est a noté que la région de l'Anti-Atlas Oriental constitue la zone d'étude pilote et de référence de cette recherche, on y présente ainsi plus de détail sur les possibles relations et interactions entre le réseau de drainage et les caractéristiques des bassins, par rapport au bassin versant de la Durance et le bassin du fleuve Cuanza. Néanmoins, dans ces derniers les observations et les analyses réalisées et présentées aussi dans cette partie, fournissent suffisamment de constatations et informations mettant en évidence ces différentes relations et interactions. Cette partie a pour objectif de vérifier les premières hypothèses obtenues par observation du réseau de drainage et qui ont constituées la base pour les traitements et calculs mathématiques dans le chapitres suivant afin de déterminer les processus qui contrôlent les différentes interactions entre le réseau de drainage et les composantes du paysage et aussi pour mieux caractériser les différents types de réseau de drainage.

## 2 Distribution et caractérisations du réseau de drainage dans la région de l'Anti-Atlas Oriental :

### 2.1 Distribution de la densité du réseau de drainage :

La distribution spatiale de la densité de drainage obtenue sur la région de l'Anti-Atlas Oriental (Figure 60-b) montre une grande variation dans la distribution sur l'ensemble des six secteurs géologiques. On remarque que la plus grande densité se trouve dans le secteur Sud-Ouest de la région d'étude qui est le secteur des Banis, elle comprend le bord méridional de Saghro, la cuvette de Tazzarine, les structures semi-tubulaires du premier et deuxième Bani et leurs dépressions respectives, les Feijas, encadrant la ville de Zagora au Nord et Nord-Est et les différentes structures plissées et/ou cuvette. On remarque aussi une forte à Moyenne densité de drainage au Sud dans le domaine de Kem-Kem, dans le bassin Maider, au Nord-Est dans le bassin Sud-Tafilalt et aussi dans le bord Nord de la Boutonnière de Saghro. Les secteurs axes Saghro-Ougnat et Ougnat-Ouzina montrent une faible densité de drainage par rapport aux autres secteurs de la région. L'analyse des demis roses diagrammes de direction des fréquences et des longueurs mesurées de l'orientation du réseau de drainage (Figure 60-c) montrent quarts directions principales d'orientation du réseau de drainage qui sont par ordre croissant de grandeur, NW-SE, NNW-SSE, NE-SW et E-W.

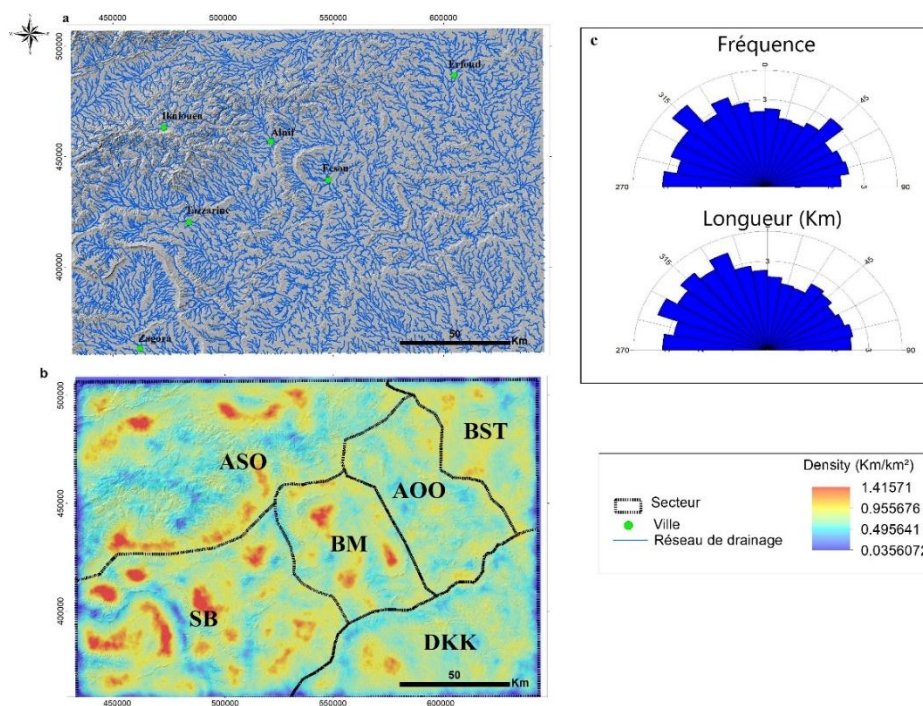


Figure 60: (a) Carte du réseau de drainage de l'Anti-Atlas oriental extrait à partir du modèle numérique de terrain de 30 mètre de résolution avec un seuil de 2000. (b) Distribution de la densité de drainage de l'Anti-Atlas oriental. (c) Rose diagramme de direction d'orientation du réseau de drainage.

## **2.2 Identification et caractérisations des types de réseau de drainage dans l'Anti-Atlas Orienta :**

Quatre types de réseaux de drainage ont été identifier dans l'Anti-Atlas Oriental (Annexe II, Figure 120, Figure 121, Figure 122, Figure 123), les types treillis, rectangulaires, parallèles et dendritiques (Figure 61-a). Le type de réseau rectangulaire avec un nombre de 54 réseaux (Figure 61-a), sont localisés exclusivement dans les secteurs qui présentent une forte densité de fracturations (Figure 62)c'est-à-dire sur le secteurs axe Saghro-Ougnat (Figure 64-a). On trouve aussi des réseaux rectangulaires le long du passage de l'Accident Majeur Anti-Atlasique sur le secteur des Banis où ils se localisent exactement au Nord-Est et au Sud-Ouest d'Oumjrane (Figure 61-a). Les cours d'eaux des réseaux rectangulaires dans ces secteurs sont connectés normalement entre eux et disposés à angles aigus formant des modèles en Zigzag. L'arrangement spatial et l'agencement de ces cours d'eaux sont associés à celui des failles et fractures. Ceci est très visible dans le secteur axe Saghro-Ougnat (Figure 61-a, Figure 61-b). les roses diagrammes de direction d'écoulement des réseaux rectangulaires affichent des directions principales NE-SW, ENE-WSW, E-W et NW-SE (Figure 61-b), similaire à celles des structures géologiques plissées et des failles (Figure 62-b).

Les réseaux de type treillis sont les plus dominants dans l'Anti-Atlas Oriental avec un nombre de 94 réseaux. Il se trouvent en grand nombre dans les secteurs qui présentent une forte déformation des structures géologiques avec la présence d'énormes affleurements plissés et des structures tectoniques importantes (Figure 62-a) (Figure 63) adoptant les orientations des structures principales de l'Anti-Atlas, c'est-à-dire NE-SW, E-W et NW-SE (Figure 62-c). C'est le cas du secteur axe Ougnat-Ouzina (Figure 61-a), où on remarque que les modèles en treillis se trouvent aux alentours et sur les flancs des principaux plis anticlinaux et synclinaux de ce secteur (Figure 61-a et Figure 64-c). On observe aussi des types treillis sur le flanc Ouest et Sud du synclinal de Fesou dans le secteur du bassin Maider (Figure 61-a). Cependant les réseaux de drainage en treillis les plus remarquables sont ceux localisés au Sud-Ouest de la zone d'étude dans le secteur des Banis, sur les flancs des structures monoclinales du première et deuxième Bani (Figure 61-a et Figure 64-d). Les demis roses diagrammes de direction d'écoulement de ces types de réseaux (Figure 61-b) montrent des directions principales d'orientation WNW-ESE, NW-SE et E-W identiques à celle des axes de plis et une direction principale NE-SW partagée entre les plis et les failles cartographiées (Figure 62-b).

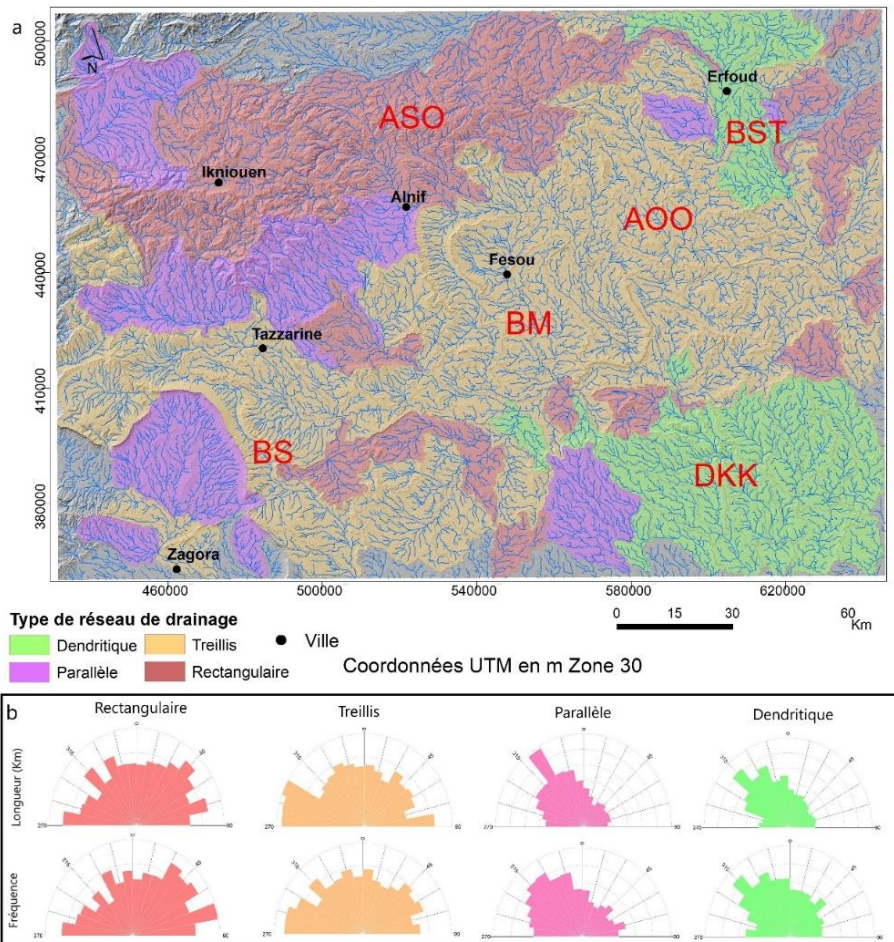


Figure 61: (a) : Carte des différents modèles de réseau de drainage identifiés dans la région d'étude superposés sur l'image d'ombrage du modèle numérique de terrain ASTER-GDEM,(b) Quatre roses diagrammes de direction ont été réalisés pour chaque modèle de réseau de drainage.

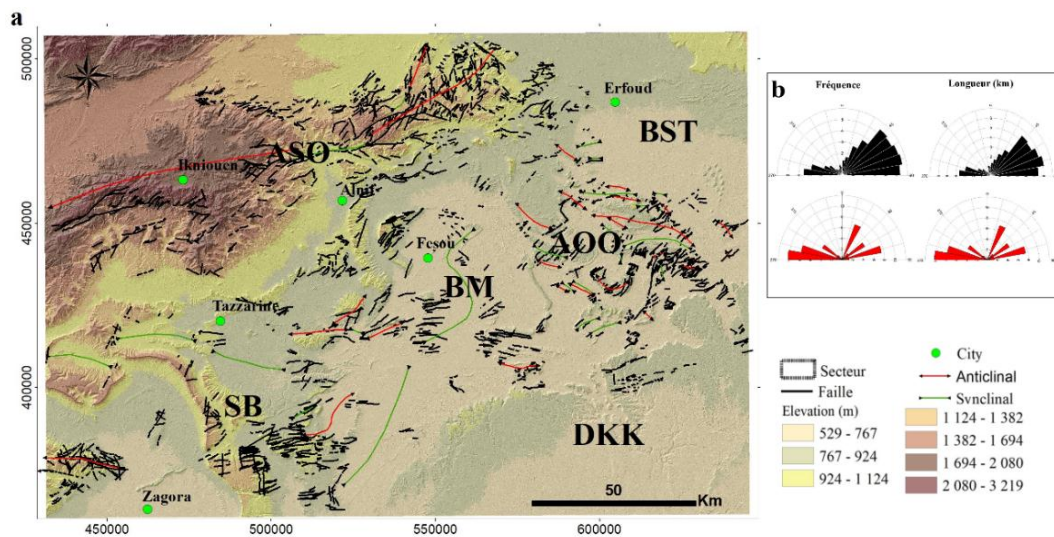


Figure 62: (a) Carte des failles et des axes de plis extraits des cartes géologiques à l'échelle 1/200000 couvrant l'AAO. (b) Roses diagrammes de fréquence et de longueur en des failles et des axes de plis respectivement en noir et en rouge.

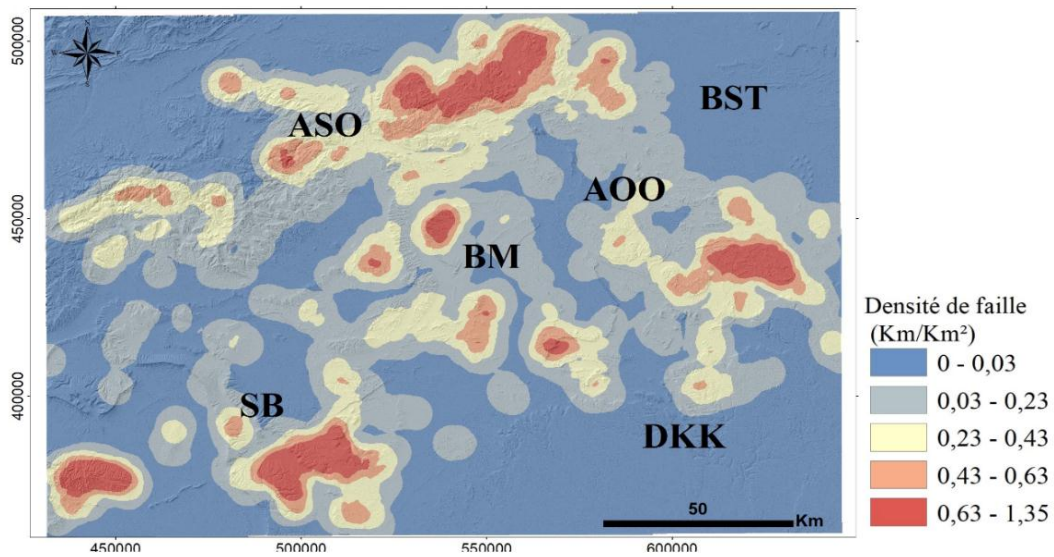


Figure 63 : Carte de distribution de densité de fracturation dans l'Anti-Atlas Oriental

Dans la l'Anti-Atlas Oriental, les types de réseaux parallèles dont on a identifié 33 (Figure 61-a), sont localisés au Nord-Ouest sur le bord méridional de la boutonnière de Saghro, à l'Est de la boutonnière de l'Ougnat et au Sud-Ouest de la zone d'étude sur l'énorme escarpement du Feijas interne Nord-Est de la ville de Zagora dans le secteur des Banis (Figure 65-a,b). On remarque que les roses diagrammes de direction d'écoulement des modèles de réseaux parallèles ont comme directions principales NW-SE, NNW-SSE et WNW-ENE (Figure 61-b). Par ailleurs, on a identifié 39 types dendritique (Figure 61-a), localisés particulièrement au Nord-Est dans le secteur bassin Sud-Tafilalt et au Sud-Est dans le domaine de Kem Kem (Figure 65-a,b). Les roses diagrammes de direction d'écoulement des réseaux dendritiques sont identiques à ceux des réseaux parallèles (Figure 61-b).

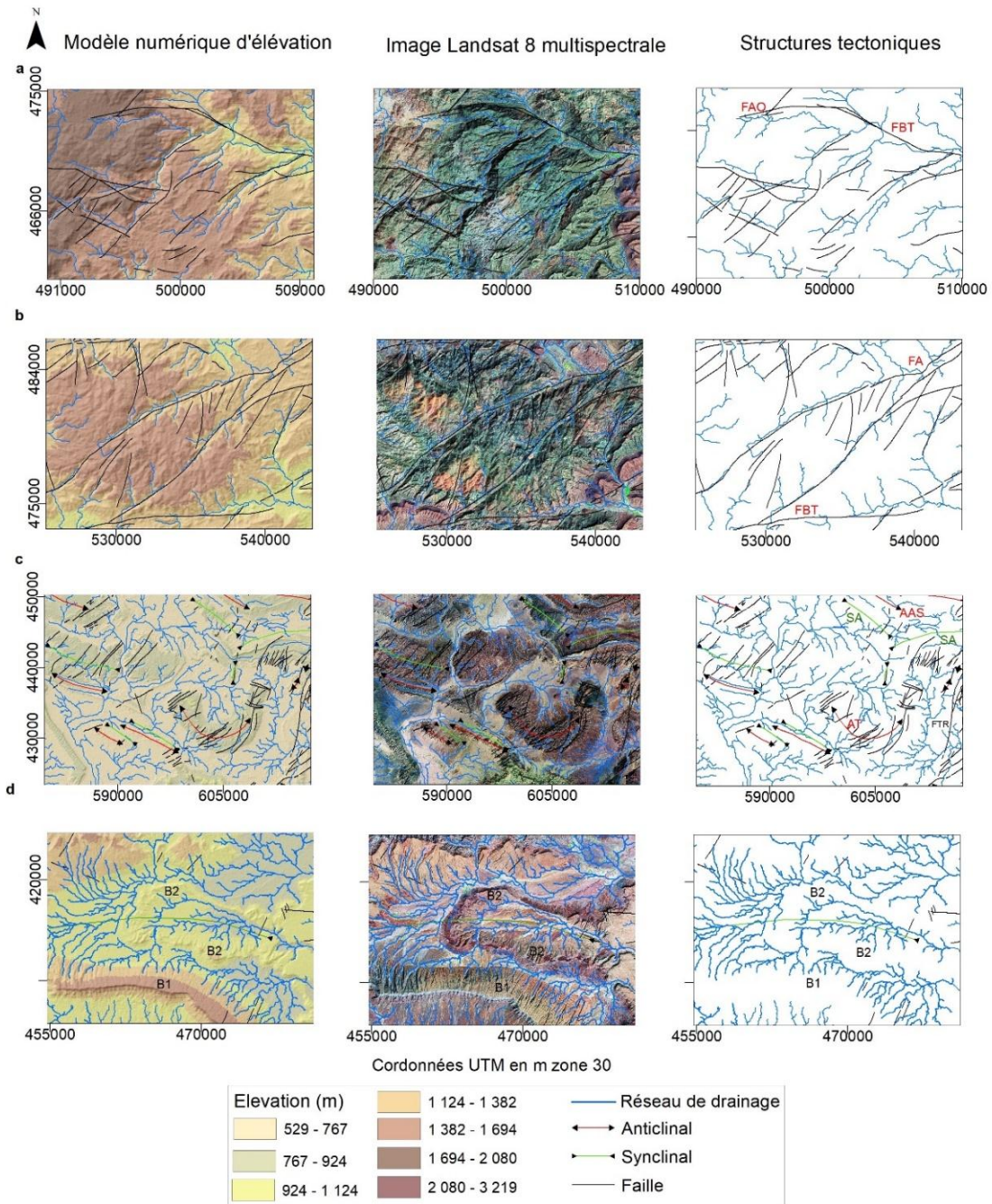


Figure 64: Exemples de relations entre les principales caractéristiques structurales (failles, synclinaux, anticlinaux) et les réseaux de drainage dans (a et b) le secteur de l'axe Saghro-Ougna, (c) secteur de l'axe Ougnat-Ouzina, et (d) le secteur du Bani. FAO = faille Assif n'Oussif ; FBT = faille Boulghzazil-Tinifift ; FA = faille Akrouz ; FTR = faille Tizi n'Ressas ; ASA = anticlinal de Shayeb Arras ; SA = Syncline d'Amessoui ; AT = Anticline de Tijekht ; B1 et B2 = premier et deuxième Banis. (Voir les emplacements des types dans la Figure 67).



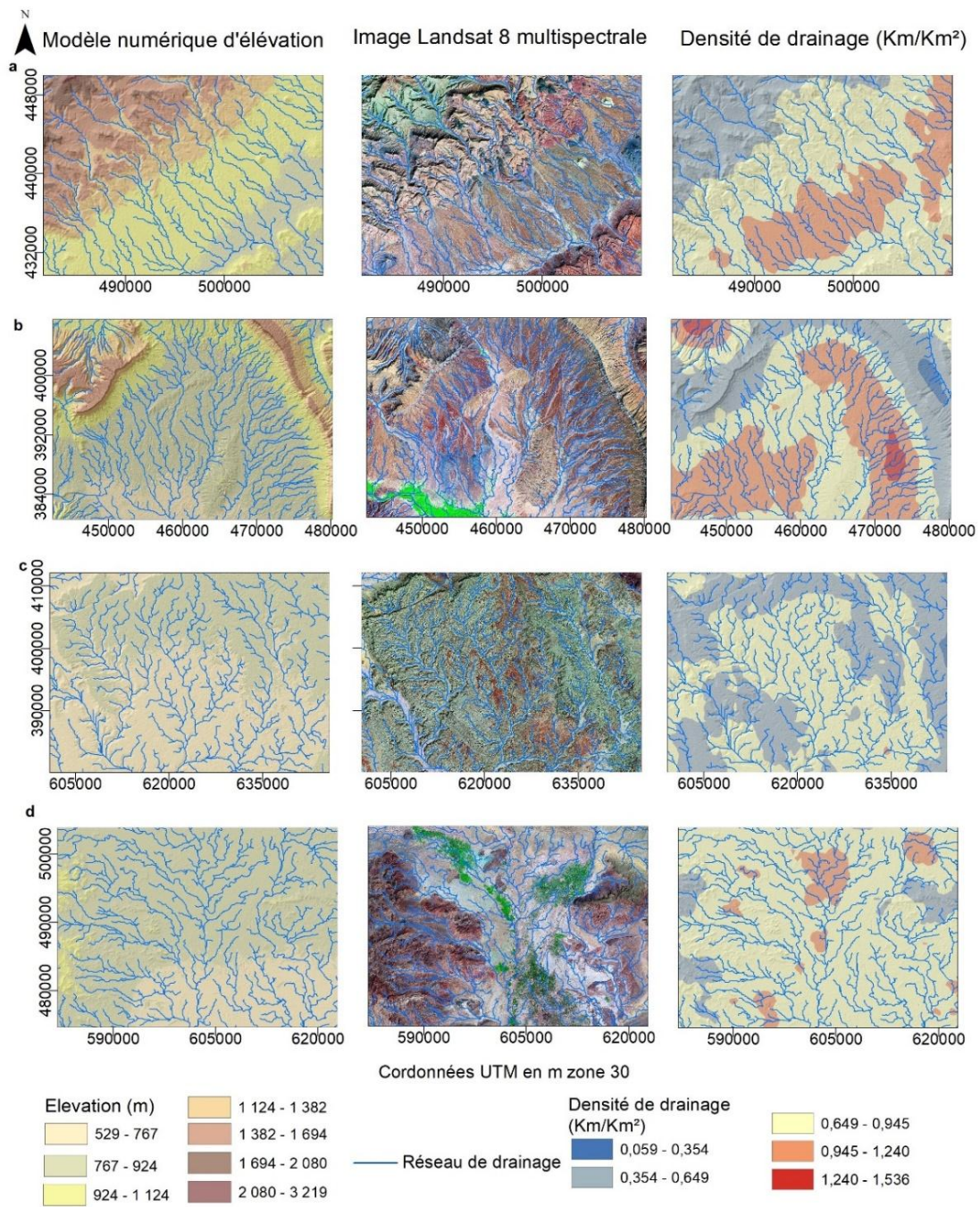


Figure 65: Exemples des relations entre les schémas de drainage parallèles et dendritiques, le gradient de pente, les structures géologiques et la densité de drainage. (a) Réseau de drainage parallèles sur le bord ouest de la boutonnière de Saghro dans l'axe Saghro-Ougnat ; (b) Réseau de drainage parallèle au nord de la ville de Zagora dans l'escarpement de la Feija dans le sud-ouest du secteur des Banis(c) Réseau de drainage dendritique dans le secteur domaine de Kem-Kem, (d) Réseau de drainage dendritique dans le secteur bassin du Sud-Tafilalt. (Voir les emplacements des types dans la Figure 67).

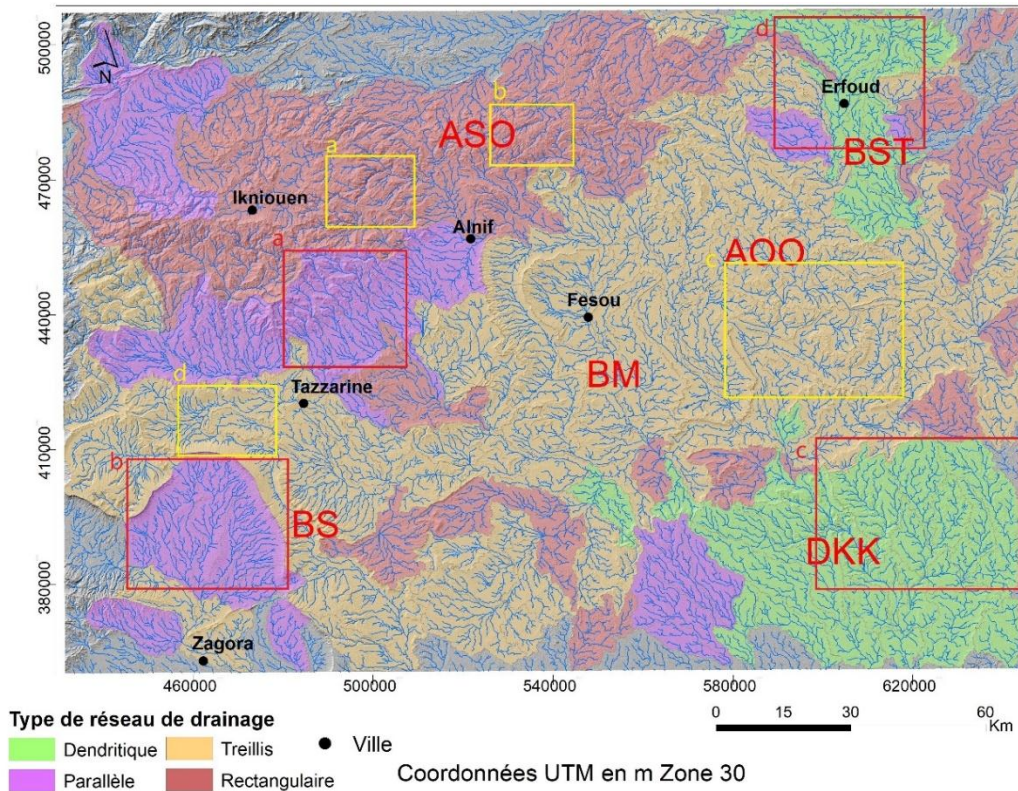


Figure 66: Localisation des exemples des types de réseau de drainage, en jaune ceux représentés dans la Figure 65, et en rouge ceux représentés dans la Figure 66.

### 2.3 Relations entre réseau de drainage et structures géologiques sous-jacentes dans la région de l'Anti-Atlas Oriental :

Les résultats obtenus sur la densité de drainage (Figure 60-b) et la densité des failles cartographiées (Figure 62-b), nous ont permis de remarquer que les zones où on a une faible densité de drainage correspondent aux mêmes zones où on a une forte densité de failles, qui sont exclusivement des zones de cisaillements et d'intense déformation, on parle ici des deux secteurs, l'axe Saghro-Ougnat et l'axe Ougnat-Ouzina. D'autre part on remarque sur les roses des directions que le réseau de drainage montre une direction principale NE-SW (Figure 60-c) similaire à celle des failles (Figure 62-c), les roses diagrammes montrent aussi que les axes de plis ont comme directions principales NW-SE et WNW-ESE qui sont aussi observés sur le réseau de drainage, quant à la direction E-W elle est en commun entre le réseau de drainage, les structures plissées et les failles.

Cette relation entre faible densité de drainage et forte densité des failles ainsi que la similarité dans les directions azimutales entre le réseau de drainage et les structures géologiques et tectoniques peut être expliquée par le fait que dans les zones de cisaillements, les cours d'eau durant leurs parcours cherchent à suivre en premier lieu les zones de faiblesses à savoir les failles, les fractures et les vallées d'angle de faille (Figure 67-a) (Stokes et al., 2008; Stokes et

Mather, 2015; Radaideh et al., 2016). Ces zones de faiblesse représentent des milieux de stockage, de recharge et des conduits naturels des eaux de surfaces et là où l'eau peut s'écouler avec le moins d'énergie possible dans ces zones de climat aride (Figure 67-b). Ainsi les cours d'eau ne s'écoulent pas de manière libre mais on les trouve confinés au niveau des zones fracturées et s'écoulent sur les couloirs des failles d'où la faible densité du réseau de drainages dans ces zones de cisaillement et l'adoption de la direction d'orientation principale des failles et des fractures par les cours d'eau. En revanche la faible densité des failles dans les secteurs bassin Sud-Tafilalt et le domaine de Kem-Kem (Figure 60-b) a permis aux cours d'eau de s'écouler dans toutes les directions occupant tout l'espace, en raison de l'absence d'un contrôle structural par des failles et fractures ou d'affleurement rocheux prééminent. Ceci a conduit à une forte densité de drainage dans ces derniers secteurs.

Les résultats obtenus sur les types de réseau de drainage dominants de l'Anti-Atlas oriental (Figure 61-a), montrent que les types rectangulaires sont localisés en majorité dans les zones de forte densité de failles, où ils s'écoulent le long des couloirs de leurs failles majeurs (Figure 67), comme la faille de Tizi n'Boujou, La faille de Boulghzazil-Tinifift, la faille d'Akerouz et la faille de Tamerghout (Figure 64-a et Figure 64-b), conduisant ces réseaux à adopter leurs orientations. Les demis roses diagrammes de directions (Figure 61-c et Figure 62-c) respectivement des directions d'écoulement des réseaux de drainages rectangulaires et directions d'orientations des failles, confirment cette dernière constatation en affichant les mêmes directions principales, NE-SW et E-W. D'autres réseaux de drainages rectangulaires se sont formés au Nord-Ouest et au Sud-Ouest d'Oumjrane on s'adaptant à un ensemble de failles dans le secteur des Banis sur le passage de l'accident majeur Anti-Atlasique (Figure 61-a).



Figure 67: (a) représentent le contact des cours d'eau avec les zones de faiblesse dans les formations de la boutonnière de l'Ougnat, (b) Source située dans le cœur de la boutonnières de l'Ougnat.

La dominance des réseaux de drainage en treillis dans l'anti-Atlas Oriental et leur présence sur différents secteurs (Figure 61-a) est en accord avec la nature géomorphologique de l'Anti-Atlas Oriental, caractérisées par la dominance des structures plissées, semi-tabulaire et par un relief de type appalachien (Robert-Charrue, 2006; Baidder et al., 2016). En effet la présence intense des réseaux de drainage en treillis sur le secteur axe Ougnat-Ouzina, le bassin Maider et le secteur des Banis (Figure 61-a) est un indicateur et témoin de l'intense déformation et activité tectonique qu'a subi cette partie de l'Anti-Atlas. Ces types treillis mettent en évidence dans l'axe Ougnat-Ouzina la succession spectaculaire des structures anticlinales et synclinales d'âge cambrien et ordovicien (Baidder et al., 2016) (Figure 64-c) par leur disposition le long des flancs de ces structures plissées. Dans le secteur bassin Maider les réseaux de types treillis se sont associés au structures plissées et semi-tubulaires des formations sédimentaire du Dévonien (Figure 68-a). Quant au secteur des Banis ils ont été formés en réponse à la géomorphologie exceptionnelle dans cette partie de l'Anti-Atlas oriental caractérisée par l'alternance des cuestas et des dépressions profondes (Figure 68-b), que les réseaux en treillis adoptent la disposition et l'orientation (Figure 64-d). L'analyse des roses diagrammes de directions (Figure 61-b et Figure 62-c) respectivement des types treillis et des axes des plis, affichent les mêmes directions préférentielles, renforçant les constations sur la relation des réseaux en treillis et le milieux de leur formation, en accompagnant les structures plissées et adoptant leur orientation WNW-ESW, NW-SE et E-W, et/ou en prenant naissance à partir des failles et fractures et s'orientant ainsi NE-SW, l'axe Ougnat-Ouzina est un exemple de ce couplage (Figure 64-c).

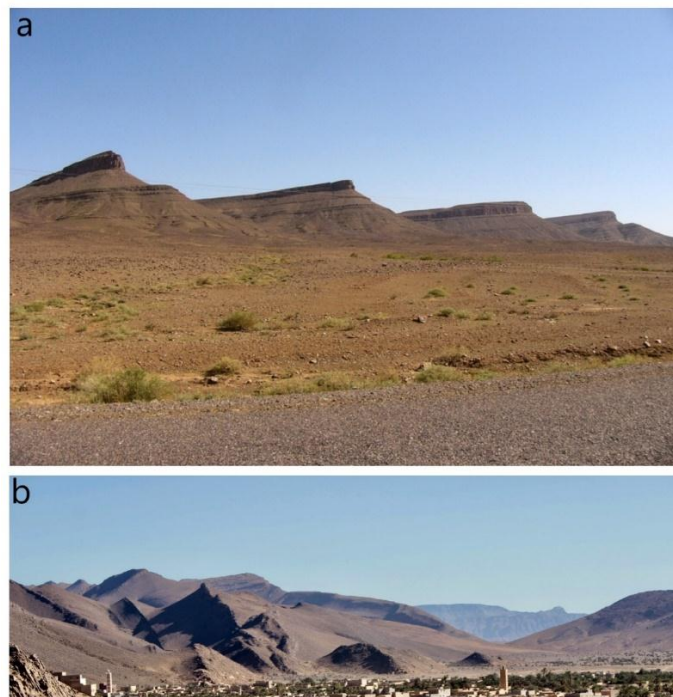


Figure 68: (a) Formations sédimentaires du Dévonien dans le secteur bassin Maider (b) Vue panoramique sur les formations du Banis.

Les réseaux dendritiques et parallèles sont souvent des indicateurs du contrôle de la pente et/ou l'absence d'un contrôle structural. Comme le cas du domaine de Kem-Kem, qui se caractérise par un faible gradient de pente (Figure 65-c,d), et l'absence de structures géologiques proéminentes (Figure 62). On a aussi réussi à localiser les zones de fort gradient de pente grâce à l'identification des réseaux de type parallèle, à savoir le bord méridional de la boutonnière de Saghro et l'escarpement de Faija au niveau de la ville de Zagora (Figure 65-a,b). L'analyse des roses diagrammes des directions d'écoulement des réseaux de drainages de type dendritique et parallèle (Figure 61-b) et ceux de la direction azimutale des failles (Figure 62-b), confirment cette absence de contrôle structural, en montrant une divergence dans leurs directions respectives.

#### **2.4 Influence des événements géologiques sur la distribution du réseau de drainage**

L'Anti-Atlas oriental est caractérisé par une grande variété de structures géologiques proéminentes et distinctes, dont l'âge varie du Précambrien au Quaternaire et qui ont subis plusieurs événements géologiques et encaissés plusieurs contraintes d'orientation différentes. Ces structures montrent des failles et accidents majeurs relatives à chacun de ces événements géologiques (Robert-Charrue, 2006; Baidder et al., 2016). Ceci a été observé et interprété à travers les images satellitaires Landsat 8 OLI et Sentinel 2-A et les 5 cartes géologiques du 1/200000 qui couvrent l'Anti Atlas oriental (Figure 69) (Hinderleyer et al., 1977; Clariond et al., 1982; Destombes and Hollard, 1986; Du Dresnay et al., 1988; Choubert et al., 1989) et les données géologiques fournis par l'USGS.

Sur cette base on a essayé d'évaluer le changement de la direction d'écoulement à travers les formations géologiques de différents ères et âges géologiques (Figure 70). Nous avons identifié cinq familles de réseau de drainage, ceux qui se développent sur le socle Précambrien, ceux identifiées sur les séries sédimentaires Paléozoïques, sur le Mésozoïque inférieur, le Néogène inférieur et ceux qui sont formés dans les dépôts Quaternaires. Les résultats obtenus sur les roses diagrammes des fréquences et longueurs mesurées de chaque famille de réseau de drainage montrent que la direction d'écoulement N-S représente une direction secondaire du Précambrien jusqu'au Quaternaire, Cependant elle est plus visible dans le Mésozoïque inférieurs et le Néogène inférieur situées exclusivement dans le secteur domaine Kem-Kem, ceci peut être expliqué par l'absence d'un contrôle structural qui n'a pas pu imposer ses directions, permettant au gradient de pente dans ces zones, qui adopte une orientation N-S, d'exercer un contrôle total sur l'orientation du réseau de drainage (Figure 71).

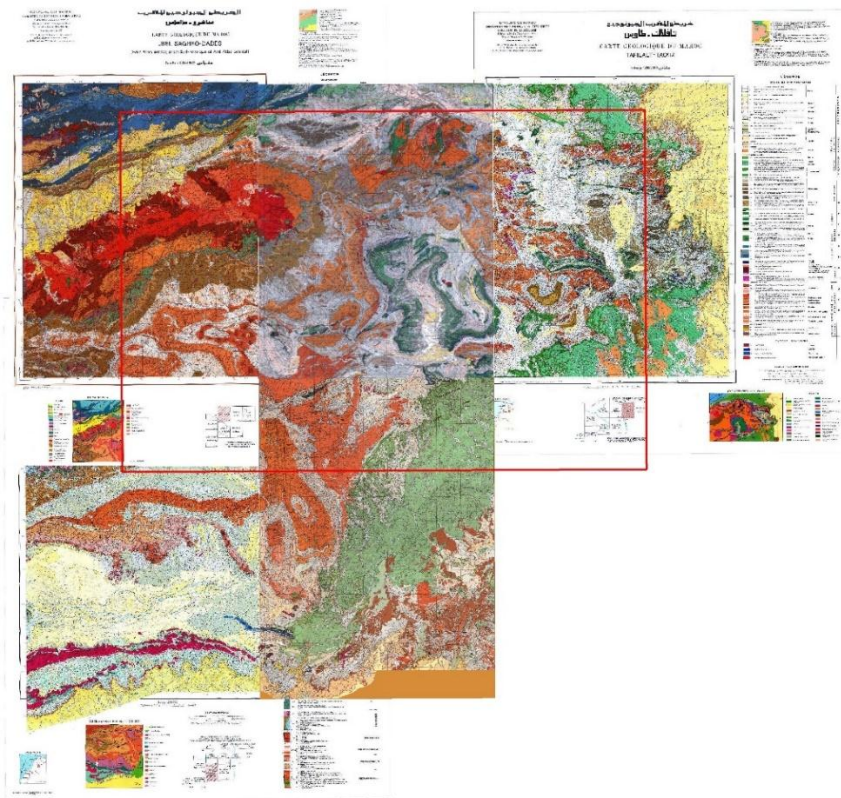


Figure 69: Les cartes géologiques 1/200000 qui recouvrent presque la totalité de la zone d'étude, qui est représenté par le cadre rouge

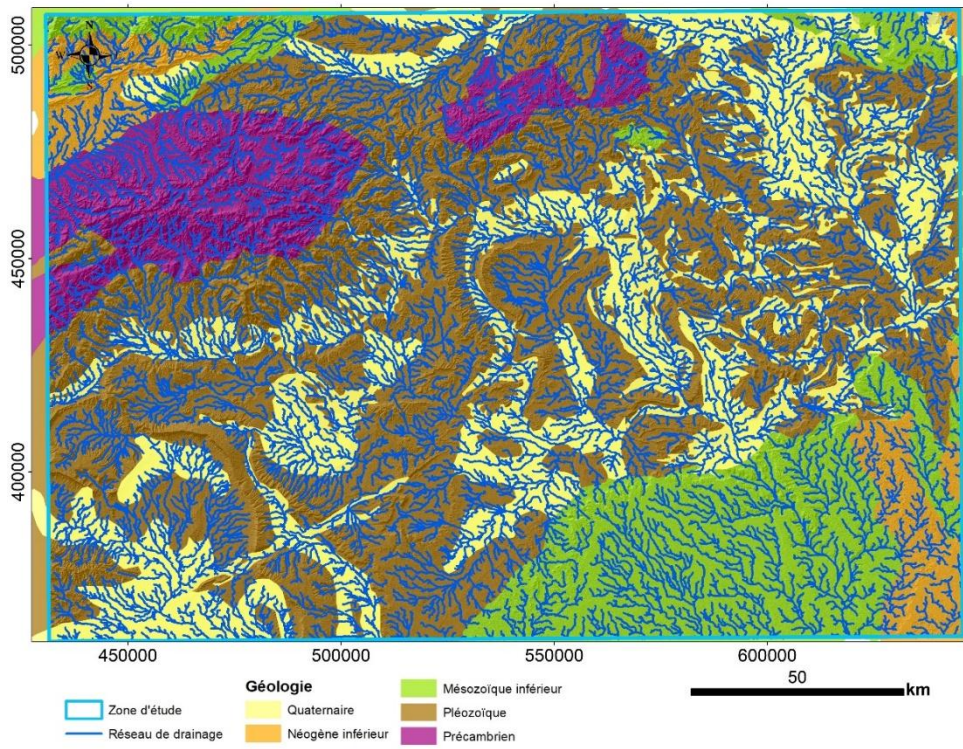


Figure 70: Distribution du réseau de drainage sur les principaux ère et âge géologiques de l'Anti-Atlas Oriental.

La direction d'écoulement E-W est aussi observée sur tous les âges, mais de façon mineur dans le Mésozoïque inférieur et le Néogène inférieur, la direction E-W est observée sur les structures semi-tubulaires Paléozoïque dans le secteur des Banis et les structures plissées dans le secteur axe Ougnat-Ouzina, en effet la direction E-W représente une des directions principales des structures Anti-Atlasique (Robert-Charrue, 2006 ; Baider et al., 2016). La direction d'écoulement NE-SW représente la direction principale d'écoulement dans le Précambrien et le Paléozoïque, nous pouvons expliquer cette direction par la présence d'accidents majeurs et une grande densité de failles sur le socle Précambrien ainsi que les affleurements plissés Paléozoïques qui ont une direction principales NE-SW, cette direction est observée dans le Mésozoïque inférieur mais de façon mineur, puis elle est repris faiblement par le réseau de drainage dans le Néogène inférieur et le Quaternaire, mais elle reste très réduite par rapport au reste des directions.

Quant à la direction d'écoulement NW-SE elle est très visible sur l'ensemble du précambrien jusqu'au quaternaire. Sur les structures Précambriennes et Paléozoïques elle représente une direction principale presque dans le même ordre de grandeur que la direction d'écoulement NE-SW. Cependant la direction NW-SE devient prédominantes par rapport aux autres directions à partir du Mésozoïque inférieur jusqu'au Quaternaire où elle représente la direction principale d'écoulement. A partir des observations sur la direction NW-SE nous assumons que dans Précambrien et le Paléozoïque la direction NW-SE est en relation avec des failles majeures et des structures plissées survenus lors de l'évènement Ougartien (Baider et al., 2016) quant au Mésozoïque inférieur, Néogène inférieur et Quaternaire la direction NW-SE est observée dans l'orientation du gradient de pente.

Les directions d'écoulement principalement NE-SE, NW-SE et E-W sont dû à l'adoption du réseau de drainage actuelle l'orientation des anciennes failles du sous-sol dans le Précambrien et le Paléozoïque, se sont failles héritées qui traversent le socle, et qui ont opérées durant la rupture de la chaîne Pan-Africaine et durant le rifting Cambrien, ils ont été réactivés durant la sédimentation Paléozoïque comme failles normales avant d'être inversées durant l'évènement Hercynien. Lors des évènements post-Hercynien une grande partie de ces failles ont été réactivés et elles constituent toujours des zones de faiblesses et de sismicité (Frizon de Lamotte et al., 2008 ; Soulaïmani, 2014 ; Gouiza et al, 2017).

Par contre durant le Mésozoïque inférieur et le Néogène inférieur, l'Anti-Atlas oriental n'a enregistré aucune déformation (Robert-charrue, 2006) à part la réactivation de ces failles héritées. Cependant cette période s'est caractérisée par la succession des évènements de subsidence et de soulèvement et c'est ce dernier évènement de soulèvement qui a donné la topographie actuelle de l'Anti-Atlas oriental caractérisée par une altitude relativement élevée

et un fort gradient de pente orienté NW-SE que le réseau de drainage a adopté à partir du Mésozoïque inférieur jusqu'à l'actuelle. Ce dernier soulèvement est dû d'une part à la collision alpine et d'autre part à une anomalie thermique récente (Robert-Charrue, 2006 ; Soulaïmani, 2014 ; Gouiza et al, 2017). Ainsi le réseau de drainage passe de l'influence des structures géologiques dans le Précambrien et le Paléozoïque à l'influence du gradient de pente à partir des événements post-Hercynien, c'est-à-dire du Mésozoïque inférieur jusqu'au Quaternaire. En d'autres termes, le changement au cours des temps géologiques de la direction principale du réseau de drainage est un indicateur du passage d'un événement géologique à un autre qui a conduit à un changement du facteur d'influence sur le réseau de drainage.

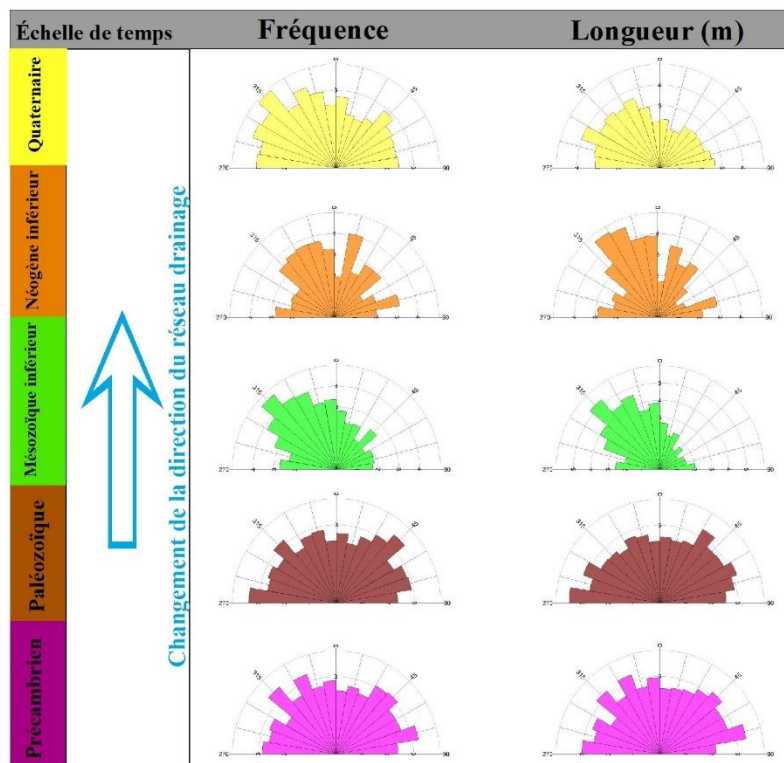


Figure 71: Changement temporel de la direction azimutale du réseau de drainage dans l'Anti-Atlas oriental

### 3 Distribution et caractérisations du réseau de drainage dans le bassin du fleuve Cuanza

#### 3.1 Réseau de drainage et structuration géologique

Sur la bassin du flauve Cuanza la densité du réseau de drainage est généralement élevée sur l'ensemble du bassin versant (Figure 72). Cependant on remarque une vaste zone de forte densité de drainage dans la région centrale du bassin Cuanza, orientée NW-SE, plus exactement au nord-ouest de Luando, à l'est et sud-est de Mussende et au sud-est de Malanje on parle ici de l'unité structurale de la zone des sables (Montero, 1961). Une autre zone



densité de drainage élevée est localisée dans la partie amont du bassin Cuanza exactement vers son embouchure au sud-est de Luanda et au piedmont de la limite nord-ouest du massif central. Ces mêmes zones correspondent dans la carte de densité de linéaments géologiques à des zones de très faible densité de linéaments. De point de vue géologique, ces zones contiennent des dépôts continentaux d'origine récente qui recouvrent les terrains anciens dans la partie orientale de l'Angola et du bassin Cuanza (Figure 17 et Figure 18),

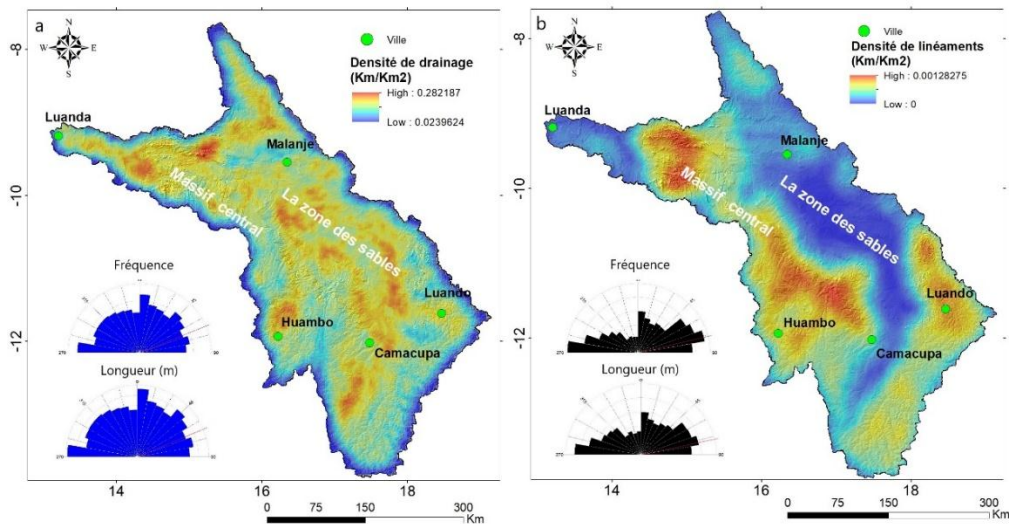


Figure 72: (a) et (b) représentent respectivement la distribution de la densité de drainage et la densité des linéaments géologiques dans le bassin du fleuve Cuanza avec les rose diagramme de direction du réseau de drainage et des linéaments respectivement en bleu et en noir.

Cette relation entre forte densité de drainage et faible densité de linéaments géologiques et les régions dans les zones de sables, comme explique dans la partie précédente sur l'Anti-Atlas Oriental, vient d'une part, du fait que l'absence d'un contrôle structural par des failles, des structures géologiques de forme linéaire ou d'affleurement rocheux proéminent des terrains plus anciens (Figure 73), a permis aux affluents du réseau de drainage de s'écouler dans toutes les directions de cette vaste zone, ne subissant que l'influence de la pente. D'autre part les terrains sédimentaires dans cette zone de sables, sont tous des dépôts alluviaux et colluviaux quaternaires sous forme de sables, d'argile, de gravillons et de graviers (Figure 73-a,b), représente une lithologie uniforme traduisant l'absence d'une érosion différentielle, le réseau de drainage donc traverse et creuse uniformément les terrains dans toutes les directions.



Figure 73: (a) et (b) Aperçus sur de la zone des sables à l'ouest de Malenji. (c) et (d) Le fleuve Cuanza au sud de la capitale Luanda dans la commune de Calombo, le bas Cuanza.

Par ailleurs, les zones de forte densité de linéaments géologiques sont localisées particulièrement dans les régions de haut relief qui représentent le socle précambrien dans le Massif central, à savoir au nord-ouest du bassin, au niveau et au sud de la ville N'dalatando, dans la partie central-est du bassin, plus exactement au nord et nord-est et à l'est de la ville de Huambo. Dans ces dernières zones la forte densité de linéaments géologiques est une réponse aux formations les plus anciennes qui affleurent dans le bassin Cuanza (Figure 17 et Figure 18). Des densités élevées à moyenne de linéaments sont localisés au sud et sud-ouest du bassin versant, sur des dépôts tertiaires composés de grès quartzitique et des roches magmatiques mésozoïques misent en place par des activités tectoniques et magmatiques au cours de cette période. Sur l'ensemble de ces dernières zones on a un faible à moyenne densité de réseau de drainage.

Cette relation entre relief élevé, faible densité de drainage, forte densité de linéaments géologiques et les structures géologiques et tectoniques des formations anciennes du socle, est d'une part liée que les affluents durant leurs parcours cherchent à suivre en premier lieu les zones de faiblesses à savoir les failles, les fractures, les vallées d'angle de faille et les limites litho-stratigraphiques, comme cela été observé dans l'Anti-Atlas Oriental. D'autre part les zones de hauts reliefs s'associent avec des pentes latérales raides qui sont produites et maintenues dans des zones favorisant l'approfondissement du chenal (Melton, 1957 ; Sangireddy et al., 2016). Dans ces zones, l'eau qui s'infiltré dans le sol par infiltration n'a aucune possibilité d'éroder la pente et de contribuer à la charge du chenal, mais émerge directement dans le chenal et est immédiatement disponible pour l'érosion de celui-ci. Ces

relations ont été constatées par Melton (1957) sur base de corrélation entre plusieurs variables dont le rapport de relief, le type de roche, la densité de drainage et le gradient de pente moyenne, et qui ont été par la suite confirmées par Sangireddy et al (2016).

Les roses diagrammes de direction obtenus sur les résultats des linéaments géologiques identifiées sur le bassin du fleuve Cuanza (Figure 72), montrent la direction E-W comme direction principale, par ailleurs les directions N-S, NE-SW sont secondaires. Ces dernières directions correspondent sur l'ensemble de l'Angola aux assemblages archéens qui montrent les mêmes tendances (Schlüter, 2008), ces directions sont aussi responsables des principales structures morphologiques de l'Angola et particulièrement sa limite Sud-ouest (Lopes et al., 2016). Il est à noter que les directions N-S et NE-SW, sont considérées comme des directions majeures dans l'Angola, leur faible identification dans le bassin du fleuve Cuanza est du probablement d'une part à la faible résolution du modèle numérique de terrain par rapport à la superficie du bassin et d'autre part à limitation des méthodes automatiques dans leur identification. Par ailleurs, on observe sur les roses diagrammes de direction du réseau de drainages, que les directions E-W, N-S et NE-SW sont les directions principales. Bien qu'il existe des différences dans les orientations principales entre le réseau de drainage et les linéaments géologiques, ils restent tout de même similaires, ce qui indique que les linéaments géologiques dans le bassin du fleuve Cuanza constituent des zones privilégiées pour le ruissellement des eaux de surface, l'incision fluviale et probablement la percolation de l'eau vers le bas lors des précipitations.

### **3.2 Identification et caractérisations des types de réseau de drainage dans le bassin du fleuve Cuanza.**

Sur les 88 sous bassins identifiés dans cette zone d'étude, on a déterminé 5 types de réseaux de drainage, le type dendritique, parallèle, rectangulaire, chevron et barbelé (Annexe IV: Figure 129, Figure 130, Figure 131), et qui sont réparties sur l'ensemble du bassin du fleuve Cuanza, de façon à s'associer avec le relief, la géologie et géomorphologie de cette zone (Figure 74-a). Sur cet ensemble on a déterminé 22 réseaux de type dendritique, ils sont localisés particulièrement dans l'unité structural de la zone des sables avec un seul réseau localisé dans l'embouchure du fleuve Cuanza. D'une part cette dernière zone avec sa faible densité de linéaments géologiques et le faible relief traduit l'absence de structure géologique proéminente susceptible d'exercer un contrôle structural sur le réseau de drainage, les roses diagramme de direction des réseaux dendritiques confirme ceci (Figure 74-b), en présentant une allure différente de celles des linéaments géologiques. D'autre part le type de la lithologie dominante, à savoir des dépôts des formations récentes particulièrement du Quaternaire,

offre un terrain avec une résistivité uniforme à l'érosion, les cours d'eau ainsi creusent uniformément ce dernier.

L'ensemble de ces conditions conduit à la formation du type dendritique, comme cela été observé sur l'Anti-Atlas Oriental et dans les travaux antérieurs (Zernitz, 1932; Parvis, 1950; Howard, 1967; Twidale, 2004; Radaideh et al., 2016 ; Bouramtane et al., 2020).

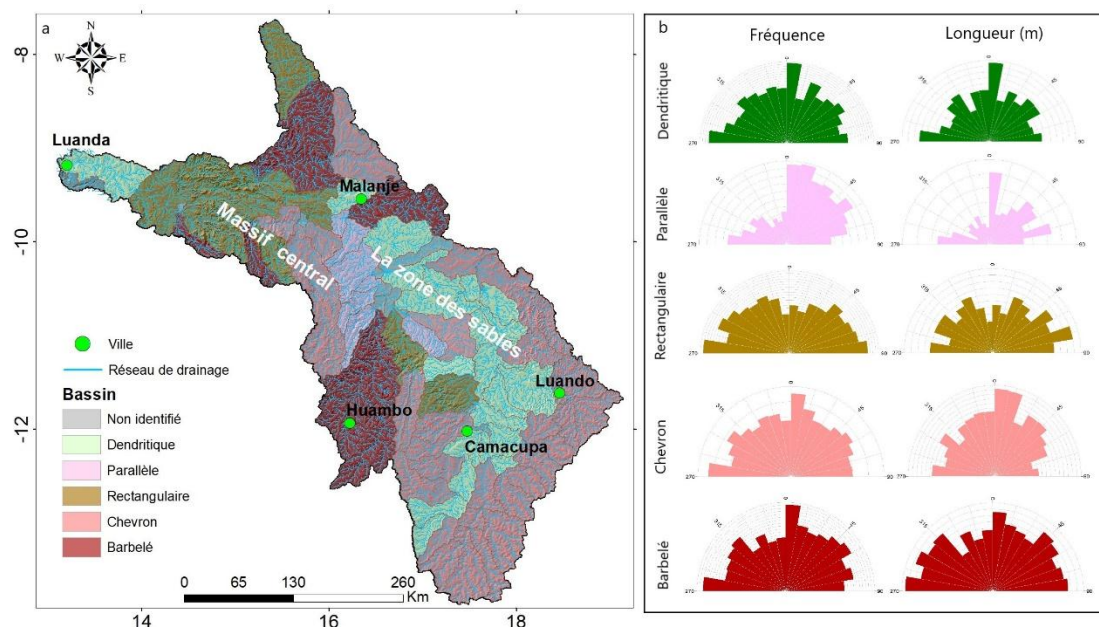


Figure 74: (a) Distribution des types de réseau de drainage dans le bassin du fleuve Cuanza. (b) Roses diagrammes des directions des différents types de réseau de drainage.

On a aussi identifié 8 bassins dont le réseau de drainage est parallèle, qui sont localisés particulièrement sur le bord oriental du Massif central, en prenant naissance dans les reliefs de cette unité structurale puis s'écoulent vers l'est pour se déverser dans les plaines de la zone des sables. Ces régions en plus de leur gradient de pente élevé, ils présentent des fortes densités de linéament géologiques qui sont souvent parallèles ainsi que des affleurements géologiques du précambrien parallèle à subparallèles aux quelles le réseau de drainage s'est associé (Schlüter, 2008 ; Lopes et al., 2016). Par ailleurs, les roses diagrammes de directions des réseaux parallèles, sont différents de ceux des linéaments géologiques, elles présentent en effet comme directions principales N-S et NNE-SSW, suivit des directions E-W et NE-SW comme direction secondaire, ce qui signifie que le contrôle structural sur les réseaux parallèles n'est pas aussi dominant que le control exercé par la pente. Egalement, Les bassins des réseaux parallèles présentent une moyenne à forte densité drainage, mais cette dernière n'est pas uniformément répartie dans le bassin.

Le bassin du fleuve Cuanza a connu plusieurs épisodes tectoniques et métamorphiques intenses qui ont engendré la formation est le développement de plusieurs structures

géologiques et tectoniques proéminentes, dont la plus importante est le bouclier d'Angola, qui se manifeste dans le bassin du fleuve Cuanza par l'unité structural du Massif central. Ces structures ont permis le développement de nombreux réseaux de drainage qui sont contrôlés par cette structuration géologiques. D'où l'identification de 18 réseaux de type rectangulaire et 8 réseaux de type barbelé. Ils sont localisés particulièrement dans la partie amont du bassin du fleuve Cuanza sur les reliefs du Massif central, ainsi que dans la partie Ouest du bassin, sur les reliefs sud de ce massif (Figure 74-a). Ces dernières régions sont caractérisées par des reliefs qui présentent les altitudes les plus élevés et le plus accidentés de la zone d'étude (Figure 75-a), une forte densité de linéaments géologiques et une lithologie caractériser par la dominance des roches granitiques et métamorphiques ce qui traduit des conditions de forte activités tectoniques et intense déformation (Figure 75-b). Les roses diagrammes de directions de ces deux types de réseaux sont semblables à celles des linéaments géologiques (Figure 74-b). Ceci affirme que dans cette région les structures géologiques contrôlent fortement la distribution du réseau de drainage.



Figure 75: (a) et (b) Chute d'eau de Calandula du fleuve Lucala dans la Province de Malanje au nord ouest de bassin Cuanza. (c) et (d) Formations métamorphiques du gneiss localisées sur la chute de Calandula.

Par ailleurs, les réseaux de drainage de type chevron sont les plus dominants dans cette zone d'études avec un total de 32 réseaux. Ils sont identifiés dans la partie occidentale du bassin sur les formations anciennes du précambrien, en particulier à l'est de Huambo et dans la partie orientale au nord de Luando et dans le sud du bassin Cuanza (Figure 74-a). Dans ces dernières régions les réseaux de drainage se sont associés aux formations récentes carbonatées du cénozoïque (Figure 76) et en s'associant aux affleurements des roches mésozoïques intrusives et extrusives. De point de vue structuration géologique, d'une part ces régions présentent des valeurs moyennes de densité de linéaments géologiques. D'autre part les roses diagramme de directions des réseaux de type chevron, sont légèrement différentes de ceux des linéaments géologiques, d'où la direction N-S représente la direction dominante, suivies de la direction E-W, NNE-SSW (Figure 74-b). Ces dernières constatations signifient que le réseau de drainage dans ces régions subit un contrôle structural mais pas aussi intense que dans les régions où les types rectangulaires et barbelés se développent.



Figure 76: (a) Formations sédimentaires clastiques et carbonatées du Jurassique supérieur au Nord-Ouest d'Angola (b) formations récentes carbonatées du cénozoïque au Nord-ouest de Luando, sud-est du bassin Cuanza

#### **4 Distribution et caractérisation du réseau de drainage dans le bassin versant de la Durance**

##### **4.1 Relation entre la distribution du réseau de drainage et la structuration et géologique**

L'analyse de la distribution de densité de drainage (Figure 77-a), montre que cette dernière présente une distribution très variée sur l'ensemble du bassin. On remarque que les densités les plus élevées sont localisées dans le centre du bassin, dans les régions où débute le domaine alpin, au niveau des vallées et les dépressions dominées par les dépôts quaternaires, particulièrement dans la région de Sisteron. Cette forte densité de drainage s'arrête nettement dans les zones où débutent les hauts reliefs du bassin où commence particulièrement les

formations de flyshe (Figure 78-a), au nord et nord-ouest de Barcelonnette, qui jouent le rôle d'une barrière au forte densité de drainage.

Au-delà de ces formations de flyshes, dans la partie la plus amont du bassin, la densité de drainage présente des faibles valeurs, sur les formations du socle métamorphique et cristallin qui dominent cette part du bassin de la Durance. On remarque aussi dans le domaine alpin les régions qui présentent une forte densité de drainage, correspondent aux régions de faible à moyenne densité de fracturation et a une faible densité de déformation. Et inversement les régions de faible densité de drainage correspondent aux régions de forte densité de fracturation et forte densité de déformation (Figure 77-b). Ces relations sont clairement observables sur les environs de Sisteron, Barcelonnette et Briançon (Figure 78-b).

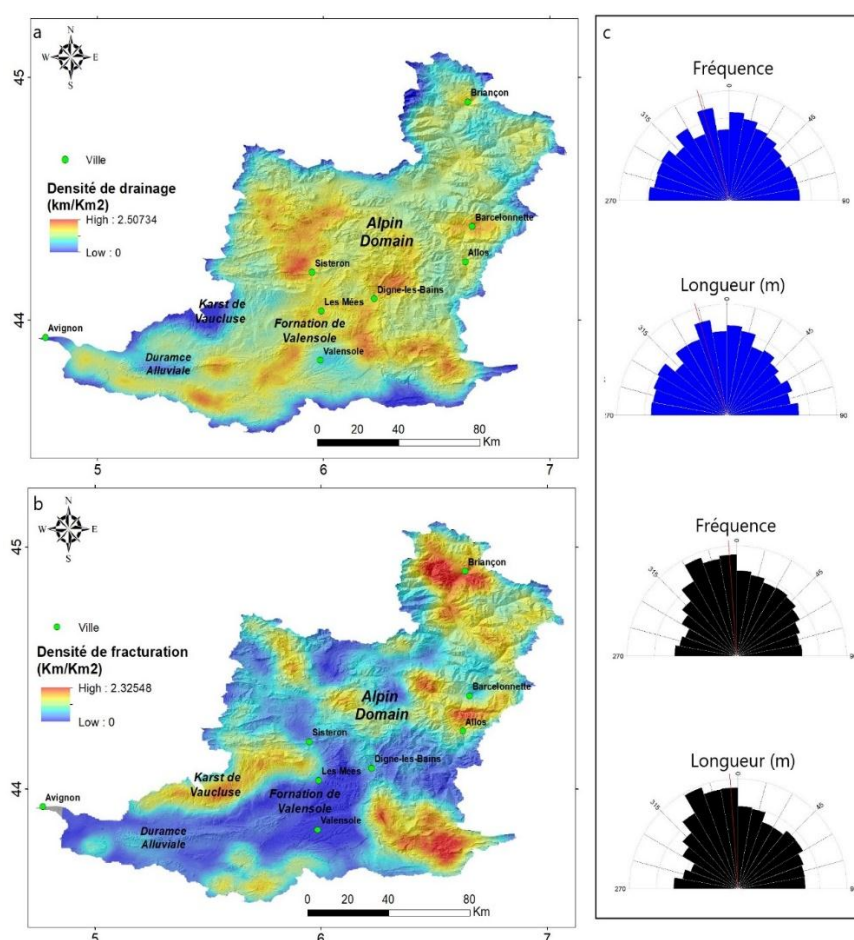


Figure 77: (a) et (b) représentent respectivement la distribution de la densité de drainage et la distribution de la densité de fracturation dans le bassin versant de la Durance. (c) roses diagramme des directions d'orientation du réseau de drainage et de la fracturation respectivement en bleu et noir.

Dans le domaine provençal, on observe aussi des fortes densités de drainage sur la vallée de la Durance, à partir de la région Les Mees en traversant la formation de Valensole jusqu'à l'embouchure dans la Durance (Figure 79-a). Ces régions sont caractérisées par les dépôts

alluviales quaternaire, les argiles et les formation conglomératique (Figure 79-b). Elles présentent aussi une faible densité de fracturations et déformations. D'autre part la région du Karst de Vaucluse constitue une zone de faible densité de drainage et forte densité de fracturation et déformation (Figure 79-c) et les seules cours d'eau permanent sont ceux qui s'écoulent sur les failles majeures qui traversent cette région (Figure 79-d). Une région qui fait l'exception de ces relations est située dans l'extrême est de la région de Valensole, où on y observe une forte densité de drainage accompagnée d'une forte densité de fracturation et déformation. De point de vue lithologique cette région présente une forte hétérogénéité, par la présence des formations calcaires et marneuse sur les reliefs et des formations conglomératique dans les vallées et les dépressions.



Figure 78 : (a) Formation de flysch dans le bassin de la Durance. (a) Observation du domaine alpins au niveau de la commune de Barcelonnette dans la vallée de l'Ubay, où on observe la puissante formation des terres noires surmontées par des formations de calcaire

Sur l'ensemble du bassin de la Durance, la densité de drainage présente une évolution décroissante de la partie avale du bassin, c'est à dire La Durance provençale, vers la partie amont du bassin, dans les hauts reliefs du domaine alpins. Ce qui est l'inverse de la structuration géologique et la lithologie, ou dans le même sens on passe des formation meuble et récente du quaternaire avec l'absence de structuration géologiques proéminentes, vers les formations les plus dures, dans un ordre croissant, les formations marneuses, calcaire, les Flyshes et les formations du socle avec la présence de forte fracturation et déformation attestant de l'intense activité tectonique.

Par ailleurs pour la région qui présente une exception à cette règle (Forte fracturation couplée avec une forte densité de drainage), Il est fort probable que la fracturation control fortement la distribution de réseau de drainage. Sur les roses diagrammes de directions du réseau de drainage du bassin de la Durance, on peut observer que les direction NNW-SSE, N-S, NW-SE, NNE-SSW sont les directions principales. Le réseau de drainage montre aussi une direction secondaire NNW-SSSE (Figure 77-c). Par contre les roses diagrammes des fractures



géologiques sont plus fines dans la reconnaissance des directions, en effet elle montrent comme directions principales N-S, NNW-SSE et NW-SE (Figure 77-c). La similarité dans les orientations entre la fracturation, les linéaments géologiques et le réseau de drainage ont été observés dans d'autres régions des alpes, plus exactement dans le massif d'Argenter (Les alpes France-Italie) ou la direction NW-SE dominant ces derniers (Ribolini et al., 2008). Ces résultats montrent une similarité dans les orientations entre le réseau de drainage et la fracturation, ce qui indique comme pour l'Anti-Atlas Oriental et le bassin du fleuve Cuanza, que la structuration géologique control la distribution et la structuration du réseau de drainage.



Figure 79: (a) Le cours d'eau principale de la Durance à la sortie de la formation de Valensole. (b) Dépôt conglomératique dans la région de Valensole et observation des reliefs du domaine alpin en arrière-plan. (c) Formation calcaire dans le karst de Vaucluse. (d) Falaise formée par le jeu d'une faille sur les puissantes formations calcaires dans la région du Karst de Vaucluse, avec le passage d'un cours d'eau sur cette dernière.

#### **4.2 Identification et caractérisation des types de réseau de drainage dans le bassin de la Durance :**

On a identifié dans le bassin de la Durance 94 sous bassins dont le réseau de drainage a été caractérisé et identifié selon les différentes classifications (Figure 80) (Zernitz, 1932; Parvis, 1950; Howard, 1967). Sur ces bassins on a identifié 2 bassins dont le type de réseau est dendritique (Annexe III: Figure 124). Ils sont localisés dans le domaine provençale, ils se sont formées en réponse à la géologie et géomorphologie de la Durance alluviale, et comme son nom l'indique, c'est la région de plaine de la Durance, avec un relief très faible, une lithologie

homogène dominée par les dépôts alluviaux. Le nombre faible des réseaux de drainage de type dendritiques ne permet pas de produire des roses diagrammes des directions du réseau de drainage significatives pour ce dernier type. Également 13 bassins dont le réseau de drainage est parallèle sont identifiés (Annexe III : Figure 124) particulièrement dans le domaine de la Durance provençale, mais ils ne représentent pas tous les mêmes conditions de formation. En effet, les réseaux parallèles se sont formés d'une part au niveau des formations conglomératiques de Valensole. D'autre part, des réseaux parallèles sont observés sur la région karstique de Vaucluse, en effet cette région avec son potentiel d'infiltration très élevé, la densité de drainage est très faible, et les seuls cours d'eaux permanents, s'écoulent le long des failles majeures localisées dans cette région, qui sont parallèles entre elles avec une orientation N-S. Les roses diagrammes de direction des réseaux parallèles, affichent les directions, N-S, NNW-SSE et NW-SE, de façon similaire à celle de la fracturation (Figure 81). D'autre type de réseau parallèle se forme en aval du bassin de la Durance, ils prennent naissance à partir des formations calcaires qui affleurent dans cette région et les cours d'eaux s'écoulent parallèlement vers la vallée de la Durance.

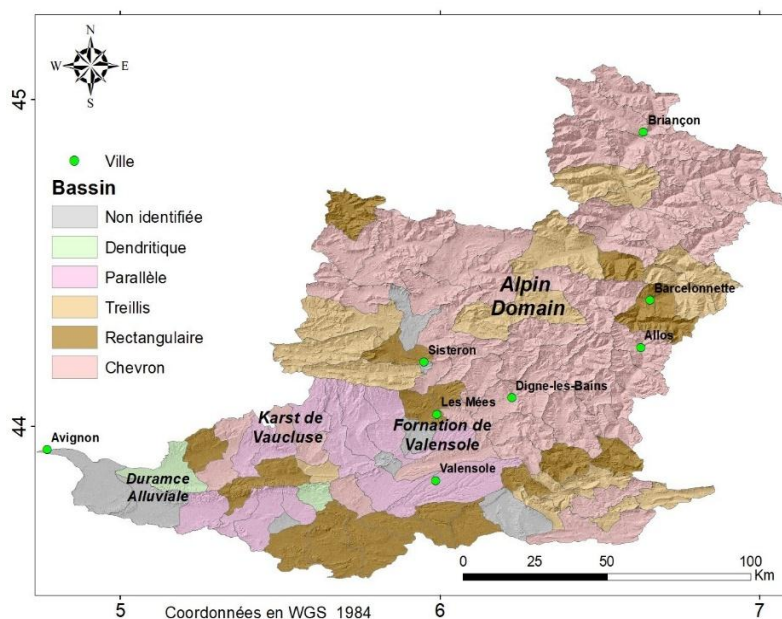


Figure 80: Distribution des types de réseau de drainage dans le bassin versant de la Durance

Parmi les types de réseau observés dans la Durance, on trouve 15 types treillis (Figure 80). Ce type de réseau est localisé majoritairement dans le domaine alpin (Annexe III : Figure 125), dans les reliefs élevés, dans les zones qui présentent une forte densité de fracturation et une forte densité de structures plissées. À l'ouest de Sisteron, au nord et l'ouest de Barcelonnette et au sud de Briançon, les réseaux de drainage s'associent aux successions de structure anticlinales et synclinales des formations carbonates et les alternances marno-calcaires et les

flyshes d'âge Jurassique et Crétacé, conduisant à leur structure en grille et treillis. Les roses diagramme de direction de ces types de réseaux confirment cette association avec la structuration géologique, en montrant des directions principales similaires à celle de la fracturation, à savoir les directions N-S, NNW-SSE et NW-SE comme direction principale (Figure 81).

19 bassins de types rectangulaires ont été identifiés dans le bassin de la Durance (Annexe III : Figure 126), ils sont majoritairement localisés dans le domaine provençal avec quelques bassins dans le domaine alpin (Figure 80). Les roses diagramme de directions de ces derniers types, sont différentes de ceux obtenus sur les fracturations, elles présentent les directions E-W, NE-SW, ENE-WSW et NW-SE comme directions principales (Figure 81), ce qui constitue un résultat non attendu, puisque le type rectangulaire s'associe souvent au fracturation et donc adopte leur agencement et structuration comme ce qui a été observé dans la région de l'Anti-Atlas Oriental et le bassin du fleuve Cuanza. Cette constatation est probablement expliquée par le fait que les réseaux rectangulaires sont localisés en grand nombre dans le domaine provençal qui est susceptible de présenter des structures géologiques dont l'orientation dominante est différente de celles observées dans le domaine alpin. Les roses diagrammes obtenus sur les fracturations du domaine provençal confirment cette dernière hypothèse, en montrant les directions E-W, ENE-WSW, NE-SW comme direction principale (Figure 82), similaire aux réseaux rectangulaires. Ces dernières orientations sont observées sur des structures tectoniques dans le sud du domaine Provençal sur le delta du Rhon (Boyer et al., 2005).

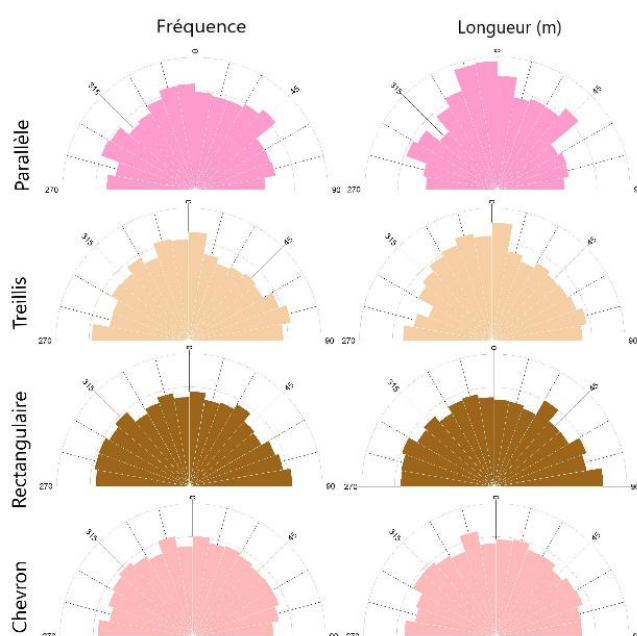


Figure 81: Rose diagramme des différents types de réseau de drainage identifiés dans le bassin versant de la Durance.

Le type de drainage chevron est le plus dominant sur le bassin de la Durance (Figure 80). On a identifié en effet 45 bassins contenant ce type de réseau (Annexe III : Figure 127), et se concentrent particulièrement dans le domaine alpin, avec quelques types chevrons localisés dans le domaine provençal. Le type chevron, comme expliqué précédemment, il s'associe souvent avec les zones de hauts reliefs, où la pente latérale est plus importante que la pente régionale et dans les régions qui ont connus et/ou qui présentaient une activité tectonique et volcanique intense, ce qui est particulièrement le cas du domaine alpin. Par contre dans le domaine provençal, les quelques réseaux en chevron observés, sont associés d'une part à quelques bassins situés dans le domaine karstique, qui montre des puissants affleurements carbonatés et des failles Majeures conjuguées. Et d'autre part les types chevron sont observés dans l'extrême est de la région de Valensole en compagnie des types treillis et rectangulaires, où on a observé que la forte densité de drainage s'accompagne avec une forte densité de fracturation. En effet les roses diagrammes de directions des réseaux chevron, affichent les directions NNW-SSE, NW-SE N-S, NNE-SSW et E-W comme directions principales (Figure 81), ce qui constitue un couplage entre les orientations de la fracturation du domaine alpin (Figure 77-c) et domaine provençal (Figure 82).

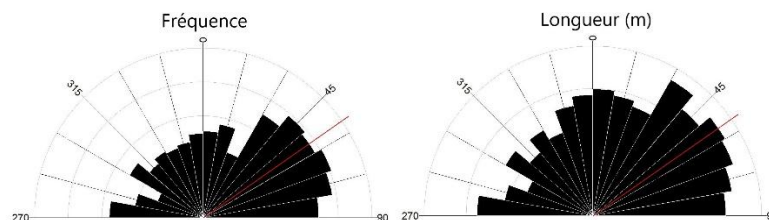


Figure 82: Roses diagrammes des directions de la fracturation dans le domaine provençal dans le bassin de la Durance

#### **IV Synthèse des résultats et analyse issues d'observations et descriptions**

Le bilan des données récoltées sur les 402 bassins des trois zones d'études, montre une grande variation et différenciation dans les caractéristiques entre ces bassins, que ça soit au sein d'une même zone ou entre les trois zones d'études. Cela ne constitue pas une révélation importante étant donné que ces régions sont connues pour contenir plusieurs unités structurales dont le relief, la géologie et la géomorphologie sont largement contrastés, un climat régional qui est différents entre les trois zones mais qui présente aussi des variations au sein de chaque zone et qui est souvent lié aux variations de relief et aux influences océaniques ou maritimes.

Egalement la couverture végétale qui observée d'en haut (par satellites) traduit l'immensité dans la variation des types de végétation et d'occupation du sol, liée à leur tour aux précédents caractéristiques. Néanmoins, ces trois zones d'études et leurs bassins, présentent des similarités, qui ne sont perceptibles qu'à travers le réseau de drainage, plus exactement sur sa distribution, structurations et ses types.

Plus encore, dans la deuxième partie, en observant et analysant le réseau de drainage et ses propriétés les plus marquantes dans le paysage, à savoir la densité de drainage qui traduit sa distribution, les types de réseau de drainage qui représentent sa structuration, ainsi qu'en analysant les caractéristiques du relief, la géologie et la géomorphologie, à travers l'observations des variations d'altitude et de pente, la lithologie et les linéaments géologiques, on a pu identifier les mêmes interactions entre ces derniers sur les trois zones d'études, où les régions de fortes densités de drainage s'associent aux zones de faible relief, faible densité de structures et linéaments géologiques et une lithologie dominée par les roches sédimentaires. Par contre les zones de faibles densité de drainages correspondent aux zone de forte densité de linéaments géologiques, souvent localisés dans les régions de reliefs élevé accidentés et une lithologie dominée par les roches volcaniques et plus souvent les roches granitiques et métamorphiques. Ces constatations confirment en partie l'hypothèse de l'existence d'un processus communs qui génère ses interactions.

Par ailleurs, les observations portées sur les types de réseau de drainage dans ces trois zones montrent aussi les mêmes modèles et tendances. Ces trois zones partagent au moins 3 types de réseaux en communs, qui sont les types dendritique, parallèle et rectangulaire. Ces derniers représentent les types de réseau de drainage basiques selon la classification de Zernitz (1932) et Howard (1967). Ceci signifie d'une part, qu'à un certain niveau d'interaction entre les propriétés de l'environnement, on atteint un certain équilibre qui génère dans un premier temps une structuration du réseau communs entre les différents milieux, donnant naissance aux types basiques. D'autre part, l'existence des types de réseaux spécifiques pour chaque région et ses caractéristiques, comme les types chevrons pour le bassin de la Durance et chevron et barbelé pour le bassin du fleuve Cuanza, qui sont selon la classification adoptée sont des types de réseau basique modifiées (Parvis, 1950; Howard, 1967), indique le développement de ce processus en réponse aux évolutions des interactions entre les propriétés de l'environnement et le passage vers un stade avancé de cette équilibre. Ces évolutions sont dû aux activités tectoniques de grande ampleur, les activités volcaniques, les glissements de terrain, les mouvements de masses et les activités anthropiques, mais souvent ces interactions ont été observées et constatées comme étant plus affectées par le changement climatique, qui influence l'ensemble des processus et équilibres environnementaux (Twidale, 2004; Daley et Cohen, 2018; Wang et al., 2018, Zhu et al., 2019).

## **V Conclusion:**

Des relations nettes semblent apparaître entre le réseau de drainage et les propriétés des bassins, qui sont très semblables dans différents climats et environnements et qui se manifestent sous la forme de plusieurs types de réseau de drainage, qui sont soit communs entre les différentes zones ou spécifiques pour une région. A première vue, ils mettent en jeu le relief et la géologie comme facteurs majeurs. Cependant, les données des propriétés physiques obtenues sur l'ensemble des bassins et leurs complexes variations présentées dans le chapitre 2, conduit à l'hypothèse que la structuration du réseau de drainage et la caractérisation des différents types et modèles de réseau est assez complexe et ne se limite pas à un, deux ou trois facteurs. Ainsi il convient de développer cette hypothèse, en suivant une méthodologie scientifique propre, via l'expérimentation et le traitement des données. De ce fait on a adopté une approche analytique multifactorielle pour mettre en jeu l'ensemble des bassins et leur propriétés physiques, morphométriques et climatiques, afin d'arriver à nuancer ce processus qui contrôle la distribution et la structuration du réseau de drainage et identifier ces composantes principales. C'est arrivant ici qu'on a fait appel à l'analyse statistique multivariées pour le traitement mathématique et l'analyse des données. Ce dernier axe sera développé en détail dans le chapitre 4.

# CHAPITRE 4 : Traitement

## mathématique et étude de sensibilité

### **I Introduction**

Ce chapitre présente la partie expérimentale concernant le traitement mathématique par les méthodes d'algèbre linéaire, qui sont des méthodes statistiques multivariées convenables pour l'étude et l'analyse des phénomènes qui mettent en jeu plusieurs variables ou facteurs. L'objectif de ce chapitre est de tester les hypothèses élaborés dans le chapitre 3, en utilisant trois méthodes qui sont par ordre d'application, l'analyse des composantes principales (ACP), l'analyse discriminante (AD), et la classification hiérarchique ascendante (CHA). Comme c'est expliqué dans la démarche et le protocole retenu dans le chapitre 2, l'ACP permettra d'étudier la structure des données et l'identification des mécanismes responsables de la variation des types de réseaux de drainage. L'AD permettra de discriminer et séparer entre les types de réseaux et d'identifier les facteurs responsables des discriminations et l'CHA permettra d'analyser la similarité ou la dissimilarité entre ces types.

### **1 Etude de la structure des données par ACP**

#### **1.1 Etude comparative de la structure des données sur le bloc commun des paramètres pour les 3 zones.**

##### **1.1.1 Structure et processus portés par les composantes principales**

En analysant la corrélation du type de réseau de drainage avec chacun des descripteurs pris séparément, on remarque que le type de réseau ne présente pas une corrélation significative avec chacun des descripteurs pris séparément. Les coefficients de corrélations sont pour la plupart des paramètres médiocres à très mauvaises. En d'autres termes, le type de réseau de drainage ne subit pas fatalement l'influence d'un seul facteur ou paramètre du paysage, comme il a été stipulé dans les travaux antérieurs à notre recherche (Howard, 1967; Twidale, 2004; Pereira-Claren et al., 2019). Ainsi, le déterminisme du type de réseau ne peut se prévoir simplement à partir d'une seule caractéristique du bassin versant.

Tableau 10: Coefficient de corrélation entre le type de réseau de drainages et les paramètres communs, dans la région de l'Anti-Atlas Oriental (AAO), le bassin du fleuve Cuanza (BFC) et le bassin versant de la Durance (BVD)

	AAO	BFC	BVD
Variables	Type	Type	Type
Type	1	1	1
MEAN-Slope	0.290	0.347	0.464
H	0.221	0.124	0.411
R1	0.242	0.078	0.350
R2	0.252	0.073	0.354
Kg	-0.125	-0.004	-0.096
Cl	-0.180	-0.480	-0.268
Kh	0.130	0.036	0.117
Rock type	0.263	0.200	-0.136
Homogénéité	0.767	0.188	0.094
MEAN-Line	0.348	0.516	0.125
MEAN-Ddrain	-0.077	-0.497	0.126
Landcover	0.205	0.375	0.366
Tc	-0.034	-0.023	-0.120

La distribution de la variabilité selon les composantes principales (CPs) a montré que l'information a été distribuée dans de nombreux CPs, ce qui indique une information complexe et non redondante. Les cinq premiers CPs présentaient des valeurs propres supérieures à l'unité, ce qui indique qu'ils transmettent plus d'informations qu'une seule variable. Les trois premiers CPs représentaient 63.06%, 66%, et 66.94% de la variance totale de l'ensemble de données, respectivement pour l'Anti-Atlas Oriental, le bassin du fleuve Cuanza et le bassin de la Durance (Tableau 11). En analysant les trois premières composantes principales pour les trois zones d'études, on remarque que leur première composante CP1 s'individualisent parfaitement des autres composantes principales, ils expliquent presque le même pourcentage des variances totales observées, 37.24%, 36.21% et 36.83% respectivement pour l'Anti-Atlas Oriental, le bassin du fleuve Cuanza et le bassin de la Durance.

Tableau 11: Distribution des variance dans les trois premières composante principales des trois zone étudiées

Zone d'étude		CP1	CP2	CP3
AAO	Variabilité (%)	37.241	15.286	10.541
	V Cumulative %	37.241	52.526	63.067
BFC	Variabilité (%)	36.210	16.783	13.007



	V Cumulative %	36.210	52.993	66.000
BVD	Variabilité (%)	36.832	18.415	11.697
	V Cumulative %	36.832	55.248	66.945

La première composantes Principales (CP1) de chaque zone d'étude, présentent tous des corrélations positives très élevés avec les paramètre de relief, à savoir (Mean-Slope, H, R1 et R2). Ces derniers paramètres sont fortement corrélés avec les paramètres géologiques, particulièrement Mean-line et Rock-type dans l'Anti-Atlas Oriental (Figure 83) et le bassin du fleuve Cuanza (Figure 84). Par ailleurs, l'Anti-Atlas Oriental présente une corrélation supplémentaire avec le paramètre d'occupation de sol (Landcover). Le bassin versant de la Durance CP1 ne présente aucune de corrélation significative avec les descripteurs géologiques (Figure 85), ces derniers ne deviennent importants qu'à partir de la deuxième composante principale CP2, par contre CP1 présente des corrélations élevés et négatives avec les descripteurs de morphométrie (Kg et Kh) et le temps de concertation (Tc) des bassins.

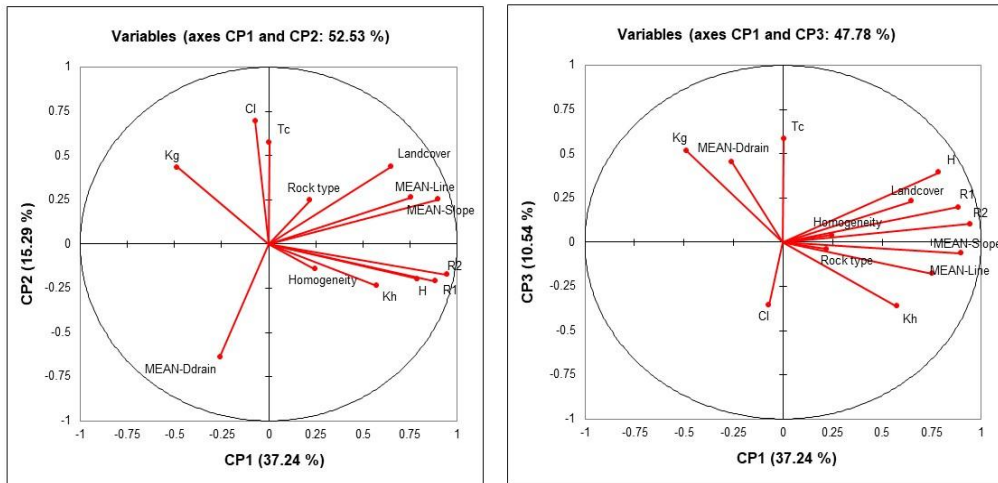


Figure 83: Distribution des paramètres dans les trois premières composantes principales pour la région de l'Anti-Atlas Oriental.

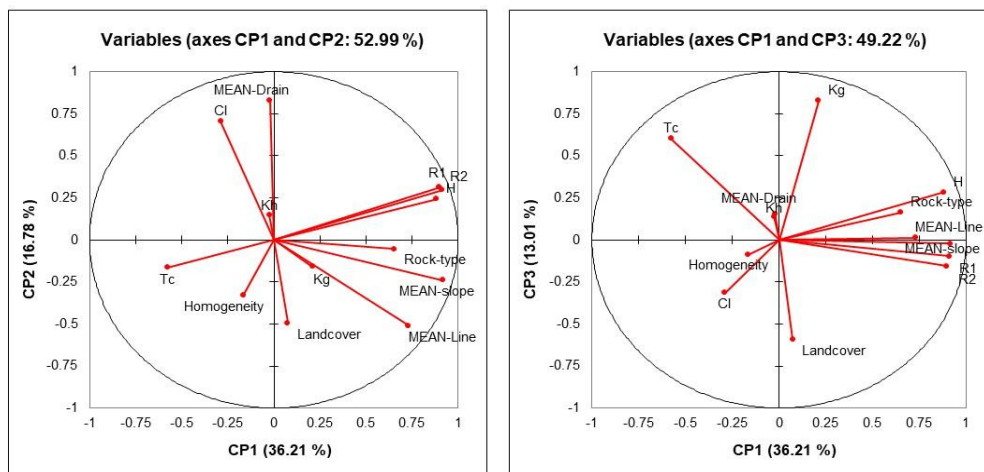


Figure 84: Distribution des paramètres dans les trois premières composantes principales pour le bassin du fleuve Cuanza.

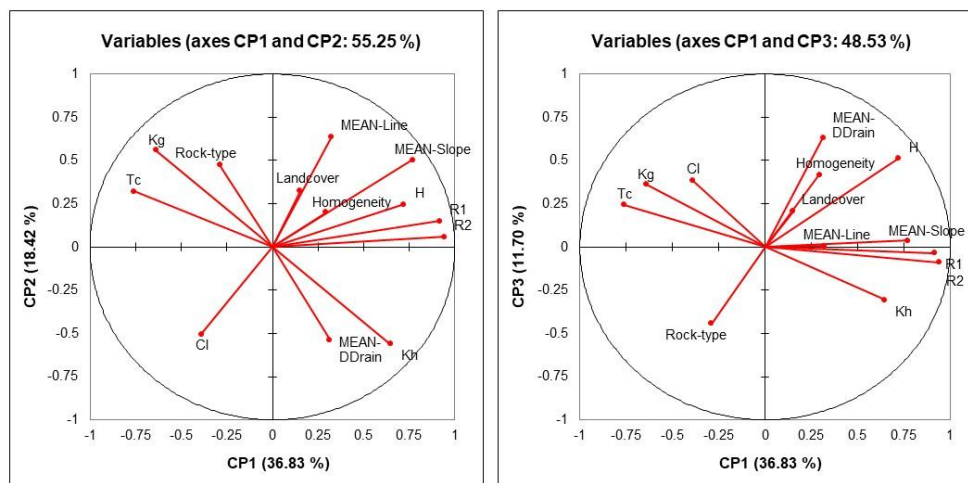


Figure 85: Distribution des paramètres dans les trois premières composantes principales pour le bassin versant de la Durance

La deuxième et la troisième composante principale CP2 et CP3, expliquent avec presque le même pourcentage les variances observées sur les trois zones d'études (Tableau 11). CP2 explique 15.2%, 16.7% et 18.4% et CP3 10.5%, 13% et 11.6% respectivement pour l'Anti-Atlas Oriental, le bassin du fleuve Cuanza et le bassin versant de la Durance. Ces deux dernières composantes principales présentent particulièrement des corrélations assez élevées avec les paramètres de morphométrie (Kg, Kh et Ci) et les paramètres hydrologiques (Mean-Drain et Tc) sur les trois zones d'études.

Par contre des différenciations existent entre ces trois zone d'étude, on remarque d'une part que le paramètre d'occupation de sol (Landcover) est un descripteur majeur sur CP2 et CP3 pour l'Anti-Atlas Oriental et le bassin du fleuve Cuanza, en présentant particulièrement une corrélation négative avec le paramètre de densité de drainage. Pour le bassin de la Durance ces dernières corrélations sont très peu marquée, par contre on remarque que les paramètres géologiques interviennent comme descripteurs majeurs dans le bassin versant de la Durance dans ces deux dernières composantes principales.

### 1.1.2 Distribution spatiale des composantes principales :

Les composantes principales (CPs) obtenus par l'ACP sont particulièrement adaptées et pertinentes pour la cartographie numérique et l'analyse spatiale, tout comme les paramètres originaux. Les valeurs des trois premières composantes principales de chaque bassin ont été utilisés pour la cartographie des principales sources de variation des types de réseaux de drainage dans chaque zone d'études. Des cartes ont été créés en attribuant aux points de

centre de gravité des bassins les valeurs de corrélations des trois premières composantes, puis à l'aide la méthode d'interpolation de la pondération inverse à la distance, on a pu extraire la distribution spatiale de ces derniers composante (Figure 86, Figure 87 et Figure 88).

La distribution de la première composante principale CP1 dans la région de l'Anti-Atlas Oriental (Figure 86-a), montre que les faibles valeurs (Couleur bleu) sont localisées dans les secteurs du domaine Kem-Kem, bassin Maider, bassin sud-tafilalat, le sud-est du secteur des Banis, et le nord-est dans la cuvette de Tazarine. Les valeurs Moyenne de CP1 (couleur cyan-jaune) sont localisées dans le secteur axe Ougnat-Ouzine, le secteur des Banis et l'extrémité nord-est du secteur axe Saghro-Ougnat. Les valeurs les plus élevés (couleur orange-rouge) sont localise dans le secteur axe Saghro-ougnat.

La distribution de CP1 dans le bassin du fleuve Cuanza (Figure 87-a) montre les valeurs les plus faible (couleur bleu) dans les vallées et dépression de l'unité structurale de la zone des sables. Les valeurs moyennes (couleur cyan-jaune) sont localisées dans l'extrémité sud du bassin, dans le nord-est et les zones de passage entre la zone des sable et la partie du massif central. Les valeurs les plus élevées (couleur Orange-rouge) sont localisées dans le massif central à l'ouest du bassin et particulièrement dans le nord-ouest en amont de l'embouchure du bassin où les valeurs sont les plus fortes.

Dans le bassin de la Durance la distribution de CP1 (Figure 88-a) montre des valeurs faibles (couleur bleu) principalement dans le domaine provençal, c'est-à-dire dans la Durance alluviale, le karst de Vaucluse, et la formation de Valensole. Des valeurs moyennes (couleur cyan-jaune) sont localisées dans la limite entre le domaine provençal et le domaine alpin et dans la partie ouest du domaine alpin. Des valeurs moyennes sont observées dans le domaine provençal, ils correspondent aux affleurements des formations calcaires qui constituent les seuls reliefs de ce domaine.

Les valeurs les plus élevés (couleur orange-rouge) sont localisées principalement dans le domaine alpin avec les plus fortes valeurs dans la vallée de l'Ubay et la région de Briançon. On remarque aussi dans le domaine alpin une zone de faible valeur de CP1 (En bleu), elle est dû d'une part à la localisation du point du centre de gravité du bassin dans l'extrémité de ce dernier, car celui-ci présente une forme allonge et tordus, d'autre part cette zone corresponde à une large profonde vallée recouverte de formation alluviale récente.

CP1 est largement similaire à celle de la variation du relief et des caractéristiques géologiques, c'est-à-dire plus la valeur de CP1 et élevés plus le terrain présente un relief élevés et rugueux, une forte densité de fracturation et linéaments géologiques et une lithologie hétérogène présentant des types de roche dure et résistants.

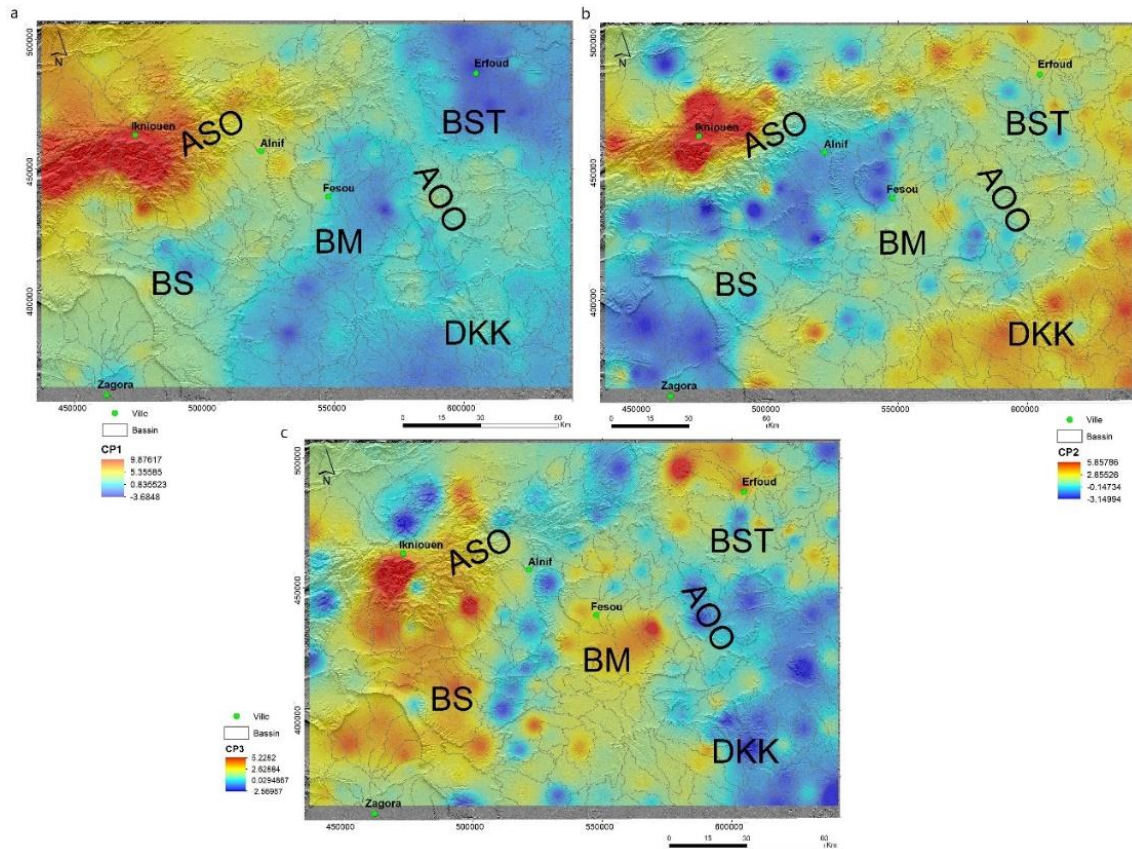


Figure 86: Distribution spatiale des trois premières composante principales dans l'Anti-Atlas Oriental (a) CP1, (b) CP2 et (c) CP3.

La distribution de CP2 dans la région de l'Anti-Atlas Oriental (Figure 86-b) montre que les valeurs élevées (couleur orange-rouge) correspondent aux zones dont les bassins sont larges et allongés et présentent un temps de concertation élevés, comme les secteurs domaine Kem-kem et le bassin sud-Tafilalt. Egalement, les valeurs élevés CP2 correspondent aussi aux régions qui présentent la seule couverture végétale dans cette zone aride et une faible densité de drainage, à savoir l'axe Saghro-Ougnat et l'axe Ougnat-Ouzina.

Les faibles valeurs de CP2 (couleur bleu) Correspondent aux zones de forte densité de drainage localisées sur le bord méridional des massif Saghro-Ougnat et au nord de Zagora, Dans ces régions, l'absence de végétation, les pentes raides sur des couches schisteuses, argileuses et gréseuses entraînent une plus grande densité de drainage (Melton, 1957 ; Bouramtane et al., 2020).

Les valeurs les plus élevés de CP2 (couleur orange-rouge) dans le bassin du fleuve Cuanza (Figure 87-b) correspondent aux régions de forte densité de drainage et de forte valeur de concavité du bassin, ils sont localisés particulièrement dans la zone des sables et dans la zone amont de l'embouchure du bassin. Les zones de moyennes et faibles valeurs de CP2 se

localisent dans le sud du bassin dans l'ouest du les reliefs du massif central et le nord-ouest toujours sur les terrains du massif central.

La distribution de CP2 dans le bassin de la Durance (Figure 88-b) est inverse à celle du bassin du fleuve Cuanza, vu que la densité de drainage et les paramètres de morphométries sont corrélées négativement avec CP2. Ainsi les valeurs les plus faible de cette dernière composante principale (Couleur Bleu) correspondent aux zones de forte densité de drainage qui sont localisées dans le domaine provençal, dans la Durance alluviale et le long la vallée de la Durance qui remonte dans domaine alpin, jusqu'au nord-est de sa source dans la région de Sisteron.

Les valeurs moyennes et élevés de CP2, représentent les régions qui présentent une moyenne à faible densité de drainage mais correspondent particulièrement aux zones de forte densité de fracturations et aux type de roche qui présente la dureté et la résistivité la plus élevés dans la zone d'étude, à savoir les formation calcaire, flyshes, socle métamorphique et socle cristallin. Ces derniers sont localisés principalement dans le domaine alpin avec les plus fortes valeurs dans la partie la plus amont du bassin de la Durance mais aussi dans le domaine provençal sur le karst de Vaucluse qui présente une faible densité de drainage et une forte fracturation et une lithologie dominée par les formations calcaires.

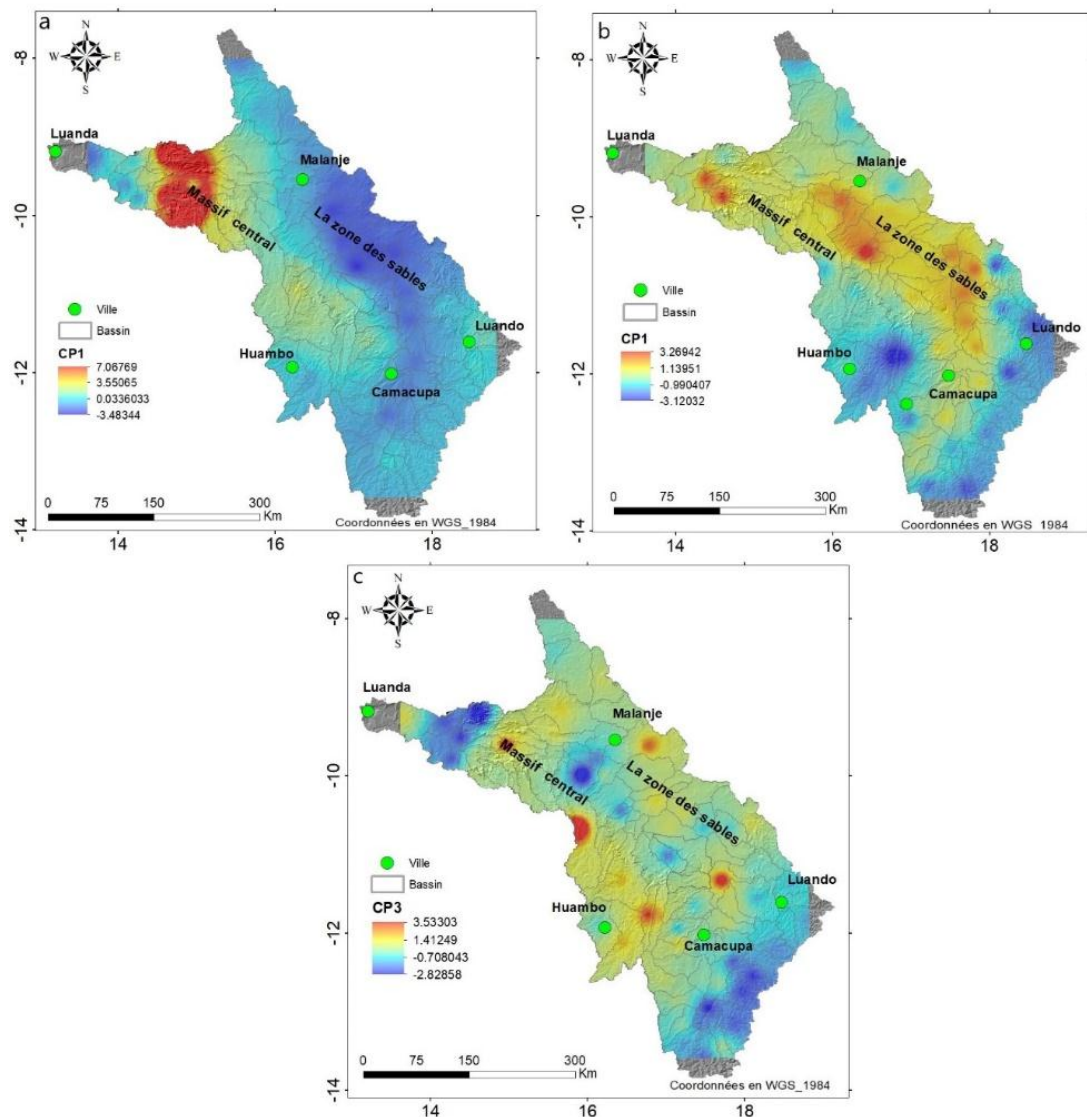


Figure 87: Distribution spatiale des trois premières composante principales dans le bassin du fleuve Cuanza, (a) CP1, (b) CP2 et (c) CP3.

Dans la région de l'Anti-Atlas Oriental les valeurs élevées et moyennes de CP3 sont localisées dans l'ouest de l'axe Saghro-Ougnat où les bassins présentent un relief élevé avec des formes allongées et dans le secteur bassin Sud-Tafilalt où la densité de drainage et le temps de concentration sont élevés (Figure 86-c). Egalement dans la partie centrale et sud-est du secteur des Banis, le bassin Maider, le bord méridional du massif de Saghor et la partie ouest du domaine Kem-Kem, où les bassins présentent une densité de drainage élevée.

Les faibles valeurs de CP3 (couleur bleu-cyan) correspondent à des faibles temps de concentration et/ou des bassins de forme relativement large, un faible relief et une faible densité de drainage. Ils sont localisés dans la partie est du domaine Kem-kem, qui représente les terrains les plus bas de l'Anti-Atlas Oriental avec des bassins de forme large, dans le

secteur Axe Ougnat-Ouzine, la partir nord-est du secteur des Banis et le bord septentrional du massif de Saghro et l'Ougnat où les bassins présentent un temps concentration faible.

Dans le bassin de fleuve Cuanza, les valeurs élevées de CP3 correspondent au bassins de forme large et allongée à l'ouest et au nord-est dans le massif central et aux bassins présentant des temps de concentration très élevés et une couverture végétale de type savane localisés dans la zone des sables. Les faibles et moyennes valeurs de CP3 (couleur bleu-cyan-jeune) localisées dans les bassins des régions sud de la zone d'étude, dans la région amont de l'embouchure du fleuve Cuanza, et dans les bassins qui représentent le passage entre les reliefs du massif central et la zone des sables. Ces bassins présentent une forme étroite recouvertes des végétations de type savane boisée, forêt et forêt mixte, et des faibles temps de concentration.

Les valeurs moyenne et faible de CP3 dans le bassin de la Durance correspondent au bassins qui présentent une densité de drainage élevé, une lithologie homogène, et un relief rugueux et des types de roche plus au moins dure et de forte résistivité (Figure 88-c). Ces derniers sont localisés dans le domaine provençal, ou les bassins présentent une densité de drainage élevés particulièrement dans la vallée de la Durance et la Durance alluviale, dans le Karst de Vaucluse, puisque dans ces derniers les bassins sont recouverte de formations calcaires homogènes.

La région la plus amont et située dans le nord cette zone d'étude présentent des valeurs moyenne à faible vu que le terrain est très rugueux avec une lithologie homogène formée de socle cristallin et métamorphique. Les valeurs élevées de CP3 sont localisées dans le centre du domaine alpin, dans les enivrent de Sisteron, dans cette zone, les bassins présentent une lithologie très hétérogènes, contenant des calcaires, des marnes (Terre noire) des argiles et des conglomérats. Egalement la densité de drainage y variable, très faible sur les reliefs et élevé dans la vallée de la Durance qui remonte dans cette partie du bassin, comme c'est montrer dans la distribution de CP1.

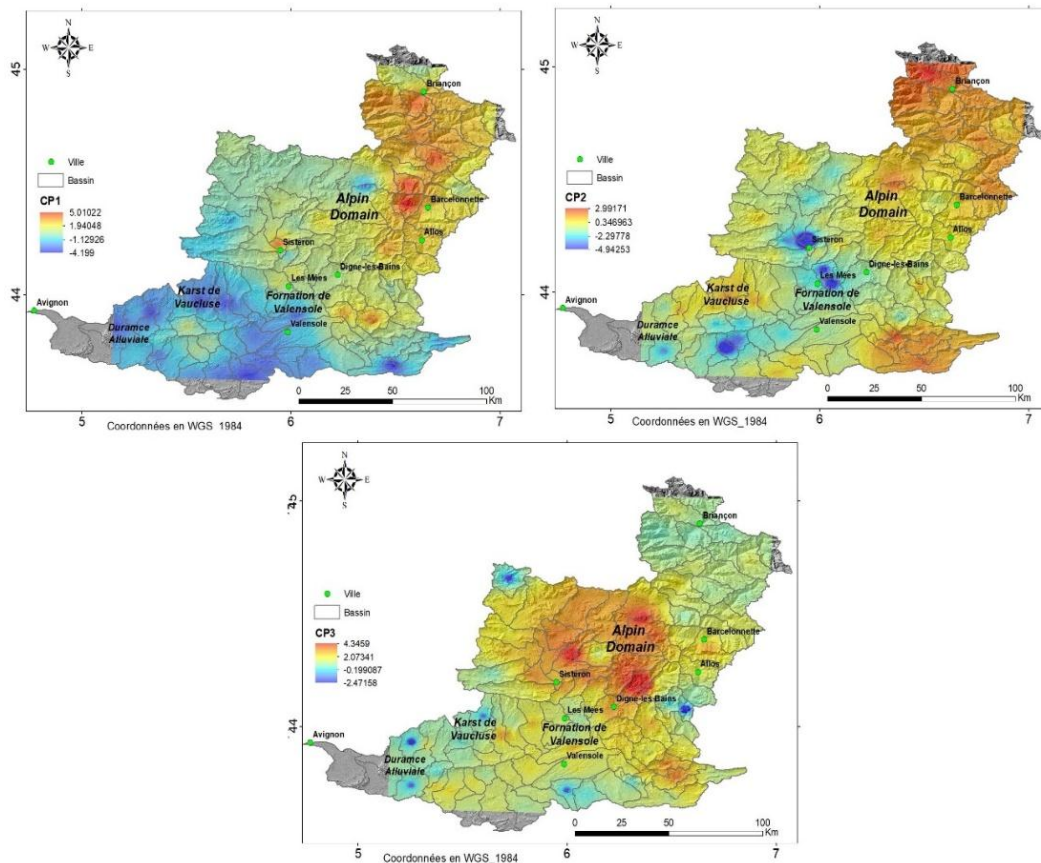


Figure 88: Distribution spatiale des trois premières composante principales dans le bassin du fleuve Cuanza, (a) CP1, (b) CP2 et (c) CP3.

### 1.1.3 Les mécanismes du processus contrôlant la variabilité des types de réseau de drainage :

A partir des résultats de l'ACP et la distribution de ses différentes composantes principales on peut observer une cohérence entre les trois zones étudiées, qui est particulièrement observée sur la première composante principale CP1 qui synthétise tous les descripteurs de reliefs pour expliquer une grande part des variances observées (plus de 35%) sur les trois zones (Tableau 11). L'ACP montre à travers CP1 que le relief contribue plus que les autres descripteurs, en terme de corrélation et nombre de paramètres, dans la variabilité des types de réseaux de drainage sur l'ensemble des zones étudiées (Figure 83, Figure 84 et Figure 85). Ceci indique que le type de réseau de drainage est fortement influencé par les caractéristiques du relief, et cela dans des échelles de bassins, climats et caractéristiques géologiques très variés.

Cette cohérence est encore plus marquée pour l'Anti-Atlas Oriental et le bassin du fleuve Cuanza, où les descripteurs géologiques, notamment le paramètres de type de roche et la densité des structures géologique de forme linéaire (Mean-line), contribuent significativement à la première composante principale CP1(Figure 83, Figure 84). Ce couplage des



caractéristiques du relief et de géologie pour la développement des différents types de réseaux de drainage est en effet observé par plusieurs auteurs (Zernitz, 1932; Parvis, 1950; Howard, 1967; Twidale, 2004; Radaideh et al., 2016; Sangireddy et al., 2016; Della Seta et al., 2017). Quant au bassin de la Durance, le fait qu'il est recouvert en majorité par des formations sédimentaires en majorité carbonatées, qui présentent des résistivités à l'érosion et des duretés pas assez distinctes comme entre les grands types de roche de l'Anti-Atlas Oriental ou du bassin du fleuve Cuanza, ont conduit les paramètres de relief à être le seul mécanisme dominant dans CP1, Néanmoins, les paramètres géologiques interviennent significativement dans CP2 (Figure 85).

Sur les trois zones étudiées, les paramètres de morphométrie des bassins (Kg, Kh et Cl) contribuent dans CP2 et CP3 pour expliquer la variabilité des types de réseaux de drainage (Figure 83, Figure 84 et Figure 85). Cependant ces descripteurs ne présentent pas une contribution dominante dans ces deux dernières composantes principales. En d'autre terme, les descripteurs de morphométrie seuls ne conviennent pas assez pour la caractérisation des types de réseaux de drainage.

Les résultats des composantes principales ont permis de nuancer le rôle de l'occupation de sol dans la variabilité des types de réseaux de drainage. En effet, la corrélation positive de ces derniers avec le relief dans de l'Anti-Atlas Oriental (Figure 83) est dû à la variabilité du climat avec les caractéristiques du relief de cette région, qui est aride au nord dans les massifs de Saghro et d'Ougnat et en allant vers le sud le climat devient extrêmement aride avec seulement 50 mm par an, et une occupation de sol composée des terrains dénudés ou à végétations clairsemées (Figure 52). Bouramtane et al. (2020b) ont observés le même phénomène sur les régions semi-humide, semi-aride, aride et désertiques du Maroc, où la végétation a montrée des réponses diverses aux variations climatiques, et cette variation est du particulièrement aux variations des précipitations. Cette constatation signifie que dans les bassins de climat aride, la variabilité du climat avec la nature du relief permet de liés, même indirectement, le type d'occupation de sol ou de couverture végétale au type de réseau de drainage.

Par ailleurs la corrélation négative entre l'occupation de sol et la densité de drainage, observés dans nos résultats sur CP2 des trois zones étudiées, particulièrement l'Anti-Atlas Oriental et le bassin du fleuve Cuanza (Figure 83 et Figure 84 ) ont été observés par Sangireddy et al (2016) dans leur étude sur le control du climat, la végétation, et la géologie sur la densité de drainage dans les zones arides et humides. Cette corrélation négative entre la densité de drainage et la couverture végétale implique que dans les régions arides comme l'Anti-Atlas

Oriental, la capacité en eau disponible en diminution progressive entraîne une diminution de la couverture végétale qui s'accompagne d'une baisse de l'épaisseur du sol.

Pour les climats humide du bassin du fleuve Cuanza et du bassin de la Durance, l'épaisseur croissante des couches de sol et la capacité en eau disponible favorisent une couverture végétale dense qui constitue une barrière naturelle au ruissellement, dissipant l'énergie cinétique des précipitations et du flux de surface et présentant un plus grand potentiel de réduction de la perte de sol, ce qui diminue la densité de drainage globale (Chadwick et al., 2003; Sangireddy et al., 2016; Andrade et al., 2020). Ceci est observé dans le domaine de la zone des sables du bassin du fleuve Cuanza où l'occupation de sol dominée par la végétation de type savanes (Figure 55) présentent une forte densité de drainage (Figure 72-a) et en présentant des valeurs élevés de CP2 (Figure 87-b) vu la corrélation positive du paramètres densité de drainage (Mean-Drain) avec cette dernière composante.

Les mêmes observations peuvent être faite sur le bassin versant de la Durance, où le domaine provençal dont le climat est plutôt méditerranéen et une occupation de sol dominée par une végétation de types savane (Figure 55) avec une moyenne forte densité (Figure 77-a) de drainage et présentant des valeurs faible et négative de CP2 (Figure 88-b), par rapport au domaine alpin avec un climat humide tempérée, une occupation de sol dominée par la végétation de type savane boisée, terre herbeuse et forêt avec une moyenne à faible densité de drainage et ainsi des valeurs élevées de CP2 (Figure 88-a).

Finalement, la contribution des paramètres de morphométrie du bassin, l'occupation de sol et la densité de drainage dans les composante principale CP2 et CP3, traduit ainsi la partition des processus d'infiltration, ruissèlement et l'érosion dans la variabilité des types de réseaux de drainage. L'irrégularité de l'érosion sur différents matériaux et couverture végétale, a bien été observée contrôlant la texture du réseau de drainage et la distribution de ses types (Parvis, 1950; Melton, 1957; Mueller et Pitlick, 2013; Sangireddy et al., 2016; Walley et al., 2018).

Le paramètre de temps de concentration  $T_c$  contribue significativement sur les différentes composantes principales des trois zones étudiées, en d'autre terme, le temps de concentration est un descripteur qui explique une part importante de la variabilité des types de réseaux de drainage. Ceci signifie que le type de réseau de drainage a un impact direct sur le comportement hydrologique du bassin versant indépendamment du type de climat. Cependant le traitement multifactoriel de l'ACP montre que ce paramètre présente des variabilités sur ces trois zones.

En effet dans le climat tropical du bassin du fleuve Cuanza et tempéré du bassin versant de la Durance,  $T_c$  des bassins versant est inversement corrélé aux paramètres de relief (Figure 84,

Figure 85) en d'autre terme les types de réseaux drainage qui se développent dans les hauts relief (Chevrone et barbelé) présentent des Tcs très faible, par rapport à ceux qui se développent dans les bas-relief (Rectangulaire, parallèles et dendritique). Par ailleurs, dans le climat aride Tc présente des corrélations avec les paramètres de morphométrie du bassin, la densité de drainage et d'occupation de sol. Ainsi la réponse hydrologiques dans les climats humides est liée au relief, par contre dans les régions arides elle est liée plutôt aux processus d'érosion dans les bassins induit par les variations de végétation et densité de drainage (Figure 83).

Les principaux résultats obtenus sur notre analyse de composantes principales des trois zone de climat tropicale, tempéré et aride et sur une gamme d'échelle de bassins allant de moins de 10 km<sup>2</sup> a plus de 1000 km<sup>2</sup>, attestent d'un processus généralisable sur une large gamme d'environnements naturels, qui mis en premier degré le relief (rugosité et texture) et la nature géologique (Type de roche et structuration géologiques), suivis des processus d'équilibre physique du bassin versant (Infiltration, ruissèlement et érosion) dans la formation et la caractérisation des types de réseaux de drainage.

## **1.2 Étude comparative de la structure des données sur le jeu de paramètre spécifique**

L'objectif étant de voir si les paramètres spécifiques de chaque zone contribuent d'une certaine manière a la structure des macro-paramètres ou bien dans le cas contraire aucune variation significative n'est ajoutée. Cette comparaison concerne que la région de l'Anti-Atlas Oriental et le bassin versant de la Durance, étant les seules à avoir des paramètres spécifiques. Pour rappel, les paramètres spécifiques pour chaque zone sont les suivantes :

- L'Anti-Atlas Oriental : les paramètres géologiques type de contrôle structural et le Secteur géologique qui est noté Area.
- Le Bassin Versant de la Durance : IDPR et le paramètre géologique intensité de déformation, noté Int-Defor.

### **1.2.1 La structure des données sur le jeu de paramètre spécifique dans l'Anti-Atlas Oriental :**

La distribution de la variance selon les composantes principales (CP) a montré que l'information a été distribuée dans de nombreux CP, ce qui indique en effet une information complexe et non redondante (Figure 89). Les trois premiers CP expliquent 59% de la variation (Tableau 12).

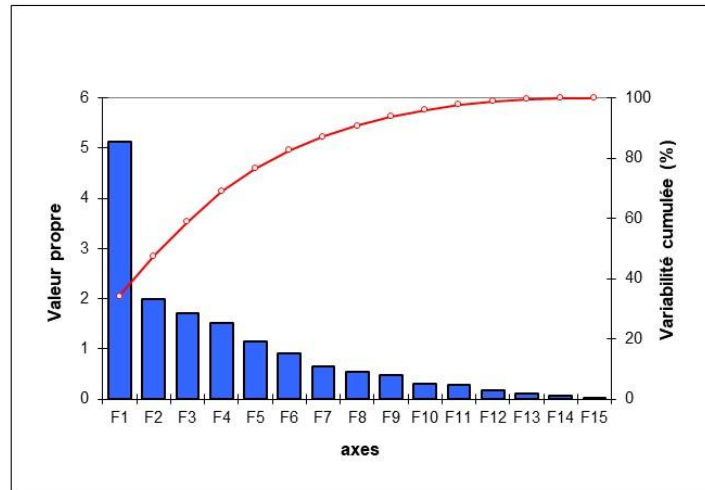


Figure 89: Principaux plans factoriels de l'ACP du jeu de données des paramètres spécifiques de l'Anti-Atlas Oriental. Avec F représente le plan factoriel de chaque composante principale

Tableau 12: Distribution des variance dans les trois premières composantes principales du jeu de données des paramètres spécifiques de l'Anti-Atlas Oriental

	F1	F2	F3
Variabilité (%)	34.175	13.273	11.382
V Cumulative %	34.175	47.448	58.830

La première composante principale CP1 explique individuellement 34.17% des variations observées (Tableau 12). Elle présente des corrélations positives et élevées avec les paramètres de relief, avec des valeurs 0.894, 0.769, 0.881 et 0.936 respectivement pour Mean-Slope, H, R1 et R2. CP1 également montre des corrélations positives avec le paramètre de morphométrie Kh, les paramètres géologiques Mean-Line et Area et les paramètres d'occupation de sol (Landcover), avec des valeurs respectivement de 0.547, 0.749, 0.471 et 0.642. La seule corrélation négative et élevée est observée chez le paramètre de forme Kg avec une valeur de -0.457. La deuxième composante principale CP2 explique 13% des variances observées, en présentant des corrélations positives avec les paramètres Cl, l'occupation de sol (Landcover) et Tc avec des valeurs respectivement de 0.709, 0.454 et 0.582. On observe aussi que CP2 présente une corrélation négative avec le paramètre Mean-Drain avec une valeur de -0.633. Finalement CP3 explique 11% des variations et elle présente uniquement des corrélations positives avec les paramètres géologiques Contrôle structurel et Homogénéité avec des valeurs de corrélation respectivement de 0.766 et 0.814 (Figure 90).

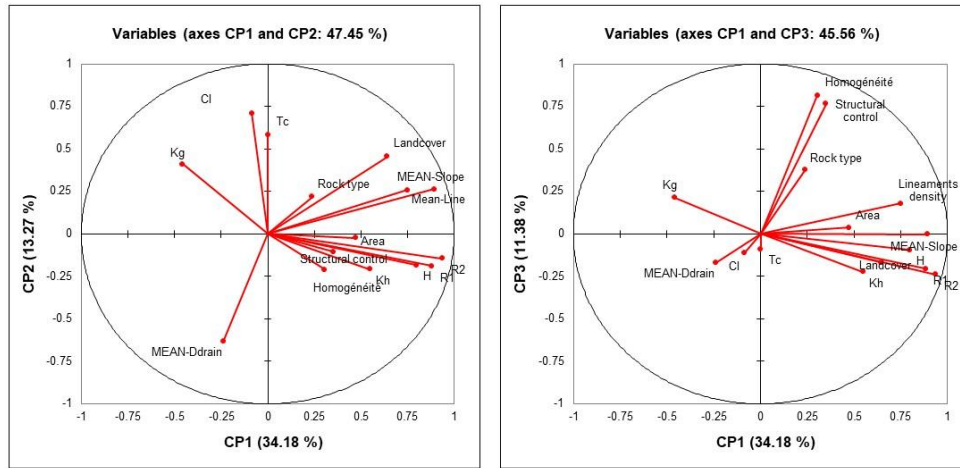


Figure 90: Distribution des paramètres du jeu de données spécifiques dans les trois premières composantes principales pour l'Anti-Atlas Oriental.

A partir de ces résultats, on remarque les composantes principales CP1 et CP2 synthétisent toujours les mêmes informations que ceux obtenus par le résultat des paramètres communs, en observant tout de même que le paramètre géologique spécifique Area apporte un appui supplémentaire à la contribution des paramètres géologiques dans la première composante principale, qui était représentée que par le paramètre Mean-line sur le résultat des blocs de paramètres communs (Figure 84). Par ailleurs, la distinction la plus significative est observée dans la troisième composante principale CP3. En effet avec les paramètres spécifiques, CP3 dépend que des paramètres contrôle structurel et homogénéité. Ceci reflète une contribution encore plus importante des paramètres géologiques dans la variabilité des types de réseaux de drainage dans la région de l'Anti-Atlas Oriental, qui n'a pas été observée sur les résultats de CP3 des paramètres communs, qui présentait plutôt des corrélations avec le paramètre de morphométrie Kg et le temps de concentration Tc.

Ainsi CP3 des blocs des paramètres spécifiques a mis en évidence la relation entre les paramètres géologiques et le type de réseau de drainage, puisque les paramètres de contrôle structurel et l'homogénéité lithologique reflètent collectivement l'influence de la structuration géologique sur le contrôle du réseau de drainage. En d'autres termes, les bassins ayant une corrélation élevée dans CP3 sont susceptibles de refléter la présence d'un type de réseau soit type treillis ou rectangulaire. Pour illustrer cette relation, on a présenté la distribution de CP3 sur la région de l'Anti-Atlas Oriental (Figure 91). Les valeurs positives élevées de CP3 sont observées dans les secteurs MB, OOA, et à l'est des secteurs BS, SOA, où les types de treillis et rectangulaires prédominent sur les bassins avec une lithologie relativement hétérogène, sur des terrains plissés et fracturés (Fig. 10). Par contre, Les valeurs négatives de CP3 traduisant un faible contrôle structurel jusqu'à son absence et une lithologie relativement homogène, se

localisent particulièrement dans les secteurs DKK, BST et dans l'escarpement du Feija le sud de SB, attestant de la faible influence du contrôle structural sur le réseau de drainage.

Ainsi, la contribution des paramètres spécifiques a permis au mécanisme de la structuration géologique de contribuer dans une composante principale supplémentaire (CP3) et de s'imposer face aux mécanismes d'équilibre physique du bassin versant (Infiltration, ruissèlement et érosion) qui contrôlait CP3 dans le bloc de paramètres communs. Ce dernier processus a été poussé vers les composantes principales de plus faible ordre (CP4, CP5...), Pour expliquer la formation et la caractérisation des types de réseaux de drainage dans l'Anti-Atlas Oriental.

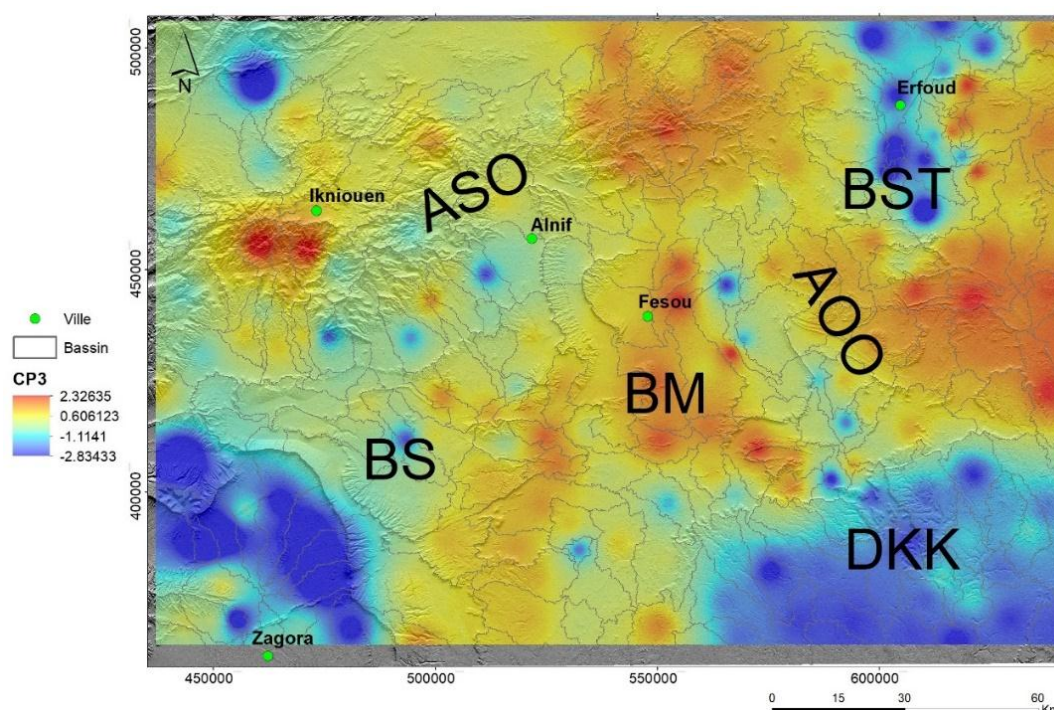


Figure 91: La distribution de la troisième composante principale CP3 du jeu de données des paramètres spécifiques de l'Anti-Atlas Oriental

### 1.2.2 La structure des données sur le jeu de paramètres spécifiques bassin versant de la Durance :

Les principaux plans factoriels de l'ACP du bassin de la Durance sont présentés dans la figure (Figure 92). La distribution de la variance selon les composantes principales a montré que l'information a été distribuée dans de nombreux CPs, ce qui indique en effet une information complexe et non redondante. Les trois premiers CPs expliquent 63% de la variation de l'information (Tableau 13).

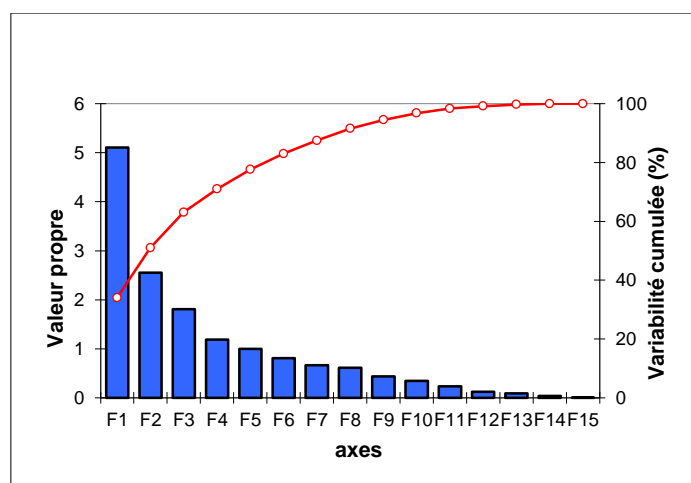


Figure 92: Principaux plans factoriels de l'ACP du jeu de données des paramètres spécifiques du bassin versant de la Durance.

Tableau 13: Distribution des variance dans les trois premières composante principales du jeu de données des paramètres spécifiques du bassin versant de la Durance

	CP1	CP2	CP3
Variabilité (%)	34.024	17.001	12.067
V Cumulative %	34.024	51.025	63.092

L'analyse individuelle de chacune de ces composantes montre que CP1 a elle seule explique 34% de la variation de l'information (Tableau 13). Elle présente des corrélations élevés et positives avec l'ensemble des paramètres de reliefs, avec des valeurs de 0.887, 0.912, 0.743 et 0.770 respectivement pour R1, R2, H et MEAN-Slope, des corrélations élevés et positives sont aussi observés avec le paramètre de morphométrie Kh, le paramètre IDPR avec des valeurs respectivement de 0.633 et 0.600 (Figure 93). CP1 présente aussi des valeurs de corrélations élevés et négatives avec les paramètres Kg et Tc avec des valeurs de corrélations respectivement de -0.625 et -0.763.

La deuxième composante principale CP2 explique 17% des variations observées. Elle présente des corrélations élevés et positives avec les paramètres Mean-Slope, Lithologie, Mean-DFault et Int-Deform avec des valeurs respectivement de 0.500, 0.483, 0.696 et 0.416. CP2 présente aussi une corrélation élevée et négative avec les paramètres Cl, Kh et Mean-Ddrain avec des valeurs de corrélation respectivement -0.487, -0.503 et 0.517. La troisième composante principale CP3 explique 12% des variances observées. Elle montre des corrélations positives élevées avec les paramètres Mean-Ddrain, IDPR et Homogénéité avec des valeurs respectivement 0.631, 0.515 et 0.417 (Figure 93).

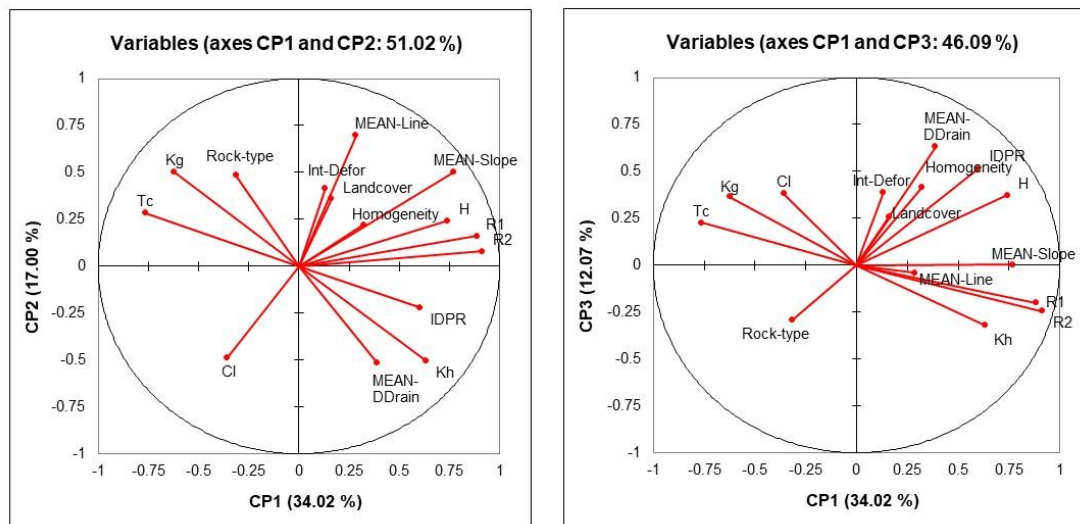


Figure 93: Distribution des paramètres du jeu de données spécifiques dans les trois premières composantes principales pour le bassin versant de la Durance.

Les différenciations du a l'apport des parametres spécifiques sont observées dans la première et la troisième composante principale (CP1 et CP3), et concernent particulièrement les paramètres IDPR. En effet ce dernier présente de très fortes corrélations positives sur ces deux dernières composantes principales. Le fait que IDPR est corrélé avec les paramètres de relief signifie que les régions de haut relief présentent des valeurs élevés IDPR, En d'autre terme, dans ces régions le processus de ruissèlement est supérieure à celui d'infiltration, ce qui aussi en accord avec la corrélation négative du paramètre temps de concentration Tc avec le relief et IDPR qui traduisent un réponse hydrologique rapide.

Dans CP3, la corrélation positive d'IDPR et la densité de drainage, traduit la relation qui existe entre l'infiltration, le ruissèlement et la densité de drainage, en d'autre terme, un bassin avec une forte valeur IDPR présentera une forte densité de drainage et inversement une faible valeur d'IDPR signifie que le bassin présente des conditions qui favorisent l'infiltration ce qui conduit à des faibles densités de drainage. Pour le paramètre Int-Defor, il présente une corrélation positive avec CP2 de la même façon que le paramètre Mean-Line. Ce dernier ainsi ne montre pas une différenciation, mais plutôt apporte un support a la contribution des paramètres géologiques sur CP2 et donc l'information qu'il apporte est redondante. Ainsi l'apport significatives des paramètres spécifiques dans le bassin versant de la Durance est observé à travers le paramètres IDPR, qui fournis une information supplémentaire et significative sur le rôle des processus d'infiltration et de ruissèlement dans la variabilité des types de réseaux de drainage dans les régions humides et particulièrement le climat tempéré.



## **2 Dimensionnalité de l'information : Approche comparative entre les trois zones**

Dans ce paragraphe, la distribution de la variance cumulée portée par les axes factoriels sera comparée et étudiée dans un premier temps pour le bloc commun des paramètres entre les trois zones d'études et dans un second temps entre le bloc des paramètres spécifiques et communs pour la région de l'Anti-Atlas Oriental et le bassin versant de la Durance. L'objectif étant d'analyser la complexité de la variance observée et le caractère homogène ou hétérogène entre les unités factorielles (Composantes principales) et la relation entre les paramètres sur les trois zones d'études. Il est à noter qu'un processus ayant des unités factorielles homogènes, signifie que la variance de ce dernier est portée par un nombre limité d'unités factorielles et que les premières unités factorielles présentaient des valeurs propres supérieures à l'unité. Par contre des unités factorielles hétérogènes, traduisent un processus complexe qui nécessite plusieurs unités factorielles pour expliquer sa variance.

### **2.1 Étude comparative de la dimensionnalité sur un même bloc des paramètres pour les trois zones d'études.**

La variance cumulée portée par les 13 axes factoriels des trois zones d'études montre une allure générale de distribution similaire entre les trois zones d'étude (Figure 94). Il faut se mettre à l'évidence que le nombre de bassins et leurs échelles sont variés et très différents entre les trois zones. Ceci ne fait que supporter l'hypothèse de l'existence d'un même processus global responsable de la distribution et la formation des types de réseaux de drainage, dont on a identifié et mesuré ces facteurs dans la partie précédente de l'analyse de la structure d'ACP.

Cependant en analysant cette distribution de la variation cumulée, axe factoriel par axe factoriel, des différenciations sont observées sur le troisième et le quatrième axe factoriel, avant que les zones d'études reprennent cette allure similaire (Figure 95). CP3 présente des valeurs de cumule de variance expliquée de 63.06%, 66% et 66.94% respectivement pour l'Anti-Atlas Oriental, le bassin du fleuve Cuanza et le bassin de la Durance et CP4 affiche des valeurs de 72.8%, 74.8%, et 74.6% respectivement pour l'Anti-Atlas Oriental, le bassin du fleuve Cuanza et le bassin de la Durance. Ces valeurs signifient que la région de l'Anti-Atlas Oriental, dont les quatre premiers axes factoriels ou composantes principales expliquent le moins de variance entre les trois zones, présente un nombre de processus moins important particulièrement sur les trois premières composantes principales. Ceci traduit une relation plus complexe entre les paramètres, produisant une hétérogénéité des unités factorielles (diminution de taux de variance expliquée), en d'autres termes le processus global contrôlant

les types de réseaux de drainage dans l'Anti-Atlas Oriental est légèrement complexe par rapport au bassin du fleuve Cuanza et le bassin de la Durance.

Ceci trouve probablement une explication dans la complexité des propriétés et caractéristiques physiques de l'Anti-Atlas Oriental, qui sont en effet très variés et diversifiés au sein même de cette région, dû à ses six secteurs ou domaines géologiques très distinctes entre eux et ayant leurs propres mécanismes (géomorphologie, lithologie, relief, climat, occupation de sol, ruissellement, infiltration...). Etant donné, que cette complexité est très apparente sur CP3 (Figure 95), nous pouvons en conclure, que particulièrement les mécanismes en relation avec l'équilibre de ruissellement, infiltration et érosion en est la source.

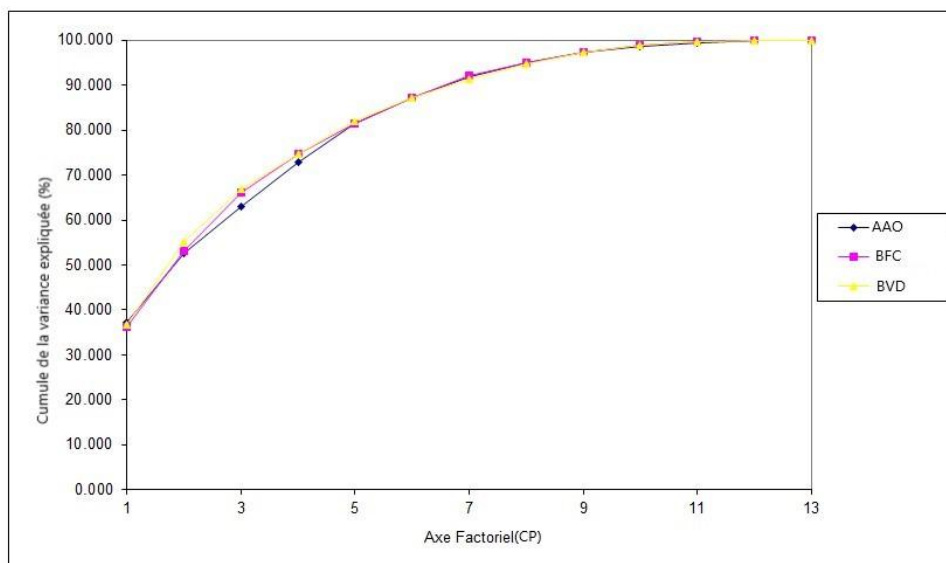


Figure 94: La distribution de la variance cumulée du bloc de paramètres communs portée par l'ensemble des axes factoriels des trois zones d'études, AAO : Anti-Atlas Oriental, BFC : Bassin du fleuve Cuanza et BVD : Bassin versant de la Durance.

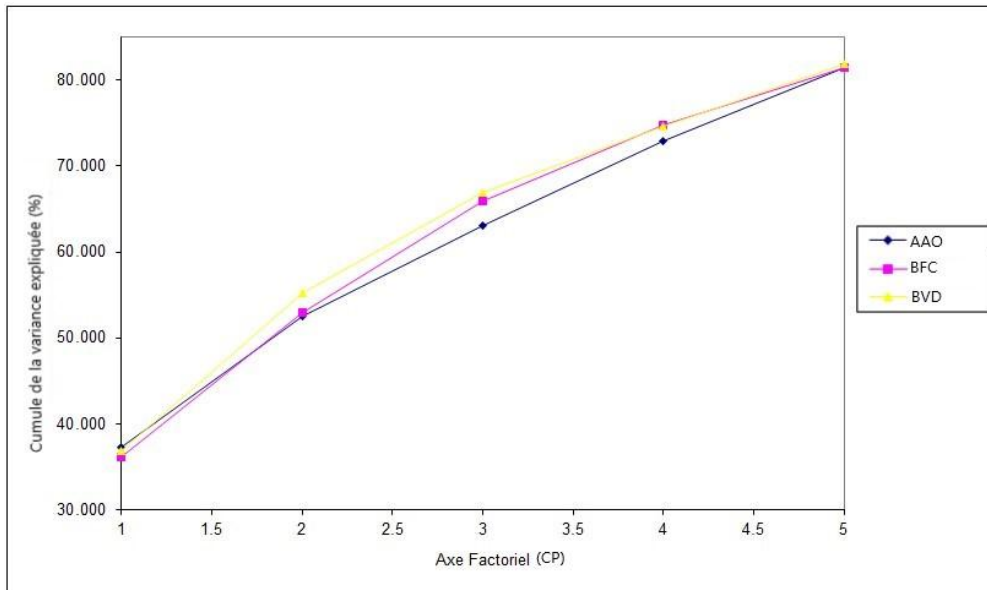


Figure 95: La distribution de la variance cumulée du bloc de paramètres communs portée par les quatre premiers axes factoriels des trois zones d'études.

## 2.2 Mesure du gain d'information apporté par les paramètres spécifiques

L'objectif ici est d'analyser l'apport des paramètres spécifiques dans la distribution de la variance observée et de constater s'ils contribuent à homogénéiser les unités factorielles en synthétisant encore plus les processus ou bien afficher plus de complexité. La distribution de la variance observée pour le bloc de paramètres communs et les paramètres spécifiques de la région de l'Anti-Atlas Oriental (Figure 96) et le bassin versant de la Durance (Figure 97) montre une légère différence. Pour l'Anti-Atlas Oriental les 4 premiers axes factoriels pour le bloc commun cumulent 72.8% de la variance contre 68.9% pour le bloc de paramètres spécifiques. Pour le bassin de la Durance les 4 premiers axes factoriels pour le bloc de paramètres communs cumulent 74.6% contre 70.9% pour le bloc de paramètres spécifiques.

Ainsi on constate que l'apport des paramètres spécifiques à chaque zone ne fait que compliquer la relation entre les paramètres et augmenter l'hétérogénéité entre les unités factorielles. Dans ce sens le processus global qui contrôle la distribution des types de réseaux de drainage ne dépend pas des caractéristiques propres et spécifiques de chaque zone, mais plutôt des caractéristiques globales qui contrôlent le réseau de drainage.

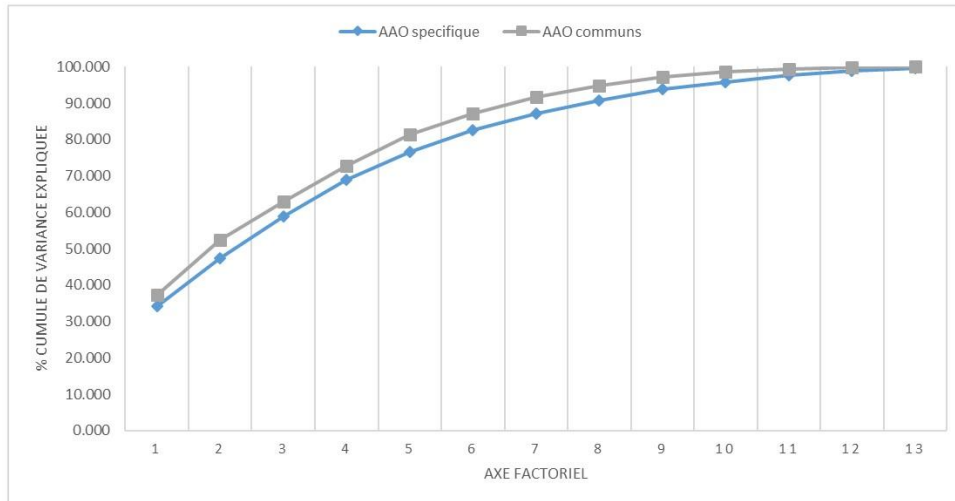


Figure 96: La distribution de la variance cumulée du bloc de paramètres communs et celui des paramètres spécifiques portée par les axes factoriels de l'Anti-Atlas Oriental

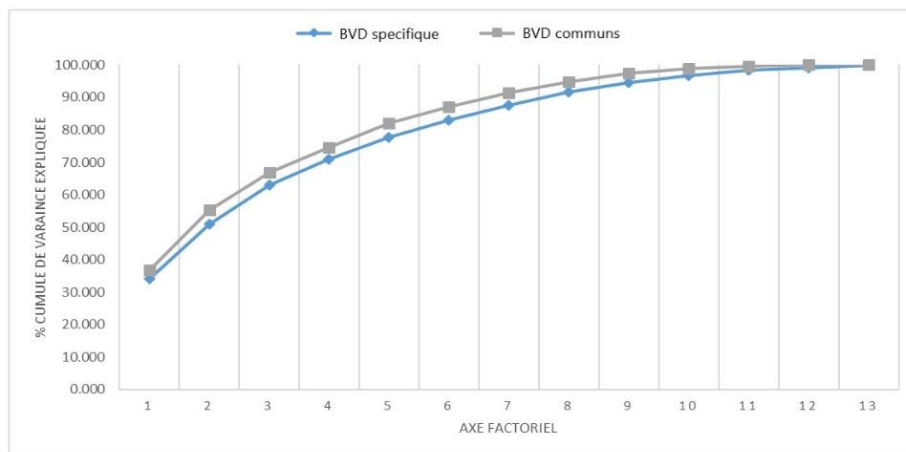


Figure 97: La distribution de la variance cumulée du bloc des paramètres communs et celui des paramètres spécifiques portée par les axes factoriels du bassin versant de la Durance

### 3 Analyse discriminante pour les trois zones

#### 3.1 Analyse discriminante sur le bloc de paramètres communs pour les trois zones d'études :

##### 3.1.1 Matrice de confusion :

L'analyse discriminante a identifiée quatre fonctions discriminantes pour le bassin du fleuve Cuanza et trois fonctions pour l'AAO, qui discriminent entre les types de réseaux de drainage avec un taux de précision de 98.86% (Tableau 14), 94.74% (Tableau 15) et 81.36% (Tableau 16) respectivement pour le bassin du fleuve Cuanza, le bassin versant de la Durance et l'Anti-Atlas Oriental. Il faut se rappeler que dans le chapitre 2, on a fixé un codage pour chaque type

de réseau de drainage : 0 = dendritique, 1 = parallèle, 2 = treillis, 3 = rectangulaire, 4 = chevron et 5 : barbelé.

La plus grande confusion entre les types de réseaux est observée dans l'AAO (Tableau 16), où seulement le type dendritique qui présentent un taux de discrimination de 100%, par contre tous les autres types présentent des confusions, donnant ainsi des taux de discrimination plus faibles que ce dernier type, mais qui restent comme même très satisfaisants, 84.85%, 89.56% et 51.86% respectivement pour les types parallèles, treillis et rectangulaires. Les confusions observées sont les suivantes : le type parallèles montre 4 réseaux discriminés comme dendritique et 1 réseau comme rectangulaire. Le type treillis montre 4 type discriminés comme étant dendritiques, 1 comme parallèle et 5 comme étant rectangulaires. Finalement le type rectangulaire montre le plus de confusion parmi les types de réseaux x de drainage de l'Anti-Atlas Oriental, sur les 54 types rectangulaires identifiés, 22 réseaux sont discriminés comme treillis et 4 type comme parallèles. Pour le bassin du fleuve Cuanza et le bassin de la Durance, on observe une légère confusion (Tableau 15), où un seul réseau chevron est discriminé comme étant de type dendritique. Tandis que dans le bassin versant de la Durance, un réseau de type rectangulaire est discriminé comme étant un chevron (Tableau 16).

Tableau 14: Matrice des confusions de l'AD obtenue sur le bloc des paramètres communs pour le bassin du fleuve Cuanza

from \ to	0	1	3	4	5	Total	% correct
0	22	0	0	0	0	22	100.00%
1	0	8	0	0	0	8	100.00%
3	0	0	18	0	0	18	100.00%
4	1	0	2	29	0	32	90.63%
5	0	0	0	0	8	8	100.00%
Total	23	8	20	29	8	88	96.59%

Tableau 15: Matrice des confusions de l'AD obtenue sur le bloc des paramètres communs pour le bassin versant de la Durance

from \ to	0	1	2	3	4	Total	% correct
0	2	0	0	0	0	2	100.00%
1	0	13	0	0	0	13	100.00%
2	0	0	15	0	0	15	100.00%
3	0	0	0	18	1	19	94.74%
4	0	0	0	0	45	45	100.00%
Total	2	13	15	18	46	94	98.94%

Tableau 16: Matrice des confusions de l'AD obtenue sur le bloc des paramètres communs pour la région de l'Anti-Atlas Oriental

from \ to	0	1	2	3	Total	% correct
0	39	0	0	0	39	100.00%
1	4	28	1	0	33	84.85%
2	4	1	84	5	94	89.36%
3	0	4	22	28	54	51.85%
Total	47	33	107	33	220	81.36%

### 3.1.2 Fonctions discriminantes des types de réseaux de drainage :

Les tableaux ci-dessous présentent les valeurs de corrélations entre les 13 paramètres et les fonctions discriminantes identifiées par l'AD respectives de chaque zone d'étude. Pour ces dernières la première fonction discriminante F1 discrimine le plus entre les types de réseaux de drainage avec des taux de succès de 46.18%, 67.57% et 63.39% respectivement pour le bassin du fleuve Cuanza, le bassin versant de la Durance et la région de l'Anti-Atlas Oriental (Tableau 17). Pour le bassin du fleuve Cuanza, F1 montre particulièrement des corrélations très élevés avec les paramètres de relief (Mean-slope, H, R1 et R2), suivies des paramètres géologiques (Mean-Line et Rock-type), le paramètre de morphométrie Cl, la densité de drainage et le l'occupation de sol (Tableau 18). Dans le bassin versant de la Durance, F1 présente des corrélations significatives avec presque les mêmes paramètres que le bassin du fleuve Cuanza, à l'exception du paramètre géologique du type de roche (Rock-type) et la densité de drainage (

Tableau 19). Quant à la région de l'Anti-Atlas Oriental, F1 présente des corrélations très élevés avec uniquement les paramètres géologiques (Rock-type, Homogénéité et Mean-line) (Tableau 20).

Tableau 17: Taux de discrimination des fonctions discriminantes identifiées par l'AD pour les trois zones d'études

Zone d'étude		F1	F2	F3	F4
BFC	Discrimination (%)	46.176	32.448	16.357	5.019
	Cumulative %	46.176	78.624	94.981	100.000
BVD	Discrimination (%)	67.572	18.292	9.824	4.312
	Cumulative %	67.572	85.864	95.688	100.000

AAO	Discrimination (%)	63.389	30.092	6.518	
	Cumulative %	63.389	93.482	100.000	

La deuxième fonction discriminante F2 arrive à discriminer les types de réseaux de drainage avec un succès de 32.45%, 18.29% et 30.09% respectivement pour le bassin du fleuve Cuanza, le bassin versant de la Durance et l'Anti-Atlas Oriental (Tableau 17). On remarque que pour le bassin du fleuve Cuanza et la région de l'Anti-Atlas Oriental, leur F2 montre un taux de discrimination élevé par rapport au bassin versant de la Durance, et elles présentent des corrélations élevés avec les paramètres de relief (H, R1 et R2) et le paramètre de densité de drainage (Mean-Ddrain) (Tableau 18 et Tableau 20). Par ailleurs le paramètre du temps de concentration Tc présente une corrélation négative et élevé avec F2 dans le bassin du fleuve Cuanza. Pour le bassin de la Durance, F2 présente des corrélations avec les paramètres de Morphométries (Kg et Kh) et le paramètre de d'occupation de sol (Landcover).

La troisième fonction discriminante F3 discrimine entre les type de réseau avec une précision de 16.36%, 9.82% et 6.52% respectivement pour le bassin du fleuve Cuanza, le bassin versant de la Durance et l'Anti-Atlas Oriental (Tableau 17). F3 présente une corrélation élevé et négative avec le paramètre géologique type de roche (Rock-Type) dans le bassin du fleuve Cuanza. Dans le bassin de la Durance, F3 présente des corrélations élevés et négatives avec les paramètre de relief (H, R1 et R2) et positive avec le paramètre géologique de densité de linéaments géologiques (Mean-line). Pour l'Anti-Atlas Oriental, F3 présente des corrélations élevés et positives avec l'ensemble des paramètres de relief, le paramètre géologique de densité des linéaments géologiques et le paramètre d'occupation de sol. La quatrième fonction discriminante F4 discrimine les types de réseaux de drainage dans le bassin du fleuve Cuanza et le bassin de la Durance, avec respectivement une précision de 5.02% et 4.31% (Tableau 17). Sur le bassin du fleuve Cuanza F4 est corrélér positivement avec le paramètre d'occupation de sol (Landcover), et négativement avec le paramètre de relief H et le temps de concentration (Tc). Pour le bassin versant de la Durance, F4 repose uniquement sur le paramètre géologique (Homogénéité).

Ainsi, on peut observer dans un premier temps, que la contribution des descripteurs de reliefs et de géologies est très importante dans l'analyse discriminante linéaire pour discriminer et caractériser les différents types de réseaux de drainage pour les trois zones étudiées, c'est-à-dire dans des environnements très différents. Néanmoins la part de contribution des autres descripteurs est non négligeable particulièrement pour le paramètre de l'occupation de sol et la densité de drainage.

Tableau 18: Corrélation entre les différents paramètres et les quatre fonctions discriminantes du bassin de fleuve Cuanza :

	F1	F2	F3	F4
MEAN-slope	-0.632	0.523	-0.286	0.039
H	-0.389	0.749	-0.032	-0.327
R2	-0.404	0.788	0.187	-0.075
R1	-0.402	0.789	0.157	-0.100
Kg	-0.078	0.033	-0.230	-0.255
Cl	0.583	0.314	0.190	0.272
Kh	-0.078	-0.052	0.367	0.006
Rock-type	-0.421	0.471	-0.512	-0.116
Homogénéité	-0.232	-0.184	0.098	0.252
MEAN-Line	-0.770	0.151	0.041	0.067
MEAN-Drain	0.626	0.496	0.315	0.008
Landcover	-0.438	-0.269	-0.094	0.651
Tc	0.269	-0.600	-0.202	-0.363

Tableau 19: Corrélation entre les différents paramètres et les quatre fonctions discriminantes du bassin versant de la Durance

	F1	F2	F3	F4
MEAN-Slope	0.854	-0.012	-0.166	0.056
H	0.611	0.045	-0.441	-0.227
R1	0.435	-0.136	-0.419	-0.169
R2	0.395	-0.275	-0.430	-0.088
Kg	0.143	0.601	0.263	-0.147
Cl	-0.445	0.205	-0.024	0.100
Kh	-0.134	-0.719	-0.266	0.255
Rock-type	-0.070	0.130	0.244	0.294
Homogénéité	0.284	0.111	-0.068	0.561
MEAN-Line	0.403	-0.120	0.531	-0.165
MEAN-DDrain	0.071	-0.235	-0.148	-0.143
Landcover	0.555	-0.490	0.089	-0.095
Tc	-0.138	0.219	0.075	-0.142

Tableau 20: Corrélation entre les différents paramètres et les trois fonctions discriminantes de l'Anti-Atlas Oriental

	F1	F2	F3
MEAN-Slope	0.217	0.280	0.747
H	0.099	0.848	0.365
R1	0.148	0.664	0.399
R2	0.176	0.578	0.388
Kg	-0.160	-0.110	0.129



Cl	-0.244	-0.306	0.444
Kh	0.156	0.124	-0.072
Rock type	0.316	-0.094	0.205
Homogénéité	0.950	0.188	-0.070
MEAN-Line	0.322	0.152	0.660
MEAN-Ddrain	-0.122	0.458	-0.303
Landcover	0.161	0.004	0.676
Tc	-0.046	-0.135	0.162

### 3.1.3 Distribution des observations sur les axes bidimensionnels des fonctions discriminantes :

Les espaces bidimensionnels dont les axes sont les fonctions discriminantes permettent d'observer la distribution des bassins (les observations) et leur centroides qui représentent les points centraux des observations de chaque type de réseau de drainage et d'identifier les processus responsables de la discrimination de ces derniers par les différentes fonctions identifier par l'AD (Figure 98, Figure 99 et Figure 100). Le graphe F1-F2 permet de séparer entre les types de réseaux de drainage avec une précision de 78.62%, 85.86% et 93.84% respectivement pour le bassin du fleuve Cuanza (Figure 98-a), le bassin versant de la Durance (Figure 99-a) et l'Anti-Atlas Oriental (Figure 100-a).

L'axe F1 sur le bassin du fleuve Cuanza (Figure 98-a) permet de séparer clairement le type dendritique des autres types de réseaux, en mettant ce dernier dans le côté positive. Le type parallèle se trouve de part et d'autre de l'axe F1 sans discrimination significative. Par ailleurs les types rectangulaires, chevron et barbelé se trouvent majoritairement dans le côté négatif de F1 ou ils y sont presque superposés. Sur le bassin de la Durance (Figure 99 –a) on remarque que l'axe F1 permet de séparer d'une part les types treillis et chevron dans le côté positive, où ils sont presque superposés. D'autre part les types dendritique, parallèle et rectangulaire sont positionnés dans le côté négatif de ce dernier axe, où le type dendritique et parallèle y sont presque superposés, par contre le type rectangulaire est légèrement isolé de ces deux derniers types, en étant plus proche du centre de l'axe central F1. L'axe de la fonction F1 dans l'Anti-Atlas Oriental (Figure 100-a) permet de séparer les types dendritique et parallèle en les mettant dans le côté négatif, des types treillis et rectangulaire qui sont situés et superposés sur le côté positive de F1.

L'axe F2 permet particulièrement de séparer dans le bassin du fleuve Cuanza entre les types parallèles, rectangulaire, chevron et barbelé qui ont été superposés sur l'axe F1 (Figure 98-a). Le type rectangulaire est le plus distingué sur l'axe F2, la majorité des observations se situe dans le côté positif, le type parallèle présente aussi des observations positives sur l'axe F2

mais de façon moins prononcée que les types rectangulaires. Le type chevron est séparé des autres types en se positionnant majoritairement sur le côté négatif de cet axe. Le type barbelé se trouve de part et d'autre l'axe F2, sans montrer aucune discrimination significative.

Par ailleurs, Dans le bassin versant de la Durance l'axe F2 d'une part, sépare le type rectangulaire des types dendritique et parallèle (Figure 99-a), en effet le type rectangulaire est isolé de ces derniers en se mettant dans le côté négatif de F2, par contre les types dendritique et parallèle se situent dans le côté positif de F2. D'autre part, les types treillis et chevrons ne présentent pas de distribution significatives sur ce dernier axe. Dans la région de l'Anti-Atlas Oriental (Figure 100-a), L'axe F2 permet de séparer les types parallèles des autres types de réseaux et particulièrement du type dendritique qui est totalement isolé des autres types de réseaux dans le côté négatif. Dans ce dernier axe les types treillis et rectangulaire sont aussi superposés sans discrimination apparente.

Le graphe F1-F3 permet de discriminer les types de réseaux avec une précision de 62.53%, 77.40% et 69.61% respectivement pour le bassin du fleuve Cuanza (Figure 98-b), le bassin versant de la Durance (Figure 99-b) et la région de l'Anti-Atlas Oriental (Figure 100-b). Le plus important dans ces graphes est l'axe F3 qui permet de séparer dans le bassin du fleuve Cuanza le type parallèle des autres types de réseaux (Figure 98-b). Dans le bassin versant de la Durance (Figure 99-b), l'axe F3 permet de séparer les types treillis et chevron qui étaient superposés dans le graphe F1-F2. Les observations du type treillis se situent majoritairement dans le côté positif de F3, par contre les observations du type chevron se présentent en grand nombre dans le côté négatif. Sur l'axe F3 de l'Anti-Atlas Oriental (Figure 100-b), on arrive à séparer légèrement les types treillis et rectangulaire, mais la superposition entre ces deux derniers est toujours significative. Les types dendritique et parallèles sont superposés au centre de l'axe F3 sans discrimination significative. Le graphe F1-F4 permet de discriminer entre les types de réseaux avec une précision de 51.19% et 71.82% respectivement pour le bassin du fleuve Cuanza (Figure 98-c) et le bassin versant de la Durance (Figure 99-b). Ce dernier axe Permet de séparer dans le bassin du fleuve Cuanza le type barbelé de l'ensemble des autres types de réseaux de drainage. Pour le bassin de la Durance, l'axe F4 permet de séparer le type dendritique des autres types, en effet les deux bassins de ce dernier type sont isolés et localisés particulièrement dans le sommet du côté positif de l'axe F4.

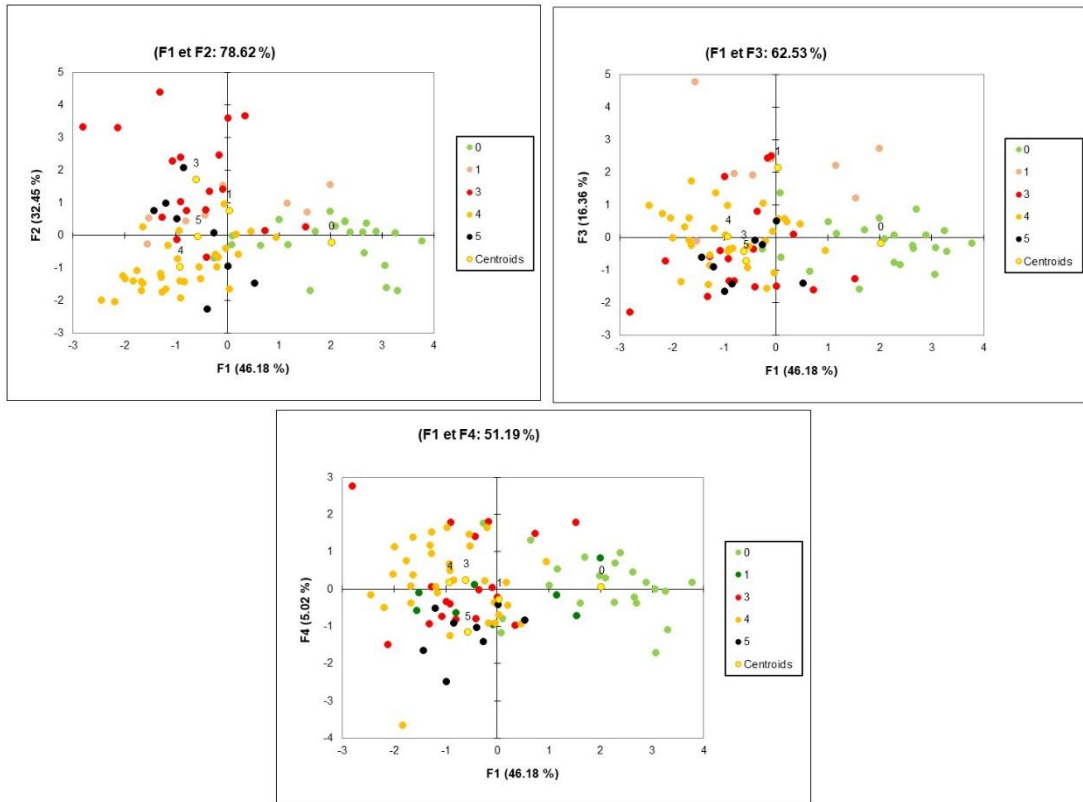


Figure 98: Distribution des observations et des centroïdes de chaque type de réseau de drainage dans les espaces bidimensionnels (a)F1-F2, (b) F1-F3 et (c) F1-F4 le bassin du fleuve Cuanza.

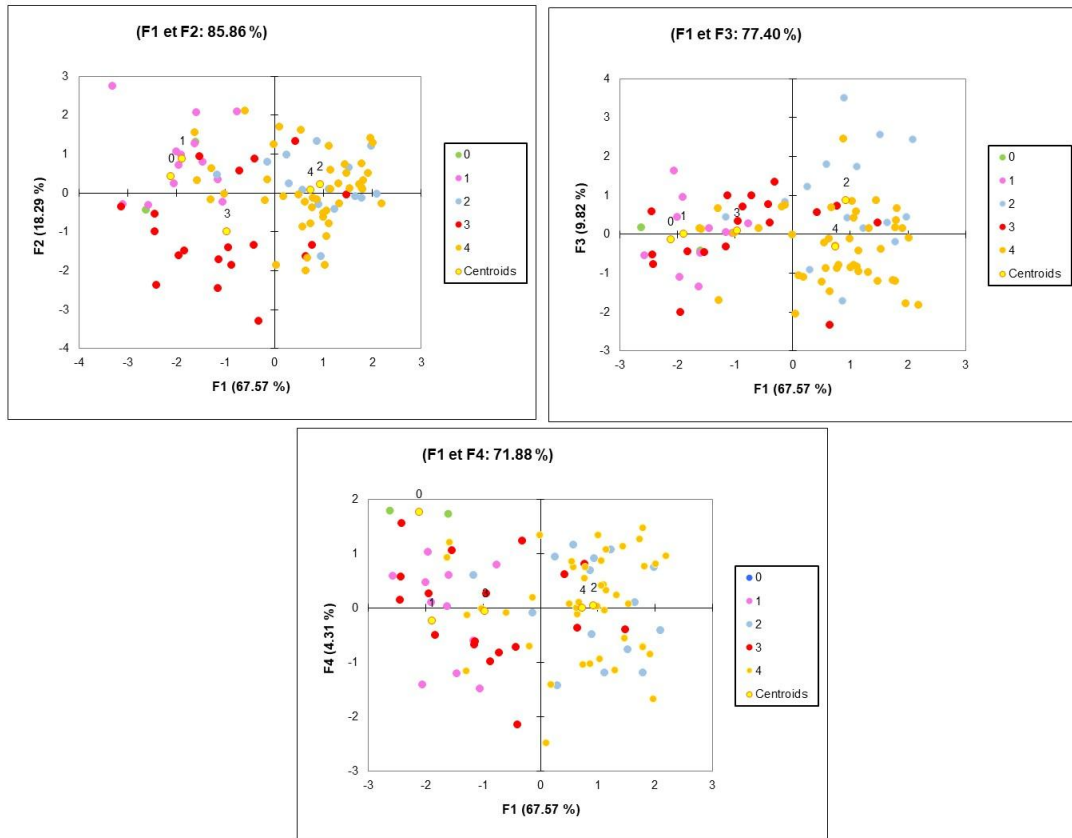


Figure 99: Distribution des observations et des centroïdes de chaque type de réseau de drainage dans les espaces bidimensionnels (a) F1-F2, (b) F1-F3 et (c) F1-F4 pour le bassin versant de la Durance.

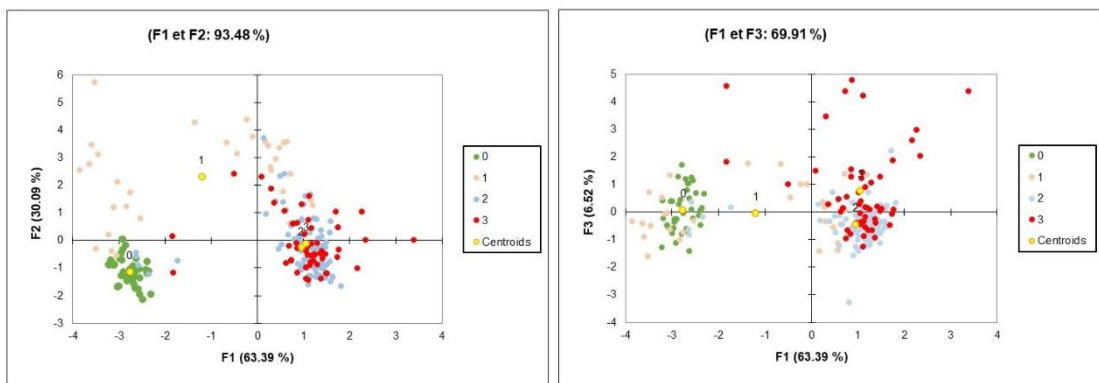


Figure 100: Distribution des observations et des centroïdes de chaque type de réseau de drainage dans les espaces bidimensionnels (a) F1-F2 et (b) F1-F3 pour l'Anti-Atlas Oriental.

### 1.1.1 Caractérisation multifactoriel des types de réseaux de drainage

Les résultats obtenus sur les matrices de confusion des trois zones d'études, signifient d'une part que les paramètres communs sont convenables pour caractériser avec un taux de succès supérieurs à 80% entre les types de réseaux de drainage (Tableau 14, Tableau 15 et Tableau

16). D'autre part ces paramètres peuvent être généralisables pour la discrimination des types de réseaux de drainage sur les différents climats. Également les résultats obtenus sur les fonctions discriminantes donnent un aperçu détaillé sur les paramètres qui contribuent le plus dans chaque zone d'étude et aussi sur l'ensemble de ces derniers.

On remarque que dans le bassin du fleuve Cuanza et dans le bassin versant de la Durance, les paramètres de relief, de géologie et de couverture végétale contribuent le plus dans la discrimination entre les types de réseaux de drainage. Par ailleurs dans l'Anti-Atlas Oriental, seuls les paramètres géologiques contrôlent significativement la discrimination entre les types de réseaux de drainage. Cette constatation est basée sur le fait que ces derniers paramètres présentent le plus de corrélation avec la première fonction discriminante F1 qui discrimine le plus entre les types de réseaux de drainage dans les trois zones d'études.

Ainsi, les climats humides du bassin de fleuve Cuanza et le bassin versant de la Durance conduisent la couverture végétale dont ils disposent à jouer un rôle significatif dans la discrimination entre les types de réseaux de drainage, par ailleurs l'aridité de l'Anti-Atlas Oriental et sa géologie exceptionnelle, font de la structuration géologique un facteur majeur de la discrimination. Néanmoins, sur l'ensemble des trois zones, les paramètres de relief et de géologie contribuent significativement par rapport aux autres paramètres, ce qui est en accord avec l'hypothèse de Zernitz (1932) qui stipule que la topographie et la structuration géologique sont les facteurs déterminants des types de réseaux de drainage.

Le couplage des paramètres de relief et de géologie dans le bassin du fleuve Cuanza et le bassin versant de la Durance, s'explique par la coexistence dans ces deux dernières zones d'études, de deux grandes familles de réseaux de drainage, étudiés dans une étude récente par Pereira-Claren et al (2019), qui sont les types de réseaux des haut-relief, contenant les types chevron et barbelé et les réseaux des bas-relief rassemblant les types dendritique, parallèle, treillis et rectangulaire. Ces constatations expliquent en partie la forte corrélation des paramètres de relief dans la première fonction discriminante F1 dans le bassin du fleuve Cuanza (Tableau 18) et le bassin versant de la Durance (

Tableau 19) afin de séparer entre ces deux familles de types de réseaux de drainage.

### **1.1.2 Discrimination des types de réseaux dans le Bassin du fleuve Cuanza :**

Les quatre fonctions discriminantes identifiées à partir de l'AD sur le bassin du fleuve Cuanza montrent que les bassins peuvent être distingués avec un taux de 96.59% sur la base de leur type de réseau de drainage (Tableau 14). La première fonction discriminante F1

descriment entre les bassins en se basant sur leurs conditions du relief, de géologie, et d'occupation de sol qui présentent une corrélation négative et la densité de drainage qui est par contre positivement corrélée (Tableau 18). F1 permet de séparer le type dendritique des autres types de réseau, en mettant ce dernier dans le côté positif. Ceci est dû au fait que les bassins de types dendritiques dans le bassin du fleuve Cuanza, se développent exclusivement dans le domaine structural des zones de sables, caractérisées par un relief très faible, avec une faible pente, recouverte par des terrains sédimentaires récents constitués par des dépôts alluviaux et colluviaux quaternaires, représentant une lithologie uniforme traduisant l'absence d'une érosion différentielle, une faible densité de linéaments géologiques (Carvalho, 1998; Schlüter, 2008), et une végétation de type savane et terre herbeuse. Ces conditions affectent la capacité d'infiltration et la résistance du sol, ainsi l'écoulement de surface se développe favorisant les conditions de ruissellements conduisant à une forte densité de drainage (Figure 101) (Sangireddy et al., 2016).



Figure 101: Végétation de type savane boisée dans la zone des sables, à l'ouest de Malanje.

F1 superpose les types rectangulaire, chevron et barbelé dans le côté négatif. Ceci est expliqué d'une part, par le fait que les types rectangulaire et barbelés sont localisés particulièrement dans le domaine structural du massif central où la forte densité de linéaments est une réponse aux plus anciennes formations du Précambrien qui affleurent dans la partie nord, ouest et nord-ouest du bassin du fleuve Cuanza (Figure 75). Comme expliqué dans les relations entre les caractéristiques géologiques et du réseau de drainage du bassin fleuve Cuanza dans le chapitre 2, la forte densité des linéaments dans ces dernières régions produit un contrôle de la structuration géologique sur les cours d'eaux, ce qui conduit à une diminution de la densité de drainage (Figure 75).

Par ailleurs, les types chevrons, se développent sur les formations du haut Zambèze dans la partie occidentale et sud dans la zone des sables du bassin du fleuve Cuanza. Cette région est

caractérisée par des moyennes densités de linéaments et par des dépôts sédimentaires carbonatés, des grès quartzitiques du tertiaire et des roches magmatiques mésozoïques misent en place par des activités tectonique et magmatique au cours de cette période (Schlüter, 2008). L'ensemble de ces conditions de relief, géologie et géomorphologie des bassins de types rectangulaire, chevron et barbelé traduisent un contrôle structural sur le réseau de drainage. Ces régions sont aussi caractérisées par une occupation de sol caractérisée par une végétation très développée dominée par les savanes boisées et les forêts mixtes (Figure 102).

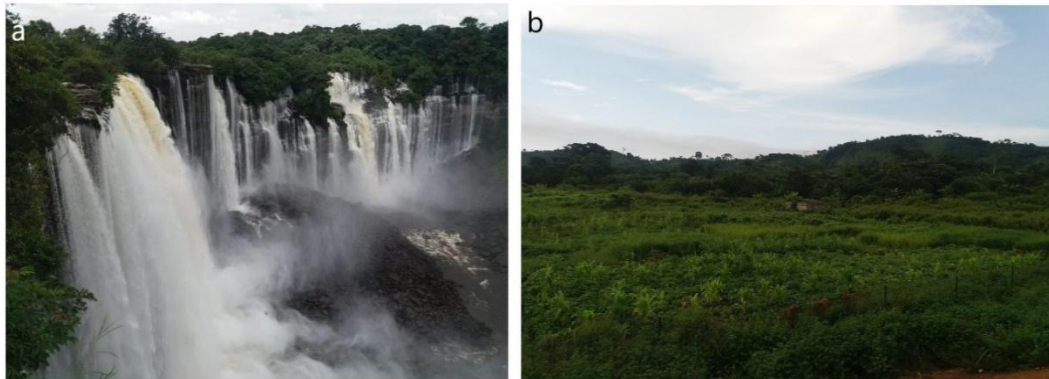


Figure 102: : (a) végétation de type forêt dans chute d'eau de Calandula du fleuve Lucala nord-ouest de Malanje (b) Végétation de type forêt mixte dans nord-ouest de Luando.

L'axe F2 permet de séparer entre d'une part les types rectangulaire et parallèle, et d'autre part les types chevron et barbelé (Figure 98-a). La majorité des bassins de types rectangulaires et parallèles ainsi que leurs centroides sont localisés dans le côté positive de F2, qui illustre la relation entre le relief, le type de roche, la densité de drainage et le temps de concentration (Tableau 18). En effet les types rectangulaires se localisent dans la partie amont du bassin du fleuve Cuanza (Figure 74-a) où les terrains du domaine du massif central sont les plus élevés et accidentée. Par ailleurs, Les bassins de type parallèle pour la plupart prennent naissance à partir des points élevés du bord oriental du massif central où la pente des vallées est raide, la couverture végétale est dense et la densité de drainage est faible à moyenne, puis leurs réseaux s'écoulent vers les plaines alluviales de la zone des sables où la pente est plus douce et la densité de drainage est la plus élevée.

Les réseaux de drainage de type chevron se situent dans le côté négatif de F2. En effet, ces derniers localisés dans la partie orientale et sud du bassin du fleuve Cuanza et faisant ainsi partie du domaine de la zone des sables (Figure 74-a), leurs bassins présentent un relief faiblement élevé et pas aussi accidenté que les bassins du massif central. Ceci est aussi attesté par la différence de densité des linéaments, qui est élevés dans le nord et moyennes à faible en allant vers le sud (Figure 72-a). Cela est dû au fait que la plupart des zones élevées, comme dans le massif central, qui ne sont pas habituellement couvertes par une grande quantité de

dépôts superficiels représentent habituellement des zones de déformation structurale complexe et contiennent généralement une grande densité de systèmes de failles, de fractures et de dykes bien discernables qui sont clairement visibles à la surface du sol (Cahen et al., 1984; Carvalho, 1998; Schlüter, 2008; Radaideh et al., 2016, Bouramtane et al., 2017).

Les bassins de type barbelés sont faiblement discriminés dans F2 avec 4 bassins dans le côté positif, un bassin sur l'axe central et 3 bassins dans le côté négatif, ce qui a projeté leur centroïde dans l'axe central de F2, attestant de cette faible discrimination. L'explication de ceci trouve sa réponse dans la contribution du paramètre Tc sur F2 (Tableau 18). En effet même si les bassins de type barbelés présentent des reliefs élevés et des types de roches granitique-métamorphique, ils affichent des valeurs élevées de Tc contrairement aux types rectangulaire et parallèles (

Tableau 21), ce qui empêche le positionnement de l'ensemble des bassins de type barbelés dans le côté positif de F2.

Sur le Tableau 21 les types parallèle et rectangulaire présentent des valeurs élevées de CN et ainsi des taux élevés de ruissèlement, conduisant à des temps de concentration plus faibles. Par contre, on peut voir que les bassins de type barbelé présentent des valeurs élevées de CN, mais ils présentent des grandes surfaces par rapport aux autres types, avec une surface moyenne de 3281.4 Km<sup>2</sup> contre 1113.053 Km<sup>2</sup> et 1423.3 Km<sup>2</sup> respectivement pour le type parallèle et le type rectangulaire, conduisant ainsi les types barbelés à avoir des valeurs élevées de Tc.

Tableau 21: les valeurs moyennes CN, de surface de bassin et de temps de concentration pour les différents types de réseaux de drainage dans le bassin du fleuve Cuanza.

Type	CN	Surface (Km <sup>2</sup> )	Tc (h)
Dendritique	85.72	1373.24	47.23
Parallèle	86.5	1113.0	31.38
Rectangulaire	88.05	1423.28	27.21
Chevron	81.68	1778.98	43.11
Barbelé	87.12	3281.39	46.96

La fonction F3 étant négativement corrélée avec le paramètre de type de roche, elle met dans le côté négatif tous les bassins qui présentent des valeurs élevées de type de roches. Cette fonction isole les types dendritique, rectangulaire, chevron et barbelé dans le côté négatif ce qui signifie que ces derniers, contiennent des types de roches sédimentaire, volcaniques et/ou granitique-métamorphiques et présentent ainsi des valeurs négatives sur F3. Par contre les bassins parallèles, par leurs positions au piémont du massif central se déversant sur les plaines alluviales de la zone des sables (Figure 74), sont recouvertes en majorités par des dépôts



récents alluviales du quaternaires (Figure 55), ils se trouvent ainsi bien isolés dans le côté négatif de F3 (Figure 98-b).

Finalement les bassins de type barbelé ont pu être discriminés significativement par rapport aux autres types de réseaux dans le graphe F1-F4 (Figure 98-c), plus particulièrement grâce à la fonction F4 qui présente une corrélation positive avec le paramètre d'occupation de sol et négative avec le paramètre de relief H et le paramètre Tc. F4 isole les bassins barbelés dans le côté négatif de son axe, puisque ces derniers d'une part, présentent les valeurs les plus élevées de H dans le bassin du fleuve Cuanza dû à leurs localisations dans les hauts reliefs du massif central, et ils présentent les valeurs les plus élevées de temps de concentration comme les types dendritique et chevron (Tableau 21).

### **1.1.3 Discrimination des types de réseaux de drainage dans le Bassin versant de la Durance :**

L'AD calculée sur le bassin versant de la Durance présente aussi quatre fonctions discriminantes qui permettent de discriminer entre les types de réseaux avec un taux de succès de 98.94% (Tableau 16). La première fonction discriminante F1, sépare les types treillis et chevron des types dendritiques parallèles et rectangulaire (Figure 99-a) en se basant sur les caractéristiques de relief, la morphométrie, la géologie et d'occupation de sol (Tableau 19).

La position des bassins de types treillis et chevron dans le côté positif de l'axe F1 signifie que ces derniers présentent des reliefs élevés et accidentés et une forte densité de fracturations. Ces caractéristiques sont dues au fait que ces derniers, comme expliqué dans le chapitre 3 sont localisés sur la partie amont du bassin versant de la Durance, sur les hautes montagnes du domaine alpins (Figure 80). Cette région est caractérisée par des hauts reliefs, une forte densité de fracturation (Figure 77-b) avec la présence de plusieurs structures plissées anticlinales et synclinales des formations sédimentaires carbonatées (Figure 78) (Figure 103-a,b) (Sternai et al., 2019).

Ceci est en accord avec les observations faites sur ces deux derniers types de réseaux (Zernitz, 1932; Parvis, 1950; Howard, 1967; Rdaideh et al., 2016; Walley et al., 2018; Pereira-Claren et al., 2019), qui ont constatés que le type treillis est connu pour être associé aux structures sédimentaires plissées, par ailleurs, le type chevron se développe dans les zones montagneuses et dans les environnements avec des pentes latérales extrêmes qui dépassent l'influence de la pente régionale sur le réseau de drainage. Ces conditions de relief, de géologie et géomorphologie, et ces types de réseaux de drainage identifiées, traduisent un contrôle intense de la structuration géologique sur le réseau de drainage dans le domaine alpin du bassin versant de la Durance. L'analyse morphologique du réseau de drainage dans la partie orientale des montagnes des Alpes, conduite par Ribolini et Spagnolo (2008) et Robl et

al (2008), a montré que les régions où la topographie et les taux de soulèvement tectonique sont les plus élevés, le contrôle structural se traduit par la puissance élevée des cours d'eau. Cette dernière constatation a été en effet observée sur des cours d'eau localisés dans la vallée de l'Ubay près de la commune de Barcelonnette (Figure 103-c,d). L'occupation de sol contribue aussi significativement dans la discrimination sur l'axe F1 (Tableau 19). La position des bassins de type treillis et chevron dans les hauts reliefs, leur confère une végétation dominée par les types forêts et végétation boisées (Figure 104).



Figure 103: : (a) Formation calcaire et (b) Formations des flyshes. (c) et (d) Lits des cours d'eaux torrentiel dans de la vallée de l'Ubay dans le commun de Barcelonnette.

Par ailleurs les bassins de types dendritique et parallèle sont superposés sur le côté négatif de F1, ce qui signifie selon les valeurs de corrélations des paramètres, que ces derniers se forment dans des conditions de bas-relief et/ou faible intensité de fracturation et une occupation de sol caractérisée par une faible végétation. Ceci est dû au fait que les types dendritique et parallèle se localisent particulièrement dans les avant-pays du domaine alpin et les plaines alluviales du bassin de la Durance. Ces régions de faible relief, présentant des formations géologiques dominées par des dépôts de conglomérat, grès, argile et les dépôts alluviaux et colluvions. Comme l'exemple de la formation conglomératique du Valensole avec une pente légère (Figure 79-a,b), où on a le développement d'un réseau de drainage de types parallèle (Figure 80).

Dans le sud-ouest de la zone d'étude, sur le domaine karstique de la fontaine de Vaucluse, cette région caractérisée par une faible densité de réseau de drainage du au taux élevés de l'infiltration des puissantes formations calcaires (Figure 79-c,d), les cours d'eaux principaux et permanents qui s'y écoulent suivent des failles majeurs parallèles qui traversent les puissantes formations calcaires, ce qui donne au réseau de drainage une structuration parallèle (Figure 80). Ces régions d'avant-pays comme constater par, Robl et al (2008) sont caractérisés par une puissance des cours d'eau nettement inférieure à celle des régions montagneuses (Figure 105). Les deux bassins dendritiques identifier dans le bassin de la Durance sont localisées dans les niveau les plus bas en aval sur la plaine alluviale de la Durance, ou la pente est la plus faible (Figure 80).

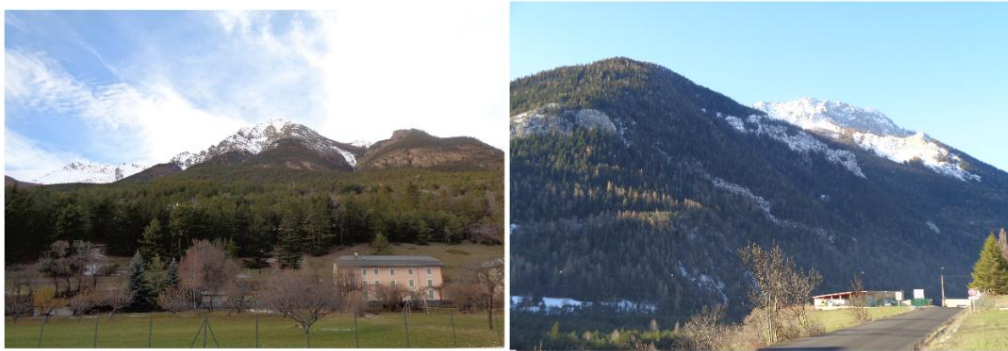


Figure 104: Observation des types de végétation forêts et végétation boisées sur les reliefs de la partie amont du bassin versant de la Durance



Figure 105: Observation du lit de la rivière de la Durance, la partie aval du bassin versant de la Durance.

Par ailleurs les types rectangulaires, identifiés dans le côté négatif de F1 (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**-a), est dû au fait que 15 bassins de type rectangulaire sur les 19 identifiés dans le bassin versant de la Durance sont localisées dans l'avant-pays du domaine alpin dans le domaine provençal, où le relief est moins élevé par rapport aux régions dans lesquelles se forment les bassins de types treillis et chevron. Cependant dans ces bassins, la présence de structures sédimentaires carbonatées qui présentent des plissement spectaculaires (Figure

106), attestent des conditions géologique et géomorphologiques d'intense, ce qui est consistant avec la présence de ces bassins de types rectangulaires dans ces régions. De points de vue couverture végétale, les bassins de types dendritiques, parallèles et rectangulaire sont dominer par des végétations de types savane, pâturage et végétation boisées. De façon plus global l'axe F1 sépare entre les types de réseaux de drainage en se basant sur les caractéristiques du relief qui traduisent les conditions géologique et géomorphologiques et contrôle le développement et la distribution de la couverture végétale (Sangireddy et al., 2016).



Figure 106: Observation des affleurements calcaire et des alternances marno-calcaire dans l'avant-pays du bassin versant de la Durance.

L'axe F2 étant corrélée avec les paramètres de morphométrie et de couverture végétale, sépare particulièrement les bassins de types parallèles des bassins de type rectangulaire (Figure 99-a). En effet, la plupart des bassins parallèles présentent des formes allongées (Figure 80) avec des valeurs élevées de  $K_g$  et faible valeur de  $K_h$ , par contre les bassins de types rectangulaire présentent des formes circulaires avec des faibles valeurs de  $K_g$  et valeur élevés de  $K_h$  (Tableau 22).

Cette relation entre la forme du bassin et le type de son réseau de drainage dépend de la surface de pente (Castelltort et al., 2009). En effet les types de réseaux parallèles étant associés à des pentes modérés jusqu'à élevées (Zernitz, 1932; Howard, 1967, Twidale, 2004), leurs surfaces plus abruptes développent des bassins plus étroits et plus longs, tandis que les surfaces à faible pente, avec l'influence de la géologie et la géomorphologie le cas des bassins de types rectangulaire, développent des bassins plus larges. Cette relation est interprétée comme étant liée à la nature de l'écoulement de l'eau sur des surfaces rugueuses, les pentes plus raides entraînant une moindre convergence de l'écoulement et des bassins plus longs et plus étroits. (Castelltort et al., 2009).

Tableau 22: les valeurs moyennes des indice Kg et Kh pour les différents types de bassin dans le bassin versant de la Durance.

Type	Kg	Kh
Dendritique	1.46	0.45
Parallèle	1.57	0.32
Treillis	1.57	0.32
Rectangulaire	1.38	0.49
Chevron	1.50	0.38

Les types treillis et chevron qui ont été superposés sur l'axe F1, ont pu être mieux discriminés grâce à la fonction F3 (Figure 99-c), qui présentent une corrélation négative avec les paramètres de relief H, R1 et R2 et positive avec le paramètre géologique MEAN-line. Ainsi les bassins de type treillis ont été pour la majorité localisés dans le côté positive de l'axe F3, signifiant que ces derniers présentent de forte densité de fracturation par rapport au bassin de types chevron, en d'autre terme les types treillis se développent des régions de forte activités tectoniques par rapport aux autres types de réseaux de drainage dans le bassin versant de la Durance. Ceci est attendu, étant donné que les types treillis sont parmi les types basiques formées principalement par la structuration géologique, particulièrement les failles et les structures plissées (Zernitz, 1932; Howard, 1967, Twidale, 2004).

Quant aux types chevron, leur centroïte est localisé dans le côté négatif mais qui reste tout de même proche du centre de l'axe F3, ce qui signifie que les bassins de types chevron peuvent présenter des fortes densités de fracturation mais reste comme même plus liées aux caractéristiques du relief, avec des fortes altitudes et une topographie très rugueuse (Pereira-Claren et al., 2019), comme on remarque dans la carte de distribution des types de réseaux, où les réseaux Chevron sont localisés dans les régions les plus élevés et les plus en amont du bassin versant de la Durance (Figure 80).

Finalement les types dendritiques, même avec l'identification que de deux types, ont pu être isolés des autres types de réseaux grâce la fonction F4 (Figure 99-b) qui présente une corrélation positive avec le paramètre géologiques homogénéité (Tableau 19). Sur l'axe F4, les bassins de types dendritiques présentent les valeurs de corrélations les plus élevés, signifiant que ces deux derniers réseaux présentent une lithologie homogène. Ce qui est en effet le cas, étant donné la localisation de ces derniers se localise dans la partie la plus aval de la zone d'étude et au niveau de la vallée de la Durance (Figure 80).

#### 1.1.4 Discrimination des types de réseaux Anti-Atlas Oriental

L'AD a fournis pour la région de l'Anti-Atlas Oriental trois fonctions discriminantes qui discriminent entre les types de réseaux de drainage avec un taux de réussite de 81.36%, légèrement inférieure aux deux zones humides étudiées auparavant, mais qui reste tout de

même un taux significativement élevé (Tableau 16). Egalement on observe sur la matrice de confusion, que les confusions de classification concernent les types parallèle, treillis et rectangulaire.

Bouramtane et al (2020a) ont observés les mêmes confusions à l'exception de celle entre les types dendritique et treillis, qui n'est pas significative, vu la différence entre ces deux derniers types, elle est considérée ainsi comme une mauvaise classification. Par contre les confusions qui sont plus significatives entre les types parallèles, treillis et rectangulaires, ont été expliqué soit par la présence des mêmes facteurs qui les contrôles, particulièrement le paramètre contrôle structural, soit par le phénomène de transition entre les types de réseaux de drainage (Howard, 1967 ; Bouramtane et al., 2020a,b). Le taux élevé de confusion observé dans notre analyse actuelle, peut être due au manque de paramètres appropriés dans le bloc de paramètres communs, pour discriminer entre les types de réseaux de drainage des 220 bassins dans cette région aride, plus de deux fois le nombre de bassins que le bassin du fleuve Cuanza et le bassin versant de la Durance, et qui présente des caractéristiques géologiques et géomorphologiques très variés et distinctes (Robert-Charrue, 2006; Frizon de Lamotte et al., 2008; Gouiza et al., 2017).

On constate aussi sur les résultats de l'AD, que la première fonction discriminantes F1 qui discrimine le plus entre les types de réseaux, présente des corrélations élevées principalement avec tous les paramètres géologiques (Tableau 20). Sur le graphe F1-F2 (Figure 100-a), l'axe F1 sépare les types de bassins contrôlés par la structuration géologique à savoir les types rectangulaire et treillis en les mettant dans le côté positif, des types de bassins qui s'associent avec un faible contrôle structural, à savoir les types dendritique et parallèles placés dans le côté négatif de cette axe. Ceci est dû à la relation étroite entre les types treillis et rectangulaires, et les conditions géologiques et géomorphologiques similaires pour leur formation, à savoir les zones de cisaillement, les structures sédimentaires plissées, failles convergentes, divergentes ou à peu près parallèles et joints et/ou failles à angle droit (Zernitz, 1932 ; Howard, 1967 ; Twidale, 2004 ; Bouramtane et al., 2020a,b).

Enfin, les types rectangulaires et treillis ont été séparés sur le graphe F1-F3 et particulièrement sur l'axe F3 (Figure 100-a), en raison de la corrélation élevée des paramètres Mean-slope, Mean-line et landcover. Ces paramètres traduisent les conditions géologiques, de relief et climatique propres aux régions dans lesquelles les types rectangulaire et treillis se développent. Les réseaux de drainage de type rectangulaire sont principalement situés dans le secteur axe Saghro-Ougnat, c'est-à-dire des zones composées de terrains du Protérozoïque et du Paléozoïque à forte densité de fracturation. Cette zone a été fortement touchée par plusieurs phases tectoniques, principalement lors des remobilisations des orogénèses

Panafricaines du Néoprotérozoïque et des orogénèses hercyniennes de la fin du Paléozoïque (Hefferan et al., 2014). De nombreuses failles héritées ont été réactivées lors des événements alpins, constituant toujours des zones de faiblesses (Frizon de Lamotte et al., 2008 ; Soulaïmani et al., 2014 ; Gouiza et al., 2017).

Ces résultats sont conformes aux observations de Zernitz (1932), car les réseaux de drainage rectangulaires se développent dans des zones où le contrôle structural est important, et la configuration est directement conditionnée par le jointolement à angle droit ou la formation de failles dans les roches (Stokes et al., 2008, Burr et al., 2013 ; Pereira-Claren et al., 2019). Par ailleurs, le terrain accidenté et fracturé du secteur SOA et son relief élevé font de cette partie de l'Anti-Atlas Oriental une zone de fortes pentes latérales particulièrement au niveau des couloirs des failles.

D'autre part, les réseaux de treillis se trouvent principalement dans le secteur du Bani, le bassin Maider et dans l'axe Ougnat-Ouzina, c'est-à-dire dans des zones où les structures géologiques sont fortement déformées et où l'on trouve d'énormes affleurements plissés. Dans le secteur Axe Ougnat-Ouzine, Les types de réseaux en treillis se trouvent autour et sur les flancs des plis principaux, de grandes structures cambriennes en forme de croissant ou de boomerang, facilement observables sur les images satellitaires. Il s'agit des anticlinaux Jbel Tijekht, Jbel Tadout et Shayeb Arass, ainsi que des synclinaux Ottara et Amesseoui (Figure 64-c). Dans le secteur de Banis, les types de réseaux en treillis s'inscrivent dans un contexte géomorphologique qui consiste en une alternance de cuestas et de dépressions profondes, structures typique de l'Anti-Atlas Oriental (Figure 64-d).

De point de vue climatique et occupation de sol, vu le relief élevé où se développent les types de réseaux rectangulaires, leurs régions se caractérisées par un climat aride avec des précipitations annuelles d'environ 120 mm, et la végétation est de type zone arbustive et quelques pâturages (Figure 107-a,b). Par contre les types treillis se localise dans les zones plus basses vers le sud en allant vers les hamadas et les régions pré-désertiques, le climat est y extrêmement arides et désertique avec seulement 50 mm de précipitation par an, l'occupation du sol et majoritairement des sols nues et une végétation clairsemée (Figure 107-c,d).



Figure 107: (a) et (b) Observation des types de végétation dans le secteur axe Saghro-Ougnat. (c) et (d) Observation de l'occupation de sol dans les bas-relief du secteur bassin Maider.

Les types parallèles sont individualisés par la fonction discriminante F2, qui est principalement basée sur des paramètres de relief (H, R1 et R2). Le résultat est conforme à l'idée que la topographie et les conditions de relief sont les facteurs déterminants de ce type de réseau de drainage, qui est généralement associé aux régions de moyenne à forte pente (Zernitz, 1932 ; Howard, 1967 ; Twidale, 2004 ; Radaideh et al., 2016 ; Bouramtane et al., 2020). Egalement, Le paramètre qui reflète la densité de drainage (MEAN-Ddrain) présente une corrélation élevée et positive sur la fonction F2, cela suggère l'existence d'un processus qui, en plus du contrôle par la pente, intègre la densité de drainage comme facteur de caractérisation des types de réseaux parallèles.

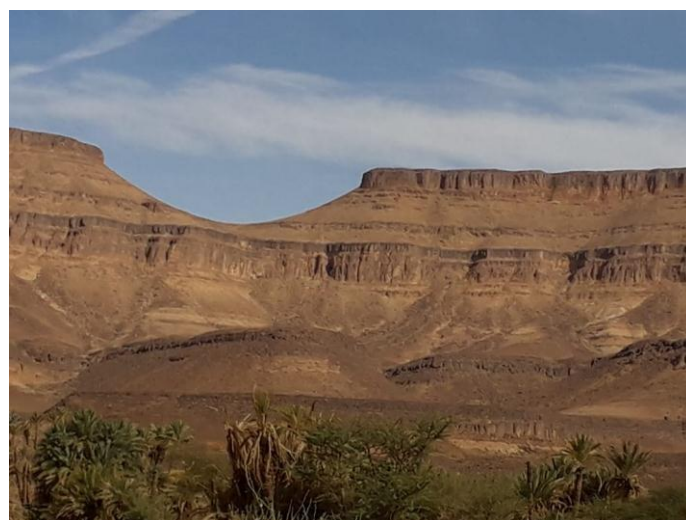




Figure 108: Observation de l'escarpement du Feija nord-ouest de Zagora dans le secteur des Banis, sur lequel se forme des réseaux de drainage parallèles.

Cette constatation est en accord avec l'observation de Johnson (1932), qui soupçonnait l'existence d'une relation entre la pente et la densité de drainage dans la caractérisation des types de réseaux de drainage : plus la pente est raide, plus les modèles parallèles sont développés, et plus la densité de drainage augmente (Twidale, 2004). De ce fait la fonction discriminante F2 permet de distinguer les bassins en fonction, d'une part, de l'influence de la pente sur leurs réseaux de drainage et d'autre part, de la densité de drainage.

Des confusions entre les types parallèle, treillis et rectangulaire, observées sur la matrice de confusion (Tableau 16), trouvent probablement leur explication dans les conditions géologiques et géomorphologiques des régions de l'Anti-Atlas Oriental (Bouramtane et al., 2020a). Les quatre bassins qui font l'objet de la confusion entre le type parallèle et rectangulaire sont localisés dans le secteur axe Saghro-Ougnat. Cette confusion même s'elle est minimale, elle est expliquée par la relation géomorphologique qui lie ces deux derniers types réseaux de drainage. Sur l'Anti-Atlas Oriental, Les réseaux rectangulaires se sont développés dans les boutonnières, des régions qui sont intensément fracturées, puis ils se sont connectés à des réseaux parallèles développés sur la couverture paléozoïque fortement inclinée qui forme le flanc sud et nord de ces boutonnières (Figure 61-a). Une telle organisation des réseaux de drainage reflète un contrôle structural dû aux propriétés géologiques et géomorphologiques des boutonnières. La relation entre les types parallèles et rectangulaires, dans la région où la structuration géologique exerce un contrôle sur le réseau de drainage a déjà été constaté par Zernitz (1932) qui a observé des rivières s'écoulant avec une configuration parallèle le long des failles parallèles dans le nord-ouest de la Finlande qui sont souvent accompagnées de fractures conjuguées, conduisent à un type de réseau rectangulaire ou angulaire.

En ce qui concerne la confusion entre les types de réseaux parallèle et treillis, elle est connue pour être générée par le parallélisme des cours d'eau observé dans ces deux derniers types. Cependant, il faut se mettre à l'évidence que le parallélisme dans les types de réseaux treillis est limité à une relation parallèle entre les affluents (Figure 64-c-d), par contre dans le modèle parallèle simple, le parallélisme peut se produire entre les affluents ou les cours d'eau non connectés (Figure 65-a-b) (Zernitz, 1932, Howard, 1967). Dans le secteur des Banis, les réseaux parallèles et en treillis se sont développés sur les mêmes formations paléozoïques plissées, mais ils diffèrent en effet par leur degré de parallélisme résultant d'une accentuation progressive de la pente, en relation avec le degré de résistivité à l'érosion (Howard, 1967). En raison de l'alternance entre les crêtes de grès quartzitique du premier et deuxième Bani et les

niveaux plus tendre du schiste argileux (schistes de Feija et de Ktaoua), les réseaux de treillis se sont développés, bien que limités à une relation parallèle entre les affluents secondaires, qui sont généralement allongés et se connectent en aval à angle droit avec le cours d'eau principale au fond des niveaux tendres (Figure 64-c, Figure 68-b).

Par contre, les modèles parallèles se sont développés au nord de Zagora sur l'énorme escarpement du Feija (Figure 108), s'écoulant vers le sud sur les niveaux des schistes argileux légèrement inclinés et en raison de la résistivité uniforme à l'érosion de ces niveaux, le réseau de drainage montre un parallélisme entre tous les affluents ainsi qu'entre les cours d'eaux non connectés (Figure 65-b).

La séparation du type de réseau dendritique des autres types dans le graphe F1-F2 reflète la spécificité de ce dernier type. Le positionnement du centroïde avec une coordonnée positive mais proche de zéro sur F2, et clairement négative sur F1 reflète le contrôle par un faible gradient de pente et l'absence d'un contrôle structurel. Il est évident que les bassins de type dendritique ne devaient pas avoir des valeurs élevées de corrélation dans l'axe F1, car ces derniers, comme expliqué dans les parties précédentes qui dérivent le type de réseau dendritique, se forment dans des zones sans contrôle structurel significatif, sans structures géomorphologiques proéminentes, avec une lithologie homogène et un gradient de pente très faible (Zernitz, 1932 ; Howard, 1967, Bouramtane et al., 2020a).

Ces résultats sont observés dans la région de l'Anti-Atlas Oriental, où les types dendritiques se trouvent exclusivement dans des zones tectoniquement stables, avec un faible relief, souvent des plaines alluviales (Figure 109), et une lithologie homogène, comme dans le cas du domaine de Kem-kem, constitué exclusivement de dépôts crétacés, et dans le bassin sédimentaire du Sud-Tafilalat avec des sédiments quaternaires formants les plaines alluviales (limon, sable, cônes alluviaux et talus) (Figure 65-c,d).



Figure 109: Exemple d'une plaine alluviale dans l'Anti-Atlas Oriental, située au nord du flan septentrional du secteur Saghro-Ougnat, dont les reliefs sont observés en arrière-plan.

## 1.2 Analyse discriminante du bloc des paramètres spécifiques pour la région de l'Anti-Atlas Oriental et le bassin de la Durance :

Comme sur la partie précédente concernant l'analyse de la structure et la dimensionnalité de l'ACP sur la base du bloc des paramètres spécifiques, on a effectué un calcul de l'analyse discriminante linéaire pour le bassin versant de la Durance et la région de l'Anti-Atlas Oriental en ajoutant leurs paramètres spécifiques respectives. L'objectif de cette partie du chapitre est d'évaluer l'apport de ces paramètres spécifiques dans la discrimination des types de réseaux de drainage, en d'autre terme, voir si leur contribution permet d'améliorer le déterminisme des types de réseaux de drainage, ou au contraire créer plus de confusion.

## 1.3 Analyse discriminante du bloc de paramètres spécifiques pour le bassin de la Durance :

L'analyse discriminante linéaire réalisée sur le bloc des paramètres spécifiques du bassin versant de la Durance, présente quatre fonctions discriminantes qui discriminent entre les types de réseaux de drainage avec un taux de précision de 96.81% (Tableau 23), étrangement inférieur à celui obtenu par le bloc des paramètres communs (98.94%). Ce dernier résultat n'était en pas du tout attendu, vu que le principe même de l'AD se base sur le fait que plus on a de paramètres liés aux observations plus on s'approche à une meilleure discrimination des observations au sein de ces derniers. Quoique ce taux de discrimination reste largement satisfaisant. L'origine de cette diminution dans la discrimination est l'augmentation de la confusion entre le type rectangulaire et le type chevron, puisque dans ces résultats trois réseaux de type rectangulaire ont été discriminés comme étant de type chevron, au lieu d'un seul réseau dans la matrice de confusion du bloc des paramètres communs (Tableau 15).

Tableau 23: Matrice des confusions obtenues sur le bloc des paramètres spécifiques du bassin versant de la Durance

from \ to	0	1	2	3	4	Total	% correct
0	2	0	0	0	0	2	100.00%
1	0	13	0	0	0	13	100.00%
2	0	0	15	0	0	15	100.00%
3	0	0	0	16	3	19	84.21%
4	0	0	0	0	45	45	100.00%
Total	2	13	15	16	48	94	96.81%

La première fonction discriminante F1 discrimine 67.93% entre les types de réseaux de drainage (Tableau 24), presque similaire à celle obtenue par le bloc des paramètres communs (Tableau 17). F1 présente des corrélations avec les mêmes paramètres (Tableau 25) que ceux observés dans F1 obtenu par le bloc des paramètres communs (Tableau 19), mais elle présente

comme même des fortes corrélations avec les paramètres spécifiques indice de développement et de persistance des réseaux (IDPR) et l'intensité de déformation (Int-Defor) avec des valeurs de corrélations respectivement de 0.523 et 0.435.

Les fonctions F2, F3 et F4 sont identiques à celles obtenus par le bloc des paramètres communs, et les paramètres spécifiques ne présente aucune contribution significative. La même chose peut aussi être observé dans la distribution des observations sur les graphes bidimensionnels des fonctions discriminantes (Figure 110) qui sont identiques à ceux obtenus sur le bloc des paramètres communs (Figure 99). Ainsi les corrélations des paramètres spécifiques avec les quatre fonctions discriminantes ne montrent aucun processus susceptible d'être à l'origine de la diminution de la discrimination et la confusion.

Tableau 24: Taux de discrimination des fonctions discriminantes du bloc des paramètres spécifiques pour le bassin versant de la Durance

	F1	F2	F3	F4
Discrimination (%)	67.930	18.096	9.956	4.018
Cumulative %	67.93	86.0	95.98	100.0

Tableau 25: Corrélation entre les différents paramètres et les quatre fonctions discriminantes du bloc des paramètres spécifiques du bassin versant de la Durance

	F1	F2	F3	F4
MEAN-Slope	0.829	-0.088	-0.071	0.035
H	0.606	0.013	-0.335	-0.254
R1	0.428	-0.143	-0.355	-0.207
R2	0.383	-0.271	-0.388	-0.139
Kg	0.155	0.540	0.331	-0.085
Cl	-0.420	0.239	-0.049	0.112
Kh	-0.152	-0.654	-0.351	0.182
Rock-type	-0.069	0.110	0.224	0.312
Homogeneite	0.282	0.072	-0.043	0.543
MEAN-Line	0.367	-0.188	0.529	-0.130
MEAN-DDrain	0.063	-0.218	-0.151	-0.165
Landcover	0.512	-0.525	0.089	-0.121
Tc	-0.127	0.219	0.085	-0.117
IDPR	0.523	0.102	-0.229	0.069
Int-Defor	0.435	-0.128	0.049	0.232

Par ailleurs, ces résultats peuvent probablement être expliqués en prenant comme perspective les résultats de l'ACP sur le bloc des paramètres spécifiques dans le bassin versant de la

Durance, on a observé que les composantes principales du bloc des paramètres spécifiques portes expliquent moins de variabilités des types de réseau de drainage par rapport à ceux du bloc de paramètres communs, ce qui signifiant une hétérogénéité plus élevé entre les unités factorielles du a plus complexité dans l'information apporter par les paramètres spécifiques. Cette hétérogénéité s'est probablement manifestée dans l'analyse discriminante sous forme d'un apport de confusion et diminution de la discrimination.

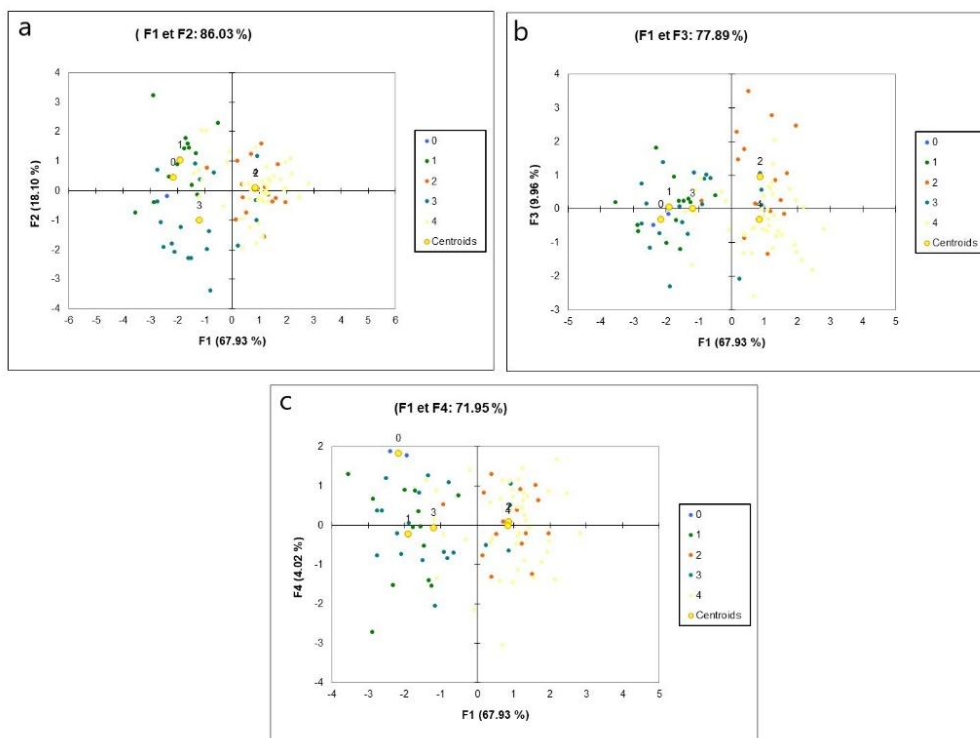


Figure 110: Distribution des observations et des centroïdes de chaque type de réseau de drainage dans les espaces bidimensionnelles (a) F1-F2, (b) F1-F3 et (c) F1-F4 du bloc des paramètres spécifiques pour le bassin versant de la Durance.

#### 1.4 Analyse discriminante du bloc de paramètres spécifiques pour la région de l'Anti-Atlas Oriental

L'analyse discriminante du bloc des paramètres spécifiques pour l'Anti-Atlas Oriental a identifiée trois fonction discriminantes qui permettent de discriminer entre les types de réseaux de drainage avec un taux de précision de 84% (Tableau 26), 2% de plus dans le taux de discriminations précision par rapport aux résultats obtenus avec le bloc de paramètres communs (Tableau 16). Sur la matrice de confusion (Tableau 26) on observe toujours que le type dendritique a pu être discriminer avec un taux de réussite de 100%, par contre les confusions identifiées concernent toujours les mêmes types de réseaux de drainage, à savoir, les types parallèle, treillis et rectangulaire.

Quoique la type treillis cette fois montre moins de confusion 92.55% contre 89.36% dans le bloc des paramètres communs, dû au fait que seulement 2 réseaux treillis sont discriminés comme étant dendritique au lieu de 4 sur le bloc des paramètres communs. Le type rectangulaire montre aussi une nette amélioration, avec une précision de discrimination de 57.41% contre 51.81% sur le bloc des paramètres communs, vue qu'il y a moins de confusion entre le type rectangulaire et treillis.

Tableau 26: Matrice des confusions obtenues sur le bloc des paramètres spécifiques de l'Anti-Atlas Oriental

from \ to	0	1	2	3	Total	% correct
0	39	0	0	0	39	100.00%
1	4	28	1	0	33	84.85%
2	2	1	87	4	94	92.55%
3	0	4	19	31	54	57.41%
Total	45	33	107	35	220	84.09%

La première fonction discriminante F1 à elle seule discrimine 62.33% des type de réseau de drainage (Tableau 27), légèrement inférieure à celle obtenus sur le bloc des paramètres communs (63.38%) (Tableau 16). Cependant, F1 présente toujours des corrélations exclusives avec les paramètres géologiques (Tableau 28), densité des linéaments géologiques (Mean-line), Type de contrôle structural (structural control) et l'homogénéité lithologique (homogénéité) avec des valeurs de corrélation respectivement 0.341, 0.828 et 0.936.

La deuxième fonction discriminante F2, discrimine avec une précision de 26.65% entre les types de réseaux de drainage (Tableau 27), elle est inférieure à plus de 4% que la fonction F2 obtenus par le bloc des paramètres communs (Tableau 16). F2 présente des corrélations avec les mêmes paramètres que celle obtenus par le bloc des paramètres communs, à savoir ceux du relief H, R1 et R2 et le paramètre de densité de drainage avec des valeurs de corrélation respectivement de 0.806, 0.619, 0.531 et 0.464.

La troisième fonction discriminante F3 discrimine entre les types de réseaux de drainage avec précision de 11% (Tableau 27), un taux supérieur à celui obtenu pas la fonction F3 du bloc des paramètres communs qui présentait un taux de 6.5% (Tableau 16). La fonction F3 présente des corrélations avec les mêmes paramètres obtenus sur le bloc des paramètres communs, c'est-à-dire, les paramètres Mean-slope, Mean-line et le paramètre d'occupation de sol (landcover) avec des valeurs de corrélation respectivement de 0.555, 0.484 et 0.506 (Tableau 28). Cependant, la fonction F3 du bloc des paramètres spécifiques présente une corrélation supplémentaire avec le paramètre spécifique du secteur géologique (Area), en ayant la valeur la plus élevée entre les autres paramètres de 0.739, ce qui signifie que ce

dernier paramètre contribue significativement dans la fonction F3 pour la discrimination des types de réseaux de drainage.

Tableau 27: Taux de discrimination des fonctions discriminâtes du bloc des paramètres spécifiques pour la région de l'Anti-Atlas Oriental

	F1	F2	F3
Discrimination (%)	62.334	26.651	11.015
Cumulative %	62.334	88.985	100.000

Tableau 28: Corrélation entre les différents paramètres et les quatre fonctions discriminantes du bloc des paramètres spécifiques dans la région de l'Anti-Atlas Oriental

	F1	F2	F3
MEAN-Slope	0.258	0.235	0.555
H	0.208	0.806	0.266
R1	0.233	0.619	0.290
R2	0.249	0.531	0.281
Concavity	-0.265	-0.255	0.354
Kg	-0.165	-0.079	0.108
Kh	0.164	0.094	-0.064
MEAN-Ddrain	-0.066	0.464	-0.228
Lineaments density	0.341	0.094	0.484
Structural control	0.828	0.082	0.147
Homogénéité	0.936	0.022	-0.106
Rock type	0.296	-0.145	0.140
Area	0.178	0.299	0.739
Landcover	0.168	-0.023	0.506
Tc	-0.058	-0.123	0.127

Sur les graphes bidimensionnels des fonctions discriminantes le graphe F1-F2 (Figure 111-a) affiche les types de réseaux de drainage avec un taux de discrimination de 88.98% inférieure à celui obtenu par le bloc des paramètres communs (Figure 100-a) , vu que F1 et F2 présentent des taux de discrimination inférieurs, mais les types de réseaux présentent exactement les mêmes distributions.

Par ailleurs le graphe F1-F3 (Figure 111-b), présente une différence notable sur le taux de discrimination avec lequel il affiche les types de réseaux de drainage, ce dernier est de 73.35%, significativement supérieur à celui obtenu par le bloc des paramètres communs qui est de 69.61% (Figure 100-a). De ce fait on peut observer que les types de réseaux treillis et rectangulaire sont mieux séparés sur l'axe F3 du bloc des paramètres spécifiques par rapport

au bloc des paramètres spécifiques. Ainsi, à partir de l'ensemble de ces constatations, l'apport des deux paramètres spécifiques de sur l'analyse discriminante de l'Anti-Atlas oriental, améliore significativement la discrimination entre les types de réseaux de drainage, particulièrement le paramètre Area. Ce dernier, comme expliquer précédemment représente les six secteurs géologiques, au sein de l'Anti-Atlas Oriental.

Le paramètre Area synthétise tous les caractéristiques géologiques, géomorphologiques, relief, d'occupation de sol et ainsi climatiques qui sont distinctes entre ces six secteurs, pour séparer entre les types treillis et rectangulaire, qui se situent sur des secteurs différents. En d'autre terme, sur le bloc communs, l'AD a réuni trois paramètres (Mean-slope, Mean-line et Landcover) pour discriminer entre ces deux derniers types de reseaux avec une précision de 6.5%, par contre l'addition du paramètre spécifique Area a permis de faire un saut de 5% dans leur discrimination.

En ce qui concerne le paramètre contrôle structurel, étant donné sa corrélation avec la premières fonction discriminante F1 qui représente les processus de structuration géologiques, l'information qu'il apporte est redondante, sans aucune contribution significative dans la discrimination des types de réseaux de drainage. Egalement, il est fort probable que le paramètre contrôle structurel aura causé une confusion supplémentaire vu la diminution dans le taux de discrimination pour F1, ce qui est en accord avec les résultats d'ACP sur le bloc des paramètres spécifiques, qui montre plus de complexité dans l'information du a l'apport de ces derniers (Figure 96).

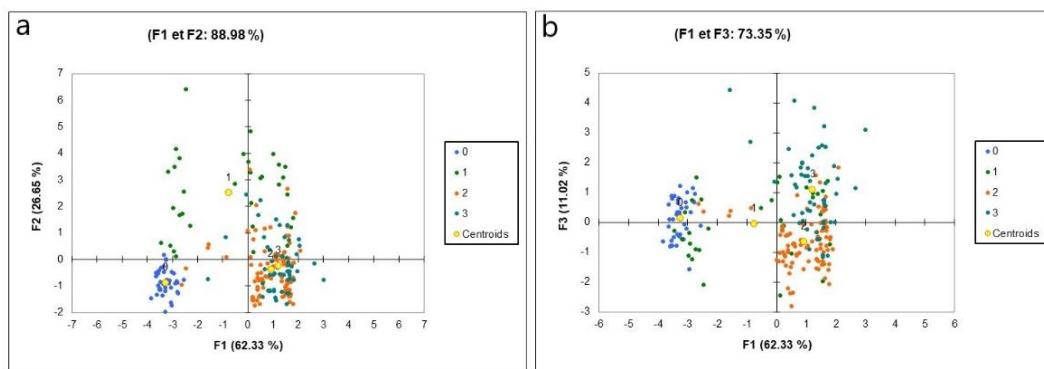


Figure 111: Distribution des observations et des centroïdes de chaque type de réseau de drainage dans les espaces bidimensionnels (a) F1-F2 et (b) F1-F3 du bloc des paramètres spécifiques pour la région de l'Anti-Atlas Oriental.



## 2 Mesure de similarité et différenciation entre type de réseau de drainage par la méthode de classification hiérarchique ascendante.

### 2.1 Analyse et signification des similarités et différenciations observées.

La CHA illustre les possibles similitudes et dissimilarités entre les différents types de réseaux de drainage pour les trois zones d'études, mais elle peut aussi informer sur les processus qui contrôlent le développement du réseau de drainage dans chaque zone d'étude. Les résultats de la classification hiérarchique ascendante qui est basé sur les coordonnées des valeurs moyennes des trois premières composantes principales de l'ACP du bloc des paramètres communs pour les trois zones d'études, sont présentés dans les figures ci-dessous, respectivement pour le bassin du fleuve Cuanza (Figure 112), le bassin versant de la Durance (Figure 113) et la région de l'Anti-Atlas Oriental (Figure 114).

Dans le bassin du fleuve Cuanza, le type dendritique est clairement individualisé par rapport aux autres types, par ailleurs les types chevron et barbelé présentent des fortes similarités et forment un groupe isolé. Les types rectangulaire et parallèles présentent aussi des légères similitudes et forment aussi un groupe isolé des autres types. On remarque sur le bassin versant de la Durance une très forte dissimilarité entre d'une part, le groupe dendritique-parallèle qui affichent entre eux des similitudes, et d'autre part, les types rectangulaires, treillis et chevron. La plus grande similitude est observée entre le type treillis et chevron qui forme un groupe isolé. Dans la région de l'Anti-Atlas Oriental, le type dendritique a été individualisé par rapport aux autres types, tandis que les types en treillis et rectangulaires présentent une plus grande similitude, formant un groupe isolé. Le type parallèle se localise à mi-chemin entre le groupe rectangulaire-treillis et le type dendritiques.

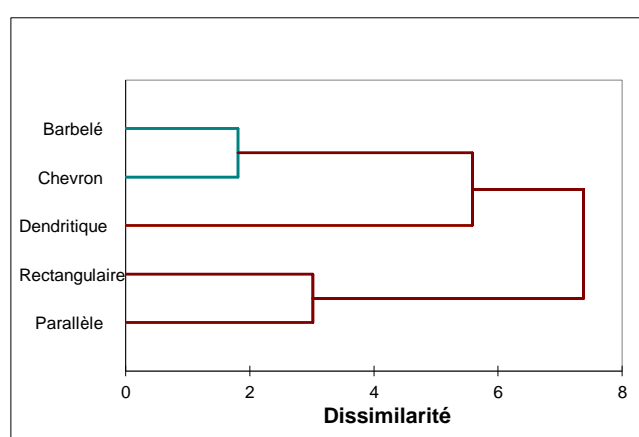


Figure 112: Dendrogramme obtenu à partir d'une analyse CHA sur les centroïdes des types de réseaux de drainage du bassin fleuve Cuanza.

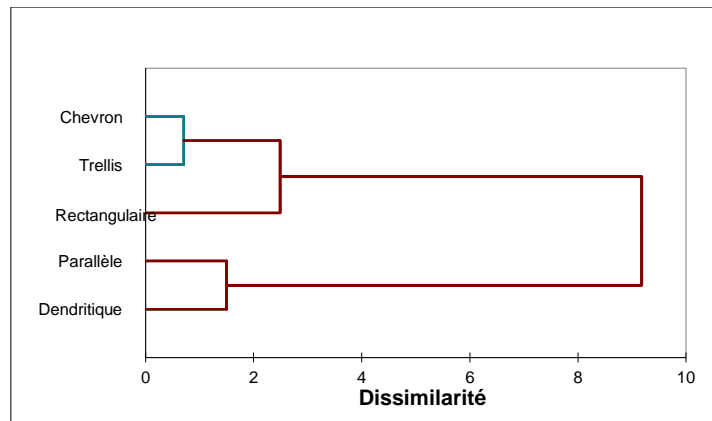


Figure 113: Dendrogramme obtenu à partir d'une analyse CHA sur les centroïdes des type de réseaux hydrographique du bassin versant de la Durance

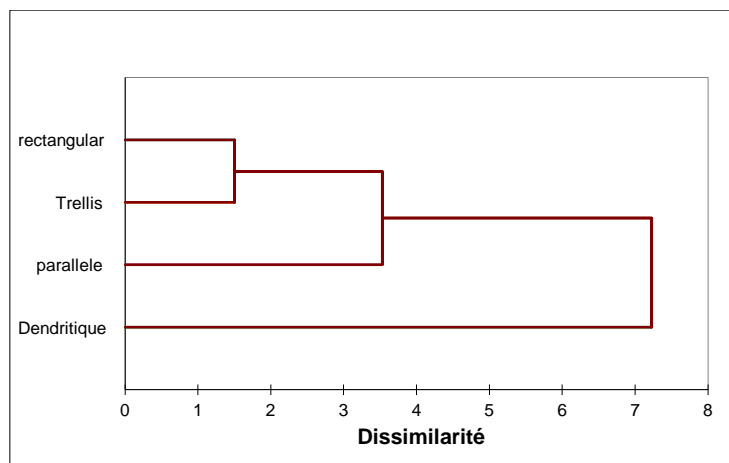


Figure 114: Dendrogramme obtenu à partir d'une analyse CHA sur les centroïdes des type de réseaux hydrographique de la région Anti-Atlas Oriental

Les résultats de la classification hiérarchique sont presque identiques pour les trois zones d'études. En effet, On observe que le type dendritique s'individualise systématiquement et montre le plus de dissimilitude avec les autres types de réseaux, dans les trois zones d'étude, particulièrement pour le bassin du fleuve Cuanza et l'Anti-Atlas Oriental. Pour le bassin de la Durance les deux réseaux dendritiques identifiés, présentent uniquement des similitudes avec les types parallèles. Ceci est expliqué par le fait que le type de réseau dendritique est plus proche du réseau parallèle du point de vue facteurs responsables de leur formation et ils sont parmi les types basiques contrôlés par la topographie et particulièrement la pente, avec quelques exceptions du contrôle structural pour le type parallèle (Zernitz, 1932, Howard, 1967 ; Jung et al., 2011 ; Bouramtane et al., 2020a).

Ces similitudes conduisent souvent à des transitions entre ces deux derniers types, à cause des changements de gradient de pente par soulèvement ou affaissement (Howard, 1967 ; Phillips

and Schumm, 1987; Castelltort et al., 2009 ; Jung et al., 2011 ; Bouramtane et al., 2020). Le type dendritique est connu pour avoir des caractéristiques distinctes des autres types de réseaux. D'une part, les propriétés de relief et de géologie, qui se traduisent par de faibles pentes, une lithologie homogène, une résistivité uniforme à l'érosion et/ou absence de contrôle structural (Zernitz, 1932 ; Parvis, 1950 ; Howard, 1967, Twidale, 2004).

Ainsi, la spécificité du type dendritique, évoqué dans la littérature, elle est ici quantifiée et démontrée dans des zones d'études de propriétés différentes et sur des échelles de bassins très variés. D'autre part les propriétés de la géométrie plane des types de réseaux de drainage montrent que le type dendritique est le type basique qui est conforme à l'autosimilarité, par contre les autres types sont auto-affine ou ils correspondent à des déviations distinctes de cette autosimilarité (Mejía and Niemann, 2008; Jung et al., 2019). A partir de ces constatations, s'il y'avait un nombre plus élevé de bassins dendritiques dans le bassin versant de la Durance, ils pourraient probablement se différencier des autres types et particulièrement du type parallèle.

Un autre aspect très important observé sur CHA, est d'une part la similitude entre les types chevrons et barbelés et leur dissimilitude avec les autres types de réseaux pour le bassin du fleuve Cuanza, et d'autre part pour le bassin versant de la Durance, où le type chevron présente une similitude qu'avec le types treillis des hauts reliefs des alpes et une dissimilitude avec le reste des types de réseaux. Ce dernier aspect illustre clairement la distinction entre les types de réseaux des haut-relief et les types de réseaux des bas-reliefs, ce qui est consistant avec les observations de (Pereira-Claren et al., 2019).

On observe aussi que le CHA sur les trois zones d'études sépare les types contrôlés par la structuration géologique et les types moins affectés ou pas affectés par ce facteur. En effet sur le bassin de la Durance et l'Anti-Atlas oriental on observe que les types chevron, treillis et rectangulaire présentent plus de similitude entre eux et forment un groupe séparé des type dendritique et parallèle qui dépendent plus de la pente (Zernitz, 1932; Howard, 1967; Twidale, 2004).

Par contre dans le bassin du fleuve Cuanza on distingue trois groupes, par ordre décroissant de similitude, chevron-babeler, dendritique et rectangulaire-parallèle. Ceci est dû à la contribution du temps de concentration en plus des facteurs de relief de géologie dans la variabilité des types de réseaux de drainage dans la première composante principale de cette zone. En d'autre terme, le groupe chevron-barbelé présente des similitudes avec le type dendritique vu le temps de concentration qui est élevé de façon similaire pour ces derniers (Tableau 21), mais différent dans les caractéristiques un relief et de géologie, qui traduisent un contrôle structurel pour le groupe chevron-barbelé et son absence dans le type dendritique,

tandis que le groupe rectangulaire-parallèle s'associe avec des reliefs et des conditions géologiques qui traduisent un contrôle structural mais avec un faible temps de concentration.

Finalement, la méthode de CHA à travers les mesures de similarité et de dissimilarité, permet de mieux appréhender les relations qui existent entre les différents types de réseaux de drainage sur les trois zones d'études, en identifiant le même schéma sur leurs dendrogrammes (Figure 112, Figure 113, Figure 114) dans lesquels les réseaux de type dendritique sont individualisés par rapport aux autres types, les réseaux des hauts reliefs et des bas-reliefs présentent une dissimilarité, et la séparation entre les types de réseaux contrôlés par la structuration géologique et ceux qui se développent dans son absence. Ces constatations rejoignent celle observées dans les résultats de l'ACP, stipulant l'existence d'un seul et unique processus multifactoriel responsable de la distribution et la structuration du réseau de drainage.

## **II Analyse de sensibilité**

Tout en construisant et en utilisant des modèles de simulation numérique pour étudier une réalité complexe, les méthodes d'analyse de sensibilité (AS) sont des outils inestimables. Elles permettent d'étudier comment l'incertitude dans la sortie d'un modèle peut être attribuée à différentes sources d'incertitude dans l'entrée du modèle. Elle peut être utilisée pour déterminer les variables d'entrée qui contribuent le plus à un comportement de sortie en tant qu'entrées non influentes, ou pour vérifier certains effets d'interaction au sein du modèle et révéler certains biais cachés liés au mode de calcul en lui-même. Les objectifs de l'AS sont nombreux : on peut mentionner la vérification et la compréhension des modèles, la simplification des modèles, la hiérarchisation des paramètres et d'identifier les paramètres qui auront une influence significative ou pas sur le système (McElwee et Yukler, 1978). Enfin, l'AS est une aide à la validation du traitement mathématique, aux efforts d'orientation de recherche ou à la justification en termes de la conception du système (Mazzilli, 2011).

Ainsi dans cette partie du chapitre et afin d'apprécier l'influence de chacun des paramètres, une analyse de sensibilité des méthodes l'analyse de composante principale et d'analyse discriminante linéaire, a été effectuée sur notre zone d'étude de référence, qui est l'Anti-Atlas Oriental. Pour ce faire, le calcul est tout d'abord réalisé avec tous les paramètres communs, puis les calculs sont à nouveau menés en enlevant un seul paramètre pour chaque calcul afin de mesurer l'influence de ce dernier. Le choix des paramètres communs a été fait pour garder un certain lien avec les deux autres zones d'études, et en estimant que l'utilisation des paramètres spécifiques pourra limiter notre perspective globale sur les processus susceptibles d'apparaître dans cette méthode.

## 1 Analyse de sensibilité de l'analyse des composantes principales

Le calcul d'ACP effectué avec tous les paramètres en incluant le paramètre (Type) qui représente le type de réseau de drainage, montre comme premier résultat dans la matrice des corrélations entre les paramètres (Tableau 29), une corrélation importante entre le type de réseau et l'homogénéité lithologique. Cela signifie que ce dernier paramètre est susceptible de contribuer de façon significative dans le processus responsable des variations des types de réseaux de drainage dans la région de l'Anti-Atlas Oriental. Cette première constatation constitue un point clé dans cette analyse de sensibilité.

La comparaison des axes factoriels entre les calculs d'ACP, l'un incluant l'information sur le type de réseau et l'autre sans le type de réseau (Figure 115), montre une légère différence sur les trois premières composantes principales. Sur l'ACP incluant le paramètre type de réseau de drainage, le pourcentage des variances expliquées est de 62.36%, et de 63.06% sur l'ACP sans le type. L'écart est plus important sur le premier axe factoriel CP1 qui est de 35.52% et 37.24%, respectivement pour l'ACP avec type de réseau et ACP sans type de réseau (Figure 116).

Ces résultats indiquent que le paramètre type de réseau de drainage apporte une très légère information qui se traduit par une complexité et une hétérogénéité supplémentaire, bien que peu importante, sur les trois premières composantes principales responsables des variances des bassins versants dans l'Anti-Atlas Oriental et particulièrement sur la première composante qui explique le plus ces variances. C'est-à-dire, le type de réseau n'est pas totalement dépendant des autres paramètres, au moins d'un point de vue de relation linéaire.

Tableau 29: La matrice des corrélations entre les paramètres

Variables	Type	MEAN-Slope	H	R1	R2	Kg	Cl	Kh	Rock type	Homogénéité	MEAN-Line	MEAN-Ddrain	Landcover	Tc
Type	<b>1</b>	0.292	0.150	0.190	0.209	-0.106	-0.125	0.112	0.276	<b>0.730</b>	0.357	-0.134	0.232	-0.013
MEAN-Slope	0.292	<b>1</b>	0.695	0.733	0.772	-0.234	0.141	0.376	0.193	0.191	0.850	-0.428	0.572	-0.008
H	0.150	0.695	<b>1</b>	0.808	0.798	-0.139	-0.227	0.310	0.062	0.221	0.526	0.093	0.348	0.022
R1	0.190	0.733	0.808	<b>1</b>	0.949	-0.409	-0.217	0.359	0.065	0.122	0.528	-0.034	0.514	-0.080
R2	0.209	0.772	0.798	0.949	<b>1</b>	-0.516	-0.166	0.574	0.108	0.130	0.553	-0.088	0.594	-0.011
Kg	-0.106	-0.234	-0.139	-0.409	-0.516	<b>1</b>	0.183	-0.620	-0.075	-0.040	-0.202	0.035	-0.224	0.350
Cl	-0.125	0.141	-0.227	-0.217	-0.166	0.183	<b>1</b>	-0.053	0.062	-0.228	0.140	-0.346	0.145	0.126
Kh	0.112	0.376	0.310	0.359	0.574	-0.620	-0.053	<b>1</b>	0.072	0.106	0.291	-0.083	0.276	-0.067
Rock type	0.276	0.193	0.062	0.065	0.108	-0.075	0.062	0.072	<b>1</b>	0.249	0.145	-0.123	0.278	0.073
Homogénéité	<b>0.730</b>	0.191	0.221	0.122	0.130	-0.040	-0.228	0.106	0.249	<b>1</b>	0.286	-0.028	-0.008	-0.078
MEAN-Line	0.357	0.850	0.526	0.528	0.553	-0.202	0.140	0.291	0.145	0.286	<b>1</b>	-0.425	0.396	-0.052
MEAN-Ddrain	-0.134	-0.428	0.093	-0.034	-0.088	0.035	-0.346	-0.083	-0.123	-0.028	-0.425	<b>1</b>	-0.264	-0.114
Landcover	0.232	0.572	0.348	0.514	0.594	-0.224	0.145	0.276	0.278	-0.008	0.396	-0.264	<b>1</b>	0.489
Tc	-0.013	-0.008	0.022	-0.080	-0.011	0.350	0.126	-0.067	0.073	-0.078	-0.052	-0.114	0.489	<b>1</b>

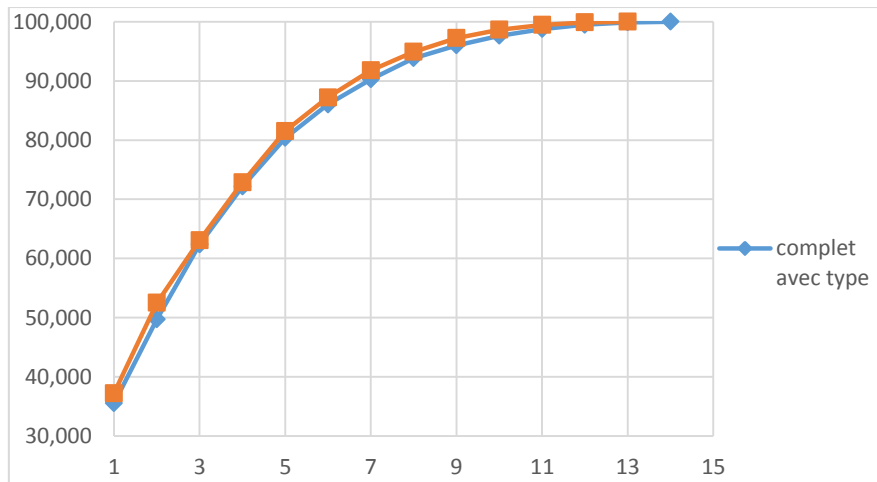


Figure 115: La distribution de la variance cumulée du bloc de paramètres communs avec et sans le paramètres type de réseau de drainage portée par l'ensemble des axes factoriels pour la région de l'Anti-Atlas Oriental.

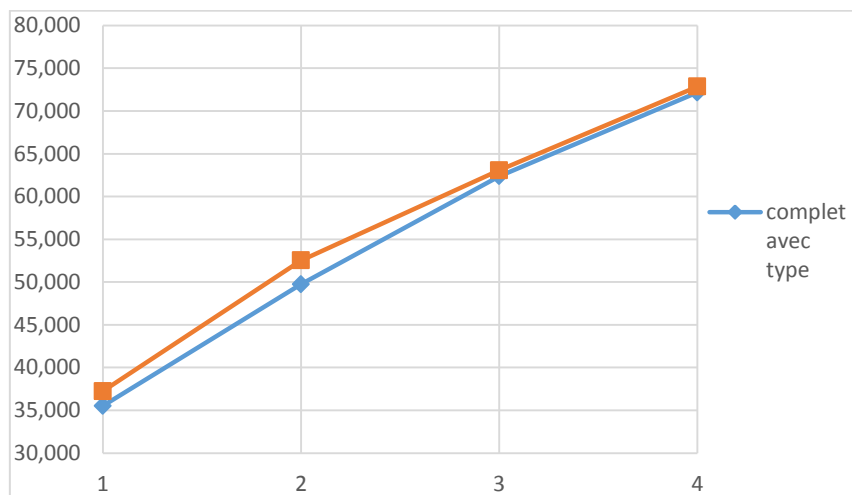


Figure 116: La distribution de la variance cumulée du bloc de paramètres communs avec et sans le paramètres type de réseau de drainage portée par l'ensemble des axes factoriels pour la région de l'Anti-Atlas Oriental.

Arriver au point où on doit tester la sensibilité du traitement mathématique, on a effectué plusieurs calculs d'ACP sans l'information sur le type de réseau et en ôtant à chaque calcul un des paramètres descriptifs. Le premier résultat obtenu (Figure 117), affiche une grande différence dans le pourcentage des variances expliquées par les axes factoriels selon le paramètre éliminé. En d'autres termes cela signifie que le processus de variabilité des types de réseaux de drainage dans l'Anti-Atlas Oriental présente une complexité et des gains d'homogénéité variables selon la nature des paramètres éliminés.

Afin de comprendre ce processus plus en détail, on a analysé les quatre premiers axes factoriels pour chaque calcul d'ACP, les résultats sont présentés dans la Figure 118 et le

Tableau 30. On remarque ainsi, que les calculs d'ACP effectué sans les paramètres Cl, Rock-type, Homogénéité, Mean-Ddrain et Tc montrent les plus grandes différences sur le premier axe factoriel par rapport aux reste du calculs, en présentant des valeurs de pourcentage cumulé de variance expliquée respectivement de 40.13%, 40.02%, 39.94%, 39.91% et 40.34%. Pour les trois axes factoriels restants, les paramètres Rock-type et Homogamétie montrent le plus de différence par rapport aux reste des paramètres avec des valeurs respectivement de 56.33%-56.42%, 67.74%-67.84% et 78.11%-77.38% respectivement pour les composantes principales CP2, CP3 et CP4.

Ces constatations signifie que l'élimination de ces paramètres, particulièrement les paramètres Rock-type et Homogénéité lithologique, conduit à un gain dans l'homogénéité des unités factoriels qui décrivent le processus responsable de la distribution et la structuration des types de réseaux de drainage. Cependant, ceci ne constitue pas un point positive, étant donné que ce gain a été obtenu au profit d'une perte considérable d'informations non redondantes et donc un appauvrissement dans le processus global de la variation des types de réseau de drainage dans la région de l'Anti-Atlas Oriental.

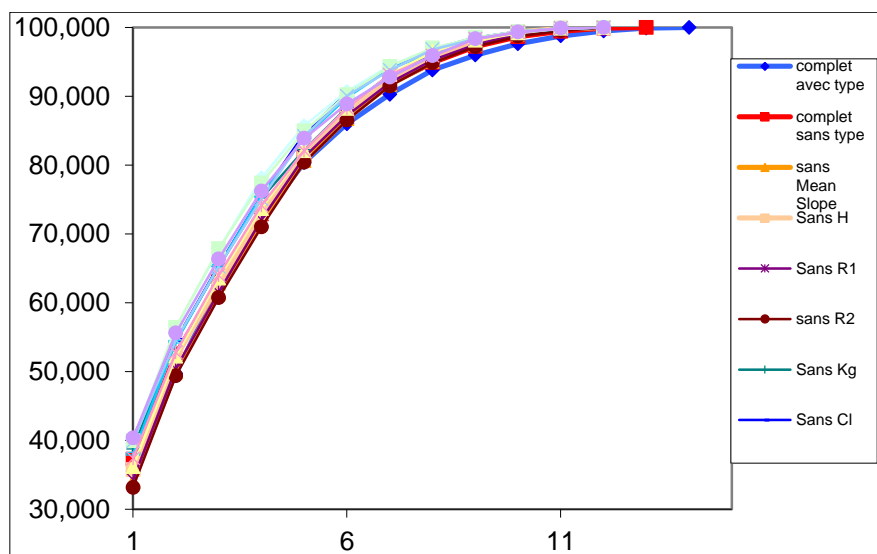


Figure 117: Variation de la distribution de la variance cumulée du bloc de paramètres communs portée par l'ensemble des axes factoriels de l'ACP durant le traitement de sensibilité pour la région de l'Anti-Atlas Oriental.

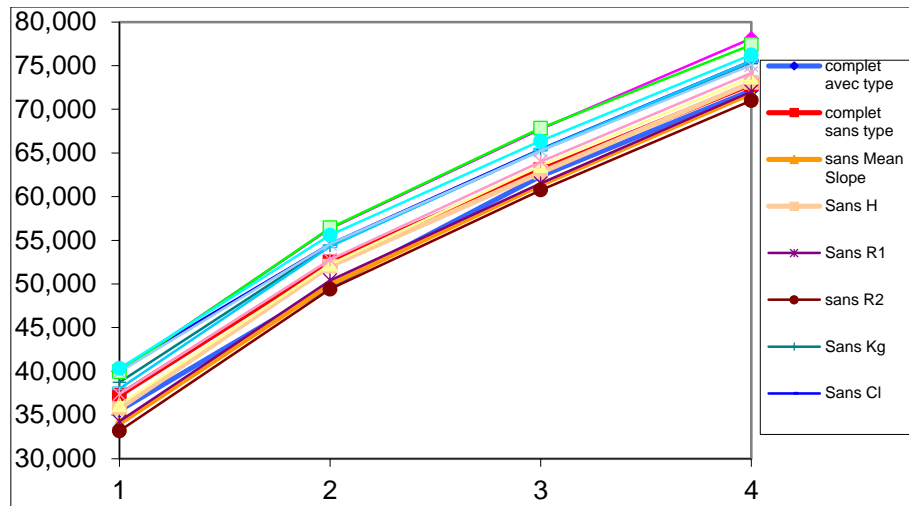


Figure 118: Variation La distribution de la variance cumulée du bloc de paramètres communs portée par les quatre premiers axes factoriels de l'ACP durant le traitement de sensibilité pour la région de l'Anti-Atlas Oriental.

Tableau 30: variation du pourcentage cumulé de la variance expliquée portée par les quatre premiers composantes principales durant le traitement de sensibilité pour la région de l'Anti-Atlas Oriental.

Axe/% variance expliquée (cumulé)	CP1	CP2	CP3	CP4
Avec type	35.522	49.734	62.366	72.154
Complet sans type	37.241	52.526	63.067	72.855
Sans Mean-slope	34.033	49.962	61.353	71.835
Sans H	35.744	52.042	62.772	73.063
Sans R1	34.269	50.422	61.528	72.038
Sans R2	33.164	49.408	60.744	70.999
Sans Kg	38.744	54.421	65.287	75.198
Sans cl	<b>40.312</b>	54.582	65.42	75.556
Sans Kh	38.03	54.298	65.374	75.539
Sans Rock Type	<b>40.028</b>	<b>56.331</b>	<b>67.747</b>	<b>78.112</b>
Sans Homogénéité	<b>39.943</b>	<b>56.425</b>	<b>67.843</b>	<b>77.389</b>
Sans Mean-Line	36.175	52.249	63.552	73.684
Sans Mean Drain	<b>39.911</b>	54.578	65.25	75.057
Sans Land Cover	37.392	52.779	64.006	74.139
Sans Tc	<b>40.344</b>	55.602	66.379	76.239



## 2 Analyse de sensibilité sur l'Analyse discriminante linéaire

La partie de ce chapitre qui décrit l'application de l'analyse discriminante linéaire sur le bloc des paramètres communs pour la région de l'Anti-Atlas Oriental, a montré que le taux de pourcentage de discriminations des types de réseaux de drainage pour les 220 bassins versants était de 81.36%, ce qui constitue un résultat satisfaisant pour ce type de traitement (Tableau 16). Par ailleurs, en effectuant l'analyse de sensibilité, en adoptant la même approche utilisée pour l'ACP, c'est-à-dire effectuer plusieurs calculs d'AD en éliminant à chaque fois un paramètre différent pour chaque calcul, on observe que le paramètre le plus sensible est de loin l'homogénéité lithologique (Tableau 31).

Cette première constatation est totalement cohérente avec l'étude de sensibilité menée sur l'analyse des composantes principales, où le paramètre de l'homogénéité lithologique affiche le plus de différenciation (Tableau 30). En effet, éliminer ce dernier paramètre de la base de données fait chuter le pourcentage de bien classé à 58.18% ce qui constitue une perte de 23.18% de discrimination. Pour les autres paramètres, l'effet est bien moindre. Les paramètres de forme Kg et Kh, ainsi que le type de roche, la couverture végétale, et la pente moyenne jouent un rôle légèrement significatif de 1.4% à 1.8%.

A partir des résultats et l'AD réalisée sur la région de l'Anti-Atlas Oriental, les constatations sur ceux obtenus sur cette analyse de sensibilité ne constitue pas un résultat inattendu, du fait que ce dernier paramètre joue un rôle primordial dans la caractérisation des types de réseaux de drainage dans cette région aride. Particulièrement pour séparer entre le type dendritique et le groupe rectangulaire-treillis (Figure 100-a), puisque comme expliqué précédemment le type dendritique s'associe aux régions qui présentent dans leur caractéristiques une lithologie homogène conduisant à une résistivité uniforme à l'érosion, ce qui est observé dans deux secteurs de l'Anti-Atlas Oriental, le domaine Kem-kem et le bassin du sud-Tafilalt.

D'autre part les types rectangulaire et treillis, sont des types de réseaux liés à la structuration géologique et se forment particulièrement dans les zones qui présentent des conditions de forte activité tectonique et intense déformation des séries sédimentaires, ce qui est observés chez les réseaux en treillis qui se développent dans le secteur axe Ougnat-Ouzine en s'associant au alternance de structures plissées d'âge Ordovicien et Dévonien, et chez les réseaux rectangulaires qui se développent dans le secteur axe Saghro-Ougnat au contact du socle Précambrien et la couverture paléozoïque du Cambrien, en suivant la structuration des failles majeurs de cette zone et où les cours d'eaux se connecte à angle droit (Figure 119).

Tableau 31: Variation du pourcentage du taux de discrimination des types de réseau de drainage durant le traitement de l'analyse de sensibilité

Paramètre éliminé	% Correct	variation
aucun	81.36%	
Homogénéité	<b>58.18%</b>	<b>-23.18%</b>
Kg	79.55%	-1.82%
Kh	79.55%	-1.82%
RockType	79.55%	-1.82%
LandCover	79.55%	-1.82%
MeanSlope	80.00%	-1.36%
R1	80.00%	-1.36%
R2	80.45%	-0.91%
H	80.91%	-0.45%
Cl	80.91%	-0.45%
Mean Line	80.91%	-0.45%
MeanDrain	80.91%	-0.45%
Tc	82.27%	<b>0.91%</b>

Par ailleurs, l'analyse de sensibilité montre un résultat qui est assez surprenant et inattendu, concernant le paramètre temps de concentration Tc (Tableau 31). En effet, l'élimination de ce paramètre conduit à une augmentation dans le taux de biens classés qui atteint 82.27%, c'est-à-dire un gain de 0.91%, en d'autre terme une diminution de la confusion entre les types de réseaux de drainage. Bien que cette variation reste relativement faible, il convient de l'étudier plus en détail en se basant sur plus de paramètre qui représentent la réponse hydrologique des bassins versants et d'étudier de manière plus spécifique l'impact des types de réseaux de drainage sur la réponse hydrologique dans les zones arides. Ceci pourra constituer un important axe de recherche dans le future, qui est actuellement sous développer, principalement dû à la rareté des données dans ces zones et la difficulté de les acquérir (Gunkel et al., 2015; Mengistu et al., 2019).

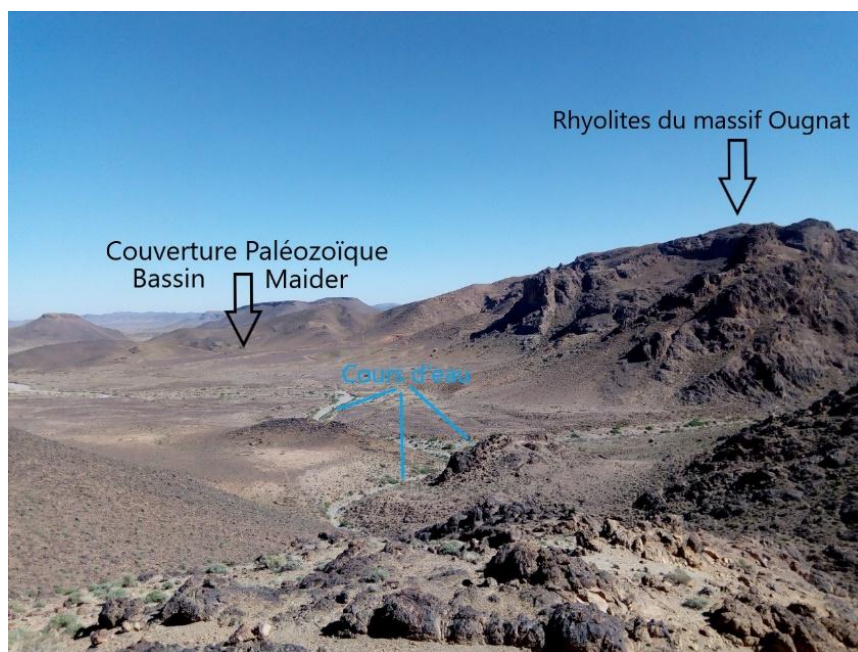


Figure 119: Zone de contacts entre les formations de rhyolites en coulée et en dôme sur le massif de l'Ougnat dans le secteur axe Saghro-Ougnat et la couverture Paléozoïque dans le secteur bassin Maider.

### **III Synthèse générale du traitement mathématique**

Le traitement mathématique multivariés a montré que le type de réseau de drainage ne subit pas fatalement l'influence d'un seul facteur ou paramètre du paysage, puisque son déterminisme ne peut se prévoir simplement à partir d'une seule caractéristique du bassin versant. Ce qui rend à l'évidence que l'approche multifactorielle est plus adéquate pour identifier cette relation complexe entre le type de réseau de drainage et les différentes propriétés de son environnement.

Les principaux résultats obtenus sur notre analyse de composantes principales des trois zones d'études ont permis, d'une part, d'identifier un processus généralisable sur une large gamme d'environnements naturels pour le déterminisme des types de réseaux de drainage, qui dépend des propriétés du relief (pente, rugosité et texture) et la nature géologique (Type de roche et structuration géologiques), suivis des processus d'équilibre physique du bassin versant (Infiltration, ruissèlement et érosion).

D'autre part l'utilisation des paramètres spécifiques ne produit aucun changement significatif sur les composantes principales, puisque ces derniers synthétisent toujours les mêmes informations qui reflètent les mêmes mécanismes que sur le calcul de l'ACP des blocs des paramètres communs. Cependant la contribution des paramètres spécifiques pour la région de l'Anti-Atlas Oriental a permis au processus géologiques de contribuer encore plus et de s'imposer face aux processus d'équilibre physique du bassin versant (Infiltration, ruissèlement et érosion) pour expliquer la formation et la caractérisation des types de réseaux de drainage dans cette région aride. Pour le bassin versant de la Durance, l'apport des paramètres spécifiques fournis une information supplémentaire et significative sur le rôle des processus d'infiltration et de ruissèlement dans la variabilité des types de réseaux de drainage.

L'analyse de la dimensionnalité de la distribution de la variance cumulée par les différents axes factoriels pour le bloc de paramètres communs, montre une allure générale similaire entre les trois zones d'études sur l'ensemble des 13 axes factoriels. Cependant en tenant compte que des quatre premiers axes factoriels, on remarque que le bassin du fleuve Cuanza et le bassin versant de la Durance montrent moins de mécanismes pour expliquer une grande part de la variance, moins d'hétérogénéité et ainsi moins de complexité entre les paramètres par rapport à la région de l'Anti-Atlas Oriental. Ceci est du probablement à la complexité de la nature de cette dernière région, qui elle-même contient plusieurs zones distinctes sur plusieurs points.

La Comparaison de la distribution de la variance cumulée entre les blocs de paramètres communs et le bloc de paramètres spécifiques pour la région de l'Anti-Atlas Oriental et le bassin versant de la Durance montre que l'hétérogénéité du milieu, la diversité des mécanismes mis en jeu, diminuent fortement lorsque les paramètres spécifiques entre en jeu. Ceci supporte l'hypothèse de l'existence d'un processus global qui contrôle la distribution des types de réseaux de drainage indépendamment des caractéristiques et propriétés spécifiques des régions.

Les paramètres communs choisis pour le calcul de l'analyse discriminante linéaire sont convenables pour discriminer entre les types de réseaux de drainage dans les trois zones d'études en permettant un taux de succès supérieurs à 80%. Ces trois zones d'études partagent la même structure de la première fonction discriminante F1 qui présente le plus de discrimination en se basant sur les conditions de relief et de géologie. Le reste des fonctions discriminantes est plutôt lié au détail et aux caractéristiques propres de chaque zone d'étude et son climat.

L'occupation de sol joue un rôle significatif pour discriminer les types de réseaux de drainage dès la première fonction discriminante F1 dans les zones de climat humide. Par contre dans le climat aride l'occupation de sol intervient de façon moindre et qu'à partir de la dernière fonction discriminante qui discrimine le moins entre les types de réseaux. Également, l'approche multifactorielle de l'AD permet de distinguer correctement entre les types de réseaux de haut-relief et bas-reliefs, et de montrer que ces derniers ne dépendent pas d'un seul paramètre à savoir le relief, mais plutôt de la combinaison de plusieurs descripteurs, particulièrement la géologie et l'occupation de sol.

D'autre part, l'apport des deux paramètres spécifiques sur l'analyse discriminante de l'Anti-Atlas oriental, améliore légèrement la discrimination entre les types de réseaux de drainage, particulièrement le paramètre du secteur géologique (Area). Ce dernier, en synthétisant les caractéristiques des secteurs géologiques de cette région, permet de mieux discriminer entre les types de réseaux treillis et rectangulaire. Quant au paramètre contrôle structurel l'information qu'il apporte est redondante, sans aucune variation significative. Par ailleurs, les résultats obtenus sur le bloc des paramètres spécifiques pour le bassin versant de la Durance, sont totalement inattendus, puisqu'elles affichaient un taux de discrimination inférieur à celui du bloc des paramètres communs, ce qui va à l'encontre de la base théorique mathématique de l'AD. L'explication probable à ceci est que la perte de l'homogénéité et la complexité de l'information obtenus sur l'ACP par les paramètres spécifiques, se sont manifestées dans l'AD sous forme de confusion supplémentaire.

Le calcul de la classification hiérarchique ascendante (CHA), a montré que le degré de similitude entre types de réseaux est conforme aux observations présentées (décrite, suggérées) dans la littérature (Zernitz, 1932 ; Parvis, 1950 ; Howard, 1967). Elles ont ici été mesurées et calculées par ce dernier traitement mathématique. L'individualisation et la dissimilitude des types dendritiques par rapport aux autres types, est observée sur les trois zones d'études, ce qui traduit un même processus de développement de ce dernier type dans différents environnements.

La distinction entre les types de réseaux des hauts reliefs et les types de réseaux des bas-reliefs a été très marquée dans cette classification sur la zone du bassin du fleuve Cuanza et le bassin de la Durance, ce qui confirme que l'approche multifactorielle est plus adéquate pour séparer entre ces derniers. Sur les trois zones d'études CHA a pu séparer entre les types contrôlés par la structuration géologique (Chevron, barbelé, rectangulaire et treillis) et les types moins affectés ou pas affectés par ce facteur (dendritique et parallèle).

Finalement l'analyse de sensibilité réalisée sur la région de l'Anti-Atlas Oriental a permis de valider notre hypothèse sur le fait que les facteurs géologiques et à leur tête de type de roche et l'homogénéité lithologique, sont les mécanismes majeurs du processus qui contrôle la distribution et la structuration du réseau de drainage dans les régions de climat aride, comme cela a été observé par Zernitz (1932) et Howard (1967) et prouvé par calcul mathématique par Bouramtane et al, (2020). Également, ces constatations valident indirectement la contribution importante des facteurs géologiques en s'associant au relief et à l'occupation de sol dans les régions humides, comme le cas du bassin du fleuve Cuanza et le bassin versant de la Durance.

# Conclusion générale et perspective

L'objectif principale de ce travail de thèse est d'identifier et analyser les facteurs qui contrôlent et caractérisent la structuration et la distribution des types réseaux de drainage, qui constituent les voies naturelles de transport d'eau, sédiments et solutés, pour comprendre leur formation et développement, et pour mieux appréhender le processus global responsable de leur genèse dans différents contextes géologiques, climatiques et environnementaux.

Ce travail s'inscrit dans une longue série d'études qui ont commencés depuis 1932, sur l'observations et l'analyse des types et modelés des réseaux de drainage et leur impact sur les différents mécanismes du bassin versant, particulièrement la réponse hydrologique et la distribution des ressources en eau. En intégrant pour la première fois l'approche multifactorielle et les méthodes statistiques multivariées pour l'identification et la caractérisation des différents types de réseaux de drainage, qui était jusqu'à maintenant identifier par observation ou par des indices morpho-métriques et des méthodes géométriques complexes.

Ce travail a permis d'identifier plusieurs types de réseaux de drainage dans trois régions distribuées entre le Maroc, la France et Angola, et sur différents domaines géologiques où ils étaient encore inconnus, à savoir le domaine Alpin, L'Anti-Atlas représentant la limite nord du Craton Ouest Africain et le Craton Angolais. A travers cette étude on a mis en évidence la contribution significative de plusieurs facteurs qui décrives le relief, la géologie, la réponse hydrologique et le climat, dans la genèse et le développement de ces types de réseaux de drainage dans plusieurs types de climats et conditions géologiques et géomorphologiques. Les résultats tirés sont essentiels pour caractériser la réponse hydrologique des bassins, la taille et l'étendue des flux de sédiments, la structuration géologique et l'évolution du paysage régional. Ainsi cette conclusion vise à mettre en perspective les différents enseignements tirés dans les quatres chapitres.

## **1 L'aspect multifactoriel du déterminisme des types de réseau de drainage**

Cette étude a tout d'abord inspectée la relation des types de réseau de drainage avec les deux principaux facteurs dites contrôlant principalement leurs structurations et formations dans les premiers de travaux de Zernitz (1932) et Howard (1967), et récemment par Pereira-Claren et al (2019), à savoir la pente et la structuration géologique dans plusieurs zones de nature climatique et géologique très différente qui sont la région de l'Anti-Atlas Oriental, le bassin du fleuve Cuanza, et le bassins versant de la Durance.

On a constaté au début par observation des imageries satellitaires et cartographie du relief, du réseau de drainage, la densité de drainage, la lithologie et la structuration géologique, que cette hypothèse de pente et structuration géologique, est en effet très juste pour l'analyse des relations directe ou les associations d'un cours d'eau ou d'un réseau de drainage avec le relief et la géologie, comme sur les différents exemples présentés par Zernitz (1932) et Twidale (2004).

Cependant, cette hypothèse reste très limitante, vu que l'environnement des zones étudiées et leurs bassins versants présentent plusieurs propriétés physiques au-delà du relief et de la géologie, ce qui est attesté par la quantité, la variabilité et la complexité des données obtenues sur les six zones d'études. Ces derniers sont ainsi le foyer de plusieurs autres mécanismes qui sont potentiellement liées directement ou indirectement aux caractéristiques des cours d'eaux et au réseau de drainage dans son ensemble. Nous avons prouvé quantitativement et par mesure de corrélation que le type de réseau de drainage, ne présente aucune corrélation significative avec un des 14 paramètres descriptifs pris séparément et aucun mécanisme clair qui peut expliquer la formation et le développement de ces types de réseaux, n'a été déterminé à travers l'analyse paramètre par paramètre.

Par conséquent, le déterminisme du type de réseau ne peut se prévoir simplement à partir d'une seule caractéristique du bassin versant. Il est en effet difficile, voire même inutile, de considérer les éléments isolés de l'environnement d'un bassin versant en relation avec les propriétés de son réseau de drainage, car les éléments géologiques et climatiques agissent en interrelation. Ces dernières constatations justifiaient l'utilisation d'une approche plus complexe, multifactorielle, à travers le traitement mathématique par les méthodes d'algèbre linéaire,

## **2 Complexité du processus de genèse des types de réseaux de drainage et réduction de la dimensionnalité de l'information**

On a analysé dans ce travail 402 bassins obtenus sur trois zones d'études, le bassin de la Durance au sud de l'Europe, l'Anti-Atlas Oriental en Afrique du nord et le bassin du fleuve Cuanza en Afrique tropical avec 14 paramètres communs qui décrivent, leur relief, géologie, morphométrie, densité de drainage, couverture végétale et la réponse hydrologique, à l'aide des méthodes statistique multivariées. Cette approche a permis d'obtenir plusieurs révélations concernant le déterminisme des types de réseau de drainage et qui pointent tous vers un processus complexe mettant en jeu la contribution de plusieurs facteurs.

Le premier résultat obtenu concerne les composantes principales obtenus par l'ACP dont chacun porte un processus qui explique avec un certain pourcentage la variance observée dans les bassins. Cette dernière est significativement répartie sur un grand nombre de composantes

principales, entre 12 et 14 composantes, pour l'ensemble des zones d'études. De CP1 à CP4, le pourcentage de variance expliqué est presque supérieur à 10% ce qui suggère que l'ensemble de données représente des environnements complexes, où les paramètres ne sont pas liés par des relations évidentes. L'ACP a permis de synthétiser les informations portées par les 16 paramètres descriptifs en quatre macro-paramètres uniques (CP1 à CP4) qui portent près de 70% des informations sur la variabilité du bassin toujours pour les trois zones d'études. La dimensionnalité des informations contenues dans la base de données est ainsi réduite sans perte significative d'informations. Sur l'ensemble des traitements effectués, l'hyperespace 14D initial a été réduit à 4D/3D avec une perte d'information qui n'excède pas l'ordre de 29%, en incluant le bruit statistique inhérent à toute base de données.

### **3 L'existence d'un processus global qui contrôle la genèse des types de réseaux de drainage, observés sur les trois méthodes**

L'ACP a mis en évidence la cohérence dans les composantes principales entre les trois zones étudiées, qui se traduit par une dépendance du type de réseau aux descripteurs du relief et de géologie du bassin versant que l'on soit en climat humide des zones tropicales, tempérées, méditerranéennes ou dans un climat aride et sur des échelles de bassins très variés. Ceci traduit, clairement l'existence d'un processus global qui mis en premier degré la rugosité et la texture du relief et la nature géologique, dont le type de roche et la structuration géologiques, suivis des processus d'équilibres du bassin versant (Infiltration, ruissèlement et érosion), qui se sont reflétés par la contribution des paramètres de morphométrie du bassin, la densité de drainage et la couverture végétale.

La signification de la première composante principale CP1 est la même, que l'on considère toutes la base de données ou chaque zone pris séparément, et cela a été prouvé en combinant les données du Rif Externe, le Moyen Atlas et l'Anti-Atlas Central. Cela montre l'importance de ce macro-paramètre au-delà de l'hétérogénéité régionale. En revanche, pour le deuxième CP2 et surtout pour les troisième et quatrième (CP3 et CP4), des spécificités régionales apparaissent, reflétant l'impact de l'aridité ou de la végétation, qui est très variable entre les trois zones. Il en résulte ainsi que la composante essentielle de l'information est commune et les spécificités régionales existent, mais elles sont secondaires.

Dans son côté l'analyse discriminante (AD) a pu discriminer sur l'ensemble des zones d'études et traitement effectués, la majorité des types de réseaux de drainage avec un taux de succès supérieurs à 75%, avec l'existence de quelques confusions. Ceci signifie que les paramètres choisis sont adéquats et convenables pour discriminer entre les types de réseaux et qu'il faut les prendre en considération dans les travaux futurs concernant la structures des cours d'eau et des réseaux de drainages.



Les confusions les plus importantes observées dans les trois zones d'étude concernent les mêmes types de réseaux de drainage, à savoir le type rectangulaire, suivi par les types chevrons, treillis et parallèles. Cela signifie que la confusion entre ces types de réseaux peut se produire dans la même région et à cause des mêmes phénomènes, qui sont le contrôle structurel, ou le phénomène de transition qui se produit souvent entre eux (Bouramtane et al., 2020). En comprend de ces résultats que la confusion entre les types de réseau de drainage est générale et non locale.

Un aspect frappant entre ces trois zones d'études est la similarité de leurs premières fonctions discriminantes F1. Cette similarité se traduit dans la forte dépendance de ces F1 sur les paramètres de relief (la pente, la rugosité et les indices de relief) et de géologie (Type de roche, densité de fracturation et/ou de linéaments géologiques). Ces trois zones partagent la même structure de la fonction F1 qui présente le plus de discrimination en se basant sur les conditions de relief et de géologie. Le reste des fonctions discriminantes est plutôt lié au détail et caractéristiques propres de chaque zone et son climat, ce qui est en accord avec les constatations de PCA.

L'approche multi-factoriel de l'AD permet de distinguer correctement entre les types de réseaux de haut-relief (Chevron et barbelé) et les réseaux de bas-reliefs (dendritique, pinnate, parallèle, treillis et rectangulaire), et montrer que ces derniers ne dépendent pas d'un seul paramètre à savoir le relief comme ce qu'il a été récemment admis, mais plutôt ils dépendent de la combinaison de plusieurs descripteurs, particulièrement la géologie et la couverture végétale.

Finalement, la classification hiérarchique ascendante dans l'Anti-Atlas Oriental, le bassin du fleuve Cuanza et le bassin versant de la Durance, montre que le degré de similitude entre types de réseau est conforme aux observations présentées (décrite, suggérées) dans la littérature. Elles ont été ici mesurées et calculées par cette dernière méthode statistique. L'individualisation et la dissimilitude des types dendritiques par rapport aux autres types, est observée sur les trois zones d'études objet de cette analyse, ce qui traduit un même processus de développement unique et global de ce dernier type de réseaux dans différents environnements.

La distinction entre les types de réseau des haut-relief et les types des bas-relief a été très marquée dans cette méthode sur la zone du bassin du fleuve Cuanza et le bassin de la Durance, ce qui confirme que l'approche multifactoriel est plus adéquate pour séparer entre ces derniers. Sur les trois zones d'études la CHA sépare entre les types contrôlés par la structuration géologique (Chevron, barbelé, rectangulaire et treillis) et les types moins affectés ou pas affectés par ce facteur (dendritique et parallèle).

#### **4 L'influence de l'occupation du sol/couverture végétale dans la caractérisation des types de réseau de drainage :**

Les résultats de ce travail ont montré que la couverture végétale contribue de manière significative dans la structure des données pour expliquer variance des bassins (ACP) et dans la genèse des types de réseaux de drainage (AD). Cependant elle ne réagit pas de façon directe mais, plutôt par interrelation avec les autres paramètres, et principalement avec la variation du relief et le climat. En effet on a remarqué que les types de réseaux qui sont associés aux forts reliefs avec des roches dures et terrains accidentés, comme le type chevron, barbelé, treillis et le rectangulaire, présentent souvent la couverture végétale la plus développée dans le climat où ils se trouvent, aussi humide qu'aride. Par contre les types dendritique, pinnate et parallèle présentent souvent une faible couverture végétale et une occupation de sol dominés par des végétations clairsemées et terres nue. Ce qui conduit ce paramètre à constituer un facteur supplémentaire autre que la géologie et le relief, pour la discrimination entre les types de réseaux de drainage.

Cependant, en analysant plus en détail la corrélation entre ces derniers paramètres, nous avons constaté la présence d'un autre facteur responsable directement de la contribution de l'occupation du sol et la couverture végétale dans le déterminisme des types de réseau de drainage et qui n'a pas été quantifié mais il est intervenu sous forme d'un produit, qui est l'exposition aux influences océanique et maritime humide atlantiques et/ou méditerranéennes, qui couplées avec la variation du relief et la latitude, particulièrement pour les zones du nord d'Afrique et l'Afrique tropicale, contrôlent la distribution et la répartition des climats humides et des précipitations.

Un autre processus a été mis en évidence par les résultats de ce travail, concerne l'influence de la couverture végétale sur la densité de drainage des bassins. En effet, nous avons que dans les bassins qui présentent un climat humide, l'épaisseur croissante des couches de sol et la capacité en eau disponible favorisent une couverture végétale dense qui constitue une barrière naturelle au ruissellement, dissipant l'énergie cinétique des précipitations et du flux de surface et présentant un plus grand potentiel de réduction de la perte de sol, ce qui diminue la densité de drainage globale. Pour les régions arides comme l'Anti-Atlas Oriental et Central, la capacité en eau disponible en diminution progressive, s'accompagne d'une baisse soudaine de l'épaisseur du sol, ce qui entraîne une diminution progressive de la couverture végétale et favorise l'érosion due à l'écoulement de surface, ce qui entraîne une augmentation de la densité de drainage.

Cette constatation a permis d'expliquer en partie la faible densité de drainage observée chez le réseau de drainage dans les zones humides de reliefs élevés et accidentés et la forte densité de

drainage observe dans les régions arides à très faible relief. Ces constatations permettent d'alimenter les réflexions la lutte contre l'érosion et la désertification en végétalisant les zones les plus impacter ou susceptible dans la future d'êtres détériorer par ces deux processus, afin de favoriser l'apparition d'un sol, augmenter le stockage de l'eau et la part des écoulements de su surface au détriment du ruissellement de surface, particulièrement dans les régions arides.

## **5 Impacte des différents types de réseau de drainage sur le Temps de concentration des bassins versants, vers une amélioration des modélisations hydrologiques**

Le traitement mis en œuvre a permis de caractériser l'impact des types de réseaux de drainage sur la réponse hydrologique du bassin. Les valeurs de corrélations du paramètre de Temps de concentration 'Tc' avec les différents paramètres descriptifs ainsi que les valeurs moyennes de Tc pour chaque type de réseau démontre que la structure du réseau de drainage a un impact majeur sur la réponse du bassin versant à un épisode pluvial. La contribution significative de Tc sur les différentes composantes principales des trois zones d'études signifie qu'il explique une part importante de la variabilité des bassins, mais cela a aussi montré qu'il présente des variabilités au sein de chaque zone d'étude.

Dans les zones de climat humide a semi-humide du bassin du fleuve Cuanza, le bassin versant de la Durance, le temps de concentration des bassins versant est très faible dans les hauts reliefs, en d'autre terme, les types de réseaux chevron et barbelé présentent une réponse hydrologique rapide, par rapport à ceux qui se développent dans les bas-relief (Rectangulaire, parallèles et dendritique). Par contre dans le climat aride Tc est liée a la variation de la couverture végétale et la densité de drainage, avec le type parallèle qui montre les valeurs de Tc les plus faible.

Ces derniers résultats, donnent un aperçu sur les progrès qui peuvent être atteintes pour le développement d'approches améliorées de modélisation hydrologique / hydraulique et de transport des sédiments, si les caractéristiques du réseau de drainage, et particulièrement ces différents types, sont intégrées dans les procédures d'analyse de fréquence hydrologique régionale sur des sites où aucune information hydrologique n'est disponible.

## **6 Perspectives :**

Ce travail a largement fait appel aux méthodes de statistique multi-variées reposant sur l'algèbre linéaire. Cependant, les relations entre les différents descripteurs des bassins versants ne sont pas forcément linéaires. De même la distribution des fréquences n'est pas forcément normale. Ce travail est donc perfectible. Il convient ainsi de tester des méthodes non linéaires pour s'affranchir de ces contraintes. Certaines méthodes de Machine Learning

sont non linéaires et pourront à l'avenir constituer une amélioration de l'approche utilisée dans ce travail. Ces méthodes appartiennent à la classe des méthodes itératives supervisées, où l'itération est le processus d'apprentissage. Ainsi, dans la plupart des applications, l'algorithme reçoit des ensembles de données d'entraînement et de validation, apprend sur ces derniers et est ensuite testé sur les ensembles de données restants (ou indépendants). De même il est possible d'utiliser le logarithme de certains descripteurs ce qui transforme en données normales des séries de valeurs qui présentent une distribution log-normale. L'impact négatif des valeurs extrêmes est alors amoindri. Tout ceci constitue des pistes d'amélioration et autant de perspectives pour les recherches futures.

## Références bibliographiques

- Abdelkareem, M., & El-Baz, F. (2015). Evidence of drainage reversal in the NE Sahara revealed by space-borne remote sensing data. *Journal of African Earth Sciences*, *110*, 245-257.
- Abdelkareem, M., Abdalla, F., Mohamed, S. Y., & El-Baz, F. (2020). Mapping Paleohydrologic Features in the Arid Areas of Saudi Arabia Using Remote-Sensing Data. *Water*, *12*(2), 417.
- Abrahams, A. D., and J. J. Flint (1983), Geologic controls on the topological properties of some trellis channel networks, *Geol. Soc. Am. Bull.*, *94*, 80– 91, doi:10.1130/0016-7606(1983)94<80:GCOTTP>2.0.CO;2.
- Adiri, Z., Harti, A.E., Jellouli, A., Lhissou, R., Maacha, L., Azmi, M., Zouhair, M., Bachaoui, E.M., 2017. Comparison of Landsat-8, ASTER and Sentinel 1 satellite remote sensing data in automatic lineaments extraction: a case study of Sidi Flah-Bouskour inlier, Moroccan Anti Atlas. *Adv. Space Res.* *60*, 2355–2367. doi:10.1016/j.asr.2017.09.006.
- Alsdorf, D. E., Rodriguez, E., Lettenmair, D.P. Measuring surface water from space. *Rev. Geophys.* 2007, *45*, RG2002, doi:10.1029/2006RG000197.
- Alvarez, W. (1999). Drainage on evolving fold-thrust belts: a study of transverse canyons in the Apennines. *Basin research*, *11*(3), 267-284.
- Amarnath, G., Babar, S., & Murthy, M. S. R. (2017). Evaluating MODIS-vegetation continuous field products to assess tree cover change and forest fragmentation in India—A multi-scale satellite remote sensing approach. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, *20*(2), 157-168.
- Andrade, E. M., Guerreiro, M. J. S., Palácio, H. A. Q., & Campos, D. A. (2020). Ecohydrology in a Brazilian tropical dry forest: thinned vegetation impact on hydrological functions and ecosystem services. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, *27*, 100649.
- Argialas, d., Lyon, j., & Mintzer, o. (1988). Quantitative description and classification of drainage patterns. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, *54*(4), 505-509.
- Argyriou, A., 2012. A Methodology for the Rapid Identification of Neotectonic Features Using Geographical Information Systems and Remote Sensing: A Case Study From Western Crete, Greece (PhD Thesis) School of Earth and Environmental Sciences, University of Portsmouth, Portsmouth, United Kingdom.
- Asante, K. O., Artan, G. A., Pervez, S., Bandaragoda, C., & Verdin, J. P. (2008). *Technical Manual for the Geospatial Stream Flow Model(GeoSFM)*. U. S. Geological Survey.
- Babault, J., Van Den Driessche, J., Teixell, A., 2012. Longitudinal to transverse drainage network evolution in the High Atlas (Morocco): The role of tectonics. *Tectonics* *31*. <https://doi.org/10.1029/2011TC003015>
- Bahrami, S., Capolongo, D., & Mofrad, M. R. (2020). Morphometry of drainage basins and stream networks as an indicator of active fold growth (Gorm anticline, Fars Province, Iran). *Geomorphology*, 107086.

- Baidder L. (2007). Structuration de la bordure septentrionale du Craton Ouest Africain du Cambrien à l'actuel : Cas de l'Anti Atlas oriental du Maroc. These Doctorat d'état es-science (Option Géologie Structurale), 215p.
- Baidder, L., Michard, A., Soulaïmani, A., Fekkak, A., Eddebbi, A., Rjimati, E.-C., Raddi, Y., 2016. Fold interference pattern in thick-skinned tectonics; a case study from the external Variscan belt of Eastern Anti-Atlas, Morocco. *J. Afr. Earth Sci.* 119, 204–225. doi:10.1016/j.jafrearsci.2016.04.003.
- Baker, V. R., Hamilton, C. W., Burr, D. M., Gulick, V. C., Komatsu, G., Luo, W., ... & Rodriguez, J. A. P. (2015). Fluvial geomorphology on Earth-like planetary surfaces: a review. *Geomorphology*, 245, 149-182.
- Baker, V.R., 2008a. Planetary landscape systems: *Earth Surface Processes and Landforms* 33, 1341–1353.
- Bargery, A. S., & Wilson, L. (2011). Erosive flood events on the surface of Mars: Application to Mangala and Athabasca Valles. *Icarus*, 212(2), 520-540.
- Belda, I. 2013. Intelligence, machines et mathématiques : l'intelligence artificielle et ses enjeux. Volume 29 de Monde et mathématique. RBA France, 2013. ISBN: 2823701273, 9782823701272. 151p.
- Bell FC, Kar SO (1969) Characteristic response times in design flood estimation. *J Hydrol* 8(2):173–196. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(69\)90120-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(69)90120-6).
- Benzécri, F. (1985). Introduction à la classification ascendante hiérarchique d'après un exemple de données économiques. *Cahiers de l'Analyse des Données*, 10(3), 279-302.
- Benzécri, J. P. (1973). *L'analyse des données* (Vol. 2, p. 1). Paris: Dunod.
- Berger, K.P., Entekhabi, D., 2001. Basin hydrologic response relations to distributed physiographic descriptors and climate. *J. Hydrol.* 247 (3), 169e182.
- Berkhahn, S., Fuchs, L., & Neuweiler, I. (2019). An ensemble neural network model for real-time prediction of urban floods. *Journal of hydrology*, 575, 743-754.
- Beven, K., Asadullah, A., Bates, P., Blyth, E., Chappell, N., Child, S., ... & Freer, J. (2020). Developing observational methods to drive future hydrological science: Can we make a start as a community?. *Hydrological Processes*, 34(3), 868-873.
- Bouramtane, T., Kacimi, I., Saidi, A., El Adraoui, A., Morarech, M., & Tahiri, A. (2018, July). Study and Analysis of the Drainage Network in the Eastern Anti-Atlas and the Role of Geology and Geomorphology on its Evolution Using Remote Sensing and GIS Data. In *IGARSS 2018-2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium* (pp. 7411-7414). IEEE.
- Bouramtane, T., Tiouiouine, A., Kacimi, I., Valles, V., Talih, A., Kassou, N., ... & Kbir, H. E. Barbiero, L (2020) b. Drainage Network Patterns Determinism : A Comparison in Arid, Semi-Arid and Semi-Humid Area of Morocco Using Multifactorial Approach. *Hydrology*, 7(4), 87.
- Bouramtane, T., Yameogo, S., Touzani, M., Tiouiouine, A., Ouardi, J., Kacimi, I., ... & Barbiero, L. (2020) a. Statistical approach of factors controlling drainage network patterns in

arid areas. Application to the Eastern Anti Atlas (Morocco). *Journal of African Earth Sciences*, 162, 103707.

Boyer, J., Duvail, C., Le Strat, P., Gensous, B., Tesson, M., 2005. High resolution stratigraphy and evolution of the Rhône delta plain during Postglacial time, from subsurface drilling data bank. *Marine Geology*, 222–223(0): 267-298.

BRGM, O. (2010). Guide méthodologique: les outils de l'hydrogéologie karstique pour la caractérisation de la structure et du fonctionnement des systèmes karstiques et l'évaluation de leur ressource. BRGM/RP-58237-FR.

BRGM-RP. (2009). Carte géologiques harmonisée du département des Hautes-Alpes notice technique. Rapport final-57328-FR. 475p.

Brookfield, M. E. (1998). The evolution of the great river systems of southern Asia during the Cenozoic India-Asia collision: rivers draining southwards. *Geomorphology*, 22(3-4), 285-312.

Burr, D. M., Drummond, S. A., Cartwright, R., Black, B. A., & Perron, J. T. (2013). Morphology of fluvial networks on Titan: Evidence for structural control. *Icarus*, 226(1), 742-759.

Buscher, J. T., Ascione, A., & Valente, E. (2017). Decoding the role of tectonics, incision and lithology on drainage divide migration in the Mt. Alpi region, southern Apennines, Italy. *Geomorphology*, 276, 37-50.

Byrne, P. K., Klimczak, C., Williams, D.A., Hurwitz, D.M., Solomon, S.C., Head, J.W., Calvache, M.L., Viseras, C., 1997. Long-term control mechanisms of stream-piracy processes in southeast Spain. *Earth Surf. Proc. Land*. 22 (2), 93–105.

Castelltort, S., Simpson, G., & Darrioulat, A. (2009). Slope- control on the aspect ratio of river basins. *Terra Nova*, 21(4), 265-270.

Chadwick, O.A., Gavenda, R.T., Kelly, E.F., Ziegler, K., Olson, C.G., Elliott, W., Hendricks, D.M., 2003. The impact of climate on the biogeochemical functioning of volcanic soils. *Chem. Geol.* 202, 195–223. [http://dx.doi.org/ 10.1016/j.chemgeo.2002.09.001](http://dx.doi.org/10.1016/j.chemgeo.2002.09.001), <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0009254103002456>> (Controls on Chemical Weathering).

Champion, C., Choukroune, P., & Clauzon, G. (2000). La déformation post-Miocène en Provence occidentale. *Geodinamica Acta*, 13(2-3), 67-85.

Charizopoulos, N., Mourtziou, P., Psilovikos, T., Psilovikos, A., & Karamoutsou, L. (2019). Morphometric analysis of the drainage network of Samos Island (northern Aegean Sea): Insights into tectonic control and flood hazards. *Comptes Rendus Geoscience*, 351(5), 375-383.

Choubert, G., Faure-Muret, A., Destombes, J., 1989. Carte Géologique du Maroc au 1/200 000, feuille Zagora-Coude du Dra-Hamada du Dra. Notes Mem. Serv. Geol. Maroc 273.

Chougale, S.S., Sapkale, J.B., 2017. Effect of terrain on stream junctions and drainage density: a study of Kadvi River basin, Maharashtra. *Indian J. Sci. Technol.* 10 (28), 1–6.

Clariond, L., Choubert, G., Lavocat, R., Joly, F., Poueyto, A., 1982. Carte Géologique du Maroc au 1/200 000, feuille BOU Haiara-Zegdou. Notes Mem. Serv. Geol. Maroc 259.

- Clark, M.K., Schoenbohm, L.M., Royden, L.H., Whipple, K.X., Burchfiel, B.C., Zhang, X., Zhang, X., Wang, E., Chen, L., 2004. Surface uplift, tectonics, and erosion of eastern Tibet from large-scale drainage patterns. *Tectonics* 23 (1), 1–21.
- Clauzon, G. (1979). Le canyon messinien de la Durance (Provence, France): Une preuve paléogéographique du bassin profond de dessiccation. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 29, 15-40.
- Collins, D.B.G., Bras, R.L., 2010. Climatic and ecological controls of equilibrium drainage density, relief, and channel concavity in dry lands. *Water Resour. Res.* 46, W04508. <http://dx.doi.org/10.1029/2009WR008615>.
- Corgne, S., Magagi, R., Yergeau, M., & Sylla, D. (2010). An integrated approach to hydro-geological lineament mapping of a semi-arid region of West Africa using Radarsat-1 and GIS. *Remote Sensing of Environment*, 114(9), 1863-1875.
- Cronshey R, McCuen R, Miller N, Rawls W, Robbins S, Woodward D (1986) Urban hydrology for small watersheds. US Dept of Agriculture, Soil Conservation Service, Engineering Division.
- Czyzyk, K.A., 2018. A nonlinear synthetic unit hydrograph method that accounts for channel network type. MS Thesis, Colorado State University, Fort Collins, Co. USA, p. 52.
- Dahlin, T. (1995). On the automation of 2D resistivity surveying for engineering and environmental applications.
- Daley, J. S., & Cohen, T. J. (2018). Climatically-controlled river terraces in eastern Australia. *Quaternary*, 1(3), 23.
- Day, D. G. (1980). Lithologic controls of drainage density: A study of six small rural catchments in New England, NSW. *Catena*, 7(4), 339-351.
- De Carvalho, H., Tassinari, C., Alves, P. H., Guimarães, F., & Simões, M. C. (2000). Geochronological review of the Precambrian in western Angola: links with Brazil. *Journal of African Earth Sciences*, 31(2), 383-402.
- Della Seta, M., Esposito, C., Marmoni, G. M., Martino, S., Mugnozza, G. S., & Troiani, F. (2017). Morpho-structural evolution of the valley-slope systems and related implications on slope-scale gravitational processes: New results from the Mt. Genzana case history (Central Apennines, Italy). *Geomorphology*, 289, 60-77.
- Destombes, J., Hollard, H., 1986. Carte Géologique du Maroc au 1/200 000, feuille Tafilalte-Taouz. Notes Mem. Serv. Geol. Maroc 244.
- Douvinet, J., Delahaye, D., & Langlois, P. (2007). De la morphométrie à un champ de mesure de l'efficacité structurelle d'un bassin versant. In *Actes du colloque international de Géomatique et d'Analyse Spatiale SAGEO'2007*.
- Douvinet, J., Delahaye, D., & Langlois, P. (2008). Modélisation de la dynamique potentielle d'un bassin versant et mesure de son efficacité structurelle. *Cybergeo: European Journal of Geography*.
- Drummond, S.A., Erkeling, G., 2014. Drainage pattern. In *Encyclopedia of Planetary Landforms* Springer. pp. 1–15.



- Du Dresnay, R., Hindermeier, J., Emberger, A., Gaia, J., Destombes, J., Hollard, H., 1988. Carte Géologique du Maroc au 1/200 000, feuille Todrgha-Ma'der. Notes Mem. Serv. Geol. Maroc 243.
- Ehlmann, B. L., Mustard, J. F., Fassett, C. I., Schon, S. C., Head III, J. W., Des Marais, D. J., ... & Murchie, S. L. (2008). Clay minerals in delta deposits and organic preservation potential on Mars. *Nature Geoscience*, 1(6), 355-358.
- El Janati, M. (2019). Application of remotely sensed ASTER data in detecting alteration hosting Cu, Ag and Au bearing mineralized zones in Taghdout area, Central Anti-Atlas of Morocco. *Journal of African Earth Sciences*, 151, 95-106.
- Emblanch, C., Zuppi, G. M., Mudry, J., Blavoux, B., & Batiot, C. (2003). Carbon 13 of TDIC to quantify the role of the unsaturated zone: the example of the Vaucluse karst systems (Southeastern France). *Journal of hydrology*, 279(1-4), 262-274.
- Ferrater, M., Booth-Rea, G., Pérez-Peña, J. V., Azañón, J. M., Giaconia, F., & Masana, E. (2015). From extension to transpression: Quaternary reorganization of an extensional-related drainage network by the Alhama de Murcia strike-slip fault (eastern Betics). *Tectonophysics*, 663, 33-47.
- Firsoff, V.A., 1960. Strange world of the Moon. Basic Books, New York (189 pp.).
- Fleury, P., Plagnes, V., & Bakalowicz, M. (2007). Modelling of the functioning of karst aquifers with a reservoir model: Application to Fontaine de Vaucluse (South of France). *Journal of hydrology*, 345(1-2), 38-49.
- Frizon de Lamotte, D., Zizi, M., Missenard, Y., Hafid, M., Azzouzi, M.E., Maury, R.C., Charrière, A., Taki, Z., Benammi, M., Michard, A., 2008. In: Michard, A., Saddiqi, O., Chalouan, A., Lamotte, D.F. de (Eds.), The Atlas System BT - Continental Evolution: the Geology of Morocco: Structure, Stratigraphy, and Tectonics of the Africa-Atlantic-Mediterranean Triple Junction. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 133–202. doi:10.1007/978-3-540-77076-3\_4.
- GOGU, R. C., & DASSARGUES, A. (2000). Sensitivity analysis for the EPIK vulnerability assessment in a local karstic aquifer. *Hydrogeology Journal*, 8(3), 337-345.
- Gouiza, M., Charton, R., Bertotti, G., Andriessen, P., Storms, J.E.A., 2017. Post-Variscan evolution of the Anti-Atlas belt of Morocco constrained from low-temperature geochronology. *Int. J. Earth Sci.* 106, 593–616. doi:10.1007/s00531-016-1325-0.
- Gunkel, A., Shadeed, S., Hartmann, A., Wagener, T., Lange, J., 2015. Model signatures and aridity indices enhance the accuracy of water balance estimations in a data-scarce Eastern Mediterranean catchment. *J. Hydrol. Reg. Stud.* 4, 487–501. doi:10.1016/j.ejrh.2015.08.002.
- Gupta, V.K., Waymire, E., Wang, C.T., 1980. A representation of an instantaneous unit hydrograph from geomorphology. *Water Resour. Res.* 16 (5), 855–862.
- Hadipriono, F. C. (1990). The development of a knowledge-based expert system for analysis of drainage patterns. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 56(6), 905-909.
- Haghnegahdar, A., Tolson, B. A., Craig, J. R., & Paya, K. T. (2015). Assessing the performance of a semi- distributed hydrological model under various watershed discretization schemes. *Hydrological Processes*, 29(18), 4018-4031.

Han, L., Liu, Z., Ning, Y., & Zhao, Z. (2018). Extraction and analysis of geological lineaments combining a DEM and remote sensing images from the northern Baoji loess area. *Advances in Space Research*, 62(9), 2480-2493.

Hauchard E., De la dynamique non linéaire à la dynamique du relief en géomorphologie – Application aux bassins versants de la marge Nord-occidentale du Bassin de Paris, Thèse de Doctorat, MTG, Université de Rouen, 3 Volumes, 2001, 730 p.

Head, J. W., Chapman, C.R., Strom, R.G., Fassett, C.I., Denevi, B.W., Blewett, D.T., Ernst, C.M., Waters, T.R., Solomon, S.C., Murchie, S.L., Prockter, L.M., Chabot, N.L., Gillis-Davis, J.J., Whitten, J.L., Goudge, T.A., Baker, D.M.H., Hurwitz, D.M., Ostrach, L.R., Xiao, Z., Merline, W.J., Kerber, L., Dickson, J.L., Oberst, J., Byrne, P.K., Klimczak, C., Nittler, L.R., 2011. Flood volcanism in the northern high latitudes of Mercury revealed by MESSENGER. *Science* 333, 1853–1856

Hilali, M., 2015. Hydrogéologie et ressources en eau du Tafilalet et ses régions limitrophes (sud-est du Maroc): connaissance, prospection, caractérisation, exploitation et gestion des ressources en eau. Mohamed V University Rabat.

Hinderleyer, J., Gauthier, H., Destombes, J., Choubert, G., Faure-Muret, A., Laville, E., Lesage, J.-L., Du Dresnay, R., 1977. Carte Géologique du Maroc au 1/200 000, feuille Jbel Saghro-Dades. Notes Mem. Serv. Geol. Maroc 161.

Hodgkinson, J. H., McLoughlin, S., & Cox, M. (2006). The influence of geological fabric and scale on drainage pattern analysis in a catchment of metamorphic terrain: Lacey's Creek, southeast Queensland, Australia. *Geomorphology*, 81(3-4), 394-407.

Hong, Y., & Adler, R. F. (2008). Estimation of global SCS curve numbers using satellite remote sensing and geospatial data. *International Journal of Remote Sensing*, 29(2), 471-477.

Horton R. E., 1945. Erosional development of streams and their drainage basins (hydrophysical approach to quantitative morphology). *Geological Society of America Bulletin*, 56, 275-390.

Howard, A.D., 1967. Drainage Analysis in Geologic Interpretation: A Summation. Am. Assoc. Pet. Geol. Bull. 51, 2246–2259.

Hurwitz, D. M., Head, J.W., Byrne, P.K., Xiao, Z., Solomon, S.C., Zuber, M.T., Smith, D.E., Neumann, G.A., 2013b. Investigating the origin of candidate lava channels on Mercury observed in MESSENGER data: Theory and observations. *J. Geophys. Res.*117, doi:10.1029/2012JE004103.

Ibanez, D. M., de Miranda, F. P., & Riccomini, C. (2014). Geomorphometric pattern recognition of SRTM data applied to the tectonic interpretation of the Amazonian landscape. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 87, 192-204.

Ichoku, C., & Chorowicz, J. (1994). A numerical approach to the analysis and classification of channel network patterns. *Water Resources Research*, 30(2), 161-174.

Istanbulluoglu, E., Bras, R.L., 2005. Vegetation-modulated landscape evolution: effects of vegetation on landscape processes, drainage density, and topography. *J. Geophys. Res.* 110, F02012. <http://dx.doi.org/10.1029/2004JF000249>.

Ivanov, M. A., Hiesinger, H., Erkeling, G., & Reiss, D. (2015). Evidence for large reservoirs of water/mud in Utopia and Acidalia Planitia on Mars. *Icarus*, 248, 383-391.

- Jelsma, H. A., McCourt, S., Perritt, S. H., & Armstrong, R. A. (2018). The geology and evolution of the Angolan shield, Congo craton. In *Geology of Southwest Gondwana* (pp. 217-239). Springer, Cham.
- Jenson, S. K. et J. O. Domingue. 1988. « Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis. » *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 54 (11): 1593-1600.
- Jenson, S. K., & Domingue, J. O. (1988). Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 54(11), 1593-1600.
- Johnsson, A., Reiss, D., Hauber, E., Hiesinger, H., & Zanetti, M. (2014). Evidence for very recent melt-water and debris flow activity in gullies in a young mid-latitude crater on Mars. *Icarus*, 235, 37-54.
- Jordan, G., Schott, B., 2004. Application of wavelet analysis to the study of spatial pattern of morphotectonic lineaments in digital terrain models. A case study. *Remote Sens. Environ.* 94 (1), 31–38. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2004.08.013> (2005).
- Jordhana, P. D., Rani, M. S., & Babu, B. S. (2020). Various Filter Algorithms Using Impulse Noise Removal in Digital Images with Image Fusion Technique. In *Emerging Trends in Electrical, Communications, and Information Technologies* (pp. 565-579). Springer, Singapore. *Journal of Geophysical Research, Planets* 117, doi: 10.1002/jgre.20052.
- Jung, K., Marpu, P. R., & Ouarda, T. B. (2015). Improved classification of drainage networks using junction angles and secondary tributary lengths. *Geomorphology*, 239, 41-47.
- Jung, K., Marpu, P. R., & Ouarda, T. B. (2017). Impact of river network type on the time of concentration. *Arabian Journal of Geosciences*, 10(24), 546.
- Jung, K., Shin, J. Y., & Park, D. (2019). A new approach for river network classification based on the beta distribution of tributary junction angles. *Journal of Hydrology*, 572, 66-74.
- Keszthelyi, L., McEwen, A.S., Phillips, C.B., Milazzo, M., Geissler, P., Turtle, E.P., Radabaugh, J., Williams, D.A., Simonelli, D.P., Breneman, H.H., Klaasen, K.P., Levanas, G., Denk, T., 2001. Imaging of volcanic activity on Jupiter's moon Io by Galileo during the Galileo Europa Mission and the Galileo Millennium Mission. *J. Geophys. Res.* 106, 33025–33052.
- Key, R. M., Cotterill, F. P. D., & Moore, A. E. (2015). The Zambezi River: an archive of tectonic events linked to the amalgamation and disruption of Gondwana and subsequent evolution of the African plate. *South African Journal of Geology*, 118(4), 425-438.
- Khaleghi, M. R., Gholami, V., Ghodusi, J., & Hosseini, H. (2011). Efficiency of the geomorphologic instantaneous unit hydrograph method in flood hydrograph simulation. *Catena*, 87(2), 163-171.
- Kite, E. S., & Daswani, M. M. (2019). Geochemistry constrains global hydrology on Early Mars. *Earth and Planetary Science Letters*, 524, 115718.
- Knight, J., & Grab, S. W. (2018). Drainage network morphometry and evolution in the eastern Lesotho highlands, southern Africa. *Quaternary International*, 470, 4-17.

- Kottek, M., J. Grieser, C. Beck, B. Rudolf, and F. Rubel, 2006: World Map of Köppen-Geiger Climate Classification updated. *Meteorol. Z.*, 15, 259-263.
- Kroner SM, Cozzie DA (1999) Data Collection for the Hazardous Waste Identification Rule, Section 7: Soil Data. US Environmental Protection Agency Office of Solid Waste Washington, DC 20460: p33
- Lafaysse, M., Hingray, B., Etchevers, P., Martin, E., & Obled, C. (2011). Influence of spatial discretization, underground water storage and glacier melt on a physically-based hydrological model of the Upper Durance River basin. *Journal of Hydrology*, 403(1-2), 116-129.
- Lange, H., & Sippel, S. (2020). Machine learning applications in hydrology. In *Forest-Water Interactions* (pp. 233-257). Springer, Cham.
- Langhans, M. H., Jaumann, R., Stephan, K., Brown, R. H., Buratti, B. J., Clark, R. N., ... & Soderblom, J. M. (2012). Titan's fluvial valleys: Morphology, distribution, and spectral properties. *Planetary and Space Science*, 60(1), 34-51.
- Lopes, F. C., Pereira, A. J., Mantas, V. M., & Mpeno, H. K. (2016). Morphostructural characterization of the western edge of the Huila Plateau (SW Angola), based on remote sensing techniques. *Journal of African Earth Sciences*, 117, 114-123.
- Malik, J. N., & Mohanty, C. (2007). Active tectonic influence on the evolution of drainage and landscape: geomorphic signatures from frontal and hinterland areas along the Northwestern Himalaya, India. *Journal of Asian Earth Sciences*, 29(5-6), 604-618.
- Martelet, G., Truffert, C., Tourliere, B., Ledru, P., & Perrin, J. (2006). Classifying airborne radiometry data with agglomerative hierarchical clustering: a tool for geological mapping in context of rainforest (French Guiana). *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 8(3), 208-223.
- Matson, D.L., Spilker, L.J., Lebreton, J.-P., 2003, The Cassini/Huygens Mission to the Saturnian system. *Space Science Reviews* 104, 1-58.
- Mazzilli, N., 2011. Sensibilité et incertitude de modélisation sur les bassins versants à forte composante karstique, Thèse. Université Montpellier II, 234 pp.
- McCourt, S., Armstrong, R. A., Jelsma, H., & Mapeo, R. B. M. (2013). New U–Pb SHRIMP ages from the Lubango region, SW Angola: insights into the Palaeoproterozoic evolution of the Angolan Shield, southern Congo Craton, Africa. *Journal of the Geological Society*, 170(2), 353-363.
- McCuen RH, Wong SL, Rawls WJ (1984) Estimating urban time of concentration. *J Hydraul Eng* 110(7):887–904. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1984\)110:7\(887\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1984)110:7(887)).
- McElwee, C.D., Yukler, M.A., 1978. Sensitivity of groundwater models with respect to variations in transmissivity and storage. *Water Resources Research*, 14(3): 451-459.
- Mejía, A. I., & Niemann, J. D. (2008). Identification and characterization of dendritic, parallel, pinnate, rectangular, and trellis networks based on deviations from planform self-similarity. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 113(F2).
- Melton, M.A., 1957. An analysis of the relations among elements of climate, surface properties, and geomorphology, Technical. ed. Columbia Univ., New York.

- Mengistu, A.G., van Rensburg, L.D., Woyessa, Y.E., 2019. Techniques for calibration and validation of SWAT model in data scarce arid and semi-arid catchments in South Africa. *J. Hydrol. Reg. Stud.* 25, 100621. doi:10.1016/j.ejrh.2019.100621.
- Montero, R. (1961). Panorama forestier de l'Angola. *BOIS & FORETS DES TROPIQUES*, 75(75), 3-16.
- Moore, A. E., & Larkin, P. A. (2001). Drainage evolution in south-central Africa since the breakup of Gondwana. *South African Journal of Geology*, 104(1), 47-68.
- Morisawa, M., 1963. Distribution of stream-flow direction in drainage patterns. *J. Geol.* 71 (4), 528–529.
- Mueller, E. R., & Pitlick, J. (2013). Sediment supply and channel morphology in mountain river systems: 1. Relative importance of lithology, topography, and climate. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 118(4), 2325-2342.
- Natural Resource Conservation Service (NRCS) (1972) Hydrology. National Engineering Handbook, Section 4, U.S. Department of Agriculture, Washington, DC: p40
- Nicod, J. (1980). Les ressources en eau de la région Provence—Alpes—Côte d'Azur. Importance et rôle des réserves souterraines. *Méditerranée*, 39(2), 23-34.
- Niemann, J. D., and L. E. Hasbargen (2005), A comparison of experimental and natural drainage basin morphology across a range of scales, *J. Geophys. Res.*, 110, F04017, doi:10.1029/2004JF000204.
- Oguchi, T. (1997). Drainage density and relative relief in humid steep mountains with frequent slope failure. *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Group*, 22(2), 107-120.
- O'Leary, D., Friedman, J., & Pohn, H. (1976). Lineament, linear, lineation: Some proposed new standards for old terms. *Geological Society of America Bulletin*, 87(7), 1463–1469
- Pacifici, A., Komatsu, G., & Pondrelli, M. (2009). Geological evolution of Ares Vallis on Mars: Formation by multiple events of catastrophic flooding, glacial and periglacial processes. *Icarus*, 202(1), 60-77.
- Pain, C. F., Clarke, J. D. A., & Thomas, M. (2007). Inversion of relief on Mars. *Icarus*, 190(2), 478-491.
- Palumbo, A. M., & Head, J. W. (2019). Oceans on Mars: The possibility of a Noachian groundwater-fed ocean in a sub-freezing martian climate. *Icarus*, 331, 209-225.
- Parvis, M., 1950. Drainage pattern significance in airphoto identification of soils and bedrocks. *Photogramm. Eng.* 16, 375–409.
- Peale, S.J., Schubert, G., Lingenfelter, R.E., 1968. Distribution of sinuous rilles and water on the Moon. *Nature* 220, 1222.
- Peckham, S. D. (1995), New results for self-similar trees with applications to river networks, *Water Resour. Res.*, 31, 1023 – 1029, doi:10.1029/ 94WR03155.
- Pesaresi, S., Mancini, A., Quattrini, G., & Casavecchia, S. (2020). Mapping Mediterranean Forest Plant Associations and Habitats with Functional Principal Component Analysis Using Landsat 8 NDVI Time Series. *Remote Sensing*, 12(7), 1132.

- Petit, C., Rolland, Y., Braucher, R., Bourlès, D., Guillou, V., & Petitperrin, V. (2019). River incision and migration deduced from <sup>36</sup>Cl cosmic-ray exposure durations: The Clue de la Cerise gorge in southern French Alps. *Geomorphology*, 330, 81-88.
- Phillips, L. F., & Schumm, S. A. (1987). Effect of regional slope on drainage networks. *Geology*, 15(9), 813-816.
- Radaideh, O. M., & Mosar, J. (2019). Tectonics controls on fluvial landscapes and drainage development in the westernmost part of Switzerland: Insights from DEM-derived geomorphic indices. *Tectonophysics*, 768, 228179.
- Rast, M., Johannessen, J., Mauser, W. Review of Understanding of Earth's Hydrological Cycle: Observation, Theory and Modelling. *Surv. Geophys.* 2014, 35, 491-513.
- Rezende-Filho, A. T., Valles, V., Furian, S., Oliveira, C., Ouardi, J., & Barbiero, L. (2015). Impacts of lithological and anthropogenic factors affecting water chemistry in the upper Paraguay River basin. *Journal of environmental quality*, 44(6), 1832-1842.
- Ribolini, A., & Spagnolo, M. (2008). Drainage network geometry versus tectonics in the Argentera Massif (French-Italian Alps). *Geomorphology*, 93(3-4), 253-266.
- Rigon, R., I. Rodri'guez-Iturbe, A. Maritan, A. Giacometti, D. G. Tarboton, and A. Rinaldo (1996), On Hack's law, *Water Resour. Res.*, 32, 3367– 3374, doi:10.1029/96WR02397.
- Rinaldo, A., Marani, A., Rigon, R., 1991. Geomorphological dispersion. *Water Resour. Res.* 27 (4), 513–525.
- Robert-Charrue, 2006. Géologie structurale de l'Anti-Atlas oriental. Neuchâtel University.
- Saidi, M.E., 1994. Genèse et propagation des crues en milieu sub-aride : exemple de l' Oued Souss (Maroc) (Flood's genesis and propagation in sub-arid environment as exemplified by Oued Souss (Morocco)). *Bull. Assoc. Geogr. Fr.* 71, 94–111.
- Robl, J., Heberer, B., Neubauer, F., & Hergarten, S. (2015, April). Morphological expression of active tectonics in the Southern Alps. In *EGU General Assembly Conference Abstracts* (Vol. 17).
- Robl, J., Hergarten, S., & Stüwe, K. (2008). Morphological analysis of the drainage system in the Eastern Alps. *Tectonophysics*, 460(1-4), 263-277.
- Rodríguez, J. A. P., Gulick, V. C., Baker, V. R., Platz, T., Fairén, A. G., Miyamoto, H., ... & Glines, N. (2014). Evidence for Middle Amazonian catastrophic flooding and glaciation on Mars. *Icarus*, 242, 202-210.
- Rodríguez-Iturbe I, González-Sanabria M, Bras RL (1982) A geomorphoclimatic theory of the instantaneous unit hydrograph. *Water Resour Res* 18(4):877–886. <https://doi.org/10.1029/WR018i004p00877>
- Rodríguez-Iturbe I, Valdes JB (1979) The geomorphologic structure of hydrologic response. *Water Resour Res* 15(6):1409–1420. <https://doi.org/10.1029/WR015i006p01409>
- Rodriguez-Iturbe, I., and A. Rinaldo (1997), *Fractal River Basins: Chance and Self-Organization*, 547 pp., Cambridge Univ. Press, New York.
- Rodriguez-Iturbe, I., E. Ijjasz-Va'squez, R. L. Bras, and D. G. Tarboton (1992b), Power law distributions of mass and energy in river basins, *Water Resour. Res.*, 28, 988–993.

- Rogan, J., & Chen, D. (2004). Remote sensing technology for mapping and monitoring land-cover and land-use change. *Progress in planning*, 61(4), 301-325.
- Ross, C.W., L. Prihodko, J. Anchang, S. Kumar, W. Ji, and N.P. Hanan. 2018. Global Hydrologic Soil Groups (HYSOGs250m) for Curve Number-Based Runoff Modeling. ORNL DAAC, Oak Ridge, Tennessee, USA. <https://doi.org/10.3334/ORNLDAAC/1566>
- Saepuloh, A., Haeruddin, H., Heriawan, M. N., Kubo, T., Koike, K., & Malik, D. (2018). Application of lineament density extracted from dual orbit of synthetic aperture radar (SAR) images to detecting fluids paths in the Wayang Windu geothermal field (West Java, Indonesia). *Geothermics*, 72, 145-155.
- Sahabi, D. Aslanian, J.-L. (2004). Olivet, Un nouveau depart pour l’histoire de l’Atlantique central, C. R. Geoscience 336 1041–1052.
- Sahib, M. G. A. (2018). Foreground Object Detection Based on Chrominance and Texture Features with Enhancement by Canny Filter. *Iraqi Journal of Information Technology*, 9(2 الانكليزية اللغة), 171-193.
- Sangireddy, H., Carothers, R.A., Stark, C.P., Passalacqua, P., 2016. Controls of climate, topography, vegetation, and lithology on drainage density extracted from high resolution topography data. *J. Hydrol.* 537, 271–282. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.02.05>.
- Scheidegger, A. E., “Stochastic branching processes and the law of stream orders”, *Water Resources Researches*, vol. 2, n° 2, 1966, pp. 199-203.
- Schumm, S. A. 1956. ‘Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Amboy, New Jersey’, *Geological Society of America Bulletin*, 67, 597–646.
- Serrat, P., & Depraetere, C. (1997). Relationships between géomorphologic features and hydrological processes in a catchment area during storm events: the case of the Agly river catchment (Pyrénées-Orientales). *Géomorphologie: relief, processus, environnement*, 3(1), 73-87.
- Sharp, R.P., 1980. Geomorphological processes on terrestrial planetary surfaces. *Ann. Rev. Earth and Planet. Sci.* 8, 231–261.
- Shreve R.L.,” Statistical law of stream numbers”, *Journal of Geology*, vol. 74, 1966, 17-37.
- Sinan M. Et Trouillard J.M. (1993) - Utilisation de la cartographie multicritère pour l’étude des vulnérabilités des nappes : Application au sud du bassin hydrogéologique de l’Essonne. Rapport BRGM RR-37211-FR.
- Skorov, Y. V., Markiewicz, W. J., Basilevsky, A. T., & Keller, H. U. (2001). Stability of water ice under a porous nonvolatile layer: implications to the south polar layered deposits of Mars. *Planetary and Space Science*, 49(1), 59-63
- Smart J. S., “Statistical properties of stream lengths”. *Water Resources Research*, vol. 4, n° 5, 1968, pp. 1001-1014.
- Soulaimani, A., Michard, A., Ouanaimi, H., Baidder, L., Raddi, Y., Saddiqi, O., Rjimat, E.C., 2014. Late ediacaran–cambrian structures and their reactivation during the Variscan and Alpine cycles in the anti-atlas (Morocco). *J. Afr. Earth Sci.* 98, 94–112. doi:10.1016/j.jafrearsci.2014.04.025.

- Sternai, P., Sue, C., Husson, L., Serpelloni, E., Becker, T. W., Willett, S. D., ... & Valla, P. (2019). Present-day uplift of the European Alps: Evaluating mechanisms and models of their relative contributions. *Earth-science reviews*.
- Stokes, M., & Mather, A. E. (2015). Controls on modern tributary-junction alluvial fan occurrence and morphology: High Atlas Mountains, Morocco. *Geomorphology*, 248, 344-362.
- Stokes, M., Mather, A. E., Belfoul, A., & Farik, F. (2008). Active and passive tectonic controls for transverse drainage and river gorge development in a collisional mountain belt (Dades Gorges, High Atlas Mountains, Morocco). *Geomorphology*, 102(1), 2-20.
- Strahler A.N., "Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography", Bulletin of the Geological Society of America (BGSA), vol. 63, 1952, pp. 117-142.
- Strong, C. M., Attal, M., Mudd, S. M., & Sinclair, H. D. (2019). Lithological control on the geomorphic evolution of the Shillong Plateau in Northeast India. *Geomorphology*, 330, 133-150.
- Struth, L., Garcia-Castellanos, D., Viaplana-Muzas, M., & Vergés, J. (2019). Drainage network dynamics and knickpoint evolution in the Ebro and Duero basins: From endorheism to exorheism. *Geomorphology*, 327, 554-571.
- Swanson, F.J., Kratz, T.K., Caine, N., Woodmansee, R.G., 1988. Landform effects on ecosystem patterns and processes. *BioScience* 38 (2), 92–98.
- Swartz, J. M., Mohrig, D. C., Passalacqua, P., Goff, J., & Gulick, S. P. S. (2018). From Distributary to Tributary: Coastal Drainage Network Position and Morphometry Are Set by Depositional Processes. In *AGU Fall Meeting Abstracts*.
- Tagnon, B. O., Assoma, V. T., Mangoua, J. M. O., Douagui, A. G., Kouamé, F. K., & Savané, I. (2018). Contribution of SAR/RADARSAT-1 and ASAR/ENVISAT images to geological structural mapping and assessment of lineaments density in Divo-Oume area (Côte d'Ivoire). *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*.
- Tarboton, D. G., Bras, R. L., & Rodriguez-Iturbe, I. (1991). On the extraction of channel networks from digital elevation data. *Hydrological processes*, 5(1), 81-100.
- Tarboton, D. G., R. L. Bras, and I. Rodriguez-Iturbe. 1991. "On the Extraction of Channel Networks from Digital Elevation Data." *Hydrological Processes* 46(5): 81-100.
- Taylor, S.R., 1982. Planetary science: a lunar perspective. *Lunar and Planetary*
- Tiouiouine, A., Yameogo, S., Valles, V., Barbiero, L., Dassonville, F., Moulin, M., ... & Kacimi, I. (2020). Dimension Reduction and Analysis of a 10-Year Physicochemical and Biological Water Database Applied to Water Resources Intended for Human Consumption in the Provence-Alpes-Côte d'Azur Region, France. *Water*, 12(2), 525.
- Tretyachenko, D. A., Greenfieldt, Y. S., Klimanova, O. A., Alekseeva, N. N., Arshinova, M. A., & Kolbowski, E. Y. (2018, January). Use of GIS Technologies in Order to Assess the Degree of Transformation of the Land Cover Structure. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 107, No. 1, p. 012107). IOP Publishing.
- Twidale, C.R., 2004. River patterns and their meaning. *Earth-Science Rev.* 67, 159–218. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2004.03.001>



- Unrug, R. (1987). Tectonic position of Karoo basalts, western Zambia. *Gondwana six: structure, tectonics, and geophysics*, 40, 319-322.
- Van der Meer, F.D., Van der Werff, H.M.A., Van Ruitenbeek, F.J.A., 2014. Potential of ESA's Sentinel-2 for geological applications. *Remote Sens. Environ.* 148, 124–133. doi:10.1016/j.rse.2014.03.022.
- Veneziano, D., and J. D. Niemann (2000b), Self-similarity and multifractality of fluvial erosion topography: 2. Scaling properties, *Water Resour. Res.*, 36, 1923– 1936, doi:10.1029/2000WR900053.
- Walley, Y., Tunncliffe, J., & Brierley, G. (2018). The influence of network structure upon sediment routing in two disturbed catchments, East Cape, New Zealand. *Geomorphology*, 307, 38-49.
- Wang, J., Song, C., Reager, J. T., Yao, F., Famiglietti, J. S., Sheng, Y., ... & Wada, Y. (2018). Recent global decline in endorheic basin water storages. *Nature geoscience*, 11(12), 926-932.
- Welling, M. (2005). *Fisher linear discriminant analysis*. Department of Computer Science, University of Toronto. Technical Report.
- Wilson, S. R., Close, M. E., & Abraham, P. (2018). Applying linear discriminant analysis to predict groundwater redox conditions conducive to denitrification. *Journal of Hydrology*, 556, 611-624.
- Zaki, A. (2019). Inverted fluvial networks in the Antoniadi crater, Mars: A sedimentological and paleohydrological investigation. *EPSC, 2019*, EPSC-DPS2019.
- Zernitz, E. R. (1932). Drainage patterns and their significance. *The Journal of Geology*, 498-521.
- Zernitz, E.R., 1932. Drainage Patterns and Their Significance. *J. Geol.* 40, 498–521. <https://doi.org/10.1086/623976>
- Zhu, Y., Zhang, J., Zhang, Y., Qin, S., Shao, Y., & Gao, Y. (2019). Responses of vegetation to climatic variations in the desert region of northern China. *Catena*, 175, 27-36.

## Liste des figures

Figure 1 : Exemple des types de réseaux de drainage : (a) dendritique, (b) pinnate, (c) parallèle, (d) treillis, (e) rectangulaire, (f) chevron et (g) barbelé. ....	12
Figure 2 : Carte de localisation des réseaux de drainage étudiés dans le cadre de cette thèse (Point rouge), et les réseaux de drainage étudiés dans les travaux antérieurs présentés dans le tableau 1 (Point jaune).....	16
Figure 3: Exemple de type de réseau dendritique identifié par (a) Zernitz (1932) (b) Parvis (1950) (c) Howard (1967) (d) Mejía et Niemann (2008) (e) Jung et Ourda (2017) (f) Jung et al (2015) (g) Jung et al (2017) (h) Jung et al, (2019) (i) Pereira-Claret al (2019).....	21
Figure 4: Exemple de type de réseau parallèle identifié par (a) Zernitz (1932) (b) Parvis (1950) (c) Howard (1967) (d) Mejía et Niemann (2008) (e) Jung et Ourda (2017) (f) Jung et al (2015) (g) Jung et al (2017) (h) Jung et al, (2019) (i) Pereira-Claret al, (2019).....	22
Figure 5: Exemple de type de réseau treillis identifié par (a) Zernitz (1932) (b) Parvis (1950) (c) Howard (1967) (d) Mejía et Niemann (2008) (e) Jung et al (2015) (f) Jung et al (2017) (h) Jung et al, (2019) (i) Pereira-Claret al, (2019).....	23
Figure 6: Exemple de type de réseau rectangulaire identifié par (a) Zernitz (1932) (b) Parvis (1950) (c) Howard (1967) (d) Mejía et Niemann (2008) (e) Jung et al (2015) (f) Jung et al (2017) (h) Jung et al, (2019) (i) Pereira-Claret al, (2019). ....	24
Figure 7: Photographie aérienne verticale de la vallée du Zambèze en aval des chutes Victoria, montrant un motif en zigzag contrôlé par des fractures dans le basalte jurassique (Twidale, 2004) .....	25
Figure 8: Exemple de type de réseau rectangulaire identifié par (a) Parvis (1950), (b) et (c) par Pereira-Claret al, (2019). ....	26
Figure 9: Exemple de type de réseau rectangulaire identifié par Pereira-Claret al, (2019). ....	27
Figure 10: (a) Image d'Apollo 15 montrant la vallée de Schröter sur la Lune, typique des rides lunaires sinueuses (Baker et al., 2015) (b) Portion du canal de lave de la vallée d' Angkor de Mercure provient du système d'imagerie double Mercury (MDIS) de l'engin spatial MESSENGER et a une résolution de 250 m par pixel (Hurwitz et al., 2013).....	28
Figure 11: (a) Imageur composite généré à partir des données du spectromètre imageur compact de reconnaissance pour Mars (CRISM) du Mars Reconnaissance Orbiter (MRO) (Ehlmann et al., 2008) (b) La surface du delta est marquée par des paléocanaux alluviaux qui se sont déversés dans un lac qui occupait le cratère d'Eberswalde et les sédiments du canal, vraisemblablement du sable et/ou du gravier (Baker et al., 2015) (c) Parties d'une image HiRISE montrant en haut des branches courtes et tronquées inversées, au milieu un système de cours d'eau inversé et en bas un canal d'exhumation (Zaki et al., 2019) (d) Partie de l'image HiRISE montrant les ravines le long du bord est du cratère Hale (Baker et al., 2015). ....	30
Figure 12: (a) images prises par le Descent Imager/Spectral Radiometer (DISR) sur la sonde Huygens lors de la descente à la surface de Titan montrant des réseaux fluviaux (b) Les types de réseaux identifiés sur la surface de Titan (Burr et al., 2013). ....	32

Figure 13: (a) Réseau de vallées dendritiques aux hautes latitudes septentrionales du Titan, capturé par radar-SAR (b) les vallées sèches à partir de l'observation radar (c) Système présumé de canyon à partir d'observations radar (Langhans et al., 2012).....	32
Figure 14: (a) l'accumulation progressive de l'aire de drainage (b) l'irrégularité des tracés des cours d'eau (c) angles de jonctions des cours d'eau (Pereira-Claren et al., 2019). .....	35
Figure 15: Localisation du bassin du fleuve Cuanza en Angola. ....	42
Figure 16: Répartition des types de climats dans le bassin du fleuve Cuanza, modifié après Kottek et al, (2006).....	43
Figure 17: Carte géologique de l'Angola, modifier après Araujo et al, (1998). ....	46
Figure 18: Carte géologique des principales unités géologiques dans le bassin versant du Cuanza, obtenue à partir des données géologique de l'Afrique fournit par USGS. ....	46
Figure 19: Colonne stratigraphique au large de Cabinda, où des roches mères d'hydrocarbures ont été découvertes dans les formations de Iabe, Landana et Malembo (Schlüter, 2008). .....	47
Figure 20: Unités aquifères du bassin de la rivière Cuanza (Ministère de l'énergie et de l'eau, 2017).....	49
Figure 21: Répartition des types de climats dans le Maroc. Modifiée après Kottek et al, (2006) .....	50
Figure 22: Contexte géologique de la zone étudiée et localisation des 6 secteurs géologiques. ASO : Axe Saghro-Ougnat, AOO : Axe Ougnat-Ouzina, BST : Bassin Sud-Tafilalt, BM : Bassin Maider, SB : Secteur des Banis et DKK : Domaine de Kem-Kem. Modifié après Baïdder et al. (2016).....	53
Figure 23: Représentation et délimitation des six secteurs géologiques identifier dans l'Anti-Atlas Oriental Modifier après Baïdder et al. (2016).....	55
Figure 24: La répartition des types de climats en France, modifiée après Kottek et al, (2006) .....	56
Figure 25: Précipitation en Provence-Alpes-Côte d'Azur en 2018 (Linternaute.com d'après Météo France).....	57
Figure 26: Températures en Provence-Alpes-Côte d'Azur en 2018 (Linternaute.com d'après Meteo France).....	57
Figure 27: Représentation des principaux types de roches dans la région PACA.....	58
Figure 28: Représentation des principales formations et structures géologiques du bassin de la Durance .....	60
Figure 29: Représentation des principaux types d'aquifère dans la région PACA (Touïouine et al., 2020).....	62
Figure 30: L'opération d'extraction automatique du réseau de drainage effectuée par l'extension Arc hydro sur exemple de bassin versant (Bassin versant de Maider, Anti-Atlas Oriental).....	65
Figure 31: Portion du réseau de drainage avec différentes valeurs de seuil : (a) 1000, (b) 1500, (c) 2000, (d) 2500, (e) 3000, (f) 3500. Pixels.....	66
Figure 32: Représentation des exemples des types de réseaux de drainage identifiés dans chaque zone d'étude.....	67
Figure 33: (a) représentation d'un réseau de drainage sur un fond d'image d'ombrage pour représente le relief (b) densité de drainage obtenus à partir du réseau de drainage sur un fond d'image d'ombrage (c) Méthode de calcul de densité de drainage .....	68

Figure 34: Représentation d'un modèle numérique de terrain (a) et la distribution de pente extraite de ce dernier (b).....	69
Figure 35: Mosaïques mondiales de la couverture terrestre standard MODIS pour 2012 (Tretyachenko et al., 2018).....	73
Figure 36: Distribution globale des groupes de sols hydrologiques à une résolution spatiale (Ross et al., 2018).....	74
Figure 37: (a) image portrait (b) traitement de l'image portrait par un détecteur de limites...	77
Figure 38: Correspondances géométriques entre (A) l'espace image (espace géographique), et (B) l'espace paramétrique de Hough.....	80
Figure 39: Bloc diagramme de la méthode de détection automatique des linéaments géologiques par la transformé de Hough.....	80
Figure 40: (a) Représentation de la distribution des fractures dans une région accidentée (b) densité de fracturation calculer à partir de la distribution des fractures de la même régions..	81
Figure 41: (a) Représentation d'un bassin versant avec une lithologie homogène (>75%) et (b) représentation d'un bassin versant de lithologie hétérogène (<75%).	83
Figure 42: Représentation du paramètres contrôle structurel (a) un bassin versant tabulaire montrant un très faible contrôle structurel dans le secteur bassin sud-Tafilalt (b) un bassin versant montrant un contrôle structurel par plissement dans le secteur axe Ougnat-Ouzina (c) bassin versant montrant un contrôle structurel par fracturation dans le secteur axe Saghro-Ougnat (d) un bassin versant montrant un contrôle structurel par couplage de plissement et fracturation dans le secteur axe Ougnat-Ouzina.....	84
Figure 43: Distribution de l'indice IDPR sur la France et à l'échelle de l'Europe en arrière-plan (BRGM, 2010).....	85
Figure 44: (a) Exemple de distribution des points de localisation des structures déformées dans le nord-ouest du bassin versant de la Durance (b) densité de déformation calculée par le nombre de point de structure déformée par unité de surface.....	86
Figure 45: Exemple de distribution de la variance expliquée des composante principales ou axes factoriels notés F, avec F1 est la première composante principale	89
Figure 46: Exemple de discrimination des observations de bassin versant en 4 groupe avec F1 et F2 représente les fonction discriminantes dériver de l'AD. F1 présente un score ou un taux de discrimination de 62.33% et F2 un score de 26.55%.....	91
Figure 47: Exemple du dendrogramme résultats de l'CHA réaliser sur les observation des bassin versants subdiviser en quatre groupe, bleu :rectangulaire, orange :treillis, mauve :parallèle et vert :dendritique.	92
Figure 48: Exemple de Matrice de base de données ou le bloc de paramètre qui est construit pour chaque zone d'étude. OBJECTID représente le numéro du bassin versant.	94
Figure 49: Méthodologie développée pour améliorer la compréhension des types de réseau de drainage et leur déterminisme.	97
Figure 50: Distribution des types de roches par bassin versant dans de l'AAO	101
Figure 51: Distribution des type de contrôle structurel par bassin versant de l'AAO	101
Figure 52: Distribution de l'occupation de sol dans la région de l'Anti-Atlas Oriental.....	101
Figure 53: Distribution des type d'occupation de sol par bassin versant de l'Anti-Atlas Oriental.....	102
Figure 54: Distribution des formations lithologiques par sous bassin dans le bassin versant de la Durance.....	103

Figure 55: Distribution de l'occupation de sol dans le bassin versant de la Durance.....	104
Figure 56: distribution des types occupations de sol dominantes dans les sous bassins du bassin versant de la Durance .....	104
Figure 57: Distribution des types de roches par sous bassin dans le bassin du fleuve Cuanza .....	106
Figure 58: Distribution de l'occupation de sol dans bassin du fleuve Cuanza.....	106
Figure 59: Distribution des occupations de sol dominantes par sous bassin dans bassin du fleuve Cuanza.....	107
Figure 60: (a) Carte du réseau de drainage de l'Anti-Atlas oriental extrait à partir du modèle numérique de terrain de 30 mètre de résolution avec un seuil de 2000. (b) Distribution de la densité de drainage de l'Anti-Atlas oriental. (c) Rose diagramme de direction d'orientation du réseau de drainage. ....	108
Figure 61: (a) : Carte des différents modèles de réseau de drainage identifiés dans la région d'étude superposés sur l'image d'ombrage du modèle numérique de terrain ASTER-GDEM, (b) Quatre roses diagrammes de direction ont été réalisés pour chaque modèle de réseau de drainage. ....	110
Figure 62: (a) Carte des failles et des axes de plis extraits des cartes géologiques à l'échelle 1/200000 couvrant l'AAO. (b) Roses diagrammes de fréquence et de longueur en des failles et des axes de plis respectivement en noir et en rouge. ....	110
Figure 63 : Carte de distribution de densité de fracturation dans l'Anti-Atlas Oriental.....	111
Figure 64: Exemples de relations entre les principales caractéristiques structurales (failles, synclinaux, anticlinaux) et les réseaux de drainage dans (a et b) le secteur de l'axe Saghro-Ougna, (c) secteur de l'axe Ougnat-Ouzina, et (d) le secteur du Bani. FAO = faille Assif n'Oussif ; FBT = faille Boulghzazil-Tinifift ; FA = faille Akrouz ; FTR = faille Tizi n'Ressas ; ASA = anticlinal de Shayeb Arras ; SA = Syncline d'Amessoui ; AT = Anticline de Tijekht ; B1 et B2 = premier et deuxième Banis. (Voir les emplacements des types dans la Figure 67). ....	112
Figure 65: Exemples des relations entre les schémas de drainage parallèles et dendritiques, le gradient de pente, les structures géologiques et la densité de drainage. (a) Réseau de drainage parallèles sur le bord ouest de la boutonnière de Saghro dans l'axe Saghro-Ougnat ; (b) Réseau de drainage parallèle au nord de la ville de Zagora dans l'escarpement de la Feija dans le sud-ouest du secteur des Banis (c) Réseau de drainage dendritique dans le secteur domaine de Kem-Kem, (d) Réseau de drainage dendritique dans le secteur bassin du Sud-Tafilalt. (Voir les emplacements des types dans la Figure 67). ....	113
Figure 66: Localisation des exemples des types de réseau de drainage, en jaune ceux représenter dans la Figure 65, et en rouge ceux représenter dans la Figure 66. ....	114
Figure 67: (a) représentent le contact des cours d'eaux avec les zones de faiblesses dans les formations de la boutonnière de l'Ougnat, (b) Source située dans le cœur de la boutonnières de l'Ougnat.....	115
Figure 68: (a) Formations sédimentaires du Dévonien dans le secteur bassin Maider (b) Vue panoramique sur les formations du Banis. ....	117
Figure 69: Les cartes géologiques 1/200000 qui recouvrent presque la totalité de la zone d'étude, qui est représenter par le cadre rouge.....	118
Figure 70: Distribution du réseau de drainage sur les principaux ère et âge géologiques de l'Anti-Atlas Oriental. ....	118
Figure 71: Changement temporel de la direction azimutale du réseau de drainage dans l'Anti-Atlas oriental .....	120

Figure 72: (a) et (b) représentent respectivement la distribution de la densité de drainage et la densité des linéaments géologiques dans le bassin du fleuve Cuanza avec les rose diagramme de direction du réseau de drainage et des linéaments respectivement en bleu et en noir. ....	121
Figure 73: (a) et (b) Aperçus sur de la zone des sables à l'ouest de Malenji. (c) et (b) Le fleuve Cuanza au sud de la capitale Luanda dans la commune de Calombo, le bas Cuanza. ....	122
Figure 74: (a) Distribution des types de réseau de drainage dans le bassin du fleuve Cuanza. (b) Roses diagrammes des directions des différents types de réseau de drainage.....	124
Figure 75: (a) et (b) Chute d'eau de Calandula du fleuve Lucala dans la Provence de Malanje au nord ouest de bassin Cuanza. (c) et (d) Formations métamorphiques du gneiss localisées sur la chute de Calandula.....	125
Figure 76: (a) Formations sédimentaires clastiques et carbonatées du Jurassique supérieur au Nord-Ouest d'Angola (b) formations récentes carbonatés du cénozoïque au Nord-ouest de Luando, sud-est du bassin Cuanza.....	126
Figure 77: (a) et (b) représentent respectivement la distribution de la densité de drainage et la distribution de la densité de fracturation dans le bassin versant de la Durance. (c) roses diagramme des directions d'orientation du réseau de drainage et de la fracturation respectivement en bleu et noir.....	127
Figure 78 : (a) Formation de flyshe dans le bassin de la Durance. (a) Observation du domaine alpins au niveau de la commune de Barcelonnette dans la vallée de l'Ubay, où on observe la puissante formation des terres noires surmontées par des formations de calcaire.....	128
Figure 79: (a) Le cours d'eau principale de la Durance à la sortie de la formation de Valensole. (b) Dépôt conglomératique dans la région de Valensole et observation des reliefs du domaine alpin en arrière-plan. (c) Formation calcaire dans le karst de Vaucluse. (d) Falaise formée par le jeu d'une faille sur les puissantes formations calcaires dans la région du Karst de Vaucluse, avec le passage d'un cours d'eau sur cette dernière.....	129
Figure 80: Distribution des types de réseau de drainage dans le bassin versant de la Durance .....	130
Figure 81: Rose diagramme des différents types de réseau de drainage identifiés dans le bassin versant de la Durance. ....	132
Figure 82: Roses diagrammes des directions de la fracturation dans le domaine provençal dans le bassin de la Durance.....	132
Figure 83: Distribution des paramètres dans les trois premières composantes principales pour la région de l'Anti-Atlas Oriental. ....	137
Figure 84: Distribution des paramètres dans les trois premières composantes principales pour le bassin du fleuve Cuanza. ....	138
Figure 85: Distribution des paramètres dans les trois premières composantes principales pour le bassin versant de la Durance .....	138
Figure 86: Distribution spatiale des trois premières composante principales dans l'Anti-Atlas Oriental (a) CP1, (b) CP2 et (c) CP3.....	140
Figure 87: Distribution spatiale des trois premières composante principales dans le bassin du fleuve Cuanza, (a) CP1, (b) CP2 et (c) CP3. ....	142
Figure 88: Distribution spatiale des trois premières composante principales dans le bassin du fleuve Cuanza, (a) CP1, (b) CP2 et (c) CP3. ....	144
Figure 89: Principaux plans factoriels de l'ACP du jeu de données des paramètre spécifiques de l'Anti-Atlas Oriental. Avec F représente le plan factoriel de chaque composante principale .....	148

Figure 90: Distribution des paramètres du jeu de données spécifiques dans les trois premières composantes principales pour l'Anti-Atlas Oriental. ....	149
Figure 91: La distribution de la troisième composante principale CP3 du jeu de données des paramètres spécifiques de l'Anti-Atlas Oriental. ....	150
Figure 92: Principaux plans factoriels de l'ACP du jeu de données des paramètres spécifiques du bassin versant de la Durance. ....	151
Figure 93: Distribution des paramètres du jeu de données spécifiques dans les trois premières composantes principales pour le bassin versant de la Durance. ....	152
Figure 94: La distribution de la variance cumulée du bloc de paramètres communs portée par l'ensemble des axes factoriels des trois zones d'études, AAO : Anti-Atlas Oriental, BFC : Bassin du fleuve Cuanza et BDV : Bassin versant de la Durance. ....	154
Figure 95: La distribution de la variance cumulée du bloc de paramètres communs portée par les quatre premiers axes factoriels des trois zones d'études. ....	155
Figure 96: La distribution de la variance cumulée du bloc de paramètres communs et celui des paramètres spécifiques portée par les axes factoriels de l'Anti-Atlas Oriental. ....	156
Figure 97: La distribution de la variance cumulée du bloc des paramètres communs et celui des paramètres spécifiques portée par les axes factoriels du bassin versant de la Durance ..	156
Figure 98: Distribution des observations et des centroïdes de chaque type de réseau de drainage dans les espaces bidimensionnels (a)F1-F2, (b) F1-F3 et (c) F1-F4 le bassin du fleuve Cuanza. ....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Figure 99: Distribution des observations et des centroïdes de chaque type de réseau de drainage dans les espaces bidimensionnelles (a) F1-F2, (b) F1-F3 et (c) F1-F4 pour le bassin versant de la Durance. ....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Figure 100: Distribution des observations et des centroïdes de chaque type de réseau de drainage dans les espaces bidimensionnels (a) F1-F2 et (b) F1-F3 pour l'Anti-Atlas Oriental. ....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Figure 101: Végétation de type savane boisée dans la zone des sables, à l'ouest de Malanje. ....	166
Figure 102: : (a) végétation de type forêt dans chute d'eau de Calandula du fleuve Lucala nord-ouest de Malanje (b) Végétation de type forêt mixte dans nord-ouest de Luando. ....	167
Figure 103: : (a) Formation calcaire et (b) Formations des flyshes. (c) et (d) Lits des cours d'eaux torrentiel dans de la vallée de l'Ubay dans le commun de Barcelonnette. ....	170
Figure 104: Observation des types de végétation forêts et végétation boisées sur les reliefs de la partie amont du bassin versant de la Durance. ....	171
Figure 105: Observation du lit de la rivière de la Durance, la partie aval du bassin versant de la Durance. ....	171
Figure 106: Observation des affleurements calcaire et des alternances marno-calcaire dans l'avant-pays du bassin versant de la Durance. ....	172
Figure 107: (a) et (b) Observation des types de végétation dans le secteur axe Saghro-Ougnat. (c) et (d) Observation de l'occupation de sol dans les bas-relief du secteur bassin Maider...	176
Figure 108: Observation de l'escarpement du Feija nord-ouest de Zagora dans le secteur des Banis, sur lequel se forme des réseau de drainage parallèle. ....	177
Figure 109: Exemple d'une plaine alluviale dans l'Anti-Atlas Oriental, située au nord du flan septentrional du secteur Saghro-Ougnat, dont les relief sont observés en arrière-plan. ....	178

Figure 110: Distribution des observations et des centroïdes de chaque type de réseau de drainage dans les espaces bidimensionnelles (a) F1-F2, (b) F1-F3 et (c) F1-F4 du bloc des paramètres spécifiques pour le bassin versant de la Durance.....	181
Figure 111: Distribution des observations et des centroïdes de chaque type de réseau de drainage dans les espaces bidimensionnels (a) F1-F2 et (b) F1-F3 du bloc des paramètres spécifiques pour la région de l'Anti-Atlas Oriental.....	184
Figure 112: Dendrogramme obtenu à partir d'une analyse CHA sur les centroïdes des type de réseaux de drainage du bassin fleuve Cuanza. ....	185
Figure 113: Dendrogramme obtenu à partir d'une analyse CHA sur les centroïdes des type de réseaux hydrographique du bassin versant de la Durance.....	186
Figure 114: Dendrogramme obtenu à partir d'une analyse CHA sur les centroïdes des type de réseaux hydrographique de la région Anti-Atlas Oriental.....	186
Figure 115: La distribution de la variance cumulée du bloc de paramètres communs avec et sans le paramètres type de réseau de drainage portée par l'ensemble des axes factoriels pour la région de l'Anti-Atlas Oriental.....	190
Figure 116: La distribution de la variance cumulée du bloc de paramètres communs avec et sans le paramètres type de réseau de drainage portée par l'ensemble des axes factoriels pour la région de l'Anti-Atlas Oriental.....	190
Figure 117: Variation de la distribution de la variance cumulée du bloc de paramètres communs portée par l'ensemble des axes factoriels de l'ACP durant le traitement de sensibilité pour la région de l'Anti-Atlas Oriental. ....	191
Figure 118: Variation La distribution de la variance cumulée du bloc de paramètres communs portée par les quatre premiers axes factoriels de l'ACP durant le traitement de sensibilité pour la région de l'Anti-Atlas Oriental.....	192
Figure 119: Zone de contacts entre les formations de rhyolites en coulée et en dôme sur le massif de l'Ougnat dans le secteur axe Saghro-Ougnat et la couverture Paléozoïque dans le secteur bassin Maider. ....	195
Figure 120: Réseaux de drainages de type dendritiques dans l'Anti-Atlas Oriental sur image d'ombrage du MNT.....	229
Figure 121: Réseaux de drainages de type parallèles dans l'Anti-Atlas Oriental sur image d'ombrage du MNT.....	229
Figure 122 : Réseaux de drainages de types treillis dans l'Anti-Atlas Oriental sur image d'ombrage du MNT.....	230
Figure 123 : Réseaux de drainages de type rectangulaires dans l'Anti-Atlas Oriental sur image d'ombrage du MNT.....	230
Figure 124: Réseaux de drainages de type dendritiques et parallèles dans le bassin versant de la Durance sur image d'ombrage du MNT.....	239
Figure 125 : Réseaux de drainages de type treillis dans le bassin versant de la Durance sur image d'ombrage du MNT.....	239
Figure 126 : Réseaux de drainages de type rectangulaires dans le bassin versant de la Durance sur image d'ombrage du MNT.....	240
Figure 127: Réseaux de drainages de type chevrons dans le bassin versant de la Durance sur image d'ombrage du MNT.....	240
Figure 128: Réseaux de drainages de type dendritiques et parallèles dans le bassin du fleuve Cuanza sur image d'ombrage du MNT.....	245



Figure 129: Reseaux de drainages de type rectangulaires dans le bassin du fleuve Cuanza sur image d'ombrage du MNT ..... 245

Figure 130: Reseaux de drainages de type chevrons dans le le bassin du fleuve Cuanza sur image d'ombrage du MNT ..... 246

Figure 131: Reseaux de drainages de type barbelés dans le bassin du fleuve Cuanza sur image d'ombrage du MNT ..... 246

## Liste des tableaux

Tableau 1: Les plus important travaux réalisés sur les types de réseaux de drainage depuis 1932 jusqu'a 2019 .....	15
Tableau 2: Précipitations moyennes des stations du "Cacimbo" (aride) et des "Chuvas".....	44
Tableau 3: Synthèse des principaux caractéristiques des trois zones d'études .....	63
Tableau 4 : Codage pour la classification des occupations de sol.....	72
Tableau 5: Codage de classification pour les formations lithologiques du bassin versant de la Durance .....	82
Tableau 6: Résumé des principaux caractéristiques physiques des six secteurs géologiques de l'AAO.....	99
Tableau 7 : les valeurs maximales, minimales et moyennes des caractéristiques quantitatives des bassins identifier dans l'AAO .....	100
Tableau 8: les valeurs maximales, minimales et moyennes des caractéristiques quantitatives des bassins identifier dans le bassin versant de la Durance.....	103
Tableau 9: les valeurs maximales, minimales et moyennes des caractéristiques quantitatives des bassins identifier dans le bassin du fleuve Cuanza .....	105
Tableau 10: Coefficient de corrélation entre le type de réseau de drainages et les paramètres communs, dans la région de l'Anti-Atlas Oriental (AAO), le bassin du fleuve Cuanza (BFC) et le bassin versant de la Durance (BVD) .....	135
Tableau 11: Distribution des variance dans les trois premières composante principales des trois zone étudiées .....	136
Tableau 12: Distribution des variance dans les trois premières composante principales du jeu de données des paramètres spécifiques de l'Anti-Atlas Oriental .....	148
Tableau 13: Distribution des variance dans les trois premières composante principales du jeu de données des paramètres spécifiques du bassin versant de la Durance.....	151
Tableau 14: Matrice des confusions de l'AD obtenue sur le bloc des paramètres communs pour le bassin du fleuve Cuanza.....	157
Tableau 15: Matrice des confusions de l'AD obtenue sur le bloc des paramètres communs pour le bassin versant de la Durance .....	157
Tableau 16: Matrice des confusions de l'AD obtenue sur le bloc des paramètres communs pour la région de l'Anti-Atlas Oriental .....	158
Tableau 17: Taux de discrimination des fonctions discriminâtes identifiées par l'AD pour les trois zone d'études .....	158

Tableau 18: Corrélation entre les différents paramètres et les quatre fonctions discriminantes du bassin de fleuve Cuanza : .....	159
Tableau 19: Corrélation entre les différents paramètres et les quatre fonctions discriminantes du bassin versant de la Durance .....	160
Tableau 20: Corrélation entre les différents paramètres et les trois fonctions discriminantes de l'Anti-Atlas Oriental.....	160
Tableau 21: les valeurs moyenne CN, de surface de bassin et de temps de concentration pour les différents types de réseaux de drainage dans le bassin du fleuve Cuanza. ....	168
Tableau 22: les valeurs moyennes des indice Kg et Kh pour les différents types de bassin dans le bassin versant de la Durance. ....	173
Tableau 23: Matrice des confusions obtenues sur le bloc des paramètres spécifiques du bassin versant de la Durance .....	179
Tableau 24: Taux de discrimination des fonctions discriminâtes du bloc des paramètres spécifiques pour le bassin versant de la Durance .....	180
Tableau 25: Corrélation entre les différents paramètres et les quatre fonctions discriminantes du bloc des paramètres spécifiques du bassin versant de la Durance.....	180
Tableau 26: Matrice des confusions obtenues sur le bloc des paramètres spécifiques de l'Anti-Atlas Oriental .....	182
Tableau 27: Taux de discrimination des fonctions discriminâtes du bloc des paramètres spécifiques pour la région de l'Anti-Atlas Oriental.....	183
Tableau 28: Corrélation entre les différents paramètres et les quatre fonctions discriminantes du bloc des paramètres spécifiques dans la région de l'Anti-Atlas Oriental.....	183
Tableau 29: La matrice des corrélations entre les paramètres.....	189
Tableau 30: variation du pourcentage cumulé de la variance expliquée portée par les quatre premiers composantes principales durant le traitement de sensibilité pour la région de l'Anti-Atlas Oriental. ....	192
Tableau 31: Variation du pourcentage du taux de discrimination des types de réseau de drainage durant le traitement de l'analyse de sensibilité.....	193
Tableau 32: Base de données des paramètres communs et spécifiques de l'Anti-Atlas Oriental .....	231
Tableau 33: Base de données des paramètres communs et spécifiques du bassin versant de la Durance .....	241
Tableau 34: Base de données des paramètres communs et spécifiques du bassin du fleuve Cuanza.....	247

# Annexe I : Algorithme de

## Transformee de Hough

```
I = imread('image.tif');
Im = rgb2gray(I);
BW = edge(Im, 'canny');
figure, imshow(BW);
[H,theta,rho] = hough(BW);
figure,
imshow(imadjust(mat2gray(H)), [], 'XData', theta, 'YData', rho, 'InitialMag
nification
', 'fit');
xlabel('\theta (degrees)'), ylabel('\rho');
axis on, axis normal, hold on;
colormap(hot)
P = houghpeaks(H,100, 'threshold', ceil(0.3*max(H(:)))));
x = theta(P(:,2));
y = rho(P(:,1));
plot(x,y, 's', 'color', 'black');
lines = houghlines(BW,theta,rho,P, 'FillGap',5, 'MinLength',7);
figure, imshow(Im), hold on
max_len = 0;
for k = 1:length(lines)
xy = [lines(k).point1; lines(k).point2];
plot(xy(:,1),xy(:,2), 'LineWidth',2, 'Color', 'green');
% Determine the endpoints of the longest line segment
len = norm(lines(k).point1 - lines(k).point2);
if ( len>max_len)
max_len = len;
xy_long = xy;
end
end
```

# Annexe II : Anti-Atlas Oriental

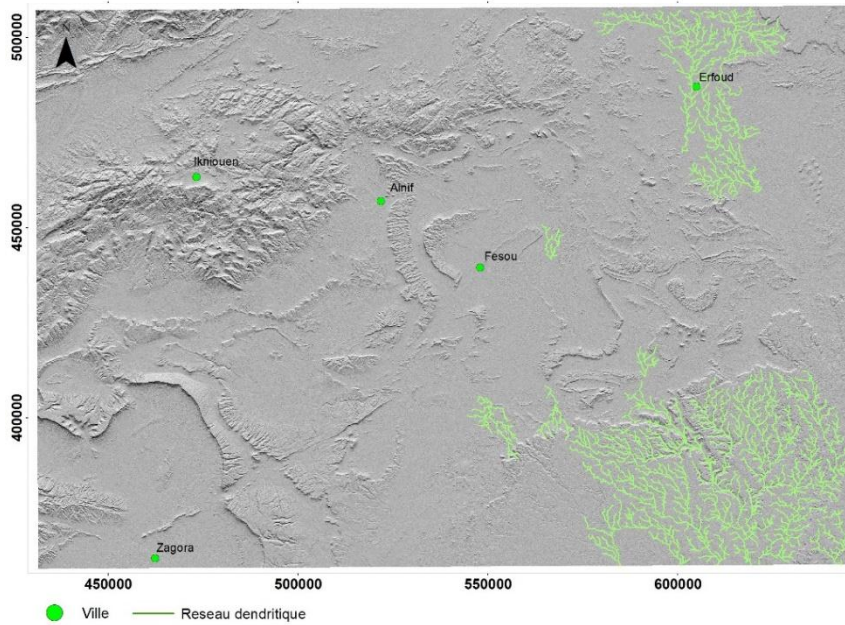


Figure 120: Réseaux de drainages de type dendritiques dans l'Anti-Atlas Oriental sur image d'ombrage du MNT

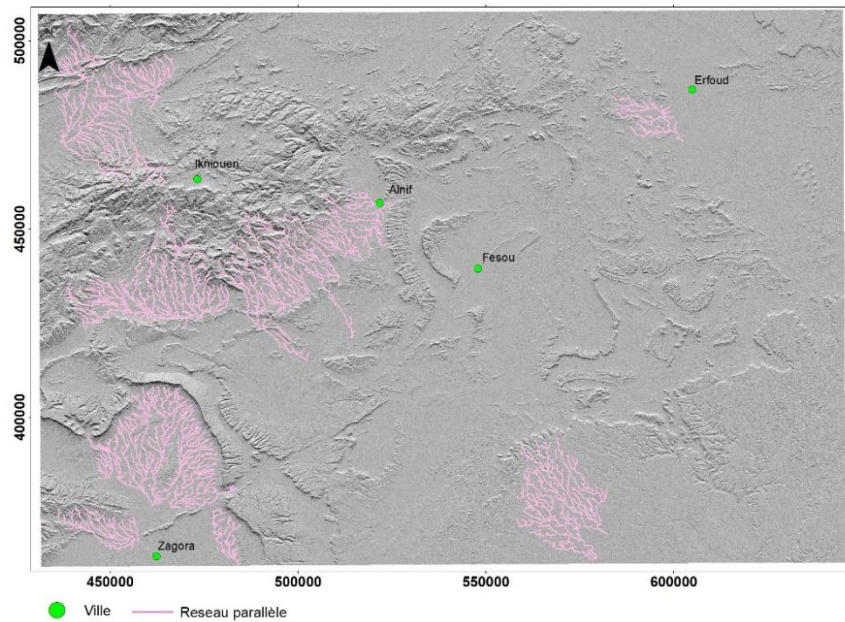


Figure 121: Réseaux de drainages de type parallèles dans l'Anti-Atlas Oriental sur image d'ombrage du MNT

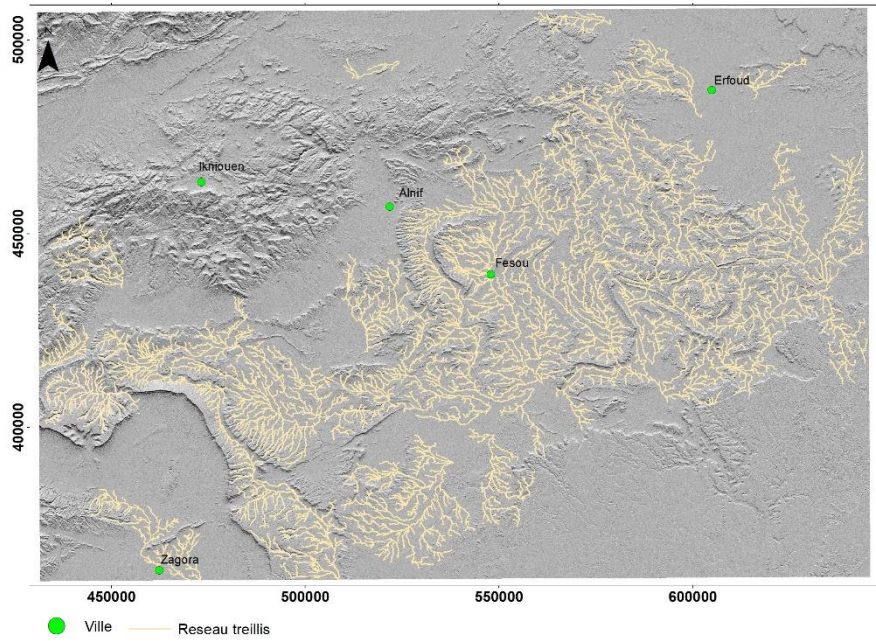


Figure 122 : Reseaux de drainages de types treillis dans l'Anti-Atlas Oriental sur image d'ombrage du MNT

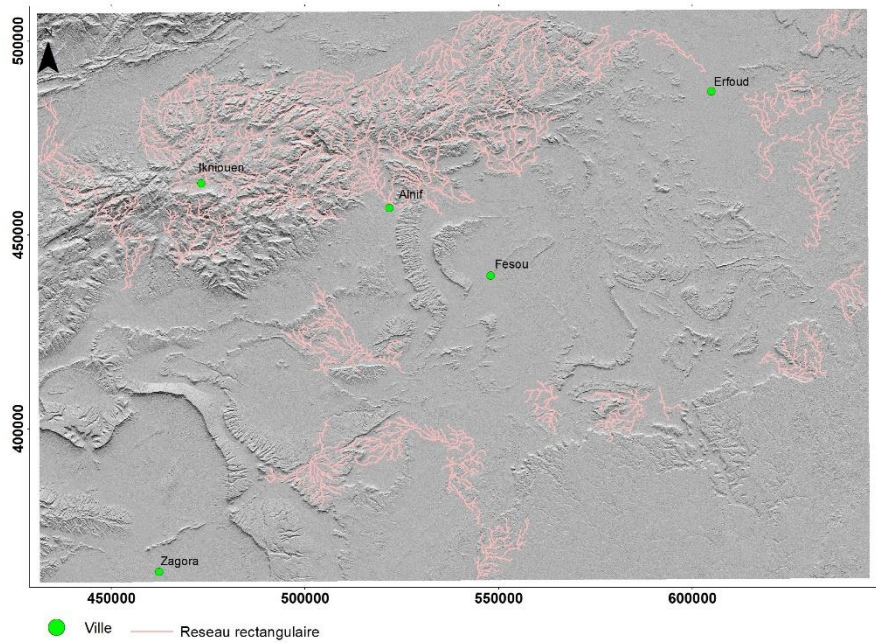


Figure 123 : Reseaux de drainages de type rectangulaires dans l'Anti-Atlas Oriental sur image d'ombrage du MNT

Tableau 32: Base de données des paramètres communs et spécifiques de l'Anti-Atlas Oriental

SBV	Typ e	MEAN -Slope	H	R1	R2	Kg	Cl	Kh	Roc k type	Homogeneit y	MEAN -Line	MEAN - Ddrain	Landcove r	Tc	Structura l control	Area
1	3	6.239	0.10 1	0.00 2	0.00 5	2.48 6	0.38 5	0.06 2	1	1	0.0003	0.5403	0	9.195	3	5
3	3	7.128	0.25 8	0.00 4	0.00 8	2.59 8	0.21 7	0.05 1	2	1	0.0008	0.7673	0	8.645	3	6
4	2	8.130	0.25 4	0.00 5	0.01 0	2.62 5	0.15 2	0.05 2	0	1	0.0008	0.6218	0	8.487	3	6
5	3	9.748	0.33 7	0.00 4	0.01 1	2.46 0	0.31 6	0.09 0	1	1	0.0013	0.6565	0	9.495	2	6
7	3	10.228	0.33 9	0.00 5	0.01 4	2.16 8	0.33 2	0.12 1	2	1	0.0014	0.6853	0	7.318	2	6
8	0	4.134	0.12 3	0.00 1	0.00 2	3.09 8	0.42 5	0.05 3	0	0	0.0000	0.7344	0	22.06 9	0	5
9	3	9.705	0.34 7	0.00 4	0.00 8	3.23 0	0.43 4	0.03 4	3	1	0.0014	0.6438	0	11.53 1	2	6
13	3	7.007	0.37 9	0.00 2	0.00 5	4.11 6	0.26 0	0.01 8	0	1	0.0007	0.7629	0	18.75 3	2	6
15	0	5.308	0.16 5	0.00 4	0.00 8	2.60 6	0.19 5	0.04 5	0	0	0.0000	0.5646	0	9.225	0	5
16	0	6.464	0.21 0	0.00 3	0.00 7	2.57 7	0.19 4	0.05 8	1	0	0.0003	0.7034	0	9.753	0	5
17	0	5.093	0.15 5	0.00 2	0.00 3	3.49 8	0.35 3	0.01 9	1	0	0.0002	0.7617	0	13.45 4	0	5
18	3	6.584	0.31 1	0.00 5	0.01 1	2.36 6	0.16 9	0.06 3	1	1	0.0005	0.8586	0	7.518	2	6
19	3	11.995	0.51 4	0.00 6	0.01 3	2.84 3	0.29 3	0.05 6	3	1	0.0017	0.6913	0	9.691	2	6
24	3	12.065	0.42 6	0.00 7	0.01 8	2.27 5	0.35 8	0.09 5	1	1	0.0014	0.6520	1	7.565	2	6
25	2	5.914	0.23 4	0.00 3	0.00 4	3.70 5	0.21 5	0.01 0	0	1	0.0004	0.9518	0	8.991	1	6
27	3	11.898	0.89 7	0.00 6	0.01 5	3.37 5	0.46 3	0.04 5	3	1	0.0013	0.6910	0	14.98 3	2	6
30	2	5.759	0.24 9	0.00 3	0.00 6	2.96 5	0.29 1	0.03 7	0	1	0.0003	0.7895	0	11.87 4	3	1
32	3	14.805	0.52 7	0.01 0	0.02 6	2.17 5	0.33 6	0.10 8	1	1	0.0016	0.6210	0	5.555	2	6
34	0	3.870	0.11 9	0.00 1	0.00 2	3.38 2	0.40 1	0.02 4	0	0	0.0000	0.8347	0	16.28 2	0	5
35	3	12.257	0.79 6	0.00 9	0.01 6	3.36 6	0.25 0	0.02 3	1	1	0.0012	0.8018	0	8.354	2	6
36	3	10.322	0.61 5	0.00 8	0.02 4	2.11 7	0.23 5	0.14 1	3	1	0.0011	0.7557	0	7.555	3	6
37	3	14.423	0.33 3	0.00 4	0.01 0	2.89 6	1.26 5	0.05 3	3	1	0.0015	0.5875	1	10.27 1	2	6
39	3	8.369	0.51 4	0.00 8	0.02 0	2.10 4	0.13 2	0.10 0	1	1	0.0008	0.9058	0	6.252	2	6
40	1	8.650	0.66 1	0.00 9	0.02 6	1.95 4	0.16 5	0.16 6	1	0	0.0007	0.8815	0	6.938	1	6
41	2	7.304	0.29 7	0.00 3	0.00 8	2.68 5	0.30 2	0.06 3	1	1	0.0007	0.7407	0	11.41 5	3	1
42	2	6.640	0.25 3	0.00 4	0.00 7	3.03 0	0.18 1	0.03 2	3	1	0.0006	0.6740	0	10.66 8	3	5

45	3	10.026	0.54 8	0.00 9	0.02 4	2.10 2	0.30 5	0.12 7	3	0	0.0009	0.7259	1	7.801	3	6
46	3	5.123	0.11 2	0.00 2	0.00 3	3.15 8	0.53 8	0.01 4	3	1	0.0001	0.8646	0	7.289	3	5
47	3	6.259	0.17 5	0.00 2	0.00 5	2.44 2	0.29 1	0.08 1	3	1	0.0006	0.7703	0	10.65 5	2	5
48	2	7.996	0.41 1	0.00 3	0.00 8	2.97 5	0.26 6	0.07 9	1	1	0.0008	0.6923	0	18.70 0	3	1
50	3	11.690	0.40 2	0.00 5	0.01 1	2.78 3	0.45 4	0.05 2	3	1	0.0016	0.6912	0	8.571	3	6
51	0	3.995	0.04 5	0.00 2	0.00 2	2.25 2	0.57 1	0.04 1	0	0	0.0000	0.8084	0	5.825	0	5
52	1	5.624	0.30 5	0.00 4	0.01 0	2.26 9	0.18 3	0.11 2	1	1	0.0004	0.8207	0	11.16 4	3	1
53	3	5.741	0.14 6	0.00 2	0.00 3	3.28 1	0.44 1	0.02 9	3	1	0.0004	0.7212	0	13.96 1	2	5
54	1	11.678	0.85 3	0.00 8	0.02 5	2.21 0	0.16 9	0.18 1	3	1	0.0010	0.7449	1	11.47 3	3	6
55	3	4.530	0.06 5	0.00 2	0.00 2	2.72 4	0.46 7	0.02 4	3	1	0.0000	0.8654	0	7.151	3	5
56	0	5.176	0.07 4	0.00 2	0.00 3	2.57 7	0.46 3	0.02 2	3	0	0.0001	0.9063	0	5.069	0	5
57	0	4.602	0.11 3	0.00 2	0.00 4	2.64 4	0.34 3	0.04 5	3	0	0.0000	0.7915	0	10.44 5	0	5
58	0	4.264	0.04 6	0.00 2	0.00 3	2.16 7	0.58 8	0.03 1	0	0	0.0002	0.8996	0	3.902	0	5
59	3	5.246	0.08 2	0.00 1	0.00 2	3.75 3	0.53 6	0.01 2	3	1	0.0001	0.8418	0	11.82 3	3	5
60	3	9.715	0.63 7	0.00 7	0.01 7	2.80 5	0.17 3	0.05 5	3	1	0.0011	0.7043	1	11.59 1	3	6
61	3	15.918	1.06 4	0.00 8	0.02 4	2.98 4	0.48 1	0.07 1	3	1	0.0016	0.6047	1	13.60 9	2	6
62	3	12.132	0.37 8	0.00 8	0.01 6	2.47 6	0.34 0	0.05 5	1	1	0.0017	0.6738	0	5.823	3	6
63	3	12.403	0.48 5	0.00 7	0.01 3	3.23 8	0.34 3	0.02 9	1	1	0.0013	0.6067	0	8.911	3	6
64	0	4.268	0.09 9	0.00 1	0.00 2	3.36 2	0.56 8	0.02 7	0	0	0.0000	0.7953	0	16.82 9	0	5
65	2	6.272	0.25 6	0.00 4	0.00 7	2.88 3	0.21 5	0.03 6	3	1	0.0004	0.7515	0	9.971	1	1
66	3	15.605	0.63 0	0.01 1	0.02 5	2.39 9	0.34 8	0.07 4	1	1	0.0015	0.6645	0	5.741	2	6
67	3	8.560	0.35 9	0.00 5	0.01 1	2.81 0	0.24 6	0.04 2	1	1	0.0010	0.7185	0	8.801	3	1
68	3	6.074	0.28 4	0.01 0	0.01 3	2.67 8	0.16 6	0.01 9	1	1	0.0009	0.7853	0	4.709	3	6
69	3	12.467	0.67 1	0.00 8	0.02 2	2.38 5	0.29 4	0.10 8	1	1	0.0013	0.6926	0	8.555	2	6
70	3	5.490	0.10 7	0.00 2	0.00 4	2.45 5	0.39 2	0.05 6	3	1	0.0002	0.7214	0	8.679	2	5
71	2	5.857	0.15 7	0.00 2	0.00 4	3.03 8	0.36 3	0.03 0	0	1	0.0004	0.7676	0	10.73 2	2	1
72	3	11.415	0.69 1	0.00 7	0.01 8	2.50 5	0.19 7	0.09 5	1	1	0.0010	0.7688	0	9.642	3	6
73	2	8.257	0.35 5	0.00 5	0.01 2	2.41 3	0.19 9	0.09 1	1	1	0.0010	0.6794	0	9.698	3	1



74	2	6.483	0.19 5	0.00 2	0.00 4	3.23 3	0.34 6	0.03 9	3	1	0.0003	0.6883	0	15.69 3	1	5
75	3	5.420	0.17 5	0.00 2	0.00 4	3.23 9	0.39 3	0.03 9	0	1	0.0002	0.6938	0	17.32 2	2	5
77	3	18.828	0.61 7	0.01 3	0.02 8	2.59 0	0.41 6	0.05 3	3	0	0.0017	0.5454	1	6.025	2	6
78	2	6.116	0.20 0	0.00 2	0.00 5	2.88 9	0.26 8	0.04 2	1	1	0.0004	0.7764	0	11.54 1	1	4
80	0	5.840	0.31 6	0.00 4	0.01 1	2.27 5	0.16 0	0.10 6	0	0	0.0003	0.7920	0	10.56 5	0	5
81	2	7.479	0.30 4	0.00 6	0.01 2	2.48 7	0.18 8	0.06 1	1	1	0.0007	0.6352	0	8.247	1	1
82	2	5.125	0.06 9	0.00 1	0.00 2	2.62 2	0.53 6	0.04 5	3	1	0.0001	0.7158	0	9.600	1	5
83	2	10.120	0.46 3	0.01 0	0.02 3	2.22 0	0.24 1	0.08 1	1	1	0.0009	0.6562	0	5.804	3	6
85	3	11.668	0.46 7	0.00 7	0.01 7	2.42 5	0.22 4	0.06 7	1	1	0.0010	0.7574	0	6.416	2	6
86a	3	18.554	0.81 8	0.01 5	0.05 3	1.70 5	0.38 7	0.33 1	3	1	0.0013	0.6178	1	5.287	3	6
86b	1	7.977	0.50 2	0.00 7	0.01 5	2.55 8	0.16 5	0.05 3	1	0	0.0005	0.8624	0	10.55 3	1	6
87	2	7.429	0.24 9	0.00 3	0.00 7	2.86 8	0.17 6	0.04 4	1	1	0.0007	0.6864	0	10.54 8	3	1
88	2	7.347	0.20 0	0.00 3	0.00 5	3.10 7	0.29 3	0.02 7	1	1	0.0006	0.7075	0	9.565	1	1
90	2	6.140	0.41 5	0.00 7	0.01 4	2.42 1	0.12 4	0.05 9	0	1	0.0004	0.8264	0	8.073	3	6
91	1	7.806	0.61 0	0.00 7	0.01 8	2.34 0	0.13 0	0.10 7	1	1	0.0005	0.7906	0	10.12 2	1	6
92	2	6.182	0.37 7	0.00 6	0.01 2	2.56 9	0.12 1	0.04 7	3	1	0.0005	0.8474	0	8.275	1	4
93	2	5.468	0.23 3	0.00 3	0.00 5	2.99 6	0.23 1	0.03 4	3	1	0.0003	0.8301	0	11.89 1	1	4
94	2	10.318	0.43 6	0.00 9	0.02 4	1.82 1	0.25 0	0.18 6	3	1	0.0012	0.7804	0	5.241	1	4
95	2	6.981	0.27 6	0.00 6	0.01 3	2.21 7	0.19 1	0.08 2	3	1	0.0006	0.6842	0	7.184	3	1
96	3	19.280	0.94 0	0.01 2	0.03 1	2.54 7	0.39 1	0.08 4	3	1	0.0017	0.6293	1	7.943	3	6
97	2	9.139	0.26 8	0.00 5	0.01 1	2.32 1	0.27 5	0.08 5	1	1	0.0011	0.6820	0	7.579	1	1
98a	3	17.585	0.74 2	0.02 3	0.06 3	1.72 4	0.35 3	0.19 7	3	0	0.0017	0.5959	3	35.74 4	3	6
98b	1	14.850	1.06 0	0.01 8	0.02 8	3.52 9	0.20 4	0.01 5	1	1	0.0014	0.6619	0	9.237	1	6
99	2	6.828	0.22 5	0.00 4	0.01 0	2.20 1	0.18 2	0.08 3	3	1	0.0004	0.7719	0	7.124	1	4
100	3	19.367	0.90 5	0.02 1	0.05 5	1.96 9	0.33 6	0.14 3	3	1	0.0016	0.6086	3	44.52 9	2	6
101	2	5.698	0.19 2	0.00 2	0.00 5	2.75 8	0.21 1	0.05 4	3	1	0.0003	0.7787	0	12.53 3	3	5
102	0	6.387	0.13 8	0.00 4	0.00 6	2.83 0	0.18 3	0.01 9	0	0	0.0003	0.7642	0	5.708	0	4
103	2	7.859	0.24 2	0.00 4	0.01 1	2.40 9	0.32 4	0.08 4	1	1	0.0007	0.5652	0	9.254	3	1

104	3	18.931	0.87 3	0.01 9	0.05 1	1.99 1	0.35 7	0.14 9	3	1	0.0015	0.5969	1	5.126	2	6
105	2	7.155	0.18 1	0.00 3	0.00 6	2.72 7	0.38 8	0.05 1	1	1	0.0005	0.6954	0	10.21 2	3	1
106	2	16.405	0.82 3	0.01 2	0.04 1	1.85 8	0.42 5	0.28 1	1	1	0.0015	0.6442	1	6.985	3	6
108	2	8.141	0.30 7	0.00 5	0.01 1	2.57 7	0.23 1	0.05 5	1	1	0.0008	0.6812	0	8.271	3	1
109	2	7.972	0.53 6	0.00 9	0.02 3	2.03 9	0.11 7	0.11 9	3	1	0.0006	0.8474	0	6.535	3	4
111	1	15.025	1.07 6	0.01 2	0.02 2	3.50 1	0.33 0	0.02 3	3	1	0.0012	0.7143	0	8.624	2	6
113	2	9.213	0.19 3	0.00 4	0.00 8	2.39 3	0.29 4	0.06 9	3	1	0.0014	0.6454	0	7.162	3	1
115	2	7.961	0.20 0	0.00 3	0.00 7	2.87 2	0.30 7	0.03 5	3	1	0.0011	0.6539	0	8.724	3	1
116	2	6.891	0.14 1	0.00 3	0.00 6	2.48 6	0.34 2	0.05 8	3	1	0.0004	0.6183	0	8.299	3	5
118	1	12.254	0.85 3	0.01 4	0.02 9	2.61 4	0.30 2	0.04 9	1	1	0.0010	0.7286	0	6.362	3	6
119	2	5.615	0.09 5	0.00 2	0.00 4	2.54 9	0.27 8	0.04 9	3	1	0.0004	0.7118	0	8.815	3	4
120	2	7.171	0.15 1	0.00 5	0.00 9	2.05 9	0.28 0	0.07 7	3	1	0.0005	0.7150	0	5.066	3	1
121	2	6.599	0.64 2	0.00 7	0.01 8	2.20 1	0.10 5	0.12 7	3	1	0.0005	0.9338	0	10.09 0	3	4
122	2	7.816	0.26 3	0.00 7	0.01 4	2.05 8	0.23 8	0.06 9	1	1	0.0006	0.8363	0	4.425	1	3
123	1	13.392	1.17 7	0.00 9	0.01 6	4.33 0	0.35 5	0.01 2	1	1	0.0010	0.7413	0	11.63 8	3	6
124	2	9.831	0.25 5	0.00 4	0.01 1	2.17 8	0.30 5	0.11 7	1	1	0.0014	0.6996	0	7.408	3	1
125	0	6.408	0.11 8	0.00 1	0.00 2	4.60 3	0.29 2	0.00 6	0	0	0.0001	0.8227	0	12.98 1	0	4
126	2	6.491	0.29 7	0.00 3	0.00 9	2.27 8	0.21 7	0.12 1	3	1	0.0003	0.7970	0	11.18 8	1	4
127	1	14.946	1.02 3	0.01 5	0.03 3	2.61 3	0.35 6	0.06 0	1	1	0.0013	0.6892	0	6.723	3	6
128	2	8.420	0.49 8	0.00 3	0.00 9	2.94 0	0.18 4	0.07 4	3	1	0.0009	0.7380	0	16.46 1	1	4
130	3	7.259	0.17 2	0.00 3	0.00 7	2.45 8	0.19 4	0.06 8	3	1	0.0004	0.6536	0	8.836	3	2
131	1	8.500	0.73 3	0.01 1	0.02 5	2.35 6	0.18 4	0.06 8	1	1	0.0006	0.8705	0	6.967	3	6
132	2	6.032	0.14 4	0.00 2	0.00 4	3.10 1	0.25 1	0.02 7	3	1	0.0005	0.7078	0	10.59 7	3	4
134	1	6.969	0.57 9	0.00 8	0.01 5	2.73 8	0.23 4	0.04 0	1	1	0.0010	0.9166	0	8.657	3	6
135	2	8.373	0.32 3	0.00 6	0.01 3	2.19 4	0.18 1	0.07 7	1	1	0.0005	0.8718	0	5.926	2	3
136	2	8.275	0.18 2	0.00 2	0.00 4	3.19 7	0.44 0	0.04 1	3	1	0.0008	0.6412	0	14.16 0	3	2
137	2	7.843	0.21 6	0.00 3	0.00 8	2.25 8	0.21 0	0.12 4	3	1	0.0008	0.6983	0	9.988	3	1
138	1	8.302	0.80 9	0.01 1	0.03 2	1.96 3	0.13 5	0.16 6	1	1	0.0006	0.8825	0	7.164	1	6

139	3	7.227	0.38 4	0.00 4	0.01 1	2.37 4	0.18 4	0.09 0	0	1	0.0004	0.8509	0	9.673	3	3
140	2	7.856	0.32 5	0.00 4	0.01 2	2.18 7	0.31 7	0.13 6	1	1	0.0008	0.7025	0	9.549	3	3
141	2	5.621	0.30 5	0.00 3	0.00 7	2.85 0	0.14 2	0.06 1	3	1	0.0003	0.7343	0	15.53 3	3	4
142	2	8.918	0.24 4	0.00 3	0.00 7	2.56 7	0.26 8	0.08 5	1	1	0.0011	0.6753	0	11.00 1	3	1
143	2	8.552	0.25 3	0.00 3	0.00 7	2.61 4	0.24 5	0.07 5	1	1	0.0010	0.6796	0	10.88 8	3	1
144	2	6.504	0.20 4	0.00 4	0.00 7	3.14 7	0.14 3	0.02 0	0	0	0.0005	0.6505	0	8.703	1	4
145	2	6.766	0.22 3	0.00 2	0.00 4	3.53 5	0.19 2	0.02 7	3	1	0.0003	0.7009	0	15.82 9	3	4
146	1	13.152	0.96 7	0.01 5	0.04 3	1.94 4	0.18 2	0.17 1	1	1	0.0009	0.7856	0	5.539	1	6
147	2	5.514	0.22 3	0.00 2	0.00 4	2.88 6	0.16 3	0.06 4	3	1	0.0002	0.7900	0	17.14 0	1	4
148	1	12.742	1.00 1	0.00 9	0.02 2	2.98 9	0.23 4	0.05 3	1	1	0.0010	0.6910	0	10.67 4	1	6
149	1	10.316	0.78 9	0.00 8	0.02 4	2.21 4	0.19 2	0.13 4	1	1	0.0009	0.8320	0	8.524	1	6
151	1	8.621	0.66 1	0.01 1	0.01 7	2.97 6	0.24 0	0.02 4	1	1	0.0007	0.8805	0	7.020	3	6
152	1	9.080	0.74 5	0.00 8	0.01 7	2.90 2	0.14 4	0.04 0	1	1	0.0008	0.8594	0	9.222	3	6
153	2	8.222	0.22 3	0.00 6	0.01 2	2.13 3	0.16 9	0.07 8	1	1	0.0007	0.6976	0	5.419	3	1
154	2	8.768	0.34 6	0.00 9	0.01 7	2.06 7	0.09 6	0.06 8	1	1	0.0009	0.9234	0	4.201	1	3
155	2	6.454	0.27 0	0.00 5	0.01 0	2.25 5	0.12 4	0.06 8	3	1	0.0004	0.9038	0	6.796	1	4
156	2	6.764	0.29 7	0.00 5	0.01 2	2.34 8	0.14 6	0.07 6	1	1	0.0005	0.7211	0	8.676	3	1
157	2	9.082	0.65 9	0.00 9	0.01 9	2.64 5	0.12 6	0.04 8	1	1	0.0006	0.8456	0	7.648	1	3
158	2	6.517	0.25 3	0.00 3	0.00 5	3.56 3	0.36 3	0.01 7	1	1	0.0005	0.7861	0	11.29 8	1	3
159	2	8.263	0.50 6	0.00 5	0.01 3	2.65 3	0.24 4	0.06 5	1	1	0.0007	0.8130	0	10.37 0	1	3
160	2	7.776	0.26 9	0.00 6	0.01 2	2.17 9	0.17 1	0.06 8	3	1	0.0006	0.8235	0	5.421	1	4
161	2	8.206	0.29 6	0.00 5	0.01 2	2.33 7	0.26 2	0.08 0	1	1	0.0011	0.6814	0	7.765	3	3
162	3	8.999	0.24 5	0.00 9	0.01 4	2.36 5	0.17 3	0.03 6	1	1	0.0010	0.7181	0	4.107	3	3
163	3	8.962	0.19 4	0.00 3	0.00 7	2.35 5	0.68 1	0.10 4	1	1	0.0008	0.6324	0	9.444	3	2
164	2	12.726	0.50 6	0.00 8	0.02 2	2.24 0	0.35 0	0.11 1	1	1	0.0011	0.6341	0	6.863	3	6
165	3	9.510	0.30 0	0.00 7	0.01 5	2.26 5	0.19 8	0.07 0	1	1	0.0013	0.6469	0	5.770	3	3
166	3	8.395	0.31 3	0.00 4	0.00 9	2.82 7	0.19 3	0.04 1	1	1	0.0009	0.7270	0	8.970	3	3
167	2	9.757	0.77 1	0.01 2	0.02 5	2.60 8	0.51 5	0.05 0	1	1	0.0011	0.7654	0	7.236	1	3

168	2	9.122	0.51 7	0.00 9	0.02 1	2.14 6	0.24 0	0.09 2	1	1	0.0010	0.8568	0	5.970	1	3
169	2	8.456	0.30 2	0.00 3	0.00 7	2.61 5	0.18 3	0.09 5	1	1	0.0006	0.7289	0	13.28 1	3	1
170	0	6.326	0.18 1	0.00 5	0.00 9	2.26 7	0.20 4	0.05 6	3	0	0.0003	0.7693	0	6.221	0	1
171	2	6.950	0.19 4	0.00 4	0.00 7	2.69 8	0.13 6	0.04 0	0	1	0.0006	0.6941	0	8.251	1	4
172	2	8.414	0.61 4	0.00 6	0.01 3	3.09 2	0.18 9	0.04 2	1	1	0.0007	0.7260	0	12.79 8	1	3
173	2	7.967	0.23 0	0.00 3	0.00 7	2.73 5	0.16 3	0.05 9	3	1	0.0010	0.6588	0	11.01 1	3	4
174	2	6.308	0.32 3	0.00 5	0.00 9	2.94 9	0.34 6	0.02 6	3	1	0.0004	0.8590	0	8.500	3	4
175	2	6.029	0.28 7	0.00 3	0.00 6	2.91 4	0.14 4	0.04 4	1	1	0.0004	0.8268	0	12.58 5	2	3
176	2	6.881	0.29 3	0.00 5	0.00 9	2.73 5	0.15 3	0.03 9	3	1	0.0007	0.8023	0	8.510	3	3
177	2	5.074	0.14 3	0.00 2	0.00 4	2.89 5	0.23 0	0.03 4	3	1	0.0003	0.7804	0	11.16 9	3	4
178	2	8.125	0.26 3	0.00 5	0.01 0	2.69 1	0.31 0	0.04 3	3	1	0.0005	0.6311	0	8.284	1	1
181	2	10.665	0.55 0	0.00 7	0.01 9	2.45 0	0.27 9	0.09 9	1	1	0.0010	0.6268	0	9.626	1	3
184	2	6.008	0.31 2	0.00 5	0.00 9	2.82 1	0.12 1	0.03 7	1	1	0.0006	0.7402	0	9.671	1	3
185	2	6.829	0.23 1	0.00 4	0.00 7	3.08 8	0.16 9	0.02 9	0	1	0.0006	0.6613	0	10.53 2	1	4
186a	2	11.344	0.58 2	0.00 8	0.03 5	1.48 8	0.32 4	0.73 0	1	1	0.0010	0.7688	0	6.338	1	3
186b	1	6.699	0.78 7	0.00 9	0.02 3	2.43 0	0.16 1	0.08 6	1	1	0.0005	0.8245	0	10.86 2	1	3
188	3	6.252	0.19 5	0.00 6	0.00 7	3.05 3	0.14 0	0.01 4	0	1	0.0003	0.7547	0	6.115	3	2
189	3	6.385	0.22 0	0.00 4	0.00 7	2.63 7	0.12 5	0.04 4	0	1	0.0003	0.7880	0	9.191	3	4
191	2	8.821	0.30 9	0.00 6	0.01 4	2.12 5	0.24 8	0.10 3	1	1	0.0010	0.7424	0	6.432	1	3
192	0	9.271	0.22 0	0.00 3	0.00 6	3.00 8	0.13 0	0.03 0	3	0	0.0006	0.6973	0	8.429	0	2
193	0	5.833	0.29 7	0.00 3	0.00 6	3.18 9	0.15 4	0.03 2	1	0	0.0002	0.8351	0	13.60 5	0	3
195	2	8.538	0.21 7	0.00 3	0.00 9	2.17 9	0.38 3	0.11 7	1	1	0.0012	0.7221	0	8.063	3	3
196	2	6.393	0.15 1	0.00 3	0.00 5	2.71 3	0.16 8	0.03 8	1	1	0.0007	0.6856	0	8.447	3	3
197	3	9.346	0.26 6	0.00 4	0.01 0	2.56 1	0.17 8	0.05 8	1	1	0.0011	0.6651	0	7.790	3	4
198	0	7.453	0.22 2	0.00 5	0.00 9	2.60 0	0.14 2	0.04 1	0	0	0.0006	0.7007	0	7.358	0	2
199	2	5.051	0.08 5	0.00 1	0.00 2	3.10 3	0.30 3	0.02 9	0	1	0.0001	0.7111	0	12.44 7	1	3
200	3	9.168	0.24 3	0.00 5	0.01 0	2.63 1	0.24 5	0.04 5	3	1	0.0008	0.6398	0	7.185	2	2
202	0	7.965	0.27 6	0.00 4	0.00 8	2.71 3	0.14 8	0.05 1	3	0	0.0005	0.7709	0	10.00 5	0	3

204	2	9.058	0.59 6	0.00 5	0.01 2	2.54 5	0.19 2	0.09 3	1	1	0.0012	0.9369	0	11.36 7	1	3
206	3	8.533	0.53 3	0.00 4	0.00 9	3.33 1	0.23 1	0.03 8	1	1	0.0014	0.7853	0	14.96 4	2	3
207	0	10.817	0.19 9	0.00 3	0.00 8	2.33 8	0.29 0	0.08 5	1	0	0.0010	0.6336	0	7.117	0	2
208	3	6.308	0.34 4	0.00 3	0.00 6	3.10 8	0.15 0	0.04 8	1	1	0.0005	0.7813	0	16.38 2	3	3
209	1	8.410	0.77 7	0.00 7	0.01 9	2.56 8	0.18 6	0.08 6	1	0	0.0005	0.8263	0	11.45 5	1	3
210	0	8.004	0.20 6	0.00 2	0.00 6	2.74 6	0.59 1	0.06 0	1	0	0.0005	0.6923	0	11.31 7	0	2
212	2	8.498	0.24 3	0.00 2	0.00 6	2.85 3	0.36 2	0.06 2	1	1	0.0009	0.7071	0	13.59 0	1	3
213	0	9.540	0.23 2	0.00 2	0.00 6	2.76 8	0.64 4	0.06 9	1	0	0.0015	0.6620	0	11.84 0	0	2
214	3	6.367	0.24 6	0.00 2	0.00 5	2.74 9	0.15 2	0.05 9	0	1	0.0005	0.8714	0	12.94 0	3	3
215	0	10.479	0.24 9	0.00 3	0.00 7	2.86 7	0.53 4	0.04 5	1	0	0.0013	0.7031	0	9.041	1	2
216	2	4.802	0.16 0	0.00 3	0.00 6	2.25 4	0.17 6	0.08 0	1	1	0.0002	0.8524	0	9.046	3	3
217	0	10.067	0.18 7	0.00 4	0.00 9	2.33 1	0.48 0	0.07 1	1	0	0.0009	0.6371	0	6.288	0	2
219	0	8.686	0.16 4	0.00 3	0.00 6	2.44 9	0.46 7	0.07 0	1	0	0.0007	0.6795	0	8.434	1	2
220	1	7.535	0.72 2	0.00 8	0.01 9	2.44 4	0.18 2	0.08 1	1	0	0.0004	0.8900	0	9.813	1	3
221	2	4.248	0.05 0	0.00 1	0.00 2	2.85 4	0.37 0	0.02 0	0	0	0.0001	0.9249	0	7.613	1	3
222	2	6.006	0.22 4	0.00 3	0.00 6	2.81 5	0.31 0	0.04 9	1	1	0.0004	0.7476	0	12.61 2	1	3
223	2	7.374	0.15 3	0.00 2	0.00 4	2.92 2	0.86 7	0.04 0	1	1	0.0006	0.7248	0	10.54 8	3	3
224	0	8.609	0.28 8	0.00 5	0.01 0	2.65 7	0.09 9	0.05 0	1	0	0.0008	0.6813	0	8.893	1	2
225	0	6.003	0.21 9	0.00 2	0.00 4	3.48 4	0.38 9	0.03 5	1	0	0.0007	0.6757	0	19.37 5	0	2
227	0	8.522	0.15 2	0.00 2	0.00 4	2.96 5	0.49 8	0.03 8	1	0	0.0010	0.6826	0	10.28 2	1	2
228a	2	15.344	0.33 0	0.01 7	0.04 2	1.70 2	0.54 5	0.16 8	1	0	0.0012	0.4453	0	2.950	3	3
228b	1	5.316	0.89 0	0.01 7	0.03 1	2.39 3	0.05 2	0.04 7	1	0	0.0003	0.9669	0	9.584	1	3
229	2	6.330	0.32 0	0.00 4	0.00 9	2.61 9	0.23 3	0.06 7	1	1	0.0006	0.7857	0	11.69 3	3	3
230	2	8.999	0.57 9	0.00 4	0.01 1	2.78 9	0.32 9	0.09 8	0	1	0.0011	0.7221	0	16.42 9	3	3
231	0	8.214	0.18 2	0.00 1	0.00 4	3.19 2	0.51 2	0.05 2	1	0	0.0007	0.6469	0	16.89 7	0	2
232	0	7.271	0.11 9	0.00 2	0.00 4	2.86 1	0.56 9	0.03 2	1	0	0.0008	0.7437	0	8.260	0	2
233	0	8.392	0.16 8	0.00 3	0.00 5	3.05 1	0.53 9	0.02 9	1	0	0.0010	0.6973	0	9.594	1	2
234	0	8.951	0.13 6	0.00 2	0.00 5	2.70 3	0.55 6	0.04 6	1	0	0.0012	0.6856	0	8.655	1	2

235	1	6.810	0.76 6	0.01 0	0.02 3	2.43 8	0.09 4	0.06 8	0	0	0.0003	0.8804	0	8.671	1	3
236	1	6.757	0.70 7	0.00 9	0.02 0	2.44 7	0.13 6	0.06 5	1	0	0.0004	0.9269	0	8.557	1	3
238	2	9.115	0.48 1	0.00 7	0.01 5	2.43 7	0.14 9	0.07 3	0	1	0.0009	0.7895	0	8.154	3	3
239	1	6.336	0.28 6	0.00 3	0.00 6	2.95 1	0.55 8	0.04 3	1	0	0.0006	0.8301	0	12.51 6	0	2
241	1	7.962	0.58 4	0.01 0	0.02 4	2.06 0	0.11 3	0.12 0	1	0	0.0007	0.8270	0	6.835	0	3
242	0	5.628	0.20 3	0.00 2	0.00 4	3.22 9	0.43 2	0.04 1	1	0	0.0003	0.6843	0	17.64 6	0	2
243	2	5.061	0.28 0	0.00 3	0.00 7	2.59 2	0.23 1	0.08 5	1	1	0.0004	0.7423	0	15.36 1	3	3
244	2	5.321	0.10 7	0.00 2	0.00 5	2.34 7	0.37 9	0.06 6	1	1	0.0003	0.6349	0	8.481	1	3
248	0	6.516	0.16 3	0.00 2	0.00 5	2.65 4	0.40 8	0.07 5	1	0	0.0004	0.6638	0	13.72 5	0	2
249	0	5.481	0.10 3	0.00 2	0.00 4	2.48 3	0.44 8	0.06 9	1	0	0.0004	0.6243	0	11.02 7	0	2
250	1	8.082	0.27 4	0.00 2	0.00 5	3.02 0	0.59 0	0.04 7	1	0	0.0005	0.8092	0	15.49 7	1	2
251	1	8.170	0.26 7	0.00 2	0.00 5	3.10 1	0.58 9	0.04 0	1	0	0.0010	0.8009	0	12.29 3	1	2
252	0	5.711	0.10 7	0.00 2	0.00 4	2.58 2	0.39 0	0.05 2	1	0	0.0006	0.6946	0	9.563	0	2
255	0	5.902	0.16 6	0.00 2	0.00 4	3.09 1	0.50 0	0.03 1	1	0	0.0003	0.8120	0	11.81 0	0	2
256	0	5.557	0.10 3	0.00 2	0.00 5	2.19 7	0.41 4	0.07 8	1	0	0.0004	0.6779	0	7.688	0	2
257	1	8.562	0.50 0	0.00 9	0.02 1	2.07 5	0.17 5	0.10 7	0	1	0.0009	0.8316	0	6.143	3	3
258	3	7.716	0.14 8	0.00 2	0.00 4	2.84 9	0.40 9	0.05 1	1	1	0.0006	0.6872	0	11.98 6	3	2
259	1	10.701	0.51 2	0.00 7	0.01 1	3.49 0	0.33 1	0.01 8	1	1	0.0011	0.7559	0	8.475	1	3
260	1	6.794	0.28 4	0.00 9	0.01 6	2.13 1	0.20 8	0.05 2	0	0	0.0004	0.8586	0	4.326	1	3
261	0	5.499	0.13 7	0.00 2	0.00 4	2.85 4	0.51 8	0.04 6	1	0	0.0001	0.6879	0	12.74 1	0	2
262	0	6.331	0.06 8	0.00 1	0.00 4	2.35 5	0.63 0	0.08 5	1	0	0.0004	0.5062	0	9.964	0	2
263	2	6.146	0.24 7	0.00 5	0.00 9	2.61 8	0.12 9	0.04 4	0	0	0.0002	0.6918	0	8.428	3	3
265	2	8.813	0.33 1	0.00 6	0.01 3	2.69 9	0.57 8	0.05 3	1	1	0.0011	0.5522	0	9.104	3	3
266	1	6.169	0.16 8	0.00 3	0.00 6	2.58 0	0.53 0	0.04 8	1	0	0.0001	0.7746	0	9.467	1	2
268	1	7.460	0.51 7	0.00 9	0.02 1	2.22 5	0.13 1	0.09 5	1	0	0.0005	0.7392	0	7.838	1	3
270	2	6.528	0.26 1	0.00 5	0.01 0	2.46 5	0.14 8	0.05 6	0	0	0.0003	0.7277	0	8.038	3	3

## Annexe III : Bassin Versant de la Durance

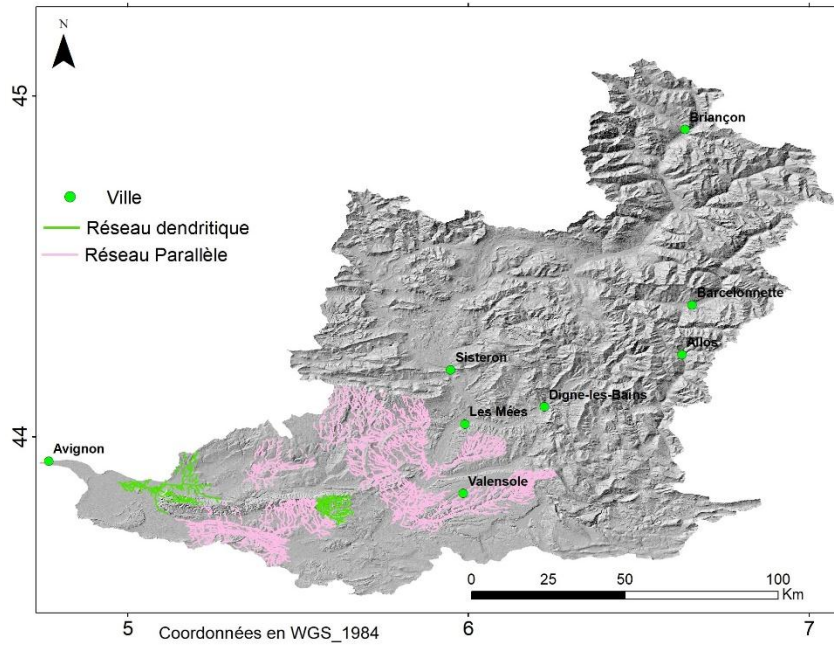


Figure 124: Réseaux de drainages de type dendritiques et parallèles dans le bassin versant de la Durance sur image d'ombrage du MNT

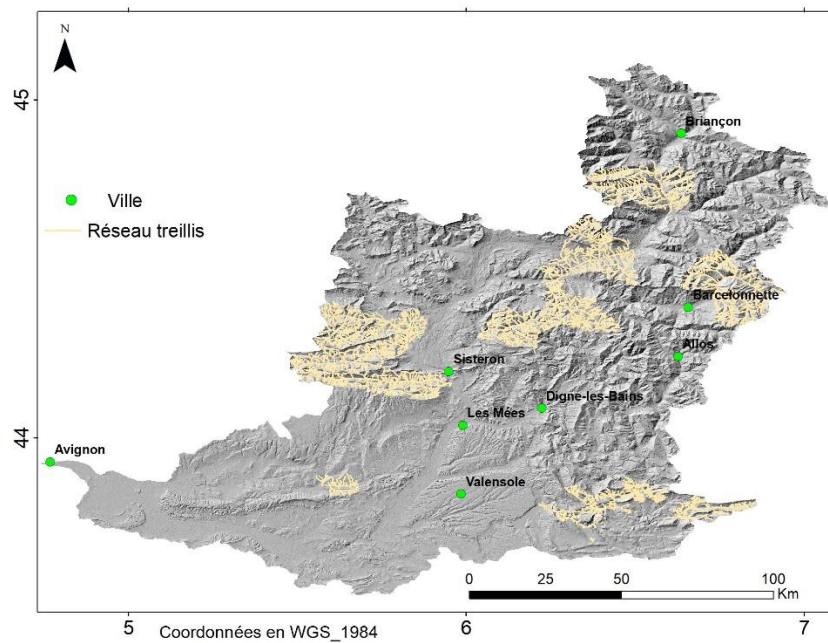


Figure 125 : Réseaux de drainages de type treillis dans le bassin versant de la Durance sur image d'ombrage du MNT

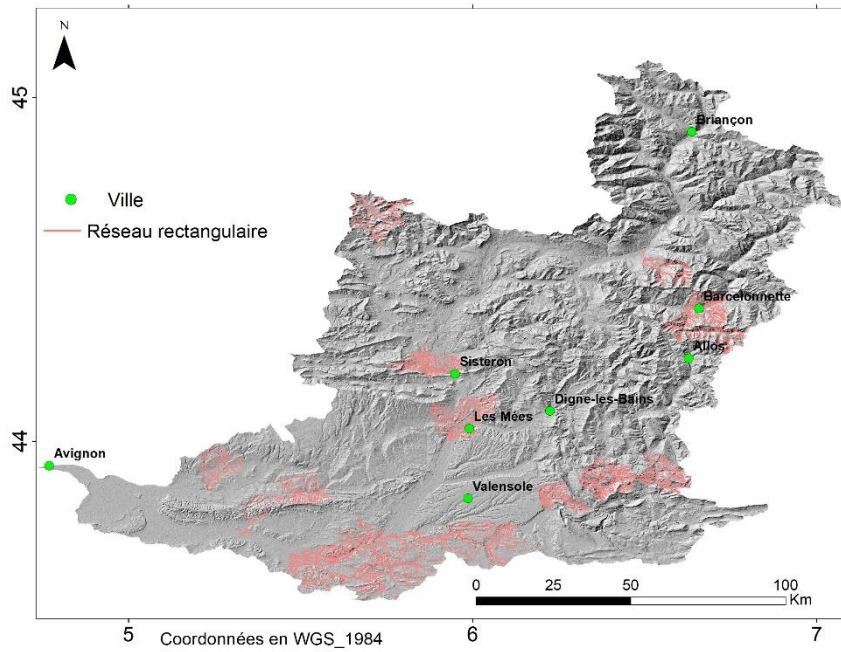


Figure 126 : Réseaux de drainages de type rectangulaires dans le bassin versant de la Durance sur image d’ombrage du MNT

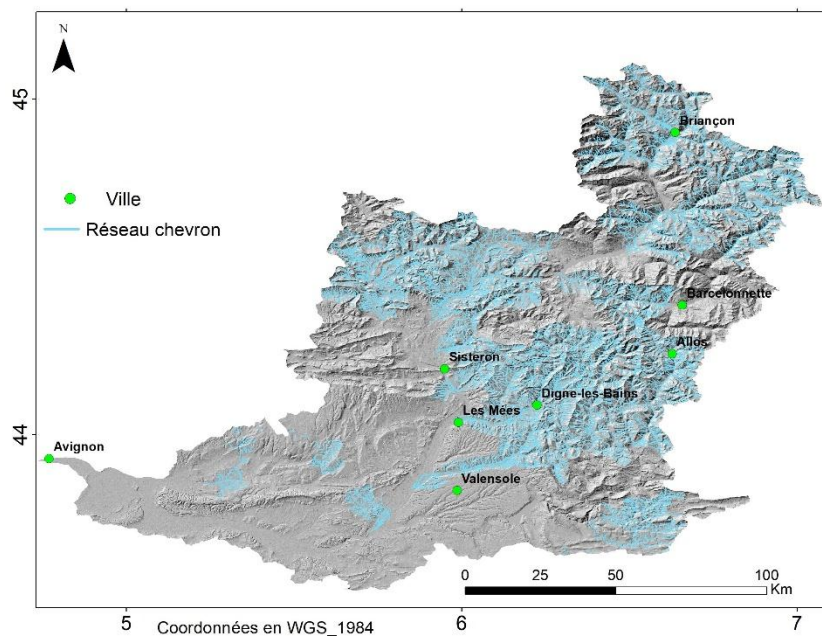


Figure 127: Réseaux de drainages de type chevrons dans le bassin versant de la Durance sur image d’ombrage du MNT



Tableau 33: Base de données des paramètres communs et spécifiques du bassin versant de la Durance

OBJECTID	Type	MEAN-Slope	H	R1	R2	Kg	Cl	Kh	Rock-type	Homogeneity	MEAN-Line	MEAN-DDrain	Landcover	Tc	IDPR	Int-Deform
1	4	15.740	2.323	0.019	0.065	1.392	0.749	0.453	1	1	0.735	2.050	2	3.087	1556.304	1.647
2	2	17.541	1.465	0.013	0.042	1.536	0.614	0.329	3	0	0.605	1.328	2	4.056	1575.426	0.873
3	3	24.889	2.879	0.048	0.169	1.272	0.390	0.618	2	1	0.750	1.361	3	2.390	1280.315	0.208
4	4	9.331	0.749	0.012	0.035	1.820	0.597	0.197	3	0	0.946	0.838	3	7.300	1116.126	0.167
5	3	19.345	1.934	0.024	0.081	1.314	0.692	0.551	2	1	0.855	1.668	4	2.874	1625.644	0.581
6	4	22.256	1.636	0.025	0.072	1.758	0.613	0.218	3	1	0.187	1.456	4	2.857	1599.995	0.503
7	4	28.005	3.227	0.036	0.123	1.347	0.653	0.506	3	1	0.514	1.504	4	2.718	1638.941	0.722
8	1	8.970	2.079	0.028	0.048	1.333	0.775	0.133	2	0	0.154	1.425	3	5.388	1362.960	0.136
9	4	15.107	2.225	0.018	0.053	1.774	0.725	0.213	3	1	1.730	1.739	4	5.021	1485.109	1.066
11	4	24.647	3.552	0.044	0.163	1.218	0.586	0.724	2	1	1.151	1.769	3	2.376	1471.174	0.334
12	2	16.255	1.600	0.011	0.033	1.612	0.639	0.283	3	1	0.522	1.581	4	5.768	1541.844	0.793
13	2	22.413	3.259	0.048	0.154	1.457	0.590	0.390	3	1	1.350	1.432	3	2.887	1304.491	0.609
14	4	23.944	2.331	0.038	0.126	1.410	0.476	0.434	3	1	1.236	1.118	3	3.059	1485.218	0.779
16	4	17.309	2.771	0.023	0.074	1.510	0.780	0.348	3	1	0.665	1.460	4	4.896	1445.225	0.343
17	1	9.515	0.928	0.017	0.052	1.607	0.732	0.286	3	1	0.850	0.927	2	4.372	1252.921	0.446
18	1	11.482	0.859	0.022	0.067	1.578	0.652	0.303	3	1	1.053	0.834	2	3.310	1224.193	0.326
19	4	26.080	3.407	0.036	0.114	1.484	0.513	0.367	2	1	0.813	1.450	3	3.422	1389.066	0.439
20	1	9.892	0.835	0.012	0.043	1.280	0.807	0.605	3	0	0.345	1.293	2	3.512	1191.484	0.528
21	4	24.906	2.035	0.029	0.101	1.329	0.455	0.530	2	1	0.428	1.251	3	2.926	1573.602	0.119
22	1	11.665	1.565	0.012	0.033	2.060	0.756	0.139	3	1	0.624	1.355	2	6.302	1430.483	0.267
23	4	17.574	2.133	0.020	0.063	1.493	0.731	0.360	3	1	0.435	1.499	4	4.371	1434.898	0.575
24	2	25.646	2.652	0.028	0.090	1.451	0.444	0.395	2	1	1.000	1.457	3	3.423	1546.979	0.210
25	4	24.263	1.968	0.031	0.109	1.305	0.619	0.566	3	0	0.301	1.400	3	2.495	1633.621	0.507
26	3	15.365	2.271	0.026	0.083	1.521	0.595	0.340	3	1	1.165	1.832	2	2.756	1489.334	0.664
27	4	17.578	2.076	0.017	0.055	1.487	0.735	0.365	3	1	0.492	1.662	2	3.560	1514.274	0.514
29	3	8.198	0.401	0.006	0.020	1.487	0.263	0.365	3	1	0.422	1.249	2	4.110	1238.168	0.614

30	4	16.49 6	2.36 4	0.01 9	0.06 3	1.36 6	0.76 5	0.48 2	2	1	0.266	1.888	4	4.09 5	1556.82 2	0.508
31	4	31.09 0	3.29 9	0.04 1	0.13 9	1.35 2	0.55 4	0.50 0	4	1	1.167	1.084	3	3.21 6	1314.72 8	0.348
32	2	9.764	0.71 0	0.01 2	0.03 7	1.47 6	0.66 7	0.37 4	1	1	0.118	1.568	2	3.00 1	1524.77 3	0.393
33	3	23.59 4	1.59 4	0.02 6	0.08 6	1.42 5	0.69 4	0.42 0	3	0	0.729	0.982	2	2.61 6	1407.46 8	0.900
34	3	10.66 9	1.90 5	0.04 3	0.16 3	1.18 3	0.89 1	0.80 9	0	1	0.269	2.073	2	1.53 5	1438.61 3	0.079
35	2	20.71 3	2.02 4	0.02 6	0.07 5	1.81 7	0.62 1	0.19 9	3	1	1.566	1.494	4	3.30 7	1389.33 8	0.794
36	3	23.74 1	3.31 0	0.02 5	0.07 9	1.47 4	0.55 4	0.37 5	2	1	1.166	1.726	3	4.15 1	1501.83 9	0.262
37	4	17.78 1	2.58 0	0.01 9	0.05 6	1.66 1	0.73 6	0.25 9	1	1	0.764	1.839	4	4.69 6	1616.53 1	1.479
38	0	9.109	0.61 7	0.00 9	0.02 7	1.64 5	0.77 5	0.26 6	3	1	0.288	0.895	2	5.52 4	1102.49 4	0.247
39	1	8.355	1.16 0	0.01 7	0.04 8	1.79 9	0.84 8	0.20 4	3	1	0.231	1.374	2	4.36 3	1248.12 9	0.448
40	4	8.658	1.01 9	0.01 1	0.03 5	1.45 9	0.70 7	0.38 8	3	1	0.172	1.887	2	3.88 3	1567.16 0	0.461
43	4	13.67 8	2.15 6	0.02 2	0.06 4	1.76 2	0.79 2	0.21 7	3	1	0.616	1.761	2	3.58 7	1496.51 7	0.094
44	3	11.24 4	2.17 1	0.02 7	0.09 5	1.27 4	0.79 7	0.61 5	3	1	0.714	1.863	2	2.78 2	1427.54 5	0.240
45	2	14.92 8	1.33 2	0.01 9	0.05 7	1.64 2	0.74 8	0.26 8	3	1	1.785	1.628	4	3.32 3	1299.31 8	0.950
47	4	11.75 1	0.79 3	0.01 2	0.03 3	1.88 5	0.69 8	0.17 9	3	0	0.948	0.702	4	7.64 1	928.014	0.620
48	3	11.27 4	1.41 4	0.02 1	0.07 7	1.20 3	0.73 4	0.75 7	3	1	0.219	1.584	4	2.65 2	1519.98 9	0.368
49	4	22.46 3	3.17 3	0.03 7	0.11 1	1.65 3	0.53 6	0.26 3	2	0	0.644	1.441	2	3.65 1	1340.46 7	0.288
50	4	8.650	0.89 3	0.01 1	0.03 2	1.90 8	0.74 5	0.17 3	3	1	0.687	0.931	2	6.57 4	1249.89 6	0.378
51	0	10.63 2	1.15 4	0.01 8	0.06 6	1.26 5	0.74 3	0.63 1	3	1	0.324	1.748	2	2.44 4	1552.18 2	0.618
52	4	20.68 7	1.57 2	0.02 8	0.08 9	1.46 3	0.63 0	0.38 4	3	1	0.190	1.289	4	2.69 6	1584.75 9	0.379
53	1	11.16 7	1.08 9	0.01 1	0.03 5	1.54 9	0.42 0	0.32 0	2	0	0.007	1.774	2	3.74 8	1490.98 4	0.130
54	4	27.83 5	3.23 0	0.03 6	0.11 8	1.42 3	0.49 4	0.42 1	3	1	1.217	1.330	3	3.31 3	1370.10 8	0.713
55	4	24.56 4	2.86 0	0.02 8	0.08 5	1.64 2	0.62 2	0.26 8	4	1	1.424	1.181	3	4.61 6	1341.41 9	1.022
56	4	20.33 1	2.64 0	0.03 1	0.10 5	1.34 3	0.54 0	0.51 1	2	1	1.280	1.924	4	2.60 9	1603.31 9	0.708
57	4	22.99 9	3.96 3	0.02 5	0.07 7	1.56 4	0.65 8	0.31 1	3	1	0.755	1.888	4	4.41 1	1624.54 9	0.939
58	4	26.65 4	2.03 9	0.02 8	0.08 9	1.48 4	0.53 0	0.36 7	3	1	0.776	1.165	3	3.30 9	1403.97 5	0.295
59	4	26.81 3	1.85 5	0.02 9	0.09 0	1.49 6	0.40 5	0.35 8	2	1	0.965	1.017	3	3.32 0	1362.61 2	0.153
60	3	13.31 7	0.86 1	0.01 9	0.06 1	1.49 2	0.59 4	0.36 1	3	1	0.250	0.982	2	2.90 8	1293.49 9	0.621

61	4	17.32 2	2.46 1	0.02 5	0.07 9	1.44 9	0.67 0	0.39 7	2	0	0.254	1.751	3	3.88 4	1573.28 0	0.563
62	4	14.89 7	1.27 2	0.02 2	0.07 4	1.31 8	0.68 9	0.54 6	2	0	0.022	1.860	2	1.91 0	1541.58 0	0.355
63	3	13.40 2	2.43 4	0.02 4	0.07 7	1.49 3	0.85 3	0.36 0	1	0	0.588	2.107	2	2.95 6	1383.80 2	0.106
64	2	25.60 2	2.06 7	0.02 4	0.07 1	1.68 5	0.48 9	0.24 8	2	1	0.774	1.111	3	4.24 3	1453.84 2	0.202
65	4	12.11 4	2.52 1	0.02 0	0.06 5	1.44 4	0.77 2	0.40 1	1	1	0.241	1.598	2	4.62 8	1371.25 4	0.422
66	4	21.02 8	2.96 0	0.01 8	0.05 6	1.58 0	0.71 2	0.30 2	3	1	0.835	1.485	2	4.65 5	1517.50 1	0.915
67	1	8.445	1.69 6	0.01 6	0.05 0	1.45 4	0.85 0	0.39 3	3	1	0.196	1.715	2	4.70 8	1408.02 1	0.287
68	3	6.937	0.55 1	0.00 7	0.02 3	1.61 8	0.58 1	0.28 0	3	1	0.647	1.227	4	6.45 8	900.119	0.869
69	4	25.38 3	2.75 7	0.04 0	0.14 3	1.27 0	0.48 4	0.62 3	3	1	1.760	1.407	3	2.54 0	1354.47 2	1.087
70	4	24.11 1	1.67 9	0.02 1	0.06 4	1.63 9	0.45 7	0.26 9	3	1	0.990	0.956	3	4.56 3	1414.26 4	1.250
71	3	7.650	0.60 7	0.01 1	0.03 6	1.42 2	0.70 9	0.42 2	3	0	0.279	1.015	4	5.35 0	985.948	0.635
72	4	25.06 3	2.44 4	0.03 8	0.12 3	1.46 5	0.55 4	0.38 3	3	1	0.959	1.241	3	2.90 6	1375.73 8	0.566
73	2	28.27 1	2.91 0	0.03 2	0.10 3	1.42 4	0.45 7	0.42 0	2	0	0.920	1.256	3	3.49 7	1430.21 6	0.313
74	4	24.32 9	3.15 8	0.02 8	0.08 7	1.53 8	0.59 6	0.32 8	0	1	1.059	1.455	3	4.19 0	1466.10 1	0.388
75	2	20.31 5	1.10 5	0.02 4	0.07 2	1.63 8	0.58 2	0.27 0	3	0	1.025	0.983	4	2.95 1	1066.73 7	0.524
76	4	23.30 8	1.29 0	0.03 3	0.11 1	1.35 7	0.53 6	0.49 3	3	0	0.187	1.119	4	1.99 9	1670.62 5	0.473
78	2	14.95 0	0.62 6	0.01 2	0.03 7	1.62 2	0.75 6	0.27 8	3	1	1.051	0.877	4	4.21 7	1182.96 7	0.806
79	1	12.07 2	1.71 9	0.01 8	0.05 5	1.57 8	0.72 8	0.30 3	3	0	0.743	1.300	2	4.62 8	1349.90 6	0.230
80	2	21.12 3	2.44 8	0.02 2	0.06 8	1.61 9	0.68 4	0.27 9	3	1	1.555	1.911	4	3.43 9	1549.42 1	0.998
81	3	20.60 7	2.44 9	0.02 6	0.10 1	1.16 3	0.62 6	0.86 2	2	1	1.216	2.021	4	2.42 3	1617.35 0	0.554
82	3	8.123	0.73 6	0.01 4	0.04 6	1.35 4	0.75 4	0.49 7	3	0	0.825	1.076	2	3.83 9	1378.27 0	0.158
83	4	22.89 6	3.76 4	0.04 6	0.16 3	1.28 3	0.49 7	0.59 9	2	0	1.107	1.526	3	2.90 7	1424.46 2	0.739
84	4	19.29 2	2.53 6	0.02 3	0.07 7	1.41 1	0.74 5	0.43 3	2	1	0.512	1.619	4	3.84 8	1610.85 2	0.584
85	4	24.40 6	2.75 2	0.02 9	0.09 6	1.39 3	0.54 0	0.45 2	2	1	1.022	1.542	3	3.32 7	1595.14 9	0.210
87	1	7.790	1.05 0	0.00 8	0.02 6	1.56 8	0.74 5	0.30 9	2	0	0.073	1.885	2	5.24 6	1369.43 9	0.171
88	1	10.61 9	2.31 7	0.02 0	0.06 1	1.59 7	0.79 9	0.29 1	3	1	0.459	1.522	2	5.09 1	1345.09 5	0.354
89	1	8.093	1.41 1	0.02 2	0.07 7	1.29 2	0.84 0	0.58 5	1	1	0.289	1.691	2	2.99 9	1304.27 3	0.300
91	3	9.585	1.14 1	0.00 9	0.02 9	1.54 5	0.75 3	0.32 3	3	0	0.887	1.421	4	7.08 9	1149.66 2	0.319

92	3	13.27 7	1.68 1	0.02 7	0.09 8	1.22 5	0.77 9	0.71 0	2	0	0.386	1.862	4	2.48 3	1458.60 3	0.255
93	4	11.40 5	1.15 1	0.00 8	0.02 5	1.72 7	0.61 7	0.23 0	2	0	0.031	1.736	4	6.33 0	1563.55 1	0.137
94	4	23.88 8	2.85 3	0.03 0	0.09 9	1.36 8	0.50 2	0.48 1	2	1	1.026	1.519	3	3.42 1	1587.82 7	0.415
95	2	18.99 3	3.40 3	0.01 6	0.04 5	1.90 4	0.72 5	0.17 4	3	1	0.633	1.459	3	8.68 8	1489.53 1	0.217
96	4	21.62 6	4.33 3	0.02 6	0.07 5	1.84 5	0.77 7	0.19 0	1	1	0.382	1.989	4	4.77 6	1623.64 8	0.875
97	2	19.48 3	2.16 0	0.01 8	0.05 8	1.49 1	0.67 3	0.36 2	3	1	1.079	1.557	2	3.51 1	1549.60 6	0.485
98	4	19.70 2	2.90 9	0.02 7	0.08 1	1.65 6	0.58 3	0.26 1	2	1	0.482	1.729	4	3.85 4	1630.99 8	0.511
99	2	22.74 0	2.46 7	0.02 5	0.08 6	1.29 6	0.56 7	0.57 9	3	1	0.971	1.668	4	3.05 6	1618.92 2	0.970
100	1	9.966	0.78 7	0.01 4	0.04 3	1.60 0	0.61 3	0.29 0	3	0	1.194	0.871	2	4.53 6	1093.11 9	0.192
101	3	7.837	0.79 0	0.00 9	0.02 8	1.43 2	0.74 5	0.41 2	3	0	0.674	1.552	4	5.60 9	1123.81 8	0.161
102	4	19.70 7	2.10 5	0.02 1	0.07 2	1.33 9	0.68 6	0.51 7	2	1	0.664	1.784	4	3.19 3	1607.84 4	0.616
104	3	7.266	0.51 6	0.00 6	0.01 7	1.62 6	0.57 0	0.27 6	3	0	0.789	1.181	4	7.73 3	1008.33 7	0.752

## Annexe IV : Bassin du fleuve Cuanza

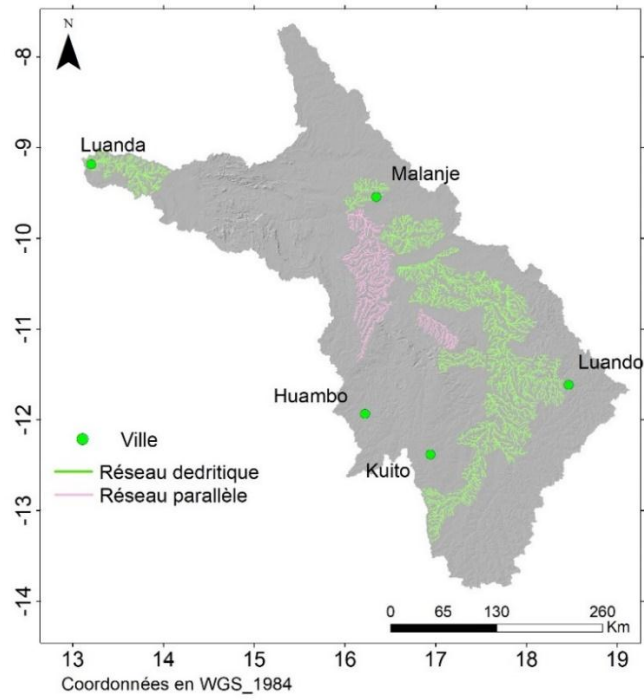


Figure 128: Réseaux de drainages de type dendritiques et parallèles dans le bassin du fleuve Cuanza sur image d’ombrage du MNT

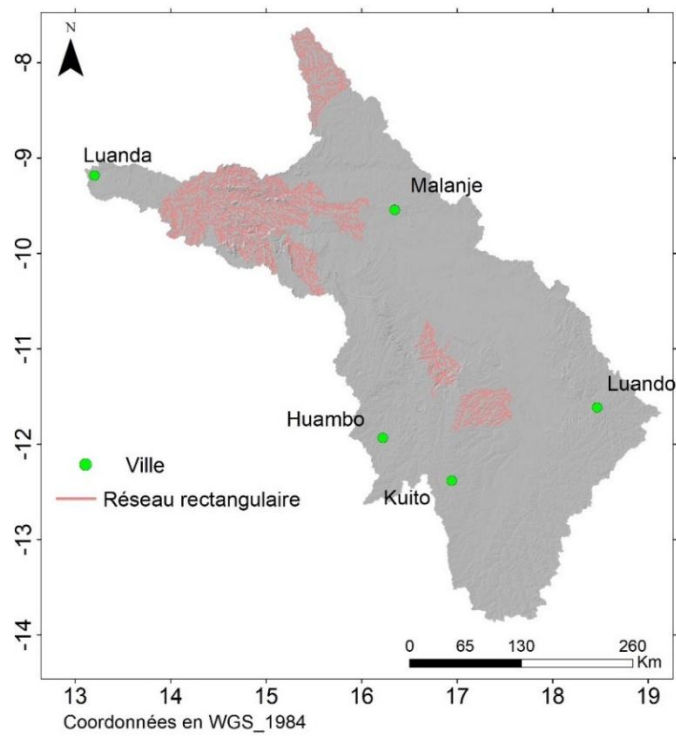


Figure 129: Réseaux de drainages de type rectangulaires dans le bassin du fleuve Cuanza sur image d’ombrage du MNT

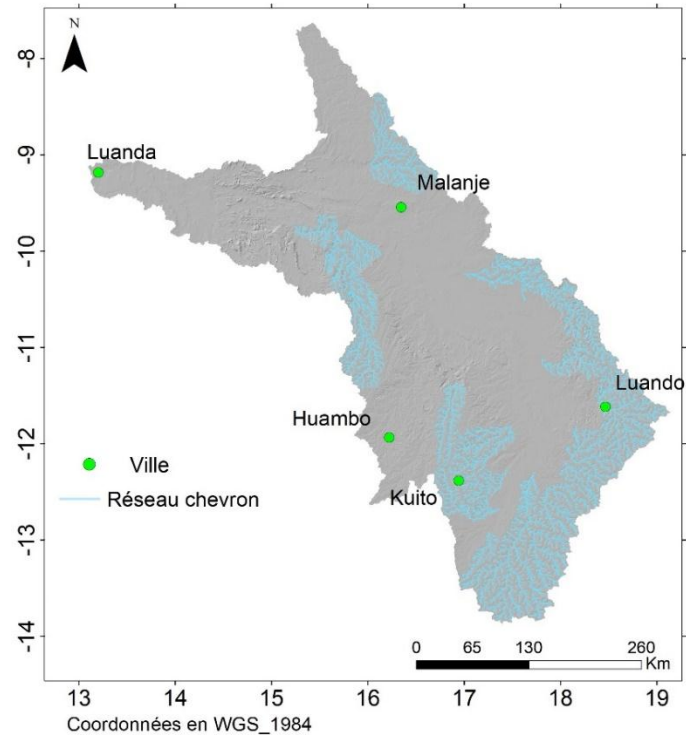


Figure 130: Réseaux de drainages de type chevrons dans le le bassin du fleuve Cuanza sur image d'ombrage du MNT

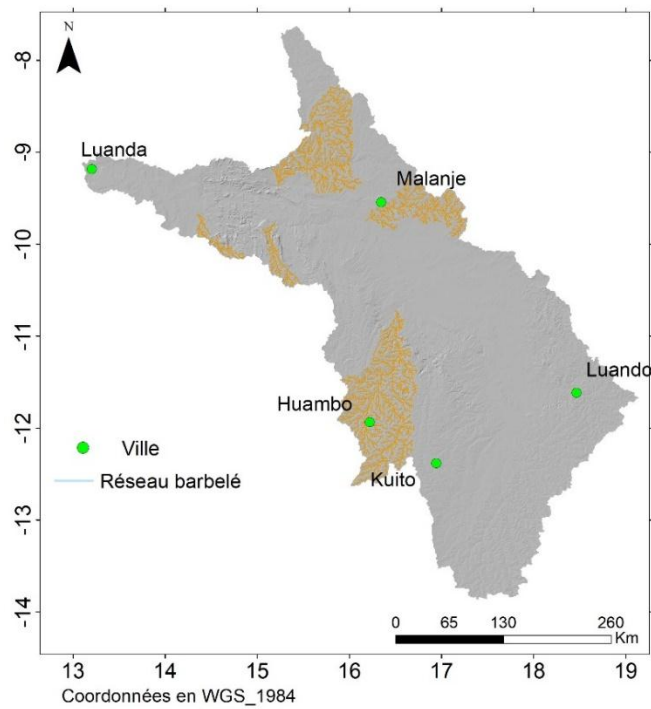


Figure 131: Réseaux de drainages de type barbelés dans le bassin du fleuve Cuanza sur image d'ombrage du MNT

Tableau 34: Base de données des paramètres communs et spécifiques du bassin du fleuve Cuanza

BV	Type	MEAN-slope	H	R2	R1	Kg	Cl	Kh	Rock-type	Homogeneity	MEAN-Line	MEAN-Drain	Landcover	Tc
7	0	2.087	0.043	0.001	0.000	2.547	0.703	0.079	1	0	0.0002	0.1755	3	77.854
17	0	1.728	0.055	0.003	0.001	2.018	0.699	0.148	3	0	0.0003	0.1675	2	36.502
34	0	0.888	0.043	0.002	0.001	2.026	0.718	0.146	0	0	0.0001	0.1990	2	67.853
38	0	1.018	0.039	0.001	0.001	2.644	0.765	0.072	0	0	0.0000	0.1978	2	62.448
39	0	0.815	0.020	0.001	0.000	2.435	0.714	0.089	1	0	0.0000	0.2005	2	60.336
45	0	0.760	0.021	0.001	0.001	2.089	0.814	0.134	0	0	0.0000	0.2120	2	40.894
46	0	1.228	0.057	0.003	0.001	1.987	0.894	0.154	0	0	0.0002	0.2085	2	41.871
49	0	0.724	0.026	0.001	0.000	2.285	0.729	0.105	0	0	0.0000	0.1989	2	71.139
51	0	0.952	0.020	0.002	0.001	2.058	0.794	0.140	1	1	0.0000	0.1959	2	31.747
54	0	2.071	0.067	0.003	0.001	2.556	0.782	0.079	0	0	0.0003	0.1998	2	35.908
55	0	1.068	0.054	0.002	0.001	2.406	0.863	0.092	0	0	0.0001	0.2134	2	52.673
61	0	1.099	0.075	0.002	0.001	2.987	0.831	0.053	0	0	0.0001	0.2193	2	70.752
62	0	1.546	0.077	0.003	0.001	2.574	0.758	0.077	0	0	0.0001	0.2044	2	47.013
69	0	2.959	0.071	0.002	0.001	2.082	0.736	0.135	1	1	0.0005	0.1916	4	48.013
77	0	1.546	0.047	0.002	0.001	2.601	0.722	0.075	0	1	0.0003	0.2028	2	47.779
79	0	2.070	0.060	0.003	0.001	2.161	0.675	0.122	0	1	0.0004	0.1976	3	43.041
80	0	1.131	0.029	0.002	0.001	2.172	0.593	0.121	1	1	0.0002	0.2128	2	33.229
81	0	1.876	0.043	0.003	0.001	2.023	0.704	0.147	1	0	0.0004	0.2004	2	31.048
87	0	1.226	0.045	0.002	0.001	2.172	0.644	0.121	0	1	0.0002	0.2178	2	41.096
89	0	2.401	0.030	0.003	0.001	2.088	0.585	0.134	1	1	0.0005	0.1737	4	25.351
93	0	2.062	0.077	0.003	0.001	2.465	0.702	0.086	0	1	0.0004	0.1968	2	41.602
95	0	1.960	0.058	0.004	0.002	2.175	0.628	0.120	0	0	0.0004	0.1670	2	30.913
23	1	1.241	0.056	0.005	0.002	1.942	0.813	0.164	0	0	0.0002	0.1986	2	24.044
25	1	1.841	0.093	0.004	0.002	2.384	0.834	0.094	0	0	0.0003	0.1973	2	38.882
35	1	1.926	0.140	0.005	0.002	2.054	0.857	0.140	0	1	0.0005	0.2110	2	41.637
41	1	1.431	0.065	0.006	0.002	1.934	0.839	0.166	0	0	0.0003	0.2272	2	21.982
43	1	3.467	0.133	0.006	0.002	2.595	0.509	0.076	0	1	0.0009	0.1875	2	29.454
53	1	3.933	0.139	0.006	0.002	2.633	0.375	0.073	3	1	0.0010	0.1847	2	30.044
57b	1	2.783	0.127	0.006	0.002	2.211	0.589	2.228	0	1	0.0008	0.2001	2	30.416
58	1	2.721	0.130	0.007	0.002	2.061	0.704	0.139	0	0	0.0005	0.2037	4	34.650
1	3	2.636	0.027	0.001	0.000	2.146	0.568	0.125	1	1	0.0003	0.1401	2	41.319
2	3	2.703	0.054	0.004	0.002	2.300	0.741	0.104	3	1	0.0004	0.1428	2	27.614
9	3	8.276	0.198	0.010	0.004	2.122	0.687	0.128	3	0	0.0009	0.1715	6	19.705
10	3	3.132	0.130	0.005	0.002	2.557	0.352	0.079	3	0	0.0006	0.1847	2	30.603
11	3	6.482	0.275	0.007	0.003	2.505	0.542	0.083	3	0	0.0010	0.2113	2	23.566

12	3	2.801	0.075	0.005	0.002	2.225	0.787	0.113	1	1	0.0003	0.1729	4	25.043
13	3	2.947	0.157	0.010	0.004	2.167	0.916	0.121	1	1	0.0005	0.2278	4	20.099
14	3	2.626	0.052	0.003	0.001	2.163	0.784	0.122	1	1	0.0002	0.1788	4	39.202
15	3	4.156	0.222	0.006	0.002	3.200	0.484	0.045	3	0	0.0009	0.2102	2	30.081
18	3	2.262	0.036	0.003	0.001	2.096	0.725	0.133	1	0	0.0002	0.1889	4	23.099
21	3	8.374	0.249	0.010	0.004	2.746	0.592	0.066	3	0	0.0012	0.1929	2	15.304
22	3	1.914	0.086	0.006	0.002	1.928	0.667	0.168	3	0	0.0004	0.1954	2	24.864
24	3	5.521	0.259	0.011	0.004	2.656	0.785	0.071	3	0	0.0007	0.2147	2	17.722
31	3	4.597	0.161	0.007	0.003	2.103	0.618	0.132	3	0	0.0006	0.1882	2	34.007
33	3	7.495	0.242	0.012	0.005	2.384	0.434	0.094	3	0	0.0009	0.1731	2	15.651
56	3	4.379	0.134	0.005	0.002	2.461	0.751	0.087	3	1	0.0008	0.1880	4	40.839
65	3	3.389	0.112	0.005	0.002	2.542	0.379	0.080	0	1	0.0010	0.1885	2	30.131
66	3	2.685	0.119	0.005	0.002	2.064	0.750	0.139	0	1	0.0007	0.2105	2	31.009
4	4	2.117	0.057	0.002	0.001	2.409	0.368	0.092	1	1	0.0003	0.1680	2	46.573
5	4	2.170	0.060	0.002	0.001	2.264	0.518	0.108	1	1	0.0003	0.1674	2	45.875
28	4	2.338	0.114	0.007	0.003	1.862	0.698	0.185	0	0	0.0004	0.1996	6	34.622
29	4	3.327	0.120	0.006	0.002	2.183	0.620	0.119	3	0	0.0006	0.1958	2	36.074
32	4	3.200	0.177	0.003	0.001	2.697	0.368	0.069	3	0	0.0007	0.1681	2	88.781
37	4	1.524	0.067	0.003	0.001	2.525	0.889	0.081	0	1	0.0001	0.1661	2	53.255
42	4	3.479	0.058	0.001	0.001	2.883	0.675	0.058	1	1	0.0006	0.1483	4	70.610
57a	4	2.006	0.106	0.002	0.001	2.734	0.777	2.756	3	1	0.0003	0.2015	2	67.845
60	4	3.376	0.058	0.002	0.001	2.346	0.516	0.098	1	1	0.0007	0.1741	4	42.515
63	4	3.106	0.088	0.004	0.001	2.925	0.181	0.056	0	1	0.0009	0.1612	3	50.368
64	4	3.060	0.087	0.004	0.002	3.168	0.185	0.046	0	1	0.0009	0.1583	3	50.105
67	4	4.255	0.046	0.003	0.001	2.266	0.467	0.108	1	0	0.0009	0.1463	4	32.063
70	4	3.631	0.058	0.003	0.001	2.270	0.363	0.107	1	0	0.0009	0.1760	4	31.509
72	4	3.576	0.049	0.003	0.001	2.363	0.562	0.096	1	0	0.0009	0.1718	4	32.798
73	4	3.544	0.043	0.002	0.001	2.161	0.618	0.122	1	0	0.0007	0.1449	4	38.818
75	4	3.034	0.089	0.005	0.002	2.019	0.477	0.147	0	1	0.0007	0.1837	3	36.073
76	4	2.325	0.085	0.003	0.001	2.735	0.444	0.066	0	0	0.0006	0.1822	3	57.811
82	4	2.737	0.026	0.002	0.001	2.236	0.470	0.112	2	1	0.0008	0.1577	4	36.239
84	4	2.617	0.046	0.003	0.001	2.096	0.535	0.133	1	0	0.0006	0.1512	4	34.588
85	4	2.880	0.044	0.003	0.001	2.175	0.586	0.120	1	0	0.0006	0.1495	4	37.402
86	4	2.209	0.101	0.004	0.002	2.243	0.474	0.111	0	1	0.0005	0.2025	3	47.623
88	4	2.172	0.038	0.002	0.001	2.315	0.637	0.102	1	1	0.0005	0.1866	2	38.331
90	4	3.083	0.044	0.003	0.001	1.970	0.657	0.158	1	1	0.0007	0.1467	4	34.020
91	4	2.456	0.042	0.003	0.001	1.921	0.609	0.169	1	1	0.0006	0.1468	4	32.746
92	4	2.400	0.078	0.003	0.001	2.442	0.314	0.089	0	1	0.0005	0.1673	3	58.462



94	4	2.833	0.034	0.003	0.001	1.874	0.503	0.182	1	1	0.0007	0.1726	4	22.945
96	4	1.856	0.051	0.003	0.001	2.374	0.719	0.095	1	1	0.0004	0.1754	2	35.891
97	4	3.024	0.050	0.003	0.001	1.929	0.665	0.167	1	0	0.0007	0.1383	4	41.160
98	4	2.909	0.031	0.004	0.001	1.883	0.478	0.179	1	1	0.0007	0.1694	2	15.641
99	4	2.977	0.050	0.002	0.001	2.724	0.629	0.067	1	1	0.0007	0.1420	4	47.112
100	4	2.716	0.046	0.003	0.001	2.183	0.575	0.119	1	1	0.0006	0.1457	4	39.948
101	4	2.715	0.051	0.003	0.001	1.963	0.613	0.159	1	1	0.0006	0.1473	4	42.034
3	5	3.151	0.101	0.003	0.001	2.072	0.567	0.137	1	1	0.0004	0.1848	2	48.486
8	5	3.714	0.163	0.004	0.002	2.296	0.408	0.104	3	0	0.0004	0.1870	2	51.898
16	5	4.746	0.046	0.001	0.000	2.627	0.541	0.073	1	1	0.0002	0.1719	2	75.476
20	5	6.398	0.178	0.009	0.004	2.913	0.670	0.057	3	1	0.0005	0.1530	2	19.570
26	5	4.156	0.140	0.007	0.003	2.562	0.534	0.078	3	0	0.0005	0.1504	2	28.641
59	5	3.837	0.150	0.003	0.001	2.535	0.445	0.080	3	0	0.0010	0.1905	2	39.245
68	5	3.130	0.069	0.003	0.001	2.089	0.543	0.134	0	0	0.0007	0.1752	3	41.513
71	5	3.200	0.072	0.002	0.001	2.598	0.431	0.076	0	0	0.0008	0.1639	3	70.878