

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mohamed khider –Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie civil et d'Hydraulique
Référence :/2019



جامعة محمد خيضر بسكرة
كلية العلوم و التكنولوجيا
قسم الهندسة المدنية و الري
المرجع/2019

Mémoire de Master

Spécialité : Hydraulique

Option : Hydraulique Urbaine

Thème :

**Fonctionnement hydrologique des bassins versants
à réseaux hydrographiques différents**

Etudiante:

Nour El Houda BELAZREG

Encadreur:

Pr Abdelkader BENKHALED

Promotion: Juillet 2019

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier, en premier lieu, Allah de m'avoir guidé et donné le courage et la capacité à terminer ce travail. Mes remerciements vont aussi à :

Monsieur Abdelkader BENKHALED de m'avoir fait l'honneur en acceptant de m'encadrer, de m'avoir soutenu par ses conseils tout au long de la période de travail, pour l'appui qu'il m'a accordé et pour son suivi régulier qui a été indispensable à son avancement.

Madame Sonia CHARHABIL et Monsieur Abdelhamid MESSAMAH qui m'ont sans cesse encouragé à terminer ce travail.

Ma chère mère d'être toujours restée à mes côtés et pour son soutien dès le début de mes études.

Mon oncle Rafik Barkat qu'il nous a quitté trop tôt, de m'avoir beaucoup encouragé.

Toute ma famille qui m'a énormément appuyé tout au long de ma carrière et de ma vie.

Ma chère amie Amina pour son aide et son amitié pendant toutes ces années.

RESUME

Les travaux présentés dans ce mémoire ont pour but une meilleure compréhension du fonctionnement hydrologique de quelques bassins versants du Nord-Est Algérien à réseaux hydrographiques différents ; dendritique, parallèle et rectangulaire. Les bassins retenus dans l'étude sont la Medjerda-Mellegue, la Seybouse, le Kebir-Rhumel, le Côtiers Constantinois Est et les Hauts Plateaux Constantinois. L'Analyse en Composantes Principales (ACP) a été appliquée afin de déterminer le degré de dépendance des bassins et les affinités entre leurs caractéristiques. La description géomorphologique a été approchée selon trois étapes i) classification du réseau hydrographique ; ii) tracé de l'arborescence du réseau hydrographique ; iii) identification des chemins d'écoulement possibles. La simulation des débits de crue à l'exutoire, selon les arborescences trouvées, a été effectuée sous le logiciel R et a montré que le bassin 1007, à réseau rectangulaire, a le plus grand débit simulé et le plus grand nombre de nœuds. L'analyse des chroniques des crues nous a permis de constater que le réseau parallèle du bassin Mellègue n'a pas de zones qui engendrent elles-mêmes des débits forts, et c'est pour cette raison que le temps de montée est court. Contrairement aux bassins du Kebir Rhumel et Seybouse, le réseau est suffisamment complexe, de sorte que le temps de montée est long. De plus nous avons pu conclure une forte corrélation entre la géologie sous-jacente et les hydrogrammes de crue.

Mots clés : Fonctionnement hydrologique, Bassin versant, Typologie du réseau hydrographique, Crues, Nord-Est de l'Algérie.

ABSTRACT

Works presented in this thesis were aimed for a better understanding of some Algerian North-East watersheds' hydrological function, with different drainage network patterns ; dendritic, parallel and rectangular. Chosen watersheds are Medjerda Mellegue, Seybouse, Kebir Rhumel, Coastal Constantine and the Constantine Highlands. Principal Components Analysis (PCA) was applied to determine the dependance degree of watersheds and the affinity between their characteristics. The geomorphological description has been done through three steps i) classification of drainage networks ii) tracing of network tree iii) identification of possible flow paths. The simulation of flood discharges in the outlets, based on network trees found, has been realized using R program and has showed, as a result, that the watershed 1007 has the big flood discharge and the large number of nodes. Chronics analysis of floods helped us remarking that Mellegue watershed's parallel network hasn't zones that generate itselfes high flood discharges, and for this reason, the rise time is short. In contrary to Kebir Rhumel and Seybouse watersheds, drainage network is complex enough with a long rise time. In addition, we were able to conclude high correlation between underlying geology and floods hydrographs.

Keywords : Hydrological function, Watershed, Drainage network typology, Floods, Algerian North-East

TABLE DES MATIERES

Liste des figures	V
Liste des tableaux	IX
Introduction générale.....	1

PREMIERE PARTIE : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE 1 : PROCESSUS HYDROLOGIQUES

1.1.	Introduction	4
1.2.	Considérations générales sur le bassin versant.....	4
1.2.1.	Définition du bassin versant.....	4
1.2.2.	Caractéristiques du bassin versant.....	6
1.2.2.1.	Caractéristiques physiographiques	6
1.2.2.2.	Caractéristiques agro-pédo-géologiques	10
1.3.	Processus hydrométéorologiques participés à la génération des crues dans un bassin versant	12
1.4.	Réponse hydrologique et formation des crues	16
1.4.1.	Fonction de production	17
1.4.2.	Fonction de transfert	17
1.4.3.	Caractéristiques d'une crue	18
1.5.	Conclusion	20

CHPITRE 2 : GEOMORPHOLOGIE ET TYPLOGIE DES RESEAUX HYDROGRAPHIQUES

2.1.	Introduction	21
2.2.	Aspects géomorphologiques	21
2.2.1.	Lit du cours d'eau.....	21
2.2.2.	Dimensions du cours d'eau	22
2.2.2.1.	Tracé en plan	22
2.2.2.2.	Profil en long.....	25
2.2.2.3.	Profil en travers	25
2.3.	Réseau hydrographique	26
2.3.1.	Définition du réseau hydrographique	26
2.3.2.	Caractéristiques du réseau hydrographique.....	27

2.3.2.1.	Densité de drainage	27
2.3.2.2.	Texture de drainage	27
2.3.2.3.	Endoréisme	28
2.3.3.	Classification des réseaux hydrographiques	28
2.3.3.1.	Selon l'ordre des cours d'eau	28
2.3.3.2.	Selon la structure du réseau hydrographique	29
2.4.	Typologie des réseaux hydrographiques	30
2.4.1.	Historique	30
2.4.2.	Classifications descriptives du réseau hydrographique	33
2.4.2.1.	Dendritique	33
2.4.2.2.	Parallèle	34
2.4.2.3.	En treillis	36
2.4.2.4.	Rectangulaire	37
2.4.2.5.	Radial	37
2.4.2.6.	Annulaire	38
2.4.2.7.	Multi-bassins	38
2.4.2.8.	Contourné	39
2.5.	L'angle de jonction (de confluence) des cours d'eau	43
2.6.	Influence de la structure du réseau hydrographique sur la réponse hydrologique	44
2.7.	Techniques de la télédétection spatiale	45
2.8.	Conclusion	46

CHAPITRE 3 : METHODES D'ANALYSE REGIONALE EN HYDROLOGIE

3.1.	Introduction	47
3.2.	Méthodes empiriques	47
3.2.1.	Méthodes des courbes enveloppes	47
3.2.2.	Méthode de classification des crues maximales de Francou-Rodier.....	48
3.3.	Méthodes de statistique multivariée	48
3.4.	Méthodes de régionalisation.....	49
3.4.1.	Régionalisation par régression linéaire multiple	49
3.4.2.	Proximité spatiale	49
3.4.3.	Similitude physique	49

3.5.	Conclusion.....	50
------	-----------------	----

DEUXIEME PARTIE : TRAITEMENT DES DONNEES

CHAPITRE 4 : PRESENTATION DE LA ZONE D’ETUDE

4.1.	Introduction	52
4.2.	Contexte général de la zone d’étude.....	52
4.2.1.	Bassin des Côtiers Constantinois (03)	54
4.2.2.	Bassin des Hauts Plateaux Contantinois (07)	55
4.2.3.	Bassin du Kebir-Rhumel (10)	55
4.2.4.	Bassin de la Medjerda-Mellegue (12)	56
4.2.5.	Bassin de la Seybouse (14)	57
4.3.	Contexte hydro-géomorphologique et climatique.....	58
4.3.1.	Altitudes	58
4.3.2.	Pentes	58
4.3.3.	Lithologie	59
4.3.4.	Occupation du sol.....	60
4.3.5.	Climat	61
4.3.6.	Précipitations	62
4.4.	Contexte hydrographique	63
4.4.1.	Endoréisme.....	63
4.4.2.	Longueur du cours d’eau.....	64
4.4.3.	Nature du cours d’eau.....	64
4.4.4.	Ordre du cours d’eau	65
4.4.5.	Type de drainage	66
4.5.	Conclusion.....	66

CHAPITRE 5 : FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE DES BASSINS VERSANTS A RESEAUX HYDROGRAPHIQUES DIFFERENTS

5.1.	Introduction	67
5.2.	Programmation en R.....	67
5.2.1.	Historique	67
5.2.2.	Description sommaire de R	67

5.2.3.	Packages de R.....	68
5.2.4.	Importation des fichiers.....	69
5.3.	Application de la méthode ACP pour le choix des bassins de différentes structures du réseau hydrographique	69
5.3.1.	Choix du nombre de facteurs ou de composantes principales.....	70
5.3.2.	Construction des nuages de points projetés	72
5.3.2.1.	Graphique des variables	72
5.3.2.2.	Graphique des individus.....	75
5.4.	Effet de la structure des réseaux hydrographiques sur les débits à l'exutoire.....	77
5.4.1.	Bassins versants.....	78
5.4.2.	Description géomorphologique des réseaux hydrographiques.....	79
5.4.2.1.	Classification des cours d'eau	79
5.4.2.2.	Tracé de l'arborescence du réseau hydrographique et identification des chemins d'écoulement possibles	81
5.4.3.	Simulation des débits écoulés à l'exutoire	87
5.5.	Analyse des chroniques des crues	99
5.5.1.	Situation des stations hydrométriques.....	99
5.5.2.	Présentation de la chronique des crues par bassin.....	99
5.5.3.	Description statistique de la chronique	101
5.5.4.	Analyse des chroniques des débits de crues.....	102
5.6.	Conclusion.....	106
	Conclusion générale	110
	Références bibliographiques	114

LISTE DES FIGURES

Figure 1	Le bassin versant ou le bassin de drainage schématisé par Charlton (2008)	5
Figure 2	Limites hydrogéologiques et hydrographiques, Balek et al. (1989)	6
Figure 3	Indice de compacité de Gravelius et forme des bassins (d'après Musy et Higy, 2004)	7
Figure 4	Différentes formes de la courbe hypsométrique (Ann, 2008)	8
Figure 5	Courbes hypsométriques caractéristiques du cycle de l'érosion d'après Strahler (1952) et profil d'un cours d'eau dans un bassin versant. (Ann, 2008 ; Tiré de Llamas (1985), Champoux et Toutant (1988))	9
Figure 6	Schéma de la phase terrestre du cycle de l'eau (Roche, 1971)	13
Figure 7	Ecoulement de subsurface par macropores (d'après Lavabre, bassin du mont Lozère in Graff, 2004)	16
Figure 8	Principe de la réponse hydrologique d'un bassin versant (Legout, 2005)	17
Figure 9	Transformation de la pluie en hydrogramme de crue (Le Clerc, 2004)	18
Figure 10	Caractéristiques d'une crue (Souanef, 2015)	19
Figure 11	Relation entre l'hyétogramme et l'hydrogramme de crue (Charlton, 2008)	19
Figure 12	Différentes formes d'hydrogrammes de crue (Hachemi, 2017)	20
Figure 13	Cours d'eau rocheux et cours d'eau alluvial.....	22
Figure 14	Types de cours d'eau alluviaux (Bravard et Petit, 1997)	23
Figure 15	Configuration d'un méandre	24
Figure 16	Profil en long d'un cours d'eau.....	25
Figure 17	Profil en travers d'un cours d'eau.....	26
Figure 18	Les textures de drainage suggérées par (Kadir, 2005). De gauche à droite, la texture fine, moyenne (medium) et grossière (coarse)	27
Figure 19	(a) Classification de Horton et (b) classification de Schumm in Dubreuil (1974)	29
Figure 20	Classification du réseau hydrographique (Faregh, 2018)	29
Figure 21	Réseau de drainage dendritique (arborescent), est le réseau le plus connu. (F) est un réseau de texture fine, et (C) est d'une texture grossière (Kadir, 2005)	33
Figure 22	Réseau hydrographique penné (Mejia et Niemann, 2008)	34
Figure 23	Réseau hydrographique parallèle (Mejia et Niemann, 2008)	35
Figure 24	Un réseau parallèle à gauche et subparallèle à droite (Kadir, 2005)	35

Figure 25	Réseau de drainage en treillis (Mejia et Niemann, 2008)	36
Figure 26	Réseau hydrographique rectangulaire (Mejia et Niemann, 2008)	37
Figure 27	Vue aérienne de réseaux de base (Radisics, 2018)	40
Figure 28	Classification de Howard (1967)	41
Figure 29	Classification descriptive détaillée (Deffontaines, 1990) du réseau hydrographique proposée par Howard (1967) : A) types de base de réseaux hydrographiques ; B) types modifiés de réseaux hydrographiques	42
Figure 30	Différents cas des cours d'eau s'écoulant vers le cours d'eau principal en un point de jonction (Zhang et Guilbert, 2013)	44
Figure 31	Exemple d'une photographie aérienne utilisée dans l'interprétation et l'identification du type du réseau de drainage (Parvis, 1950)	45
Figure 32	Variation du débit spécifique (de pointe) en fonction de la superficie du bassin versant (a) selon la localisation du bassin versant (b) la nature de la mesure (Ancy, 2012)	47
Figure 33	Représentation de la classification des crues dans le bassin versant (d'après Bois, 2000)	48
Figure 34	Découpage de l'Algérie en régions hydrographiques (PNE 2010).....	52
Figure 35	Bassins versants de la région Constantinois-Seybouse-Mellegue du Nord-Est de l'Algérie.....	53
Figure 36	Délimitation des sous bassins-versants (ABH-CSM, 2011 ; Abdeddaim, 2018)	53
Figure 37	Réseau hydrographique du bassin des Côtiers Constantinois (Abdeddaim, 2018).....	55
Figure 38	Réseau hydrographique des Hauts Plateaux Constantinois (Abdeddaim, 2018)	55
Figure 39	Réseau hydrographique du bassin du Kebir Rhumel (Abdeddaim, 2018)	56
Figure 40	Réseau hydrographique du bassin de la Medjerda Mellegue (Abdeddaim, 2018)	57
Figure 41	Réseau hydrographique du bassin de la Seybouse (Abdeddaim, 2018)	57
Figure 42	Carte altimétrique (BNEDER, 2010 ; Abdeddaim, 2018)	58
Figure 43	Carte des pentes (BNEDER, 2010 ; Abdeddaim, 2018)	59
Figure 44	Carte lithologique (BNEDER, 2010 ; Abdeddaim, 2018)	60
Figure 45	Carte d'occupation du sol (BNEDER, 2010 ; Abdeddaim, 2018)	61
Figure 46	Carte Climatologique (BNEDER, 2010 ; Abdeddaim, 2018)	62

Figure 47	Cartes des précipitations annuelles (BNEDER, 2010 ; Abdeddaim, 2018)	63
Figure 48	Bassins versants endoréiques et exoréiques de la région d'étude (Abdeddaim, 2018)	64
Figure 49	Réseaux hydrographiques selon la longueur du cours d'eau (Abdeddaim, 2018)	64
Figure 50	Réseaux hydrographiques selon la nature du cours d'eau (Abdeddaim, 2018)	65
Figure 51	Réseaux hydrographiques selon l'ordre du cours d'eau (Abdeddaim, 2018)	65
Figure 52	Réseaux hydrographiques selon le type de drainage (Abdeddaim, 2018)	66
Figure 53	Console et fenêtre de script sous Windows	68
Figure 54	Charger, Installer ou mettre à jour les Packages de R	68
Figure 55	Scree plot	72
Figure 56	Cercle de corrélation des variables	73
Figure 57	Contribution des variables	74
Figure 58	Cercle de corrélation des individus.....	75
Figure 59	Contribution des individus.....	76
Figure 60	Biplot variables-individus.....	77
Figure 61	Sous bassin versant retenus.....	78
Figure 62	Classification des cours d'eau du SBV 1007 et 1406 (Abdeddaim, 2018).....	79
Figure 63	Classification des cours d'eau des bassins 1201, 1203 et 1204 (Abdeddaim, 2018).....	80
Figure 64	Arborescence et Chemins d'écoulement possibles du sous bassin 1007.....	82
Figure 65	Arborescence et Chemins d'écoulement possibles du sous bassin 1201	83
Figure 66	Arborescence et Chemins d'écoulement possibles du sous bassin 1203.....	84
Figure 67	Arborescence et Chemins d'écoulement possibles du sous bassin 1204.....	85
Figure 68	Arborescence et Chemins d'écoulement possibles du sous bassin 1406.....	86
Figure 69	Illustration d'une simulation du débit écoulé	88
Figure 70	Résultat de simulation des zones correspondant au sous bassin 1007.....	89

Figure 71	Résultat de la simulation du débit à l'exutoire du sous bassin 1007	90
Figure 72	Résultat de la simulation du débit à l'exutoire du sous bassin 1201	91
Figure 73	Résultat de simulation des zones correspondant au sous bassin 1203.....	92
Figure 74	Résultat de la simulation du débit à l'exutoire du sous bassin 1204	93
Figure 75	Résultat de simulation des zones correspondant au sous bassin 1406.....	94
Figure 76	Résultat de la simulation du débit à l'exutoire du sous bassin 1406	95
Figure 77	Carte des précipitations du sous bassin 1007 (Abdeddaim, 2018)	96
Figure 78	MNT du bassin versant de la Seybouse (14) (Abdeddaim, 2018)	97
Figure 79	Carte des pentes et des précipitations du sous bassin 1406 (Abdeddaim, 2018)..	97
Figure 80	MNT du bassin versant de la Medjerda-Mellegue (12) (Abdeddaim, 2018).....	98
Figure 81	Carte de pentes et des précipitations du bassin de la Medjerda-Mellegue (12) (Abdeddaim, 2018).....	98
Figure 82	Situation des stations hydrométriques des bassins 10, 12 et 14 (ANRH).....	99
Figure 83	Chroniques des crues des sous bassins étudiés	100
Figure 84	Box plot des chroniques des crues des sous bassins 1007, 1204 et 1406	102
Figure 85	Hydrogrammes de crues des bassins : (a) Bassin de la Seybouse ; (b) Bassin du Mellegue ; (c) Bassin du Kebir-Rhumel	103
Figure 86	Crues idéales : (a) Bassin du Kebir Rhumel , (b) Bassin de la Medjerda Maellgue, (c) Bassin de la Seybouse	104
Figure 87	Réseaux de drainage avec les caractéristiques géologiques (Kavvas, 2015).....	106
Figure 88.a	Direction des flux des écoulements superficiels du sous bassin Kebir Rhumel (a) 1007	107
Figure 88.b	Direction des flux des écoulements superficiels du sous bassin Seybouse (b) 1406	108
Figure 88.c	Direction des flux des écoulements superficiels du sous bassin Mellegue (c) 1204	109

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1	Codes, noms des bassins versants et nombres des sous bassins versants, de la région Nord-Est d'Algérie	54
Tableau 2	Valeurs des descripteurs des sous bassins versants.....	69
Tableau 3	Statistiques	70
Tableau 4	Matrice de corrélation	70
Tableau 5	Valeurs propres de l'ACP	71
Tableau 6	Noms, codes des sous bassins et type de drainage des réseaux hydrographiques.....	78
Tableau 7	Résultats de la simulation	96
Tableau 8	Statistiques des débits de crues (en gras les paramètres remarquables).....	101
Tableau 9	Valeurs moyennes de la dynamique des crues observées sur les sous bassins considérés	105

INTRODUCTION GENERALE

L'Algérie est soumise aux inondations qui se manifestent de façon catastrophique. Selon les services de la protection civile, une commune sur trois est susceptible d'être inondée en partie ou en totalité, par conséquent la réduction des risques est devenue une préoccupation majeure pour toutes les grandes organisations internationales. Depuis quelques décennies le rythme des inondations s'est accéléré et devient potentiellement plus dangereux et plus dévastateur.

L'étude du fonctionnement hydrologique des bassins versants est d'une importance majeure, car elle aide à mieux comprendre les phénomènes aléatoires engendrés au niveau du bassin versant. Ces processus font intervenir l'ensemble du système constitué par l'eau, le sol, la végétation, la pente et le climat. Ils sont en général décrits sur l'entité géomorphologique que constitue le versant. Parmi les facteurs qui déterminent la réponse hydrologique d'un bassin versant, la structure du réseau hydrographique. L'agencement du réseau hydrographique est fondamental pour considérer le chemin et le temps de transit depuis les zones sources vers l'exutoire.

La caractérisation des chemins ou voies d'écoulement s'appuie fortement sur la classification (ou schématisation) du réseau hydrographique proposée initialement par Horton en 1945 puis modifiée par Strahler (1957). Cette classification est très importante puisqu'elle reflète la ramification du réseau hydrographique. Plusieurs hydrologues comme Zernitz (1932) et Howard (1967) ont bien détaillé la typologie des réseaux hydrographiques. Ils ont conclu qu'elle permet d'expliquer de manière significative la crue, et que des réseaux hydrographiques différents engendraient des crues différentes.

L'impact du réseau hydrographique sur la réponse hydrologique a été mis en évidence par plusieurs chercheurs dans le monde et en région méditerranéenne en particulier (Mebarki, 2005 ; Zhang et Guilbert, 2012 ; Menad, 2012. Jung et al. 2015 ; Abdeddaim, 2018). Abdeddaim (2018) a investigué dans la région du Nord-Est de l'Algérie, la typologie des réseaux hydrographiques et son influence sur la réponse hydrologique.

Le travail présenté dans ce mémoire s'inscrit dans le cadre des travaux de recherche, menées par l'équipe hydrologie du laboratoire LARHYSS. Il permet de donner des éléments de réponse à cette problématique, en analysant différentes structures du réseau hydrographique de quelques bassins versants du Nord-Est de l'Algérie. Le choix a été porté sur les descripteurs du bassin versant les plus significatifs et les plus performants.

Cette étude a pour objectif de mieux comprendre la dynamique des processus induits par la structure du réseau hydrographique et la morphologie du bassin en général pour générer des crues à l'exutoire.

Nous avons adopté pour cela, une démarche multidisciplinaire, où l'on a utilisé l'outil statistique et informatique. . Ainsi le logiciel R version 3.4.3 a été utilisé pour la réalisation de l'Analyse en Composantes Principales (ACP) et la simulation des débits écoulés à l'exutoire de plusieurs formes du réseau hydrographique.

Afin de répondre à l'objectif du mémoire, nous avons conçu deux parties, l'une bibliographique et l'autre une analyse de données. Le mémoire est structuré en cinq chapitres :

Le chapitre 1 est une synthèse bibliographique sur les différents concepts concernant les processus hydrologiques, les écoulements superficiels et souterrains et la réponse hydrologique à l'exutoire dans un bassin versant.

Le chapitre 2 détaille les réseaux hydrographiques, leurs types de base et de modification de base ainsi que l'influence du changement de la structure sur la forme de l'hydrogramme de crue.

Le chapitre 3 comprend des généralités sur les méthodes d'analyse régionale en Hydrologie.

Le chapitre 4 est une présentation générale de la région d'étude avec une délimitation des bassins et des sous bassins versants, des cartes propres à la région (lithologique, des précipitations, des pentes..) et toutes les caractéristiques du réseau hydrographique de la région.

Le chapitre 5 est la contribution propre du mémoire. Une application de l'ACP est faite, sous R, pour obtenir une représentation plus pertinente des données initiales (bassin versant et caractéristiques des bassins versants).. Une simulation des écoulements de crue, à l'exutoire des bassins versants considérés, est également réalisée, sous R, après avoir identifié les chemins d'écoulement possibles. Enfin une analyse des chroniques des crues est effectuée de manière à comprendre la dynamique des processus induits par la structure du réseau hydrographique.

En fin une conclusion est apportée pour synthétiser les différents résultats obtenus à l'issue de cette étude.

PREMIERE PARTIE : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Chapitre 1 : Processus hydrologiques

Chapitre 2 : Géomorphologie et typologie des réseaux hydrographiques

Chapitre 3 : Méthodes d'analyse régionale en Hydrologie

1. Processus hydrologiques

1.1. Introduction

L'hydrologie est la science qui s'occupe de la présence et de la distribution des eaux sur la terre, y compris les propriétés chimiques et physiques de l'eau et leurs interactions avec l'environnement (Balek et al., 1989).

D'un point de vue historique, elle fut d'abord rattachée aux sciences géographiques, plus tard, elle devint un domaine spécialisé des sciences géophysiques. Vers la fin du 19^{ème} siècle, des méthodes spécifiques furent développées pour l'élaboration de divers types de travaux de génie civil et une nouvelle approche fut créée, " l'hydrologie de l'ingénieur". L'hydrologie fait appel à des nombreuses sciences et sa particularité essentielle réside dans sa multidisciplinarité (Ann, 2008).

L'objectif de ce premier chapitre est donc de présenter brièvement quelques aspects liés à notre étude.

1.2. Considérations générales sur le bassin versant

La pratique de l'hydrologie requiert la détermination d'un domaine d'étude, soit, le plus souvent, un ou plusieurs bassins versants, et met en évidence ses principaux facteurs dont dépend la réponse hydrologique du bassin.

1.2.1. Définition du bassin versant

La notion du bassin versant est plus complexe qu'elle n'y paraît au premier abord. D'après :

- Roche (1963), le bassin versant ou bassin de drainage d'une rivière considérée en un point donné de son cours, est l'aire limitée par le contour à l'intérieur duquel l'eau précipitée se dirige vers ce point de la rivière. Si le sol est imperméable, il est bien évident que les limites du bassin sont définies topographiquement par la ligne de crête le séparant du bassin voisin (bassin topographique).
- Balek et al. (1989), un bassin versant est défini par les limites et ligne de partage des eaux de surface qui séparent la surface qui se draine vers l'exutoire considéré (surface de drainage) des surfaces qui s'écoulent vers d'autres exutoires.

- [Musy et al. \(2004\)](#), le bassin versant représente l'unité spatiale de référence pour l'hydrologie. Il est défini comme l'étendue drainée par un cours d'eau et ses affluents est limitée par une ligne de partage des eaux.
- [Anctil et al. \(2005\)](#), le bassin versant est une région qui possède un exutoire commun pour ses écoulements de surface. C'est l'équivalent d'un réservoir délimité de telle façon que toutes les précipitations qu'il reçoit contribuent au débit à cet exutoire.
- [Charlton \(2008\)](#), chaque rivière s'écoule dans une région que l'on appelle un bassin de drainage, qui fournit au canal de l'eau et des sédiments. Elle est délimitée par des berges (semblable à une crête de montagne). L'exutoire, où le cours d'eau principal quitte le bassin, correspond au point le moins élevé de tout le bassin versant (figure 1).

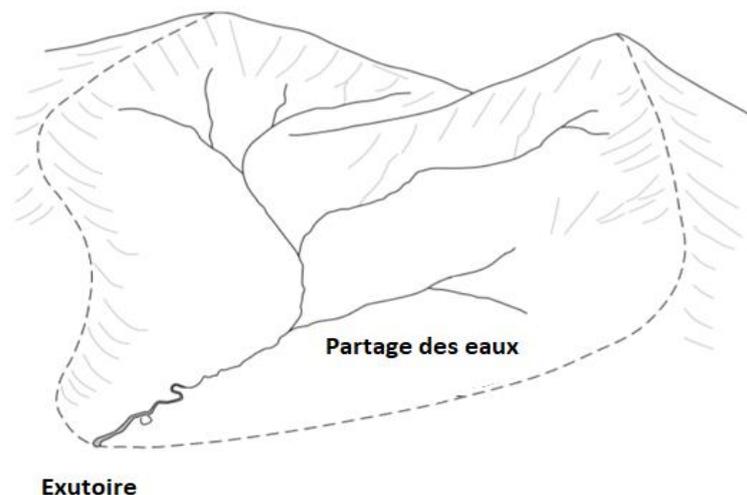


Figure 1. Le bassin versant ou le bassin de drainage schématisé par [Charlton \(2008\)](#)

Il est toutefois plus fréquent de choisir pour exutoire un site de mesure de débit, c'est-à-dire un endroit où il y a une station hydrométrique.

Chaque bassin versant se subdivise en un certain nombre de bassins élémentaires (sous-bassins versants) correspondant à la surface d'alimentation des affluents se jetant dans le cours d'eau principal et chaque bassin versant est séparé des bassins versants voisins par une ligne de partage des eaux.

Si le sous-sol est imperméable, le cheminement de l'eau ne sera déterminé que par la topographie et le bassin versant sera limité par les lignes de crête. On dit c'est un bassin versant topographique. Dans le cas d'une région au sous-sol perméable, il se peut qu'une partie des eaux s'infiltrent puis sorte du bassin sous forme des eaux souterraines (figure 2). On dit donc c'est un bassin versant hydrogéologique ([Laborde, 2000](#)).

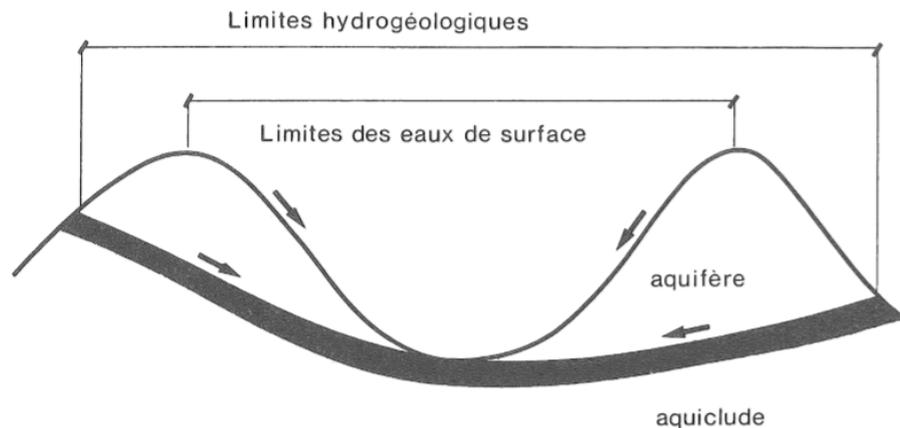


Figure 2. Limites hydrogéologiques et hydrographiques (Balek et al., 1989)

1.2.2. Caractéristiques du bassin versant

Puisque ces caractéristiques ont un effet certain sur le cheminement de l'eau et sur la réponse hydrologique, les hydrologues ont développé au fil des ans une gamme d'indices et de paramètres qui permettent de comparer plusieurs bassins versants entre eux. Ces paramètres s'estiment aisément à partir des cartes adéquates ou en recourant à des techniques et modèles numériques. Musy et al. (2004) divisent les caractéristiques du bassin en caractéristiques physiographiques et agro-pédo-géologiques.

1.2.2.1. Caractéristiques physiographiques

La physiographie décrit la variation spatiale des caractéristiques physiques d'un bassin versant ayant une incidence hydrologique. Les premiers travaux de Horton ont permis des progrès significatifs par le biais d'analyses statistiques visant à déterminer quels étaient les facteurs physiographiques les plus corrélés avec la réponse hydrologique. En 1945, ce sont aussi les travaux de Horton qui donnent naissance à la théorie de la morphologie par le biais de l'étude du réseau hydrographiques.

1.2.2.1.1. Superficie

C'est-à-dire l'aire circonscrite par la ligne de partage des eaux. Il est un paramètre hydrologique incontournable puisque la quantité d'eau drainée est proportionnelle au bassin. La surface du bassin peut être mesurée par superposition d'une grille dessinée sur papier transparent, par l'utilisation d'un planimètre ou, mieux, par des techniques de digitalisation.

1.2.2.1.2. Forme

Elle est la configuration géométrique telle que projetée sur un plan horizontal (Musy et al., 1992). Elle est caractérisée par le rapport longueur du bassin (L) mesurée le long du cours d'eau principal jusqu'à la crête la plus distante sur largeur moyenne du bassin.

Elle est indispensable pour affecter le cheminement de l'eau et influencer l'allure de l'hydrogramme de crue à l'exutoire. Deux bassins versants de dimensions semblables, mais de formes différentes, agissent très différemment à une même averse (Musy et al., 1992).

Plusieurs indices ont été utilisés par des hydrologues au cours des années dont il existe de diverses formules, qui permettent de caractériser les écoulements et de comparer les bassins versants entre eux (Musy et al., 2004 ; Ann, 2008).

- **L'indice de compacité de Gravelius (1914), K_G (dans Roche, 1963)**

Il est défini comme le rapport du périmètre du bassin versant au périmètre du cercle ayant la même surface.

$$K_G = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} = 0,28 \cdot \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (1.1)$$

Où : K_G : indice de compacité de Gravelius ; A : surface du bassin versant (Km²) ;
P: périmètre du bassin (Km).

K_G est proche de 1 pour un bassin presque circulaire et supérieur à 1 pour un bassin allongé (figure 3).

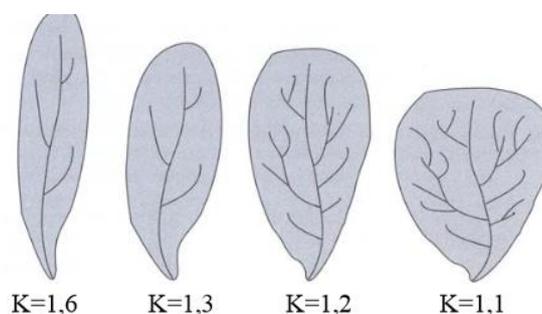


Figure 3. Indice de compacité de Gravelius et forme des bassins (d'après Musy et al., 2004)

- **L'indice de compacité de Horton (1932), K_H**

Cet indice est rarement utilisé. Il est peu précis par rapport aux autres indices.

$$K_H = \frac{A}{L} \cdot \frac{1}{L} = \frac{A}{L^2} \quad (1.2)$$

Où : K_H : indice de compacité de Horton ; A : surface du bassin versant (Km^2) ;

P : Périmètre du bassin (Km).

- **L'indice de compacité de Miller (1953), K_M**

C'est une comparaison entre l'aire du bassin versant à celui d'un cercle ayant le même périmètre que le bassin versant considéré.

$$K_M = \frac{A}{A_c} \quad (1.3)$$

Où : K_M : indice de compacité de Miller ; A : surface du bassin versant (Km^2) ;

A_c : Surface du cercle (Km^2).

1.2.2.1.3. Relief

L'influence du relief sur l'écoulement est très importante et plus évidente (Roche, 1963) puisque de nombreux paramètres hydrométéorologiques varient avec l'altitude ainsi que la pente qui influe directement sur la vitesse de l'écoulement. Il se détermine aussi par différents indices (Ann, 2008).

- **La courbe hypsométrique**

C'est une courbe qui donne les côtes d'altitude du relief (la pente) en fonction de la surface cumulée en pourcentage ou en hectare. Elle aide à comprendre le comportement hydrologique des cours d'eau (figure 4).

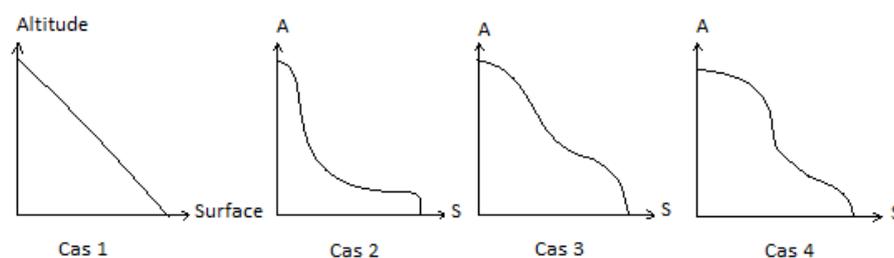


Figure 4. Différentes formes de la courbe hypsométrique (Ann, 2008)

Cas 1 : variation altimétrique régulière ; Cas 2 : grande variation altimétrique au haut du bassin suivie d'une plaine à l'aval. Possibilité d'avoir des inondations importantes et des dépôts de sédiments solides ; Cas 3 : la faible pente signifie que le relief est d'un haut plateau ; Cas 4 : une rupture de pente indique le changement du régime d'écoulement.

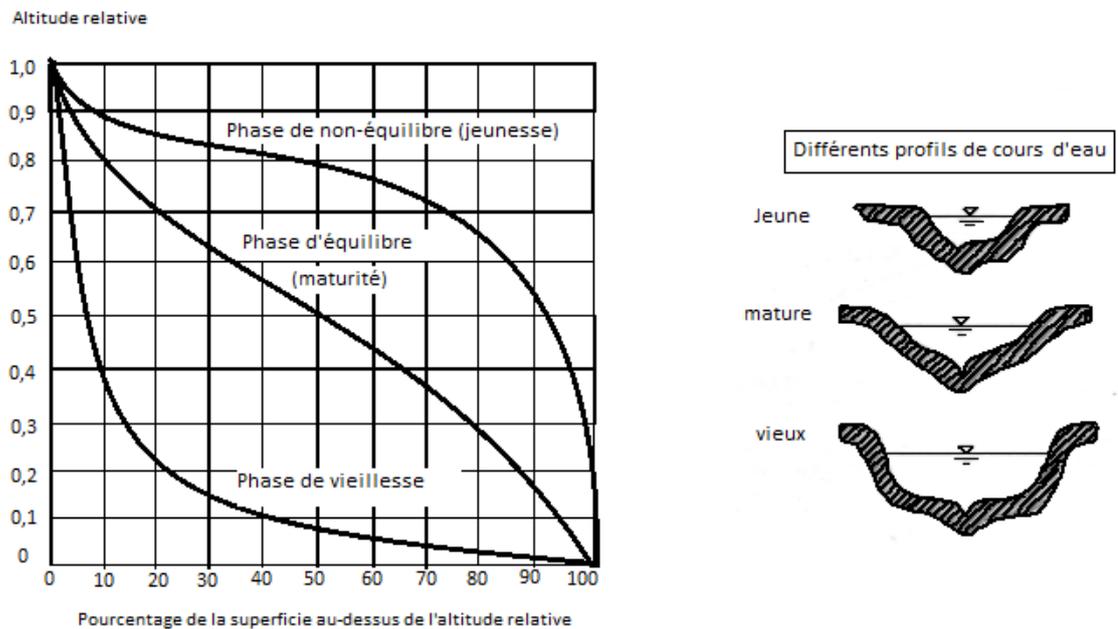


Figure 5. Courbes hypsométriques caractéristiques du cycle de l'érosion d'après Strahler (1952) et profil d'un cours d'eau dans un bassin versant (Ann, 2008 ; Tiré de Llamas (1985), Champoux et Toutant (1988))

La courbe hypsométrique reflète l'état de l'équilibre dynamique du bassin. La courbe supérieure de la figure 5 ci-dessus, indique une érosion importante au niveau des bassins jeunes. La courbe au milieu représente les bassins en équilibre de superficie et d'altitude. La courbe inférieure, l'altitude est faible malgré la grande superficie, elle est liée aux bassins sédimentaires.

- **Les altitudes caractéristiques**

L'altitude moyenne du bassin est un indice important qui intègre et présente l'influence de la zonalité climatique verticale et elle est déterminée par la somme du produit de la surface partielle S_i comprise entre les courbes de niveau, et des altitudes moyennes correspondantes H_i (Iratni, 2014).

L'altitude médiane $H_{50\%}$ correspond à l'altitude lue au point d'abscisse 50% de la surface totale du bassin, sur la courbe hypsométrique, cette grandeur se rapproche de l'altitude moyenne si la pente de la courbe est régulière.

L'altitude $H_{95\%}$ correspond à l'altitude lue au point d'abscisse 95% de la surface totale du bassin, sur la courbe hypsométrique.

L'altitude $H_{5\%}$ correspond à l'altitude lue au point d'abscisse 5% de la surface totale du bassin, sur la courbe hypsométrique.

- **La pente moyenne du bassin versant**

Elle représente un facteur important du régime d'écoulement dans le cours d'eau. Elle est le rapport des altitudes min et max le long du cours d'eau sur la longueur du thalweg le plus long.

- **La longueur du plus long thalweg (L_t)**

Dans la plupart des cas, il faut poursuivre le thalweg de l'exutoire vers l'amont jusqu'à la limite du bassin (Laborde, 2000).

1.2.2.1.4. Réseau hydrographique

On appelle ainsi l'ensemble des canaux de drainage naturels, permanents ou temporaires, par où s'écoulent les eaux provenant du ruissellement ou restituées par les nappes souterraines (Roche, 1963). Le réseau hydrographique et ses caractéristiques seront détaillés au deuxième chapitre.

1.2.2.2. Caractéristiques agro-pédo-géologiques

Les caractéristiques agro-pédo-géologiques sont celles qui se rapportent au type de couverture végétale (agronomie), à la nature du sol (pédologie) et à la géologie du substrat (géologie) au sein d'un bassin versant.

1.2.2.2.1. Couverture su sol

L'activité végétative et le type du sol sont très liés et leurs actions combinées influencent singulièrement l'écoulement en surface. Le couvert végétal retient, selon sa densité, sa nature et l'importance de la précipitation, une proportion variable de l'eau atmosphérique.

La forêt, par exemple, intercepte une partie de l'averse par sa frondaison. Elle minimise le ruissellement et le débit des cours d'eau et amortit les faibles et moyennes crues. Par contre, son action sur les débits extrêmes causés par des crues catastrophiques est réduite.

A l'inverse, le sol nu, de faible capacité de rétention favorise un ruissellement très rapide. L'érosion de la terre est favorisée dans le cas de l'absence de la couverture végétale (Ann, 2008).

Le rôle de la forêt est exprimé par un indice de couverture forestière ou coefficient de boisement K :

$$K = \frac{\text{Surface des forêts}}{\text{Surface du bassin}} \cdot 100 \quad (1.4)$$

Pour caractériser la capacité du bassin versant à ruisseler, on tient compte de coefficient de ruissellement C_R :

$$C_R = \frac{\text{Hauteur d'eau ruisselée}}{\text{Hauteur d'eau}} \cdot 100 \quad (1.5)$$

Il est influencé directement par la nature superficielle du bassin versant (Bois, champs cultivés..).

1.2.2.2. Nature du sol

Le sol agit de différentes manières sur le régime d'une rivière. Sa nature et surtout sa couleur influent sur son développement et la nature de la végétation. Mais ce sont les propriétés mécaniques qui importent en hydrologie (Roche, 1963). La nature du sol intervient sur la (sol argileux, sol sableux) rapidité de montée des crues et sur leur volume (Ann, 2008).

En effet, le taux d'infiltration, le taux d'humidité, la capacité de rétention, les pertes initiales, le coefficient de ruissellement (C_R) sont en fonction du type de sol et de son épaisseur.

1.2.2.3. Géologie du substratum

La connaissance de la géologie d'un bassin versant s'avère importante pour cerner l'influence des caractéristiques physiographiques et la perméabilité du substratum. Celle-ci intervient sur la vitesse de montée des crues, sur leur volume et sur le soutien apporté aux débits d'étiage par les nappes souterraines (Ann, 2008). Les caractères géologiques principaux à considérer sont la lithologie (nature de la roche mère) et la structure tectonique du substratum.

1.3. Processus hydrométéorologiques participés à la génération des crues dans un bassin versant

Globalement, les processus hydrométéorologiques (figure 6) ont été résumés en quatre cheminements principaux (Ward et al., 1990) :

- 1- Précipitations directes à la surface libre du cours d'eau
- 2- Ecoulement de surface qui peut être décomposé selon les modalités d'écoulement comme suit :
 - Ecoulement par dépassement de la capacité d'infiltration ou ruissellement hortonien
 - Ecoulement par saturation constitué par l'écoulement en surface des précipitations directes tombées sur les surfaces saturées ou de l'exfiltration.
- 3- Ecoulement de subsurface (hypodermique ou retardé), est constitué de :
 - Ecoulement par effet piston
 - Ecoulement par macropores
 - Ecoulement de retour
 - Ecoulement par l'intumescence de la nappe
 - Ecoulement dû à la fonte des neiges
- 4- Ecoulement souterrain

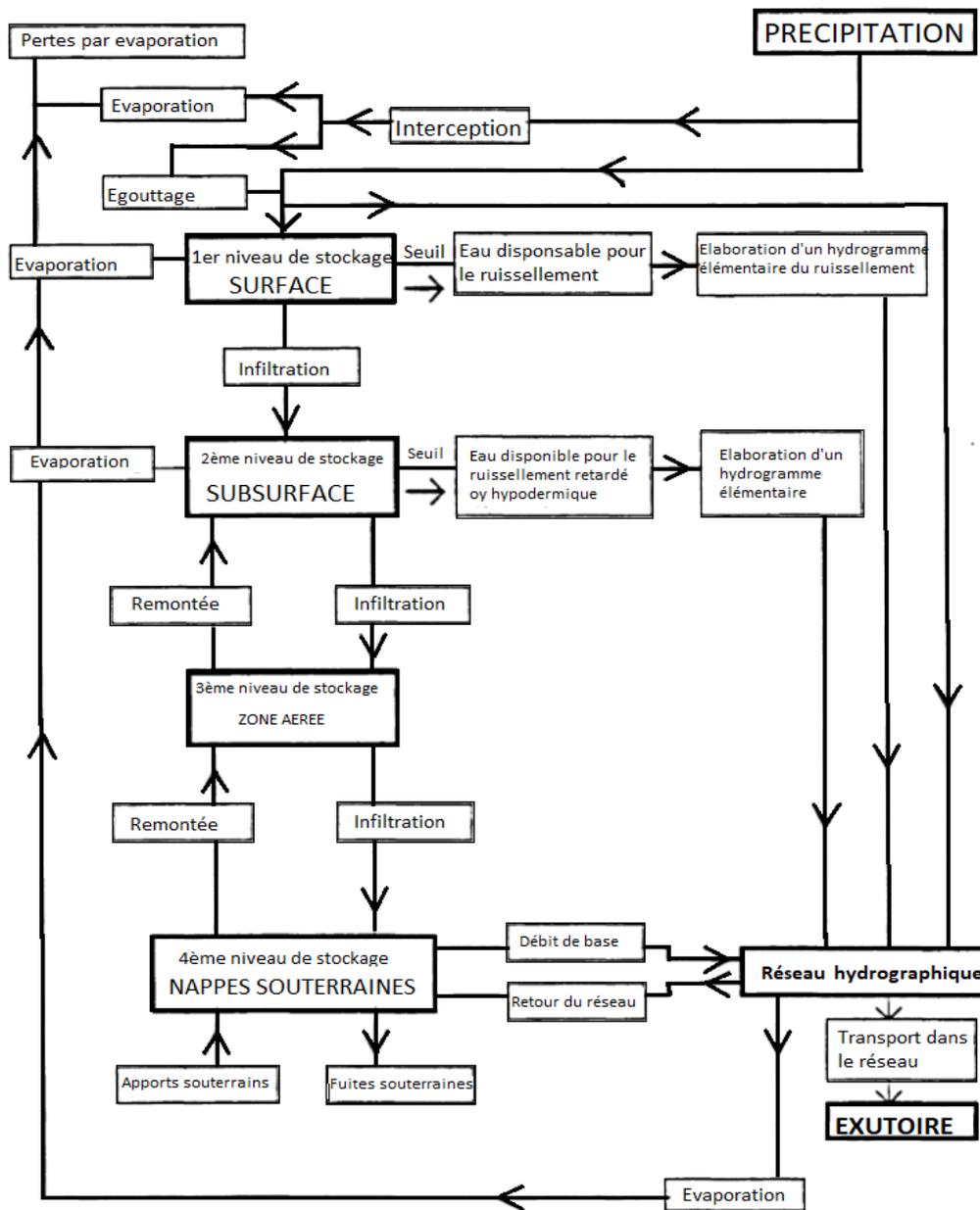


Figure 6. Schéma de la phase terrestre du cycle de l'eau (Roche, 1971)

La précipitation est l'une des caractéristiques principales du cycle hydrologique. C'est le produit de la condensation de la vapeur d'eau de l'atmosphère qui est restitué à la terre sous forme liquide ou solide. Quatre conditions sont nécessaires pour causer une précipitation :

- le refroidissement de l'air.
- le développement de nuages de gouttelettes.
- la condensation
- l'accumulation d'humidité suffisamment importante pour rendre compte des taux de précipitations observés.

Les précipitations sont classées selon les phénomènes hydrométéorologiques en :

- Les précipitations convectives
- Les précipitations orographiques
- Les précipitations cycloniques

Là où la surface de la terre est recouverte par la végétation : c'est l'interception. L'eau qui tombe sur la surface de la terre soit de manière directe ou après l'interception, s'infiltrera dans la terre. L'infiltration doit être définie comme le mouvement de l'eau dans le sol ; le mouvement vertical de l'eau à travers les couches successives du sol est appelé percolation.

L'excès d'eau que le sol n'est plus capable d'absorber produit le ruissellement ; c'est la partie de l'eau qui voyage sur la surface du sol et au travers des chenaux pour atteindre l'exutoire du bassin. La partie de l'écoulement de surface qui s'écoule sur la surface de la terre vers les chenaux des rivières appelée écoulement superficiel. L'importance de la fraction du débit total qui emprunte la voie subsuperficielle dépend essentiellement de la structure du sol. La présence d'une couche relativement imperméable à faible profondeur favorise ce genre d'écoulement. Cet écoulement tend à ralentir le cheminement de l'eau et allonger la durée de l'hydrogramme.

L'écoulement peu profond de l'eau qui s'infiltré et qui s'écoule latéralement au travers des horizons superficiels du sol vers les rivières est appelé écoulement de subsurface ou écoulement hypodermique. L'infiltration qualifie le transfert de l'eau dans les couches superficielles du sol (Musy et al., 2004). Afin de comprendre ce phénomène d'infiltration, il faut avoir connaissance :

- du régime d'infiltration ou le taux d'infiltration, qui désigne le flux d'eau pénétrant dans le sol en surface. Il est exprimé en mm/h et dépend du régime d'alimentation (pluie, irrigation), de l'état d'humidité et des propriétés du sol.
- de l'infiltration cumulative est le volume total d'eau infiltrée pendant une période donnée. Elle est l'intégrale du régime d'écoulement dans le temps.
- de la conductivité hydraulique à saturation qui représente la valeur limite du taux d'infiltration du sol.
- de la capacité d'infiltration ou l'infiltrabilité qui représente le flux d'eau maximum que le sol peut absorber à travers sa surface. Elle est en fonction de la conductivité hydraulique, de la texture et la structure du sol. Au cours d'une averse, elle décroît d'une

valeur initiale jusqu'à une valeur limite qui exprime le potentiel d'infiltration à saturation.

La partie des précipitations qui ne s'est pas infiltrée dans le sol et qui forme le ruissellement, est appelée la précipitation nette ou efficace ou l'excès de la pluie.

D'une part, c'est le ruissellement hortonien qui est dominant dans le milieu aride et semi-aride, et d'autre part le milieu humide est le domaine du ruissellement sur surfaces saturées et du ruissellement de subsurface (Charlier, 2007).

Le ruissellement n'est souvent actif que sur une partie du bassin, il n'est pas généralisé à tout le bassin. Selon la localisation de la zone concernée, l'eau ruisselée pourra soit participer aux débits de crue ou s'infiltrer plus en aval sur le versant. Par conséquent, la quantité d'eau supérieure à la capacité du sol au stockage, et à la transmission latérale par écoulement de subsurface ne pourra pas s'infiltrer et va s'écouler totalement en surface. L'écoulement par saturation est constitué par l'écoulement en surface des précipitations directes tombées sur les surfaces saturées, ainsi que l'écoulement de retour.

Une impulsion d'eau reçue par le versant est transmise à l'aide d'une onde de pression vers l'aval, provoquant une exfiltration immédiate en bas de versant, ou plus simplement, l'eau continue dans le sol avant le début de l'évènement pluvieux, est chassée par l'eau de pluie. C'est le phénomène de l'effet piston.

La circulation de l'eau en milieu saturé et non saturé par gravité est également possible à travers les réseaux constitués par les macropores. Ces derniers peuvent être d'origine des trous creusés par des animaux ou des conduits occupés anciennement par des racines, ils permettent le transfert de l'eau rapide de la surface du sol jusqu'à la nappe ou au réseau hydrographique. Sous l'effet de la gravité, cette eau se déplace dans toutes les directions. C'est l'écoulement par macropores (figure 7).



Figure 7. Ecoulement de subsurface par macropores (d'après Lavabre, bassin du mont Lozère, [Graff, 2004](#))

L'écoulement souterrain est la partie de l'écoulement infiltrée dans le sol, qui percole à travers des horizons superficiels du sol et recharge les réserves d'eaux souterraines au travers desquelles elle atteindra les rivières. Cet écoulement qui a atteint les rivières et l'écoulement hypodermique, constituent l'écoulement de base ([Balek et al., 1989](#)). A l'échelle du bassin versant, les flux de drainage par le réseau hydrographique constituent l'essentiel de débits hors période de crue (période d'étiage) et forment le débit de base.

Au cours des différents processus décrits, une partie importante de la précipitation est consommée par l'évaporation, la transpiration et l'évapotranspiration ; ceci est dû aux conditions atmosphériques et la physiologie des plantes.

[Musy et al. \(2004\)](#) ont bien détaillé la zone saturée et la zone non saturée qui résident dans le comportement hydrodynamique de l'eau dû à l'effet de l'air et se traduit par une conductivité hydraulique différente. Ces deux zones font partie d'un même système d'écoulement. La zone du sol est également le lieu de transit de matières et de substances, et la zone du sous-sol correspondant à celle de la nappe. L'infiltration renouvelle l'eau du sous-sol et des réservoirs souterrains et entretient le débit de l'écoulement souterrain par son circuit dans les aquifères.

1.4. Réponse hydrologique et formation des crues

Des approches des chemins de l'eau, dynamiques et systématiques, fournissent depuis longtemps de clés de lecture et d'analyse de la complexité du bassin versant. Les observations, les mesures et les expérimentations ont permis de mieux comprendre comment le système du bassin versant assure selon les échelles, ses fonctions de stockage, de transfert et de

transformation de l'eau (Black, 1977; Ambroise, 1999). Ces processus hydrologiques ne sont pas quelconques mais dépendent de la combinaison de facteurs traduisant des conditions aux limites (atmosphère et climat) et des conditions initiales (état hydrologique du bassin) imposées au bassin de drainage (figure 8 et 9).

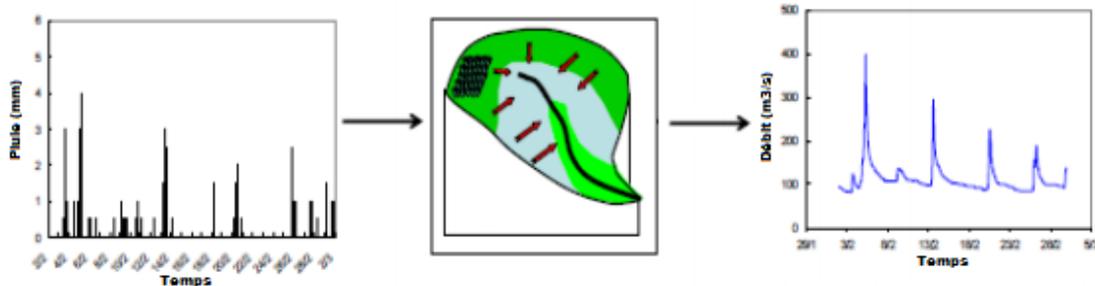


Figure 8. Principe de la réponse hydrologique d'un bassin versant (Legout, 2005)

1.4.1. Fonction de production

La fonction de production permet de déterminer la portion de la pluie brute (pluie efficace ou nette) qui va ruisseler et arriver jusqu'à l'exutoire.

Elle est déduite par les méthodes : processus d'infiltration, coefficient de ruissellement, SCS et l'indice des précipitations antécédentes (Musy et al., 1998).

1.4.2. Fonction de transfert

Une fois la pluie nette est calculée, il faut établir une fonction de transfert pour déterminer la distribution dans le temps des volumes d'eau à l'exutoire. Elle permet de déterminer l'hydrogramme de crue résultant de la pluie nette. Elle est déduite souvent par la méthode de l'hydrogramme unitaire (Musy et al., 1998).

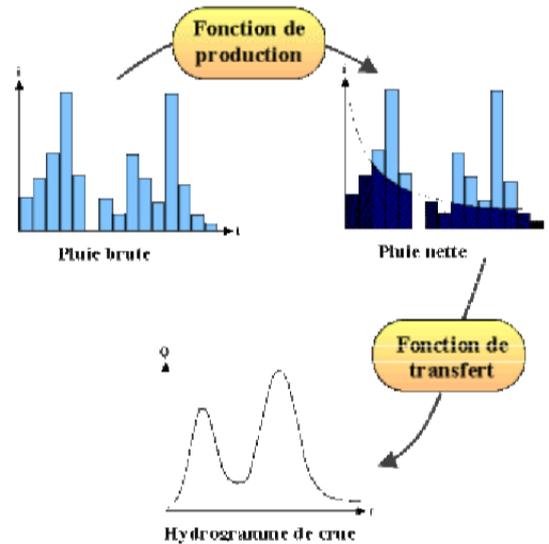


Figure 9. Transformation de la pluie en hydrogramme de crue (Le Clerc, 2004)

1.4.3. Caractéristiques d'une crue

La crue d'après Roche et al. (2012) est la montée temporaire des eaux dans les différentes parties d'un cours d'eau. Elle est présentée sous forme d'un graphe, on l'appelle hydrogramme de crue (figure 10 et 11) et il est caractérisé par (Le Clerc, 2004 ; Roche et al., 2012 ; Souanef, 2015) :

- Le temps de concentration correspond au temps nécessaire à la goutte de pluie tombée sur le point le plus éloigné de l'exutoire du bassin versant pour rejoindre cet exutoire.
- Le temps de réponse ou « lag » est le décalage temporel entre le pic d'intensité des pluies et la pointe de crue.
- Le temps de montée est le temps nécessaire pour atteindre le débit de pointe.
- Le temps de base de l'hydrogramme est le temps de montée et le temps de décrue. C'est le temps entre le début de la crue et le retour au débit de base.

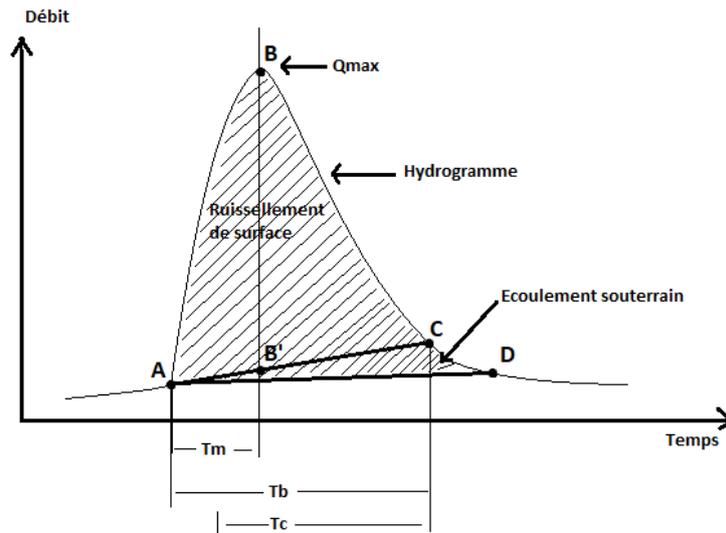


Figure 10. Caractéristiques d'une crue (Souanef, 2015)

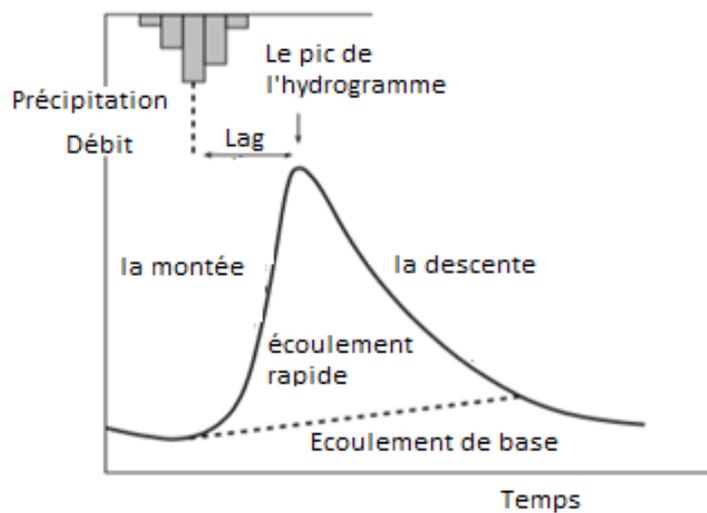


Figure 11. Relation entre l'hétéogramme et l'hydrogramme de crue (Charlton, 2008)

L'intérêt de l'étude des crues provient du pouvoir dévastateur de celle-ci quand elles sont importantes. Afin de s'en prémunir, il est utile de bien les analyser et connaître leurs origines, les différents phénomènes (figure 12) qui les provoquent et les processus participant à leur construction (Souanef, 2015).

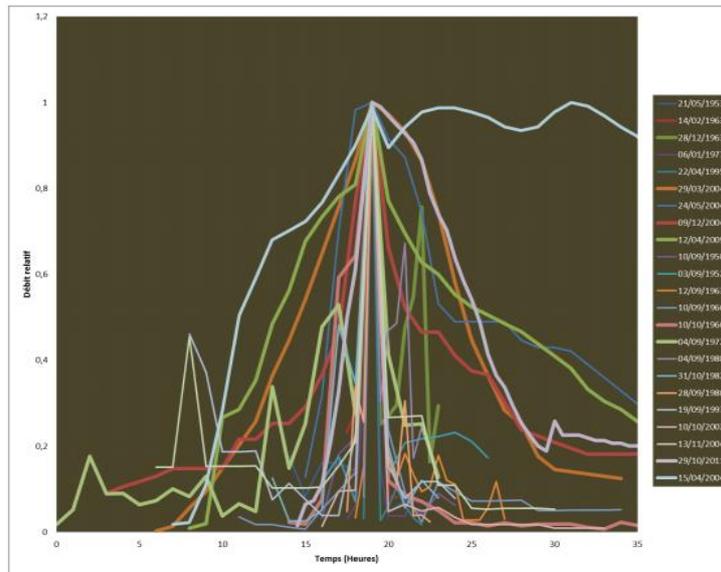


Figure 12. Différentes formes d'hydrogramme normalisé de crue (Hachemi, 2017)

1.5. Conclusion

Dans ce premier chapitre, on a pu donner quelques généralités sur tout ce qui concerne le bassin versant, ses caractéristiques, une explication détaillée des processus hydrologiques, le phénomène des crues et l'hydrogramme de crue.

2. Géomorphologie et typologie des réseaux hydrologiques

2.1. Introduction

La morphologie de drainage est une branche importante de la géomorphologie quantitative. Basée sur les premières études de [Horton \(1945\)](#) et développée ensuite par des autres géomorphologues américains, comme [Strahler \(1952\)](#) et [Schumm \(1956\)](#). En étudiant la typologie des réseaux hydrographiques, on peut connaître les paramètres qui influent la forme de l'hydrogramme de crue à l'exutoire des bassins versants, ainsi que les facteurs qui engendrent de différents types de drainage. Les réseaux hydrographiques sont classés selon leurs structures et leurs densités de drainage, qui ont de leur part une relation avec la pente et la structure du terrain ([Zhang et Guilbert, 2013](#)), et se développent en fonction de la topographie locale et la géologie sous-jacente.

2.2. Aspects géomorphologiques

Il y a quatre paramètres qui influent, le plus, la géomorphologie d'un cours d'eau. Il s'agit du débit d'eau, de la pente de la vallée, de la composition de la berge et du débit solide ([Paccaut et al., 2010](#)).

2.2.1. Lit du cours d'eau

Le lit d'un cours d'eau est, en général, la partie la plus profonde de la vallée dans laquelle s'écoule gravitairement un courant d'eau. De manière classique, on distingue le lit mineur limité par des berges et le lit majeur occupé temporairement par les eaux débordantes.

Le lit mineur, dit aussi "apparent", "ordinaire", "permanent", est occupé par des matériaux roulés par les eaux et peu masqués par la végétation et l'implantation humaine.

Dans les plaines ou les fonds de larges vallées, peuvent apparaître, à l'intérieur du lit mineur, des microreliefs caractéristiques : chenaux, dépressions d'inégales profondeurs séparés par des seuils, bras secondaires abandonnés. Le lit d'étiage ou chenal d'étiage est celui dans lequel se concentre l'écoulement pendant les périodes de basses eaux.

Le lit majeur ou champ d'inondation est l'espace que les eaux peuvent recourir et tapisser d'alluvions fines. Il est généralement occupé par une végétation plus ou moins hygrophile (humide). La partie du lit majeur, la plus souvent inondée, est parfois appelée lit moyen ou champ d'inondations fréquentes. Le lit majeur d'extension maximum est dit lit majeur exceptionnel ou épisodique.

Dans les plaines et les vallées alluviales, la distinction entre lit mineur et lit majeur est souvent délicate dans la mesure où les inondations du lit majeur ne proviennent pas du débordement du cours d'eau principal (Dacharry, 1998).

2.2.2. Dimensions du cours d'eau

Le cours d'eau se caractérise par trois dimensions : le tracé en plan, le profil en long et le profil en travers (Charlton, 2008).

2.2.2.1. Tracé en plan

Le lit du cours d'eau principal est nettement plus large que celui des affluents, son débit plus abondant (Roche, 1963).

On distingue deux catégories des cours d'eau (Charlton, 2008 ; Lagacé, 2011) : les cours d'eau rocheux et les cours d'eau alluviaux. Le cours d'eau dans un canal rocheux s'écoule directement sur le substratum sous-jacent. Le canal alluvial est celui qui se constitue d'une couche des alluvions (figure 13).



Figure 13. Cours d'eau rocheux et cours d'eau alluvial

Considérons un cours d'eau qui coule sur des alluvions de taille à peu identique. Pour les faibles vitesses, rien ne se passe au fond du cours d'eau : les matériaux solides restent au repos.

Pour les vitesses plus élevées, les matériaux solides se déplacent sur le fond en roulant, en glissant ou en effectuant des bonds successifs : ce phénomène est appelée charriage. Les grains se déplacent à une vitesse nettement inférieure à celle de l'eau (Degoutte, 2001).

Pour les vitesses encore plus élevées, les matériaux prélevés sur le fond sont emportés par le courant : le phénomène est appelé transport en suspension. Les grains se déplacent à la vitesse de l'eau au voisinage du grain.

Quatre types de cours d'eau alluviaux sont connus : le cours d'eau rectiligne, à méandres, en tresse et anastomosé (figure 14).

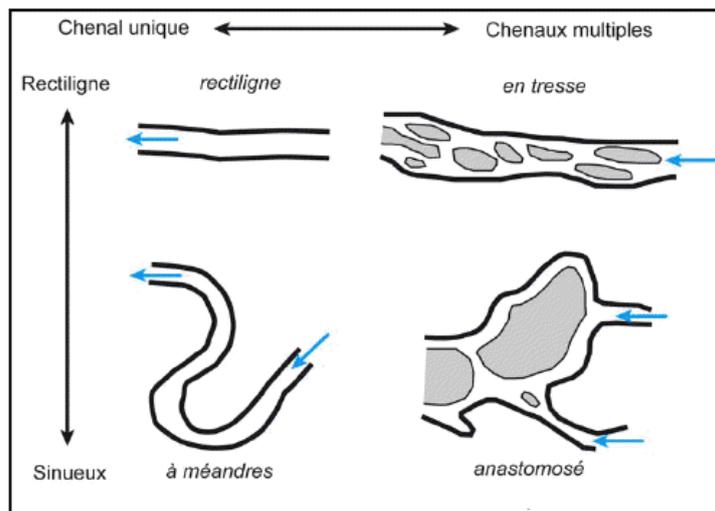


Figure 14. Types de cours d'eau alluviaux (Bravard et Petit, 1997)

- Le cours d'eau rectiligne

C'est rare de trouver un cours d'eau naturellement rectiligne dans la nature, et c'est pour cette raison qu'on procède souvent à des aménagements de correction artificielle des cours d'eau (Charlton, 2008).

- Le cours d'eau à méandres

Ce sont des cours d'eau profonds et étroits (figure 15), et leur origine est souvent un cours d'eau rectiligne. Parmi les études les plus intéressantes, une étude dans un laboratoire concernant les méandres a été faite par Friedkin (Morisawa, 1968). Selon Schumm, la sinuosité est liée à la morphologie et la taille des matériaux présentés dans le cours d'eau. Les cours d'eau à méandres correspondent à des pentes faibles ou très faibles (0,1 m/km).

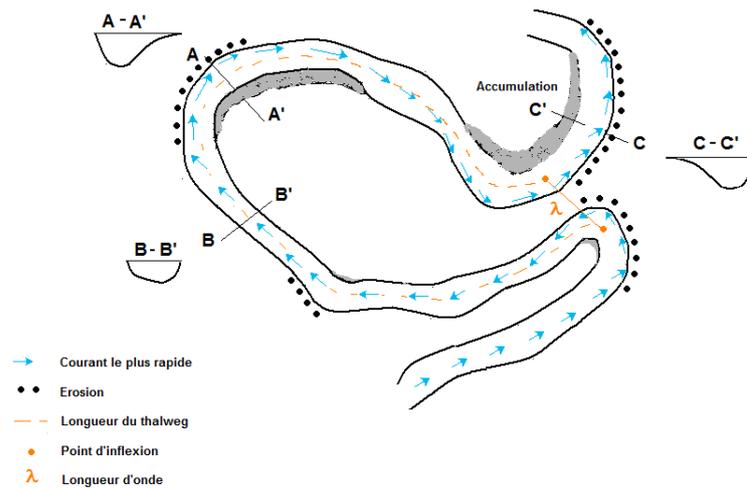


Figure 15. Configuration d'un méandre

Les causes de formation des méandres sont diverses et aucune théorie n'explique correctement leur formation et évolution. Plusieurs facteurs entrent en jeu :

- Courants secondaires
- Liaison entre la pente et le diamètre des sédiments
- Nombre de Froude supérieur à 3
- Déformations du fond ou ondes de sable

- Le cours d'eau en tresses

Ils comportent un réseau plus ou moins dense, complexe, de chenaux qui s'entrelacent tout autour d'un grand nombre d'îles ou de bancs. Ils prennent une forme en tresse lorsque le cours d'eau à plus ou moins forts transports solides, passent rapidement d'une forte ou très forte pente à une pente assez faible.

Durant les périodes de basses eaux, de vastes zones de bancs sont exposées à la surface et qui sont composés, de leur part, d'une grande partie des sédiments transportés par l'érosion (Charlton, 2008). Ils peuvent être des bancs de sables, de graviers, de galets ou des roches.

- Le cours d'eau anastomosé

C'est un cours d'eau divisé en deux ou plusieurs autres cours d'eau secondaires dans les plaines inondables, mais ce type est très rare par rapport au cours d'eau à méandres et en tresses. Ces cours d'eau secondaires peuvent être des cours d'eau rectilignes, en méandres ou en tresses (Charlton, 2008).

2.2.2.2. Profil en long

Graphiquement, le profil en long est représenté par la variation altimétrique du fond du cours d'eau en fonction de la distance. Les cours d'eau secondaires du bassin versant sont également reportés (figure 16).

Le profil en long permet de déterminer la pente moyenne qui reflète la vitesse avec laquelle l'eau se rend à l'exutoire du bassin. Une pente raide accélère l'écoulement superficiel, tandis qu'une pente douce donne à l'eau le temps pour s'infiltrer, dans le sol (Ann, 2008).

$$P_{\text{moy}} = \frac{\Delta H_{\text{max}}}{L} \quad (2.1)$$

Où : P_{moy} : pente moyenne du cours d'eau (m/Km) ; ΔH_{max} : dénivellation maximale de la rivière (m), c'est la différence d'altitude entre le point le plus éloigné et l'exutoire ;

L : longueur du cours d'eau principal (Km).

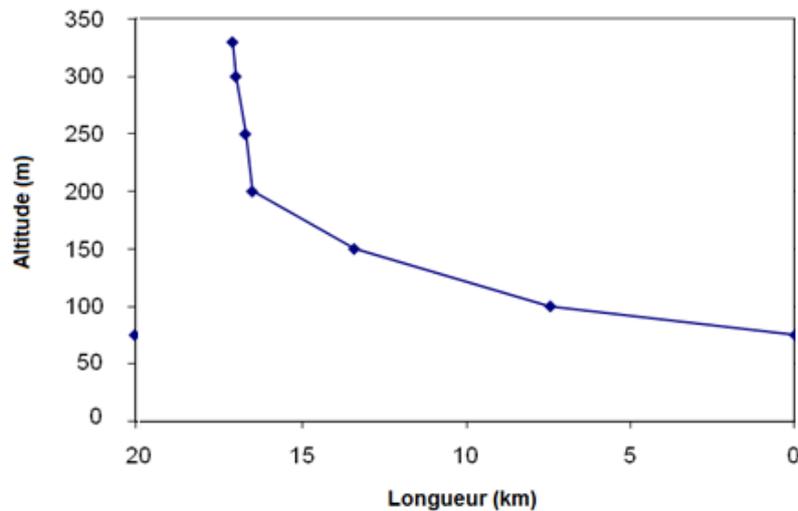


Figure 16. Profil en long d'un cours d'eau

2.2.2.3. Profil en travers

Le profil en travers d'un lit du cours d'eau est représenté par une coupe perpendiculaire à l'axe du la surface du canal (figure 17).

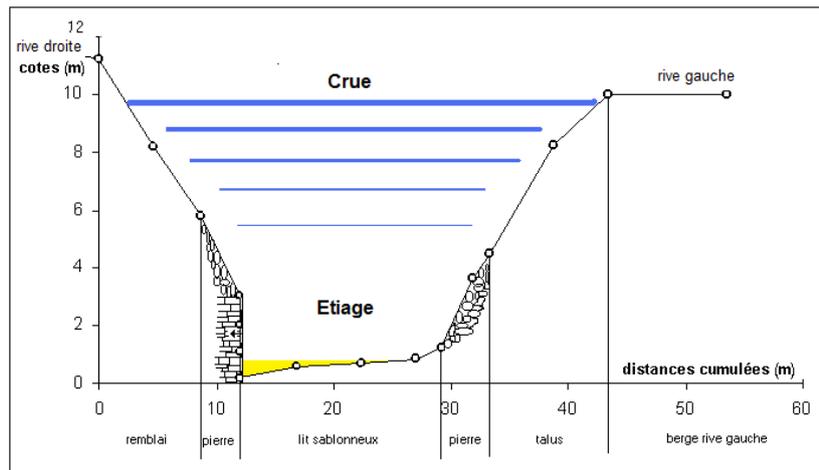


Figure 17. Profil en travers d'un cours d'eau

2.3. Réseau hydrographique

Dans beaucoup de régions du monde, les inondations se manifestent de façon catastrophique. L'analyse de l'influence de la structure des réseaux hydrographiques sur le risque hydrologique est très importante lors des épisodes des crues (Abdeddaim et al., 2016).

2.3.1. Définition du réseau hydrographique

Il existe plusieurs définitions, et on cite parmi lesquelles :

- [Deffontaines \(1990\)](#) a défini un réseau hydrographique comme suit : le réseau hydrographique correspond à tout écoulement linéaire concentré sur la surface topographique qu'il entaille progressivement. Il représente un état du cycle de l'eau et est en équilibre relatif à l'échelle géologique avec le climat, la pente et les aménagements anthropiques. Les rivières s'écoulent en suivant le chemin le plus facile, minimisant sans cesse leur entropie. C'est l'ensemble des surfaces topographiques situées en contrebas de tous les points hauts voisins (relief), s'écoulant généralement selon une direction. Ces surfaces peuvent contenir de l'eau de manière temporaire ou permanente.
- [Glossaire International d'Hydrologie \(1990\)](#) : c'est un ensemble des canaux de drainage naturels, permanents ou temporaires, par où s'écoulent les eaux provenant du ruissellement ou restituées par les nappes souterraines.

- [Charlton \(2008\)](#): les eaux et les sédiments sont transportés des crêtes des montagnes et des vallées vers l'exutoire par un système de drainage appelé le réseau hydrographique.
- [Jrifa \(2015\)](#): le réseau hydrographique désigne aussi l'ensemble des milieux aquatiques (lacs, rivières, eaux souterraines, zone humide, etc.) présents sur un même bassin. C'est un ensemble structuré de chenaux qui assurent le drainage superficiel, permanent ou temporaire, d'un bassin versant ou d'une région donnée.

2.3.2. Caractéristiques du réseau hydrographique

La forme et la texture du réseau de drainage, sont étudiées pour identifier l'influence exercée par le sol et le substratum sur ces réseaux ([Parvis, 1950](#)).

2.3.2.1. Densité de drainage

La densité de drainage est définie, pour un bassin versant donné de superficie quelconque, comme la longueur du réseau ([Roche, 1963](#)).

2.3.2.2. Texture de drainage (densité hydrographique)

La densité hydrographique représente le nombre des canaux d'écoulement par unité de surface. Le drainage a une texture grossière où le substratum ou le sol est résistant à l'érosion. Le drainage d'une texture fine est associé avec les matériaux qui ne résistent pas à l'érosion (figure 18). D'une autre manière, le type du réseau de drainage indique la porosité du sol ou du substratum, où il se trouve ([Parvis, 1950](#)).

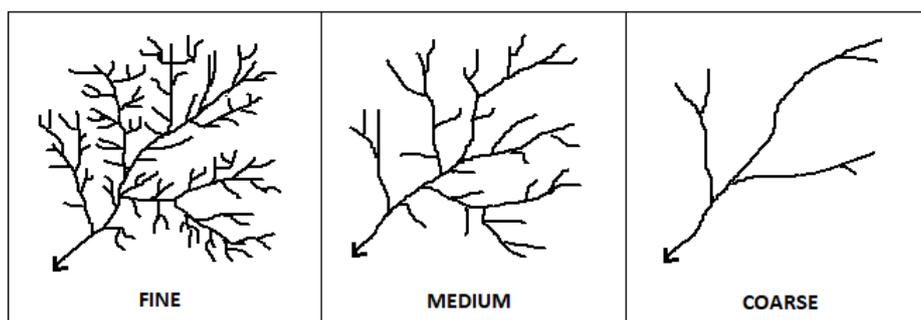


Figure 18. Les textures de drainage suggérées par ([Kadir, 2005](#)). De gauche à droite, la texture fine, moyenne (medium) et grossière (coarse)

2.3.2.3. Endoréisme

On caractérise par ce terme, les réseaux hydrographiques qui ne se relient à aucun autre réseau plus important. Dans nombreux cas, l'évapotranspiration dans les dépressions topographiques consomme la totalité du flux de l'aquifère et il n'existe pas de cours d'eau exutoire. On parle de bassin versant endoréique (Roche et al., 2012). Les réseaux endoréiques sont surtout fréquents en zone aride et en zone karstique. On peut distinguer deux types d'endoréisme (Labrode, 2000) :

- un endoréisme total où le réseau hydrographique converge vers une zone centrale du bassin où apparaît une surface d'eau libre permanente ou non, à partir de laquelle s'évapore la quasi-totalité des apports ;
- un endoréisme du ruissellement. Dans ce cas, le réseau de drainage aboutit à une zone où l'eau s'infiltré et poursuit son écoulement vers l'extérieur du bassin par les nappes.

2.4. Classification des réseaux hydrographiques

L'analyse des réseaux hydrographiques et ses hiérarchisations, joue un rôle important dans la compréhension des mécanismes de ruissellement et de la genèse des crues. On peut classer les réseaux hydrographiques selon deux facteurs :

2.4.1. Selon l'ordre des cours d'eau

La hiérarchie du réseau hydrographique se manifeste par l'importance croissante de ses éléments, depuis les ramifications originelles de l'amont dépourvues de tributaires jusqu'au collecteur principal.

On commence avec l'ordre 1 pour les affluents sans branches à l'amont. Le cours d'eau principal est alimenté par les affluents du premier ordre approvisionnés par les affluents du second ordre et ainsi de suite jusqu'aux petits cours d'eau de bassin forment ce qu'on appelle le chevelu (Roche, 1963). L'ordre du cours d'eau est toujours supérieur à celui des affluents et ainsi, l'ordre le plus grand est donné au cours d'eau connecté à l'exutoire. Les schémas les plus pertinents sont ceux de Horton (1945), puis développés par Strahler (1957) et de Shreve (1966).

La classification de Horton (1945) définit un ordre des thalwegs comme suit : tout cours d'eau sans affluent est d'ordre 1, tout cours d'eau ayant un affluent d'ordre x est d'ordre $x+1$ et garde cet ordre sur toute sa longueur. A la confluence de deux thalwegs d'importance égale, on donne

l'ordre supérieur au plus long. Pour Schumm (1977), l'ordre $x+1$ est pour tout tronçon de rivière formé par la réunion de deux cours d'eau d'ordre x (figure 19 et 20) (Dubreuil, 1974).

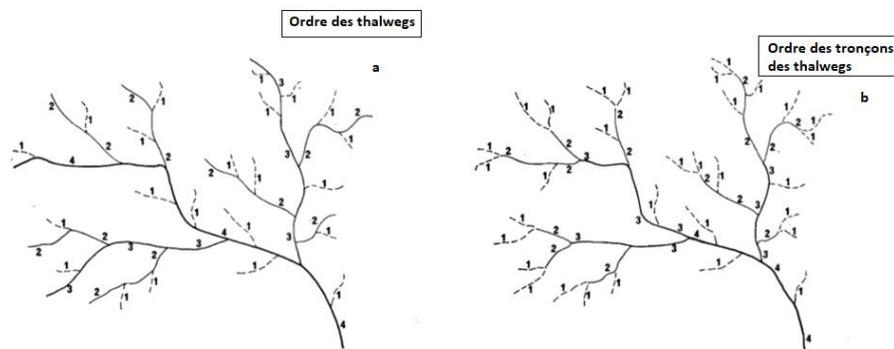


Figure 19. (a) Classification de Horton et (b) classification de Schumm (Dubreuil, 1974)

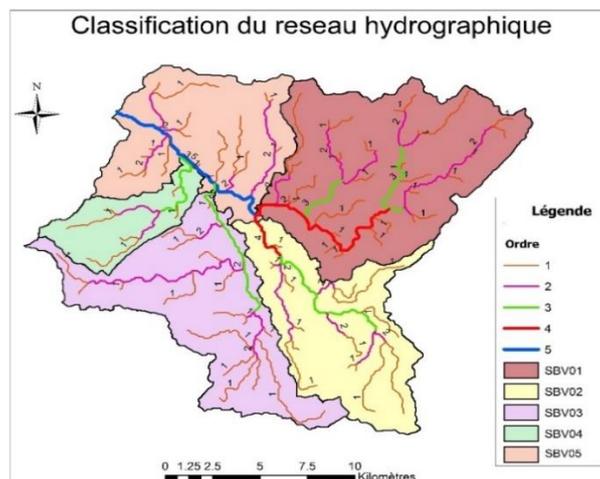


Figure 20. Classification du réseau hydrographique (Faregh, 2018)

2.4.2. Selon la structure du réseau hydrographique

Un système de drainage naturel est la structure formée par les cours d'eau, les rivières et les lacs dans un bassin versant (Zhang et Guilbert, 2013). Les cours d'eau sont toujours connectés pour former un réseau hydrographique et particulièrement une structure de drainage.

La structure du réseau hydrographique est l'arrangement planimétrique de plusieurs cours d'eau qui sont généralement adaptés à la topographie, la pente, l'histoire géologique et morphogéologique, la lithologie, le climat et la pluviométrie d'une région (Kadir, 2005 ; Shailesh, 2015). En effet, la schématisation d'un modèle du réseau de drainage est très utile pour l'identification et l'interprétation des caractéristiques géologiques et structurales du bassin

versant. Il est un élément important dans l'interprétation géologique des photographies aériennes (anciennement) et dans les systèmes d'information géométriques (actuellement) puisque il est une partie hydrologique et morphologique fondamentale du bassin versant (Zhang et Guilbert, 2013).

La structure ou le type de drainage décrit la morphologie d'un réseau hydrographique à l'échelle du bassin versant, à l'inverse du type du cours d'eau qui décrit la morphologie de la rivière à l'échelle de la rivière seulement (Leopold et Wolman, 1957; Zhang et Guilbert, 2013).

2.4. Typologie des réseaux hydrographiques

D'après Howard (1967), le réseau de drainage est la structure formée par l'ensemble des voies de drainage, sans tenir compte s'ils sont occupés par des cours d'eau permanents. Ces réseaux sont classés sur la base de la texture (ou la densité) et la forme (Parvis, 1950). Leur développement est lié fortement à la structure des roches.

Les types du réseau de drainage peuvent être classés (Shailesh, 2015), selon leurs origines, leurs distributions spatiales, l'écoulement subsuperficiel et les caractéristiques des cours d'eau, en deux classifications : classification génétique et classification géométrique. La classification génétique correspond aux différentes formes des cours d'eau que constitue le réseau hydrographique. Dans notre étude, on s'intéresse uniquement à la classification géométrique.

Les types de drainage se sont, en général, subdivisés en deux catégories :

- Type de géométrie de base du réseau de drainage.
- Type de modification de base du réseau de drainage.

Le type de géométrie de base est celui dont les caractéristiques diffèrent radicalement des autres types de drainage. Zernitz (1932) et Parvis (1950) ont classé les types de base comme suit: dendritique, parallèle, treillis, rectangulaire, radial et annulaire, puisque ils sont les plus étudiés dans le domaine de la géologie. Howard (1967) a ajouté à ceux-ci le type contourné. A l'inverse, le type de modification de base, qui appartient à l'un des types de base, diffère dans quelques caractéristiques régionales.

2.4.1. Historique

Les géomorphologues ont réalisé depuis longtemps que la géométrie des réseaux de drainage peut varier significativement entre les régions, tout dépend de la lithologie locale et les

conditions tectoniques. Cette tendance a conduit à une classification des réseaux de drainage en utilisant des termes comme dendritique, parallèle, penné, rectangulaire et treillis.

La première classification a été proposée par [Campbell \(1896\)](#) puis [Zernitz \(1932\)](#), en se basant sur les cartes de la géométrie des réseaux de drainage. Cette classification est divisée en types de base et types de base modifiés. [Parvis \(1950\)](#) a développé ce système de classification en ajoutant quinze types modifiés basés sur des analyses de photos aériennes, pour l'identification des sols et substratums régionaux. Les photos aériennes ont bien révélé de diverses modifications au niveau du réseau de drainage de base.

L'analyse du drainage dans un bassin versant selon [Strahler \(1952, 1957\)](#), consiste à la désignation de l'ordre des cours d'eau, l'analyse dimensionnelle et la similitude géométrique des bassins versants en se basant sur les résultats obtenus par [Horton \(1932, 1945\)](#).

[Howard \(1967\)](#) a bien détaillé dans ses travaux, les réseaux de drainage. L'analyse constitue des études sur les types de drainage, les textures de drainage, les types des cours d'eau ainsi que les anomalies de drainage. Il a ainsi pu classifier les réseaux de drainage selon leur signification géologique. [Miller \(1961\)](#), [Strandberg \(1967\)](#) et [Fairbridge \(1968\)](#) ont proposé aussi des classifications descriptives. [Morisawa \(1963, 1968\)](#) a remarqué que le dépôt des sédiments influence la structure des cours d'eau, et la résistance et la structure du substratum expliquent évidemment le développement et le changement morphologique des cours d'eau au cours du temps. Les failles représentent toujours les chemins les plus faciles à traverser. [Cazabat \(1969\)](#) a donné une explication complète et détaillée de tous les types du réseau hydrographique étudiés à partir de photographies aériennes. Au contraire de [Gagnon \(1974\)](#) qui insista sur le drainage climatique et anthropique.

[Schumm et Kahn \(1972\)](#) ont fait des expérimentations concernant la dépendance morphologique de types de cours d'eau comme le cours d'eau rectiligne, en tresse et à méandres, et ils ont pu déduire une relation importante entre la sinuosité et la pente dans un écoulement fluvial, qui indiquent un changement dans le réseau de drainage. [Prud'homme \(1972\)](#), [Gregory et Walling \(1983\)](#), [Chorley et al. \(1984\)](#) et [Baker \(1986\)](#) ont continué cet effort de description.

[Phillips and Schumm \(1987\)](#) ont travaillé sur l'effet de la pente régionale sur les réseaux de drainage. Le but initial de cette étude était de mieux comprendre et interpréter les cartes géologiques et les photographies aériennes.

L'identification de schémas de drainage par les photo-interpréteurs a été accomplie depuis des années, mais elle est très coûteuse et prend trop de temps, et les photo-interpréteurs doivent avoir de l'expérience (Argialas et al, 1988). Donc, les chercheurs ont procédé à trouver une approche assistée par l'ordination qui aide à bien résoudre ce problème. Deffontaines (1990) a continué le travail en développant les structures précédentes schématisées par les anciens hydrologues pour les deux catégories (types de base et de base modifiés). Il a élaboré un tableau synthétique assez complet de ces types. Musy et al. (1992) ont schématisé de nouvelles structures du réseau hydrographique.

L'effort de la recherche d'Ichoku et Chorowicz (1994), a abouti à l'établissement d'une technique de détermination et de classification des formes de drainage. Cette méthode est totalement numérique et automatique. Divers paramètres de ces types du réseau hydrographique comme les longueurs, les directions du cours d'eau ainsi que l'angle de jonction ou de confluence ont été considérés. Ces paramètres sont utilisés pour déterminer la densité et texture de drainage et le degré de parallélisme.

Dans l'étude de Mejia et Niemann (2008), une nouvelle méthode de classification des réseaux de drainage a été développée. Elle est basée sur leurs déviations de l'autosimilarité, c'est-à-dire qu'une partie de l'objet est identique à l'objet complet. La géométrie du réseau dendritique est connue pour être approximativement auto-similaire.

Un facteur majeur influence la morphologie du réseau de drainage est la géologie sous-jacente, bien que la topographie, le type du sol, la structure du substratum, le climat, la couverture végétale, le transport des sédiments dans l'écoulement soient également influents (Charlton, 2008).

Douvinet et al. (2008) ont étudié les crues turbides à partir des indices morphométriques de forme, de volume et de réseau. Ils ont pu mesurer les effets de l'état géomorphologique du bassin et étudier la relation entre sa structure interne et la réponse hydrologique, en utilisant un automate cellulaire géographique. A partir de l'angle de pente, on peut connaître le sens d'écoulement superficiel qui transite d'une cellule à une autre.

Zhang et Guilbert (2013) ont introduit une nouvelle méthode de classification automatique de systèmes de drainage de différentes structures. Cette méthode est basée sur des indicateurs géométriques comme l'angle de jonction et la sinuosité. Cinq types de drainage sont utilisés.

Les types de drainage ont été classifiés aussi selon leurs complexités et l'ordre des cours d'eau dont ils se constituent.

2.4.2. Classifications descriptives du réseau hydrographique

2.4.2.1. Dendritique

Un réseau dendritique ressemble à un arbre avec des ramifications équilibrées entre des canaux de différentes tailles, des cours d'eau un peu irréguliers, des canaux orientés vers plusieurs directions et des affluents qui se confondent aux angles aigus (Zernitz, 1932 ; Parvis, 1950 ; Howard, 1967). Les réseaux dendritiques existent généralement dans les régions avec peu de contrôle structural, des pentes régionales douces et relativement une lithologie uniforme (Parvis, 1950 ; Howard, 1967 ; Le Pape, 1998).

Le facteur principal qui influe sur le développement d'un réseau dendritique est le type de la roche où le drainage se développe (figure 21). Dans les roches imperméables constituant de fines graines, le drainage est plus ramifié et moins espacé, contrairement à une roche perméable de graines grossières, le drainage est moins ramifié et plus espacé (Kadir, 2005).

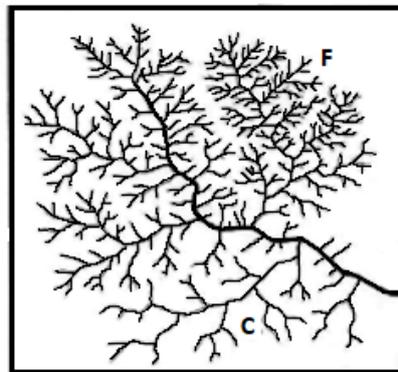


Figure 21. Réseau de drainage dendritique (arborescent)
(F) est un réseau de texture fine, et (C) est d'une texture grossière (Kadir, 2005)

Le réseau dendritique comprend quatre types de drainage modifiés : sub-dendritique, penné, anastomosé et distributaire.

2.4.2.1.1. Sub-dendritique

Le réseau sub-dendritique ne diffère du réseau dendritique que par le manque de perfection. Les déviations sont dues à des contrôles régionaux secondaires, structuraux ou topographiques (Howard, 1967).

2.4.2.1.2. Penné

Un réseau penné ressemble à une plume (figure 22), qui se caractérise par un grand cours d'eau principal très droit et orienté en une seule direction, et plusieurs affluents plus-ou moins parallèles et étroitement espacés, rejoignent le cours d'eau principal à des angles aigus (Zernitz, 1932 ; Parvis, 1950 ; Howard, 1967). Plusieurs explications ont été proposées de l'origine de ce réseau de drainage. Zernitz (1932), Phillips et Schumm (1987) ont suggéré qu'il apparaît dans les zones où il y a un mouvement tectonique tout au long le cours d'eau principal dont la pente des vallées est raide. Il est développé dans les fines textures, les matériaux facilement érodés tels que le loess (limon calcaire, très fin, déposé par le vent ou encore le limon des plateaux).

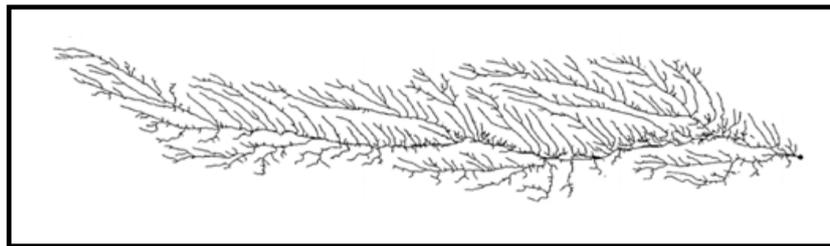


Figure 22. Réseau hydrographique penné (Mejia et Niemann, 2008)

2.4.2.1.3. Anastomosé

On trouve ce type des réseaux dans les plaines inondables et les deltas (Parvis, 1950 ; Howard, 1967).

2.4.2.1.4. Distributaire

C'est un réseau dont une partie de la rivière ne peut plus retourner dans le cours d'eau principal après l'avoir quitté (comme dans les deltas). Il est presque semblable au réseau dendritique sauf que les affluents divergent au lieu de converger vers le cours d'eau principal (Howard, 1967).

2.4.2.2. Parallèle

Le réseau parallèle a des cours d'eau qui ont tendance à être très droits, des canaux qui ont tendance à être parallèles (figure 23) et les affluents qui se confondent à des angles très aigus (Zernitz, 1932 ; Parvis, 1950 ; Howard, 1967 ; Phillips et Schumm, 1987 ; Le Pape, 1998). On trouve les réseaux parallèles dans les régions avec des pentes modérées et raides ou dans les reliefs allongés qui obligent le cours d'eau à traverser strictement un chemin parallèle (Charlton, 2008).

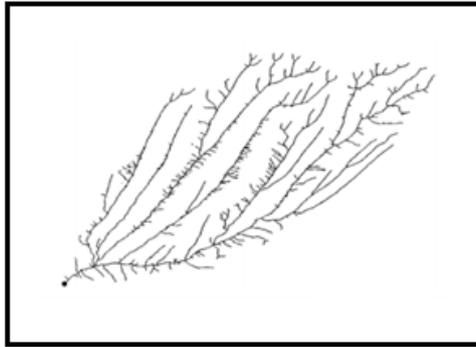


Figure 23. Réseau hydrographique parallèle (Mejia et Niemann, 2008)

Le réseau parallèle comprend deux types de drainage modifiés : sub-parallèle et colinéaire.

2.4.2.2.1. Subparallèle

Le réseau subparallèle (Zernitz, 1932) est moins parallèle que le réseau de base (figure 24). S'il est uniquement dû à la pente, le réseau ressemble à celui formé par les branches d'arbre, mais en raison d'un contrôle structural des couches déformées, ont une résistance relativement uniforme à l'érosion, il y a un parallélisme suffisant entre le cours d'eau principal et les autres affluents, qui assure la stabilité du substratum rocheux (Howard, 1967).

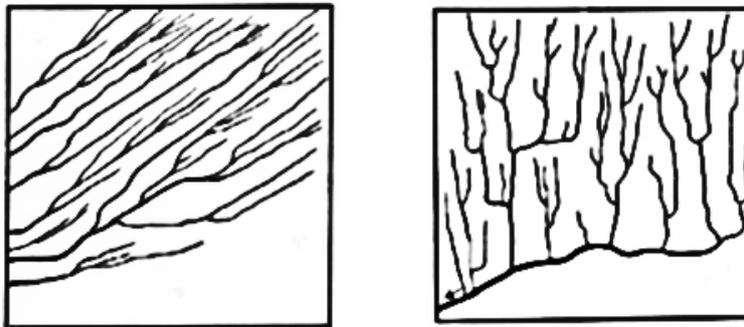


Figure 24. Un réseau parallèle à gauche et subparallèle à droite (Kadir, 2005)

2.4.2.2.2. Colinéaire

Ce réseau se constitue des cours d'eau et des canaux très parallèles et droits, qui apparaissent et disparaissent (superficiels et subsuperficiels) (Zernitz, 1932 ; Parvis, 1950). Il existe dans des régions de lœss et de sable qui sont des matériaux poreux.

2.4.2.3. En treillis

Un réseau en treillis se caractérise par des nombreux, petits, et courts canaux par rapport au grand canal principal (figure 25). La sinuosité du canal est faible et les affluents fusionnent presque à des angles droits (Zernitz, 1932 ; Howard, 1967). Il prend forme dans les zones où existent des séries de failles parallèles (Parvis, 1950), et où les roches sont sédimentaires, pliées et volcaniques (Le Pape, 1998).

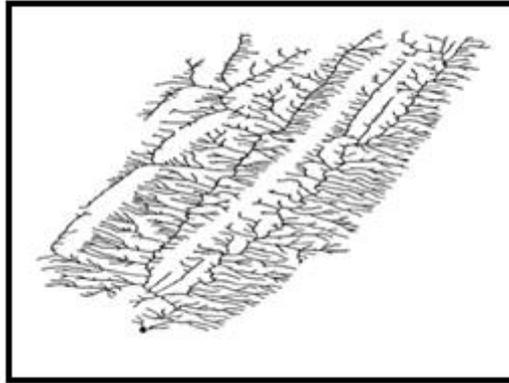


Figure 25. Réseau de drainage en treillis (Mejia et Niemann, 2008)

Le réseau en treillis comprend quatre types de drainage modifiés : en sub-treillis, en treillis directionnel, en treillis de faille et en treillis de joints.

2.4.2.3.1. En sub-treillis

La différence entre le réseau en treillis et celui en sub-treillis est seulement dans le parallélisme de drainage (Howard, 1967 ; Le Pape, 1998). Les cours d'eau sont moins parallèles par rapport au réseau de base.

2.4.2.3.2. En treillis directionnel

Ce terme a été suggéré pour des cours d'eau qui tendent à être longues dans une rive par rapport à l'autre (Howard, 1967 ; Le Pape, 1998). Les deux types sub-treillis et treillis directionnel correspondent le plus souvent à des formes de reliefs allongés (Maychou, 2009).

2.4.2.3.3. En treillis de failles

Il constitue des cours d'eau moins rapprochés que le réseau en treillis, et tend à être dendritique au niveau des failles (Howard, 1967 ; Le Pape, 1998).

2.4.2.3.4. En treillis de joints

Il est caractérisé par des cours d'eau trop courts, rectilignes et parallèles. Le parallélisme est dans un seul sens contrairement à un réseau rectangulaire (Howard, 1967 ; Le Pape, 1998).

2.4.2.4. Rectangulaire

Dans un réseau rectangulaire (figure 26), la sinuosité du canal est introduite par un grand nombre de courbure avec des angles droits, et ses affluents se confondent aussi à des angles droits (Zernitz, 1932 ; Howard, 1967). Ces zones de failles représentent des zones de faiblesse que les cours d'eau exploitent durant leur croissance (Howard, 1967 ; Schumm et al. 2000). Deux zones soumises à des mouvements tectoniques, et qui se rencontrent dans un angle droit, forment un réseau rectangulaire (Charlton, 2008).

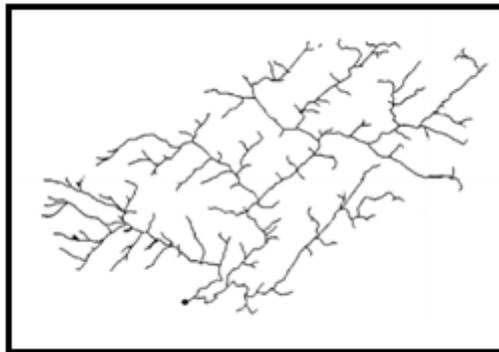


Figure 26. Réseau hydrographique rectangulaire (Mejia et Niemann, 2008)

Le réseau rectangulaire a un seul type de modification de drainage: angulaire.

2.4.2.4.1. Angulaire

Ensemble de cours d'eau mais à angles non droits. C'est le réseau le plus fréquent en milieu fracturé. Ce réseau est proposé par Parvis (1950) comme un type modifié du réseau en treillis et qu'il est similaire au réseau rectangulaire seulement dans le parallélisme, contrairement à Howard (1967) qui considère le réseau angulaire, une modification du réseau rectangulaire.

2.4.2.5. Radial

Les cours d'eau traversant les sommets des volcans (montagnes de forme circulaire ou conique) assurent un drainage radial (Parvis, 1950). C'est l'ensemble des cours d'eau divergents à partir d'un point central, et ce réseau se développe lorsque les cours d'eau s'écoulent dans diverses directions. Le réseau radial se forme par la suite d'érosion symétrique tout autour des dômes et des volcans d'une grande altitude (Charlton, 2008).

Le réseau radial a aussi un type de modification de drainage : centripète.

2.4.2.5.1. Centripète

Ce terme peut référer aux plusieurs cours d'eau qui convergent vers un point commun (Parvis, 1950). Ce réseau est similaire au système de drainage radial, mais la seule exception est que le drainage radial s'écoule au-dehors par rapport au drainage centripète qui s'écoule au-dedans.

2.4.2.6. Annulaire

Ensemble de cours d'eau disposés en anneaux, souvent avec de nombreux cours d'eau secondaires perpendiculaires de faible longueur. C'est le réseau le plus fréquent dans les structures géologiques en dôme où des roches de différentes résistances à l'érosion forment des anneaux concentriques (Le Pape, 1998).

2.4.2.7. Multi-bassins

Spécifique aux régions périglaciaires et où il y a une zone d'érosion, de dépôts glaciaires et de pergélisol, c'est-à-dire les zones arctiques dont le sol est gelé (Howard, 1967).

Le réseau à multi-bassins a quatre types de drainage modifiés : désordonné, karstique, thermokarstique et la baie allongée.

2.4.2.7.1. Désordonné

Ensemble de cours d'eau d'orientation diverses dans les milieux rocheux ou de dépôts glaciaires imperméables (Howard, 1967).

2.4.2.7.2. Karstique

Ensemble de cours d'eau et de petits plans d'eau d'orientations diverses en milieu calcaire. La particularité de ce réseau est liée au phénomène de la dissolution du calcaire qui se traduit par des dépressions fermées, dont certaines sont remplies d'eau, et des cours d'eau, dont certaines parties s'écoulent de façon souterraine (à partir de l'infiltration) et ne sont pas visibles en surface. En milieu faiblement karstique en surface, indépendamment de ce type de réseau hydrographique, il peut arriver que seulement une faible portion du cours d'eau soit souterraine sans que l'ensemble du réseau ne présente un caractère karstique (Parvis, 1950 ; Howard, 1967).

2.4.2.7.3. Thermokarstique

Spécifique aux régions périglaciaires, le réseau thermokarstique est caractérisé par un ensemble de petits plans d'eau, reliés par des segments de petits cours d'eau sinueux d'orientations diverses. On emploie le terme thermokarstique pour caractériser le phénomène de fonte dont le résultat ressemble à celui de la dissolution en milieu calcaire (Parvis, 1950).

2.4.2.7.4. Baie allongée

Il est particulier dans les plaines et les deltas (Parvis, 1950). Les cours de la baie suivent les creux de vieilles plages.

2.4.2.8. Contourné

Cette configuration est une réponse à la structure rocheuse. Les cours d'eau qui coulent dans une direction peuvent être complètement inversés lorsqu'ils rencontrent des roches résistantes constituées de barrières granulaires (Parvis, 1950 ; Le Pape, 1998).

La figure 27 ci-dessous montre des photos réelles de toutes les structures de base du réseau hydrographique. Les figures 28 et 29 résument les différentes structures du réseau hydrographique.

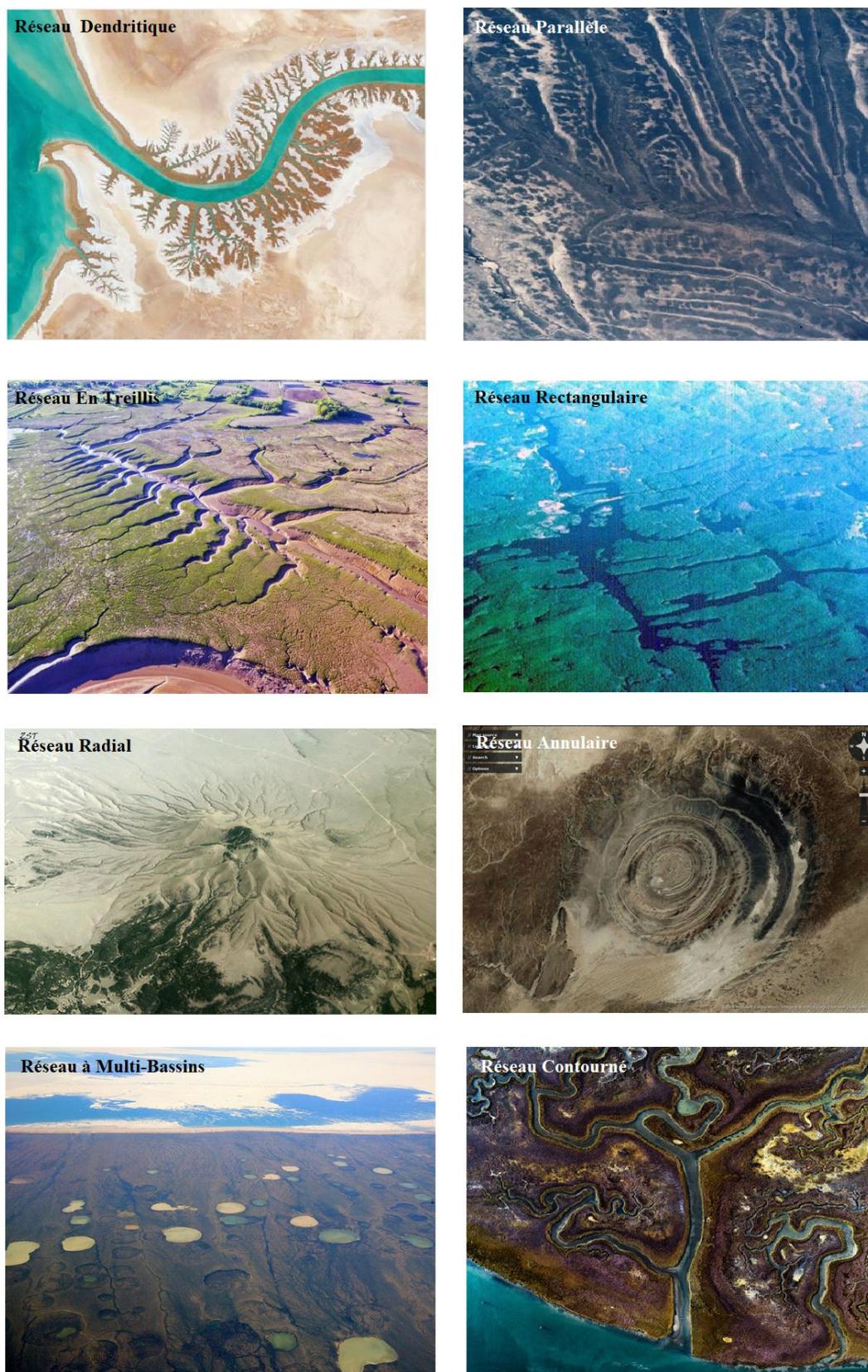


Figure 27. Vue aérienne de réseaux de base (Radisics, 2018)

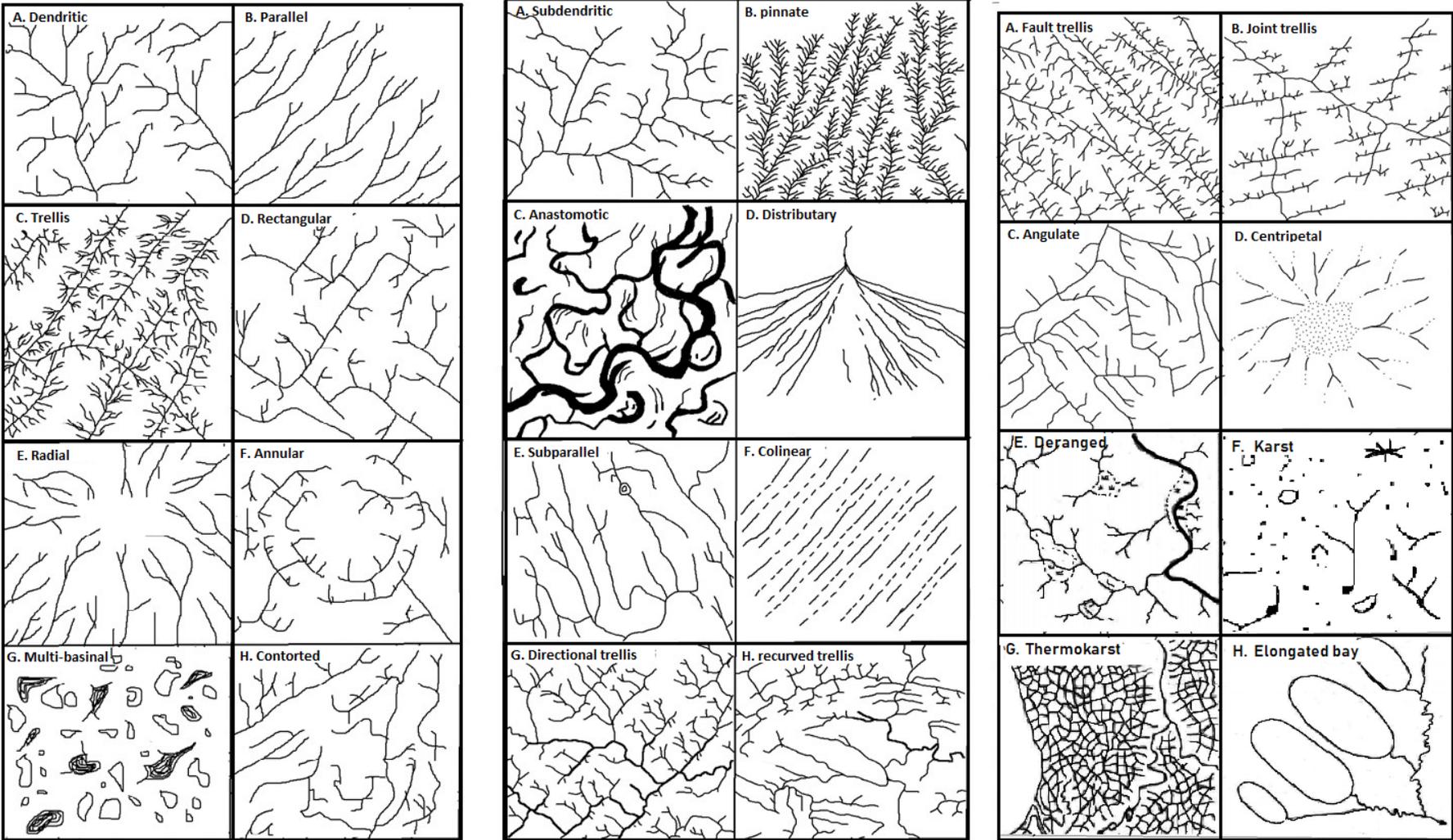
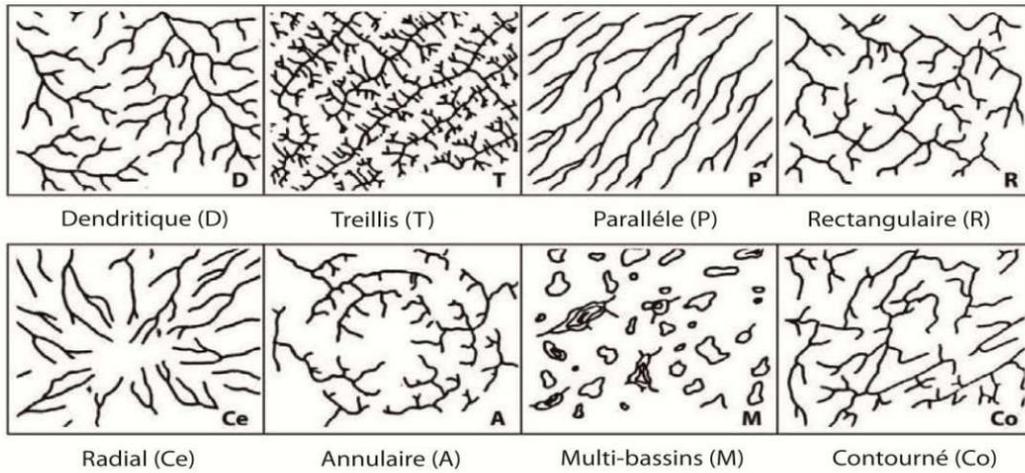


Figure 28. Classification de Howard (1967)

A) Classification de base



B) Classifications modifiées



Figure 29. Classification descriptive détaillée (Deffontaines, 1990; Le Pape, 1998) du réseau hydrographique proposée par Howard (1967) : A) types de base de réseaux hydrographiques ; B) types modifiés de réseaux hydrographiques

Toutes les classifications sont considérées comme des types de base, sauf le réseau penné qui a été considéré comme une modification du type dendritique selon [Zernitz \(1932\)](#) et [Howard \(1967\)](#), et une modification du type parallèle selon [Phillips et Schumm \(1987\)](#). [Howard \(1967\)](#) a ajouté le réseau contourné et à multi-bassins aux autres six types de base illustrés par [Parvis \(1950\)](#) et [Zernitz \(1932\)](#). Le réseau contourné n'a pas de modification pour [Howard \(1967\)](#), mais [Cazabat \(1969\)](#) et [Gagnon \(1974\)](#) ont considéré les types "compensé, palimpsest, yazoo et désordonné" comme des modifications de ce réseau. Pour certains types, comme les types modifiés du réseau en treillis, il est difficile de distinguer l'un de l'autre sans faire une étude tectonique ([Deffontaines, 1990](#)).

[Howard \(1967\)](#) a comparé les caractéristiques du réseau avec des propriétés géologiques connues des régions et a conclu que l'analyse des types de drainage peut nous fournir des informations utiles concernant les caractéristiques structurales et le type des matériaux sous-jacents. En effet, plusieurs chercheurs ([Zernitz, 1932](#) ; [Horton, 1945](#) ; [Parvis, 1950](#) ; [Dunne, 1980](#)) ont déterminé la relation entre le type du réseau de drainage et le substratum, le sol, les mouvements tectoniques, le climat et les processus d'érosion ([Mejia et Niemann, 2008](#)).

2.5. L'angle de jonction (de confluence) des cours d'eau

Parmi les caractéristiques géométriques du réseau de drainage, la plus importante est l'angle formé par l'affluent avec son cours d'eau principal dans un point (ou nœud) de jonction ([Zhang et Guilbert, 2013](#)). Le réseau rectangulaire, par exemple, caractérisé par des cours d'eau dont les virages sont pointus à des angles droits. Une autre différence entre le réseau parallèle et le réseau en treillis, est la longueur. Les cours d'eau sont plus longs dans un réseau parallèle par rapport à un réseau en treillis. La longueur moyenne des affluents vers le cours d'eau principal est un autre indicateur quantitatif.

L'angle de jonction est un paramètre très important ([Zhang et Guilbert, 2013](#)) qui peut aider à déduire la direction de l'écoulement. En général, un affluent joint le cours d'eau principal ou un autre affluent formant un nouveau cours d'eau. Dans ce cas, il est facile d'obtenir l'angle. Mais il devient compliqué lorsque plusieurs cours d'eau s'écoulent vers le cours d'eau principal en un seul point de jonction. [Riazanoff et al. \(1992\)](#) a employé des techniques automatiques et a résolu pas mal de problèmes concernant les angles de confluence, le parallélisme et la densité du réseau hydrographique ([Ichoku et Chorowicz, 1994](#)).

La figure ci-dessous (Figure 30) montre différents cas des cours d'eau s'écoulant vers le cours d'eau principal en un point de jonction. Les flèches signifient la direction de l'écoulement. Le cours d'eau en gras, est celui qui a un ordre élevé par rapport les autres cours d'eau.

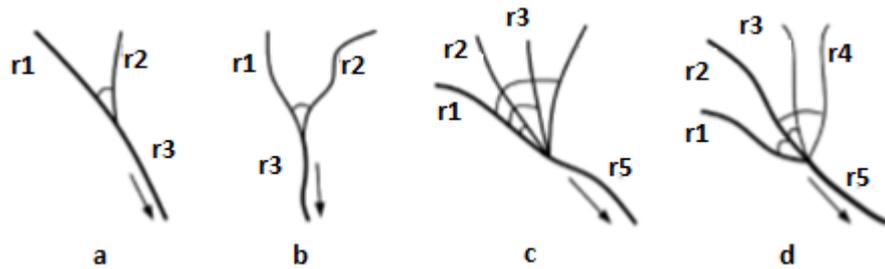


Figure 30. Différents cas des cours d'eau s'écoulant vers le cours d'eau principal en un point de jonction (Zhang et Guilbert, 2013)

2.6. Influence de la structure du réseau hydrographique sur la réponse hydrologique

La manière dont réagit le bassin versant lorsqu'il est soumis à une sollicitation se nomme réponse hydrologique. Elle peut être caractérisée spatialement totale ou partielle, temporellement rapide ou retardée (Abdeddaim, 2018).

La rapidité des réponses des bassins versants est généralement expliquée par la formation de ruissellement à la surface du sol dont le temps de transfert est court. La compréhension des phénomènes régissant le ruissellement est donc un élément clé pour l'amélioration des prévisions des crues.

La forme de l'hydrogramme de crue engendré à l'exutoire par le ruissellement est influencée par la structure du réseau hydrographique. Différentes structures du réseau hydrographique engendrent différentes formes de l'hydrogramme de crue.

Les hydrologues tirent profit de la morphométrie pour comprendre la dynamique des processus hydrologiques, par le système des réseaux hydrographiques et par des lois de développement des cours d'eau.

Les indices morphométriques classiques ont été les toutes premières mesures créées par les géomorphologues afin de quantifier l'influence théorique de la morphologie des bassins versants sur leur réponse hydrologique de surface (Douvinet et al., 2008). Les indices de forme s'attachent à décrire la forme prise par le périmètre d'un bassin. Les indices de volume servent

à décrire le relief d'un bassin et à analyser la répartition des altitudes. Les indices de réseau deviennent de plus en plus utilisés pour mesurer l'organisation hiérarchique d'un réseau hydrographique et confirmer les hypothèses de l'évolution des réseaux.

2.7. Techniques de télédétection spatiale

La télédétection regroupe toutes les connaissances et techniques, qui permettent d'observer, d'analyser, d'interpréter et de gérer des espaces géographiques terrestres (figure 31) à partir d'informations obtenues à distances sans contact direct (Mayer, 2014).

Ces techniques ont relayé celles de la bonne vieille photographie aérienne, qui a grandement modelé et amélioré nos habitudes d'inventaires des ressources naturelles, leur cartographie et le suivi de certaines catastrophes naturelles pendant au moins un siècle. La télédétection spatiale résulte de la conjonction de deux événements scientifiques :

- L'évolution dans le domaine spectral qui a permis de voir l'invisible.
- L'amélioration des méthodes d'analyse et de traitements des données dans le domaine de l'informatique.

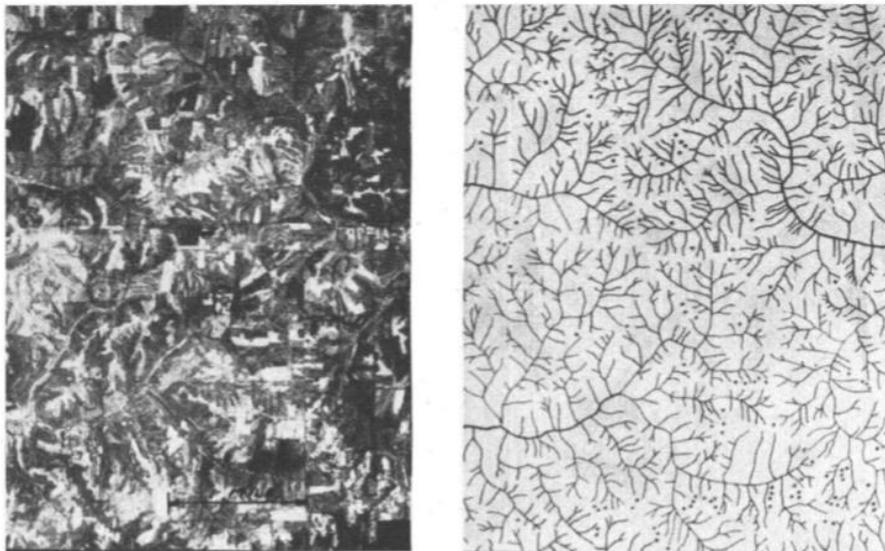


Figure 31. Exemple d'une photographie aérienne utilisée dans l'interprétation et l'identification du type du réseau de drainage (Parvis, 1950)

2.8. Conclusion

L'étude des caractéristiques des réseaux de drainage ou réseaux hydrographiques d'une région, permet de connaître et déduire la structure des cours d'eau.

En se basant sur les analyses et les interprétations faites, sur les différents réseaux hydrographiques dans différentes régions, des conclusions peuvent être données comme suit :

- Le réseau de drainage peut être classifié selon le type de base ou de base modifié.
- Il y a une forte corrélation entre les réseaux de drainage et la structure des sols et des substratums d'une région.
- Les descripteurs morphométriques sont des mesures créées en géomorphologie pour comparer les caractéristiques morphologiques des bassins versants et comprendre leur comportement.
- L'angle de jonction des cours d'eau permet d'identifier le sens de l'écoulement dans n'importe quelle structure du réseau hydrographique.

3. Méthodes d'analyse régionale en Hydrologie

3.1. Introduction

Les écoulements hydrologiques forment un continuum sur toute la surface du bassin versant. Les méthodes d'analyse hydrologique tentent d'expliquer les processus dominants dans un bassin versant pour déterminer les débits des cours d'eau. Pour des raisons pratiques, ce continuum est simplifié en chemins d'écoulement discrets pour faciliter la compréhension conceptuelle, le développement de modèles et l'analyse de données. Le nombre de chemins d'écoulement identifiés peut dépendre des caractéristiques du bassin versant et l'objectif ultime de l'analyse représentant typiquement les réponses hydrologiques quantifiées au droit d'un cours d'eau.

Les études rapportées dans la littérature scientifique se sont principalement concentrées sur la régionalisation des paramètres des bassins. La régionalisation se base sur des données issues de bassins versants jaugés, dont les performances en modélisation hydrologique sont fiables et ont été préalablement vérifiées.

Selon la disponibilité des données, on peut distinguer plusieurs méthodes :

3.2. Méthodes empiriques

3.2.1. Méthode des courbes enveloppes

Les courbes enveloppes consistent à fournir une borne maximale des débits de pointe. La figure 32 montre des courbes enveloppes de crues éclair pour différentes régions en Europe.

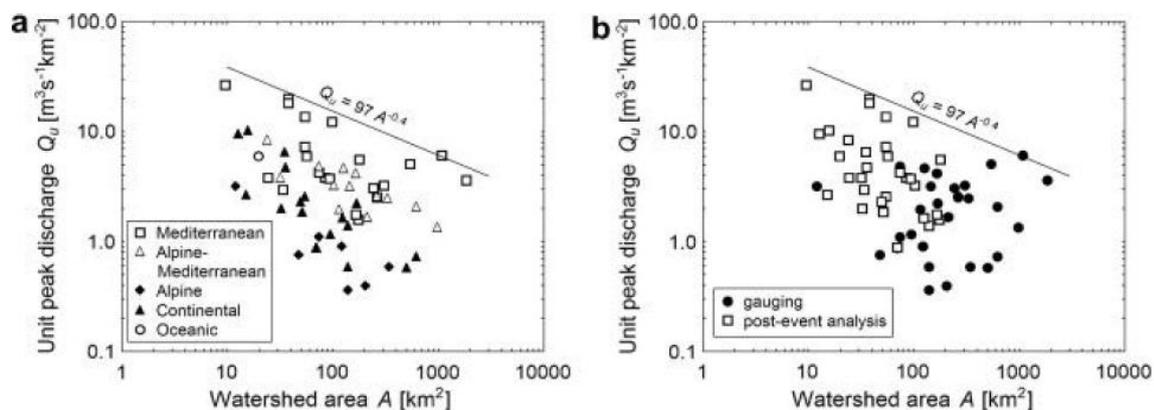


Figure 32. Variation du débit spécifique (de pointe) en fonction de la superficie du bassin versant (a) selon la localisation du bassin versant (b) la nature de la mesure (Ancy, 2012)

3.2.2. Méthode de classification des crues maximales de Francou-Rodier :

Ces mêmes auteurs (1967) ont classé plusieurs crues dans le monde et les ont représentés dans un graphique donnant $\log Q$ en fonction de $\log S$ (figure 33).

Où : Q : est le débit (m^3/s); S : est la surface du bassin versant (km^2)

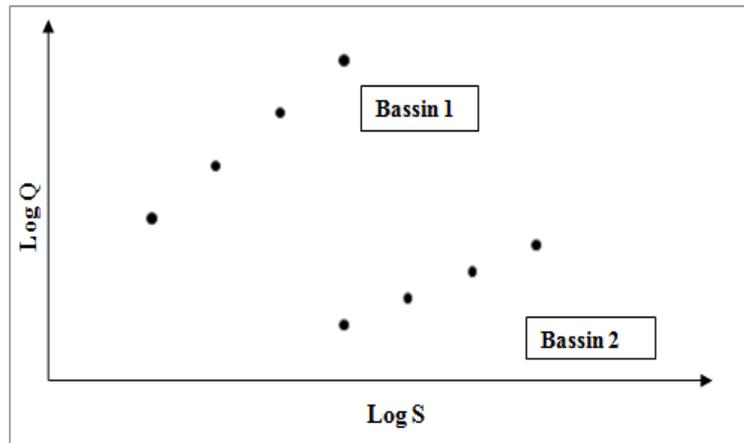


Figure 33. Représentation de la classification des crues dans le bassin versant (d'après Bois, 2000)

Les auteurs ont pu constater que les points représentés étaient d'autant plus alignés que la région d'étude était homogène.

3.3. Méthode de statistique multivariée

L'application de techniques environnétriques telles que l'analyse typologique ou de groupe (AC), l'analyse en composantes principales (ACP), l'analyse factorielle (AF) et l'analyse discriminante (AD) a augmenté de manière significative ces dernières années pour divers domaines afin d'esquisser des informations utiles. Ces outils sont également utilisés pour étudier les facteurs hydrologiques et les voies d'écoulement des eaux.

L'analyse en composantes principales (ACP) a été utilisée dans diverses études pour réduire le nombre de variables nécessaires à la description de la variation observée au sein des ensembles de données (Mustapha et al. 2014, Bouguerne et al., 2016). La combinaison de l'ACP et l'AF en tant que technique de réduction de données est largement utilisée, en vue de détecter, en particulier, les similitudes entre les échantillons et /ou variables (Mendiguchia et al. 2007 ; Wang et al. 2012).

3.4. Méthodes de régionalisation

3.4.1. Régionalisation par régression linéaire multiple

La régionalisation par régression est l'une des plus anciennes méthodes de régionalisation des paramètres. Cette méthode consiste à mettre en lumière des relations liant les descripteurs physiques, morphologiques ou climatiques des bassins versants aux paramètres calibrés du modèle hydrologique utilisé (Oudin et al., 2008). Pour que cette méthode fonctionne bien, il doit exister une relation fiable entre la valeur des paramètres et les caractéristiques du bassin, et les descripteurs doivent permettre de bien comprendre le comportement des bassins versants non-jaugés. Le paramètre de l'élévation moyenne du bassin versant est un paramètre qui apporte beaucoup d'information quant au comportement hydrologique des bassins versants (Kokkenan et al., 2003).

3.4.2. Proximité spatiale

Cette méthode consiste à identifier les bassins versants les plus rapprochés spatialement. Des études ont trouvé que la méthode de proximité spatiale procurait généralement de bons résultats lorsque le secteur à l'étude disposait d'un réseau dense de bassins versants (Merz et Blöschl, 2004; Paparakja et al 2005). Dans une région dense de bassins versants, les ensembles de paramètres devraient être sensiblement égaux ou sont jugés comme étant différents simplement en raison de facteurs aléatoires (Viviroli et al., 2009).

3.4.3. Similitude physique

Plusieurs descripteurs (ou caractéristiques physiques ou climatiques) ont été utilisés pour représenter les caractéristiques des bassins versants. Chaque bassin versant possède des caractéristiques physiques qui lui sont propres. Qu'il s'agisse des sols qui le composent, de l'utilisation du sol, de sa superficie, de sa pente ou encore de son altitude moyenne, chacune des caractéristiques a une influence sur les schémas d'écoulement ainsi que sur la réponse hydrologique d'un bassin versant (Breton-Dufour, 2017). La méthode de régionalisation basée sur la similitude physique repose sur l'hypothèse que les bassins dont les caractéristiques physiques sont similaires devraient réagir de la même façon. Globalement, les descripteurs le plus fréquemment utilisés sont les informations physiographiques, telles que l'aire de drainage, l'élévation moyenne et la pente du bassin ou du cours d'eau principal, ainsi que les paramètres météorologiques comme les moyennes annuelles ou journalières des précipitations et des

températures. D'autres descripteurs sont utilisés moins souvent, comme l'évaporation moyenne annuelle, les différents types du sol. L'élévation moyenne des bassins versants est considérée comme étant un descripteur important à considérer dans l'analyse par similitude physique puisque celui-ci a un impact sur plusieurs processus hydrologiques et climatiques (Parajka et al., 2013).

3.5. Conclusion

Ce chapitre avait pour but de parler, en général, des différentes méthodes d'analyse régionale en Hydrologie dont on cite les méthodes empiriques, les méthodes de statistiques multivariée et les méthodes de régionalisation.

DEUXIEME PARTIE : ANALYSE DES DES DONNEES

Chapitre 4 : Présentation de la zone d'étude

**Chapitre 5 : Fonctionnement hydrologique des bassins versants à
réseaux hydrographiques différents**

4. Présentation de la région d'étude

4.1. Introduction

Le choix de cette région se justifie par l'enjeu de la présente étude, à savoir distinguer le fonctionnement hydrologique sur différents réseaux hydrographiques et au vu de la qualité et la quantité des résultats des études effectuées dans le passé et récemment (Mébarki, 2005 ; Abdeddaim, 2018). L'espace considéré est suffisamment hétérogène, marqué par une diversité géomorphologique et climatologique.

Ce quatrième chapitre définit le contexte des bassins versants de la région du Nord-Est de l'Algérie et en précise les différentes particularités du cadre physique (la géologie, la lithologie, la morphologie...) qui interfèrent dans la genèse de l'écoulement.

4.2. Contexte général de la région d'étude

Afin de promouvoir une meilleure gestion de la ressource en eau, dès 1996 le territoire algérien a été découpé en cinq (05) régions (figure 34):

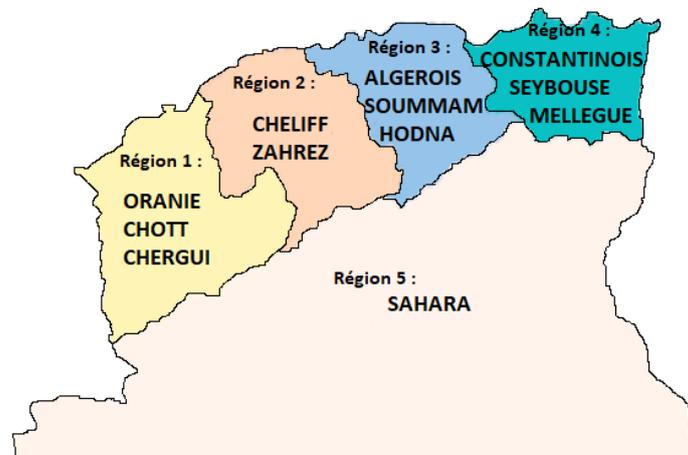


Figure 34. Découpage de l'Algérie en régions hydrographiques (PNE, 2010)

L'étude s'est intéressée à la région hydrographique Constantinois-Seybouse-Mellegue (CSM), qui est située au Nord-Est de l'Algérie. Elle est limitée au Nord par la mer méditerranée, au Sud par la région hydrographique du Sahara (spécifiquement par le bassin du Chott Melrhir codé 06), à l'Est par la frontière tunisienne et à l'Ouest par la région hydrographique des Côtiers Algérois-Soummam-Hodna (par le bassin de la Hodna codé 05, le bassin du Soummam codé 15 et celui du Côtier Algérois codé 02).

Elle s'étend sur une superficie de 43 796 Km², et englobe 14 wilayas. Neuf wilayas en totalité : Jijel, Mila, Skikda, Guelma, Annaba, El-Tarf, Souk Ahras et Oum El Bouaghi. Cinq wilayas partiellement : Bejaia, Sétif, Batna, Khenchela et Tebessa.

Cette région est constituée de cinq grands bassins versants (figure 35): Côtiers Constantinois Est, Centre et Ouest (code 03), Hauts Plateaux Constantinois (code 07), Kebir-Rhumel (code 10), Medjerda-Mellegue (code 12) et Seybousse (code 14) (tableau 1).

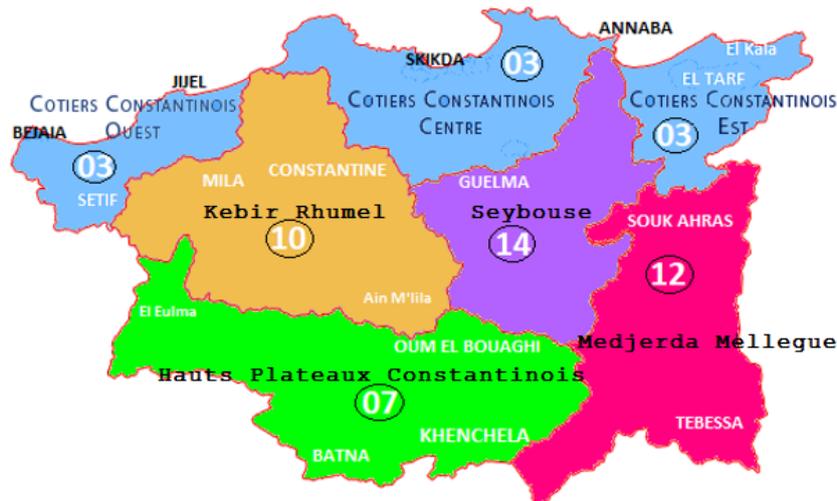


Figure 35. Bassins versants de la région Constantinois-Seybousse-Mellegue du Nord-Est de l'Algérie (ABH-CSM, 2001)

La figure 36 présente les sous bassins de la région d'étude.



Figure 36. Délimitation des sous bassins-versants (ABH-CSM, 2011 ; Abdeddaim, 2018)

Tableau 2. Codes, noms des bassins versants et nombres des sous bassins versants, de la région Nord-Est d'Algérie

Code BV	Nom BV	Nombre SBV
03	BASSIN DES COTIERS CONSTANTINOIS	18
07	BASSIN DES HAUTS PLATEAUX CONSTANTINOIS	07
10	BASSIN DU KEBIR RHUMEL	07
12	BASSIN DE LA MEDJERDA MELLEGUE	05
14	BASSIN DE LA SEYBOUSE	06

4.2.1. Bassin des Côtiers Constantinois (03)

Le bassin hydrographique Côtiers Constantinois est situé dans le littoral Nord de l'Est Algérien, limité au Nord par la Méditerranée, à l'Est par la frontière Tunisienne, à l'Ouest par la région hydrographique Algérois-Hodna-Soummam et au Sud par les bassins Kebir Rhumel, Seybouse et Medjerda. Il couvre une superficie totale de 11119 Km². Le bassin des Côtiers Constantinois couvre dix wilayas : Bejaia, Jijel, Skikda, Annaba, El Tarf, Setif, Mila, Constantine, Guelma et Souk Ahras.

En allant de la frontière Tunisienne vers l'Ouest, les principaux cours d'eau rencontrés sont l'Oued Mafragh, formé de la conjonction des Oueds Kebir-Est et Bounamoussa, l'Oued Kebir-Ouest, l'Oued Saf-Saf, l'Oued Guebli, l'Oued Djendjen et l'Oued Agrioun (figure 37). L'exutoire de ces oueds est la mer méditerranée (un bassin septentrional de type exoréique).

Le bassin versant Côtiers Constantinois est composé de trois bassins versants : Côtiers Ouest, Côtiers Centre et Côtiers Est. Le Côtier Est est limité au Nord par la mer méditerranée, au Sud par le bassin de Medjerda Mellegue, à l'Est par la frontière tunisienne et à l'Ouest par le bassin de la Seybouse. Le Côtier Centre est limité par la mer méditerranée au Nord, par a Seybouse et le bassin du Kebir Rhumel au Sud, à l'Est par la Seybouse et à l'Ouest par le Kebir Rhumel. Le Côtier Ouest est limité par la mer méditerranée au Nord, par le Kebir Rhumel au Sud et à l'Est et par la région du Côtier Algérois-Soummam-Hoda à l'Ouest.

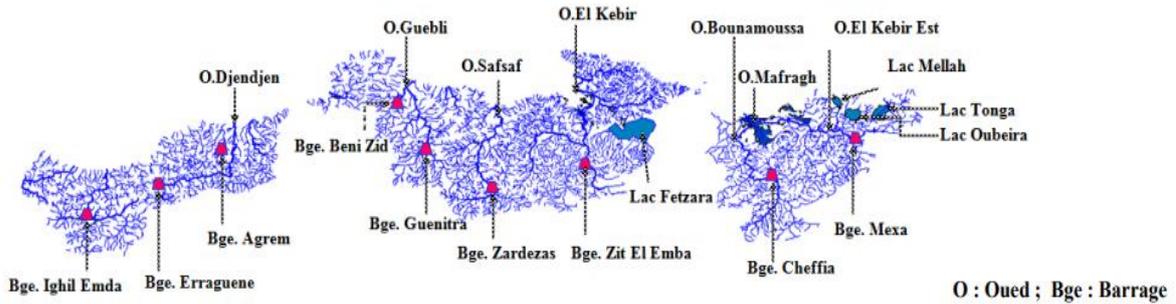


Figure 37. Réseau hydrographique du bassin des Côtiers Constantinois (Abdeddaim, 2018)

4.2.2. Bassin des Hauts Plateaux Constantinois (07)

Le bassin versant des Hauts Plateaux Constantinois s'étend sur une superficie de 9615 Km², le bassin est limité au Nord par le bassin du Kebir Rhumel et la Seybouse, au Sud par le bassin du Chott Melrhir, à l'Ouest par celui de la Soummam, et de Hodna et à l'Est par le bassin de la Medjerda.

Le bassin des hauts plateaux constantinois couvre cinq wilayas : Oum El Bouaghi, Khenchela, Mila, Sétif et Batna.

Ce bassin versant se caractérise par la présence de plusieurs zones endoréiques (Chott el Beïda, Chott el Faraine, Sebkheth el Hamiet, Sebkheth Ez Zemoul, Garaet el Marhsel, Garaet Ank Djemel, Garaet Guellif et Garaet,...etc) (figure 38).

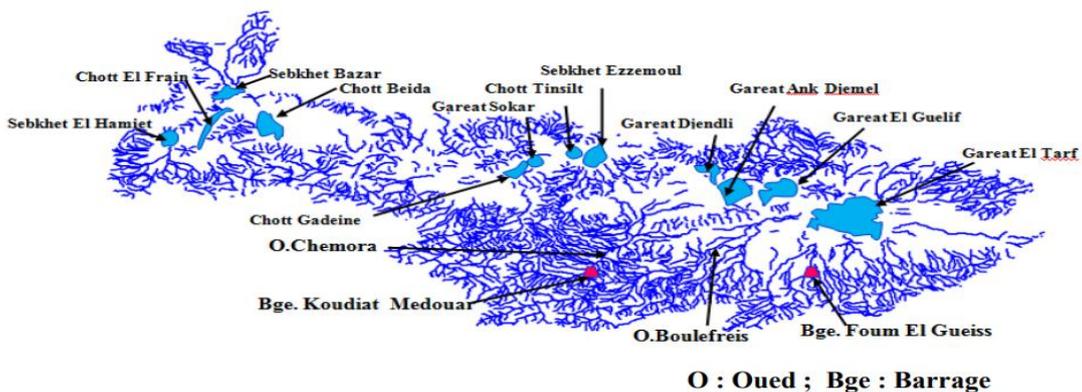


Figure 38. Réseau hydrographique des Hauts Plateaux Constantinois (Abdeddaim, 2018)

4.2.3. Bassin du Kebir Rhumel (10)

Le bassin versant du Kebir-Rhumel s'étend sur une superficie de 8825 Km². Le bassin est limité au Nord par le bassin des Côtiers Constantinois Centre et Ouest, au Sud par le bassin des Hauts

Plateaux Constantinois, à l'Ouest par le bassin de la Soummam, et à l'Est par le bassin de la Seybouse.

Le bassin du Kebir-Rhumel couvre six wilayas : Oum El Bouaghi, Skikda, Constantine, Mila, Sétif et Jijel. Il comprend trois grands oueds : Boumerzoug, Rhumel, Enndja, Kebir (figure 39). La confluence de l'Oued Enndja avec le Rhumel forment l'Oued Kebir qui coule profondément au milieu des imposants massifs du Tell, puis s'élargit à la faveur de la vallée alluviale littorale. C'est un bassin de type exoréique.

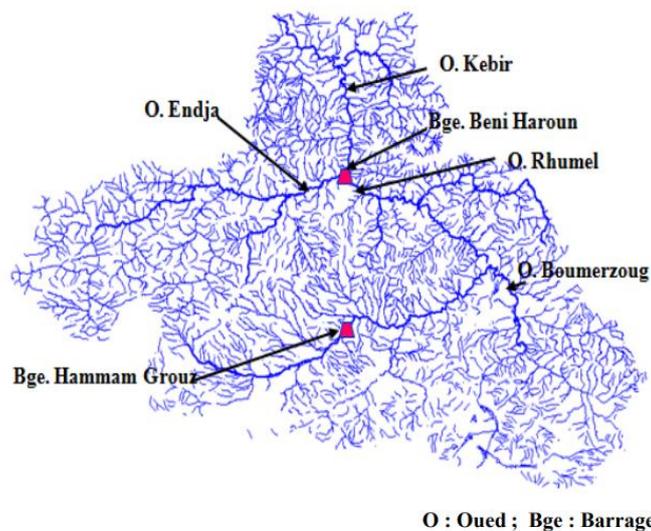


Figure 39. Réseau hydrographique du bassin du Kebir Rhumel (Abdeddaim, 2018)

4.2.4. Bassin de la Medjerda Mellegue (12)

Situé aux confins Algéro-Tunisiens, d'une superficie de 7758 km² (partie Algérienne), le bassin Medjerda-Mellegue est limité au Nord par le bassin du Côtier Constantinois Est, à l'Est par la Tunisie, à l'Ouest par le bassin de la Seybouse et des Hauts Plateaux Constantinois et au Sud par le bassin du Sahara. Le bassin de la Medjerda couvre cinq wilayas : Souk Ahras, Tebessa, Khenchela, Oum El Bouaghi et Guelma.

Le bassin de la Medjerda Mellegue englobe cinq sous bassins versants, présentant un chevelu hydrographique moins développé, moins dense et exoréique. Il comprend quatre grands oueds : Medjerda, Chabro, Meskiana et Mellegue (figure 40).

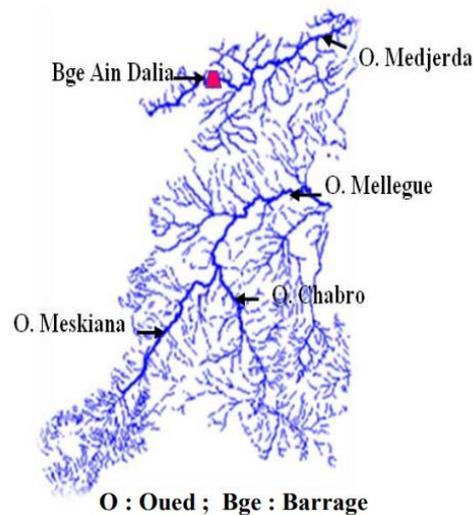


Figure 40. Réseau hydrographique du bassin de la Medjerda Mellegue (Abdeddaim, 2018)

4.2.5. Bassin de la Seybouse (14)

Il s'étend sur une superficie de 6452 Km². Le bassin est limité au Nord par le bassin versant des Côtiers Constantinois Centre et Est, au Sud par le bassin des hauts plateaux Constantinois, à l'Ouest par le bassin de Kebir-Rhumel, et à l'Est par le bassin de la Medjerda.

Le bassin de la Seybouse couvre sept wilayas : Oum El Bouaghi, Skikda, Annaba, El Tarf, Constantine, Guelma, Souk Ahras.

Le bassin de la Seybouse remembre six sous bassins versants présentant un chevelu hydrographique très ramifié et dense, il comprend trois grands oueds : Cherf Bouhamdane, Seybouse. C'est un bassin septentrional, de type exoréique (figure 41).

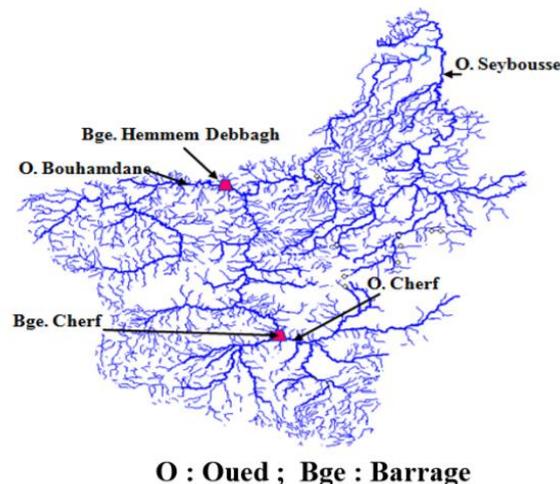


Figure 41. Réseau hydrographique du bassin de la Seybouse (Abdeddaim, 2018)

4.3. Contexte hydro-géomorphologique et climatique

4.3.1. Altitudes

Les altitudes augmentent en allant du Nord vers le Sud de la zone d'étude. On peut classer les altitudes en se basant sur la carte altimétrique ci-dessous comme suit (figure 42):

- Bassin du Côtier Constantinois Est : 0 à 800 m.
- Bassin du Côtier Constantinois Centre : 0 à 800 m.
- Bassin du Côtier Constantinois Ouest : 0 à 1200 m.
- Bassin des Hauts Plateaux Constantinois : 1200 à 2200 m.
- Bassin du Kebir Rhumel : 0 à 1200 m.
- Bassin de la Seybouse : 0 à 2200 m.
- Bassin de la Medjerda Mellegue : 800 à 2200 m.

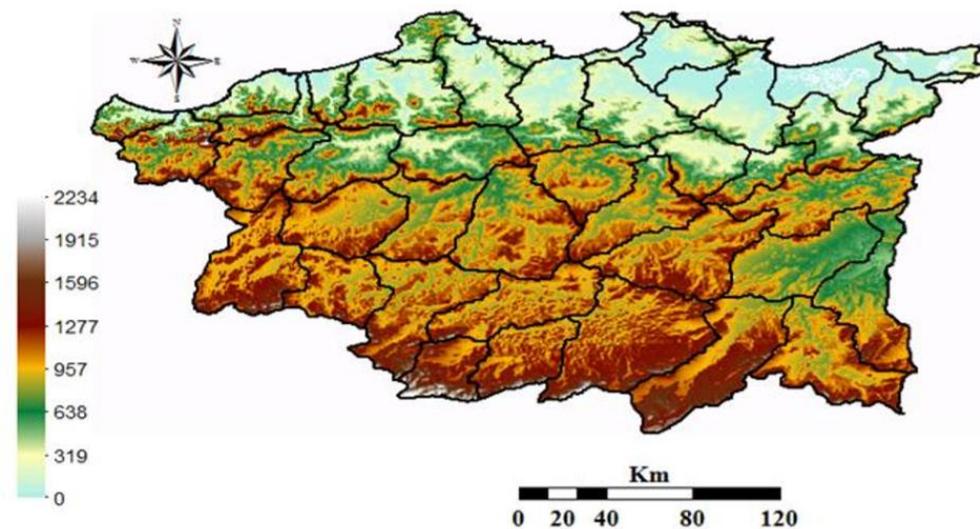


Figure 42. Carte altimétrique (BNEDER, 2010 ; Abdeddaim, 2018)

4.3.2. Pentés

Les pentes sont subdivisées en quatre classes (figure 43) :

- Classe 1 : $0\% \leq \text{Pente} \leq 5\%$. Cette classe représente les zones à faible et moyenne altitude. Ces pentes caractérisent les régions du Côtier Constantinois Est et celles du Nord de la Seybouse ainsi que la partie Sud de la Medjerda Mellegue et la bande centrale des Hauts Plateaux Constantinois.
- Classe 2 : $5\% \leq \text{Pente} \leq 15\%$. Cette classe se caractérise par la bande qui se trouve entre le Nord et le Sud de la région d'étude.

- Classe 3 : $15\% \leq \text{Pente} \leq 35\%$. Cette classe couvre les zones à altitude plus ou moins élevée, spécifiquement les zones du Centre et de l'Est de la région d'étude (Sud du Kebir Rhumel, de la Seybouse et le sous bassin du Nord de Medjerda Mellgue).
- Classe 4 : $\text{Pente} > 35\%$. Cette classe concerne les zones montagneuses où les altitudes sont importantes au Sud (Bassin des Hauts-Plateaux Constantinois), au Nord (Bassin des Côtiers Constantinois, du Kebir Rhumel) et les sous bassins du Nord de la Medjerda Mellgue, Sud de la Seybouse. Ces zones sont caractérisées par un potentiel de ruissellement élevé (figure 43).

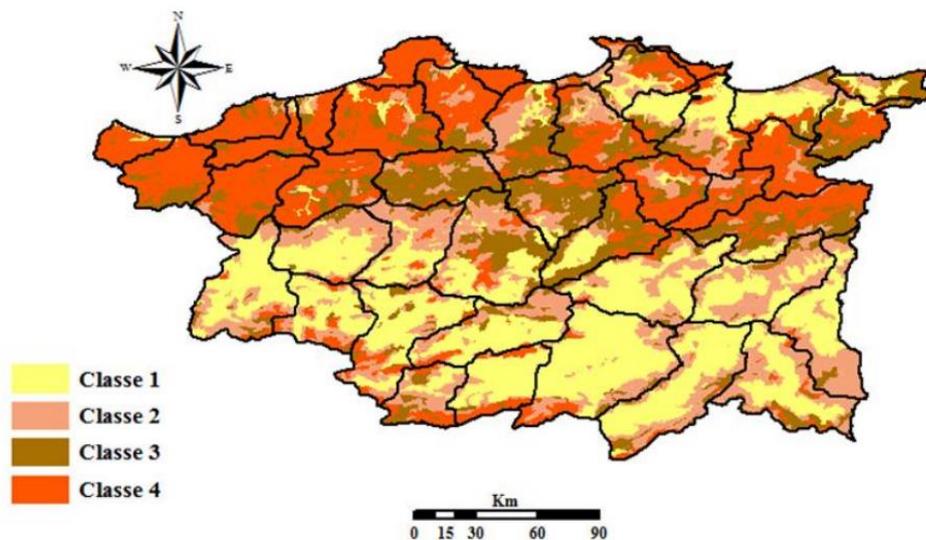


Figure 43. Carte des pentes (BNEDER, 2010 ; Abdeddaim, 2018)

4.3.3. Lithologie

Les bassins du Nord-Est se caractérisent par différents types de roches (figure 44) :

- Bassin du Côtier Constantinois Est : Marnes, Gneiss, Alluvions, Sable, Flysch et Calcaire.
- Bassin du Côtier Constantinois Centre : Alluvions, Sables, Gneiss, Grès, Flysch, Marnes, Granite, Schistes, Calcaire et Argile.
- Bassin du Côtier Constantinois Ouest : Granite, Flysch, Conglomérat, Gneiss, Alluvions, Sable, Grès, Marnes, Calcaire et Dolomite.
- Bassin des Hauts Plateaux Constantinois : Sebka, Alluvions, Sable, Calcaire, Argile, Grès, Dolomite, Marnes et Conglomérat.

- Bassin du Kebir Rhumel : Gneiss, Schistes, Conglomérat, Flysch, Alluvions, Sable, Marnes, Calcaire, Dolomite et Argile.
- Bassin de la Seybouse : Marnes, Alluvions, Sable, Calcaire, Dolomite, Gypse et Argile.
- Bassin de la Medjerda Mellegue : Marnes, Argile, Gypse, Alluvions et Sable.

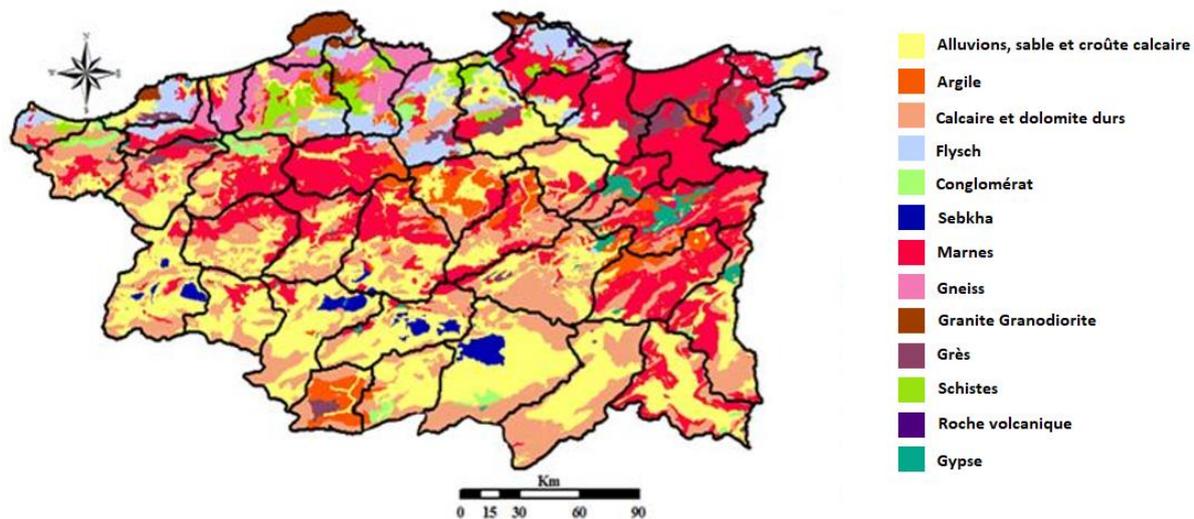


Figure 44. Carte lithologique (BNEDER, 2010 ; Abdeddaim, 2018)

4.3.4. Occupation du sol

Le couvert végétal de la région d'étude offre une grande diversité spatiale qui est influencée par le modelé des terres et les écarts climatiques induits par la proximité du Sahara au Sud et de la mer méditerranée au Nord (figure 45).

- Bassin du Côtier Constantinois Est et Centre : zones agricoles, forêts, plans d'eau et maquis arboré
- Bassin du Côtier Constantinois Ouest : zones agricoles, forêt et maquis arboré.
- Bassin des Hauts Plateaux Constantinois : zones agricoles, reboisement, plans d'eau, arboculture et halophytes.
- Bassin du Kebir Rhumel : zones agricoles, forêt, plans d'eau, maquis arboré et reboisement.
- Bassin de la Seybouse : zones agricoles, forêt, maquis arboré, alfa, parcours steppiques et reboisement.

- Bassin de la Medjerda Mellegue : zones agricoles, forêt, parcours steppiques, alfa, reboisement, halophytes et maquis arboré.

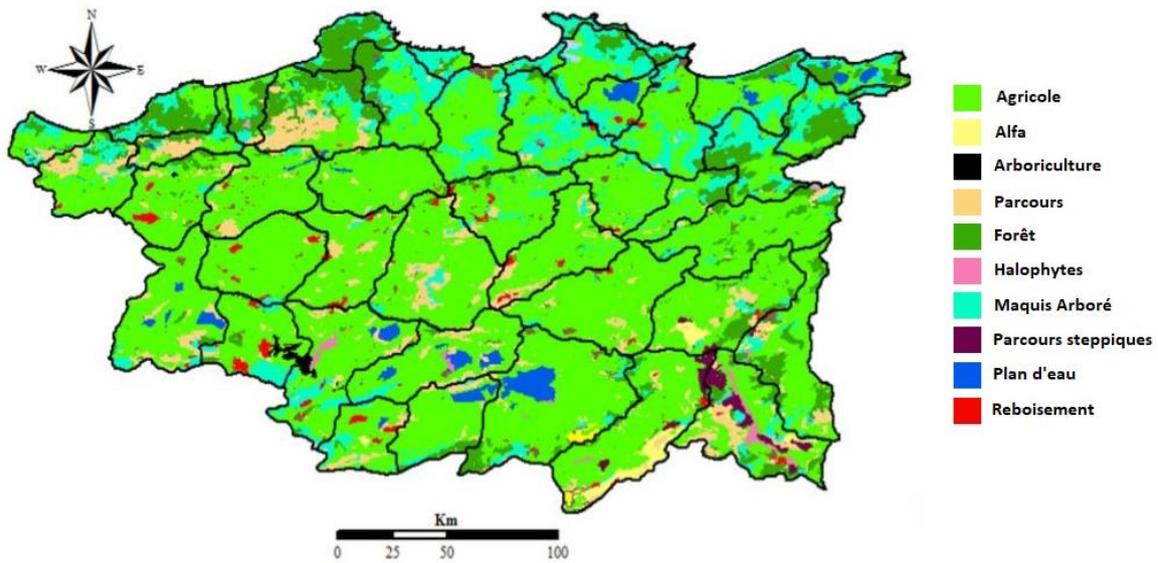


Figure 45. Carte d'occupation du sol (BNEDER, 2010 ; Abdeddaim, 2018)

4.3.5. Climat

La climatologie de la région d'étude présente dans l'ensemble les mêmes caractéristiques que celles du climat méditerranéen, qui se distingue par un hiver froid et humide et un été chaud et sec. On distingue quatre étages bioclimatiques (figure 46).

- Bassin des Côtiers Constantinois : climat humide à sub-humide.
- Bassin des Hauts Plateaux Constantinois : climat sub-humide à aride.
- Bassin du Kebir Rhumel : climat humide à semi-aride.
- Bassin de la Seybouse : climat humide à semi-aride.
- Bassin de la Medjerda Mellegue : climat sub-humide à semi-aride.

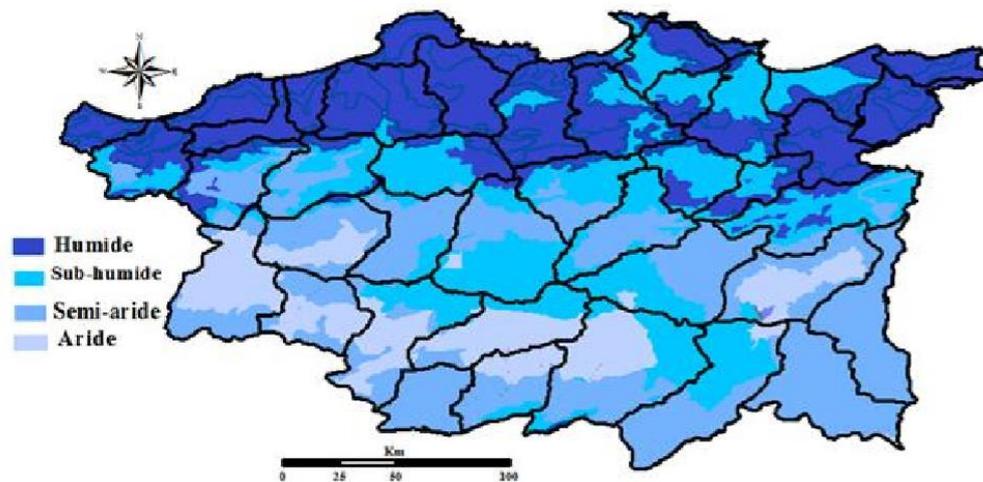


Figure 46. Carte Climatologique (BNEDER, 2010 ; Abdeddaim, 2018)

4.3.6. Précipitations

La carte des précipitations présente un intérêt scientifique, dans les études des régimes pluviométriques. Elle se place en amont de toutes les études relatives au fonctionnement hydrologique. En effet, elle demeure le facteur le plus important dans la détermination des régimes hydrologiques des cours d'eau.

Les précipitations du Nord-Est Algérien se caractérisent par une forte variabilité spatiotemporelle (figure 47).

- Bassin du Côtier Constantinois Est : 600 à 1200 mm.
- Bassin du Côtier Constantinois Centre : 700 à 2000 mm.
- Bassin du Côtier Constantinois Ouest : 800 à 2000 mm.
- Bassin des Hauts Plateaux Constantinois : 300 à 500 mm.
- Bassin du Kebir Rhumel : 400 à 1500 mm.
- Bassin de la Seybouse : 400 à 1100 mm.
- Bassin de la Medjerda Mellegue : 300 à 800 mm.

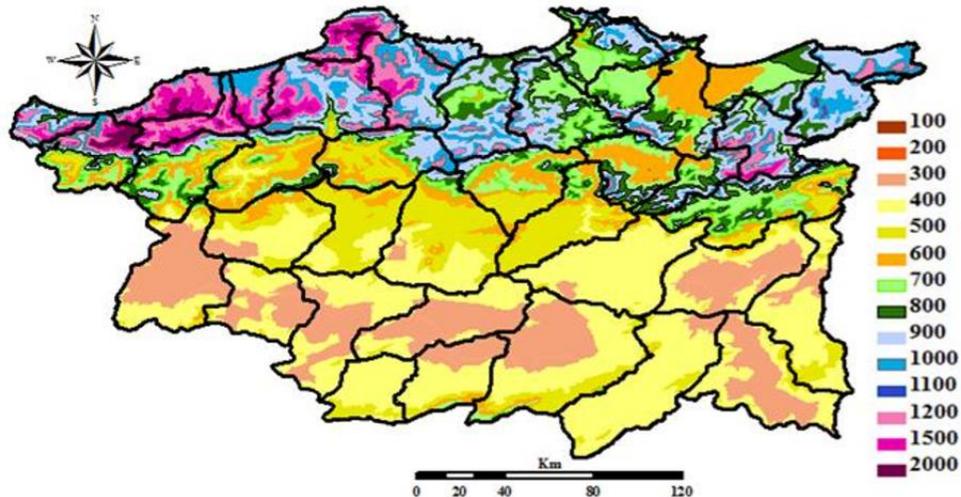


Figure 47. Cartes des précipitations annuelles (BNEDER, 2010 ; Abdeddaim, 2018)

4.4. Contexte hydrographique

L'agencement du réseau devient fondamental pour considérer le chemin et le temps de transit depuis les zones sources jusqu'à l'exutoire. Ils constituent un des principaux agents de structuration du relief. Sur le plan hydrologique, les réseaux hydrographiques drainent les écoulements de surface et de sub-surface et accélèrent les transferts de volume d'eau au sein des bassins (Abdeddaim, 2018). Ils constituent à ce titre l'un des paramètres importants dans la génération des pics de crue. Ils sont l'une des composantes principales de la réponse hydrologique d'un bassin versant aux précipitations.

4.4.1. Endoréisme

Les Hauts Plateaux Constantinois se caractérisent par un réseau hydrographique endoréique, contrairement aux autres bassins de la région qui se caractérisent par un réseau hydrographiques exoréique (figure 48).

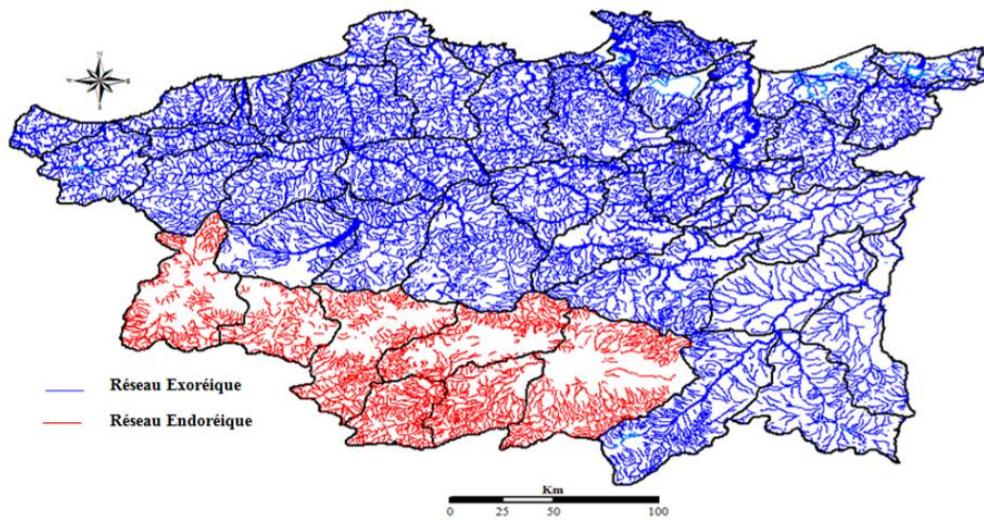


Figure 48. Bassins versants endoréiques et exoréiques de la région d'étude (Abdeddaim, 2018)

4.4.2. Longueur du cours d'eau

Le contexte hydrographique indique que les plus longs cours d'eau sont : Kebir-Rhumel, Seybouse et Mellegue (figure 49).

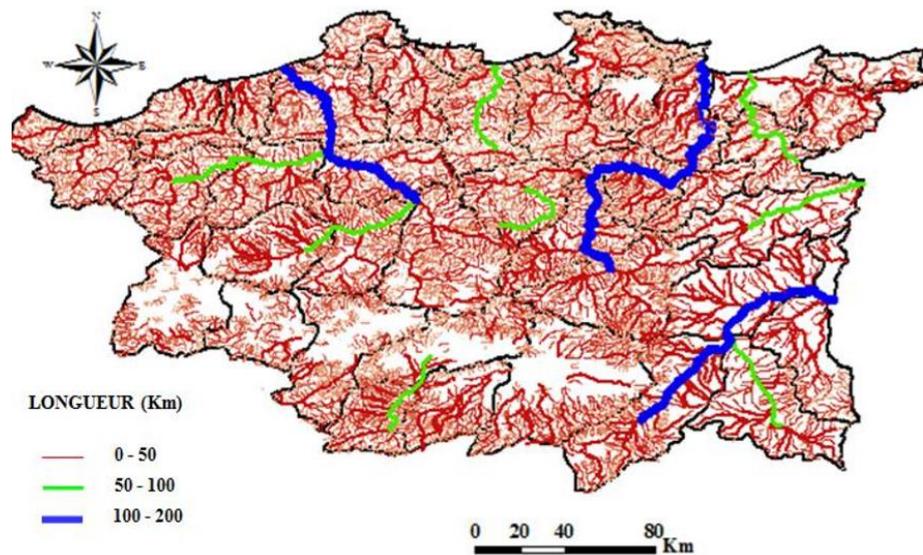


Figure 49. Réseaux hydrographiques selon la longueur du cours d'eau (Abdeddaim, 2018)

4.4.3. Nature du cours d'eau

Les cours d'eau permanents sont ceux du Côtier Constantinois Ouest et Est. Le reste des cours d'eau sont temporaires (figure 50).

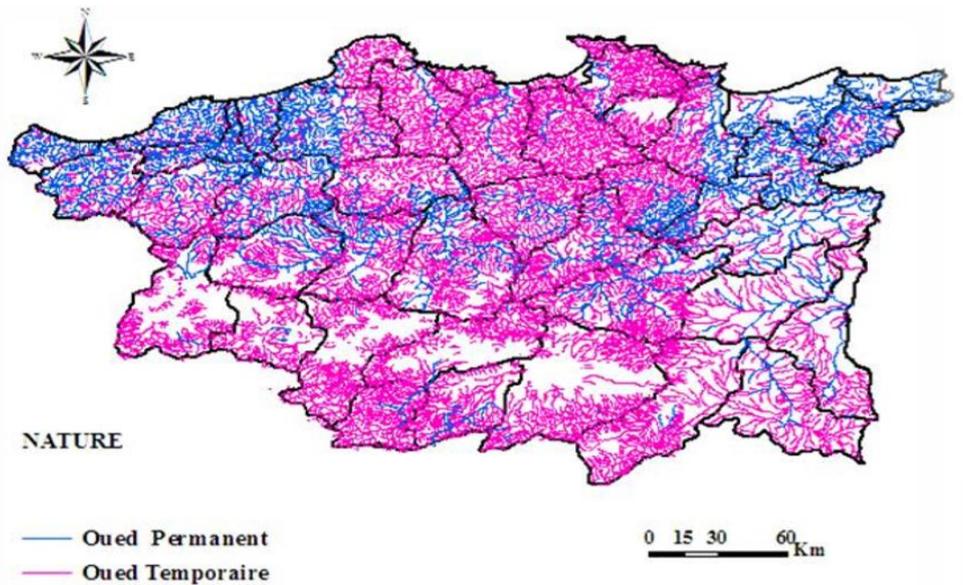


Figure 50. Réseaux hydrographiques selon la nature du cours d'eau (Abdeddaim, 2018)

4.4.4. Ordre du cours d'eau

Les ordres des cours d'eau les plus élevés sont (figure 51) :

- Ordre $i = 6$, Kebir Rhumel ; El Kebir ; Seybouse ; Mafragh et Boulfreiss.
- Ordre $i = 5$, Mellegue ; Djendjen ; Guebli ; Safsaf ; Bounamoussa ; Kebir Est ; Bouhamdane ; Maleh ; Endja ; Rhumel amont et aval ; Boumerzoug ; Chemora et Boulhilet.

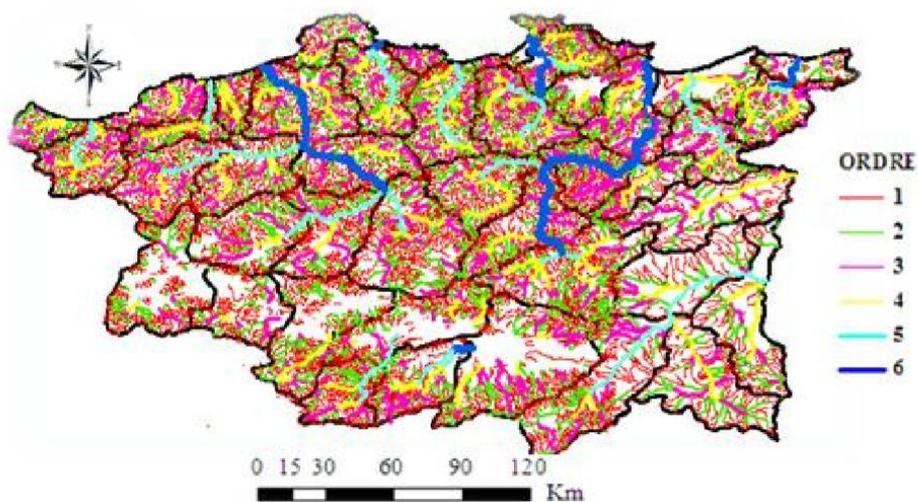


Figure 51. Réseaux hydrographiques selon l'ordre du cours d'eau (Abdeddaim, 2018)

4.4.5. Type de drainage

Les éléments du réseau hydrographique, dépendent de la structure, de la géologie et du relief. Le type, qui en résulte à une grande influence sur la propagation et la composition de l'onde de crue (figure 52).

- Bassin de la Seybouse et du Côtier Constantinois Est : réseau **dendritique**.
- Bassin du Côtier Constantinois Centre : **dendritique** sauf le sous bassin 0314 qui est **parallèle** et le sous bassin 0306 qui est **rectangulaire**.
- Bassin du Côtier Constantinois Ouest : **rectangulaire** sauf les sous bassins 0304 et 0305 qui sont **dendritiques**.
- Bassin de la Medjerda Mellegue : **dendritique** sauf le sous bassin 1204 qui est **parallèle**.
- Bassin des Hauts Plateaux Constantinois : **multi-bassins** sauf les sous bassin 0707 et 0704 qui sont **parallèles** et le sous bassin 0706 qui est **dendritique**.
- Bassin du Kebir Rhumel : **dendritique** sauf le sous bassin 1007 qui est **rectangulaire** et le sous bassin 1003 qui est **parallèle**.

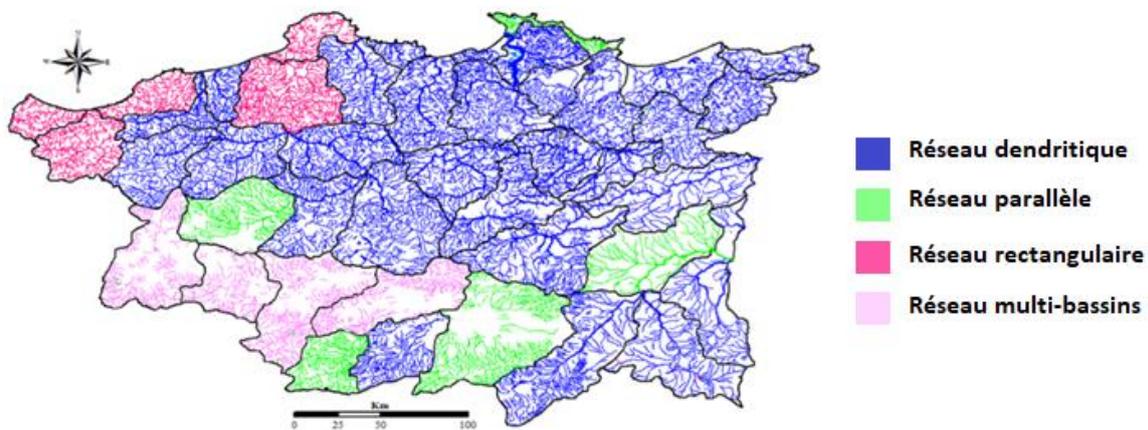


Figure 52. Réseaux hydrographiques selon le type de drainage (Abdeddaim, 2018)

4.5. Conclusion

La description de la région d'étude a montré l'intérêt de cette zone. A travers ces contextes géographiques, hydro-géomorphologique et climatiques, on tentera de comprendre le comportement hydrologique des bassins versants ayant différentes structures des réseaux hydrographiques de leurs cours d'eau.

5. Fonctionnement hydrologique des bassins versants à réseaux hydrographiques différents

5.1. Introduction

On admet qu'il existe une grande variété de fonctionnements hydrologiques et donc de processus de l'écoulement (Chevallier et al. 1990 ; Musy et Higy. 1998). Il nous paraît important d'en présenter les principaux traits dans cette analyse. Ces processus font intervenir l'ensemble du système constitué par l'eau, le sol, la végétation et le climat. Ils sont en général décrits sur l'entité géomorphologique que constitue le versant.

Ce chapitre a pour but la présentation des résultats obtenus par l'outil informatique et l'interprétation de ces derniers afin de mieux comprendre les écoulements dans un réseau hydrographique et l'influence du changement de sa structure sur la réponse hydrologique à l'exutoire.

5.2. Programmation en R

Le logiciel R, dans notre étude, est utilisé pour deux buts. Le premier est pour la réalisation de l'ACP et le deuxième est pour la simulation du débit écoulé à l'exutoire dans divers types de réseau hydrographique. Quelques définitions concernant cet outil informatique sont nécessaires afin de bien comprendre son mode de travail.

5.2.1. Historique

Ross Ihaka et Robert Gentleman proposent un langage pour l'analyse de données et les graphiques qu'ils nomment R et il a été réalisé pour la première fois en 1993 (Goulet, 2016). La version utilisée pour notre étude est R 3.4.3 (2017).

5.2.2. Description sommaire de R

R est un environnement intégré de manipulation de données, de calcul et de préparation de graphiques. Toutefois, ce n'est pas seulement un « autre » environnement statistique, mais aussi un langage de programmation complet et autonome.

R est un langage interprété, c'est-à-dire qu'il nécessite un interprète pour exécuter les commandes, et n'a pas de phase de compilation. Il existe plusieurs façons de travailler avec R: soit directement dans la console (qui est un interprète), soit dans une fenêtre de script (R Editor). La seconde méthode est fortement conseillée, puisqu'elle permet de sauvegarder le

code et d'y accéder facilement pour une utilisation ultérieure (figure 52). Le symbole # indique à R de ne pas évaluer le code qui suit, jusqu'à la fin de la ligne. Il permet donc de placer des lignes en commentaires (Gallic, 2015).

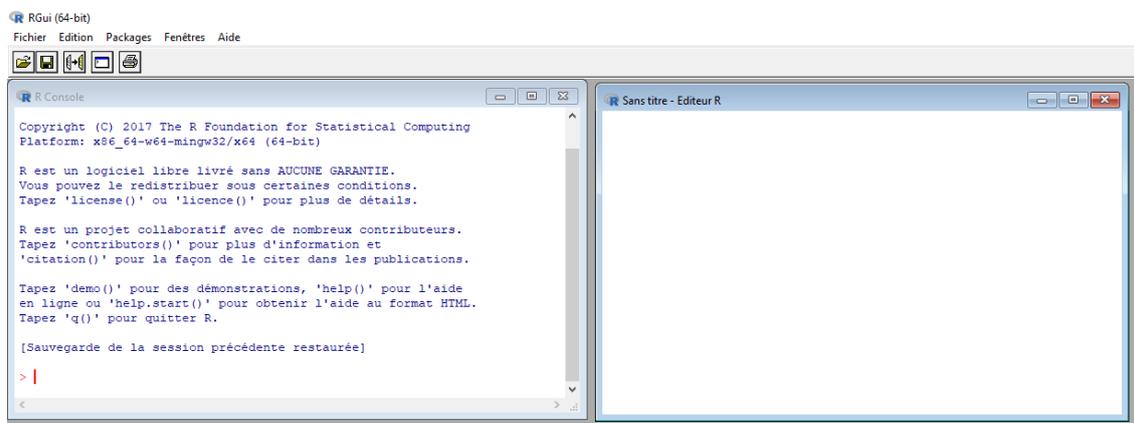


Figure 53. Console et fenêtre de script sous Windows

5.2.3. Packages de R

Les fonctions de base de R sont contenues dans un package nommé base. Celui-ci est chargé automatiquement à l'ouverture de R, en même temps qu'une poignée d'autres. Les packages sont des jeux de fonctions, accompagnés de fichiers d'aides, parfois de jeux de données, qui sont mis à disposition des utilisateurs (Gallic, 2015).

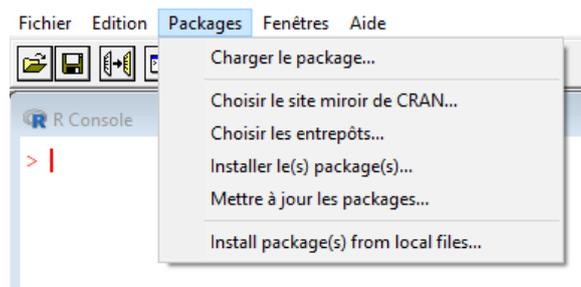


Figure 54. Charger, Installer ou mettre à jour les Packages de R

Les fonctions qui ne sont pas dans les packages en mémoire nécessitent d'être chargées. Mais avant de pouvoir le faire, encore faut-il que le package soit installé. Si ce n'est pas le cas, il suffit de faire appel à l'instruction `install.packages()`, puis de choisir, selon l'éditeur utilisé, un site miroir. Par exemple, pour installer le package `ggplot2`, qui permet de réaliser des graphiques plus ou moins sophistiqués, l'instruction est la suivante :

```
install.packages("ggplot2")
```

Pour charger le package en mémoire et ainsi avoir accès aux fonctions que celui-ci contient, l'instruction est `library()`.

```
library("ggplot2")
```

5.2.4. Importation des fichiers dans R

Il existe plusieurs types de fichiers que R peut importer, mais pour le cas de cette étude, on travaille avec les fichiers Excel de type (.csv) pour faciliter l'importation des tableaux des données en utilisant les fonctions `read.table` et `data.frame`.

```
> data<-read.table(file.choose(), header=T, sep=";")
```

Une fois le fichier spécifié est choisi depuis un répertoire sous Windows, le résultat est affiché par la suite sous forme d'un tableau.

5.3. Application de la méthode ACP pour le choix des sous bassins de différentes structures du réseau hydrographique

La méthode ACP a été appliquée, afin de déterminer les affinités entre les descripteurs, forme-réseau-volume, des sous bassins versants du Nord-Est Algérien, et d'en déduire le degré de dépendance et d'influence de ces descripteurs sur les débits max.

Le choix des sous bassins a porté essentiellement sur la disponibilité des données hydrométriques. Il est en outre basé sur les résultats trouvés par [Abdeddaim \(2018\)](#). Le choix des descripteurs a été fait en considération des principaux paramètres du réseau hydrographique, qui influent la réponse hydrologique (tableau 2).

Tableau 2. Valeurs des descripteurs des sous bassins versants

Code sous Bassin	Descripteurs de sous bassin									
	Q	S	Kc	Ipr	L _t	R _c	P _{tce}	T _c	D _d	i
	(m ³ /s)	(km ²)	-	(m/Km)	(km)	-	%	h	(Km ⁻¹)	
1201	69,52	1506	1,68	28,45	61,17	4,67	0,53	12,72	0,53	4
1203	34,26	1568	1,63	30,86	50,93	4,84	0,24	13,12	0,55	4
1204	507,06	1506	1,39	27,70	51,73	3,21	0,37	15,39	0,56	5
1403	161,24	1108	1,40	35,38	38,72	4,34	0,59	10,42	1,05	6
1406	56,78	1060	1,51	29,33	71,71	3,96	0,13	13,48	0,76	6
1007	779,01	1340	1,30	43,10	56,87	3,57	0,20	10,71	1,00	6
1004	153,73	1151	1,50	28,63	53,74	4,42	0,30	13,15	0,90	5
316	252,17	734	1,68	35,32	4,28	2,89	0,12	5,90	1,06	6
704	93,34	757	1,37	44,89	35,39	3,72	0,54	7,82	1,12	5

Q : Débit max ; S : Surface du bassin ; K_c : Coefficient de forme ; I_{pr} : Indice de pente de Roche ; L_t : longueur du thalweg principal ; R_c : Rapport de confluence ; P_{tce} : Pente du bassin versant ; T_c : Temps de concentration du bassin ; D_d : Densité de drainage ; i : ordre du cours d'eau

Les packages de R utilisés pour la réalisation de l'ACP sont : factoextra, FactoMineR, Devtools, ggbiplot, rgl et ggplot2 (Hayden, 2018).

Interprétation des résultats de l'ACP :

Tableau 3. Statistiques

```
> summary(pca)
Importance of components:

```

	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7	PC8	PC9
Standard deviation	2.1504	1.4437	1.2334	0.89170	0.72026	0.50736	0.36237	0.25988	5.376e-16
Proportion of Variance	0.4624	0.2084	0.1521	0.07951	0.05188	0.02574	0.01313	0.00675	0.000e+00
Cumulative Proportion	0.4624	0.6709	0.8230	0.90250	0.95437	0.98011	0.99325	1.00000	1.000e+00

Tableau 4. Matrice de corrélation

```
> cor(data)
```

	Q	S	Kc	Ipr	Lt	Rc	Ptce	Tc	Dd	i
Q	1.000000000	0.19958397	-0.59015096	0.3414596	0.002418203	-0.5694092	-0.245732031	0.019663844	0.16221057	0.4055718
S	0.199583966	1.000000000	0.06322353	-0.5036020	0.629156586	0.4814971	0.072351291	0.798162862	-0.83173932	-0.5822665
Kc	-0.590150964	0.06322353	1.000000000	-0.5323272	-0.205728286	0.2690514	-0.228556424	-0.071792645	-0.41506050	-0.4352038
Ipr	0.341459579	-0.50360198	-0.53232721	1.000000000	-0.373969573	-0.3333186	0.129266985	-0.710598078	0.76258996	0.3785140
Lt	0.002418203	0.62915659	-0.20572829	-0.3739696	1.000000000	0.5269682	0.021783151	0.823429083	-0.56659144	-0.2691406
Rc	-0.569409242	0.48149709	0.26905145	-0.3333186	0.526968192	1.000000000	0.354793806	0.430245584	-0.40694735	-0.6000876
Ptce	-0.245732031	0.07235129	-0.22855642	0.1292670	0.021783151	0.3547938	1.000000000	0.008652964	0.03907868	-0.3318217
Tc	0.019663844	0.79816286	-0.07179264	-0.7105981	0.823429083	0.4302456	0.008652964	1.000000000	-0.79474267	-0.4062820
Dd	0.162210567	-0.83173932	-0.41506050	0.7625900	-0.566591437	-0.4069474	0.039078682	-0.794742673	1.000000000	0.6947576
i	0.405571846	-0.58226654	-0.43520377	0.3785140	-0.269140571	-0.6000876	-0.331821654	-0.406282035	0.69475764	1.000000000

La lecture du tableau 4 de la matrice de corrélation des variables permet de conclure que les descripteurs de forme S et I_{pr} sont fortement corrélés avec les descripteurs de volume T_c et D_d, tandis que le descripteur de réseau L_t est fortement corrélé avec les descripteurs de volume T_c. On remarque aussi une forte corrélation entre les variables T_c et D_d. D'autre part on remarque des corrélations linéaires positives et négatives, ce qui signifie que les variables varient dans deux sens opposés, certaines étant moyennes (0.56), et d'autres très faibles (0.07).

5.3.1. Choix du nombre de facteurs ou de composantes principales :

Le but recherché ici est d'obtenir le maximum d'inertie ou pourcentage d'information conservée avec le minimum de facteurs.

Nous utiliserons les valeurs propres (eigenvalues) pour déterminer le nombre de composantes principales à prendre en considération (Kaiser, 1961). Les valeurs propres et la proportion de

variances (c'est-à-dire l'information) retenues par les composantes principales sont données au tableau suivant :

Tableau 5. Valeurs propres de l'ACP

```
> eig.val
      eigenvalue variance.percent cumulative.variance.percent
Dim.1 4.62434101      46.2434101      46.24341
Dim.2 2.08425756      20.8425756      67.08599
Dim.3 1.52122926      15.2122926      82.29828
Dim.4 0.79512895       7.9512895      90.24957
Dim.5 0.51877253       5.1877253      95.43729
Dim.6 0.25741890       2.5741890      98.01148
Dim.7 0.13131357       1.3131357      99.32462
Dim.8 0.06753823       0.6753823     100.00000
```

La somme de toutes les valeurs propres (tableau 5) donne une variance totale de 10. La proportion de variance expliquée par chaque valeur propre est donnée dans la deuxième colonne. Le pourcentage cumulé expliqué est obtenu en ajoutant les proportions successives de variances expliquées (3^{ème} colonne).

Les trois premières composantes principales expliquent plus de 80% de la variation. C'est un pourcentage acceptable. Pour décider du nombre d'axes principaux à retenir, nous avons utilisé le graphique (figure 55) des valeurs propres (appelé scree plot) (Laglaine et al., 1994). Le nombre d'axes est déterminé par le point, au-delà duquel les valeurs propres restantes sont toutes relativement petites et de tailles comparables (Jolliffe, 2002 ; Peres-Neto et al., 2005).

Du graphique ci-dessous, on s'aperçoit qu'à la troisième composante principale, 80% des informations (variances) contenues dans les données sont conservées par les trois premières composantes principales.

Les 3 premières dimensions (46,27 ; 20,85 ; 15,21) expliquent 82,33% de l'information contenues dans les données des descripteurs de formes, réseau et volume des sous bassins considérés. Sur les dernières dimensions, il y a peu d'informations (inertie perdue).

Le premier axe conserve 46% de l'inertie du nuage de points. La chute est importante à partir de cet axe. Il existe une structuration importante des données qui va se manifester sur le premier axe. Le second et troisième axe, conservent une part importante de l'inertie totale, 21% et 15%. On observe un 1^{er} coude de l'éboulis (ou inflexion) des valeurs propres au

niveau de la 2^{ème} dimension, puis un second décrochement (inflexion) après la 3^{ème} dimension.

Le pourcentage de variabilité représenté sur les deux premiers axes n'est pas particulièrement élevé (67%) ; pour éviter une mauvaise interprétation des graphiques, un tracé sur les axes 1 et 3 est donc aussi demandé.

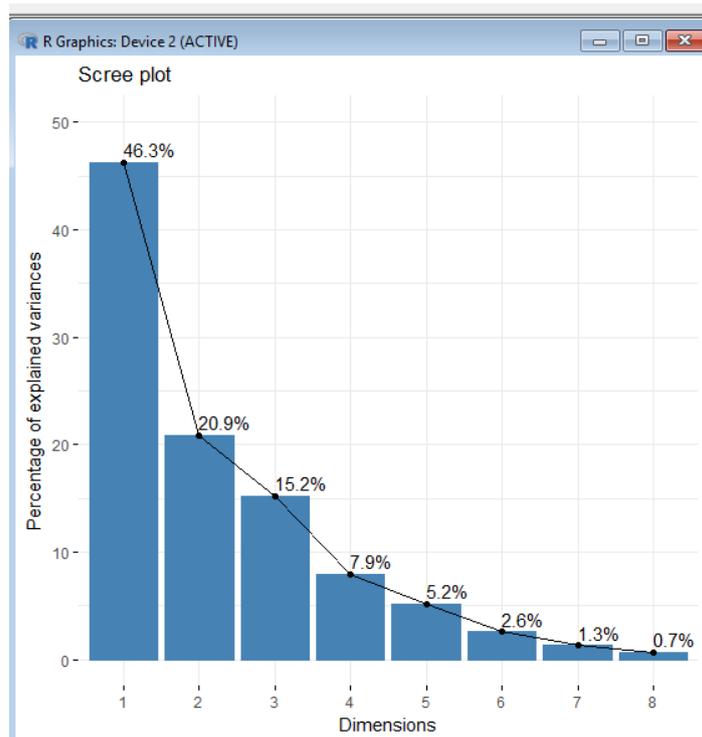


Figure 55. Scree plot

5.3.2. Construction des nuages de points projetés

Le nuage de points (variables et individus) est construit en projection sur le plan factoriel qui permettra de visualiser les corrélations entre les variables et d'identifier les groupes d'individus ayant pris des valeurs proches sur certaines variables.

5.3.2.1. Graphique des variables

Cette analyse portera sur les éléments : coordonnées, corrélation entre variables et les axes, cosinus-carré et contributions.

- **Cercle de corrélation**

La corrélation entre une variable et une composante principale (PC) est utilisée comme coordonnée de la variable sur la composante principale. La représentation des variables diffère de celle des individus: les individus sont représentés par leurs projections, mais les variables sont représentées par leurs corrélations (Abdi et al., 2010).

Le cercle des corrélations (figure 56) montre que les variables Superficie (S), Temps de concentration (T_c), Longueur du thalweg principal (L_t), Densité de drainage (D_d) et Indice de pente de Roche (I_{pr}) contribuent toutes à la formation de l'axe 1. Les trois premières variables sont significativement positivement corrélées et regroupées, tandis que la D_d et I_{pr} sont significativement négativement corrélés avec les trois premières caractéristiques. Toutes les variables sont donc bien représentées sur l'axe 1 excepté l'indice de forme K_c et le débit Q (ceux-ci sont mieux représentés sur l'axe 2) et dans une moindre mesure R_c et P_{tce}.

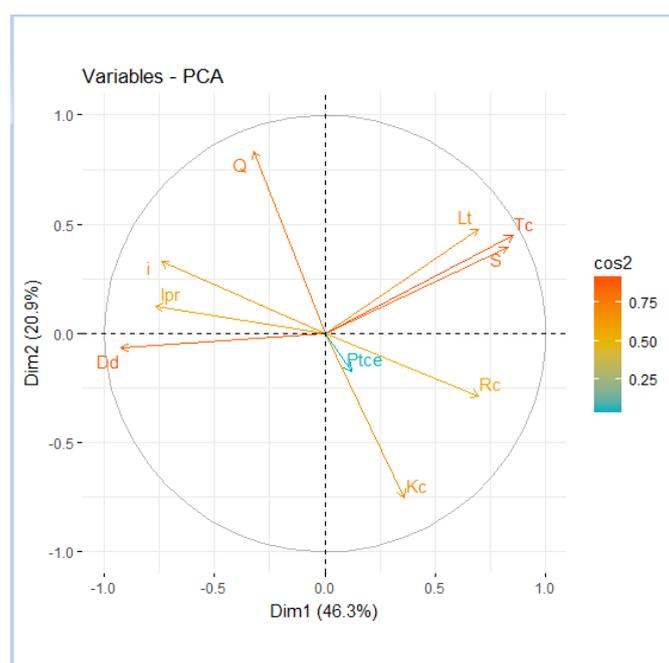


Figure 56. Cercle de corrélation des variables

Les valeurs de cos², qui renseignent sur la qualité de représentation des variables sur la carte de l'ACP et montrées sur le graphique, confirment les résultats précédents. Il est à rappeler que le *cosinus carré* des variables (cos²) est calculé comme étant les coordonnées au carré: $\text{var.cos}^2 = \text{var.coord} * \text{var.coord}$. Les variables S, T_c, D_d, L_t, Q ont de fortes valeurs de cos².

- Contributions des variables aux axes principaux

Les contributions des variables dans la définition d'un axe principal donné, sont exprimées en pourcentage. Les variables corrélées avec les deux premières dimensions sont les plus importantes pour expliquer la variabilité dans les données des descripteurs des sous bassins. Les variables qui ne sont pas en corrélation avec un axe ou qui sont corrélées avec les derniers axes sont des variables à faible apport et peuvent être supprimées pour simplifier l'analyse globale. La contribution des variables aux composantes principales est montrée sur le graphique de la figure 57 suivant :

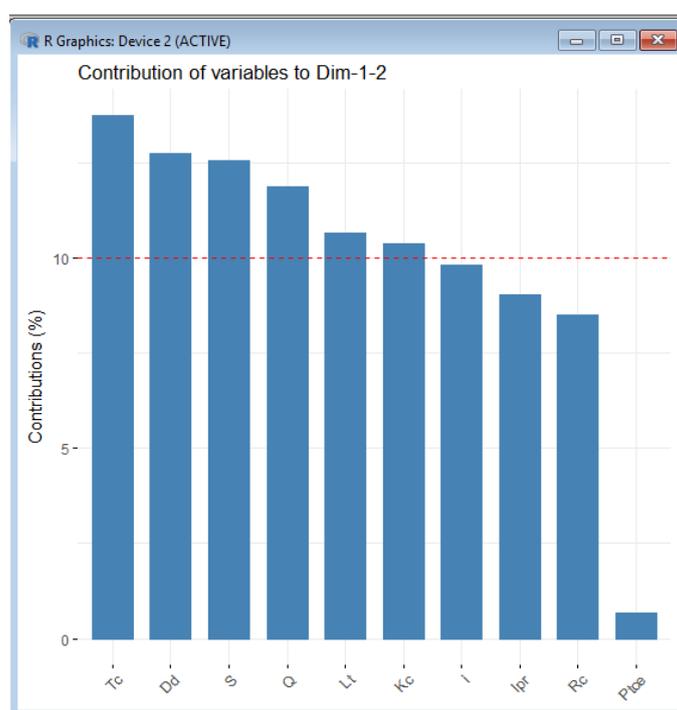


Figure 57. Contribution des variables

La ligne en pointillé rouge, sur le graphique ci-dessous, indique la contribution moyenne attendue. Si la contribution des variables était uniforme, la valeur attendue serait $1/\text{longueur (variables)} = 1/10 = 10\%$. Pour une composante donnée, une variable avec une contribution supérieure à ce seuil pourrait être considérée comme importante pour contribuer à la composante. On voit que les variables Tc, Dd, S, Q, Lt et Kc, contribuent le plus aux dimensions 1 et 2 et dans une moindre mesure les variables i, Ipr, et Rc.

5.3.2.2. Graphique des individus

Les résultats, pour les individus concerne, comme pour le cas des variables, les éléments suivants : coordonnées, corrélation entre individus et axes, cosinus-carré et contributions.

- **Cercle de corrélation**

Le graphique ci-dessous permet de représenter les individus sur une carte à deux dimensions, et ainsi d'identifier des tendances. On voit dans la figure 58 que les bassins ayant de fortes valeurs de S , T_c et L_t (1204, 1203, 1201 et dans un deuxième ordre 1406 et 1004) sont localisés sur la droite. Ils s'opposent aux sous bassins 316, qui est assez particulier (outlier), et 704, qui est très proche de la contribution moyenne. Il est intéressant de noter l'excentricité du sous bassin 1007 qui a la plus petite valeur de l'indice de forme (K_c). En regardant les données des sous bassins 1004 et 1406, l'interprétation pourrait être hasardeuse en déduisant qu'ils sont corrélés, alors qu'ils ne le sont pas. Le sous bassin 1007 est fortement représenté au vu de la valeur de \cos^2 . D'une manière générale, le cercle de corrélation ne montre pas de regroupement particulier de points à l'exception des sous bassins 1203 et 1201 qui présentent beaucoup de descripteurs similaires.

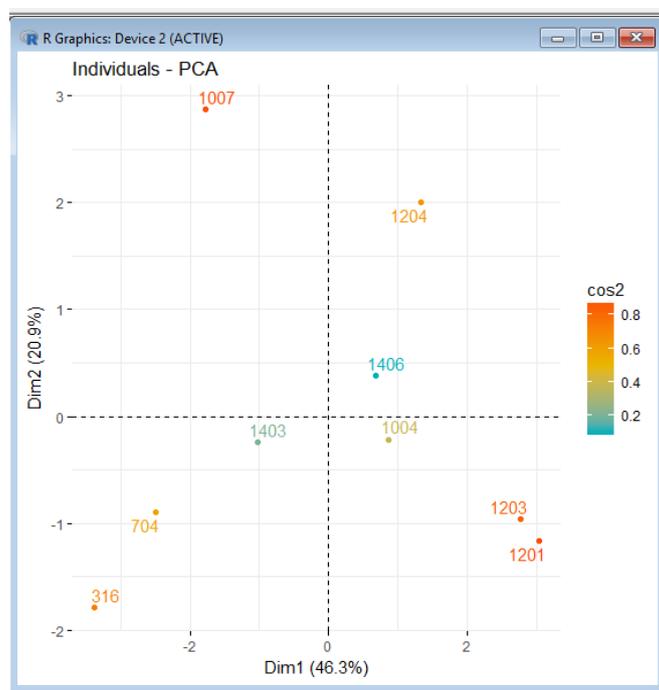


Figure 58. Cercle de corrélation des individus

- **Contributions des individus aux axes principaux**

Les individus corrélés avec les deux premières dimensions sont les plus importants pour expliquer la variabilité dans les données des descripteurs des sous bassins. La contribution des individus aux composantes principales est montrée sur le graphique de la figure 59 suivant :

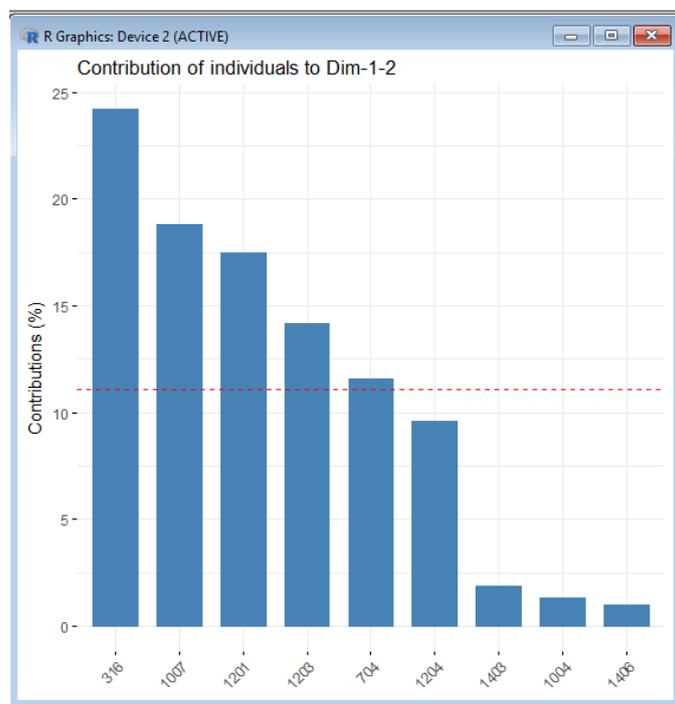


Figure 59. Contribution des individus

La ligne en pointillé rouge, sur le graphique ci-dessous, indique la contribution moyenne attendue. Pour une composante donnée, un individu avec une contribution supérieure à ce seuil pourrait être considéré comme important pour contribuer à la composante.

La contribution des individus aux deux premières composantes principales est donnée au graphique suivant. On voit que les sous bassins 316, 1007, 1201, 1203 et 704 contribuent le plus aux dimensions 1 et 2.

Le graphique biplot (figure 60) suivant résume les résultats obtenus sur les principaux axes F1 et F2. Il est à noter que les coordonnées des variables et des individus ne sont pas construites dans le même espace. Par conséquent, dans le biplot, on se concentre principalement sur la direction des variables mais pas sur leurs positions absolues sur le graphique.

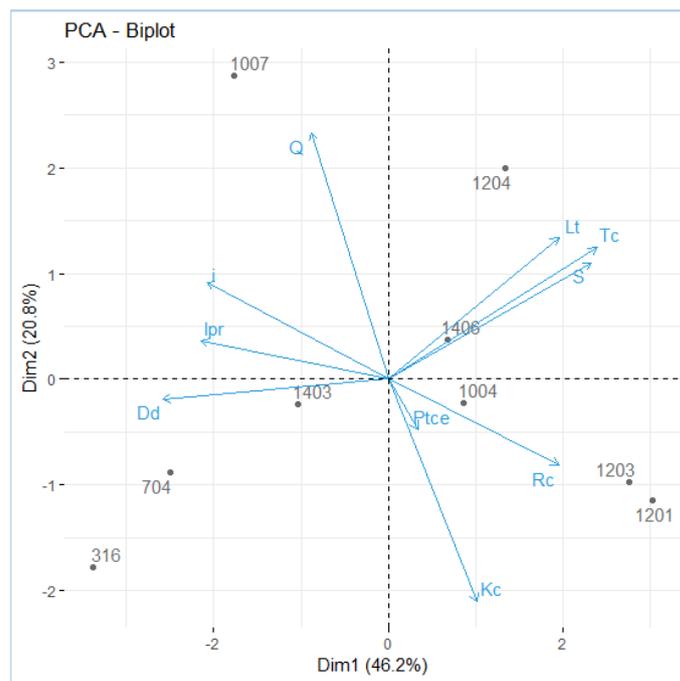


Figure 60. Biplot variables-individus

5.4. Effet de la structure des réseaux hydrographiques sur les débits à l'exutoire

En utilisant la description géomorphologique des bassins versants de la région d'étude, et en vue de mieux comprendre le fonctionnement hydrologique de ces bassins, nous avons adopté la démarche suivante :

1. Les sous bassins versants de montagne sélectionnés sont de tailles différentes, présentant de grandes hétérogénéités spatiales, au niveau des pentes, de la lithologie, de l'occupation du sol, influant sur la réponse hydrologique.
2. Une description géomorphologique des sous bassins versants est réalisée dans le but de caractériser les chemins d'écoulement possibles d'une goutte d'eau tombant en un endroit quelconque du bassin. Elle s'appuie sur la schématisation du réseau hydrographique selon les ordres de Strahler (Lagline et al., 1994). Celle-ci est envisagée selon trois étapes :

- a. Classification du réseau hydrographique
- b. Tracé de l'arborescence du réseau hydrographique
- c. Identification des chemins d'écoulement possibles

3. Une simulation des débits écoulés à l'exutoire, effectuée sous R, permettra de connaître et distinguer l'effet de la structure du réseau sur le fonctionnement hydrologique des sous bassins étudiés.

Les packages de R utilisés pour la réalisation de la simulation sont `igraph` et `rgl` (Holtz, 2017).

5.4.1. Bassins versants

Nous avons sélectionné cinq sous bassins versants de caractéristiques morphométriques différentes, situés sur différentes zones du bassin hydrographique Constantinois-Seybouse-Mellegue (CSM) (tableau 6). Le critère principal de comparaison retenu est la structure du réseau hydrographique.

Tableau 6. Noms, codes des sous bassins et type de drainage des réseaux hydrographiques

Bassin versant	Code	Type de réseau
Medjerda-Mellegue	1201	Dendritique
Medjerda-Mellegue	1203	Dendritique
Medjerda-Mellegue	1204	Parallèle
Kebir-Rhumel	1007	Rectangulaire
Seybouse	1406	Dendritique

Il est à rappeler que l'application de l'Analyse en Composantes Principales a permis de conclure que les sous bassins 1201 et 1203 sont assez similaires. Les sous bassins considérés dans la présente analyse sont représentés à la figure suivante.

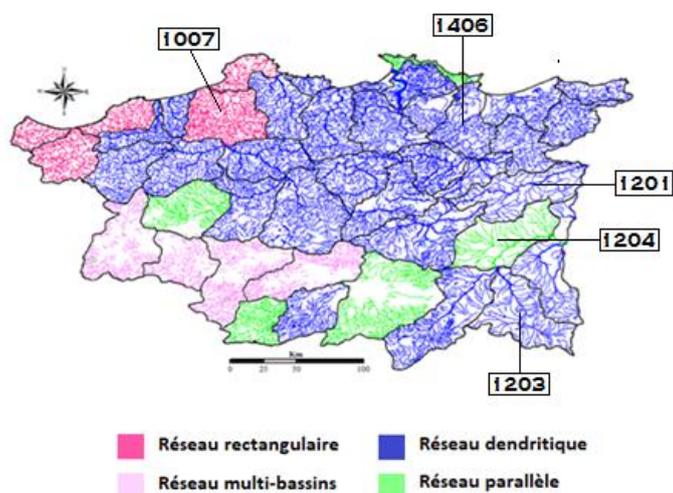


Figure 61. Sous bassins versants retenus

5.4.2. Description géomorphologique des réseaux hydrographiques

5.4.2.1. Classification des cours d'eau

La classification adoptée reflète la ramification du réseau hydrographique. Cette codification est basée sur les principes suivants :

- Tout cours d'eau dépourvu de tributaire est d'ordre 1.
- Le cours d'eau formé par la confluence de deux cours d'eau du même ordre est d'ordre $i + 1$.
- Le cours d'eau formé par la confluence de deux cours d'eau d'ordre différent prend l'ordre le plus élevé des deux.
- L'ordre W du bassin versant est défini comme l'ordre du cours d'eau le plus élevé.

Les résultats sont donnés aux figures 62 et 63 ci-dessous.

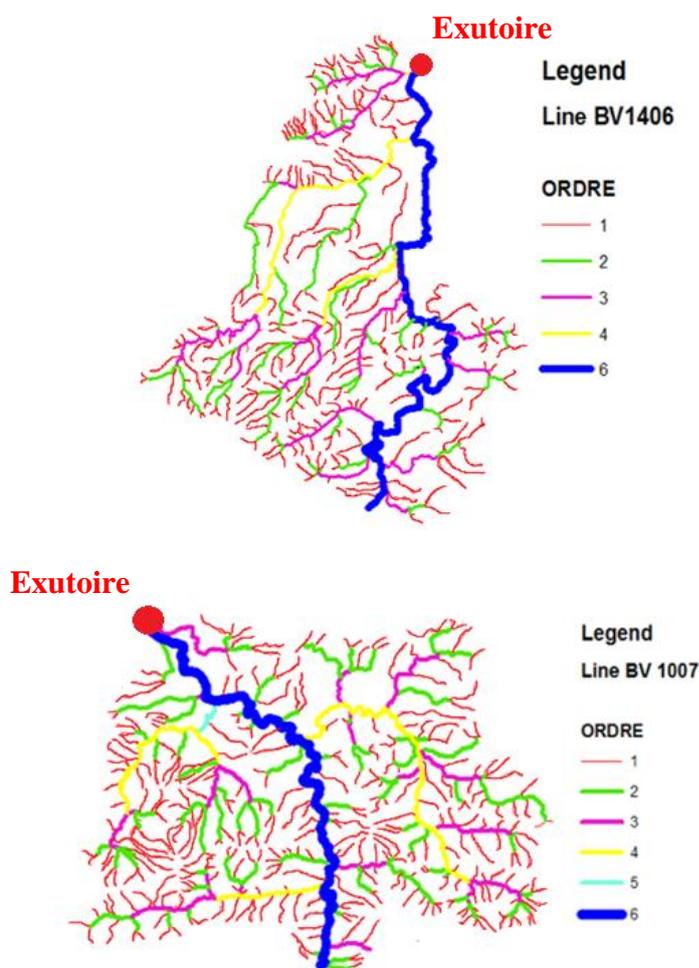


Figure 62. Classification des cours d'eau du sous bassin 1007 et 1406 (Abdeddaim, 2018)

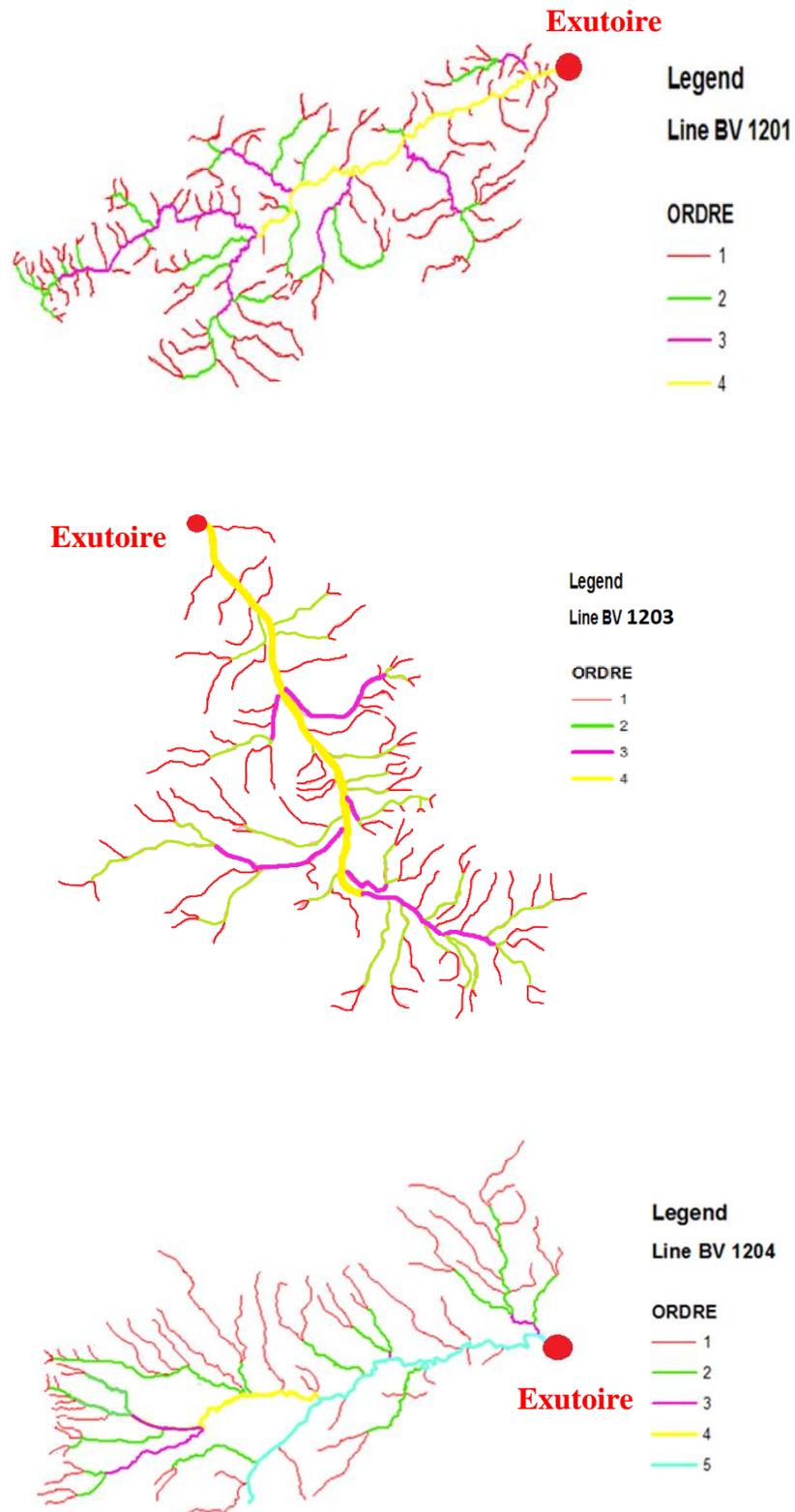


Figure 63. Classification des cours d'eau des sous bassins 1201, 1203 et 1204 (Abdeddaim, 2018)

5.4.2.2. Tracé de l'arborescence du réseau hydrographique et Identification des chemins d'écoulement possibles

Les règles élémentaires qui régissent le comportement de l'écoulement sur un bassin selon le schéma de [Strahler](#) sont les suivantes :

- Une particule de pluie nette tombe toujours sur une surface d'ordre i , $1 < i < W$, et non sur un cours d'eau. Cette hypothèse paraît raisonnable étant donnée la faible superficie des cours d'eau par rapport à celle des régions.
- Toutes les eaux tombant sur une surface donnée d'ordre i sont drainées vers un cours d'eau du même ordre i .
- Un cours d'eau d'ordre i se jette obligatoirement dans un cours d'eau d'ordre supérieur j , soit $i < j < W + 1$.
- L'exutoire, d'ordre $W + 1$, est l'étape finale de toutes les particules d'eau ayant cheminé sur le bassin.

Ces règles définissent l'ensemble (s) des chemins possibles sur le bassin ([Laglaune, et al., 1994](#)).

Dans le contexte de cette étude, nous avons caractérisé un chemin d'écoulement par un ensemble de m éléments (région et cours d'eau) et par les changements d'état (passage d'un élément à l'autre). Le premier élément est toujours une région, les suivants sont des cours d'eau et le dernier est l'exutoire. Les éléments peuvent être représentés de plusieurs manières. Nous avons choisi ici de représenter une région par un réservoir rectangulaire et un cours d'eau par une longueur.

Un chemin s est caractérisé comme suit :

$$R_i \longrightarrow C_i \longrightarrow C_j \longrightarrow \dots \longrightarrow C_w$$

Les résultats sont présentés dans les figures 64, 65, 66, 67 et 68 suivantes comme suit :

Avec « R » est une région, « C » est un cours d'eau, le chiffre est l'ordre de l'élément et « s » est un chemin possible.

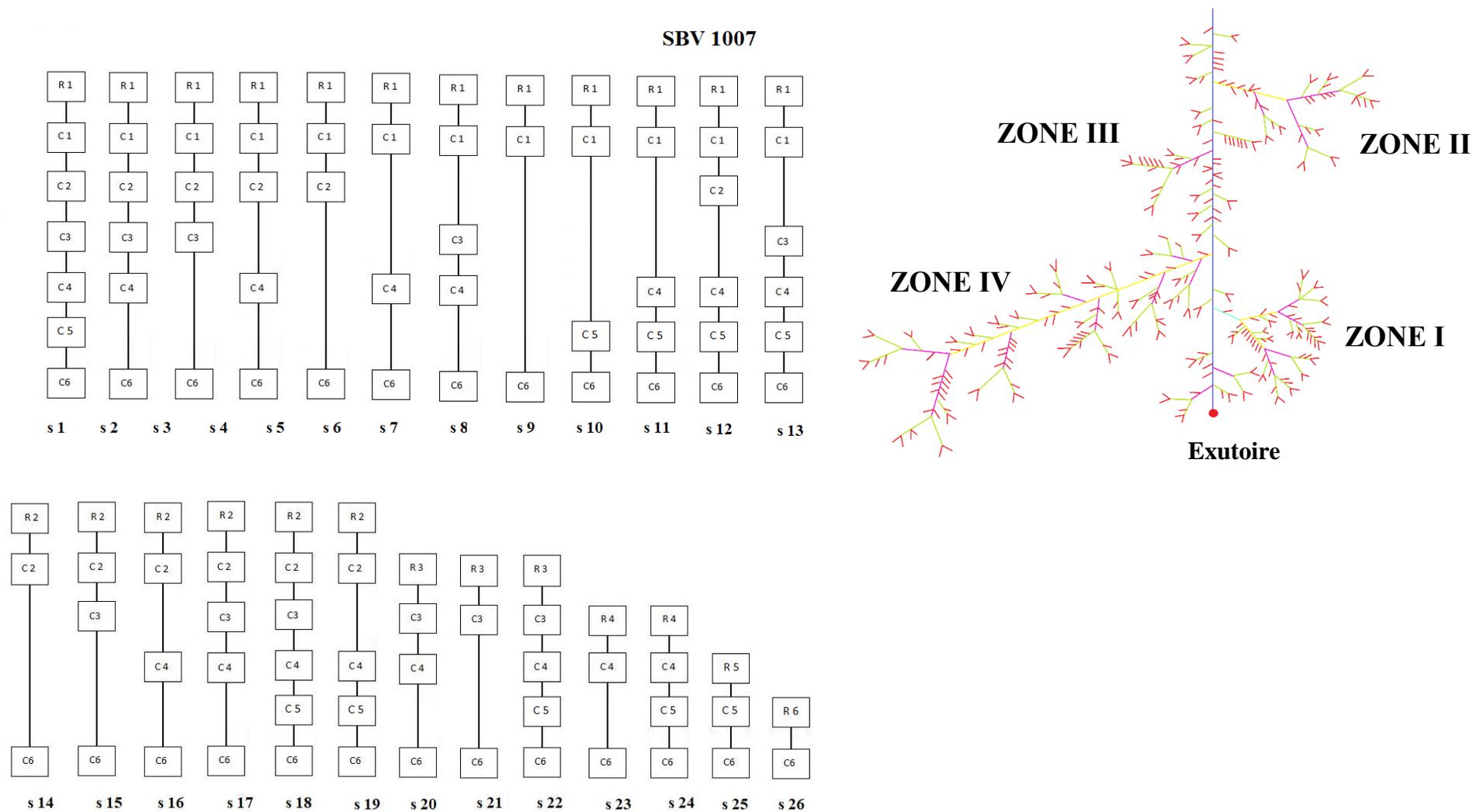


Figure 64. Arborescence et Chemins d'écoulement possibles du sous bassin 1007

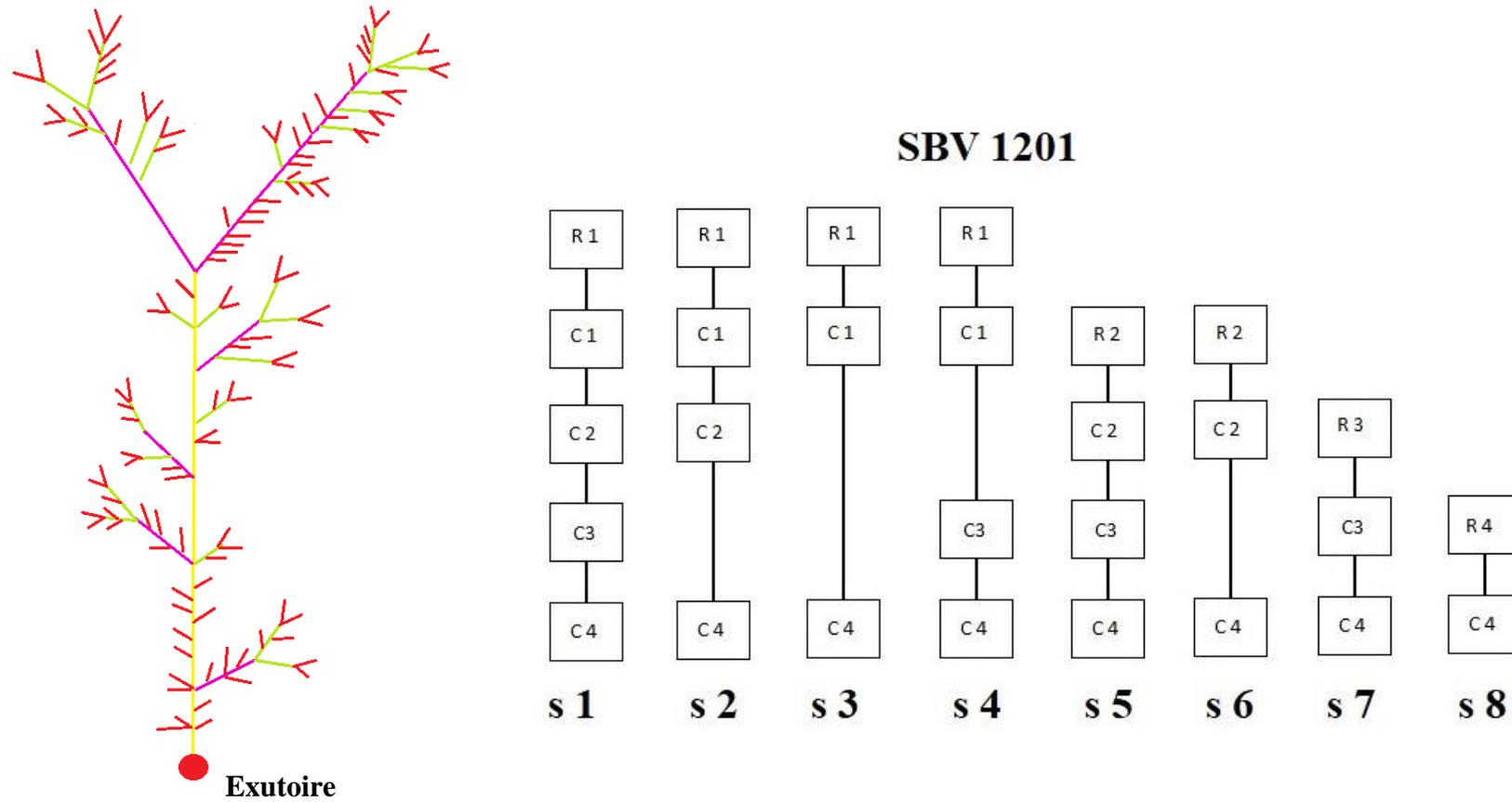


Figure 65. Arborescence et Chemins d'écoulement possibles du sous bassin 1201

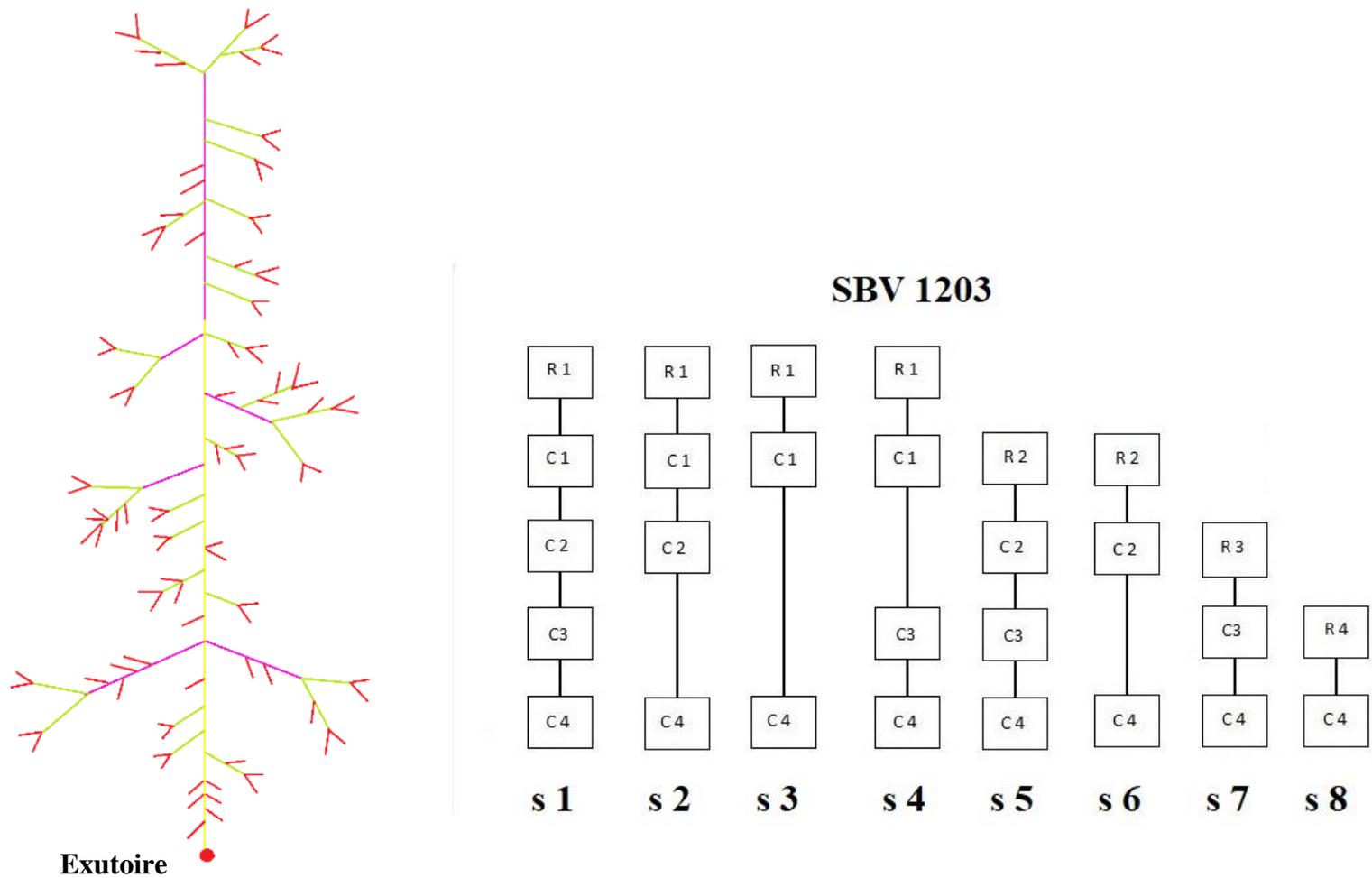


Figure 66. Arborescence et Chemins d'écoulement possibles du sous bassin 1203

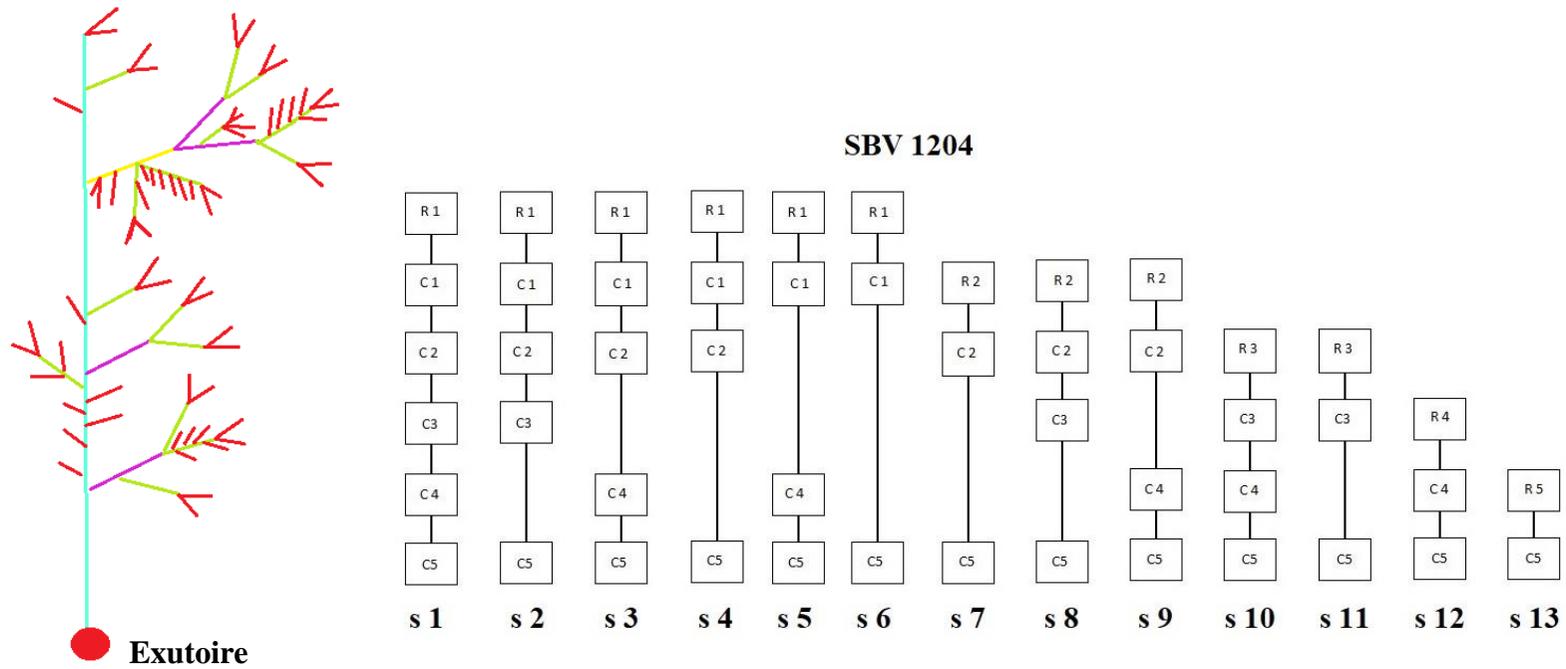


Figure 67. Arborescence et Chemins d'écoulement possible du sous bassin 1204

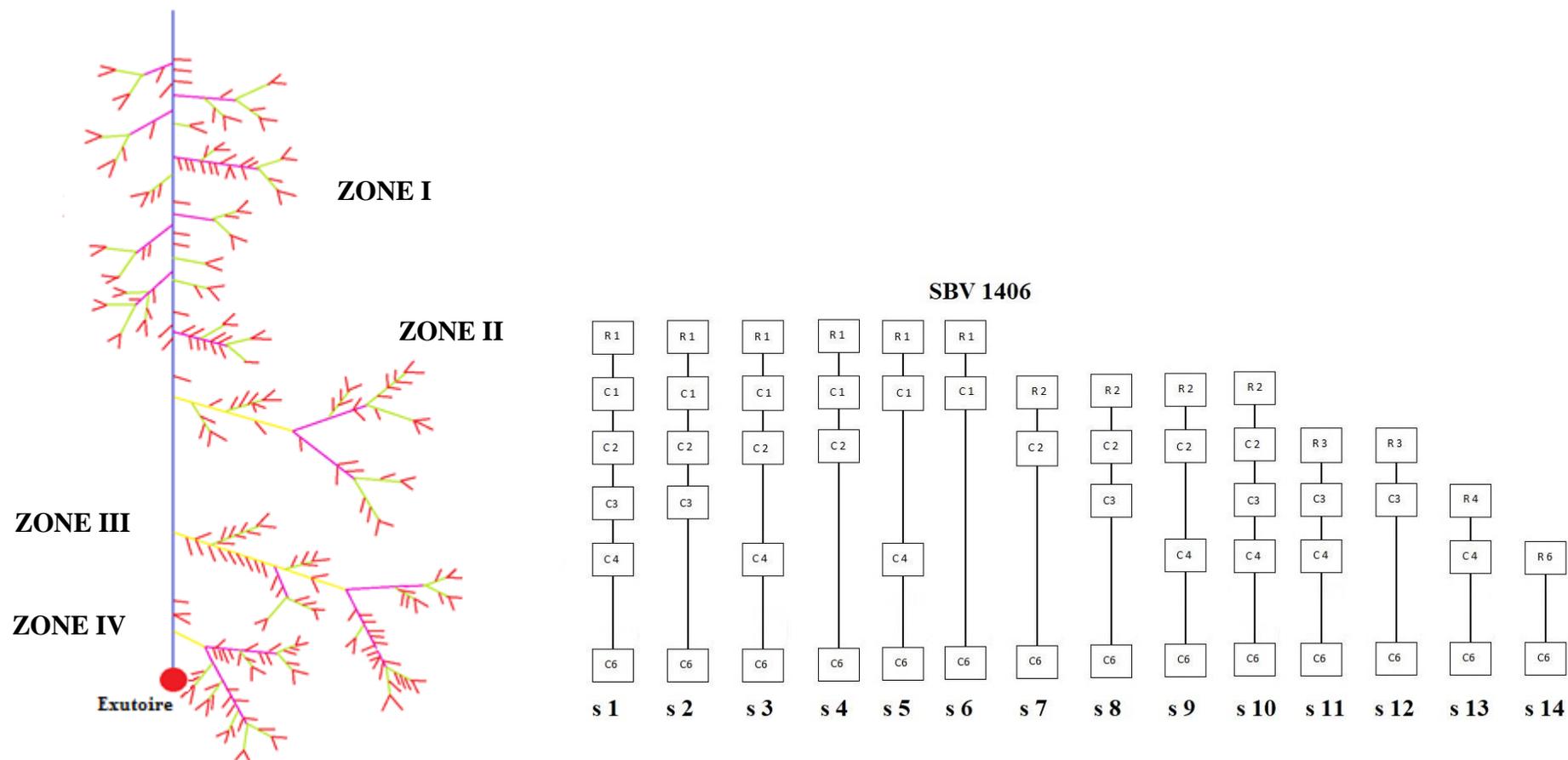


Figure 68. Arborescence et Chemins d'écoulement possibles du sous bassin 1406

5.4.3. Simulation des débits écoulés à l'exutoire

Une fois la description géomorphologique effectuée, nous avons tenté de faire des simulations, sous le logiciel R, des débits de pointe des principaux cours d'eau aux exutoires des sous bassins considérés. La procédure a été comme suit :

- Importation des données tout en suivant le sens d'écoulement vers l'exutoire
- On suppose que le débit dans les affluents est égal à $5 \text{ m}^3/\text{s}$
- Calcul des débits aux jonctions et à l'exutoire (débit maximum)
- Affichage du résultat

Vu le manque de données pluviométriques, nous avons supposé, théoriquement, que la pluie est uniforme sur l'ensemble du bassin considéré. La procédure de calcul, sous R, du débit max à l'exutoire, est donnée comme suit :

```
> library (igraph)

> BV_1203 <- read.table(file.choose(), header=T, sep=";")
> head(BV_1203)
  DE  A Q
1  1  98 5
2  2  98 5
3  3  99 5
4  4 100 5
5  5 100 5
6  6 102 5
```

La première et la deuxième colonne du tableau ci-dessus (DE et A) représentent une numérotation des nœuds du réseau hydrographique. Ces nœuds sont nécessaires pour identifier le chemin d'écoulement lors d'une simulation. La figure 69 représente un exemple d'écoulement de l'eau vers un exutoire, avec il existe quatre nœuds et trois cours d'eau d'ordre 1 (en rouge) et 2 (en vert). L'exutoire représente le nœud final.

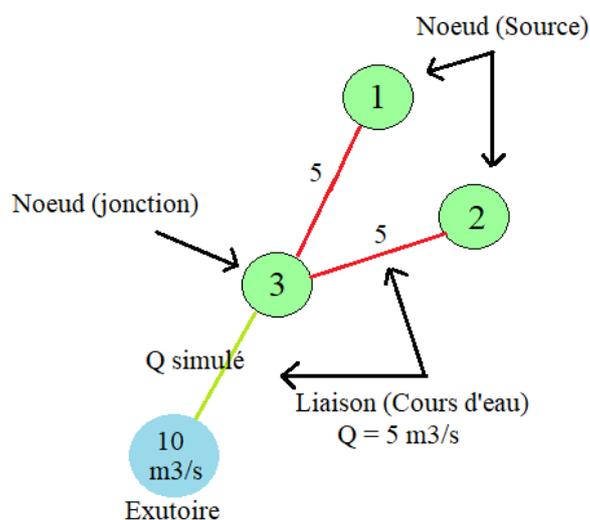


Figure 69. Illustration d'une simulation du débit écoulé

Pour les sous bassins 1007 et 1406, leurs réseaux hydrographiques étant trop complexes, nous avons réalisé la simulation des débits pour les différentes zones, constituant ces réseaux hydrographiques. Les résultats sont donnés dans les figures 70, 71, 72, 73, 74, 75 et 76 suivantes.

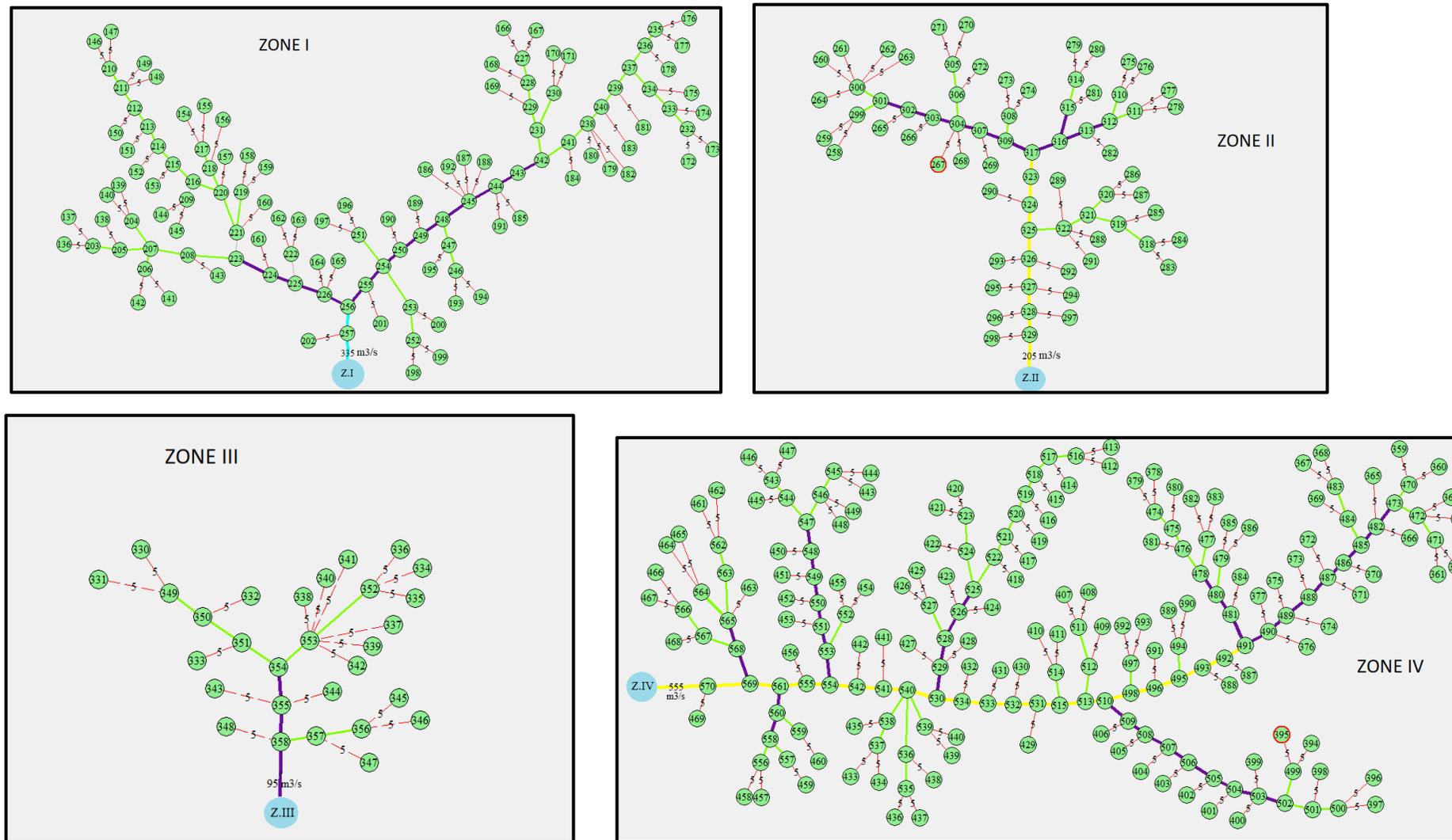


Figure 70. Résultat de simulation des zones correspondant au sous bassin 1007

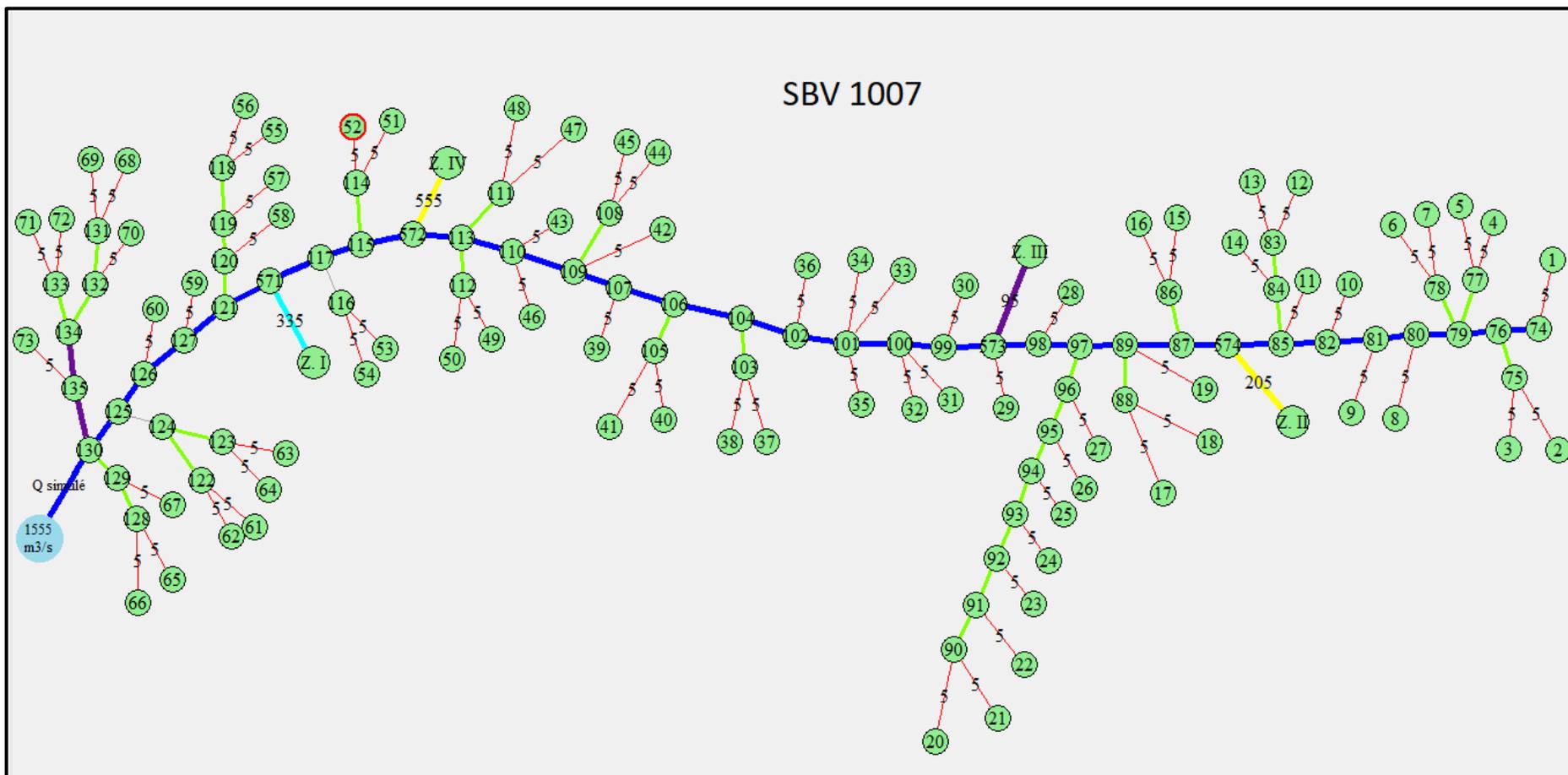


Figure 71. Résultat de la simulation du débit à l'exutoire du sous bassin 1007

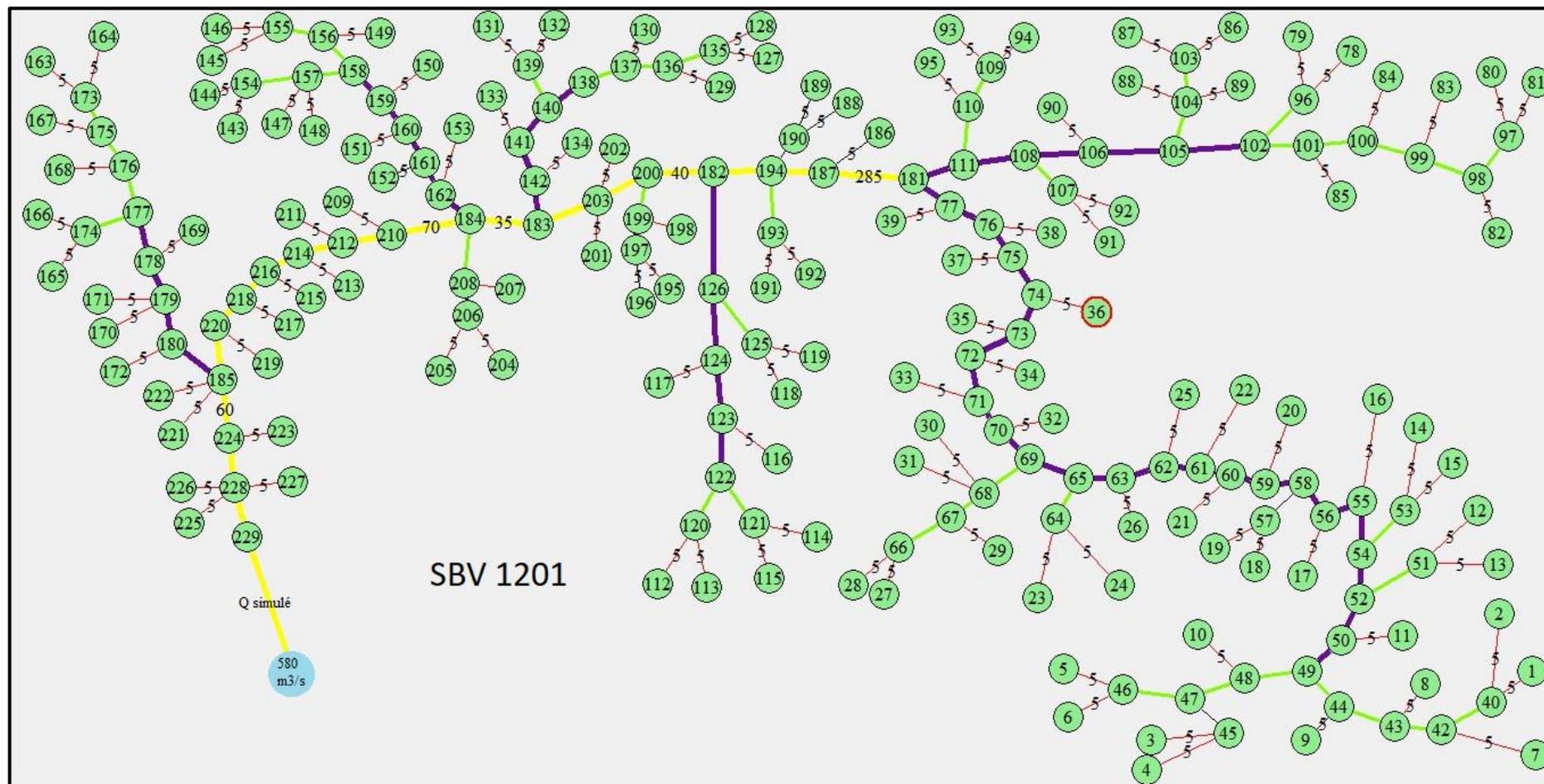


Figure 72. Résultat de la simulation du débit à l'exutoire du sous bassin 1201

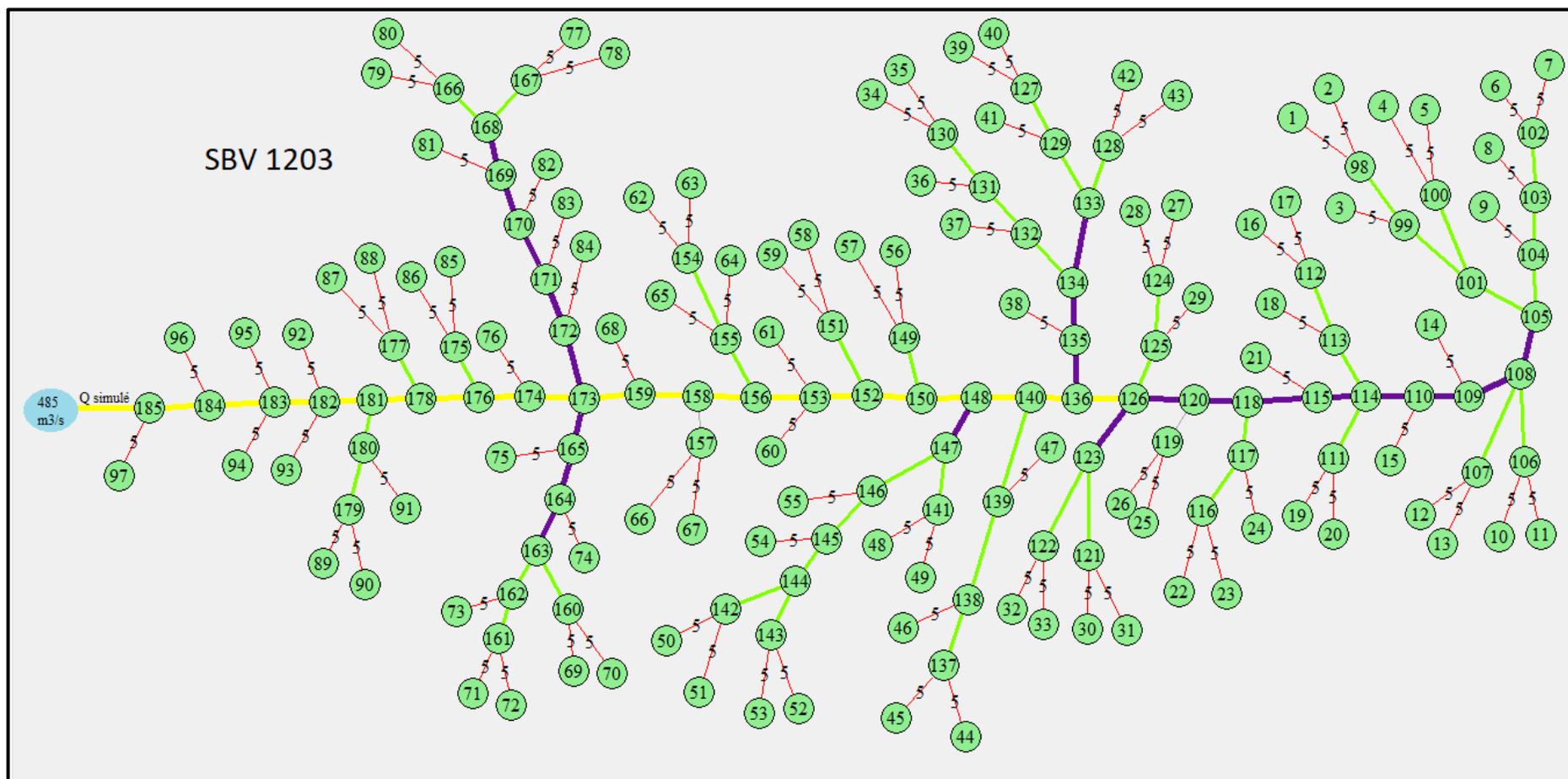


Figure 73. Résultat de la simulation du débit à l'exutoire du sous bassin 1203

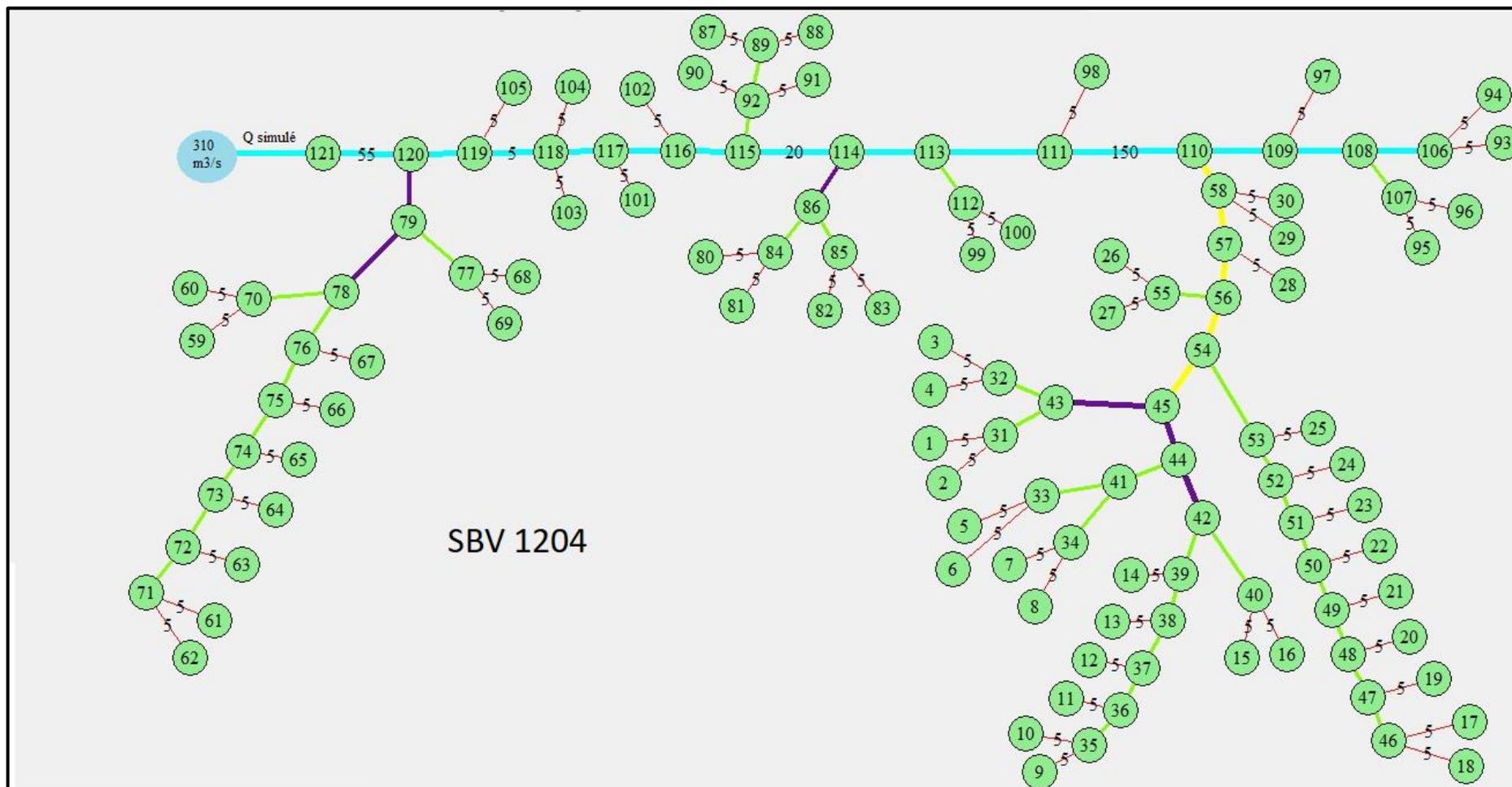


Figure 74. Résultat de la simulation du débit à l'exutoire du SBV 1204

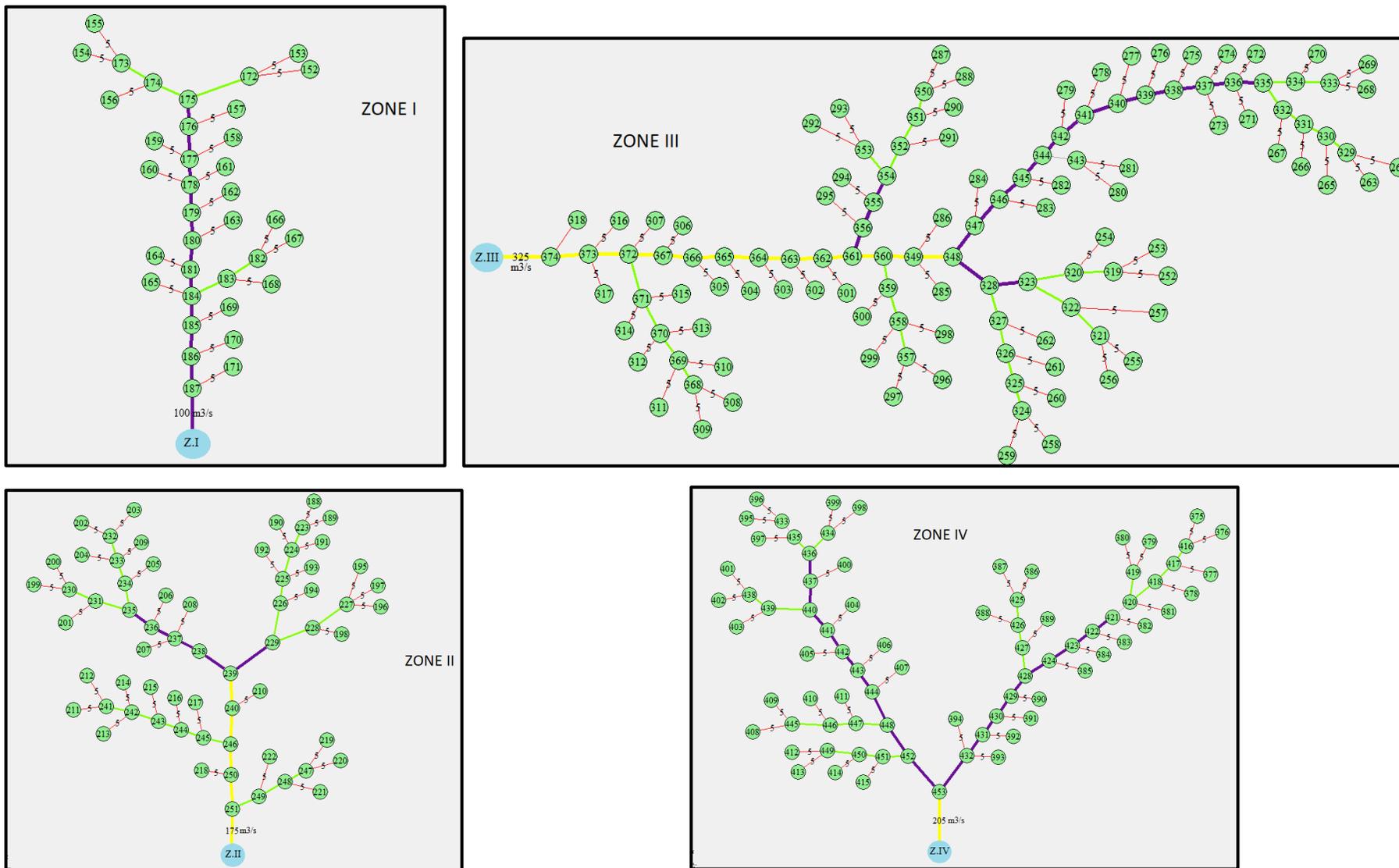


Figure 75. Résultat de simulation des zones correspondant au sous bassin 1406

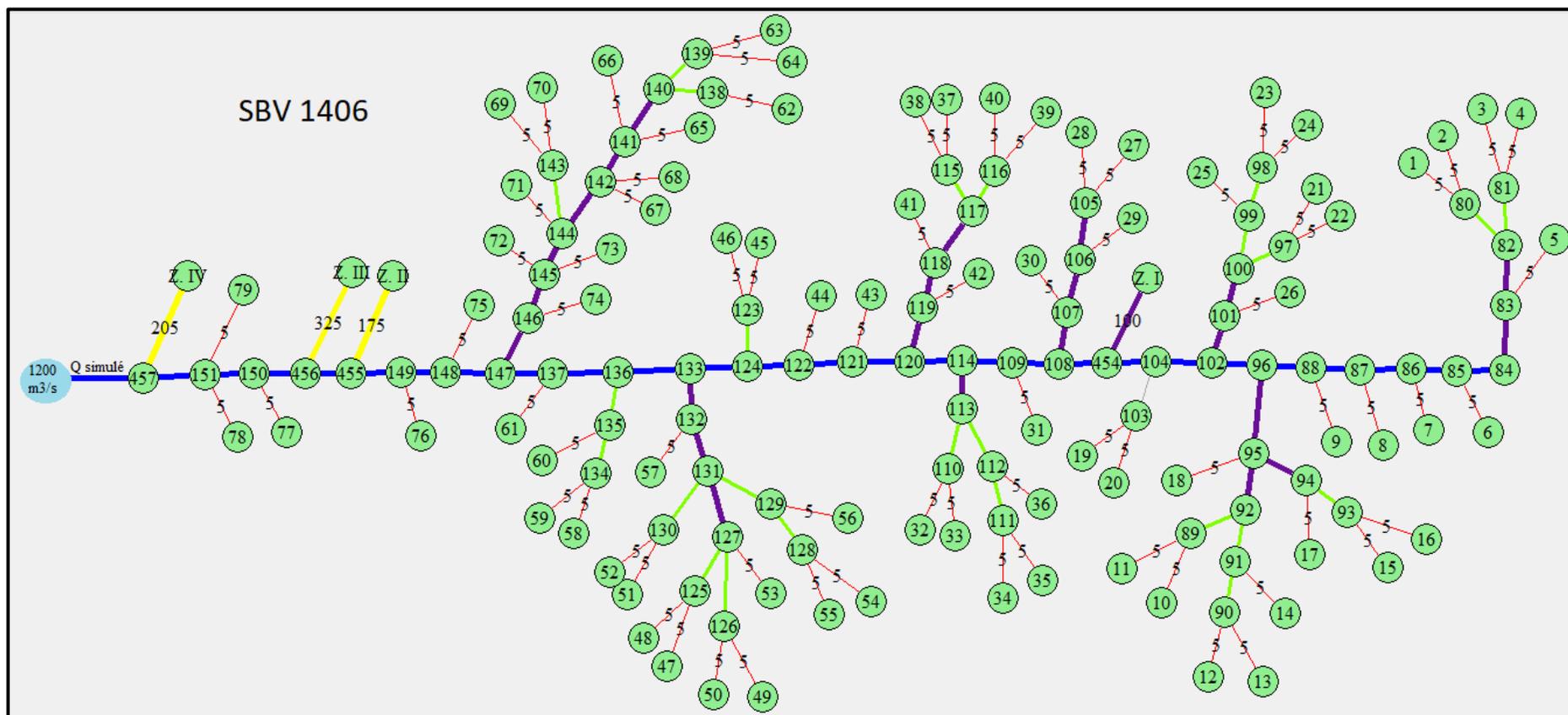


Figure 76. Résultat de la simulation du débit à l'exutoire du sous bassin 1406

Tableau 7. Résultats de la simulation

Bassin versant	Code	Surface (km ²)	Type de réseau	Débit à l'exutoire (m ³ /s)	Nombre de nœuds
Medjerda-Mellegue	1201	1506	Dendritique	580	229
Medjerda-Mellegue	1203	1568	Dendritique	485	185
Medjerda-Mellegue	1204	1506	Parallèle	310	121
Kebir-Rhumel	1007	1340	Rectangulaire	1555	574
Seybouse	1406	1060	Dendritique	1200	457

On remarque d'après le tableau 7 précédent que :

- Le Sous bassin 1007 (réseau rectangulaire) a le plus grand débit simulé et le plus grand nombre de nœuds introduits sous R. Il présente une arborescence plus développée par rapport aux autres bassins. Ce qui signifie qu'il y a beaucoup de cours d'eau pour les différents ordres. Ceci est confirmé par les valeurs du coefficient de torrencialité et de la densité de drainage qui sont les plus élevées de la région d'étude, soit respectivement $C_t = 0,17$ et $D_d = 1,00$. Le sous bassin 1007 se situe dans une zone de forte pluviosité (figure 77).

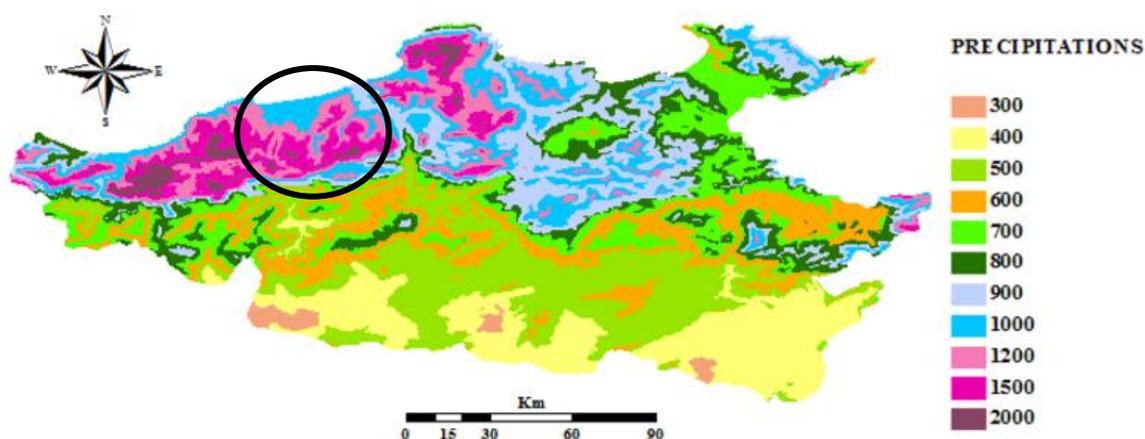


Figure 77. Carte des précipitations du sous bassin 1007 (Abdeddaim, 2018)

- Le sous bassin 1406 a aussi un débit fort et est classé après celui du sous bassin 1007 malgré sa superficie moins importante par rapport aux autres sous bassins. Les mêmes arguments que ceux du sous bassin 1007 peuvent être cités pour ce bassin mais à un degré moindre ($C_t = 0,15$ et $D_d = 0,76$). Le sous bassin 1406 se trouve dans une région à faible altitude mais à grande pluviosité (figures 78 et 79).

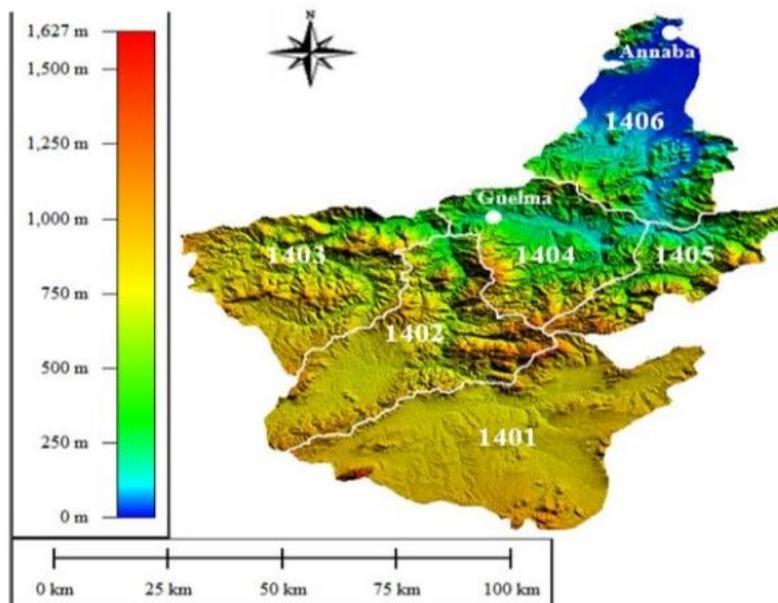


Figure 78. MNT du bassin versant de la Seybouse (14) (Abdeddaim, 2018)

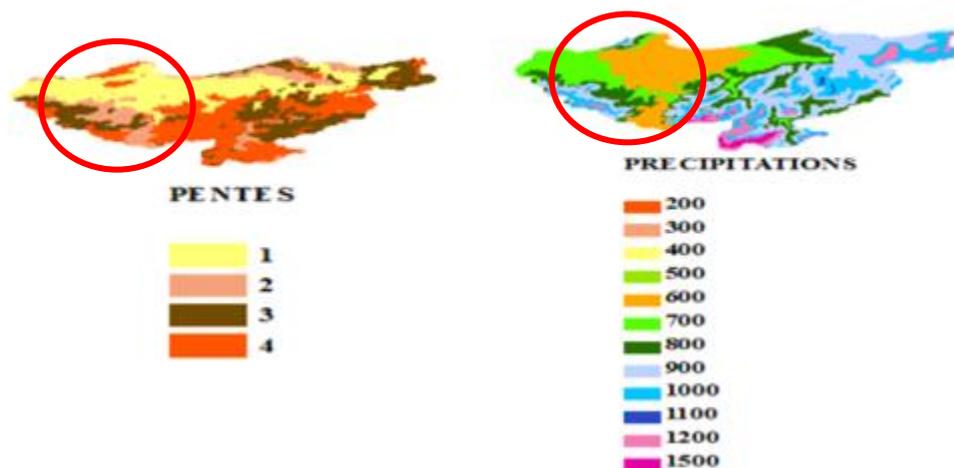


Figure 79. Carte des pentes et des précipitations du sous bassin 1406 (Abdeddaim, 2018)

- Dans le bassin de la Medjerda- Mellegue, le sous bassin 1201 a le plus grand débit simulé et le plus grand nombre de nœuds en comparaison avec les sous bassins 1203 et 1204. Les raisonnements qu'on peut attribuer à ces différences de débits simulés se rapportent essentiellement à la pluviométrie. En effet, les précipitations dans le sous bassin 1201 sont plus importantes que dans les sous bassins 1203 et 1204. De même, les pentes et les altitudes sont plus élevées dans la région du sous bassin 1201 et 1203 (figure 80 et 81).

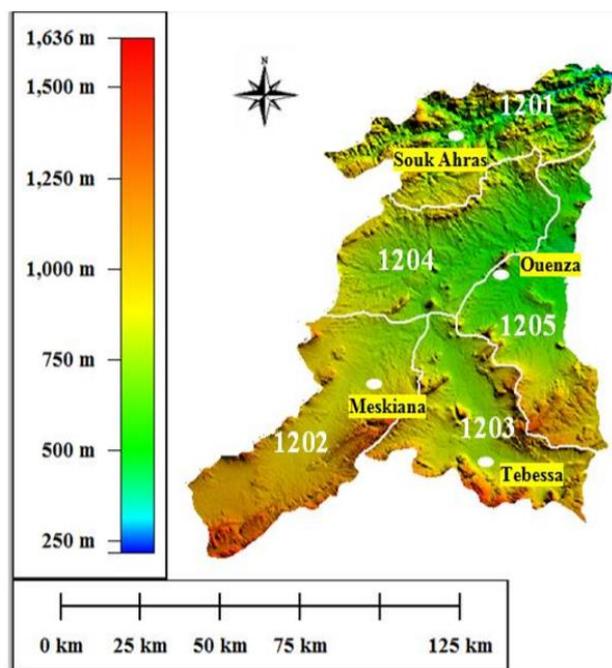


Figure 80. MNT du bassin versant de la Medjerda-Mellegue (12) (Abdeddaim, 2018)

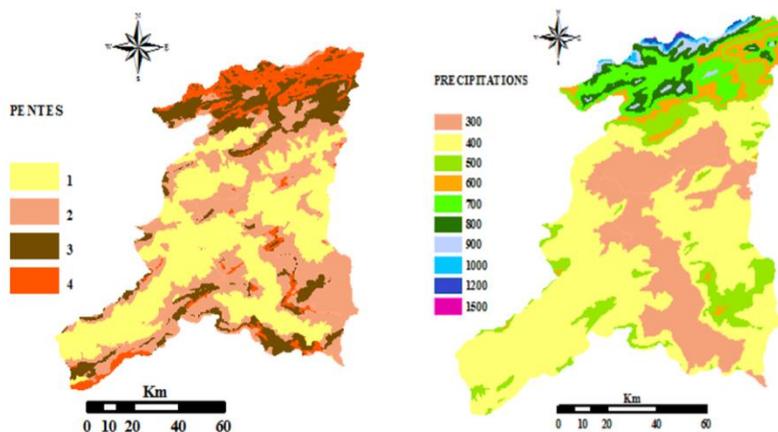


Figure 81. Carte de pentes et des précipitations du bassin de la Medjerda-Mellegue (12) (Abdeddaim, 2018)

5.5. Analyse des chroniques des crues

5.5.1. Situation des stations hydrométriques

Les données de crues sont issues de la banque de données ANRH qui met à disposition les séries hydrométriques des stations du réseau opérationnel à pas de temps horaire. La figure 82 donne la situation des stations hydrométriques, pour lesquelles nous disposons des débits de crues (100701 ; 120401 et 140601).

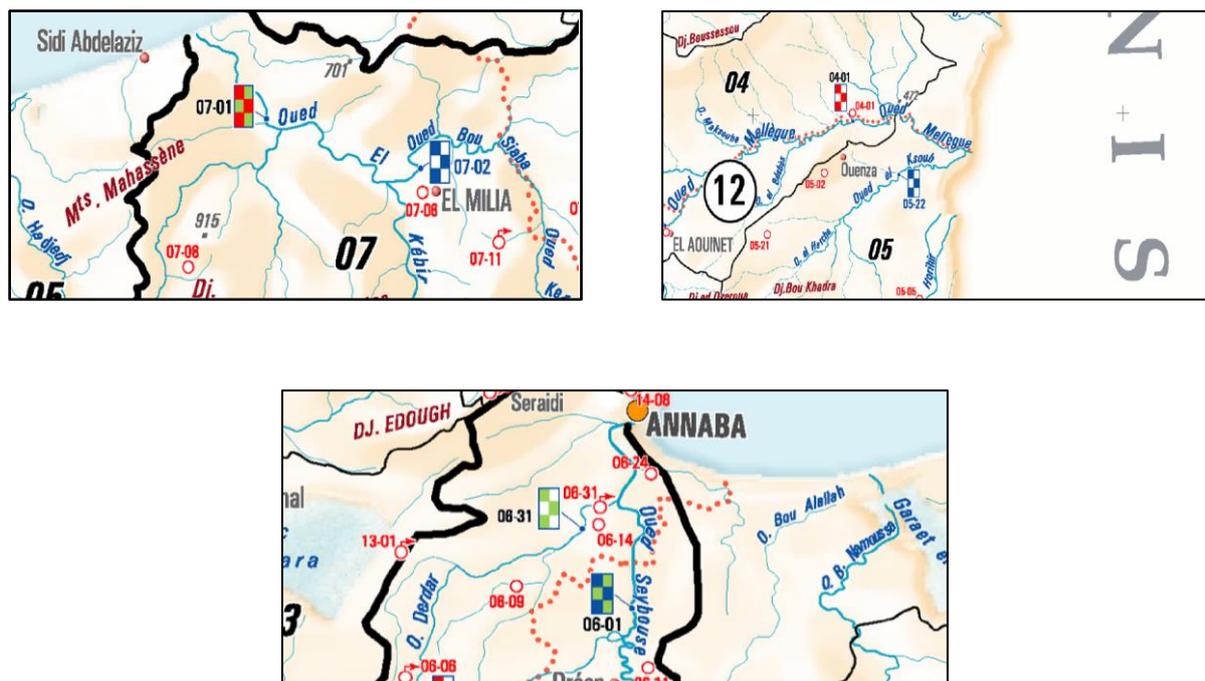


Figure 82. Situation des stations hydrométriques (ANRH, 2005)

5.5.2. Présentation de la chronique des débits par sous bassin

Un aperçu des observations disponibles pour chaque station des trois sous bassins considérés. L'analyse est orientée selon les trois types de réseau de drainage retenus : Dendritique, Parallèle et Rectangulaire. Là encore, le nombre d'années complètes est variable d'un sous bassin à l'autre (figure 83).

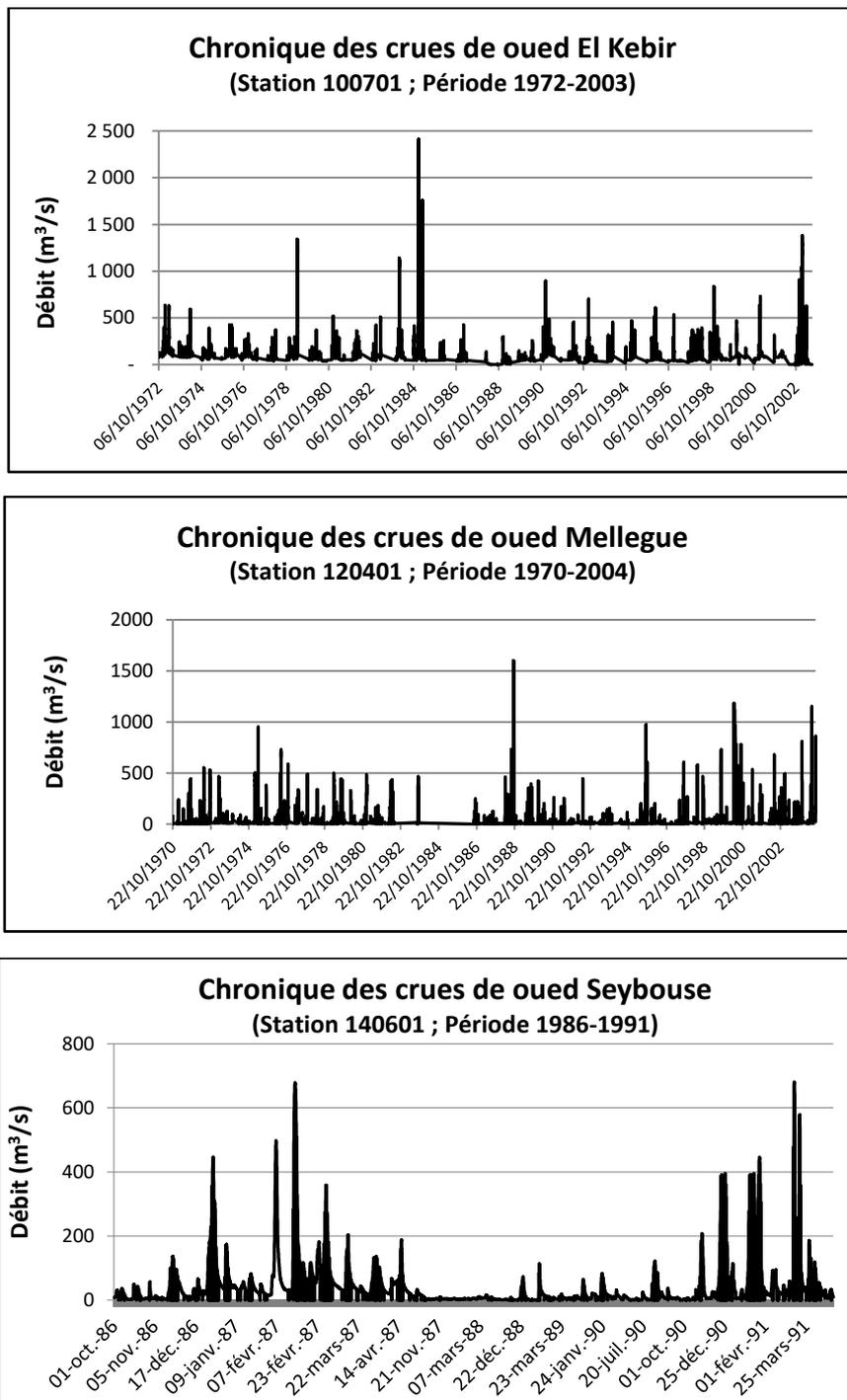


Figure 83. Chroniques des crues des sous bassins étudiés

Le sous bassin de oued Kebir 1007 montre des débits plus importants que ceux des sous bassins du Mellegue et de la Seybouse, respectivement codés 1204 et 1406.

5.5.3. Description statistique des chroniques de crues

Le tableau 8 et le box plot résument les statistiques des débits des oueds aux stations considérées.

Tableau 8. Statistiques des débits de crues (en gras les paramètres remarquables)

Paramètres	Code bassin		
	100701	120401	140601
Effectif	35 082	29859	8 841
Moyenne	127,88	34,26	43,88
Ecart type	130,06	71,90	78,29
CV	1,02	2,10	1,78
Min	0,00	0,00	0,00
Max	2 412,00	1 602,00	681,36
Médiane	97,90	14,18	19,10
1er Quartile	65,42	7,28	5,65
3ème Quartile	148,56	29,36	45,80
Skewness	6,08	6,90	4,26
Kurtosis	63,99	73,47	22,77

En fin de cette description, on a construit, sous R, le box plot correspondant à chaque chronique. Les résultats sont donnés comme suit :

```
> chroniques <- read.table (file.choose(), header=T, sep=";")
> head(chroniques)
  SBV.1007 SBV.1204 SBV.1406
1    77.30     0.75     8.14
2    77.30     0.75     8.14
3    77.30     0.75     8.28
4    77.30     0.75     8.28
5    78.18     0.75     8.28
6    80.87     0.75     8.28

> boxplot(SBV.1007, SBV.1204, SBV.1406,ylab="débit (m3/s)", xlab="Sous Bassins Versants",
+         col=c("red","yellow","grey"), main="boxplot des sous bassins versants ",
+         names=c("1007 Oued Kebir","1204 Oued Mellegue","1406 Oued Seybouse"),border="black")
> |
```

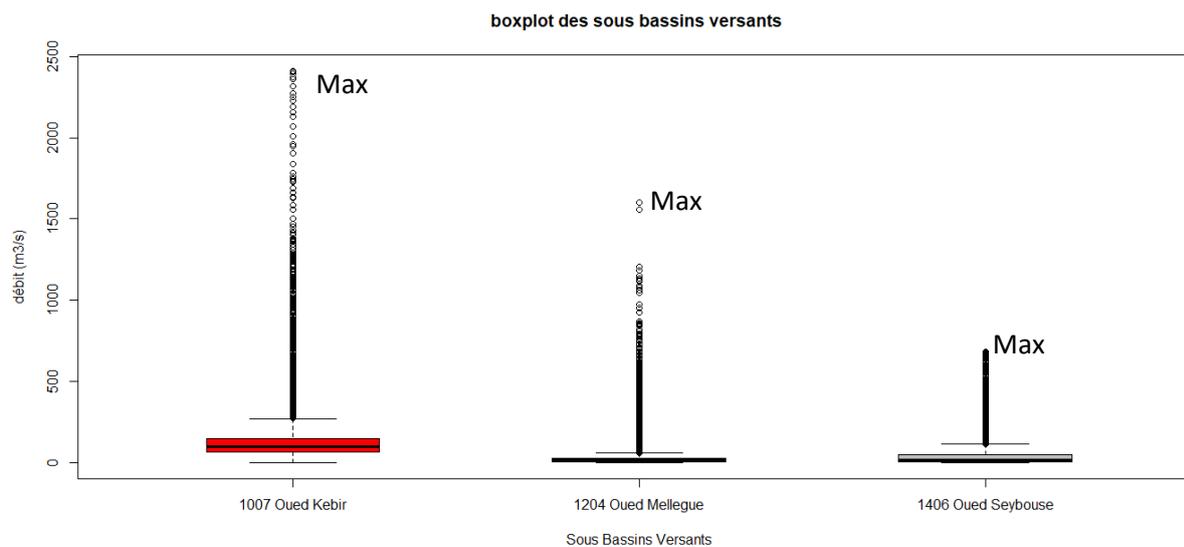


Figure 84. Box plot des chroniques des crues des sous bassins 1007, 1204 et 1406

La figure 84 montre clairement la dominance des débits de crues du sous bassin 1007, sous leurs différentes composantes statistiques.

5.5.4. Analyse des chroniques de débits de crue

Dans cette étude, il a été également opportun de s'intéresser aux crues des oueds des sous bassins considérés. En effet, la base de données, bien que n'étant pas exhaustive, permet quand même de ressortir beaucoup de traits caractéristiques aux différents réseaux de drainage.

L'un des problèmes les plus importants dans l'analyse des crues est, d'un côté la fréquence d'enregistrement du débit des crues qui est en général d'une heure. Toutefois certaines crues sont relevées à un pas de temps de 30 minutes. D'autres présentent des relevés au pas de 1 heure et 2 heures. D'une autre coté, la base de données des crues a révélé des hydrogrammes de crues marqués par un début de montée relativement élevé caractérisant des crues souvent soudaines et rapides (flash floods). L'ensemble des hydrogrammes sont très détaillés dans la phase de décrue.

On a pu observer des crues complexes ou composés, avec en général deux pics, particulièrement pour les bassins de la Seybouse (figure 85, a), moins pour le sous bassin du Mellegue (figure 85, b). Ceci n'est pas bien mis en évidence pour le sous bassin de Kebir-Rhumel où l'on observe des crues assez typiques (figure 85, c).

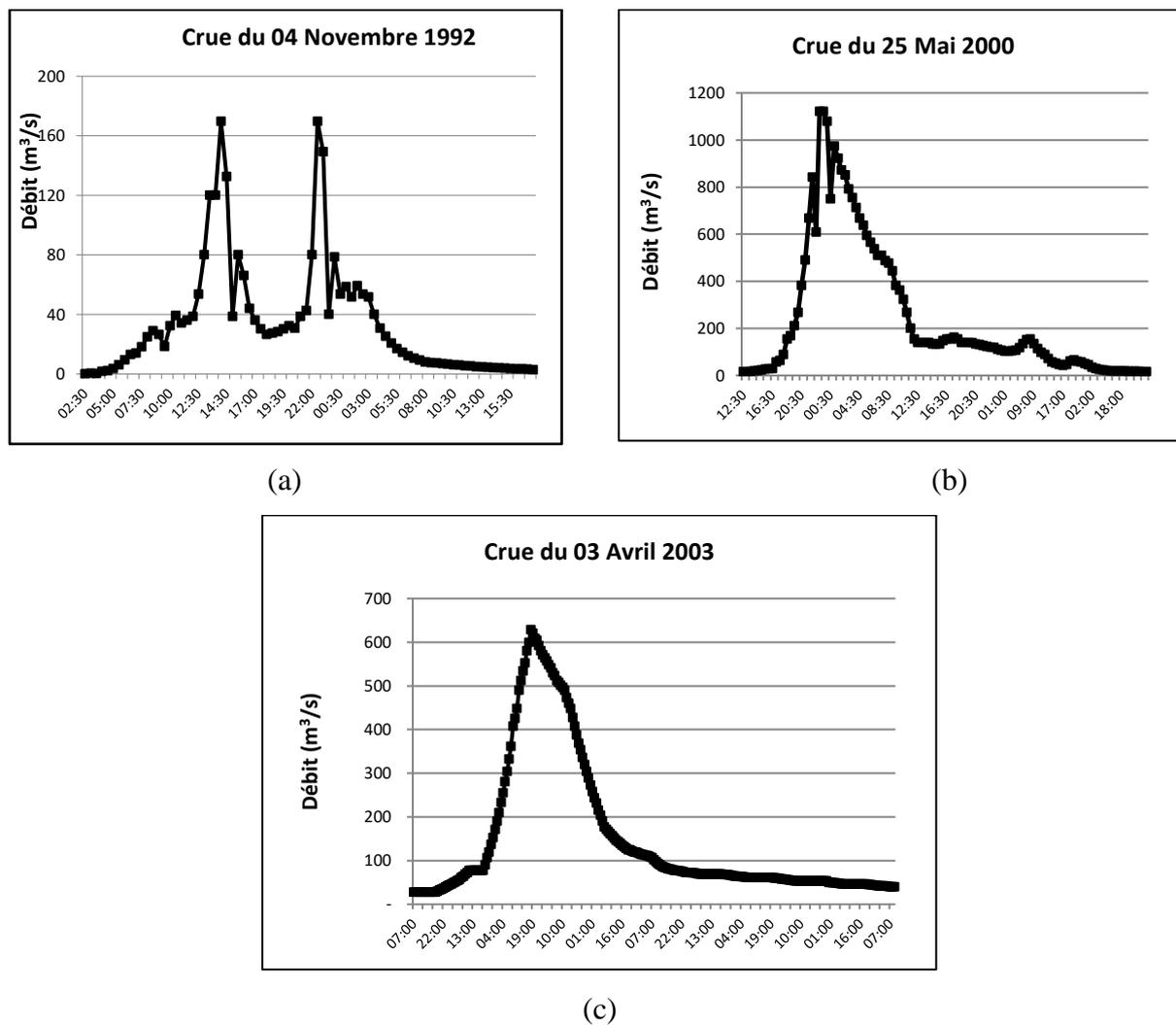


Figure 85. Hydrogrammes de crues des sous bassins : (a) de la Seybouse ; (b) du Mellegue ; (c) du Kebir-Rhumel

La figure 86, ci-dessous montre les crues idéalisées pour chaque sous bassin. Le manque de données pluviométriques horaires, pour certains sous bassins étudiées, ne nous a pas permis de représenter la relation type Hyéto-gramme – Hydrogramme.

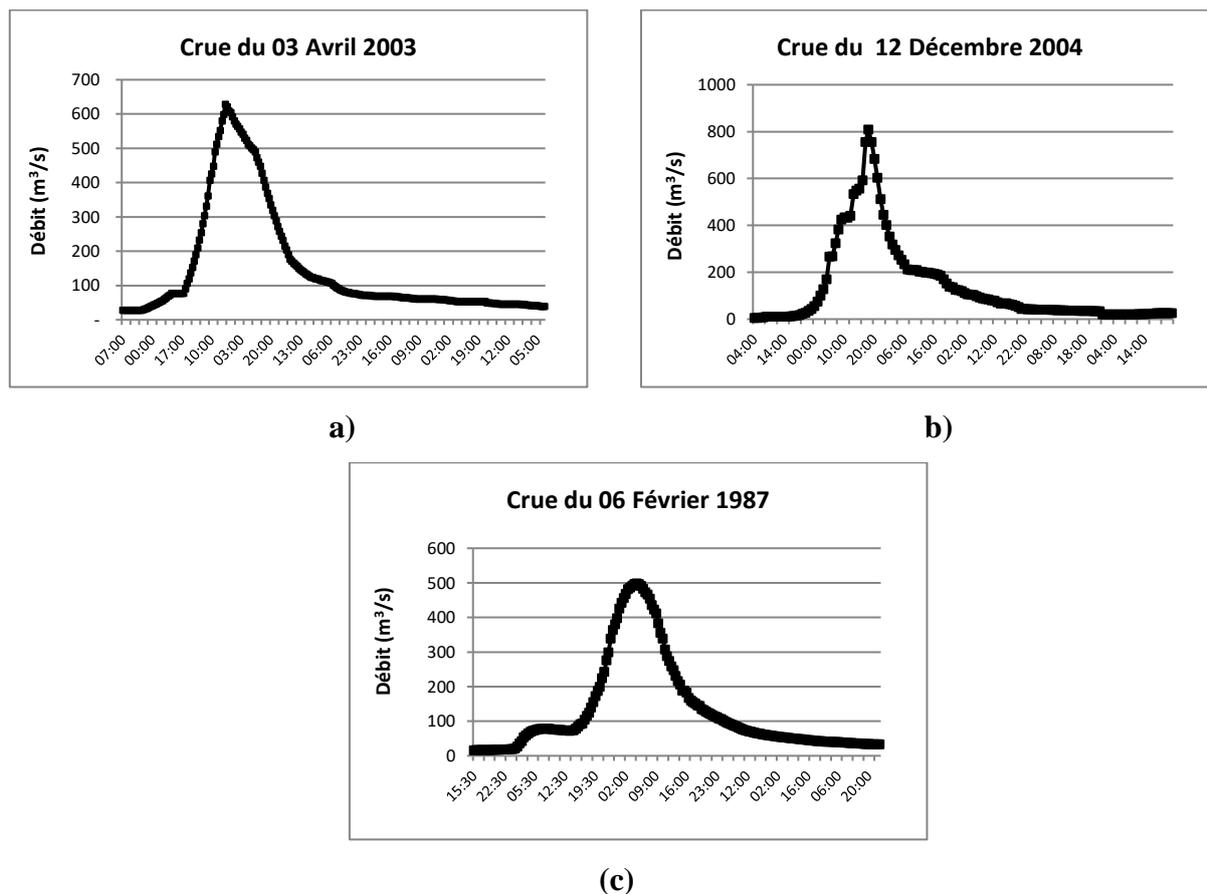


Figure 86. Crues idéalisées pour les sous bassins a) :1007 ;b) : 1204 ; c) : 1406

La caractérisation des épisodes de crue est basée généralement sur l’analyse de quelques variables-clés dont les valeurs conditionnent le fonctionnement hydrologique des sous bassins étudiés au cours de ces crues. Nous avons choisi les variables : la durée totale de la crue ou temps de base; le temps de montée; le débit moyen de la crue; débit maximal de la crue et le coefficient de pointe. Rappelons que le temps de base est le temps qui s’écoule entre le début de la crue de ruissellement superficiel et l’arrivée des derniers apports provenant de l’extrémité du bassin. Le temps de montée est le temps qui s’écoule entre le début de la crue et le maximum. Tandis que le coefficient de pointe de la crue est le rapport du débit maximum ruisselé et le débit moyen ruisselé pendant la durée du temps de base. Le tableau 9 suivant résume l’ensemble des crues sélectionnées en termes de valeurs moyennes.

Tableau 9. Valeurs moyennes de la dynamique des crues observées sur les sous bassins considérés

Code bassin	Type de réseau	Nombre de crues	Temps de montée (heures)	Temps de base (heures)	Débit max (m ³ /s)	Débit moy (m ³ /s)	Coefficient de Pointe
100701	Rectangulaire	08	115,82	158,98	798,25	278,66	2,95
120401	Parallèle	22	55,03	77,50	556,43	91,90	6,04
140601	Dendritique	12	82,50	112,67	310,90	56,07	4,72

Ces résultats nous ont conduit à essayer de trouver des explications quant à la relation entre la caractérisation des crues des bassins et la simulation des différents réseaux de drainage (figure 87).

1. Le réseau rectangulaire du sous bassin 1007 correspond au temps de montée le plus long et au débit max le plus fort. Le réseau hydrographique est principalement guidé par la lithologie (alternances de roches dures et tendres) et la fracturation. Le sous bassin 1007 se caractérise par des roches métamorphiques comme les Gneiss et les Schistes dues au mouvement tectonique. Le long des fractures, l'érosion et l'altération sont facilitées ; un cours d'eau peut alors se développer rapidement, capturer facilement d'autres cours d'eau ou bien s'adapter en utilisant des directions structurales. Ainsi une faille peut bloquer et dévier un cours d'eau ou modifier son régime en augmentant ou diminuer sa pente. Les failles représentent toujours les chemins les plus faciles à traverser (zones de faiblesse). Ces failles reculent le mouvement de l'eau, et au même temps, elles peuvent contenir de très grandes quantités d'eau ruisselée.

2. Le réseau parallèle du sous bassin 1204 correspond au temps de montée le plus court avec un débit fort. La forme allongée du bassin versant favorise le développement de ce genre des réseaux. Le réseau parallèle est indépendant du contrôle structural. A cause de la pente raide, les cours d'eau sont parallèles et longs avec peu d'affluents à l'amont, qui suivent la même direction vers le thalweg principal. Le sous bassin 1204 se caractérise par des roches sédimentaires peu perméables, dominé par les Marnes qui favorisent le ruissellement superficiel.

3. Le réseau dendritique du sous bassin 1406 correspond à un temps de montée moyen et un débit faible par rapport aux sous bassins 1007 et 1204. Le réseau dendritique se caractérise par une pente régionale faible qui favorise le développement de plusieurs affluents (une forme arborescente). Les Marnes (roches peu perméables), les Calcaires et les Grès (roches perméables) ralentissent le ruissellement superficiel et favorisent l'infiltration de l'eau dans le sol.

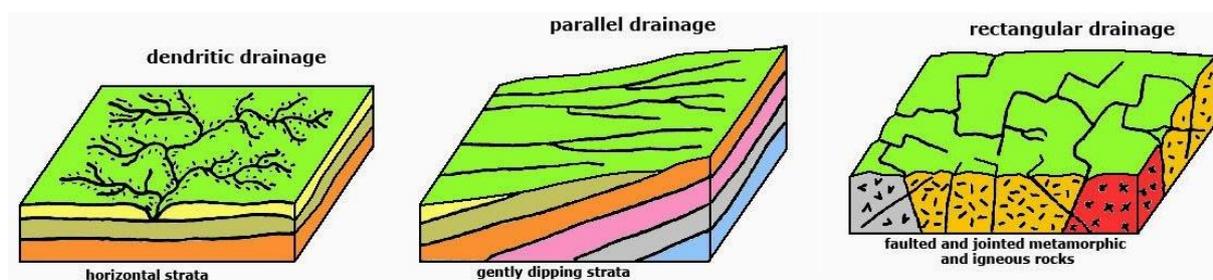


Figure 87. Réseaux de drainage avec les caractéristiques géologiques (Kavvas, 2015)

Pour le schéma final obtenu par la simulation du réseau hydrographique, on constate que le réseau parallèle du sous bassin 1204 n'a pas beaucoup de zones qui engendrent elles-mêmes des débits forts, et c'est pour cette raison que le temps de montée est court. Contrairement aux sous bassins 1007 et 1406, le réseau est suffisamment complexe, de sorte que le temps de montée est long. Au moment où ces forts débits, issus de chaque zone, rejoignent le cours d'eau principal, ils augmentent le débit écoulé vers l'exutoire, et cela explique les résultats finals de la simulation.

5.6. Conclusion

Tous les éléments étudiés dans ce mémoire, à l'échelle du bassin versant conduisent à proposer un schéma de fonctionnement hydrologique, c'est-à-dire une description type des chemins de l'eau pour chaque sous bassin versant. Nous présentons ici les résultats des chemins d'écoulement à travers une grille des directions des flux d'écoulement. Le bassin 1007 (Kebir Rhumel) montre une configuration assez complexe (figure 88.a). Le bassin 1406 (Seybouse) présente une configuration moins complexe (figure 88.b). Tandis que le bassin 1204 (Mellegue) exhibe une configuration simplifiée illustrant bien la structure parallèle du réseau hydrographique du bassin (figure 88.c).

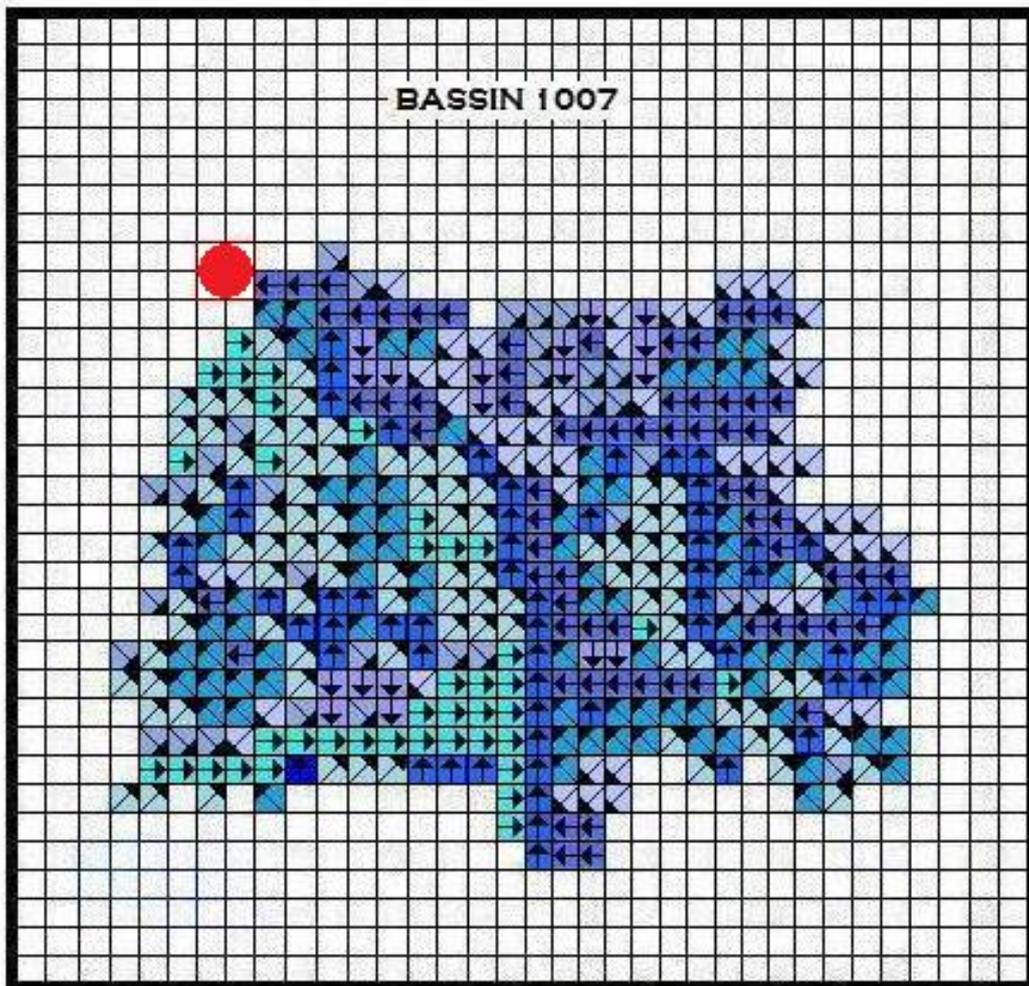


Figure 88.c. Direction des flux des écoulements superficiels du sous bassin Kebir Rhumel (1007)

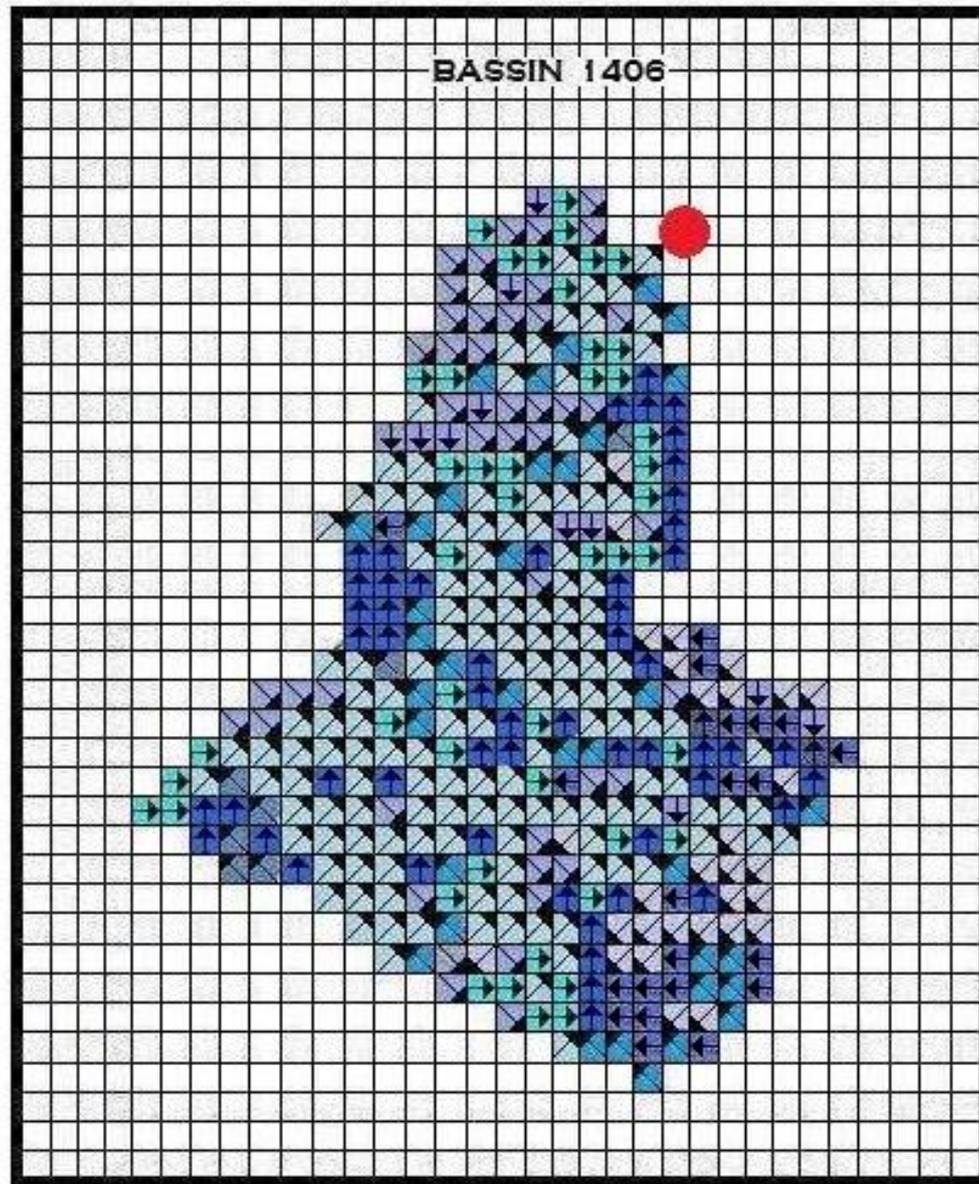


Figure 88.b. Direction des flux des écoulements superficiels du sous bassin de Seybouse
(1406)

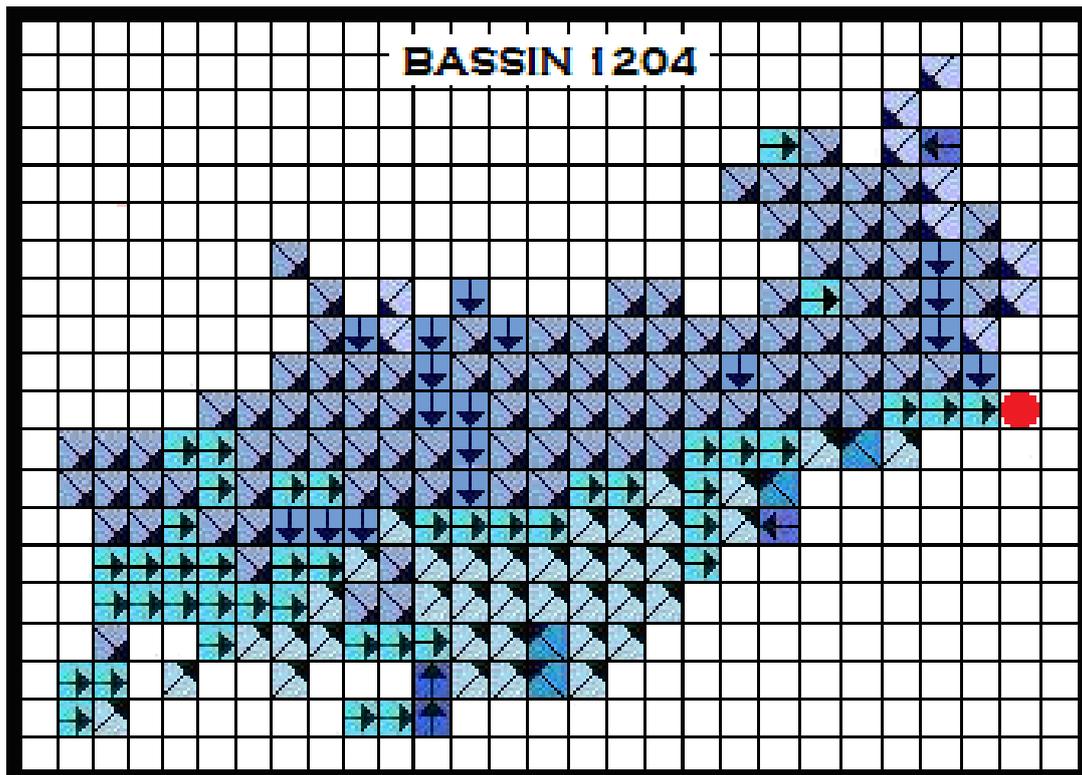


Figure 88.c. Direction des flux des écoulements superficiels du sous bassin Mellegue (1204)

CONCLUSION GENERALE

Les travaux présentés dans ce mémoire ont pour but une meilleure compréhension du fonctionnement hydrologique de quelques bassins versants du Nord-Est Algérien à réseaux hydrographiques différents ; dendritique, parallèle et rectangulaire. Les bassins retenus dans l'étude sont la Medjerda-Mellegue, la Seybouse, le Kebir-Rhumel, le Côtiers Constantinois Est et les Hauts Plateaux Constantinois. Au terme de cette étude nous rapportons les conclusions suivantes :

- L'étude bibliographique a mis en exergue, la description géomorphologique des bassins versants qui apporte des informations pertinentes sur l'écoulement de surface. L'organisation des réseaux hydrographiques est un facteur fondamental dans le fonctionnement hydrologique des bassins versants. Elle représente la signature d'un certain nombre de processus de transfert d'eau.

- Différentes méthodes d'analyse sont utilisées en hydrologie pour d'expliquer les processus d'écoulements dans un bassin versant. Les études rapportées dans la littérature scientifique se sont principalement concentrées sur la régionalisation des paramètres des bassins. Dans ce contexte, l'accent est mis particulièrement sur les méthodes de statistique multivariée. L'Analyse en Composantes Principales (ACP) a été appliquée afin de déterminer le degré de dépendance des bassins et les affinités entre leurs caractéristiques. Les résultats sont les suivants :

- Les trois premières composantes principales expliquent 82,33% de l'information contenues dans les données des descripteurs des bassins considérés. Toutes les variables sont bien représentées sur l'axe 1 excepté l'indice de forme K_c et le débit Q .

- Les variables T_c , D_d , S , Q , L_t et K_c contribuent le plus aux dimensions 1 et 2 et dans une moindre mesure les variables i , I_{pr} , et R_c . Le cercle de corrélation ne montre pas de regroupement particulier de points à l'exception des bassins 1203 et 1201 qui présentent beaucoup de similarité de l'ensemble des descripteurs.

- En vue de mieux comprendre le fonctionnement hydrologique des bassins de la région d'étude (1201 ; 1203 ; 1204 ; 1007 et 1406), la description géomorphologique des bassins

versants a été approchée selon trois étapes i) classification du réseau hydrographique ; ii) tracé de l'arborescence du réseau hydrographique ; iii) identification des chemins d'écoulement possibles. L'analyse a identifié, 8, 8, 13, 26 et 14 chemins d'écoulement pour les bassins 1201, 1203, 1204, 1007 et 1406 respectivement.

- La simulation des débits de crue à l'exutoire, selon les arborescences trouvées, a été effectuée sous le logiciel R. Les résultats ont montré que pour l'ensemble des bassins considérés dans la présente analyse, le bassin 1007, à réseau rectangulaire, a le plus grand débit simulé et le plus grand nombre de nœuds.
- La base de données des crues a révélé des hydrogrammes de crues marqués par un début de montée relativement élevé caractérisant des crues souvent soudaines et rapides (flash floods). L'analyse des chroniques des crues nous a conduits à essayer de trouver des explications quant à la relation entre la caractérisation des crues des bassins et la simulation des différents réseaux de drainage. L'analyse a concerné uniquement un sous bassin pour chacun des réseaux rectangulaire, parallèle et dendritique, soit respectivement 1007, 1406 et 1204. Nous avons pu conclure une forte corrélation entre la géologie sous-jacente et les hydrogrammes de crue. En outre Le réseau rectangulaire du bassin 1007 correspond au temps de montée le plus long et au débit max le plus fort. Le réseau parallèle du bassin 1204 correspond au temps de montée le plus court avec un débit fort. Le réseau dendritique du bassin 1406 correspond à un temps de montée moyen et un débit faible par rapport aux bassins 1007 et 1204.
- Le réseau parallèle du bassin 1204 n'a pas beaucoup de zones qui engendrent des débits forts, et c'est pour cette raison que le temps de montée est court. A l'opposé, les bassins 1007 et 1406, ont leurs réseaux suffisamment complexes, conduisant à un temps de montée plus long. De plus, au moment où ces forts débits, issus de chaque zone, rejoignent le cours d'eau principal, ils augmentent le débit écoulé vers l'exutoire.
- Les résultats de cette étude soulignent un intérêt certain quant à la poursuite de ce champ d'investigation. Il y a lieu de noter le rôle des interactions spatiales sur la dynamique du ruissellement en tout point du bassin. La forme et la densité des réseaux de drainage varient considérablement d'un bassin à l'autre. La réponse hydrologique d'un bassin versant à une averse est un processus complexe.

Dans l'optique d'améliorer ce travail au futur, il faudra approfondir la description géomorphologique du bassin et introduire d'autres indices tel que l'angle de jonction des affluents. D'autre part, une autre perspective s'ouvre, celle de l'utilisation des automates cellulaires qui sont compatibles avec les bases de données spatiales gérées par les SIG. Ils sont connus pour leurs avantages dans la modélisation des processus spatiaux car ils traitent l'espace d'une manière explicite et à un niveau de détail qui peut être considérable.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abdeddaim, H.** 2018. *Contribution à l'étude de l'influence de la structure du réseau hydrographique sur le risque hydrologique*. Thèse de Doctorat. Université de Biskra. 276 p.
- Abdeddaim, H. et Benkhaled, A.** 2016. *Influence de la structure du réseau hydrographique sur la réponse hydrologique « cas des bassins du Nord-Est de l'Algérie »*. Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, n°27, Sept 2016, pp. 313-335.
- Abdi, H. et Williams, L.J.** 2010. "Principal Component Analysis." John Wiley and Sons, Inc. WIREs Comp Stat 2: 433–59.
- Agence des Bassins Hydrographiques "Constantine-Seybouse-Mellegue".** 2001. *Délimitation des bassins versants*.
- Agence des Bassins Hydrographiques "Constantine-Seybouse-Mellegue".** 2011. *Délimitation des sous bassins versants*.
- Agence Nationale des Ressources Hydrauliques.** 2005. *Données hydrométriques et carte de situation des stations*. Fichier format Excel.
- Ambroise, B.** 1999. *La dynamique du cycle de l'eau dans un bassin versant : processus, facteurs, modèles*. Deuxième édition. Ecole polytechnique fédérale de Lausanne. 206 p.
- Ancey, C.** 2012. *Risques hydrologiques et aménagement du territoire*. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne. 350 p.
- Anctil, F., Rousselle, J. et Lauzon, N.** 2005. *Hydrologie : cheminements de l'eau*. Presses internationales polytechniques. 317 p.
- Ann, V.** 2008. *Extraits de notes de cours de l'hydrologie générale. Département de génie rural*. Institut de technologie de Cambodge. 111 p.
- Argialas, D.P., Lyon, J.G. et Mintzer, O.W.** 1988. *Quantitative description and classification of drainage patterns*. American society of Photogrammetry and Remote Sensing . Topographic laboratories. Vol. 54, No. 4, P. 505-509.
- Balek, J., Jones, G.P. et Skofteland, E.** 1989. *Notes de cours de formation pour techniciens en hydrologie*. Une contribution au programme hydrologique international. Traduction française. UNESCO, Paris, France. 282 p.
- Bois, P.** 2000. *Hydrologie générale*. ENSHM Grenoble, Cours photocopié. Institut National Polytechnique de Grenoble. 180 p.
- Bouguerne, A., Boudoukha, A., Benkhaled, A. et Mebarkia, A.** 2016. *Assessment of surface water quality of Ain Zada dam (Algeria) using multivariate statistical techniques*. Intl. J. River Basin Management . 28(12), pp 3841–3854.
- Bravard, J.P. et Petit, F.** 1997. *Les cours d'eau, dynamique du système fluvial*. Paris, Armand Colin, Collection U. 222 p.

- Breton-Dufour., M.** 2017. *Étude de méthodes de régionalisation des paramètres des modèles hydrologiques et application à un bassin versant non jaugé au Mexique*. Mémoire de Maitrise. École de Technologie Supérieure Université Du Québec. 172 p.
- Bureau National d'Etude pour le Développement Rural.** 2010. *Différentes cartes de la région d'étude « Nord-Est de l'Algérie »*.
- Charlier, J.B.** 2007. *Fonctionnement et modélisation hydrologique d'un petit bassin versant cultivé en milieu volcanique tropical*. Thèse de Doctorat. Spécialité structure et évolution de la Terre et des autres planètes, Ecole Doctorale SIBAGHE, sciences et techniques du Languedoc, Université MONTPELLIER II. 246 p.
- Charlton, Ro.** 2008. *Fundamentals of fluvial geomorphology*. Taylor and Francis group. London and New York. 275 p.
- Chevalier, P., Planchon, O. et Lapetite, J.M.** 1990. *Le fonctionnement hydrologique d'un bassin versant*. Pp.207-223.
- Deffontaines, B.** 1990. *Développement d'une méthodologie d'analyse morphostructurale et morphonéotectonique*. Analyse des surfaces enveloppées du réseau hydrographique et des modèles numériques de terrain. Application au Nord-Est de la France. Thèse de Doctorat de l'université Paris VI. Spécialité de géologie structurale et télédétection. 264 p.
- Degoutte, G.** 2001. *Hydraulique et dynamique fluviale appliquées au diagnostic, à l'aménagement et la gestion des rivières*. Collection ouvrages pédagogiques, Edition ENGREF. 306 p.
- Douvinet, J., Delahaye, D. et Langlois, P.** 2008. *Modélisation de la dynamique potentielle d'un bassin versant et mesure de son efficacité structurelle*. Cybergo : Revue européenne de la géographie. Environnemental sciences. 19 p.
- Dubreuil, P.** 1974. *Initiation à l'analyse hydrologique*. ORSTOM. 226 p.
- Faregh, W.** 2018. *Etude du risque hydrologique en zone urbaine, cas de la région de Oum El Bouaghi*. Thèse de Doctorat. Université de Biskra. 281 p.
- Gallic, E.** 2015. *Logiciel R et programmation*. Notes de cours adressées aux étudiants de Master de Statistique. Université de Rennes 1. 232 p.
- Glossaire International d'Hydrologie.** 1992. Liste des termes équivalents avec leur définition. 471 p.
- Goulet, V.** 2016. *Introduction à la programmation en R*. Cinquième édition. Ecole d'actuariat, Université Laval. Avec la collaboration de Laurent Caron. Québec. 218 p.
- Graff, B.** 2004. *Prédétermination des débits de crue des petits bassins versants torrentiels*. Thèse de Doctorat. Université de Montpellier II. 376 p.
- Hachemi, A.** 2017. *Contribution à l'étude des crues de l'Oued Abiod (Biskra)*. Thèse de Doctorat. Université de Biskra. 142 p.

- Howard, A.D.** 1967. *Drainage analysis in geological interpretation (a summation)*. The American Association Of Petroleum Geologists Bulletin. V. 51. No. 11 (November. 1967). 4 figs. Table. Stanford, California 94305. P. 2246-2259.
- Ichoku, C. et Chorowicz, J.** 1994. *A numerical approach to the analysis and classification of channel network patterns*. Laboratoire de géologie géomorphologie structurale et télédétection. Université de Pierre et Marie Curie, Paris. P. 161-174.
- Iratni, N.** 2014. *Modélisation hydrologique de quelques sous bassins versants de la Tafna*. Mémoire de Magister. Université des sciences et de la technologie d'Oran. 160 p.
- Jang, K. et TBMJ, O.** 2015. Analysis and classification of channel network types for intermittent streams in the United Arab emirates and Oman, 5(5).
- Jolliffe, I.T.** 2002. *Principal Component Analysis*. 2nd ed. New York: Springer-Verlag. 518 p.
- Jrifa, I. et Ezzejjari, I.** 2015. *Caractéristiques du réseau hydrographique des deux zones : Matmata, Ain Boukellal sur des cartes topographiques (1/50000)*. Mémoire de fin d'études. Licence Sciences et Techniques : Géorressources et Environnement. Stage effectué au laboratoire GRE FST-Fès. Maroc. 35 p.
- Kadir, D.** 2005. *Advanced photogéology. Lecture notes*. Geological engineering dept. 46 p.
- Kaiser, H.F.** 1961. "A Note on Guttman's Lower Bound for the Number of Common Factors" British Journal of Statistical Psychology 14: 1-2.
- Kokkonen, T., Jakeman, J.A., Young, P.C. et Koivusalo, H.J.** 2003. *Predicting daily flows in ungauged catchments: model regionalization from catchment descriptors at the Coweeta Hydrologic Laboratory, North Carolina*. Hydrological Processes. En ligne. Vol 17, issu 11, p 2219-2238.
- Laborde, J.P.** 2000. *Eléments d'hydrologie de surface. Cours*. Centre nationale de la recherche scientifique. Université de Nice-Shophia Antipolis. 204 p.
- Lagacé, R.** 2011. *Notions d'hydraulique en milieu rural*. Cours GAE-3005. Ing. Et agr., professeur. Faculté des sciences de l'agriculture et de l'alimentation. Département des sols et de génie agroalimentaire. Université LAVAL. Québec. Canada. 307 p.
- Laglaine, V., Berod, D., Devred, D. et Musy, A.** 1994. *Modélisation déterministe de la crue extrême d'un bassin versant de montagne avec application de la description géomorphologique du réseau hydrographique*. Revue des sciences de l'eau. pp 285 - 308.
- Le Clerc, S.** 2004. *Revisiter la notion de scénario hydrologique de référence pour la caractérisation des inondations*. Thèse de Doctorat. Université Joseph Fournier de Grenoble. 373 p.
- Le Pape, S.** 1998. *Analyse et quantification du réseau hydrographique, le réseau hydrographique comme objet vectoriel*. Mémoire de l'École Supérieure des Géomètres Topographes, 66 p.
- Legout, C.** 2005. *Etude des mécanismes hydrologiques et biogéochimiques de la recharge des nappes à surface libre*. Thèse de Doctorat. Université Rennes 1. 198 p.

- Maychou, S.** 2009. *Etude morphostructurale et cartographie SIG du Rharb Septentrional et du Prérif (Maroc)*. Analyse sismotectonique et modélisation de la déformation de la région de Moulay Bouselham. Thèse de Doctorat. 197 p.
- Mayer, R.E.** 2014. *Notions de géographie physique*. Edition des archives contemporaines. France.
- Mebarki, A.** 2005. *Hydrologie des bassins de l'Est Algérien : ressources en eau, aménagement et environnement*. Thèse de Doctorat d'Etat. Université Mentouri de Constantine. 360 p.
- Mejia, A.I. et Niemann, J.D.** 2008. *Identification and characterization of dendritic, parallel, pinnate, rectangular and trellis networks based on deviations from platform self-similarity*. Journal of geophysical research, Vol. 113, F02015, doi:10.1029/2007JF000781, 2008. University of Maryland and Colorado, USA. Article, 21 p.
- Menad, W.** 2012. *Risques de crue et de ruissellement superficiel en métropole méditerranéenne : cas de la partie Ouest du Grand Alger*. Thèse de Doctorat en géographie. Université de Paris Diderot. 331 p.
- Mendiguchia, C., Moreno, C. et Garcia-Vargas, M.** 2007. *Evaluation of natural and anthropogenic influences on the Guadalquivir River (Spain) by dissolved heavy metals and nutrients*. Chemosphere, 69, pp 1509–1517.
- Merz, R. et Blöschl, G.** 2004. *Regionalization of catchment model parameters*. Journal of Hydrology. En ligne, vol 287, issues 1-4, pp 95–123.
- Morisawa, M.** 1968. *Streams : their dynamics and morphology*. Earth and Planetary Science series. 175 p.
- Mustapha, A., Md Yusoff, F., Zaharin Aris, A. et Pauzi Zakaria, M.** 2014. *Statistical approach in determining the spatial changes of surface water quality at the upper course of Kano River, Nigeria*. Water Quality, Exposure and Health, 6 (3), 127–142.
- Musy, A. et Higy, C.** 2004. *Hydrologie : une science de la nature*. Presses polytechniques et universitaires romandes. Collection 'Gérer l'environnement'. 314 p.
- Musy, A. et Higy, C.** 1998. *Hydrologie appliquée*. Office fédérale de l'éducation et de la science. Ecole polytechnique fédérale de Lausanne. 368 p.
- Musy, A. et Laglaine, V.** 1992. *Hydrologie générale*. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne. Cours photocopié. 480 p.
- Oudin, L., Vazken, A., Charles, P., Claude, M., et Le Moine, N.** 2008. *Spatial proximity, physical similarity, regression and ungaged catchments: A comparison of regionalization approaches based on 913 French catchments*. Water Resources. Research. Vol 44 issue 3. En ligne. 15 p.
- Paccaut, G. et Roulier, C.** 2010. *Espace nécessaire aux cours d'eau en méandres*. Rapport final. Office fédéral de l'environnement. Division prévision des dangers. 121 p.

- Parajka, J., Merz, R. et Blöschl, G.** 2005. *A comparison of regionalisation methods for catchment model parameters*. Hydrology and Earth System Sciences. En ligne, vol , 9 issue 3 pp 157–171.
- Parajka, J., Viglione, A., Rogger, M., Salinas, J.L., Sivapalan, M. et Blöschl, G.** 2013. *Comparative assessment of predictions in ungauged basins – Part 1: Runoff hydrograph studies*. Hydrology and Earth System Sciences. En ligne. Vol 17 issue 5 p 1783-1795.
- Parvis, M.** 1950. *Drainage pattern significance in airphoto identification of soils and bedrocks*. Photogramm. Eng., 16, p. 375-409.
- Peres-Neto, P.R., Jackson, D.A. et Somers, K.M.** 2005. “How Many Principal Components? Stopping Rules for Determining the Number of Non-Trivial Axes Revisited.” British Journal of Statistical Psychology 49: 974–9.
- Phillips, L.F. et Schumm, S.A.** 1987. *Effect of regional slope on drainage networks*. Geology, 15. P. 813 – 816.
- Plan National de l’Eau.** 2010. *Carte de découpage de l’Algérie en régions hydrographiques*.
- Roche, M.** 1963. *Hydrologie de surface*. Office de la recherche scientifique et technique outre-mer, Paris. Gauthier-Villars éditeur, Paris. 431 p.
- Roche, M.** 1971. *Les divers types de modèles déterministes*. La houille blanche, (2), pp.111-130.
- Roche, P.A., Miquel, J. et Gaume, E.** 2012. *Hydrologie quantitative : processus, modèles et aide à la décision*. Ingénierie et développement durable. 590 p.
- Schumm, S.A. et Kahn.** 1972. *Experimental study of channel pattern*. Department of geology and engineering research center, Colorado State University. Geological society of American Bulletin, v. 83, p. 1755-1770, 22 figs.
- Shailesh, C.** 2015. *Drainage pattern*. Geo education. College of India. p. 1-7.
- Souanef, N.** 2015. *Analyse fréquentielle des débits max de crues de l’Oued Abiod*. Mémoire de Magister d’Hydraulique. Université de Mohamed Khider Biskra. 134 p.
- Viviroli, D., Mittelbach, H., Gurtz, J. et Weingartner, R.** 2009. *Continuous simulation for flood estimation in ungauged mesoscale catchments of Switzerland Part II: Parameter regionalisation and flood estimation results*. Journal of hydrology. En ligne. Vol 377 issue 1, p 208-225.
- Wang, X., Ye, L., Cai, Q. et Qu, X.** 2012. *Evaluation of spatial and temporal variation in stream water quality by multivariate statistical techniques, a case study of the Xiangxi River Basin, China*. Quaternary International – Journal, 282, pp 137–144.
- Ward, R.C. et Robinson, M.** 1990. *Principles of Hydrology*. Third edition by McGraw-Hill book company (UK). 365 p.
- Zernitz, E.R.** 1932. *Drainage patterns and their significance*. J. Geol., 40. P. 498-521.

Zhang, L. et Guilbert, E. 2013. *Automatic drainage pattern recognition in river networks*. Dept. of land surveying and geo-informatics, the Hong Kong Polytechnic University, Hung Hom, Kowloon, Hong Kong. Article in International Journal of Geographical Information Science. 24 p.

- **Sites web consultés**

Dacharry, M. 1998. *Lit du cours d'eau naturel : définitions et commentaires*. Disponible sur : <https://hydrologie.org/glu/FRDIC/DICLIT.HTM> [consulté le 01 Décembre 2018].

Hayden, L. 2018. *Principal Components Analysis in R*. Disponible sur : <https://www.datacamp.com/community/tutorials/pca-analysis-r> [Consulté le 02 Février 2019]

Holtz, Y. 2017. *The R graph gallery: Network*. Disponible sur : <https://www.r-graph-gallery.com/network/> [consulté le 18 Février 2019].

Kavvas, M. 2015. *Introduction to geology: Chapter 11 Rivers, streams and water underground*. Disponible sur : <http://www.geologycafe.com/class/chapter11.html> [consulté le 11 Mai 2019].

Radisics, M. 2018. *Water Shapes. Earth :aerial photographs*. Disponible sur : <https://water.shapes.earth/artworks/> [consulté le 10 Juin 2019].