

République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث 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
Ref :



جامعة محمد خيضر بiskra
كلية العلوم والتكنولوجيا
قسم: الهندسة المدنية والري
المرجع:

Thèse présentée en vue de l'obtention du diplôme de

Doctorat LMD en : Hydraulique

Spécialité (Option) : Hydraulique urbaine

Thème

**Etude du risque hydrologique en zone urbaine
Cas de la région de Oum El Bouaghi**

Présenté par : **FAREGH Wail**

Soutenu le :/.../ Devant le jury composé de

Dr. MESSAMAH Abdelhamid	MCA	Président	Université de Biskra
Pr.BENKHALED Abdelkader	Professeur	Rapporteur	Université de Biskra
Dr.ABDELBAKI Cherifa	MCA	Examinatrice	Université de Tlemcen
Dr. BOUTAGHENE Hamouda	MCA	Examineur	Université d'Annaba

Remerciements

Ce travail a été effectué au sein du laboratoire de Recherche en Hydraulique Souterraine et de Surface (LARHYSS), à l'université Mohamed Khider - Biskra, sous la direction du professeur ACHOUR Bachir. Je tiens à remercier tout d'abord le professeur ACHOUR Bachir de m'avoir permis de mener mes recherches dans le laboratoire.

Ma reconnaissance va plus particulièrement à monsieur BENKHALED Abdelkader, professeur à l'université de Biskra, qui m'a encadré tout au long de ma thèse. Ma considération est inestimable. Ses remarques et critiques pertinentes m'ont conduit vers la bonne voie. Son soutien m'a permis de ne jamais faiblir et de poursuivre toujours plus loin mes travaux. Je tiens également à souligner que la confiance qu'il a mis en moi a été un moteur à ma réussite. D'un point de vue relationnel, j'ai trouvé une relation cordiale et une écoute intéressée. J'ai énormément appris à ses côtés.

Mon respect aux membres du jury qui me feront l'honneur d'apprécier mon travail. J'exprime ma gratitude à Monsieur MESSAMAH Abdelhamid, MCA à l'Université de Biskra, pour l'honneur qu'il me fait en présidant mon jury de thèse. Je remercie également madame ABDELBAKI Cherifa, MCA à l'Université de Tlemcen, en acceptant de juger ce travail en qualité d'examineur. Mes remerciements vont également à monsieur BOUTAGHENE Hamouda, MCA à l'Université de Annaba, pour m'avoir fait le plaisir de participer au jury de soutenance.

Mes remerciements s'adressent également à monsieur Zidi Abdlehakim, ingénieur pédologue au laboratoire de l'I.N.S.I.D, pour son aide précieuse dans l'analyse granulométriques des échantillons de sol.

A l'issu de ce travail, Je tiens à exprimer mes vifs remerciements à ma famille et à toutes les personnes qui m'ont aidé tout au long de mes années de recherche et pour m'avoir permis de mener cette thèse à bien

Dédicace

Je remercie dieu tout puissant qui m'a éclairé le bon chemin et qui m'a guidé dans ma vie et aussi toutes les personnes aimables et serviables qui m'ont soutenu et qui ont contribué à mon enrichissement personnel commençant par mon très cher père pour son immense affection, sa bienveillance et sa tendresse qu'il m'a apporté durant toutes mes années d'études. Je pense également à ma douce et tendre mère qui a été toujours présente par ces conseils, sa bonté et ses encouragements infinis qui m'ont fortement aidé. Ces dédicaces seraient incomplètes sans les avoir adressées à mes chers frères : Heithem et Abderrahim, mes amis : Billel, Heithem et Rafik. À tous ces gens- là, je serais éternellement reconnaissante.

Je voudrais également dédier ce travail au Docteur MEZA Nouredine (université d'Oum El Bouaghi), Professeur KHIARI Abdelkader (université d'Oum El Bouaghi), qu'ils m'ont accompagné, aidé, soutenu et partagé avec moi des moments faciles et difficiles durant ces trois années.

Mes dédicaces s'adressent également à l'ensemble du personnel du laboratoire INSID (Oum El Bouaghi) et du laboratoire LNHC Oum el bouaghi particulièrement au monsieur BARKAT Ahmed.

Résumé

L'objectif de ce travail est d'étudier le risque d'inondation en milieu urbain à l'aide d'une approche multicritères. La zone d'étude est la ville de Sigus, wilaya d'Oum El Bouaghi.

L'étude est divisée en deux parties. La première partie consiste à caractériser les principaux paramètres du bassin versant responsables de générer les flux inondants. Ces paramètres sont le mode d'occupation des sols et les types des sols. Ces deux paramètres sont déterminés en utilisant une approche couplée SIG-télédétection qui a abouti à des cartes des coefficients de ruissellement Cr_{125} et Cr_{80} .

La deuxième partie est consacrée à analyser, évaluer et cartographier la vulnérabilité de Sigus en situation d'inondation. À partir des bases de données Cr et d'autres paramètres on a pu calculer le débit centennal et vérifier la capacité d'évacuation des systèmes existants. Le canal existant est sous dimensionné. Puis, on a étudié le comportement de la ville sur la base des paramètres de la transmissivité des zones bâties. La dernière partie est l'analyse multicritère pour évaluer et cartographier les différents critères composant la vulnérabilité. L'utilisation de la méthode multicritères AHP a abouti à une carte finale de la vulnérabilité de Sigus au risque d'inondation.

Mots clés : Risque d'inondation, Sigus, Algérie, Bassin versant, cartographie, SIG-télédétection, Transmissivité, AHP

Abstract

The objective of this work is to study the flood risk in urban areas using a multi-criteria approach. The study area is the city of Sigus, wilaya of Oum El Bouaghi.

The study is divided into two parts. The first part consists of characterizing the main watershed parameters responsible for generating flood flows. These parameters are land use patterns and soil types. These two parameters are determined using a GIS-remote sensing approach that resulted in maps of Cr_{125} and Cr_{80} runoff coefficients.

The second part is devoted to analyze, evaluate and map the vulnerability of Sigus in flood situation. From the Cr databases and other parameters it was possible to calculate the centennial flow and to check the evacuation capacity of the existing systems. The existing channel is undersized. Then, we studied the behavior of the city on the basis of the parameters of the transmissivity of built-up areas. The last part is the multicriteria analysis to evaluate and map the different criteria that make up the vulnerability. The use of the AHP multicriteria method resulted in a final map of Sigus' vulnerability to flood risk.

Keywords: Flood, Sigus, Algeria, Watershed, cartography, GIS-remote sensing, Transmissivity, AHP.

المخلص

الهدف من هذا العمل هو دراسة مخاطر الفيضانات في المناطق الحضرية باستخدام نهج متعدد المعايير. منطقة الدراسة هي مدينة سيقوس، ولاية أم البواقي.

تنقسم الدراسة إلى جزأين. يهدف الجزء الأول إلى تحديد العوامل الرئيسية للحوض الساكب المسؤولة عن توليد تدفقات الفيضانات. هذه العوامل هي أنماط استخدام الأراضي وأنواع التربة. تم تحديد هذان العاملين باستخدام نهج الاستشعار عن بعد المرتبط بنظام المعلومات الجغرافية الذي أسفر عن خرائط لمعاملات الجريان.

الجزء الثاني مخصص لتحليل، تقييم وإنجاز خريطة خطر الفيضانات لمدينة سيقوس. انطلاقاً من قواعد البيانات لمعاملات الجريان إضافة إلى عوامل أخرى تمكنا من حساب التدفق المئوي والتحقق من قدرة الاستيعاب لنظم الحماية الموجودة، تبين أن القناة الحالية غير كافية. كذلك، درسنا سلوك النسيج العمراني على أساس معايير انتقال من المناطق المبنية. والجزء الأخير هو تحليل خطر الفيضانات عن طريق المعايير المتعددة. أسفر استخدام أسلوب تعدد المعايير عن خريطة نهائية لمخاطر الفيضانات في سيقوس.

الكلمات الرئيسية: الفيضانات، سيقوس، الجزائر، الحوض الساكب، الخرائط، نظم المعلومات الجغرافية الاستشعار عن بعد

Résumé

Sommaire

Sommaire

Introduction générale.....	1
Contexte et problématique.....	1
Objectif de la thèse.....	3
Principe méthodologique.....	4
Plan et structure de la thèse.....	5

Partie 01 : *Etat de l'art en matière du risque hydrologique*

Chapitre I : *Caractérisation du risque d'inondation en milieu urbain*

I.1 Introduction.....	6
I.2 Etymologie du mot risque.....	6
I.2.1 La thèse moderniste.....	6
I.2.2 Roman nautique.....	7
I.3 Définition du risque.....	7
I.3.1 L'aléa.....	8
I.3.1.1 Aléa climatique.....	8
I.3.1.2 Aléa hydraulique.....	10
I.3.2 La vulnérabilité.....	10
I.4 le phénomène "Crue".....	12
I.4.1 Processus de formation de l'écoulement de crue.....	12
I.4.2 Typologie des crues.....	18
I.5 Envergure des inondations.....	18
I.5.1 Les inondations : un risque hydrologique majeur.....	18
I.5.2 A l'échelle mondiale.....	19
I.5.3 Les inondations en Algérie.....	23
I.6 Conclusion.....	26

Chapitre II : *La modélisation en hydrologie*

II.1	Introduction.....	27
II.2	La modélisation hydrologique.....	29
II.2.1	Typologie des modèles.....	29
II.2.1.1	Modèle empirique (boite noire).....	29
II.2.1.2	Modèle conceptuel (boite grise).....	29
II.2.1.3	Modèle à base physique (boite blanche).....	29
II.2.1.4	Modèle global.....	30
II.2.1.5	Modèle distribué (spatialisé).....	30
II.2.1.6	Modèle semi-distribué.....	30
II.2.2	Critères de classification des modèles.....	30
II.2.3	Classification des modèles.....	31
II.2.3.1	Classification de Refsgaard.....	31
II.2.3.1.1	Les modèles déterministes.....	31
II.2.3.1.1.1	Empiriques (lumped).....	31
II.2.3.1.1.2	Globaux conceptuels.....	32
II.2.3.1.1.3	Distribués à base physique.....	32
II.2.3.1.2	Les modèles stochastiques.....	32
II.2.3.2	Classification d'Ambroise.....	33
II.2.3.2.1	Modèles empiriques globaux.....	33
II.2.3.2.2	Modèles conceptuels globaux.....	33
II.2.3.2.3	Modèles physiques spatialisés.....	34
II.2.3.2.4	Modèles conceptuels semi-spatialisé.....	34
II.3	La méthode SCS-CN.....	34
II.3.1	Contexte historique.....	34
II.3.2	Principe de la méthode.....	36
II.3.3	Les paramètres influençant le CN.....	38
II.3.3.1	Les types des sols.....	38
II.3.3.2	L'occupation du sol.....	39
II.3.3.3	Les conditions hydrologiques.....	40
II.3.3.4	Les activités agricoles.....	40
II.3.3.5	Les conditions antécédentes d'humidité.....	40
II.3.3.6	L'abstraction initiale.....	40

II.3.3.7 La durée, l'intensité et la turbidité de la pluie.....	41
II.3.4 Détermination du CN.....	41
II.3.5 Avantages et limites de la méthode SCS-CN.....	44
II.4 Conclusion.....	44

Chapitre III : *La télédétection et les systèmes d'informations géographiques en hydrologie*

III.1 La télédétection.....	45
III.1.1 Introduction.....	45
III.1.2 Définition.....	45
III.1.3 Principe de la télédétection.....	45
III.1.3.1 La télédétection passive.....	46
III.1.3.2 La télédétection active.....	46
III.1.4 Les plates-formes de la télédétection.....	46
III.1.5 Les résolutions.....	50
III.1.5.1 La résolution spatiale.....	50
III.1.5.2 La résolution temporelle.....	52
III.1.5.3 La résolution radiométrique.....	54
III.1.5.4 La résolution spectrale.....	55
III.1.6 Application de la télédétection en hydrologie.....	56
III.1.6.1 Les précipitations.....	57
III.1.6.1.1 Les techniques actuelles pour l'estimation des précipitations.....	58
III.1.6.2 L'occupation des sol.....	59
III.1.6.2.1 Classification.....	60
III.1.6.2.2 Les indices de végétation.....	61
III.1.6.2.3 Classifications thématiques des images de télédétection.....	62
III.1.6.2.3.1 La classification non supervisée.....	63
III.1.6.2.3.2 La classification supervisée.....	63
III.1.6.3 Les eaux de surfaces.....	64
III.1.6.3.1 La détection des eaux de surface.....	64
III.2 Les systèmes d'information géographiques.....	65
III.2.1 Contexte historique.....	65
III.2.2. Notions fondamentales d'un SIG.....	66

III.2.2.1	Définition.....	66
III.2.2.2	Les capacités fonctionnelles d'un SIG.....	66
III.2.2.3	Les types de données.....	68
III.2.2.3.1	Vecteur.....	68
III.2.2.3.2	Raster (données matricielles ou tessellation).....	68
III.2.4	Les bases de données.....	70
III.2.5	Les fonctions d'une carte.....	71
III.2.6	Conclusion.....	72

Partie 02 : Etude du risque d'inondation en milieu urbain :
application pour la ville de Sigus

Chapitre IV : Les caractéristiques morphométriques du bassin versant

IV.1	Introduction.....	73
IV.2	Présentation de la zone d'étude.....	73
IV.2.1	Situation géographique.....	73
IV.2.2	Climatologie.....	74
IV.2.2.1	Le climat.....	74
IV.2.2.2	La température.....	74
IV.2.2.3	L'humidité.....	74
IV.3	Définition d'un MNT.....	75
IV.4	Les types des MNT.....	75
IV.4.1	Les MNT Raster.....	75
IV.4.2	Les MNT TIN.....	76
IV.5	Délimitation du bassin versant.....	76
IV.6	Le réseau hydrographique.....	77
IV.6.1	Hierarchisation du réseau hydrographique.....	77
IV.6.2	Discretisation en sous bassins versants.....	78
IV.6.3	Le ratio de bifurcation (R_b).....	79
IV.6.4	Type de drainage.....	79
IV.6.5	Fréquence des cours d'eau.....	81
IV.6.6	La densité de drainage.....	81

IV.7	La géométrie du bassin versant.....	82
IV.7.1	Le facteur de forme de Horton.....	83
IV.7.2	L'indice de compacité (Gravelius).....	83
IV.7.3	Le rapport de circularité (Miller).....	83
IV.7.4	Le rapport d'élongation (Schumm).....	84
IV.8	Caractéristiques du relief.....	85
IV.8.1	Caractéristiques des altitudes (hypsométrie).....	85
IV.8.2	Le relief du bassin versant (relief total : B_h).....	91
IV.8.3	Le numéro de robustesse (R_n).....	92
IV.8.4	Les indices de pente.....	92
IV.8.4.1	Pente moyenne I_m	92
IV.8.4.2	Indice de pente globale I_g	93
IV.8.4.3	Dénivelée spécifique D_s	94
IV.8.5	Le temps de concentration (Formule de GIANDOTTI).....	95
IV.9	Conclusion.....	96

Chapitre V : Détermination du ruissellement

V.1	Introduction.....	97
V.2	Analyse des données pluviométriques.....	97
V.2.1	Pluies maximales journalières.....	97
V.2.2	Procédé d'ajustement.....	98
V.2.2.1	Présentation du logiciel.....	98
V.2.2.2	Test d'homogénéité (test de WILCOXON).....	99
V.2.2.3	Résultats d'ajustement.....	99
V.2.2.3.1	La méthode graphique.....	99
V.2.2.3.2	La méthode des critères.....	100
V.2.3	la pluie de courte durée.....	101
V.2.3.1	Pluie de courte durée et leurs intensités à différentes Fréquences.....	101
V.2.3.2	Intensités maximales à différentes Fréquences.....	101
V.3	Le débit de crue.....	104
V.3.1	Le concept du période de retour.....	104
V.3.2	Calcul du débit de crue.....	105
V.4	Détermination du coefficient de ruissellement par la méthode SCS-CN.....	106

V.4.1	La base de données type des sols.....	107
V.4.1.1	Méthode d'investigation indirecte.....	108
V.4.1.1.1	Logiciels et données utilisés.....	108
V.4.1.2	Campagne d'échantillonnage.....	109
V.4.1.2.1	Méthode d'échantillonnage.....	112
V.4.1.2.2	Liste du matériel utilitaire sur le terrain.....	112
V.4.2	La base des données occupation des sols.....	114
V.4.2.1	Evaluation de la précision thématique de la carte d'occupation des sols.....	116
V.4.3	Traitement de données.....	118
V.4.4	Les résultats (cartes du coefficient de ruissellement "Cr").....	118
V.4.4.1	Présentation du logiciel HEC-GeoHMS.....	119
V.4.4.1	Résultats et discussion.....	119
V.5	Conclusion.....	122

Chapitre VI : *Analyse multicritères pour l'évaluation et la cartographie de la vulnérabilité de Sigus au risque d'inondation.*

VI.1	Introduction.....	124
VI.2	Présentation de la zone d'étude.....	124
VI.2.1	Choix de la zone d'étude.....	124
VI.2.2	Historique des inondations.....	124
VI.2.3	Développement et organisation spatiale des villes.....	126
VI.2.3.1	Développement du tissu urbain de la ville de Sigus.....	126
VI.2.3.1.1	Etape avant 1954.....	126
VI.2.3.1.2	Etape entre 1954 – 1962.....	126
VI.2.3.1.3	Etape après 1962.....	126
VI.2.3.1.4	Taux d'urbanisation.....	127
VI.2.3.2	L'organisation de la ville.....	127
VI.2.4	Le système d'évacuation des eaux de ruissellement.....	129
VI.2.4.1	Situation actuelle des systèmes d'évacuation des eaux de ruissellement.....	129
VI.2.4.2	Vérification de la capacité d'évacuation du canal existant.....	130
VI.2.4.2	Présentation du logiciel HEC-RAS.....	130
VI.3	Etude de transmissivité des zones bâties.....	132
VI.3.1	Le relevé de pénétrabilité.....	132

VI.3.2	La transmissivité.....	133
VI.3.2.1	Perméabilité partielle.....	133
VI.3.2.1.1	Perméabilité d'une concession.....	133
VI.3.2.1.2	Perméabilité partielle d'un bloc.....	135
VI.3.2.1.3	Perméabilité partielle des routes.....	135
VI.3.2.1.4	Perméabilité partielle des vides.....	135
VI.3.2.2	Densité des chemins hydrauliques.....	135
VI.3.2.3	Largeur moyenne des chemins hydrauliques.....	135
VI.3.3	La zone d'étude.....	135
VI.3.4	Les résultats de l'étude de transmissivité.....	138
VI.3.4.1	La perméabilité partielle des CEP.....	138
VI.3.4.2	Densité des chemins hydrauliques.....	144
VI.3.4.3	Largeur moyenne des chemins hydrauliques.....	150
VI.3.5	Conclusion partielle.....	156
VI.4	Analyse multicritère pour l'évaluation et la cartographie de la vulnérabilité de la ville de Sigus au risque d'inondation.....	156
VI.4.1	Principe de la méthode AHP.....	157
VI.4.2	Conception du modèle hiérarchique.....	160
VI.4.2.1	Le critère "Transmissivité".....	162
VI.4.2.1.1	Le sous-critère "Perméabilité partielle".....	162
VI.4.2.1.2	Le sous-critère "Densité des chemins hydrauliques".....	165
VI.4.2.1.3	Le sous-critère "Largeur moyenne des chemins hydrauliques".....	167
VI.4.2.1.4	La transmissivité.....	169
VI.4.2.2	Le critère "Topographie".....	171
VI.4.2.2	L'objectif "la vulnérabilité".....	175
VI.5	Conclusion.....	178
	Conclusion générale.....	180

Annexes

Annexe 01	: Fiches d'échantillonnage des sols.....	1
Annexe 02	: Résultats de simulation hydraulique pour le canal existant	19
Annexe 03	: les relevés de pénétrabilité	27
Annexe 04	: Résultats de cartographie la de vulnérabilité par la méthode AHP.....	35

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : les inondations les plus dévastatrices de l'histoire.....	22
Tableau 1.2 : Inventaire des inondations catastrophiques en Algérie.....	25
Tableau 2.1 : Groupes hydrologiques des sols.....	39
Tableau 2.2 : Valeur du CN pour les zones urbaine.....	41
Tableau 2.3 : Valeur du CN pour les parcours en zones arides et semi-arides.....	42
Tableau 2.4 : Valeur du CN pour autres terres agricoles.....	42
Tableau 2.5 : Valeur du CN pour autres terres agricoles.....	43
Tableau 3.1 : la résolution radiométrique et les niveaux de luminosité correspondante.....	54
Tableau 3.2 : Classification de l'occupation des sols.....	60
Tableau 3.3 : Quelques indices de végétation.....	62
Tableau 3.4 : Quelques logiciels de traitement d'images satellitaires.....	63
Tableau 3.5 : Comparaison entre les types de données.....	69
Tableau 3.6 : les plus importants logiciels SIG.....	72
Tableau 4.1 : Températures maximales et minimales.....	74
Tableau 4.2 : Humidité moyenne mensuelle.....	74
Tableau 4.3 : Caractéristiques du réseau hydrographique.....	79
Tableau 4.4 : type de drainage du bassin versant de Sigus.....	80
Tableau 4.5 : Texture de drainage.....	81
Tableau 4.6 : Facteur de forme de Horton.....	83
Tableau 4.7 : Indice de compacité	83
Tableau 4.8 : Rapport de circularité	84
Tableau 4.9 : Rapport d'allongement.....	84
Tableau 4.10 : Limites de variation pour les différents indices de forme.....	84
Tableau 4.11 : Répartition en pourcentage de la surface élémentaire du SB1.....	86
Tableau 4.12 : Répartition en pourcentage de la surface élémentaire du SB2.....	87
Tableau 4.13 : Répartition en pourcentage de la surface élémentaire du SB3.....	88
Tableau 4.14 : Répartition en pourcentage de la surface élémentaire du SB4.....	89
Tableau 4.15 : Répartition en pourcentage de la surface élémentaire du SB5.....	90
Tableau 4.16 : Caractéristique du relief.....	92

Tableau 4.17 : pentes moyennes des sous bassins I_m	92
Tableau 4.18 : Classe numérique des pentes.....	93
Tableau 4.19 : Indice de pente globale I_g	94
Tableau 4.20 : classifications O.R.S.T.O.M.....	94
Tableau 4.21 : Dénivelée spécifique D_s	94
Tableau 4.22 : Classifications O.R.S.T.O.M.....	95
Tableau 4.23 : Les temps de concentration des SBV.....	96
Tableau 5.1 : Pluies journalières maximales observées à la station de Fourchi.....	98
Tableau 5.2 : Statistiques de la série pluviométrique.....	98
Tableau 5.3 : Résultat d'ajustement pour une période de retour 100 ans.....	100
Tableau 5.4 : Pluie de courte durée et leurs intensités à différentes fréquences.....	101
Tableau 5.5 : Directives pour la sélection de la période de retour.....	105
Tableau 5.6 : Points d'échantillonnage préliminaire.....	110
Tableau 5.7 : Points accessibles.....	111
Tableau 5.8 : Pourcentage des types des sols dans le bassin versant Sigus.....	114
Tableau 5.9 : Occupation des sols sur le bassin versant Sigus.....	115
Tableau 5.10 : valeurs de l'indice de $Kappa$	117
Tableau 5.11 : Matrice de Confusion.....	118
Tableau 5.12 : les débits des SBV.....	122
Tableau 6.1 : Taux d'urbanisation de la ville de Sigus.....	126
Tableau 6.2 : Statistiques des POS.....	126
Tableau 6.3 : Les éléments d'un relevé de pénétrabilité.....	132
Tableau 6.4 : Légende du dessin.....	132
Tableau 6.5 : Echelle fondamentale des comparaisons par paire.....	157
Tableau 6.6 : Comparaison par paire des critères.....	157
Tableau 6.7 : Matrice de comparaison par paire.....	158
Tableau 6.8 : Matrice de jugement.....	158
Tableau 6.9 : valeurs de l'indice de l'incohérence aléatoire I.A (Saaty, 1980).....	159
Tableau 6.10 : Comparaison par paire des critères de la perméabilité partielle.....	161
Tableau 6.11 : Matrice de comparaison par paire.....	162

Tableau	6.12 :	Matrice	de
jugement.....			162
Tableau 6.13 :	Résultat de calcul du C.R pour le critère C 1.1.....		162
Tableau 6.14 :	Classification des indices vulnérabilité pour les critères de la perméabilité partielle.....		163
Tableau 6.15 :	Comparaison par paire des critères de la densité.....		165
Tableau 6.16 :	Matrice de comparaison par paire.....		165
Tableau 6.17 :	Matrice de jugement.....		165
Tableau 6.18 :	Classification des indices vulnérabilité pour les critères de la densité.....		166
Tableau 6.19 :	Comparaison par paire des critères de la largeur moyenne.....		168
Tableau 6.20 :	Matrice de comparaison par paire.....		168
Tableau 6.21 :	Matrice de jugement.....		168
Tableau 6.22 :	Classification des indices vulnérabilité pour les critères de la largeur moyenne.....		169
Tableau 6.23 :	Comparaison par paire des critères de la transmissivité.....		171
Tableau 6.24 :	Matrice de comparaison par paire.....		171
Tableau 6.25 :	Matrice de jugement.....		171
Tableau 6.26 :	Résultat de calcul du C.R pour le critère C.1.....		172
Tableau 6.27 :	Comparaison par paire des critères de la topographie.....		174
Tableau 6.28 :	Matrice de comparaison par paire.....		174
Tableau 6.29 :	Matrice de jugement.....		174
Tableau 6.30 :	Classification des indices vulnérabilité pour les critères de la topographie..		175
Tableau 6.31 :	Comparaison par paire des critères de la largeur moyenne.....		178
Tableau 6.32 :	Matrice de comparaison par paire.....		178
Tableau 6.33 :	Matrice de jugement.....		178

Liste des figures

Figure 1.1 : Schéma explicatif des composantes du risque hydrologique.....	7
Figure 1.2 : Courbe d'isorisque.....	8
Figure 1.3 : Carte des pluies maximales journalières de l'Algérie.....	9
Figure 1.4 : courbe classique d'estimation des dommages.....	11
Figure 1.5 : Représentation schématique du système de ruissellement. Les lignes continues indiquent la transmission et les discontinues indiquent le stockage.....	13
Figure 1.6 : Ruissellement par dépassement de la capacité d'infiltration (Ra) et ruissellement par saturation (Rb).....	14
Figure 1.7 : (a) Ecoulement hypodermique dans une zone non saturée : (b) : Ecoulement hypodermique dans une nappe perchée	16
Figure 1.8 : Ecoulement des eaux souterraines vers la surface.....	17
Figure 1.9 : Types de catastrophes naturelles dans le monde entre 1990 et 2007.....	20
Figure 1.10 : Mortalité et personnes affectées par les catastrophes naturelles dans le monde de 1950 à 2012.....	21
Figure 1.11 : Nombre des inondations dans le monde entre 1985 et 2003.....	21
Figure 1.12 : les événements les plus remarquables en Algérie 1927 – 2015.....	23
Figure 1.13 : Photos des inondations Skikda 1984.....	24
Figure 1.14 : Photos des inondations Alger 2011.....	25
Figure 2.1 : Processus d'inondation en milieu urbain.....	28
Figure 2.2 : Fonctionnement d'un modèle boîte noire.....	30
Figure 2.3 : Classification de Refsgaard des modèles hydrologiques.....	33
Figure 2.4 : Triangle textural des sols.....	39
Figure 3.1 : La télédétection passive et active.....	46
Figure 3.2 : Capteur sur camion pour des mesures sur une cible donnée avec deux radiomètres à micro-onde passive (Bandes L et C).....	47
Figure 3.3 : Avion de télédétection C-130.....	48
Figure 3.4 : Image d'une navette lors d'une mission de télédétection.....	49
Figure 3.5 : Les différents types de satellites : géostationnaire et sur orbite polaire.....	50
Figure 3.6 : variation des CVI avec l'angle de vision et de l'altitude du capteur.....	51
Figure 3.7 : Recouvrement latéral d'un satellite sur orbite polaire.....	53
Figure 3.8 : Images de Landsat 5 TM : (a) : cas normal, (b) : durant l'inondation de 1993...	54
Figure 3.9 : le concept de la résolution radiométrique.....	55

Figure 3.10 : Réflectance spectrale typique pour la végétation, le sol et l'eau.....	56
Figure 3.11 : Réflectances et longueurs d'onde pour le sol, la végétation et l'eau.....	64
Figure 3.12 : Les composantes fonctionnelles du SIG.....	67
Figure 3.13 : les différents types de données : (a) Vecteur, (b) Raster.....	69
Figure 3.14 : Les couches d'une base de données avec de plusieurs thèmes.....	70
Figure 4.1 : Situation géographique de la ville de Sigus.....	73
Figure 4.2 : Exemples de mailles raster maille carrée et maille hexagonale.....	75
Figure 4.3 : Exemple de raster TIN.....	76
Figure 4.4 : Le modèle numérique du terrain.....	77
Figure 4.5 : Classification du réseau hydrographique et découpage en sous bassins.....	78
Figure 4.6 : Quelques types de drainage.....	80
Figure 4.7 : Carte hypsométrique du BV Sigus.....	86
Figure 4.8 : Courbe hypsométrique du sous bassin versant N°01.....	87
Figure 4.9 : Courbe hypsométrique du sous bassin versant N°02.....	88
Figure 4.10 : Courbe hypsométrique du sous bassin versant N°03.....	89
Figure 4.11 : Courbe hypsométrique du sous bassin versant N°04.....	90
Figure 4.12 : Courbe hypsométrique du sous bassin versant N°05.....	91
Figure 4.13 : carte des pentes.....	93
Figure 5.1 : Carte de situation du bassin versant Sigus.....	97
Figure 5.2 : les résultats d'ajustement.....	100
Figure 5.3 : Courbe Intensité-Durée-Fréquence.....	103
Figure 5.4 : Courbe Pluies de courte durée fréquentiel.....	103
Figure 5.5 : Carte des classes de sol obtenues par ERDAS.....	109
Figure 5.6 : Carte des points d'échantillonnage du sol.....	112
Figure 5.7 : exemple d'une fiche d'échantillonnage.....	113
Figure 5.8 : Carte des types de sols bassine versant Sigus.....	114
Figure 5.9 : Carte d'occupation des sols bassin versant Sigus.....	115
Figure 5.10 : Carte des points de vérité sur terrain.....	117
Figure 5.11 : Carte du CN bassin versant Sigus.....	120
Figure 5.12 : Carte du coefficient de ruissellement pour P = 80 mm.....	121
Figure 5.13 : Carte du coefficient de ruissellement pour P = 125 mm.....	121

Figure 6.1 : Carte des zones inondables de la wilaya d'Oum El Bouaghi.....	125
Figure 6.2 : Chronique des précipitations journalières maximales à la station de Fourchi.....	125
Figure 6.3 : Plan de masse de la ville de Sigus.....	128
Figure 6.4 : la partie composée de l'oued Sigus (coté amont).....	129
Figure 6.5 : La partie composée de l'oued Sigus (côté aval).....	130
Figure 6.6 : Vue en plan + les sections en travers de l'oued Sigus.....	131
Figure 6.7 : Résultat de simulation pour un débit centennal.....	132
Figure 6.8 : Exemple d'un relevé de pénétrabilité.....	134
Figure 6.9 : les couloirs d'écoulements principaux.....	136
Figure 6.10 : Perméabilité totale du CEP 01.....	140
Figure 6.11 : Perméabilité totale du CEP 02.....	141
Figure 6.12 : Perméabilité totale du CEP 03.....	142
Figure 6.13 : Perméabilité totale du CEP 04.....	143
Figure 6.14 : Perméabilité totale du CEP 05.....	143
Figure 6.15 : Perméabilité totale moyenne des CEPs.....	144
Figure 6.16 : Densité des chemins hydraulique CEP 01.....	145
Figure 6.17 : Densité des chemins hydraulique CEP 02.....	146
Figure 6.18 : Densité des chemins hydraulique CEP 03.....	147
Figure 6.19 : Densité des chemins hydraulique CEP 04.....	148
Figure 6.20 : Densité des chemins hydraulique CEP 05.....	149
Figure 6.21 : Larguer des chemins hydrauliques CEP 01.....	151
Figure 6.22 : Larguer des chemins hydrauliques CEP 02.....	152
Figure 6.23 : Larguer des chemins hydrauliques CEP 03.....	153
Figure 6.24 : Larguer des chemins hydrauliques CEP 04.....	154
Figure 6.25 : Larguer des chemins hydrauliques CEP 05.....	155
Figure 6.26 : exemple d'une structure hiérarchique de l'AHP.....	157
Figure 6.27 : Schéma de principe de la méthode AHP.....	158
Figure 6.28 : Structure hiérarchique générale.....	161
Figure 6.29 : Structure hiérarchique du sous-critère "Perméabilité partielle".....	162
Figure 6.30 : Comparaison par paire des critères C1.1.1, C1.1.2 et C1.1.3.....	163
Figure 6.31 : carte de vulnérabilité selon le critère "Perméabilité partielle".....	164
Figure 6.32 : Structure hiérarchique du critère "densité des chemins hydrauliques".....	165

Figure 6.33 : carte de vulnérabilité selon le critère "densité des chemins hydrauliques".....	167
Figure 6.34 : Structure hiérarchique du critère "largeur moyenne des chemins hydrauliques".....	167
Figure 6.35 : carte de vulnérabilité selon le critère "largeur moyenne des chemins hydrauliques".....	168
Figure 6.36 : Structure hiérarchique du critère "Transmissivité".....	169
Figure 6.37 : Comparaison par paire des critères C1.1, C1.2 et C1.3.....	170
Figure 6.38 : carte de vulnérabilité selon le critère "Transmissivité".....	170
Figure 6.39 : la structure hiérarchique du critère "Topographie".....	171
Figure 6.40 : Comparaison par paire des critères C2.1, C2.2 et C2.3.....	172
Figure 6.41 : carte de vulnérabilité selon le critère "Topographie".....	174
Figure 6.42 : Structure hiérarchique de la vulnérabilité.....	175
Figure 6.43 : Comparaison par paire des critères C1 et C2.....	176
Figure 6.44 : Carte de vulnérabilité de la ville de Sigus au risque d'inondation.....	177

Introduction générale

Introduction générale

Contexte et problématique

Dans le domaine des risques et depuis plus de 50 ans, les chercheurs ont mis l'accent sur une série de questions fondamentales :

- 1) Quelle est le taux d'occupation humaine dans les zones de danger ?
- 2) Comment réagissent les personnes et les sociétés aux risques naturels ?
- 3) Comment pouvons-nous réduire le risques et l'impact des risques naturels ?

Dans la dernière décennie, une autre question s'impose, les sociétés, sont-elles de plus en plus vulnérables aux risques naturels ? (Cutter, 1996).

Actuellement, le développement urbain est un enjeu important à l'échelle mondiale. L'urbanisation, qui signifie la croissance de la population vivant dans les zones urbaine, est l'un des changements sociaux majeurs qui affecte la terre (Chen, 2007). Depuis 2007, la moitié de la population mondiale vit en milieu urbain. Ce palier atteint, il est attendu à ce que la population totale vivant en ville double dans les 30 prochaines années (Sahani, 2011).

Au cours des dernières années, l'Algérie a connu une croissance démographique éminente associée par développement des tissus urbains. Ce développement s'effectue, souvent, sur des terres agricoles d'une façon anarchique, puisque le taux d'accroissement de la population dépasse la capacité d'accueil des villes. Le taux d'urbanisation élevé indique que la population urbaine de l'Algérie a plus que doublé, partant de 22.971.658 personne en 1987 à 38.297.000 en 2013 (O.N.S, 2013).

La région d'Oum El Bouaghi ne fait pas l'exception. Elle présente un cas remarquable d'explosion démographique. La population été 402.683 en 1987 jusqu'à 621.612 en 2008 avec un taux de croissance de 1,9%. Cette croissance démographique, et avec l'exode rural, ont abouti à une urbanisation de plus en plus croissante sur un territoire déjà saturé.

L'urbanisation augmente l'écoulement des eaux pluviales en surface. À mesure que les terres sont urbanisées, elles sont recouvertes de surfaces imperméables telles que des routes, des pavées, des parkings et des bâtiments qui empêchent la pluie de s'infiltrer dans le sol. Le ruissellement de surface dans les zones urbaines a une vitesse plus élevée

Introduction générale

que dans les zones non urbaines parce que les surfaces imperméables sont plus lisses que les terres d'agriculture et les forêts. Cette augmentation de la vitesse entraîne une concentration plus rapide des flux dans diverses parties du bassin versant. Le résultat est une augmentation du débit de pointe observé dans les zones urbaines qui cause des inondations (Kang, 1998).

Les inondations sont, par nature, des événements complexes provoqués par une série de vulnérabilité de l'homme, l'inadéquation des planifications du développement et la variabilité climatique. Les inondations normales attendues sont généralement bien accueillies dans plusieurs parties du monde, car elles fournissent un sol riche en eau, mais les inondations à l'échelle inattendues (dommageables) avec une fréquence excessive provoquent des dommages à la vie, les infrastructures et l'environnement. Au cours des dernières décennies, la tendance des inondations a changé, devenant plus fréquent, intense et imprévisible pour les communautés locales, d'autant plus que les questions de développement et la pauvreté ont amené plus de gens à vivre dans des zones vulnérables aux inondations. L'EM-DAT compte un total de 210 événements hydrologiques qui ont provoqué 4250 morts et immense dégâts matériels.

Parmi tous les risques naturels en Algérie, les inondations sont considérées les plus désastreuses. Entre 2000 et 2009 l'EM-DAT enregistre 36 catastrophes parmi lesquelles 25 sont des inondations, les dégâts sont énormes, 1299 morts, 200311 sinistrés et 702 millions dollars.

Le cadre hydrographique de plusieurs communautés d'Oum El Bouaghi joue un rôle capital dans l'amplification de ce phénomène hydrologique. En effet, les communautés sont bâties dans des terrains vastes qui étaient autrefois des plaines utilisées notamment pour céréaliculture. Ces communautés sont fortement plus sujettes au risque des inondations alors qu'il y a soixante-dix ans ces inondations ne présentent pas un risque majeur. Désormais, ce phénomène s'amplifie d'année en année, dans les 30 dernières années le nombre d'affectés atteint 212 avec une victime morte, ce qui n'a jamais été le cas (D.R.E, 2012).

Dans les bassins urbanisés, les surfaces naturellement perméables sont converties en terrains imperméables. A cause de la diminution de l'infiltration, telles surfaces engendrent un ruissellement accru. Souvent, les surfaces lisses permettent un ruissellement de surface de plus en plus rapide et les zones de dépressions et stockage

Introduction générale

sont réduites. De plus, les systèmes de drainage naturels sont modifiés en canaux artificiels élargis et rectilignes dont la rugosité est négligeables. Généralement ces modifications facilitent le ruissellement de surface et par conséquent le débit de pointe des crues (Sauer, 1984).

Dans les mégapoles, les inondations peuvent prendre naissance au sein du tissu urbain car le bassin versant urbain est relativement étendu avec des coefficients de ruissellement très élevés. Dans les villes de petite et moyenne importance, qui se situent à l'exutoire, le ruissellement généré au sein de la ville est insignifiant et ne pose pas de dégâts. La majorité des flux inondant proviennent du bassin versant qui entoure la ville.

Presque toutes les communautés de la région de Oum El Bouaghi confrontés à ce problème hydrologique sont alimentées par des bassins versant dont les caractéristiques morphométriques non pas fait l'objet d'une étude détaillée pour évaluer leurs influences sur les mécanismes de genèse de ruissellement dans l'hydrosystème.

Il est indispensable de mettre l'accent sur l'impact du milieu naturel sur les inondations, particulièrement les paramètres physiographiques et morphométriques du bassin versant dans un contexte où les villes se situent à l'aval du bassin. A ce stade il est nécessaire d'abord d'identifier ces paramètres et leurs rôles sur la genèse du ruissellement tels que le mode d'occupation des sols et la texture des sols. Cela nécessite des approches convenables et une compréhension approfondi des processus d'évaluation de la vulnérabilité dont le but est la caractérisation de la distribution spatiale et temporelle du risque sur un territoire connu. Cette caractérisation permet aux décideurs plus tard une planification et une gestion intégrée.

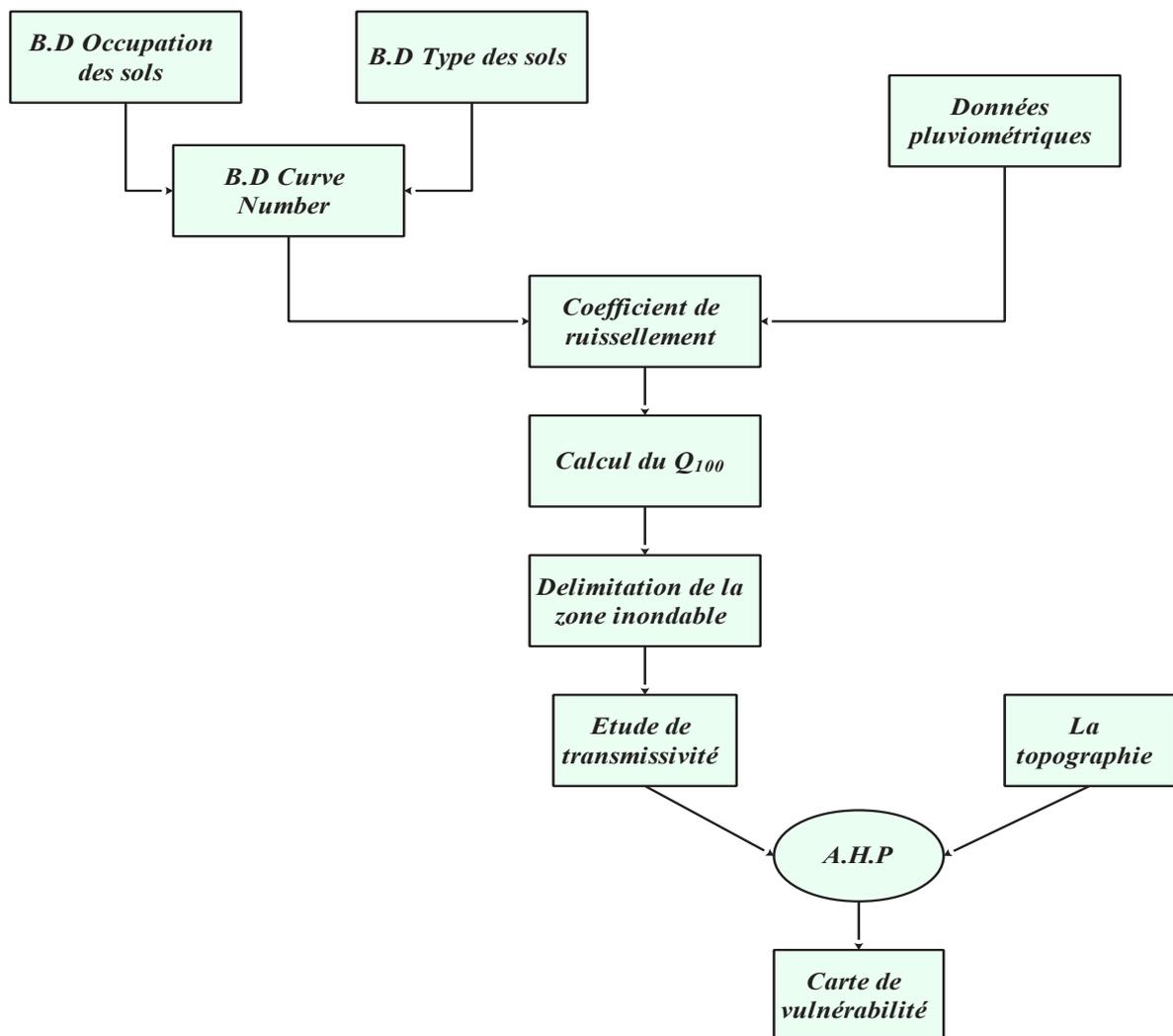
Objectif de la thèse

L'ambition de cette thèse est de se situer à l'interface entre une approche conceptuelle et celle du terrain pour appréhender la question des risques hydrologiques. Notre souhait est de rendre compte l'hétérogénéité spatiale de ce genre de risque et de la complexité des hydro-systèmes urbains en tirant profit de l'utilisation de nouvelles techniques de traitement de l'information. Le projet consiste, d'abord, à étudier le bassin versant naturel de la ville de Sigus tout en déterminant les différentes composantes physiques responsables de l'inondation. Dans cette étape, l'estimation du ruissellement se fait par la méthode SCS-CN qui est basée sur le complexe

type-occupation des sols. La détermination de ce complexe se fait par une approche couplée SIG-télédétection. Puis, on estime le comportement des éléments s de la ville en situation d'inondation en utilisant la méthode dite "transmissivité" développée par B.Hingray (1999). L'étape finale consiste à développer un outil d'évaluation des critères de vulnérabilité l'aide d'une méthode d'analyse multicritère pour l'aide à la décision.

Principe méthodologique

La démarche suivie dans cette thèse a comme objectif d'aboutir à une carte de vulnérabilité au risque d'inondation. La première partie consiste à concevoir deux bases de données "Type des sols " et "Occupation des sols" pour aboutir à une carte du coefficient de ruissellement. Celle-ci permet de calculer le débit de crue centennale et par conséquent délimiter la zone inondable. La carte de vulnérabilité est réalisée en utilisant une approche multicritères.



Plan et structure de la thèse

Cette thèse est décomposée en deux parties, chacune s'articule sur trois chapitres.

- La première partie dite "*état de l'art en matière de risques hydrologiques*"
 - Le premier chapitre est consacré à caractériser le risque d'inondation en milieu urbain. La connaissance des composantes du risque hydrologique est une étape essentielle. Puis la démonstration des différents mécanismes du ruissellement. Le dernier paragraphe illustre l'envergure des inondations à l'échelle mondiale et en Algérie.
 - Le deuxième chapitre s'articule sur la connaissance des notions de base de la modélisation hydrologique et les principales classifications des modèles. Puis l'illustration du modèle utilisé dans cette étude qui le modèle SCS-CN.
 - Le troisième chapitre aborde les notions de base des systèmes d'informations géographiques et la télédétection avec leurs utilisations dans le domaine de la modélisation hydrologique.
- La deuxième partie "*Application sur le bassin versant Sigus*"
 - Le quatrième chapitre sert à déterminer les caractéristiques morphométriques du bassin versant Sigus et leurs impacts sur la genèse du ruissellement d'inondation. Les caractéristiques morphométriques sont regroupées en trois catégories : le réseau hydrographique, la forme du bassin versant et le relief.
 - Le cinquième chapitre est décomposé en trois parties. La première partie consiste à analyser la série pluviométrique tout en passant par une procédure d'ajustement. Puis le calcul du débit de la crue centennale dont le coefficient de ruissellement est le paramètre capital. La troisième partie consiste à concevoir les bases de données "Type de sols" et "Occupation des sols" sur la base des images satellitaires traitées et les techniques du SIG.
 - Le sixième chapitre aborde une approche multicritères pour évaluer le risque d'inondation. Il est divisé en trois parties. La première partie aborde la présentation de la zone d'étude et la situation des systèmes d'évacuation vis-à-vis la crue centennale. La deuxième partie analyse le comportement des zones bâties en situation d'inondation par l'étude de transmissivité. Enfin, la troisième partie illustre l'approche multicritère AHP dans le contexte d'évaluer et cartographier la vulnérabilité de Sigus au risque d'inondation.

Partie I :

*Etat de l'art en matière du risque
hydrologique*

Chapitre I

*Caractérisation du risque d'inondation en
milieu urbain*

I.1 Introduction

Les inondations en milieu urbain sont parmi les catastrophes naturelles les plus fréquentes. Ce phénomène est la conséquence de plusieurs facteurs naturels et humains. Ce chapitre est consacré à caractériser le risque d'inondation en milieu urbain. D'abord le premier paragraphe est consacré à illustrer le contexte historique du mot risque. Puis la définition des différentes composantes du risque hydrologique. Ensuite le troisième paragraphe est destiné à expliquer les différents mécanismes de formation du ruissellement. Le dernier paragraphe aborde l'historique des inondations dans le monde est en Algérie.

I.2 Etymologie du mot risque

Depuis quelques siècles, le mot risque s'est installé dans la quasi-totalité de la société, que ce soit au niveau économique, politique, environnemental et même religieux (Giddens, 1991). Ce terme qui a devenu un modèle pour la caractérisation contemporaine des sociétés ne cesse de proliférer et son utilisation a devenu de plus en plus vulgarisée et globale dans toute les domaines de la vie quotidienne (Cakmak, 2011).

Pour mieux comprendre cette notion, il est indispensable de restituer le contexte spatio-temporel de son apparition. Selon le Littré (dictionnaire étymologique), l'origine du mot risque et assez obscure, sa morphologie change parfois d'une façon étrange, ses sens sont multiples et ces racines sont incertaines (Magne, 2010).

Il n'existe pas d'étude compréhensive de l'étymologie et de l'histoire conceptuelle du terme risque (Luhmann, 1993). Dans ce contexte, c'est l'économiste Pradier (2004) qui a fait un travail lexicologique, au cours duquel il récuse deux mythes pour expliquer l'origine du mot risque, une thèse moderniste et un roman nautique.

I.2.1 La thèse moderniste

D'après Luhmann le concept du mot risque apparaît au début de l'époque moderne pour indiquer une situation problématique qui ne peut être décrite précisément avec le vocabulaire existant. Il s'agit d'une période correspondante à des grandes découvertes et l'apparition du capitalisme ce qui signifie le développement du commerce, de l'assurance et les techniques financières modernes. Donc la diffusion du mot risque est la conséquence du développement du capitalisme.

I.2.2 Le roman nautique

Selon Pradier (2004), les dictionnaires étymologiques présentent une grande variété d'hypothèse pour expliquer l'origine du mot risque. Le mot trouve son origine dans l'italien *rischio* qui vient du *resicu* attesté dans *la carta picena*, ou dans la terminologie des lois maritimes "danger lié à une entreprise", ou bien dans la traduction militaire *risicum* qui signifie "la chance ou la malchance d'un soldat". Une autre hypothèse qui apparait, c'est la racine latine *resicare* qui signifie "enlever en coupant, rogner" ce sens a une origine maritime "risque que court une marchandise en mer". Vu le nombre de bateaux sillonnant la méditerranée, Pradier constate que les marchands italiens près de la méditerranée, comme Naples et Gènes, sont l'origine du mot risque.

Ce roman nautique apparait comme hypothèse la plus adéquate par rapport à la thèse moderniste. Enfin, la morphologie du mot laisse à désirer et personne n'a pu déterminer avec exactitude l'origine du mot.

I.3 Définition du risque hydrologique

Le risque hydrologique est défini comme un danger éventuel plus au moins probable auquel on est exposé, ce risque est induit par l'eau. Cette formulation fait apparaitre les deux composantes du risque, l'aléa et la vulnérabilité (Figure 1.1).

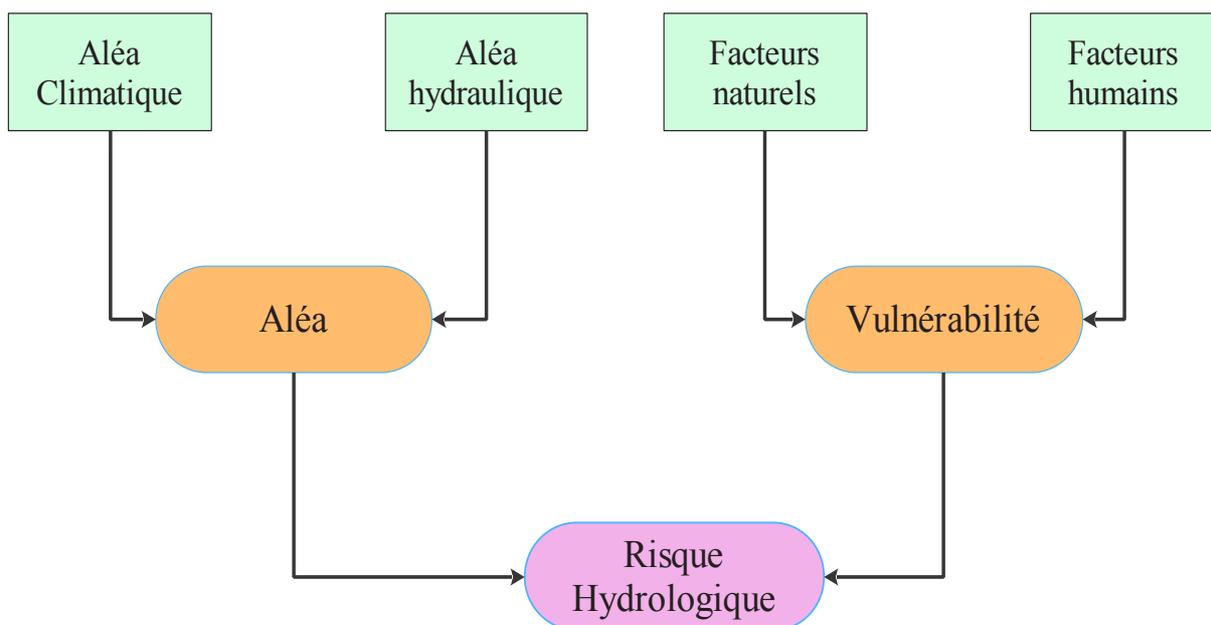


Figure 1.1 : Schéma explicatif des composantes du risque hydrologique

D'après cette formule, un même risque peut être le produit d'un aléa fort avec une vulnérabilité faible, d'un aléa moyen et une vulnérabilité moyenne ou d'un aléa faible et vulnérabilité forte. En représentant l'aléa et la vulnérabilité par deux axes dans un espace plan, on obtient des courbes d'isorisque (Figure 1.2).

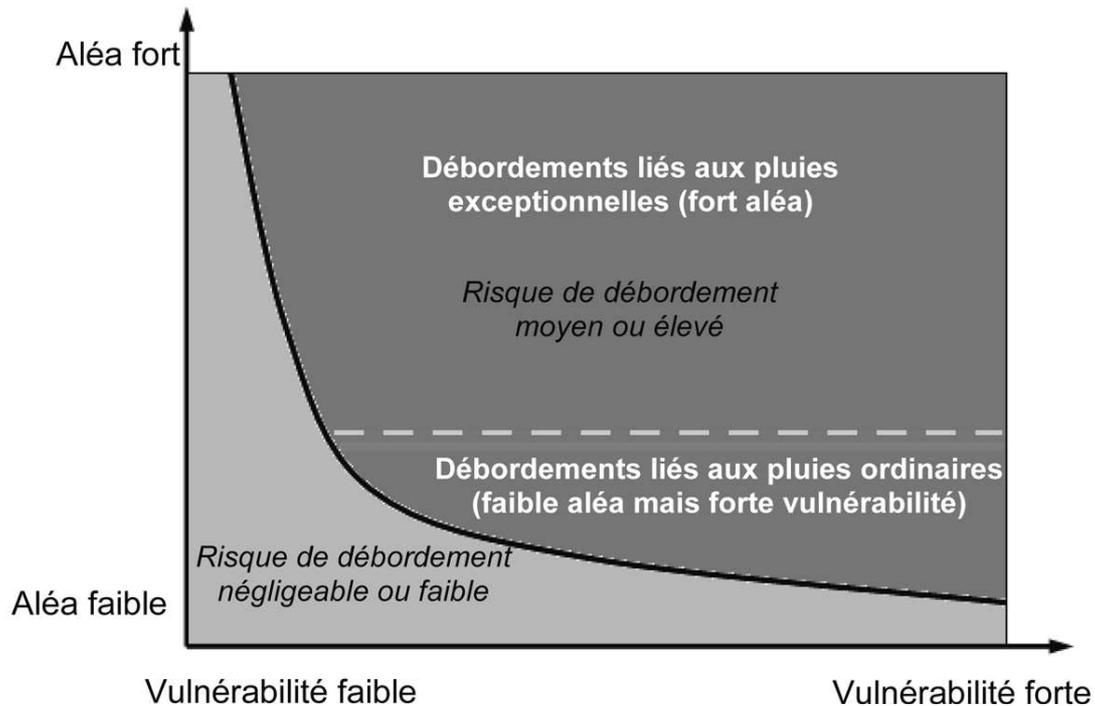


Figure 1.2 : Courbe d'isorisque (Renard, 2008).

I.3.1 L'aléa

Il est défini comme la probabilité d'un phénomène naturel ou accidentel de se produire en un lieu donné. Souvent, l'aléa se présente sous forme des eaux de ruissellement suscitées par les précipitations. On distingue deux types d'aléa :

I.3.1.1 L'aléa climatique

Il se présente sous forme des précipitations caractérisées par l'intensité, la durée et la fréquence (courbe IDF). Une meilleure compréhension de la variabilité pluviométrique d'une région permettrait une amélioration de la gestion des risques induit par les eaux de ruissellement. La connaissance de la distribution spatiale et temporelle est indispensable. Malheureusement, elle n'est pas prise en considération, méconnue par les ingénieurs et marginalisées dans toutes les études de protection contre les inondations. Aussi, l'obtention d'une telle information nécessite une multitude de stations pluviométriques réparties sur le bassin versant. Un exemple de ce type d'information est donné en figure 1.3.

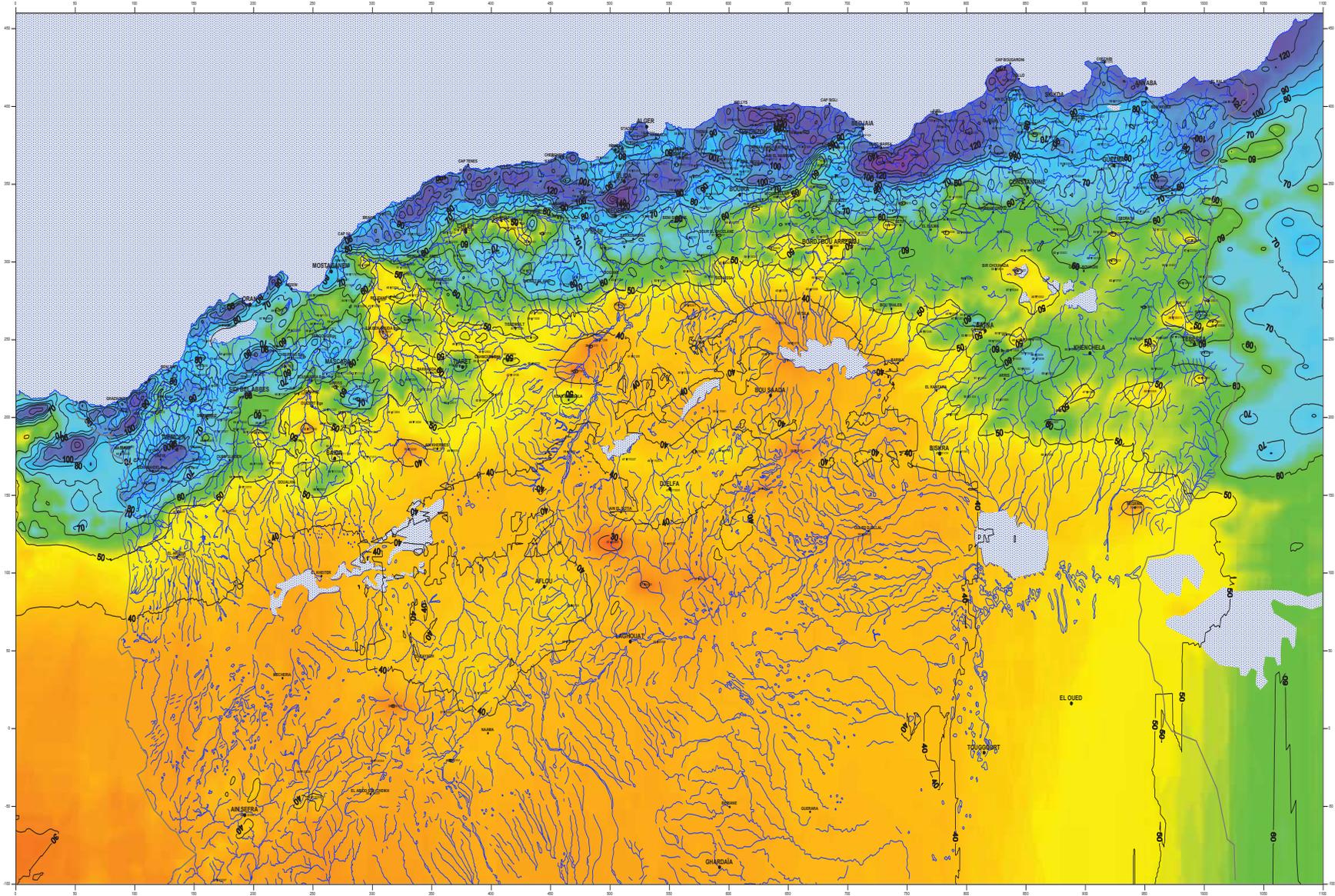


Figure 1.3 : Carte des pluies maximales journalières de l'Algérie (Source : ANRH, 2010).

I.3.1.2 L'aléa hydraulique

C'est la conséquence de l'aléa climatique et le mode d'occupation des sols. On peut identifier un tel aléa hydraulique par la hauteur de la lame d'eau et la vitesse d'écoulement.

Le taux d'accroissement élevé est suivi par un développement du tissu urbain imparable ce qui affecte directement le cycle hydrologique urbain. L'urbanisation conduit à l'imperméabilisation des sols ce qui implique des coefficients de ruissellement très élevés et un temps de réponse du BV de plus en plus réduit. Ce temps de réponse signifie que la vitesse d'écoulement atteint des valeurs immenses ou les conditions de l'écoulement sont favorables.

Les réseaux hydrographiques naturels urbains, parfois non permanents, avec des cheminements sinueux, très encombrés, peut pentus, sont remplacés par des canaux à ciel ouvert ou des galeries enterrés, souvent, surdimensionnés dans ces parties amont, tracés directement pour des raisons économiques et dotés par des pentes confortables pour un écoulement idéale (Chocat, 1997). Aussi, la collecte et l'évacuation des eaux de ruissellement se fait par des réseaux d'assainissement généralement de type unitaire. Ces réseaux sont dimensionnés pour des périodes de retour décennales donc tout le système est sous-dimensionné pour des périodes de retour supérieures. Aussi, ils peuvent avoir des défaillances ou dysfonctionnement pour des causes naturelles comme l'entrée des corps volumineux ou le dépôt des matières en suspensions, ou des causes humaines comme les défauts de réalisation ou l'absence de l'entretien périodiques.

I.3.2 la vulnérabilité

C'est le fait d'être sensible aux blessures ou aux attaques. Cette définition implique la prise en compte de deux effets de la vulnérabilité aux risques naturels : les dommages potentiels ou la capacité d'endommagement des phénomènes naturels menaçants ; les difficultés qu'une société mal préparée rencontre pour réagir à la crise, puis restaurer l'équilibre en cas de sinistre (perturbations directes et indirectes, immédiates et durables). Ces deux aspects renvoient à deux approches du système de la vulnérabilité : l'approche classique consiste à mesurer l'endommagement potentiel des éléments exposés ; la nouvelle approche, intégrée et complémentaire de la première, vise à cerner les conditions ou les facteurs propices aux endommagements ou influant sur la capacité de réponse à une situation de crise (Thouret, 1996).

L'approche classique de la vulnérabilité consiste à estimer les dommages potentiels, généralement sous forme d'une courbe (Figure 1.4). Les impacts spatio-temporels, socioéconomiques et culturels sont estimés par les coûts et l'endommagement des éléments exposés. Les coûts directs, immédiats ou latents (préjudices corporels, habitat et activités

socioéconomiques), et les coûts indirects, à terme moyens de production, emploi, reconstruction, sont mesurables. Les atteintes au patrimoine humain, écologique, culturel et esthétique et la réadaptation sont également importantes, mais restent difficiles à évaluer avec précision. L'inconvénient majeur de cette définition est de n'aboutir qu'à une définition positive du risque qui se traduit inévitablement par une recherche en terme de minimalisation, et qui conduit à s'approcher autant que possible du risque zéro, même s'il est inaccessible (Yahiaoui, 2012).

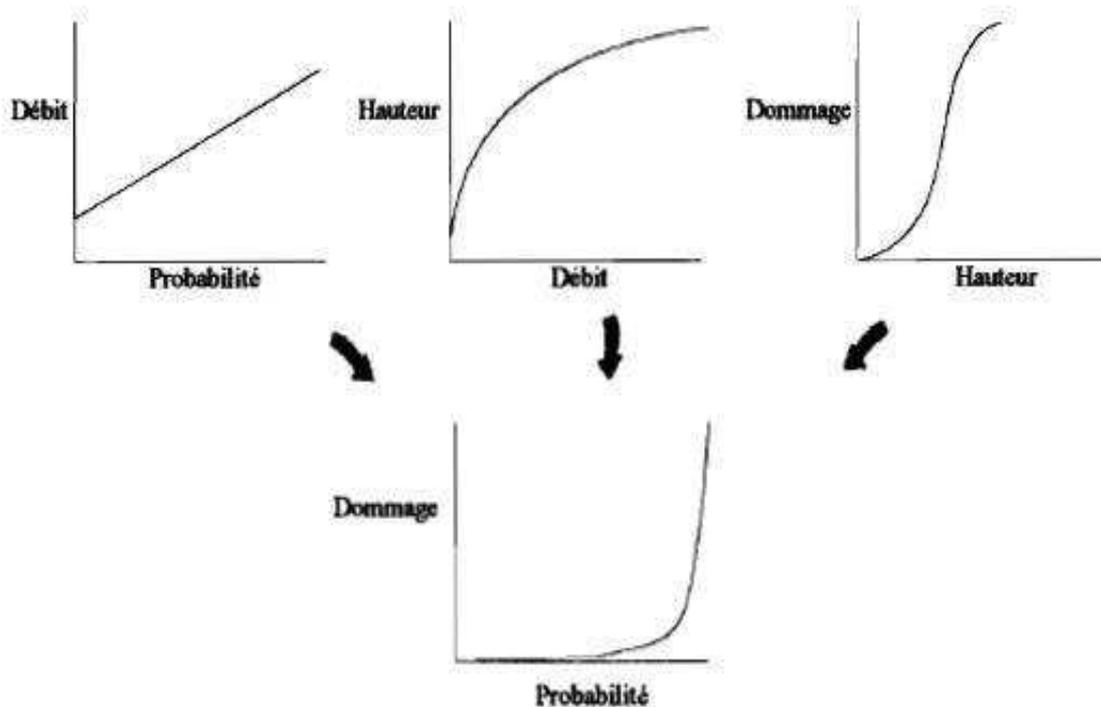


Figure 1.4 : courbe classique d'estimation des dommages (Hingray, 1999).

La nouvelle approche prend en considération les différents facteurs influençant la vulnérabilité telle que naturels, structurels ou socio-économiques. Puis elle examine la réponse du milieu exposé au risque. Les facteurs naturels correspondent aux caractéristiques morphométriques et pédologiques du bassin versant. Les zones les plus hautes du bassin versant sont caractérisées, souvent, par des pentes excessives ou les sols ont tendance d'être plus minces ce qui limite le potentiel de stockage des eaux (infiltration réduite). Les zones de montagne ont tendance de recevoir plus de précipitations. La topographie et la surface du bassin versant ainsi que la densité du réseau hydrographique naturel jouent un rôle déterminant sur l'envergure du temps de réponse du bassin versant.

Les facteurs socio-économiques se présentent sous forme des dommages que peuvent subir les habitants et à la valeur économique du site sinistré. Les dommages sur les personnes sont essentiellement liés aux possibilités d'alerte et d'évacuation. L'alerte et l'évacuation sont déterminées par la possibilité de prévoir les précipitations et les crues correspondantes, et par la possibilité d'informer les populations concernées et d'organiser l'intervention des secours. Ces différentes actions sont cependant d'autant plus difficiles à mettre en œuvre que les événements sont rapides, et qu'il s'agit d'inondations pluviales résultant de précipitations importantes dont la prévision est relativement incertaine. Les dommages liés à l'occupation du sol dépendent de nombreux paramètres. On distingue fréquemment les dommages directs concernant les dégâts matériels et les pertes d'exploitation (Hingray, 1999).

I.4 Le phénomène "Crue"

I.4.1 Processus de formation des crues

L'hydrologie des bassins versants s'est développée à partir des années soixante avec l'ambition de comprendre les mécanismes de genèse des débits et inscrire ainsi l'hydrologie dans une démarche scientifique et non plus simplement opérationnelle (Molénat, 2008). L'hydrologie classique s'appuie sur les différents processus de formation de l'écoulement à l'échelle d'un bassin versant. Les précipitations sur un bassin versant sont converties en ruissellement par une série de procédés qui conservent et transmettent l'eau sur la surface du sol ou dans le sol. Une partie de cette eau peut être stockée près de la surface et évaporée ou absorbée par la végétation et transpirée (Weyman, 1975). L'ensemble du système peut être représenté schématiquement (Figure 1.5). L'observation de ces processus a permis de mettre quelques hypothèses sur la façon dont les apports en eau, alimentent les cours d'eau. Selon Joerin (2000), l'eau de pluie peut rejoindre le cours d'eau par quatre voies principales :

- les écoulements de surface.
- les écoulements hypodermiques.
- les écoulements souterrains.
- les précipitations directes à la surface du cours d'eau.

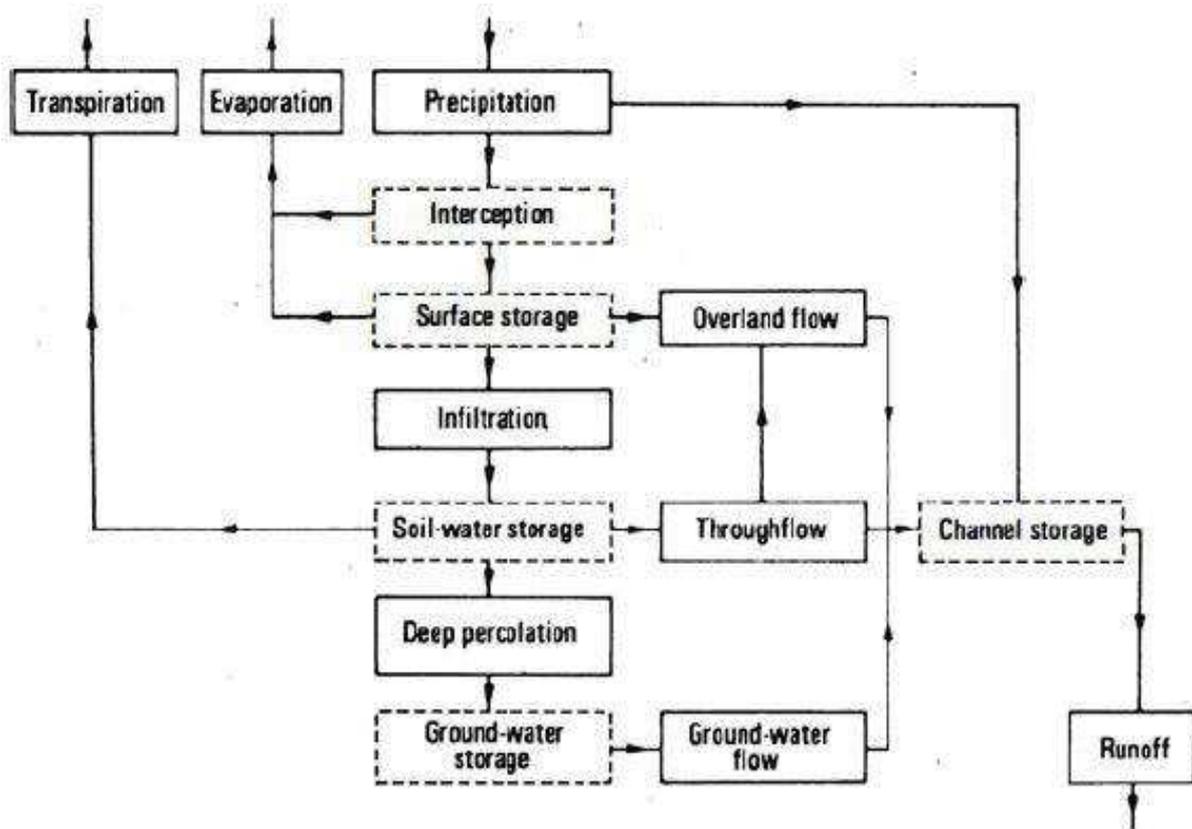


Figure 1.5 : Représentation schématique du système de ruissellement. Les lignes continues indiquent la transmission et les discontinues indiquent le stockage (Weyman, 1975).

L'écoulement de surface correspond à la lame d'eau ruisselée dont le sol n'a pas pu absorber. Cela est dû, soit au dépassement de la capacité d'infiltration du sol, soit le sol atteint le point de saturation et ne peut plus absorber les eaux des précipitations.

Le ruissellement par dépassement de la capacité d'infiltration (Figure 1.6) également connu sous le nom de ruissellement Hortonien, se produit lorsque les eaux des précipitations s'écoulent sur la surface du sol plus vite que ce sol peut les absorber. Donc les précipitations dépassent la capacité d'infiltration du sol. Ce processus est très important dans de nombreuses régions, dans les champs irrigués, les zones urbaines, et plus généralement, pendant les orages ou l'intensité des précipitations est très fortes.

Pendant de nombreuses années, il était cru que l'apparition du ruissellement de surface est principalement contrôlée par les caractéristiques d'infiltration du sol, à chaque fois qu'il pleut ou l'eau d'irrigation est appliquée à un taux plus élevé que la capacité d'infiltration du sol, le ruissellement est généré. Robert E. Horton (1933) était responsable de certains des travaux de base sur ce concept et donc le processus est appelé ruissellement Hortonien.

Le ruissellement Hortonien était le premier mécanisme de ruissellement à découvrir, et a été pensé pour être le principal mécanisme de toutes les eaux de ruissellement pendant un certain temps. Cependant, Le ruissellement par saturation a été identifié comme le principal mécanisme de ruissellement.

Cependant, le concept de ruissellement Hortonien n'explique pas de façon significative les eaux de ruissellement provenant des tempêtes dans la plupart des régions humides où la capacité d'infiltration du sol est généralement beaucoup plus faible que l'intensité des précipitations moyennes. Steenhuis et Muck (1988) ont constaté que les sols en pente faible, dans l'herbe et pâturage, ont des taux d'infiltration qui sont rarement dépassés par le taux de précipitations. Cela a été confirmé dans d'autres études (Dunne, 1970 ; Merwin, 1994). En revanche, les réponses de tempête dans les cours d'eau reflètent les processus de ruissellement qui se produisent en amont presque chaque fois qu'il pleut, ce qui signifie qu'il doit y avoir un mécanisme autre que le ruissellement Hortonien.

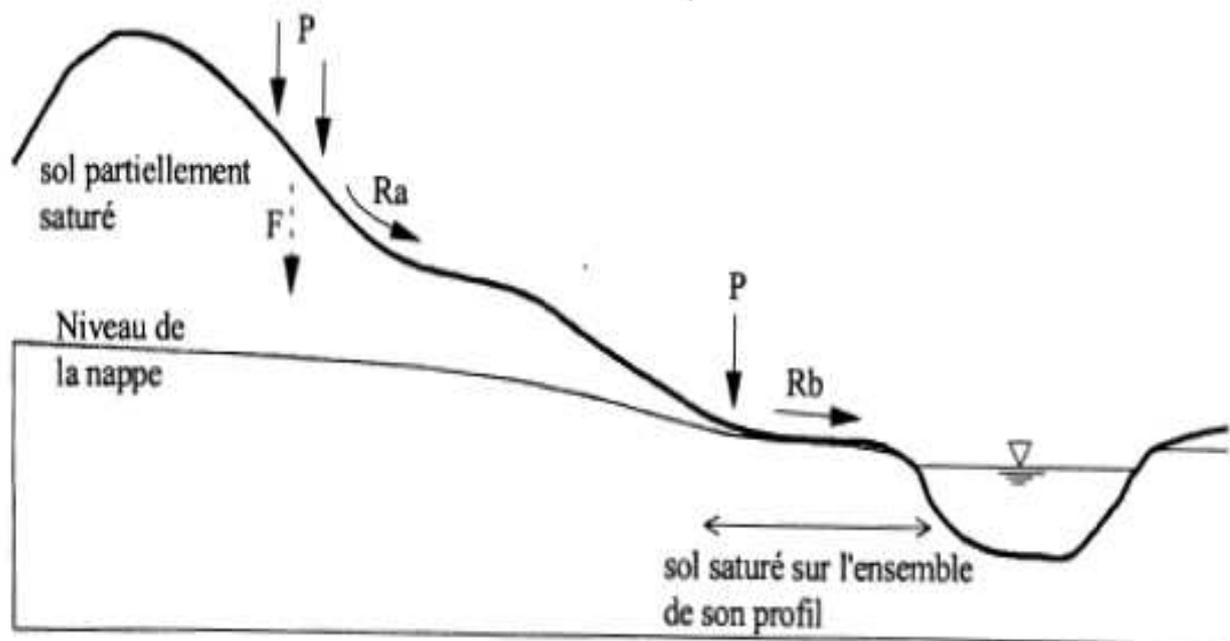


Figure 1.6 : Ruissellement par dépassement de la capacité d'infiltration (R_a) et ruissellement par saturation (R_b) (Musy, 1998).

Dans plusieurs régions, les eaux de ruissellement sont le plus souvent générées sur des petites portions du bassin versant qui sont susceptibles de devenir complètement saturé. Une fois que les sols de ces zones se saturent, toute pluie supplémentaire qui tombe (indépendamment de

L'intensité) devient l'écoulement de surface. Ce processus est appelé ruissellement par saturation (Ambroise, 1998). Ce type d'écoulement (Figure 1.6) est le principal mécanisme du concept d'aire contributive variable (*Variable Source Area VSA*) (Hewlett, 1967 ; Beven, 1979). Par conséquent, la tendance d'une zone pour produire le ruissellement est, en grande partie, indépendante de l'intensité des précipitations. Au lieu de cela, la totale quantité de précipitations et les différentes caractéristiques du bassin versant tels que la profondeur du sol (par exemple, la capacité de d'emmagasinement disponible) et la topographie locale sont des facteurs importants pour déterminer si une zone particulière dans un bassin versant va générer le ruissellement ou non. En outre, comme les précipitations continuent d'alimenter la zone saturée, la zone génératrice de ruissellement se développe (d'où vient le terme la zone source variable, VSA). Ceci est en contraste avec le ruissellement Hortonien, qui dépend du type de sol (taux d'infiltration par rapport à l'intensité de la pluie).

L'écoulement de subsurface ou écoulement hypodermique (Figure 1.7) désigne l'ensemble des écoulements situés dans les horizons de surface partiellement ou totalement saturés en eau, c'est-à-dire sous la surface du sol mais au-dessus des nappes phréatiques (Dvorak, 1996). Les écoulements hypodermiques concernent les eaux infiltrées qui se cantonnent aux horizons superficiels du sol et se déplacent latéralement vers le cours d'eau. Le déplacement latéral, plutôt que vertical, de l'eau est alors dû au fait que la conductivité hydraulique latérale est supérieure à la conductivité hydraulique verticale. Il est d'ailleurs utile de mentionner que l'activation de tous les mécanismes d'écoulement de proche subsurface nécessite que la partie supérieure du sol à un degré de saturation élevé. Il s'agit là du phénomène d'accroissement de la transmissivité latérale (*transmissivity feedback*) qui force l'écoulement de l'eau du sol vers le réseau hydrographique. Ces écoulements latéraux peuvent donc se produire à deux niveaux, soit dans la zone non saturée au-dessus de la nappe profonde, ou dans une nappe perchée de proche surface (Figure 1.7). La formation des nappes perchées est attribuable au fait que l'infiltration verticale de l'eau de pluie à travers la matrice de sol est ralentie par la présence d'un horizon de moindre perméabilité ou d'une discontinuité texturale à quelques dizaines de centimètres de la surface du sol (Brown, 1999). La zone au-dessus de la couche peu perméable a donc tendance à se saturer rapidement, et une augmentation minime de la teneur en eau peut produire une hausse importante de la conductivité hydraulique. Trois mécanismes d'écoulement de proche subsurface peuvent être identifiés, soit :

- l'écoulement via les macropores (*macropore flow, pipe flow, preferential flow*),
- l'effet piston (*translatory flow*)
- l'intumescence de la nappe (*groundwater ridging*).

Tout d'abord, l'écoulement macroporeux est un écoulement préférentiel – donc rapide – de l'eau du sol qui se fait via des trous creusés par les animaux et les conduits laissés inoccupés par d'anciennes racines. Ces pores, qui peuvent former un réseau plus ou moins dense et interconnecté, ne peuvent cependant être le siège d'un écoulement que s'ils sont entourés d'une matrice de sol partiellement saturée. Ensuite, le mécanisme d'effet piston proposé par Hewlett & Hibbert (1967) est également important puisqu'il permet d'expliquer comment de l'eau contenue dans le sol avant un événement pluvieux (eau ancienne ou vieille eau) est chassée par de la nouvelle eau de pluie. C'est un mécanisme qui ne peut se manifester que lorsque le sol est pleinement saturé. Dans ces conditions, la propagation rapide d'une onde de pression permet à de pluie qui tombe en haut d'un versant d'être acheminée, presque instantanément, au pied de celui-ci (Geneviève, 2010).

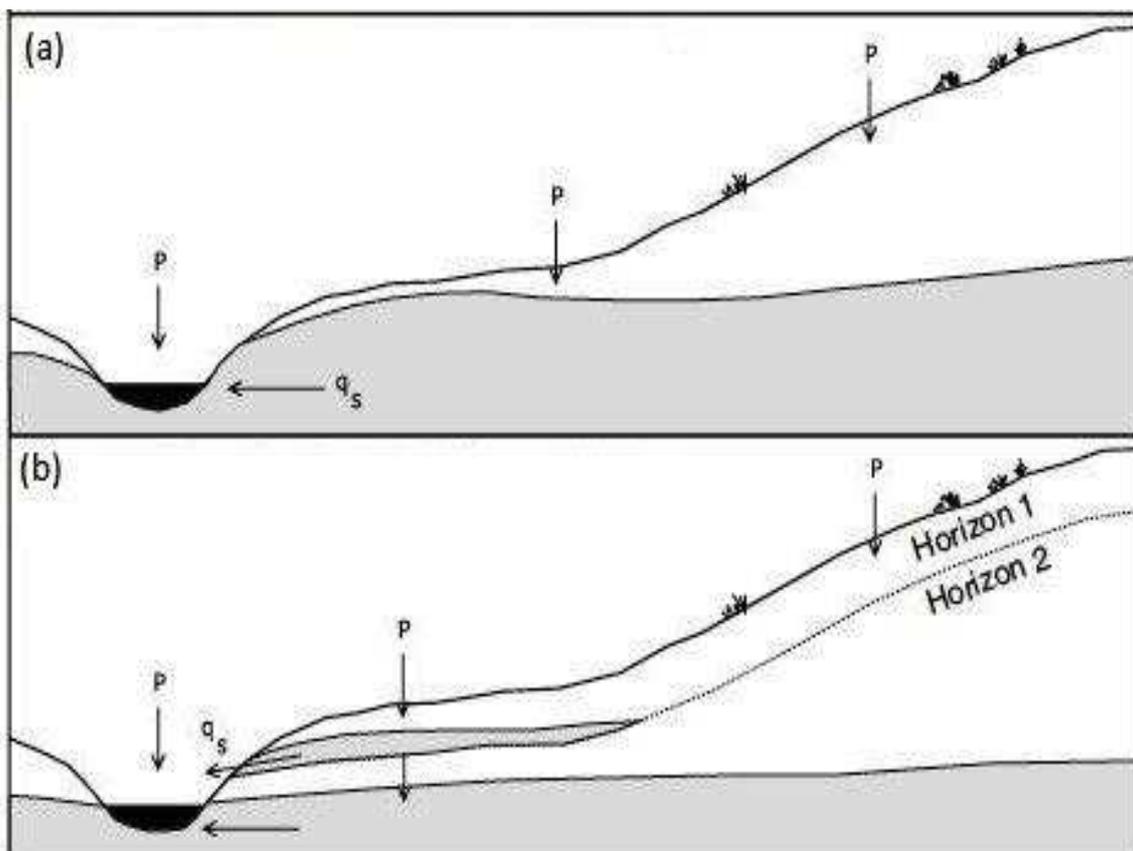


Figure 1.7 : (a) Ecoulement hypodermique dans une zone non saturée : (b) : Ecoulement hypodermique dans une nappe perchée. (Beven, 2000).

Concernant la contribution des nappes dans la genèse de ruissellement l'idée la plus répandue chez les hydrologues est : «L'écoulement souterrain est rarement la cause des ruissellements importants lors des orages. Son rôle principal consiste à soutenir le débit des cours d'eau durant les étiages entre les périodes pluvieuses et la fonte des neiges . . . »

En effet, compte tenu des lois d'écoulement et des temps de réponses qu'impliquent les conductivités hydrauliques des sols, les écoulements sont trop lents pour contribuer significativement à l'onde de crue (Figure 1.8). Les travaux de Beven (1982) à ce sujet confortent cette hypothèse. Une réponse rapide des nappes de versant ne peut être envisagée que dans le cas où la nappe est proche de la surface, et la conductivité hydraulique à saturation. Finalement la contribution des nappes accompagne la décrue et le tarissement des cours d'eau, mais ne semble pas expliquer les volumes d'eau ayant transité dans le sol et participant à l'onde de crue. (Esclaffer, 2003).

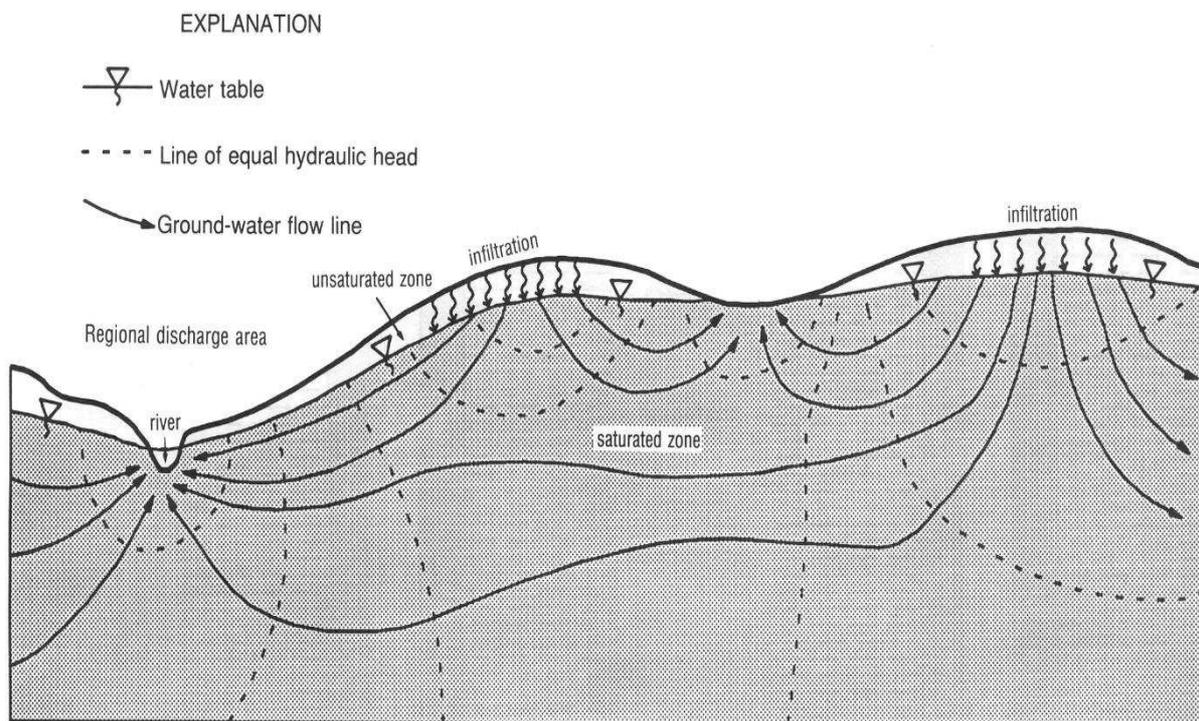


Figure 1.8 : Ecoulement des eaux souterraines vers la surface (www.igs.indiana.edu).

Généralement, Les précipitations directes sur la surface du cours d'eau sont négligées en tant que mécanisme alimentant le débit du cours d'eau puisque la portion contributive est relativement insignifiante sur un réseau hydrographique spatialement limité dans un bassin versant. Il est toutefois utile de mentionner que lors d'évènements pluvieux de forte intensité et dans des conditions humides, certains segments intermittents du réseau peuvent être réactivés,

rendant ainsi significatif l'apport de ce mécanisme de genèse de l'écoulement (Geneviève, 2010).

I.4.2 Typologie des crues

Du point de vue hydrologique, une crue est définie par différents critères tels que la durée, la fréquence et le débit de pointe (Klemes, 1975). Les crues peuvent être classées en trois grands types en fonction de leur importance et l'intervalle de récurrence (Beloulou, 2008) :

- les crues décennales sont des crues moyennes fortes (statistiquement, chaque année, il y a une chance sur dix pour qu'un tel événement se produise ou soit dépassé),
- les crues centennales sont des crues fortes à très fortes (statistiquement, chaque année, il y a une chance sur cent pour qu'un tel événement se produise ou soit dépassé),
- les crues millénaires sont des crues exceptionnelles (statistiquement, chaque année, il y a une chance sur mille pour qu'un tel événement se produise ou soit dépassé).

D'autres classifications existent dans la littérature et s'intéressent essentiellement à la nature de la crue éclair. Les caractéristiques des crues tiennent compte de l'importance des précipitations qui sont à leur origine. Deux facteurs permettent d'expliquer le phénomène des crues :

- Une pluie moyenne pendant un temps très long, ce qui est le cas pour les crues étendues se développant sur de grands bassins.
- Une pluie très intense s'abattant sur un temps assez court, c'est le cas des crues éclair pour lesquelles sont observés des cumuls d'environ 200 mm en moins de 6 heures.

Une crue éclair est le résultat d'une combinaison entre un événement météorologique, une situation hydrologique particulière et la géomorphologie du bassin versant. On peut dire que les phénomènes influençant les crues éclair sont de deux natures : météorologique et hydrologique. Ces crues éclair sont généralement observées dans des bassins relativement restreints. Elles sont particulièrement impressionnantes car elles provoquent des débits importants en très peu de temps et s'écoulent dans des cours d'eau dont les débits sont habituels plutôt faibles. Contrairement aux crues étendues pouvant atteindre leurs côtes maximales en quelques jours, les crues éclair se développent très rapidement et se dissipent tout aussi vite, ce qui les rend plus dangereuses sur les vies humaines.

I.5 Envergure des inondations

I.5.1 Les inondations : un risque hydrologique majeur

On désigne par risque ou danger hydrologique les risques induits par l'eau lorsqu'elle tombe sous forme de précipitations liquides ou solides. Cette classe de dangers/risques est donc

relative à des phénomènes variés. Les risques hydrologiques font partie des risques dits naturels comme les risques météorologiques et les risques géologiques/géotechniques (écroulement, chute de pierres, mouvement de terrain, tremblement de terre, éruption volcanique). Il existe d'autres risques naturels (feu de forêt, tsunami) qui n'entrent pas dans des grandes classes de risques. Pour le territoire algérien, les dommages liés aux risques hydrologiques représentent plus de 50% des dommages en termes de coût.

Une inondation peut être définie comme une irruption d'eau sur un terrain normalement sec comme : une submersion par l'eau débordant du lit majeur d'un cours d'eau, ou comme une accumulation d'eau provenant de drainages, sur des zones qui ne sont pas normalement submergées. Il s'agit donc d'une situation temporaire qui peut-être dommageable (destruction d'habitations, par exemple) ou bénéfique (apport d'alluvions fertilisants, par exemple). Les causes des inondations sont multiples et peuvent être classifiées comme on le montre ci-après.

I.5.2 A l'échelle mondiale

Dans le monde entier, les inondations sont les catastrophes les plus récidivantes (figure 1.9). Les bases de données sur les inondations sont de plus en plus nombreuses et de mieux en mieux renseignées. On parlera de trois sources majeures (Vinet, 2010) :

- L'EM-DAT (Emergency events database) du CRED (Centre de Recherche sur l'épidémiologie des désastres) situé à Louvain en Belgique, est la base de référence internationale créée en 1988 et qui recense les catastrophes naturelles, technologiques et sanitaires (<http://www.emdat.be/>).
- Le site de Dartmouth Flood Observatory (<http://www.dartmouth.edu/~floods/>) est comme son nom l'indique, spécifiquement dédié aux inondations à l'échelle mondiale. Il présente une cartographie animée et en direct des zones sinistrées ; des bases de données sont téléchargeables ainsi que des cartes zones inondées mois par mois.
- Les réassureurs constituent la troisième source d'informations internationales. Parmi eux, la Munich Re fournit des bilans sur le coût des catastrophes naturelles dans le monde.

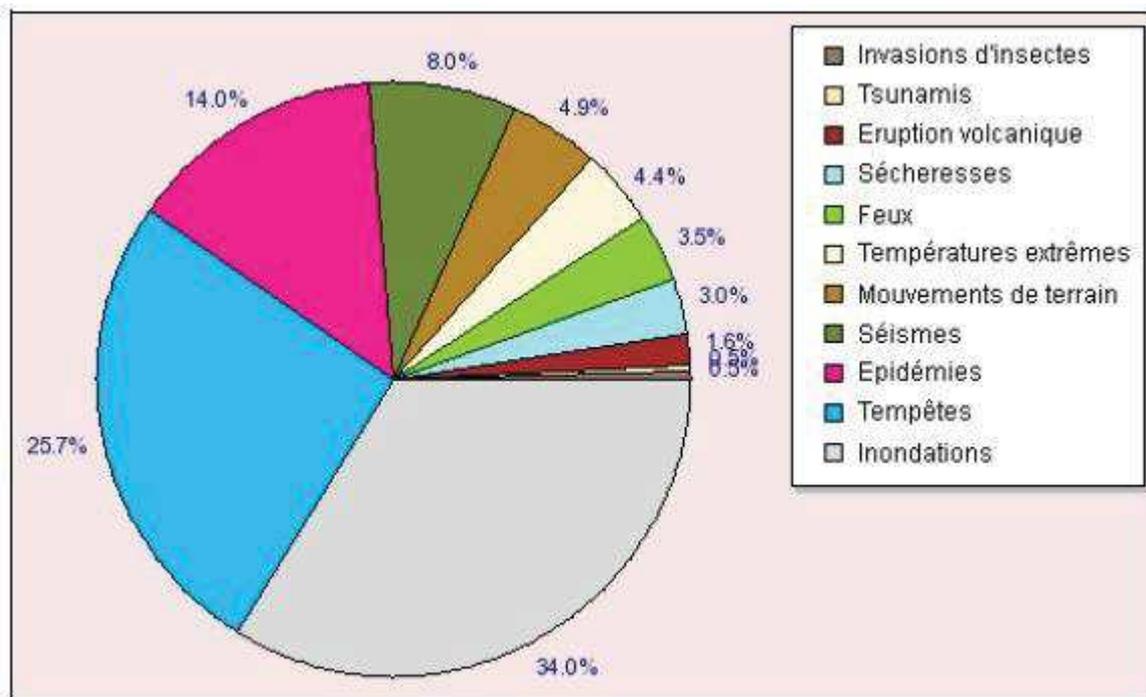


Figure 1.9 : Types de catastrophes naturelles dans le monde entre 1990 et 2007 (EM-DAT, 2007).

L'inondation peut être un risque majeur avec des conséquences humaines et matérielles extrêmement néfastes. Selon les statistiques du CRED, le nombre de personnes touchées par les catastrophes s'est considérablement accru, atteignant plus de 650 millions en 2002 contre 250 millions en 1992 (Figure 1.10). Sur ce total, la grande majorité ont été victimes d'inondations. Entre 2000 et 2006, 95 millions de personnes étaient touchées en moyenne chaque année par cet aléa. Bien qu'il soit difficile de discerner une tendance sur le nombre de personnes tuées dans les catastrophes naturelles, on constate une augmentation du nombre d'évènements et de personnes affectées par les catastrophes dans les dernières décennies. On pourrait croiser cette dernière évolution avec la démographie mondiale et l'urbanisation galopantes et l'augmentation significative des températures depuis 1980.

Selon le Dartmouth Flood Observatory (DFO, 2004), le nombre des évènements des inondations a multiplié entre 1985 (presque 75 évènements) et 2003 (300 évènements) (Figure 1.11). Le bilan de l'année 1996 fait état de 6210 décès, 12.8 millions de personnes évacuées, 4.7 millions d'hectares submergés et 12.2 milliards de dollars américains de dommages. Selon la même source, le bilan de l'année 2007 est beaucoup plus lourd : 12429 décès, 35.6 millions de personnes déplacées et 22 milliards de dollars de dommages. Ces chiffres montrent bien que les dommages occasionnés par les catastrophes naturelles, les

inondations en particulier, deviennent de plus en plus importants aussi bien sur le plan humain que matériel.

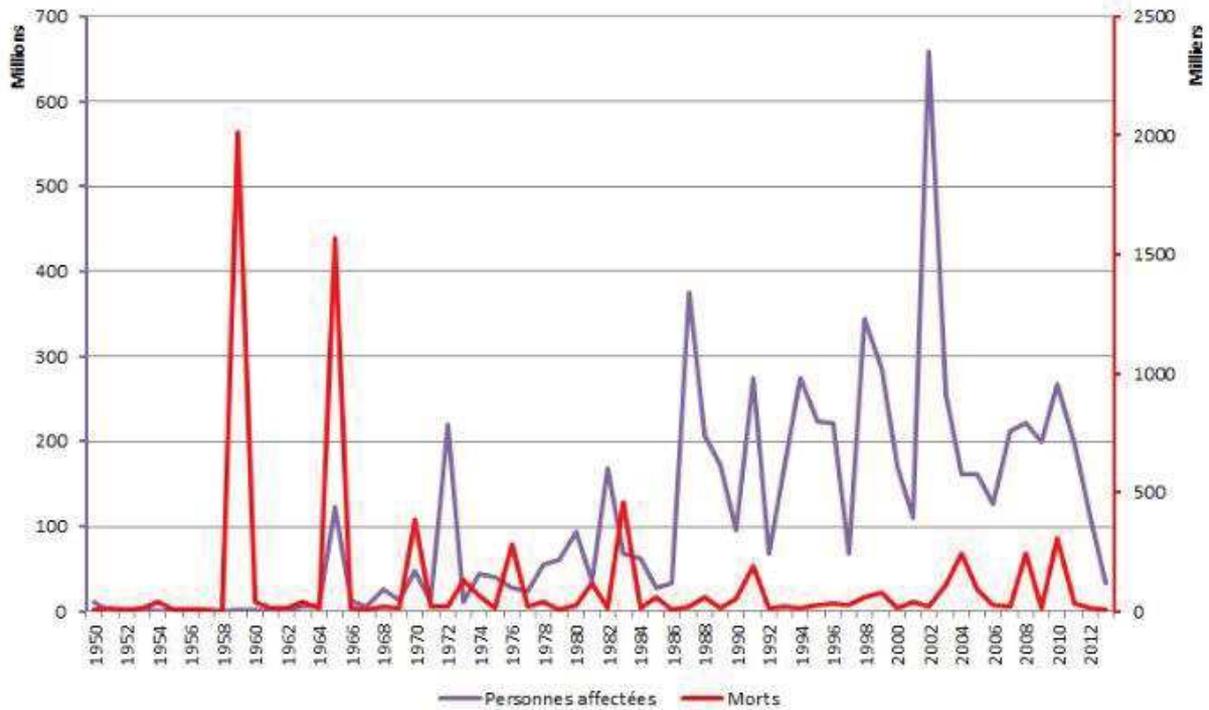


Figure 1.10 : Mortalité et personnes affectées par les catastrophes naturelles dans le monde de 1950 à 2012 (EM-DAT, 2007).

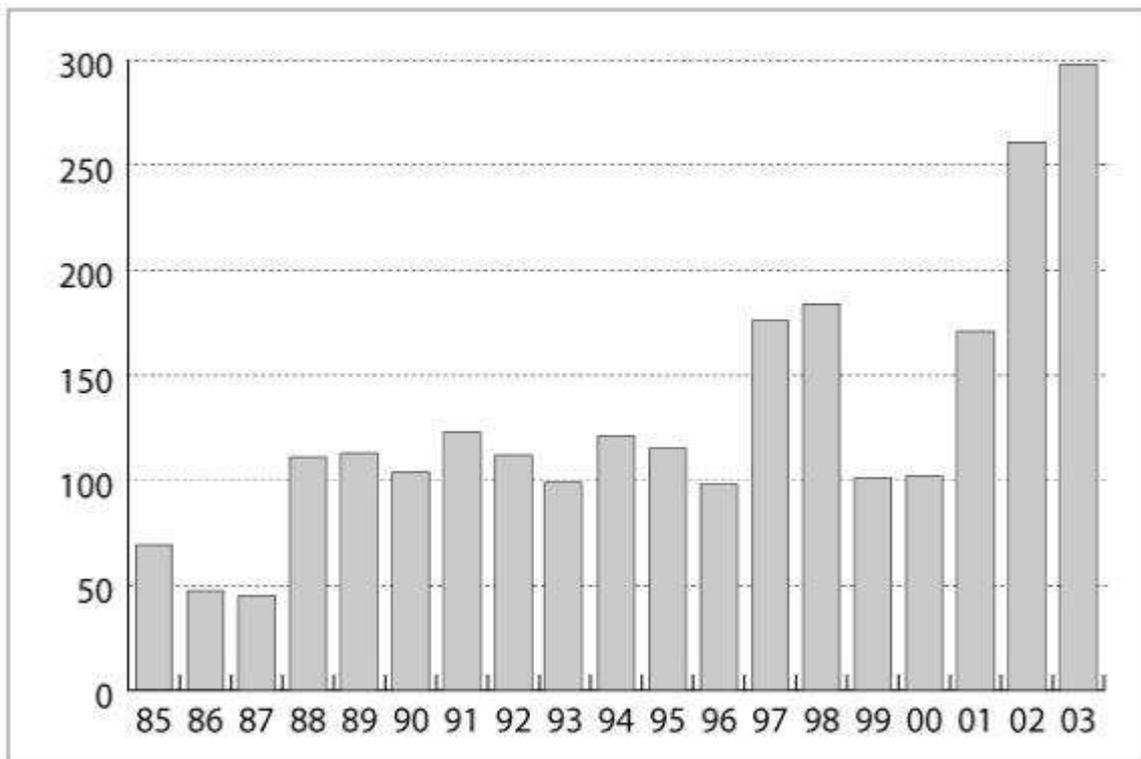


Figure 1.11 : Nombre des inondations dans le monde entre 1985 et 2003 (DFO, 2007).

L'inventaire global des événements de crues extrêmes qui se sont produites au cours de ces deux dernières décennies (1985-2007) indique que les cyclones tropicaux engendrent les inondations les plus dévastatrices et les plus violentes (DFO, 2007) (Figure 1.11). En 2005, l'ouragan Katrina a causé la mort de 1053 personnes et des dommages évalués à 60 milliards de dollars dans la Nouvelle Orléans (USA) qui a été à 80 % inondée. En 2006, le typhon Bilis est la cause des dégâts considérables en Chine et, à un degré moindre, aux Philippines (629 décès, 2.45 millions de personnes déplacés et 3.328 milliards de dollars de dommages).

Les inondations brutales peuvent causer des dégâts considérables et des dommages environnementaux, parfois très difficiles à évaluer. Souvent, les catastrophes causées par l'eau font régresser le processus de développement pendant des dizaines d'années. En moyenne, pendant les années 90, les pertes économiques imputables à des phénomènes météorologiques extrêmes qui ont provoqué des catastrophes liées à l'eau ont été six fois supérieures à celles des années 60. Les pays en voie de développement sont touchés de façon disproportionnée. Les pertes sont parfois supérieures à une ou plusieurs années de développement économique. Au Mozambique, par exemple, les inondations récentes survenues entre le 3 Janvier et le 10 Mars 2007 ont entraîné un recul de 23 % de l'économie alors qu'au Honduras, les dommages occasionnés par l'ouragan Mitch de Novembre 1998 représentaient plus de 69% et près de 73% de la dette extérieure, la plupart des infrastructures (ponts et routes) étant sévèrement affectées et nécessitant plusieurs années pour être remplacées (Beloulou, 2008). Les inondations les plus brutales de l'histoire humaines sont présentées dans le tableau 1.1.

Tableau 1.1 : les inondations les plus dévastatrices de l'histoire (Source : https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_deadliest_floods).

L'évènement	localisation	Nombre de victimes estimé	L'année
L'inondation de la Chine	La Chine	2500000–3700000	1931
L'inondation de la rivière jaune	La Chine	900000 – 2000000	1887
L'inondation de la rivière jaune	La Chine	500000 – 800000	1938
Rupture de barrage de Banqiao	La Chine	231000	1975
L'inondation de la rivière Yangtze	La Chine	145000	1935
L'inondation de St. Felix	Pays-Bas	100000	1530
L'inondation de Hanoi	Vietnam	100000	1971
L'inondation de la rivière Yangtze	La Chine	100000	1911
L'inondation de St. Lucia	Pays-Bas	50000 – 80000	1287
L'inondation de la mère du nord	Pays-Bas	60000	1212

I.5.3 En Algérie

L'Algérie, comme la majorité des pays, est confrontée au phénomène des inondations, qui se manifestent de façon catastrophique constituant ainsi une contrainte majeure pour le développement économique et sociale. Les plus fortes crues des cours d'eau (des oueds) de l'Algérie se manifestent en automne et en hiver à cause des orages et des averses intenses, dont les durées sont très courtes (quelques minutes à quelques heures). Ces fortes crues engendrent des inondations catastrophiques dont les dégâts humains et matériels ont été toujours élevés (Boutoutaou, 2014).

L'Algérie ne figure pas parmi les pays où les inondations font des milliers de morts, mais elle reste sujette à des inondations récurrentes. Les statistiques de l'EM-DAT montrent le caractère catastrophique et la variabilité spatiale et temporelle de ces phénomènes. En Algérie entre 1927 et 2015, le nombre des événements mortels est 50. Un premier travail de recensement des événements épatants est donné dans le tableau 1.2. La figure 1.12 illustre le nombre des victimes mortes pour chaque événement.

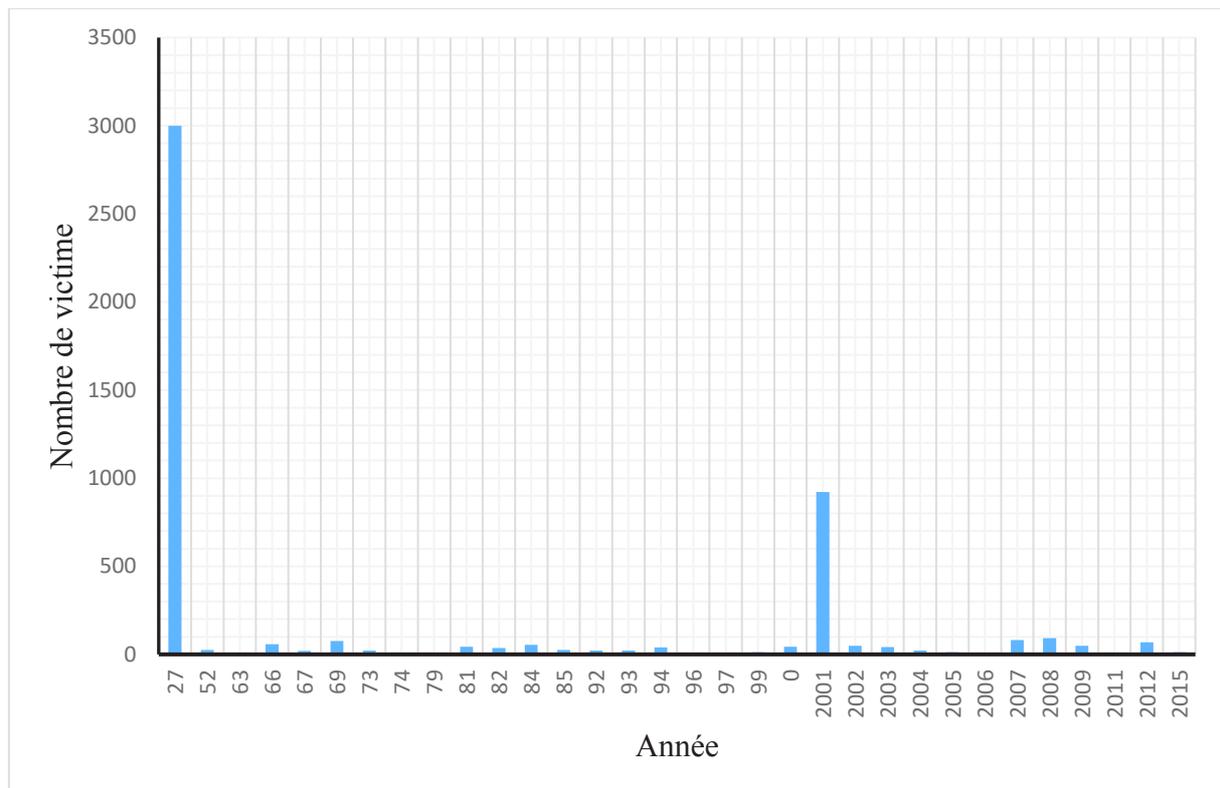


Figure 1.12 : les événements les plus remarquables en Algérie 1927 – 2015

- Les inondations de Décembre 1984 à Skikda (Figure 1.13).

L'archive hydrologique du bassin versant du Saf-Saf et la ville de Skikda est caractérisé par une hydrologie extrême, traduite en inondations de caractère violent, brusque et étendu, dont celles de décembre 1984 étant l'événement hydrologique le plus spectaculaire affectant l'ensemble des impluviums et des villes du nord est algérien. La pluviométrie particulièrement abondante qui a affecté le bassin versant durant l'année 1984 aux différentes échelles, s'est largement transformée en écoulement de surface. Les dégâts étaient importants : Pertes humaines (11 décès), destruction des infrastructures, équipements socioéconomiques, démolition des immeubles, perte de terrains agricoles et enclavement de la ville pendant plus de 10 jours (Boulghobra, 2012).



Figure 1.13 : Photos des inondations Skikda 1984 (Source : <http://ecolerusicade.free.fr/inond.html>)

- *Les inondations de Novembre 2001 à Alger* (Figure 1.14).

Les pluies abattues sur Alger (Bab el Oued) entre le 9 et le 11 Novembre 2001 (262 mm dont 204 mm en 24 heures) ont provoqué une inondation catastrophique. Les dégâts étaient lourds, plus de 700 morts, 115 disparus et des milliers de blessés. Les dégâts matériels : effondrement des constructions, coupures des routes et de l'électricité, renversement de voitures, arbres et poteaux électriques arrachés, liaisons ferroviaires interrompues entre Alger et les autres villes. Les pertes ont été estimées à 30 milliards de dinars algériens (300 millions de dollars). Ces pluies torrentielles (130 mm enregistrées à la station de Bouzereah durant la matinée du 10 Novembre), accompagnées de violentes rafales de vent et de coulées de boue, ont provoqué tellement de dégâts que les autorités algériennes ont déclenché le plan ORSEC pour venir au secours des victimes (évacuation des milliers de familles) et ont appelé à la solidarité internationale.



Figure 1.14 : Photos des inondations Alger 2011 (Source : <https://elwatanlafabrique.wordpress.com>)

Tableau 1.2 : Inventaire des inondations catastrophiques en Algérie (1971 – 2008) (Lahlah, 2004).

Date de l'évènement	localisation	Dégâts humains	Dégâts matériels
12-oct-71	Azzazga	40	centaines d'habitations détruites.
27 -29 mars 1973	Annaba, Souk Ahras et Tébessa	/	/

28 au 31 mars 1974	Tizi-Ouzou	52	4570 maisons et 13 ponts détruits,
01-sept-80	El Eulma (Sétif)	44 morts	/
11-nov-82	Annaba	/	/
22-août-83	Djelfa	10	200 habitations détruites
03-févr-84	Jijel	20 morts	50 millions dinars
	Constantine		200 hectares terres agricoles
	Skikda		
	Guelma	3	
	Khenchla		
	Oum El bouaghi		144 maisons
05-juil-87	Batna	2	
01-sept-89	Biskra	2	400 palmiers détruits
03-juin-91	Ghardaïa	9	
29 septembre au 02 octobre 1994	Ghardaïa		270 millions de dinars
	Laghout		5 millions de dinars
	Mascara	2	
	Tissemsilt	9	
	Sidi Bel Abbes	2	
04-avr-96	Annaba	5	
14-janv-99	Adrar	2	
28-sept-00	Boussaâda	1	
24-oct-00	Sidi Bel Abbes	2	
9 et 10 novembre 2001	Beb El Oued (Alger)	750	30 millions de dinars
1 et 2 octobre 2008	Ghardaïa	34	2500 millions de dinars

I.6 Conclusion

La notion du risque est connue par l'homme depuis plusieurs siècles dans les différents domaines de la vie. Les risques hydrologiques, particulièrement les inondations, sont les plus fréquentes. Les causes des inondations sont multiples telles que climatiques et hydrauliques. Le ruissellement de surface est considéré comme le processus de base pour la genèse des flux inondants dont la production dépend de plusieurs facteurs tels que les conditions initiales, les caractéristiques hydrodynamiques des sols et les paramètres morphométriques du bassin versant.

Chapitre II

La modélisation en hydrologie

II.1 Introduction

Avant l'avènement de l'hydrogramme unitaire, la modélisation hydrologique était empirique et basée sur des données limitées. Les graphiques, les tableaux et les solutions analytiques simples étaient les modèles standards et les calculs manuels reflètent le processus de calcul. Dans les décennies qui ont suivi, peut-être jusqu'à la fin de 1950, les modèles analytiques simples ont reçu beaucoup d'attention et une gamme de ces modèles ont été limités, le traitement des données était facile à manipuler manuellement.

Dans les années soixante, la modélisation hydrologique a connu un progrès remarquable en raison de la révolution numérique et l'accès facile aux outils performants de calcul. Pour la première fois, il est devenu possible de synthétiser l'ensemble du cycle hydrologique et de traiter de grandes quantités de données. Le premier exemple d'une telle synthèse était le modèle de bassin versant Stanford lancé par Crawford et Linsley (1966). Au cours des années, la capacité de calcul a grandi sans limites. La capacité de calcul d'aujourd'hui est pratiquement illimitée et continue de croître. En hydrologie, la synthèse de l'ensemble du cycle hydrologique est devenu populaire, si populaire que ses modèles informatiques sont trop nombreux pour compter. Pratiquement toutes les agences aux États-Unis, fédérales, étatiques ou locales, avait soit développé son propre modèle ou adopté l'un des modèles populaires. Les universités et les organismes de recherche fédéraux tels que le US Army Corps of Engineers, US Geological Survey, ministère de l'Agriculture des États-Unis, et US National Weather Service, ont pris une avance dans ce domaine. Des tendances similaires sont apparues dans d'autres pays. Entre-temps, les préoccupations environnementales et écologiques croissantes ont exigé une meilleure information de ces modèles. Ainsi, ces modèles ont été développés de leur champ d'application pour englober la simulation de l'érosion et le transport des sédiments, le transport de produits chimiques, et l'effet de l'utilisation des sols dues aux activités humaines. Evidemment, les besoins de données de ces modèles se multiplient, ainsi la nécessité d'un traitement de ces données. Les modèles ont continué à se développer en intégrant l'analyse statistique, le risque et la fiabilité, graphiques, etc. Aujourd'hui, les modèles sont de plus en plus distribués. Le résultat de cette modélisation est que les besoins de données sont devenus énormes ainsi que la nécessité de les traiter (Fiorentino, 1996).

Le terme modèle désigne l'ensemble de relations mathématiques destiné à trouver une représentation schématique d'un processus donné. En hydrologie, c'est le cycle de l'eau. L'inondation en milieu urbain est un phénomène complexe et regroupe plusieurs facteurs

d'ordre climatique, hydrologique, hydraulique et urbain. La modélisation des ces facteurs nous permet de :

- Comprendre le comportement du bassin versant vis-à-vis des sollicitations pluvieuses
- Estimer la pluie nette de ruissellement à partir des données pluviométrique brutes (fonction de production) et les débits ruisselés (fonction de transfert).
- Prévoir le comportement du milieu urbain face aux flux inondant.

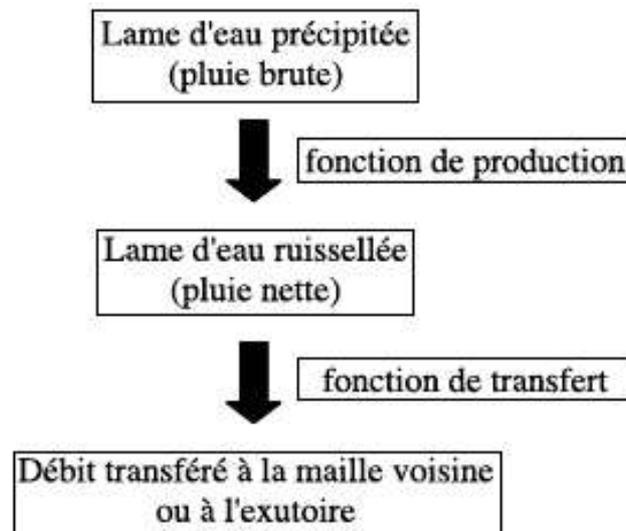


Figure 2.1 : Processus d'inondation en milieu urbain

A partir de cela, on peut distinguer quatre éléments fondamentaux à modéliser :

- L'élément climatique : c'est l'étude des caractéristiques des précipitations à partir des données brutes qui sont l'intensité, la durée et la fréquence (courbe IDF) et s'il y a lieu la distribution spatiale
- L'élément hydrologique : les fonctions de production et du transfert permettent la transformation de la pluie brute en ruissellement de surface, ensuite le transfert dans le réseau hydrographique vers l'exutoire (Figure 2.1).
- L'élément hydraulique : il se préoccupe des caractéristiques et le comportement des écoulements dans les éléments de drainages mesurant le débit, la vitesse et la hauteur de l'écoulement prenant en considération les autres paramètres tel que la rugosité et la pente.
- L'élément urbain : qui décrit le comportement des différents éléments de la ville face à une situation de crue, c'est l'hydrosystème urbain.

II.2 La modélisation hydrologique

Le processus hydrologique sur un bassin versant naturel est tellement compliqué et causé par un nombre important de facteurs que sa modélisation est devenue un sujet ambigu et donne une infinité de notions, définitions et classifications comme le mentionne Ambroise (1998) *"il y a presque d'autant de modèles que d'hydrologues"*. Tous les modèles sont une représentation simplifiée du monde réel. Ils peuvent être physiques, à analogie électrique ou mathématique. Dans le passé, les modèles physique ou à analogie électrique ont été importants, maintenant les modèles mathématique, avec écart, sont universellement les plus applicables et connaissent un développement très rapide. Dans ce qui suit, on s'intéresse aux modèles mathématiques.

II.2.1 Typologie des modèles

II.2.1.1 Modèle empirique (boîte noire)

Un modèle empirique est construit autour de relations mathématiques directes établies entre les entrées et les sorties observées sur le bassin versant considéré. Ce type de modèle ne cherche pas à décrire les processus impliqués dans la relation pluie-débit et est donc souvent caractérisé comme des modèles "boîtes noires" puisque le système peut être consulté en termes d'entrée et sortie sans aucune connaissance de son fonctionnement interne (Figure 2.2).

II.2.1.2 Modèle conceptuel (boîte grise)

Un modèle conceptuel cherche à représenter les principaux processus de la relation pluie-débit sans utiliser les lois physiques régissant les processus concernés. Ce type de modèle est généralement constitué de réservoirs connectés entre eux, dont les niveaux augmentent et diminuent au cours du temps et qui sont censés représenter les différents compartiments hydrologiques des bassins versants. L'utilisation de différents réservoirs permet une première séparation des composantes de la relation pluie-débit. Aussi connu "modèle à boîte grise" puisqu'il combine une structure théorique partielle avec les données pour compléter le modèle.

II.2.1.3 Modèle à base physique (boîte blanche)

Un modèle à base physique représente les processus de la relation pluie-débit en utilisant les lois physiques régissant ces processus. Ce type de modèle permet, de plus, de calculer les différents termes du bilan d'eau du bassin versant étudié. Appelé modèle à boîte blanche, boîte transparente ou boîte de verre parce que les composantes internes du système sont disponibles pour inspections. Ils sont purement théoriques.

II.2.1.4 Modèle global

Dans un modèle global, le bassin versant est représenté comme une seule entité spatiale homogène. La variabilité spatiale des processus étudiés n'est donc pas explicitement prise en compte avec ce type de modèle.

II.2.1.5 Modèle distribué (spatialisé)

Dans un modèle distribué, le bassin versant est divisé en plusieurs entités spatiales. Ce découpage de l'espace peut être sous la forme d'un maillage régulier, ou par sous bassins-versants. Ce modèle permet de prendre en compte la variabilité spatiale des processus étudiés.

II.2.1.6 Modèle semi-distribué

Dans un modèle semi-distribué, certains processus sont modélisés en divisant le bassin versant en plusieurs entités spatiales. Ce découpage de l'espace peut être réalisé grâce à des critères hydrologiques (découpage en sous bassin versant), ou des critères topographiques (découpage par bandes d'altitude). Ce modèle permet de prendre en compte la variabilité spatiale des processus étudiés.



Figure 2.2 : Fonctionnement d'un modèle boîte noire

II.2.2 Critères de classification des modèles

Il paraît logiquement nécessaire de faire une classification des modèles suivant plusieurs critères afin de mieux choisir suivant l'objectif. Plusieurs auteurs ont mis des critères de classification comme Refsgaard (1996), Singh (1995). On va citer celles décrits par Ambroise (1998) ou il propose quatre critères :

- Selon la nature des variables et des paramètres : stochastique ou déterministe
- Selon la nature des relations utilisées : empirique ou à base physique avec une classe intermédiaire "Conceptuel (paramétrique)"
- Selon l'unité spatiale de base : globale ou distribué avec une classe intermédiaire "semi-distribué".
- Selon l'évolution temporelle : cinématique (descriptif) ou dynamique (explicatif) ou cette évolution est mise en relation avec les forces qui la cause

On mentionne que les différences entre les définitions et les classifications de chaque auteur rendent la compréhension très équivoque telle que la notion du modèle conceptuel.

II.2.3 Classification des modèles

Plusieurs auteurs ont essayé de faire une classification, Refsgaard Et Storm (1995), Singh (1995), Chocat (1997), Weather (1993) et Ambroise (1998). La différence entre les critères rend la classification elle-même différente. On va présenter, dans ce qui suit, celles de Refsgaard et Ambroise.

II.2.3.1 Classification de Refsgaard

Deux types classiques de modèles qui s'apparaissent, stochastique et déterministe. Ces deux notions appartiennent à deux approches différentes mais au cours de la dernière décennie l'intersection est produite pour offrir une méthodologie déterministe-stochastique commune qui fournit un cadre très utile pour résoudre quelques problèmes fondamentaux comme la variabilité spatiale (Figure 2.3).

II.2.3.1.1 Les modèles déterministes

Ils peuvent être classés suivant la description de la zone d'étude en globaux et distribués, ou suivant la description du processus hydrologique en empirique, conceptuel ou à base physique. Comme les modèles conceptuels sont généralement globaux et les modèles à base physique sont distribués, les trois groupes des modèles hydrologiques sont :

II.2.3.1.1.1 Empiriques (lumped)

Ce sont des modèles qui impliquent des relations évaluées, non par le processus physique du BV, mais par les entrées et les sorties du modèle. Ils peuvent être divisés en trois sous-groupes :

- Méthode empiriquement hydrologique : comme le modèle de l'Hydrogramme unitaire
- Méthode à base statistique : ce sont des modèles qui utilisent la régression et la corrélation ou souvent connus "modèle de fonction de production" comme ARIMA, CLS, API

- Méthode à base hydro-informatique : un nouveau groupe qui base sur la technique des réseaux de neurones et le développement de l'algorithme.

II.2.3.1.1.2 Globaux conceptuels

Ils sont généralement utilisés pour modéliser la fonction pluie-débit. Grâce à la description globale, où tous les paramètres et variables sont représentés par des valeurs moyennes sur l'ensemble du bassin versant, la description des processus hydrologiques ne peut être fondée directement sur les équations qui sont censés être valable pour des éléments à caractéristiques spécifiques. Par conséquent, les équations sont semi-empirique, mais toujours avec une base physique.

II.2.3.1.1.3 Distribués à base physique

Contrairement aux modèles précédents ces modèles considèrent que le débit et l'énergie peuvent être calculés directement à partir des équations différentielles partielles telles que barré saint venant. En premier temps, ce genre de modèle était utilisé juste pour la simulation des eaux souterraines, la première tentative de l'utiliser sur un BV hydrologique était par Freez et Harlan (1969). Aujourd'hui les modèles distribués à base physiques sont largement diffusés puisqu'ils offrent des détails sur le BV avec une description du processus relativement proche de la réalité, et peuvent être appliqués pour résoudre presque tous genres de problèmes hydrologiques. Les plus connues SHE, IHDM, THALES.

II.2.3.1.2 Les modèles stochastiques

Aussi appelé probabiliste ou modèle de série chronologique. Ils traitent la séquence des événements en tenant compte du facteur du temps. Ils sont dérivés d'une analyse d'une série temporelle. Les modèles stochastiques peuvent être utilisés pour la génération de longues séquences d'événement hypothétiques avec les mêmes propriétés statistiques que le record historique. Cette technique est dite "la technique de Monte Carlo". Ces données peuvent être utilisées pour l'analyse des variables tels que l'apport de stockage d'un réservoir. Salas (1981) divise les modèles stochastiques en deux partie, des modèles à une seule série chronologique qui sont des modèle à une seule variable, ou des modèles à multiples séries chronologiques qui sont le regroupement de plusieurs série similaires ou différentes.

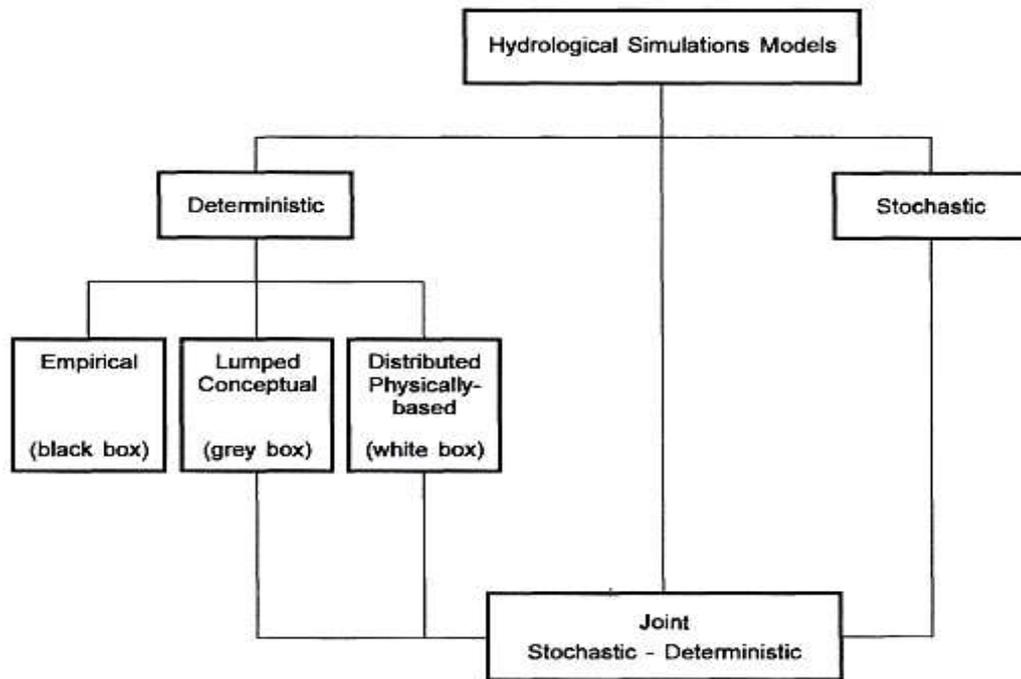


Figure 2.3 : Classification de Refsgaard des modèles hydrologiques

II.2.3.2 Classification d'Ambroise

II.2.3.2.1 Modèles empiriques globaux

Ils sont généralement utilisés pour modéliser la relation pluie-débit par une approche soit stochastique ou déterministe, comme le modèle de l'hydrogramme unitaire. Ces modèles utilisent seulement les variables d'entrée et de sortie sans prendre en considération la nature physique de l'élément. Les modèles empiriques sont souvent utilisés par les ingénieurs vu leurs simplicité, le nombre modeste des données nécessaires mais ils ne donnent aucune information sur le fonctionnement interne du BV donc ils sont inutile pour la recherche

II.2.3.2.2 Modèles conceptuels globaux

Dans ce type le BV est considéré comme un système complexe ou ces composantes telle que le sol, la végétation, le réseau hydrographique sont variables et les précipitations se répartissent selon plusieurs niveaux de stockage. Tout ça a donné naissance à une nouvelle classe de modèle nommée "conceptuel" ou "à réservoir" comme SWM (Stanford Watershed Model, 1966) à 08 réservoirs et 27 paramètres (Crawford et Linsley, 1966), ou GR3J de génie rurale avec 03 réservoirs et 03 paramètres. Dans ces modèles, le réservoir est décrit par deux paramètres, le niveau d'eau et le coefficient de vidange des orifices et par deux types d'équations, équation du bilan pour la variation du niveau d'eau et la relation entre les flux entrants et sortants, et une loi de vidange des orifices.

II.2.3.2.3 Modèles physiques spatialisés

Ce sont des modèles qui s'appuient sur les équations physiques pour décrire le processus du système souvent sous forme des équations différentielles partielles par rapport au temps et l'espace telle que l'équation de conservation de la quantité de mouvement. Ils offrent une description théorique du BV.

II.2.3.2.4 Modèles conceptuels semi-spatialisé

Ce type de modèle base sur un découpage du BV en unités spatiales adjacentes considérées homogènes, transmettant le débit entre eux de l'amont vers l'aval. Ceci permet de tenir compte de la répartition spatiale des caractéristiques de chaque unité et suivre le comportement de l'écoulement à l'intérieur du BV à chaque pas de temps. La difficulté réside dans sa mise en œuvre vue le choix difficile de la méthode de discrétisation et le nombre important des données nécessaire. On nomme quelque modèles comme : CEQUEAU-ORSTOM et SLURP.

Quel que soit l'auteur ou les critères de classification, la modèles distribués, malgré les obstacles, semblent plus avantageux en terme de résultats et séduisants pour le développement. Dans ce qui suit, nous présentons le modèle SCS-CN.

II.3 La méthode SCS-CN

Lorsqu'un hydrologue est confronté à la tâche d'estimer le ruissellement direct d'un bassin versant non jaugeé, très souvent, la méthode utilisée est celle du Service de conservation des sols (SCS). La méthode SCS-CN caractérise le potentiel d'un bassin versant à générer le ruissellement direct à partir des précipitations en identifiant pour lui un Curve Number approprié (Hubert, 1981).

II.3.1 Contexte historique

Selon Hjelmfelt (1991) l'utilisation d'un graphe de la relation pluie-débit pour décrire l'hydrologie d'un bassin versant a commencé au début du 20^{ème} siècle. Mead (1919) a démontré plusieurs graphes de cette relation. En 1942, Sherman a tenté d'inclure d'autres paramètres pour tracer la courbe pluie-débit pour de chaque mois. Kohler et Linsley (1951) ont développé l'approche de Sherman avec le diagramme de corrélation multiple. Ils ont intégré des données telles que les précipitations antécédentes, la semaine de l'année et la durée de l'évènement avec les valeurs de la pluie et du ruissellement.

Selon Mokcus, les SCS (Service de Conservation des Sols), maintenant connue sous le nom de NRCS (National Ressources Conservation service) a développé la méthode pendant les années 1930 la méthode SCS-CN pour des bassins versant ayant une superficie inférieure à 1035 km².

L'objectif était d'établir une méthode qui permet d'évaluer la réponse hydrologique d'un bassin versant avant et après un évènement pluvieux. La collecte de données hydrologiques a débuté dans plusieurs sites à travers les Etats-Unis en 1928. La méthode reposait sur des données couvrant 10 à 20 années de recherche sur le terrain (Ponce, 1996). En 1936, l'USDA a réalisé des enquêtes et des investigations pour mesurer les flux retardés des BV, qui sont un problème hydrologique classique, qui ont mené, finalement, à l'évaluation de l'effet des composantes du BV sur le processus de ruissellement. Mais ces données étaient insuffisantes et ne couvrent qu'une partie des conditions affectant le processus de ruissellement, par conséquent, les données d'infiltration doivent être prises en considération (Mirsha, 2003).

Avec l'utilisation des infiltromètre de type Sprinkler sur des parcelles de 1,83×3,66 m, des milliers des tests d'infiltration ont été effectuées au cours des années 1930 et 1940. Pour des raisons économiques, un autre infiltromètre de type FA a été largement utilisé sur des parcelles de 0,3×0,76m. Sur la base des données d'infiltration, une méthode rationnelle pour estimer le ruissellement sous des conditions de couverture des sols a été développée. Pour cette raison, le SCS a recruté trois consultants privé Horner, Horton et Sherman. En 1933, Horton a développé la courbe de capacité d'infiltration et Horner, en 1940, a concentré sur le développement de la capacité d'infiltration à partir des données des BV. Leurs études ont abouties à l'élaboration des courbes des taux de retentions et l'excès de pluie pour le calcul des volumes de ruissellement. Mais cette méthode nécessite des données de la distribution spatiale et temporelle des précipitations ce qui rend son application sévèrement restreinte dans plusieurs pays (Woodward, 2002).

La méthode pluie-débit était développée pendant les années 1940 en utilisant les données d'infiltration pour le calcul des volumes de ruissellement. Andrews 1954, a regroupé des données d'infiltration collectées de Texas, Oklahoma, Arkansas et Louisiana utilisant la texture du sol comme caractéristique. Eventuellement, il a développé une méthode graphique pluie-débit tenant compte de la texture du sol, type et quantité de couverture des sols et les activités agricoles. Vu le développement de cette méthode, il était claire la nécessité d'une méthode applicable pour les BV non jaugés. Les travaux de Mokcus (1949) et Andrews (1954) ont été transformés et généralisés pour donner la méthode SCS-CN existante. Cette méthode été publiée la première fois en 1956 dans NEH-4 (National engineering Handbook4). Sa première utilisation, en 1954, pour l'étude d'un BV pour la protection contre les inondations a conduit à une vaste connaissance et la méthode été utilisée à travers le monde. Elle est simple, facile à comprendre et applicable pour les BV agricoles, forestiers et urbains non jaugés. La raison

principale pour son utilisation réside dans le fait qu'elle tient compte de toutes les caractéristiques du BV influençant la production du ruissellement tel que : type de sol, occupation du sol et les conditions antécédentes d'humidité

II.3.2 Principe de la méthode

La méthode SCS-CN est basée sur l'équation de la balance hydrique (équation 2.1) et deux hypothèses fondamentales. La première (équation 2.2), le rapport du ruissellement (Q) aux précipitations totales (P) égale au rapport d'infiltration (F) au potentiel de rétention maximale (S). La deuxième (équation 2.3) relie l'abstraction initiale (I_a) au potentiel de rétention maximale (Parasuraman, 2007).

$$P = I_a + F + Q \quad (2.1)$$

$$\frac{Q}{P - I_a} = \frac{F}{S} \quad (2.2)$$

$$I_a = \lambda \cdot S \quad (2.3)$$

En 1949, Sherman était le premier à proposer de tracer un graphe du ruissellement direct et des précipitations. Sur la base de ce concept, Mockus était l'auteur de l'exposé A du rapport du bassin versant Neosho qui contient la procédure pour estimer le ruissellement sur la base de certain paramètres du bassin versant (Rallison, 1982).

- 1- Le sol : types, localisation et l'extension spatiale.
- 2- L'occupation du sol : genre, localisation et l'extension spatiale.
- 3- Les données pluviométriques antécédentes.
- 4- La durée de l'averse et les valeurs des précipitations associées.
- 5- La température moyenne annuelle.

Tous ces paramètres ont été combinés en un seul indice b par la formule 2.4 :

$$b = 0.074 (10)^{0.229M} \cdot C^{1.061} / [T^{1.990} \cdot D^{1.333} (10)^{2.271} \cdot (\frac{s}{D})] \quad (2.4)$$

M : les précipitations antécédentes de 5 jours (pouce).

C : indice de pratique de couverture.

T : indice saisonnier, en fonction de la date et la température (F°).

D : durée de l'averse (h).

s : indice du sol, pouce par heure.

La forme métrique de cette équation n'a jamais été développée.

Les résultats de la valeur de b ont été utilisés comme une deuxième variable indépendante avec P étant la variable initiale dans un graphe des précipitations par rapport au ruissellement.

$$Q = P [1 - (10)^{-bP}] \quad (2.5)$$

Q : ruissellement direct

P : Précipitations

Cette équation n'inclue pas un terme tenant compte de l'abstraction initiale. Elle a été simplifiée dans le brouillon du guide hydrologique de 1954 en un graphe de P par rapport au Q.

$$Q = KP^2 / (KP + 1) \quad (2.6)$$

K : Constant pour des conditions spécifiques du bassin versant

L'équation précédente peut être écrite aussi :

$$Q = P^2 / (P + S) \quad (2.7)$$

$$S = 1/K \quad (2.8)$$

S désigne le stockage de l'eau dans le sol ou l'infiltration. L'équation (2.7) est relativement proche de l'équation d'infiltration de Horton. Cette équation n'offre pas une signification pour l'abstraction initiale ou le stockage des eaux de ruissellement dans les dépressions. Après plusieurs discussions entre les hydrologues la notion d'Ia a été introduite dans l'équation (2.7). La version de 1959 du guide de l'hydrologie indique qu'une relation entre Ia et S était développée. Cette relation s'écrit comme suit :

$$Ia = 0.2 * S \quad (2.9)$$

Ia est assumé inclure l'interception, l'infiltration initiale, le stockage de surface et d'autres facteurs. Cette relation entre Ia et S était basée sur des données des bassins versants de petite et grandes superficies. Les données ont été collectées de plusieurs régions des états unis. Après l'inclusion d'Ia dans l'équation (2.9), la relation finale est :

$$Q = (P - 0.2S)^2 / (P + 0.8S) \quad (2.10)$$

S est lié à la texture du sol et le mode d'occupation du sol par le CN qui varie de 0 à 100.

$$S = \left(\frac{25400}{CN} \right) - 254 \quad (2.11)$$

La détermination du CN se fait en utilisant les tables de NEH-4 (regroupées aux tableaux 2.2, 2.3, 2.4 et 2.5 cités aux pages 44, 45 et 46). Le CN dépend de type de sol et de l'occupation du sol. Les sols sont divisés en quatre groupes hydrologiques (GHS) A, B, C et D pour les différents modes d'occupation de sol (urbain, agricole...etc.).

II.3.3 Les paramètres influençant le CN

II.3.3.1 Les types des sols

La première étape pour la détermination du CN d'un bassin versant est l'identification des groupes hydrologiques de sols (Hubert, 1981). En 1955, Musgrave a décrit une classification hydrologique des sols sur la base de leur texture et le taux d'infiltration. Cette classification regroupe les sols en quatre groupes qui sont : A, B, C et D avec les sables en groupe A et les argiles en D.

Le groupe A inclut les sols ayant un faible potentiel de ruissellement et des taux d'infiltration élevés même lorsqu'ils sont complètement mouillés. Ces sols les plus perméables tels que le sable, sable limoneux et limon sableux. Ils contiennent une faible proportion d'argile et de colloïdes ainsi que suffisamment de matières organiques. Ces sols ont un taux de transmission supérieur à 7.62 mm/h.

Le groupe B inclut des sols ayant des taux d'infiltration modérés lorsqu'ils sont complètement mouillés inclut le limon fin ou limon dont le taux d'infiltration est 3.81 à 7.62 mm/h.

Le groupe C inclut les sols ayant un faible taux d'infiltration même lorsqu'ils sont bien mouillés. Il consiste principalement des sols dont la couche empêche le mouvement de l'eau vers le bas et des sols avec une texture moyennement fine à fine tels que le limon argileux sableux dont le taux d'infiltration varie de 1.27 à 3.81 mm/h.

Le groupe D inclut les sols ayant un fort potentiel de ruissellement et des taux d'infiltration faible tels que le limon argileux, limon argileux fin, argile sableux, argile limoneux ou argile.

La détermination des groupes hydrologiques des sols nécessite d'abord une analyse granulométrique des échantillons pour déterminer le pourcentage de chaque composante (sable, limon et argile). Puis la texture du sol est déterminée à partir du triangle textural (Figure 2.4). Les différents groupes hydrologiques des sols ainsi que les textures correspondantes sont illustrés dans le tableau 2.1.

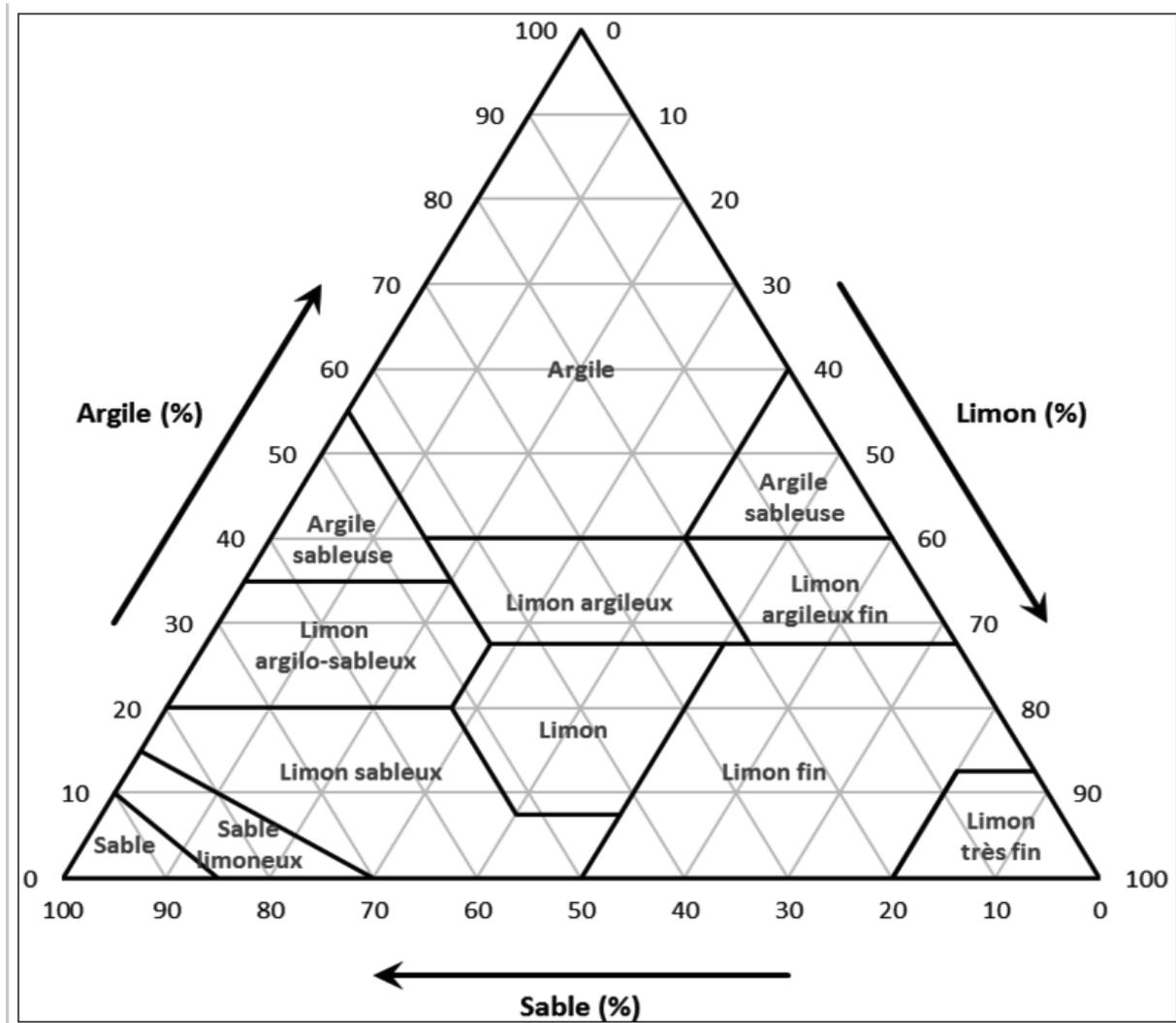


Figure 2.4 : Triangle textural des sols

Tableau 2.1 : Groupes hydrologiques des sols

Groupes hydrologiques des sols	Texture des sols
A	Sable, Sable Limoneux ou Limon Sableux.
B	Limon fin ou Limon.
C	Limon Argileux Sableux.
D	Limon Argileux, Limon Argileux fin, Argile Sableux, Argile Limoneux ou Argile.

II.3.3.2 L'occupation du sol

L'occupation des sols décrit le couvert du BV y compris tout genre de végétation, les plans d'eau, les zones urbaines. Une zone urbaine signifie une imperméabilité importante qui se diffère selon les éléments, un parking peut avoir un CN de 98 alors un jardin en gazon a CN de 39. Cette classification est basée sur le pourcentage des parties imperméables et le reste de la zone est considéré comme pâturage en bonne condition. Mais cette imperméabilité n'a aucun

influence sauf si la zone est contributive c.-à-d., la zone doit être connectée directement au réseau de drainage. Les surfaces non contributives produisent un ruissellement retardé avec des pertes significatives. Généralement, le total des zones imperméables est supérieur que celui des zones contributives à cause des toitures et des allées qui évacuent les eaux sur les terres avoisinantes. Schueler (1987) a noté que le potentiel de ruissellement mesuré en termes de coefficient de ruissellement est relié avec le pourcentage d'imperméabilité I comme :

$$C = 0,05 + 0,9\left(\frac{I}{100}\right) \quad (2.12)$$

Pour une zone imperméable 100%, C = 95, une perte par évaporation est de 5%. L'estimation du pourcentage d'imperméabilité dépend de la densité de population. Pandit (1996) a modifié la formule de Stankovski (1974) pour le Système métrique :

$$I = 9,6 * PDd^{(0,573 - 0,0391 \log_{10} PDd - 0,398)} \quad (2.13)$$

PD_a : la densité de population en personne/hectare.

II.3.3.3 Les conditions hydrologiques

Elles signifient le pourcentage des terres herbacées, plus qu'un BV est couvert par les herbes plus qu'il y aura infiltration et moins de ruissellement, cette situation est dite "en bonne condition hydrologique" puisque le BV est protégé contre l'érosion.

II.3.3.4 Les activités agricoles

Elles impliquent tous types de travaux agricoles y compris le labour. Freebairn (1989) a démontré l'impact des activités agricoles sur l'infiltration et constate que le labour affecte la structure et la porosité des sols et par conséquent l'infiltration.

II.3.3.5 Les conditions antécédentes d'humidité

Elles signifient la quantité d'humidité disponible dans le profil du sol avant le début d'événement pluvieux. Pour un événement où le sol est totalement saturé, la quasi-totalité des précipitations sera transformées directement au ruissellement sans perte d'infiltration. Mais si le sol est totalement sec, il est possible que toute la pluie sera absorbée.

II.3.3.6 L'abstraction initiale

Elle se présente sous forme de rétention de surface, évaporation et infiltration. Elle décrit, aussi, l'impact des conditions climatiques sur le fonctionnement du BV, puisque l'évaporation est favorisée par les facteurs climatiques tel que, le rayonnement solaire, la température, l'humidité et le vent.

II.3.3.7 La durée, l'intensité et la turbidité de la pluie

Pour un événement pluvieux donné, la durée des précipitations affecte l'intensité et par conséquent l'infiltration. L'intensité des précipitations et la durée sont reliées inversement, une courte durée signifie une grande intensité et vice versa. La turbidité de la pluie se réfère aux impuretés trouvées dans l'eau qui affectent l'infiltration par le processus de "colmatage" des pores des sols et par conséquent modifie la conductivité. Aussi une eau contaminée par des minéraux dissous, tel que les sels, est probable de modifier la porosité et la structure du sol.

II.3.4 Détermination du CN

Le CN est le paramètre de base pour la méthode SCS-CN. Pour le déterminer il est indispensable de connaître deux paramètres de base : le type de sol (texture, granulométrie) et le mode d'occupation des sols. Les tableaux 2.2, 2.3, 2.4 et 2.5 présentent les différentes valeurs du CN.

Tableau 2.2 : Valeur du CN pour les zones urbaines

Cover description Cover type and hydrologic condition	Average percent impervious area ²	Curve numbers for hydrologic soil group			
		A	B	C	D
<i>Fully developed urban areas (vegetation established)</i>					
Open space (lawns, parks, golf courses, cemeteries, etc.) ² :					
Poor condition (grass cover < 50%)		68	79	86	89
Fair condition (grass cover 50% to 75%)		49	69	79	84
Good condition (grass cover > 75%)		39	61	74	80
Impervious areas:					
Paved parking lots, roofs, driveways, etc. (excluding right-of-way)		98	98	98	98
Streets and roads:					
Paved, curbs and storm sewers (excluding right-of-way)		98	98	98	98
Paved, open ditches (including right-of-way)		83	89	92	93
Gravel (including right-of-way)		76	85	89	91
Dirt (including right-of-way)		72	82	87	89
Western desert urban areas:					
Natural desert landscaping (pervious areas only) ⁴		63	77	85	88
Artificial desert landscaping (impervious weed barrier, desert shrub with 1- to 2-inch sand or gravel mulch and basin borders)		96	96	96	96
Urban districts:					
Commercial and business	85	89	92	94	95
Industrial	72	81	88	91	93
Residential districts by average lot size:					
1/8 acre or less (town houses)	65	77	85	90	92
1/4 acre	38	61	75	83	87
1/3 acre	30	57	72	81	86
1/2 acre	25	54	70	80	85
1 acre	20	51	68	79	84
2 acres	12	46	65	77	82
<i>Developing urban areas</i>					
Newly graded areas (pervious areas only, no vegetation) ⁵					
		77	86	91	94
Idle lands (CN's are determined using cover types similar to those in table 2-2c).					

¹ Average runoff condition, and $I_p = 0.2S$.

² The average percent impervious area shown was used to develop the composite CN's. Other assumptions are as follows: Impervious areas are directly connected to the drainage system, impervious areas have a CN of 98, and pervious areas are considered equivalent to open space in good hydrologic condition. CN's for other combinations of conditions may be computed using figure 2-3 or 2-4.

³ CN's shown are equivalent to those of pasture. Composite CN's may be computed for other combinations of open space cover type.

⁴ Composite CN's for natural desert landscaping should be computed using figures 2-3 or 2-4 based on the impervious area percentage (CN = 98) and the pervious area CN. The pervious area CN's are assumed equivalent to desert shrub in poor hydrologic condition.

⁵ Composite CN's to use for the design of temporary measures during grading and construction should be computed using figure 2-3 or 2-4 based on the degree of development (impervious area percentage) and the CN's for the newly graded pervious areas.

Tableau 2.3 : Valeur du CN pour les parcours en zones arides et semi-arides

Cover description		Hydrologic condition ^{2/}	Curve numbers for hydrologic soil group			
Cover type	Treatment ^{2/}		A	B	C	D
Fallow	Bare soil	—	77	86	91	94
	Crop residue cover (CR)	Poor	76	85	90	93
		Good	74	83	88	90
Row crops	Straight row (SR)	Poor	72	81	88	91
		Good	67	78	85	89
	SR + CR	Poor	71	80	87	90
		Good	64	75	82	85
	Contoured (C)	Poor	70	79	84	88
		Good	65	75	82	86
	C + CR	Poor	69	78	83	87
		Good	64	74	81	85
	Contoured & terraced (C&T)	Poor	66	74	80	82
Good		62	71	78	81	
C&T+ CR	Poor	65	73	79	81	
	Good	61	70	77	80	
Small grain	SR	Poor	65	76	84	88
		Good	63	75	83	87
	SR + CR	Poor	64	75	83	86
		Good	60	72	80	84
	C	Poor	63	74	82	85
		Good	61	73	81	84
	C + CR	Poor	62	73	81	84
		Good	60	72	80	83
	C&T	Poor	61	72	79	82
Good		59	70	78	81	
C&T+ CR	Poor	60	71	78	81	
	Good	58	69	77	80	
Close-seeded or broadcast legumes or rotation meadow	SR	Poor	66	77	85	89
		Good	58	72	81	85
	C	Poor	64	75	83	85
		Good	55	69	78	83
	C&T	Poor	63	73	80	83
Good	51	67	76	80		

¹ Average runoff condition, and $I_a - 0.2S$

² Crop residue cover applies only if residue is on at least 5% of the surface throughout the year.

³ Hydraulic condition is based on combination factors that affect infiltration and runoff, including (a) density and canopy of vegetative areas, (b) amount of year-round cover, (c) amount of grass or close-seeded legumes, (d) percent of residue cover on the land surface (good $\geq 20\%$), and (e) degree of surface roughness.

Poor: Factors impair infiltration and tend to increase runoff.

Good: Factors encourage average and better than average infiltration and tend to decrease runoff.

Tableau 2.4 : Valeur du CN pour autres terres agricoles

Cover description		Hydrologic condition	Curve numbers for hydrologic soil group			
Cover type			A	B	C	D
Pasture, grassland, or range—continuous forage for grazing. ^{2/}		Poor	68	79	86	89
		Fair	49	69	79	84
		Good	39	61	74	80
Meadow—continuous grass, protected from grazing and generally mowed for hay.		—	30	58	71	78
Brush—brush-weed-grass mixture with brush the major element. ^{3/}		Poor	48	67	77	83
		Fair	35	56	70	77
		Good	30 ^{4/}	48	65	73
Woods—grass combination (orchard or tree farm). ^{5/}		Poor	57	73	82	86
		Fair	43	65	76	82
		Good	32	58	72	79
Woods. ^{6/}		Poor	45	66	77	83
		Fair	36	60	73	79
		Good	30 ^{4/}	55	70	77
Farmsteads—buildings, lanes, driveways, and surrounding lots.		—	59	74	82	86

¹ Average runoff condition, and $I_a - 0.2S$.

² Poor: <50% ground cover or heavily grazed with no mulch.

Fair: 50 to 75% ground cover and not heavily grazed.

Good: > 75% ground cover and lightly or only occasionally grazed.

³ Poor: <50% ground cover.

Fair: 50 to 75% ground cover.

Good: >75% ground cover.

⁴ Actual curve number is less than 30; use CN = 30 for runoff computations.

⁵ CN's shown were computed for areas with 50% woods and 50% grass (pasture) cover. Other combinations of conditions may be computed from the CN's for woods and pasture.

⁶ Poor: Forest litter, small trees, and brush are destroyed by heavy grazing or regular burning.

Fair: Woods are grazed but not burned, and some forest litter covers the soil.

Good: Woods are protected from grazing, and litter and brush adequately cover the soil.

Tableau 2.5 : Valeur du CN pour autres terres agricoles

Cover description	Hydrologic condition ^{2/}	Curve numbers for hydrologic soil group			
		A ^{3/}	B	C	D
Herbaceous—mixture of grass, weeds, and low-growing brush, with brush the minor element.	Poor		80	87	93
	Fair		71	81	89
	Good		62	74	85
Oak-aspen—mountain brush mixture of oak brush, aspen, mountain mahogany, bitter brush, maple, and other brush.	Poor		66	74	79
	Fair		48	57	63
	Good		30	41	48
Pinyon-juniper—pinyon, juniper, or both; grass understory.	Poor		75	85	89
	Fair		58	73	80
	Good		41	61	71
Sagebrush with grass understory.	Poor		67	80	85
	Fair		51	63	70
	Good		35	47	55
Desert shrub—major plants include saltbush, greasewood, creosotebush, blackbrush, bursage, palo verde, mesquite, and cactus.	Poor	63	77	85	88
	Fair	55	72	81	86
	Good	49	68	79	84

¹ Average runoff condition, and $I_a = 0.2S$. For range in humid regions, use table 2-2c.

² Poor: <30% ground cover (litter, grass, and brush overstory).

Fair: 30 to 70% ground cover.

Good: > 70% ground cover.

³ Curve numbers for group A have been developed only for desert shrub.

II.3.5 Avantages et limites de la méthode SCS-CN

La méthode SCS-CN présente plusieurs avantages par rapport à d'autres méthodes. C'est une méthode conceptuelle simple pour l'estimation du ruissellement direct à partir d'une quantité de pluie. Elle est bien étayée par des données empiriques. La méthode dépend d'un seul paramètre, le numéro de la courbe CN (Curve Number), qui est en fonction des principales caractéristiques du bassin versant responsables de la production du ruissellement citées précédemment.

Mockus (1964) a noté plusieurs problèmes liés à la méthode SCS-CN. Par exemple, elle ne contient pas une expression pour le temps et ne tient pas compte de l'impact de l'intensité des précipitations et de sa répartition temporelle. Comme l'indiqué Cowan (1957), le temps n'a pas été incorporé dans la méthode parce que (a) l'indisponibilité des données suffisamment fiables pour décrire les taux d'infiltration pour une large gamme de complexes Sol végétations occupation des sols (SVL : Soil végétation land use) (b) il n'existe pas une méthode fiable pour déterminer la distribution temporelle des précipitations. Rallison et Miller (1982) décrivent plusieurs autres limitations, par exemple, la disponibilité de données fiables de la variation des conditions géographiques et environnementales.

Ponce et Hawkins (1996) considèrent que la méthode SCS-CN n'a pas encore été établie pour sa crédibilité et l'acceptation. Comme une méthodologie développée par une agence, la SCS-CN a été écartée par les revues rigoureuses. Les informations fournies dans NEH-4 (National Engineering Handbook-4) sont insuffisantes (Rallison et Cronshey, 1979). Il y a un manque de directives claires sur la façon de faire varier l'état antécédent, en particulier pour les numéros de courbe inférieurs (Hawkins, 1975 ; Bondelid, 1982 ; Ponce, 1989). Puisque la méthode a été initialement développée pour les sites agricoles, elle est plus performante sur ces bassins versants, équitablement sur les sites d'agriculture en rang, mais son application pour des sites forestiers est médiocre (Hawkins, 1984, 1993). Il n'existe pas de disposition explicite pour l'effet des échelles spatiales. Simanton (1973) a montré que le CN pour des zones moins de 227 ha en Arizona tend à diminuer avec l'augmentation de la superficie des bassins versants. Récemment, Grove, (1998) et Moglen, (2000) ont comparé les approches globales et distribuées de la méthode SCS-CN, ils ont trouvé que les valeurs de ruissellement résultant sont significativement différentes pour valeurs de précipitations faibles. Bien que Mockus (1964) indique l'applicabilité de la méthode même pour des grands bassins versants, l'absence de directives claires existe encore si elle peut sûrement être appliquée à des bassins versants d'une taille petite ou grande. Cependant, Ponce et Hawkins (1996), ont averti contre l'utilisation de la méthode pour les bassins versants de plus de 250 Km².

II.4 Conclusion

La pluralité des modèles hydrologiques rendent le choix du modèle une tâche difficile. Pour une meilleure simulation du comportement hydrologique d'un bassin versant, l'utilisation d'un modèle conceptuel semi-empirique, dont le nombre de données d'entrée est raisonnable, semble la plus adéquate. A ce stade, la méthode SCS-CN s'impose comme un modèle performant. Elle est fondée sur la détermination, avec précision, des composantes du bassin versant telles que la texture des sols et le mode d'occupation des sols.

Chapitre III

*La télédétection et les systèmes d'informations
géographiques en hydrologie*

III.1 La télédétection

III.1.1 Introduction

Dans les années précédentes, la télédétection est devenue une viable source des données pour quantifier l'état des flux des eaux et d'énergie entre la terre et l'atmosphère (Shelp, 2011). Son application est liée à de nombreux aspect de cycle de l'eau comme : les précipitations (Gebremichael, 2007), l'évaporation (Sun, 2009), l'humidité des sols (Wigneron, 1998), la balance hydrique des bassins versant et la variation des niveaux des eaux souterraines.

III.1.2 Définition

La littérature offre plusieurs définitions de la télédétection. Elle est définie comme la science et l'art d'obtenir des informations concernant un objet, une surface ou un phénomène à travers l'analyse des données acquises par un capteur qui n'est pas en contact direct avec l'objet d'étude. Il faut noter que les données obtenues par télédétection sont différentes de celles hydrologiques classiques. La télédétection présente un nombre d'avantage important mais aussi quelque inconvénient. L'un des inconvénients est la plupart des données hydrologiques ne sont jamais mesurées directement. La télédétection signifie que la télédétection se fait, souvent, à partir d'un spectre électromagnétique. Afin d'utiliser les données de la télédétection dans les sciences de l'eau, cela implique la nécessité de transformer les données en information hydrologiques pertinentes (Schultz, 2000).

III.1.3 Principe de la télédétection

La télédétection permet d'étudier la surface de la terre au moyen de capteurs. Ces instruments enregistrent les rayonnements émis ou réfléchis par la surface de la terre. Ces capteurs sont sensibles à la lumière visible mais aussi à d'autres parties du spectre électromagnétique comme l'infrarouge, l'ultraviolet et les micro-ondes. Une image du sol terrestre est obtenue en attribuant des intensités de gris ou de couleurs aux valeurs numériques enregistrées. L'utilisation de différentes combinaisons de valeurs et des traitements spécifiques permet l'extraction d'informations sur certaines caractéristiques du sol, informations qui peuvent être utiles en hydrologie (Lyzenga, 1987), en agriculture, en foresterie, en géologie, en océanographie ou en cartographie. En fonction du type de capteur utilisé, on parle de télédétection passive ou de télédétection active (figure 3.1).

III.1.3.1 La télédétection passive

Les capteurs passifs détectent les rayonnements naturels qui sont émise ou réfléchi par l'objet ou de la zone environnante observé. La lumière du soleil réfléchi est la source la plus courante de rayonnement mesurée par des capteurs passifs. Des exemples de capteurs passifs comprennent un film de photographie, infrarouge, et radiomètres (Abdulrahman, 2010)

III.1.3.2 La télédétection active

Le capteur embarqué à bord de l'avion ou du satellite produit sa propre énergie pour illuminer la cible : il dégage un rayonnement électromagnétique qui est dirigé vers la cible. Le rayonnement réfléchi par la cible est alors perçu et mesuré par le capteur. On utilise des radars ou des lasers comme source d'énergie. Ces rayonnements passent à travers la couverture nuageuse et il est donc possible d'obtenir des images quelles que soient les conditions météorologiques et de jour comme de nuit (Tempfli, 2009).

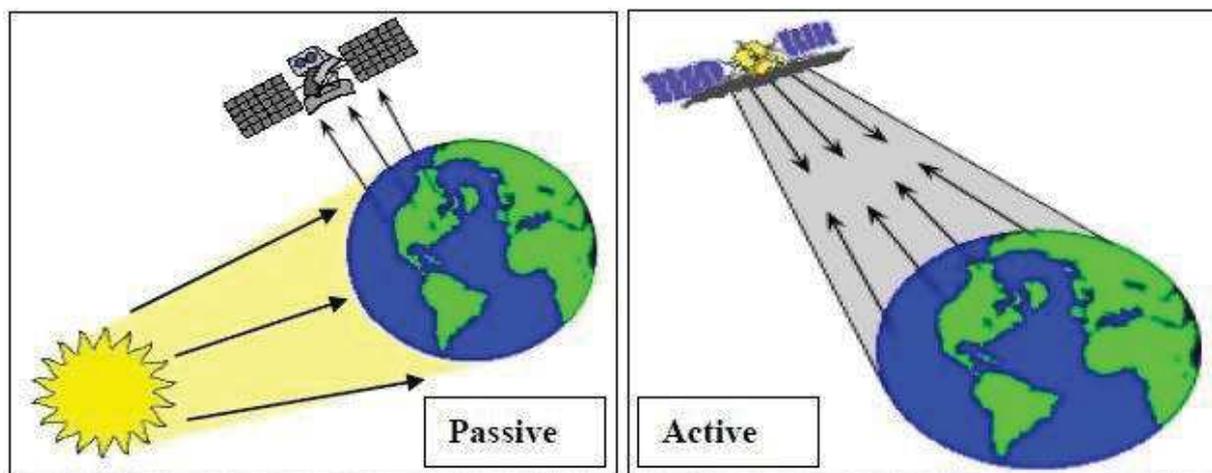


Figure 3.1 : La télédétection passive et active (Abdulrahman, 2010).

III.1.4 Les plates-formes de la télédétection

Pour les hydrologues, le choix de la plate-forme de télédétection est aussi important. Elle inclue, des bases terrestres (généralement un camion ou une antenne sur tour), des aéronefs ou des avions, des navettes spatiales ou les systèmes satellites.

Généralement les systèmes de camions et des antennes sont utilisés pour le développement des capteurs, l'étude des interactions capteur-cible et le développement des algorithmes. Ces systèmes permettent de contrôler avec précision ce que le capteur est capable de faire. La figure 3.2 montre un exemple d'instrument de télédétection sur camion utilisé pour déterminer l'humidité du sol.

Durant ces travaux sur l'humidité des sols, Jackson (1984) a évalué l'impact des facteurs, tel que la densité de la végétation sur l'humidité des sols, en utilisant un système de télédétection sur camion, il a conclu que ce système n'est pas vraiment fiable et qu'il faut utiliser un système plus performant et puissant que celui des avions. Les avions et les navettes spatiales fournissent une étape intermédiaire avant de passer aux satellites. Néanmoins, les avions fournissent, également, une plate-forme très utile pour la couverture des zones relativement petites et pour des missions non répétitives comme la photographie aérienne et les missions d'imagerie multispectrale et thermique. L'avion C-130 de la NASA (Figure 3.3) est l'outil le plus réputé, il a été utilisé dans plusieurs campagnes. Cet avion est pratiquement un laboratoire volant, il était conçu pour recueillir les données à partir de plusieurs instruments à tout moment.



Figure 3.2 : Capteur su camion pour des mesures sur une cible donnée avec deux radiomètres a micro-onde passive (Bandes L et C). (Source : Schultz, 2000).

Les navettes spatiales sont fréquemment utilisées comme source aérienne pour des épreuves de conception et expérimentation de nouveaux instruments (figure 3.4). La navette a radar d'imagerie (SIR : Shuttle Imaging Radar) représente un bon exemple, c'est un radar a ouverture synthétique porté sur le système de transportation de la navette (l'orbiteur de la navette spatiales de la NASA a la capacité de porter une variété d'expérience scientifique, le SIR est l'un parmi plusieurs). SIR-A était la première charge scientifique à bord de la navette, elle a fonctionné pendant 54 heures durant le vol de Columbia en Novembre 1981. Bien que la mission ait été abrégée de ces plans originaux, SIR-A était capable d'acquérir des images d'environ 10.360.000 Km² de surface terrestre (Campbell, 2011). Des données supplémentaires sur SIR-A sont données ci-dessous :

- Lancement : 12 Novembre 1981
- Atterrissage : 14 Novembre 1981
- Altitude : 259 km
- Fréquence : 1.278 GHz (bande L)
- Longueur d'onde : 23,5 cm
- Angle de dépression : 40 °
- largeur de l'andain : 50 km
- Polarisation : HH
- résolution au sol : environ 40 m × 40 m.

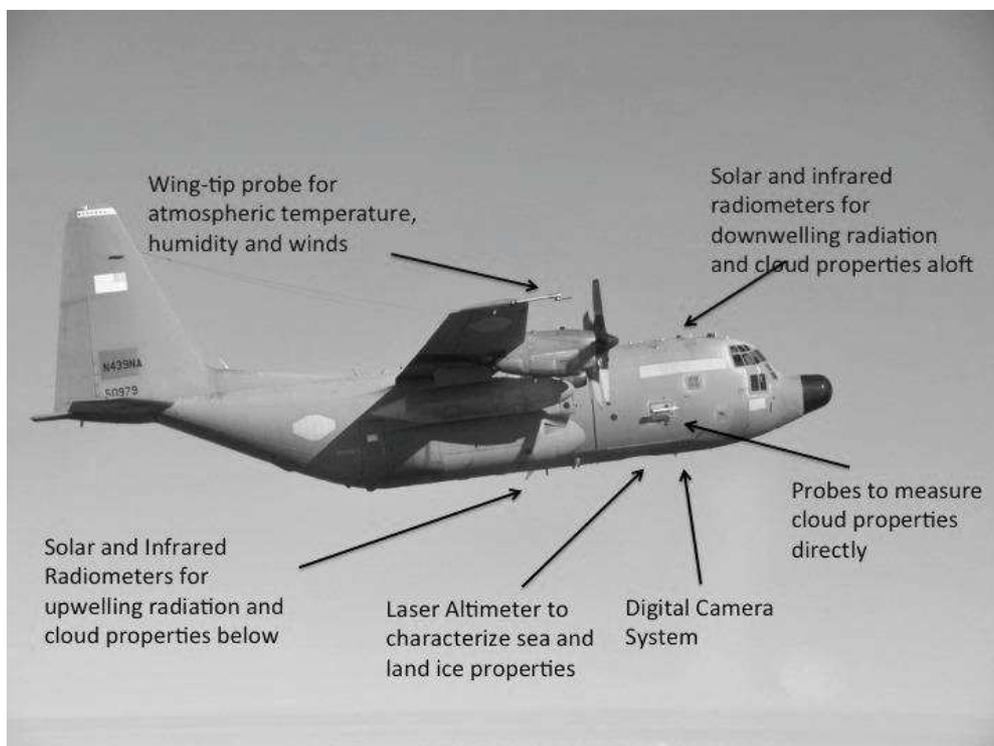


Figure 3.3 : Avion de télédétection C-130 (Source : www.nasa.gov)

Les satellites présentent la plate-forme idéale pour la télédétection car ils peuvent fournir une couverture essentielle et globale s'ils sont dans une orbite polaire et une couverture continue s'ils sont géostationnaires (figure 3.5). Les satellites volent généralement dans des orbites terrestres basses (centaines de kilomètres) et offrent des mesures de haute résolution. Les satellites polaires gravitent autour du globe terrestre en passant par les pôles Nord et Sud. À chacun de leur passage, ils scannent une étroite bande de terre en allant du nord au sud ou du sud au nord. Après avoir effectué un tour de la Terre, cette dernière ayant elle-même tourné sur

son axe, le satellite enregistre à ce moment-là les données d'une nouvelle bande de terre. Les satellites typiques de ce genre sont NOAA-A VHRR (National Oceanic and Atmosphere Administration- Advanced Very High Resolution Radiometre), le Satellite français SPOT (système probatoire de l'observation de la terre) et l'américain LandsAT TM (Thematic Mapper).

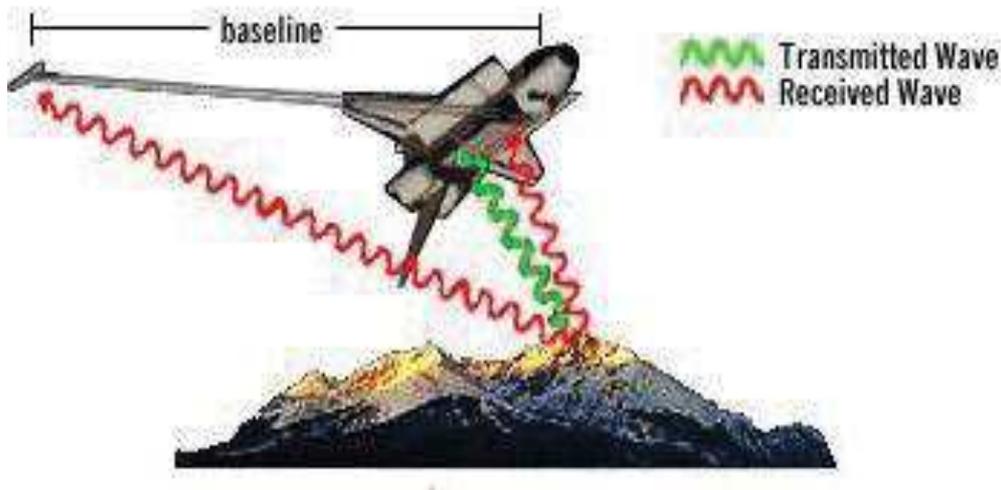


Figure 3.4 : Image d'une navette lors d'une mission de télédétection (Source : www.geog.ucsb.edu)

Les satellites géostationnaires sont des satellites qui se trouvent sur des orbites géostationnaires (orbite géosynchrone) situées toujours au-dessus du même point de la Terre. Le satellite doit pour cela tourner sur une orbite circulaire et à la même vitesse que la vitesse de rotation de la Terre, ce qui ne peut se faire que dans le plan de l'équateur et à une distance de 35800 km environ de la Terre. On n'a tout simplement pas le choix, si l'on désire qu'un satellite reste 'immobile' par rapport à la Terre, il faut le placer à 36.000 km d'altitude. Les satellites géostationnaires présentent la plate-forme principale pour les observations météorologiques car ils offrent des données spatiales continues mais grossières. Il existe plusieurs satellites de ce type comme : MeteoSAT, GOES et GMS.

Il existe des satellites qui ne sont pas ni géostationnaires ni sur orbite polaire. Dans ce cas, la trajectoire de l'orbite est choisie pour répondre à des exigences scientifiques spécifiques. La mission de cartographie des pluies tropicales (TRMM : Tropical Rainfall Mapping Mission) est un bon exemple, la trajectoire de l'orbite est de + 35° et -35° au-dessus et au-dessous de l'équateur pour améliorer la fréquence d'échantillonnage des précipitations.

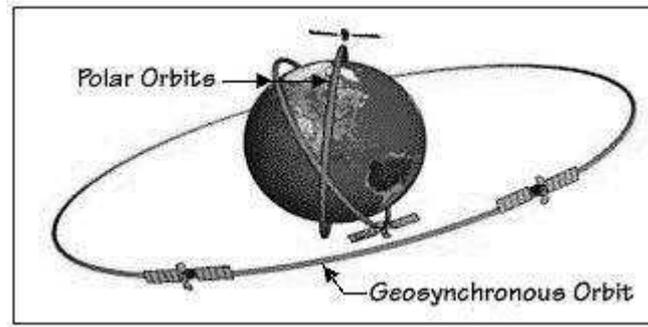


Figure 3.5 : Les différents types de satellites : géostationnaire et sur orbite polaire (Source : www.public.wildtracks.org).

III.1.5 les résolutions

III.1.5.1 la résolution spatiale

Une image digitale est constituée d'une matrice de pixels. Chaque pixel contient des informations sur une petite zone sur la surface de la terre, qui est considéré comme un objet unique. La résolution spatiale est une mesure de la superficie ou la taille de la plus petite dimension de la surface de la Terre sur lequel une mesure indépendante peut être réalisée par le capteur. Elle est exprimée par la taille du pixel sur le terrain en mètres (Kumar, 2012).

La mesure de la taille du pixel est donnée par le CVI (champ de vision instantané) (IFOV : Instantaneous Field of View). Le CVI est le cône angulaire de la visibilité du capteur, ou de la zone sur la surface de la Terre qui est vu à un moment particulier. CVI dépend de la hauteur du capteur au-dessus du niveau du sol et l'angle de vision du capteur.

Un angle de vision étroit produit un CVI plus petit comme le montre la Figure 3.6. On voit que l'angle de vision β étant supérieur à l'angle d'observation α , CVI_{β} est supérieure à CVI_{α} . CVI augmente également avec l'altitude du capteur, comme illustré sur la Figure 3.6. CVI_{β} et CVI_{α} du capteur à plus faible altitude sont moins par rapport à celles du capteur d'altitude.

Sur la base de la résolution spatiale, les systèmes satellites peuvent être classés en :

- systèmes à basse résolution
- systèmes à résolution moyenne
- systèmes à haute résolution
- systèmes à très haute résolution

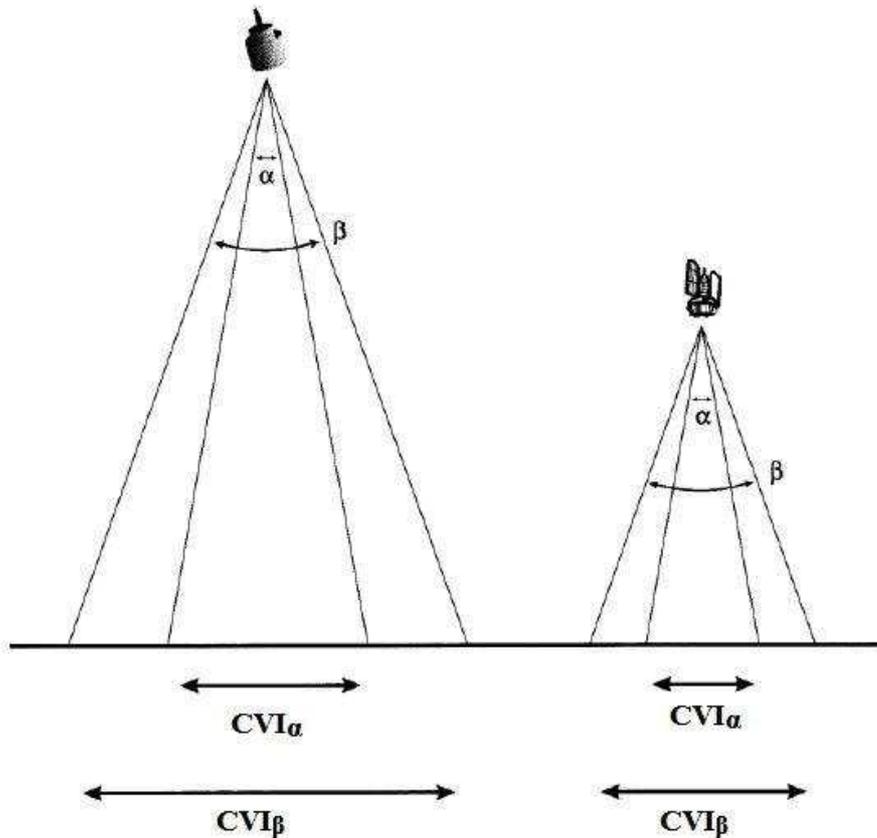


Figure 3.6 : variation des CVI avec l'angle de vision et de l'altitude du capteur

L'hydrologue doit également définir la résolution spatiale dont il a besoin. Ce choix dépend de la nature du problème et les détails nécessaires dans le modèle. Dans certains cas, pour les très grands bassins, on ne devrait pas avoir besoin de données à haute résolution. La résolution spatiale est très variable d'un capteur à l'autre. En général, les satellites en orbites plus élevées ne sont pas en mesure de fournir des données de haute résolution spatiale. Cependant, cela dépend aussi des caractéristiques du capteur utilisé. Il existe des satellites qui fournissent des données à haute résolution et d'autres ayant une résolution assez basse.

Les systèmes de télédétection avec une résolution spatiale plus de 1 km sont généralement considérés comme des systèmes à basse résolution. MODIS et AVHRR sont des capteurs à très basse résolution utilisés dans la télédétection par satellite (Rembold, 2013). Lorsque la résolution spatiale est de 100 m à 1 km un tel système est considéré comme un système à résolution moyenne. La bande infrarouge thermique de Landsat TM (250 m) et les bandes 1-7 de MODIS (250 m à 500 m) s'appartiennent à cette classe (Franklin, 2002). Les systèmes de télédétection avec une résolution spatiale de 5m à 100m sont classés comme des systèmes à haute résolution. Landsat ETM+ (30m), IRS LISS-III (MSS 23m et 6m panchromatique) et

AWiFS (56-70m), SPOT 5 (2.5-5m panchromatique) sont quelques-uns des capteurs à haute résolution (Wulder, 2015). Les systèmes à très haute résolution sont ceux qui fournissent moins de 5 m de résolution spatiale. GeoEye (0.45m pour panchromatique et 1.65m pour MSS), IKONOS (panchromatique 0.8-1m), et Quickbird (2,4-2,8 m) sont des exemples de systèmes à très haute résolution (Bruzzone, 2006).

III.1.5.2 La résolution temporelle

La résolution temporelle est définie comme le temps nécessaire pour revoir et acquérir des données pour la même zone. En la télédétection, ce temps dépend des paramètres de l'orbite et des caractéristiques des capteurs (Théau, 2008). Appelée aussi résolution répétitivité, elle correspond à la période entre deux acquisitions de la même scène. Cette résolution ne dépend pas du capteur mais de l'orbite et du mode de manœuvre du satellite (Soudani, 2007). La résolution temporelle est généralement exprimée en jours. Il faut donc quelques jours à un tel satellite pour qu'il puisse observer de nouveau exactement la même scène à partir du même point dans l'espace. La résolution temporelle absolue du système de télédétection est donc égale à cette période. Toutefois, certaines régions de la surface peuvent être observées plus fréquemment puisqu'il y a chevauchement entre les couloirs-couverts adjacents et que ces zones de chevauchement deviennent de plus en plus grandes en s'approchant des pôles. Certains satellites ont aussi la possibilité de pointer leurs capteurs en direction du même point pour différents passages du satellite. La résolution temporelle effective du satellite dépend donc d'une variété de facteurs dont la grandeur de la zone de chevauchement entre les couloirs-couverts adjacents, la capacité du satellite et de ses capteurs et également la latitude (C.C.T, 2012).

La résolution temporelle est variable d'un capteur à l'autre et d'un système satellite à l'autre. Les données météorologiques des radars au sol peuvent être acquises toutes les 5 minutes, les satellites géostationnaires fournissent des données toutes les demi-heures et quelques satellites en orbite polaire fournissent des données aussi rarement que tous les 16 jours (par exemple LandsAT). L'hydrologue, compte tenu des données de télédétection, doit choisir les données qui correspondent aux besoins de son analyse. Dans certains cas des processus dynamiques et de petits bassins, les données journalières sont nécessaires. Dans d'autres cas pour les processus moins dynamiques et grands bassins, les données sur deux semaines ou plus peuvent être satisfaisantes. Un exemple de cela pourrait être la prédiction de ruissellement de la fonte des neiges dans un grand bassin de drainage. Là encore, il y a des études qui n'ont pas un aspect

temporel ou il négligeable comme la délimitation du réseau hydrographique dans un bassin versant ou l'occupent des sols varient lentement.

En raison d'un certain degré de chevauchement des bandes d'imagerie des orbites adjacentes, une imagerie plus fréquente de la même zone est possible. La figure 3.7 illustre le schéma du recouvrement latéral de la bande d'image fauchée dans un satellite orbital polaire.

Les images de la même zone de la Terre à différentes périodes de temps montrent la variation des caractéristiques spectrales au fil du temps. Ces données multi-temporelle est essentielle pour les études suivantes :

- L'utilisation des terres / classification de la couverture terrestre
- La variation temporelle de l'utilisation des terres / couverture du sol
- Suivi d'un événement dynamique comme : les cyclones, les inondations, les volcans et les tremblements de terre.

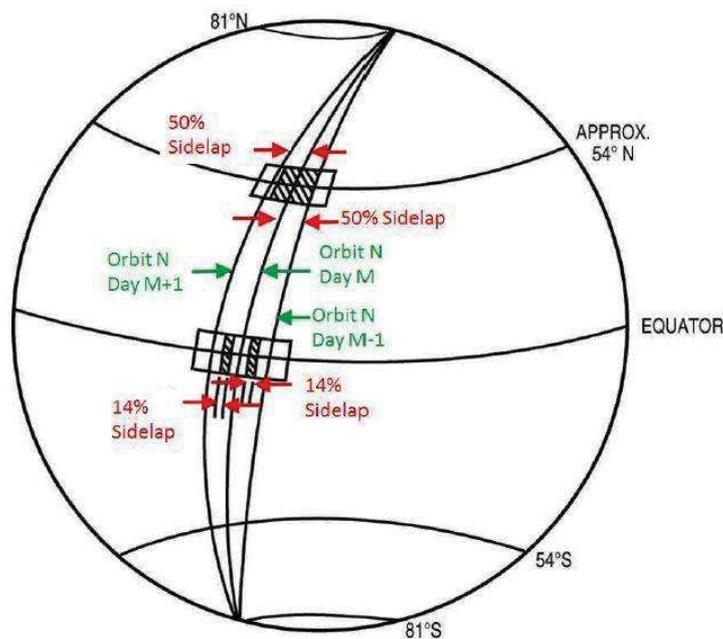


Figure 3.7 : Recouvrement latéral d'un satellite sur orbite polaire (<http://eros.usgs.gov/>)

Les images satellitaires avant et après l'inondation aident à identifier l'étendue géographique du plan d'eau au cours du développement et de la récession d'une inondation. La grande inondation de 1993 ou autrement connue comme la Grande inondation des fleuves Mississippi et Missouri en Aout 1993 le long des fleuves Mississippi et du Missouri et de leurs affluents (figure 3.8).

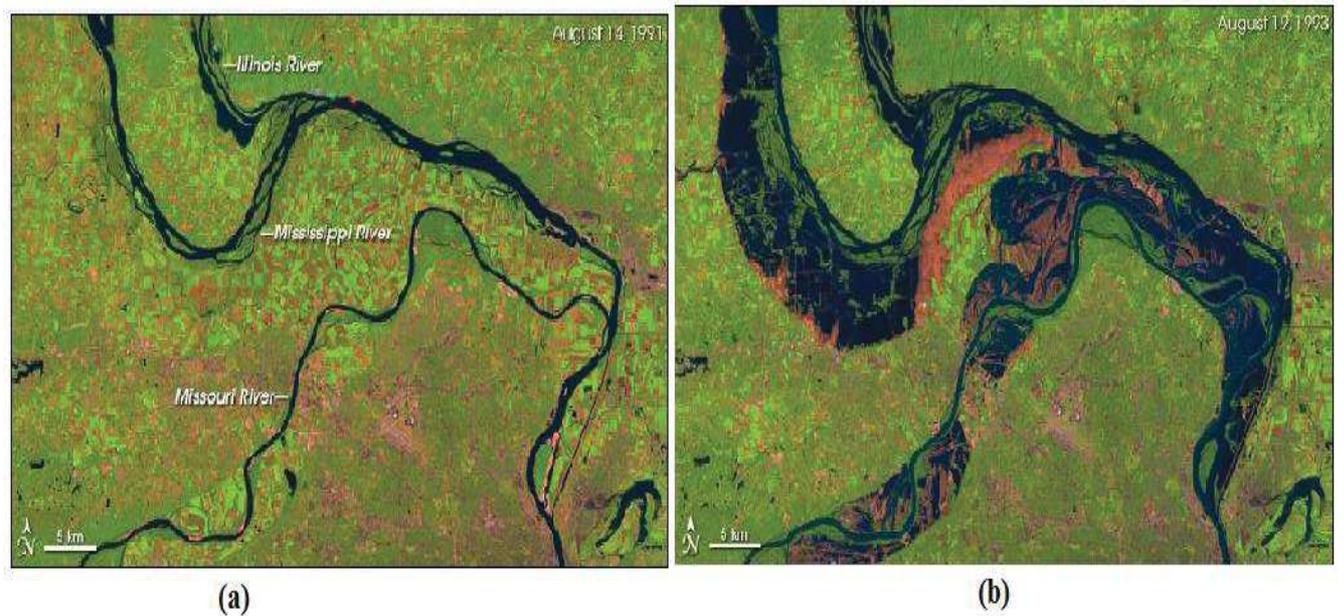


Figure 3.8 : Images de Landsat 5 TM : (a) : cas normal, (b) : durant l'inondation de 1993
(www.earthobservatory.nasa.gov)

III.1.5.3 La résolution radiométrique

Résolution radiométrique d'un capteur est la mesure des niveaux de gris entre le noir pur (sans réflectance) au blanc pur. En d'autres termes, elle représente la sensibilité du capteur à l'amplitude de l'énergie électromagnétique. La résolution radiométrique précise dans quelle mesure les différences de luminosité d'une image peuvent être perçus ; cela est mesuré par le nombre de niveaux de valeur de gris. Le nombre maximal de valeurs est définie par le nombre de bits (chiffres binaires) (Richards, 2006). Une représentation de 8 bits a 256 valeurs de gris (Figure 3.9). Plus la résolution radiométrique d'un capteur est fine plus il est sensible à la détection de petites différences d'énergie réfléchié ou émise, ou en d'autres termes, le système peut mesurer plus le nombre de niveaux de gris. Le tableau 3.1 illustre la résolution radiométrique de quelques satellites.

Tableau 3.1 : la résolution radiométrique et les niveaux de luminosité correspondante

résolution Radiométrique	Nombre de niveaux	Exemple
1 bit	$2^1 - 2$ niveaux	
7 bit	$2^7 - 128$ niveaux	IRS 1A & 1B
8 bit	$2^8 - 256$ niveaux	Landsat TM
11 bit	$2^{11} - 2048$ niveaux	NOAA-AVHRR

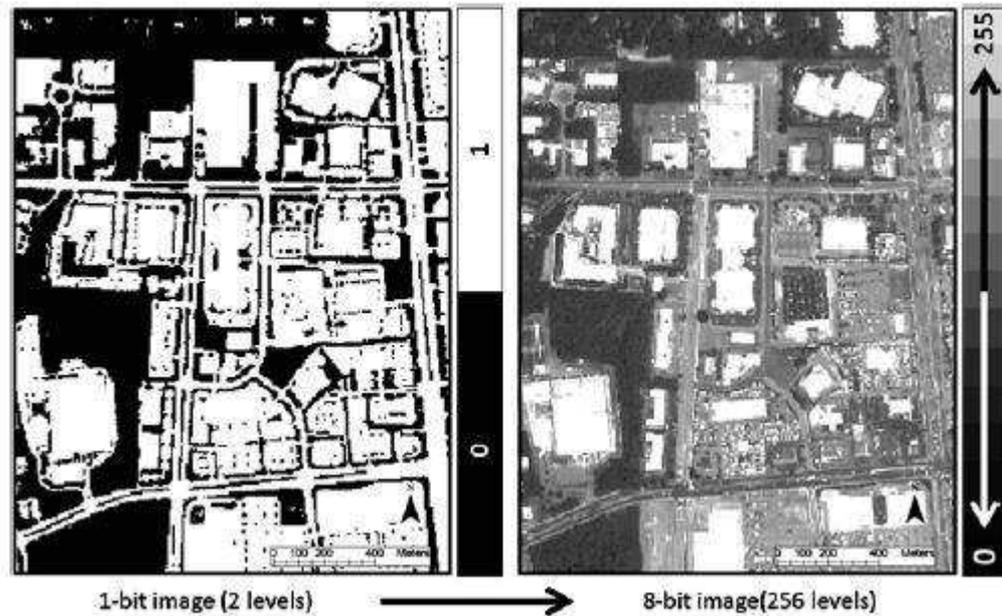


Figure 3.9 : le concept de la résolution radiométrique (Source : Khorram, 2012).

III.1.5.4 La résolution spectrale

La résolution spectrale représente la largeur de bande spectrale du filtre et la sensibilité du détecteur. Elle peut être définie comme la capacité d'un capteur pour définir des intervalles de longueurs d'ondes fines ou la capacité d'un capteur pour distinguer l'énergie reçue dans une largeur de bande spectrale pour caractériser les différentes composantes de la surface de la terre. Plus la résolution spectrale est fine plus la gamme de longueur d'onde pour un canal ou d'une bande particulière est étroite.

Plusieurs systèmes de télédétection sont multispectraux qui enregistrent l'énergie sur les plages de longueurs d'onde distinctes à différentes résolutions spectrales. IRS LISS-III utilise 4 bandes : de 0,52 à 0,59 (vert), de 0,62 à 0,68 (rouge), 0,77 à 0,86 (près IR) et 1,55-1,70 (moyen IR). Les instruments Aqua / Terra MODIS utilisent 36 bandes spectrales, dont trois dans le spectre visible. La technologie récente est celle des capteurs hyper spectraux qui détectent des centaines de bandes spectrales très étroites.

En télédétection, les différentes caractéristiques de la surface terrestre sont identifiées à partir de l'image en comparant leurs réponses sur différentes bandes spectrales distinctes. Les classes vastes, tels que l'eau et la végétation, peuvent être facilement séparées à l'aide des longueurs d'onde très larges comme la visible et la proche infrarouge.

Cependant, pour des classes plus spécifiques à savoir, type de végétation, classification des roches etc., des gammes de longueurs d'onde beaucoup plus fines et de résolution plus fine sont obligatoires (figure 3.10).

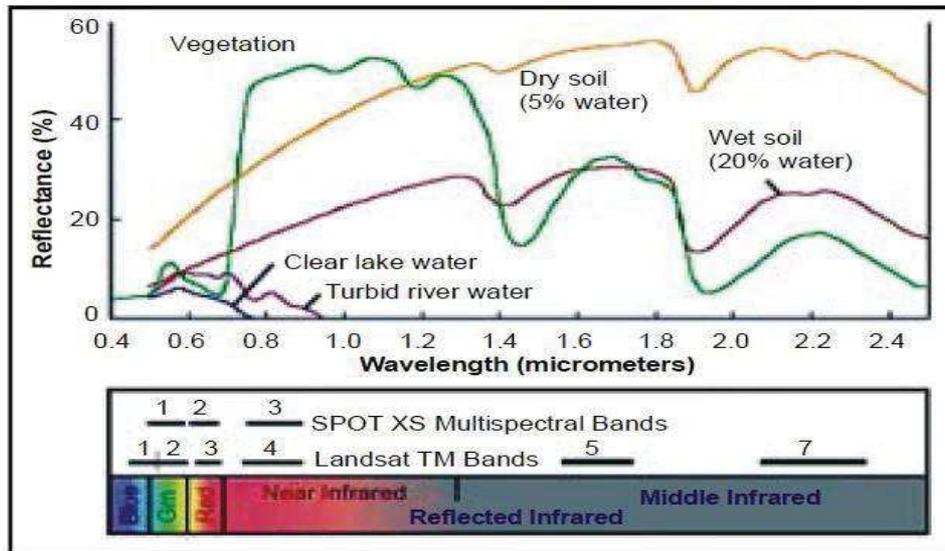


Figure 3.10 : Réflectance spectrale typique pour la végétation, le sol et l'eau (Aggarwal, 2003).

III.1.6 Application de la télédétection en hydrologie

L'hydrologie est une science basée sur des observations et des mesures. L'hydrologie opérationnelle et l'engineering des ressources en eau ont utilisé ces mesures pour la conception et la gestion des systèmes de ressources en eau et la prévision des systèmes hydrologiques. La collection des données hydrologiques pour l'hydrologie opérationnelle est ancienne, elle revient même aux anciennes civilisations comme l'égyptienne et la chinoise. La collection moderne des données hydrologiques a focalisée sur les débits des cours d'eau, les précipitations, les données météorologiques de base qui sont suffisantes pour répondre aux besoins de conception et de prévision des ressources en eau : principalement la conception de l'approvisionnement en eau potable et la protection contre les crues, ce qui nécessite des enregistrements d'une longue période et des mesures précises des précipitations (distribution spatiale et temporelle) (Dubayah, 2000).

La télédétection et l'hydrologie sont deux disciplines très différentes avec des intérêts et des traditions largement différents. Bien que la télédétection a une forte base technologique, visant à développer des capteurs sans contact et le traitement des systèmes pour recueillir des informations fiables sur la terre et d'autres objets physiques, l'hydrologie est science orientée,

beaucoup plus, vers l'étude de l'occurrence de la présence et le comportement de l'eau sur la terre sous les différentes formes (gaz, liquide et solide) (Wagner, 2009).

Avec le lancement réussi de la première technologie des ressources de la terre (ERTS-1 ou Landsat-1) le 23 Juillet 1972, les scientifiques et les ingénieurs ont gagné une nouvelle source précieuse d'observations spatiales pour l'étude des systèmes et les processus hydrologiques. Entravée auparavant par un manque d'information spatiale détaillée, hydrologues ont été soudainement en mesure de faire de meilleures évaluations détaillées des conditions de ressources en eau. Comme la nécessité des données de télédétection à grande échelle est devenue de plus en plus apparente des efforts considérables ont été déployés pour extraire des informations plus détaillées des produits d'imagerie originaux. De plus, les modèles hydrologiques ont été largement révisés ou réinventés pour une utilisation encore plus efficace de cette nouvelle forme d'information. Un tel travail a continué de développer de même que le nombre de satellites a multiplié et leur résolution spatiale, la couverture globale, et la fréquence orbitale ont augmenté. Simultanément avec le développement des ordinateurs et la sophistication de la technologie informatique et des logiciels, il est désormais possible pour les utilisateurs d'évaluer rapidement et quantifier un grand nombre de caractéristiques physiques des bassins versants (Pietroniro, 2002).

III.1.6.1 Les précipitations

Les précipitations sont largement reconnues comme l'élément fondamental du cycle hydrologique (Michaelides, 2009). Les précipitations sont une variable hydrologique et climatique capitale et comprennent à la fois le liquide (pluie) et solide (neige et glace) formes. Elles se produisent quand une particule formée par la condensation de la vapeur d'eau devient assez lourde pour tomber sous la force de gravité. La précipitation est un paramètre indéniablement difficile à évaluer, en premier lieu en raison de sa grande variabilité spatiale et temporelle (Barrett, 2000). Pour les périodes inférieures à un jour, la distribution des précipitations est souvent analysée en termes de mouvements des nuages qui les causent. Pour les périodes de plus d'un jour, il devient de plus en plus difficile, et finalement impossible, de le faire. Jusqu'à environ 3 jours, les systèmes à l'échelle synoptique peuvent fournir un cadre d'analyse, même si cela peut être difficile, car ces systèmes se déplacent souvent et se développent de manière significative au cours de cette période.

Les informations sur la quantité des précipitations sur un bassin est une donnée indispensable à la plupart des systèmes de prévision des crues en temps réel. Puisque l'intensité des

précipitations affecte les débits de pointe, et les variations spatiales et temporelles des précipitations affectent sensiblement les débits des cours d'eau, des efforts considérables ont été consacrés à la mesure des précipitations sur les bassins versants en utilisant les réseaux de pluviomètres. Au cours des dernières années, il y a eu un débat considérable pour savoir si les techniques de mesure basées sur la technologie de la télédétection, en utilisant les systèmes de satellites radar et / ou, peuvent compléter, voire remplacer, les mesures pluviométriques (Collier, 1985). Le même auteur a argumenté que les techniques satellitaires et des radars pour mesurer les précipitations pour la prévision hydrologique étaient complémentaires. Les radars étaient plus appropriés pour les bassins plus petits de 10^4 km^2 , tandis que les satellites étaient mieux pour des bassins beaucoup plus larges. Néanmoins, les données de pluviomètres sont encore nécessaires à la fois pour l'étalonnage et la vérification des techniques de télédétection. Il est important d'incorporer les différentes méthodes de mesure sur le plan opérationnel pour générer un système de mesure qui est plus performant que chaque système séparément.

III.1.6.1.1 Les techniques actuelles pour l'estimation des précipitations

Il existe plusieurs méthodes pour l'estimation des précipitations qui utilisent diverses données de capteurs et chacun a ses propres avantages et inconvénients. Les satellites géostationnaires fournissent une résolution temporelle très élevée, ils transportent des capteurs infrarouges visibles et thermiques. Mais ces capteurs n'ont pas une relation directe avec les précipitations. Les satellites en orbite polaire ont une résolution temporelle très faible, ils portent des capteurs à micro-ondes. Ces capteurs à micro-ondes ont des relations directes avec les précipitations et peuvent précisément les estimer. La technologie récente des satellites pour l'estimation de précipitations est la technique multi-capteur qui combine les avantages des deux types de données, géostationnaire (haute résolution temporelle) et les satellites en orbite polaire (relation directe). Les techniques disponibles pour l'estimation des précipitations sont essentiellement divisés en 3 catégories : les techniques VIS/TIR (Visible/ infrarouge thermique), les techniques de micro-ondes et les techniques mixtes (Upadhyaya, 2013).

Les approches basées sur les images VIS / TIR tentent d'établir une corrélation entre le taux de pluie de surface avec des températures de brillance du sommet des nuages fournies par le satellite. Les canaux visibles et infrarouges thermiques des satellites géostationnaires sont très répandues, dans l'imagerie visible les nuages brillants ont tendance à être épais et plus qu'elles épais plus qu'elles sont susceptibles d'être associés à des précipitations (Delgado, 2007). De même dans l'imagerie infrarouge, les précipitations plus lourdes ont tendance à être associée à des nuages plus grands et plus froids aux sommets (Tessema, 2001). Les techniques les plus

couramment utilisées sont : Indice des précipitations global (GPI : Global Precipitation Index) (Huffman, 1997), la technique convective-stratiformes (CST : Convective-Stratiform technique) (Bendix, 2010), la technique Griffith-Woodley (Negri, 1983) etc.

Les techniques de micro-ondes passives pour l'estimation des précipitations ont considérablement progressé au cours de la dernière décennie en raison d'études d'observation courantes et la compréhension du transfert de rayonnement micro-ondes à travers les nuages et hydrométéores (Kummerow, 1993). Les méthodes basées les micro-ondes passives suivent une propriété simple c'est-à-dire les émissions a basses fréquences des gouttes d'eau conduisent à l'augmentation des radiations des micro-ondes, mais des fréquences plus élevées provoquées par dispersion de la précipitation conduisent à une diminution des radiations des micro-ondes.

Les techniques micro-ondes actives représentent la méthode la plus directe pour l'estimation des précipitations. Cependant, l'utilisation des micro-ondes actives pour l'estimation des précipitations a été très limitée avec seulement le TRMM-PR (Tropical Rainfall Measuring Mission-Precipitation Radar) étant spécifiquement conçu pour récupérer des caractéristiques des précipitations.

III.1.6.2 L'occupation des sols

La couverture de la surface terrestre a changé depuis des temps immémoriaux, elle est susceptible de continuer à évoluer dans le futur (Ramankutty, 1998). Ces changements se produisent sur une gamme d'échelles spatiales, du local au global et à des fréquences temporelles des jours à des siècles. Les deux forces naturelles et humaines sont responsables du changement. Les forces naturelles telles que la dérive des continents, les glaciations, les inondations et les tsunamis et les forces humaines telles que la conversion de la forêt à l'agriculture, l'étalement urbain et les plantations forestières ont changé la dynamique des types d'utilisation des terres dans le monde entier (Giri, 2012). Au cours des dernières décennies, les facteurs humains ont progressé beaucoup plus rapidement que les facteurs naturels. Ce taux de changement inhabituel est devenu une préoccupation environnementale majeure dans le monde entier. Deux forces principales sont responsables des changements humaines, le développement technologique et le taux de population élevé (Lambin, 2011).

Comprendre la distribution et la dynamique de la couverture terrestre est essentielle pour une meilleure compréhension des caractéristiques et des processus fondamentaux de la terre, y compris la productivité agricole, la diversité des espèces végétales et animales, et le cycle

hydrologique. Le couvert végétal est l'occupation des sols influencent les processus hydrologiques de plusieurs façons (Hubert, 1995).

Malgré ses limites, la télédétection a joué un rôle important dans le processus d'acquisition de données d'occupation des sols pendant nombreuses années. Dans les années 1940, les photos aériennes noires et blanches ont été utilisées à cette fin. Depuis lors, de nouveaux films, comme Ektachrome-infrarouge, et de nouvelles plates-formes, comme le U-2 et Landsat, ont enrichi énormément moyens d'acquisition de ces données. Particulièrement sur des zones vastes, les techniques de télédétection sont maintenant devenues l'outil le plus efficace pour l'acquisition des données d'utilisation des terres et couverture du sol (Lindgren, 1985).

III.1.6.2.1 Classification

Historiquement, les données d'occupation des sols n'étaient pas rassemblées d'une manière uniforme. Aux états unis, les divers organismes qui possèdent les données ont tendance à travailler indépendamment les uns des autres. Le résultat été une série de méthodes de collection et de systèmes de classification ayant si peu en commun et les données ne peuvent pas être unifiés ou regroupés. Pour améliorer cette situation, l'U.S.G.S a développé un système normalisé pour la classification des données d'occupation des sols obtenues au moyen de techniques de télédétection (Anderson, 1976). La classification de l'USGS, connue aussi classification de Anderson, est composé de quatre niveaux. Niveaux I et II du système (tableau 3.2) peuvent être utilisés par les planificateurs étatiques. Les données de niveau I seront acquises par Landsat en utilisant soit l'interprétation des images ou des procédures de traitement numérique.

Tableau 3.2 : Classification de l'occupation des sols

Niveau I	Niveau II
1 : Zone urbaine ou composée	1.1 Résidentiel
	1.2 Service et commercial
	1.3 Industriel
	1.4 Transports, communications et services publics
	1.5 Complexe industriel et commercial
	1.6 : Zone urbaine ou composée
	1.7 Autre zone urbaine
2 : Terre agricole	2.1 Terres cultivées et pâturage
	2.2 Vergers, Bosquets, Vignobles, etc.
	2.3 Opérations d'alimentation enfermées
	2.4 Autres terres agricoles
3 : Grands pâturages	3.1 Terres de pâturage herbacées

	3.2 Pâturage d'arbuste
	3.3 Terres de pâturage mixtes
4 : Terre forestière	4.1 Forêt à feuilles caduques
	4.2 Forêt à feuilles persistantes
	4.3 Forêt mixte
5 : Eau	5.1 Cours d'eau et canaux
	5.2 Lacs
	5.3 Réservoirs
	5.4 Baies et Estuaires
6 : Zones humides	6.1 Zone humide forestière
	6.2 Zone humide non forestière
7 : Terres Nues	7.1 Terrain plat des sels secs
	7.2 Plages
	7.3 Autres Zones sableuses hors plages
	7.4 Roches à l'affleurement
	7.5 Mines à ciel ouvert et Carrières
	7.6 Zones de transition
	7.7 Terres Nues mixtes
8 : Toundra	8.1 Toundra d'arbuste
	8.2 Toundra herbacée
	8.3 Toundra terre nue
	8.4 Toundra humide
	8.5 Toundra mixte
9 : Neiges et glaces permanentes	9.1 Terrain de neige permanent
	9.2 Glaciers

III.1.6.2.2 Les indices de végétation

En l'hydrologie, Le rôle de la végétation du bassin versant dans le cycle hydrologique et son impact sur le ruissellement est un sujet de recherche capital. Au cours du dernier siècle, les études des bassins versants ont généralement fourni des notions de base pour l'évaluation des relations entre la végétation du bassin versant, l'évapotranspiration et le ruissellement. Les différentes idées obtenues de ces études ont contribué de façon significative à enrichir les connaissances de base de l'hydrologie moderne (Peel, 2009). La relation entre les mesures de télédétection et les paramètres de végétation est mentionnée en termes des indices de végétation. En télédétection, les indices font parties des méthodes de traitement appelées les transformations multispectrales. Ils consistent à convertir les luminances mesurées au niveau du capteur satellitaire en grandeurs ayant une signification dans le domaine de l'environnement. Les indices permettent de décrire l'état d'un phénomène. Un indice de végétation par exemple, peut rendre compte du stade de croissance végétale à un moment donné. Tous les indices, que

ce soient les indices de végétation, les indices des sols ou les indices relatifs à la colonne d'eau reposent sur une approche empirique basée sur des données expérimentales. Les indices de végétation sont très utilisés pour identifier et suivre la dynamique de la végétation sur les bassins versants ce qui permet une meilleure compréhension sur les différents processus hydrologiques. Depuis quarante ans, De très nombreux indices de végétation ont été construits et utilisés, Ils prennent la forme soit d'expressions très basiques (simple différence ou simple ratio), soit de formules beaucoup plus complexes. Le tableau 3.3 illustre quelques indices tels que : **SR** (Simple Ratio), **NDVI** (Nomralized Difference Vegetation Indice) connu aussi l'indice de Tucker, **EVI** (Enhanced Vegetation Index), **GARI** (Green Atmospherically Resistant Vegetation Index), **WDRVI** (Wide-Dynamic Range Vegetation Index) etc. le tableau illustre les indices de végétation les plus utilisés. Bannari (1995), a récapitulé presque tous les indices de végétation les plus en utilisés, il compte 35 indices de végétation.

Tableau 3.3 : Quelques indices de végétation (Viña, 2011)

Indexe	Abréviation et Formule	Auteurs
Simple Ratio	$SR = \frac{\rho_{NIR}}{\rho_{RED}}$	Jordan, 1969
Nomralized Difference Vegetation Indice	$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{Red}}{\rho_{NIR} + \rho_{Red}}$	Rouse, 1974
Enhanced Vegetation Index	$EVI = 2.5 \frac{\rho_{NIR} - [\rho_{Green} - \gamma(\rho_{Blue} - \rho_{Red})]}{\rho_{NIR} + [\rho_{Green} - \gamma(\rho_{Blue} - \rho_{Red})]}$	Huete, 1999
Green Atmospherically Resistant Vegetation Index	$GARI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{Red}}{1 + \rho_{NIR} + 6\rho_{Red} - 7.56\rho_{Blue}}$	Gitelson, 2004
Wide-Dynamic Range Vegetation Index	$WDRVI = \frac{\alpha \cdot \rho_{NIR} - \rho_{Red}}{\alpha \cdot \rho_{NIR} + \rho_{Red}}$	Gitelson, 2004

III.1.6.2.3 Classifications thématiques des images de télédétection

L'un des principaux objectifs de la télédétection est d'interpréter les données observées et classer les éléments. En plus de l'approche d'interprétation d'images, l'analyse quantitative qui utilise l'ordinateur pour identifier chaque pixel à certaines classes spectrales (appelé de classification), est couramment utilisé. Pour obtenir des informations thématiques à partir d'images multispectrales, les mesures obtenues des images de télédétection doivent être transformées en objets discrets, qui se distinguent les uns des autres par une classification thématique discrète. L'objectif global de procédures de classification d'image est de classer automatiquement tous les pixels d'une image dans des classes de couverture terrestre ou thèmes (Lillesand, 2004). Il existe deux procédures de classification : classification supervisée et classification non supervisée (Richards, 2006).

III.1.6.2.3.1 La classification non supervisée

La classification non supervisée est un moyen par lequel les pixels d'une image sont affectés à des classes spectrales sans que l'utilisateur ayant une connaissance anticipée de l'existence ou les noms de ces classes. Elle est effectuée le plus souvent en utilisant des méthodes de regroupement (clustering). Ces procédures peuvent être utilisées pour déterminer le nombre et l'emplacement des classes spectrales dans lesquelles les données sont dissimulées et pour déterminer la classe spectrale de chaque pixel. Ensuite L'analyste identifie ces classes en associant un échantillon de pixels dans chaque classe avec des données de référence disponibles, qui pourraient inclure des cartes et des informations obtenues des visites de terrain. La classification non supervisée est où les résultats (groupements de pixels ayant des caractéristiques communes) sont basées sur l'analyse des images avec un logiciel sans que l'utilisateur offre des classes d'échantillons. L'ordinateur utilise des techniques pour déterminer les pixels similaires et les regroupe en classes. : L'utilisateur peut spécifier au logiciel le nombre désiré de classes en sortie, mais ne participe pas dans le processus de classification.

III.1.6.2.3.1 La classification supervisée

La classification supervisée est basée sur l'idée que l'utilisateur peut sélectionner des pixels échantillon dans une image qui sont représentatifs des classes spécifiques, puis diriger le logiciel de traitement d'image à utiliser ces sites de référence comme pour la classification de tous les autres pixels de l'image. Les sites de référence (aussi appelés séries de tests ou des classes d'entrée) sont choisis en fonction de la connaissance de l'utilisateur.

L'utilisateur désigne également le nombre de classes de l'image. De nombreux analystes utilisent une combinaison de processus de classification supervisées et non supervisée pour développer l'analyse des résultats finals et obtenir de cartes plus détaillées. Il existe plusieurs logiciels pour le traitement des images satellitaires, les plus couramment utilisés sont mentionnés dans le tableau 3.4.

Tableau 3.4 : Quelques logiciels de traitement d'images satellitaires

Nom du logiciel	Développeurs	Année
ERDAS Imagine	Hexagon Geospatial	1978
ENV I	Exelis	1977
QGIS	QGIS Development Team	2002
GRASS	GRASS Development Team	1984
ILWIS	ITC	1984
ArcGIS	ESRI	1999

III.1.6.3 Les eaux de surfaces

La croissance rapide de la population à travers le monde augmente la demande sur l'eau de surface pour l'irrigation, l'industrie et l'approvisionnement en eau potable et diminue la qualité des eaux de surface disponibles (Schulz, 1989). L'eau de surface peut se produire sous forme liquide comme les lacs, et les rivières et la forme solide sous forme de neige, glacier, les rivières et le lac de glace. La télédétection joue un rôle majeur dans l'estimation de l'étendue et de la composition des eaux de surface sous les deux formes.

III.1.6.3.1 La détection des eaux de surface

La localisation et la délimitation des eaux de surface est plus facile à faire à l'aide de données de télédétection dans les longueurs d'onde proche infrarouge et visible (Swain et Davis, 1978). Puisque l'eau absorbe plus d'énergie dans les longueurs d'onde à court et moyen infrarouge ($> 0,8 \mu\text{m}$) il y a peu d'énergie disponible pour la réflexion à ces longueurs d'onde. D'autre part, la végétation et le sol, ont une réflectance plus faible dans les bandes visibles ($0,4 - 0,8 \mu\text{m}$) et une réflectance plus élevée à la longueur d'onde proche et moyen infrarouge (figure 3.11). Ainsi, sur les images du scanner multispectrales dans la partie infrarouge réfléchissante du spectre, les masses d'eau apparaissent sombres et se distinguent en contraste pur (Swain et Davis, 1978).

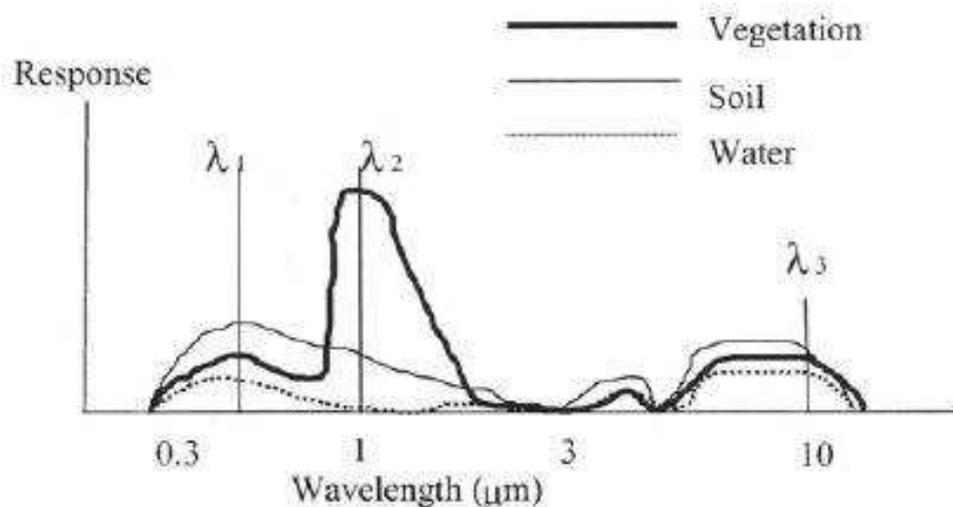


Figure 3.11 : Réflectances et longueurs d'onde pour le sol, la végétation et l'eau (Swain, 1978).

L'eau a une faible réflectivité dans les bandes d'ondes entre $0,7$ et $3,0 \mu\text{m}$ (Engman, 1991). Cette région du spectre s'aligne mieux avec Band 7 ($0,8-1,1 \mu\text{m}$) sur le capteur Landsat MSS, Band 4 du capteur Landsat TM ($0,76$ à $0,90 \mu\text{m}$), Band 3 du capteur SPOT-HRV (de $0,79$ à $0,89 \mu\text{m}$) et Band 2 ($0,72$ à $1,1 \mu\text{m}$) de la série NOAA A VHRR. Tous ces capteurs ont

montré une grande efficacité à ces longueurs d'onde pour cartographier les régions d'eau de surface. Weisnet. (1979) a noté que les réserves d'eau de surface sont facilement détectés à ces longueurs d'onde, il a indiqué à certains des premiers travaux de délimitation des zones inondations en utilisant le canal infrarouge proche à la fois du satellite ERTS-1 (Landsat MSS) (Rango, 1974) et le canal VHRR-IR des satellites NOAA.

III.2 Les systèmes d'information géographiques

III.2.1 Contexte historique

La première application documentée de ce qui pourrait être nommé comme système d'information géographique était en France en 1832 par le géographe Charles Piquet qui a créé une représentation cartographique de l'épidémiologie du Cholera à Paris en représentant les 48 districts de la ville avec des différents gradients de couleurs. Mais l'apparition réelle de la notion moderne du SIG était en 1968 par le géographe anglais Tomlinson. En 1977, l'USGS (United States Geological Survey) a produit des cartes d'occupation des sols contenant aussi des données associées telles que le découpage administratif des états unis (Mitchell. 1977). Ces cartes ont été digitalisées et intégrées dans une base de données numérique tout en produisant des informations sous forme graphique et digitale. Pour réaliser ces tâches, le système d'extraction et d'analyse de l'information géographique GIRAS (Geographic Information Retrieval and Analysis System) a été conçu et développé. GIRAS a été conçu pour accepter les entrées digitales, produire des résultats cartographiques et statistiques, permettre l'extraction et l'analyse des données et effectuer toutes les tâches de gestion des bases de données.

À la fin des années 1970, les deux SIG MOSS et GRASS GIS étaient en cours de développement. Au début des années 1980, M&S Computing (maintenant Intergraph), ainsi que Bentley Systems Incorporated, l'Institut de recherche sur les systèmes environnementaux (ESRI), CARIS (Computer Aided Resource Information System), MapInfo Corporation et ERDAS En tant que fournisseurs commerciaux de logiciels SIG, ont intégré avec succès plusieurs fonctionnalités du SIG, en combinant l'approche de première génération à la séparation d'informations spatiales et les données attributaires avec une approche de deuxième génération pour l'organisation des données attributaire dans des base de données. En 1986, MIDAS (Mapping Display and Analysis System), le premier produit de SIG de bureau a été réalisé pour le système d'exploitation MSDOS. En 1990, il a été renommé MapInfo pour le système d'exploitation Windows.

III.2.2 Notions fondamentales d'un SIG

III.2.2.1 Définition

SIG est une technologie assistée par ordinateur à usage général pour la gestion des données géographiques sous forme numérique. Il est conçu pour capturer, stocker, manipuler, analyser et afficher divers ensembles de données spatiales. Un SIG contient à la fois des données géométriques (coordonnées et informations topologiques) et des données attributaires (des informations décrivant les propriétés des objets géométriques tels que des points, des lignes et des zones). Le concept et la technologie du système d'information géographique sont largement utilisés dans la planification et la conception de l'ingénierie des ressources en eau et modifient la façon dont ces activités sont menées. De nos jours, les ressources naturelles sont de plus en plus rares et les effets de l'activité humaine sont omniprésents. Dans cette situation, les meilleurs outils disponibles doivent être utilisés pour caractériser l'environnement, prédire les impacts, élaborer des plans gérer les situations de crises et offrir des solutions. Les technologies, les outils et les procédures SIG apportent des avantages considérables aux planificateurs. Goodchild (1993) affirme que la technologie SIG a la capacité d'exécuter une variété de tâches dont certaines sont : (1) prétraitement des données brutes acquises, souvent, par télédétection en une forme appropriée pour l'analyse, (2) la modélisation et l'analyse et (3) le traitement et la mise en forme des résultats sous forme de rapports, tableaux et cartes.

Ces dernières années, l'application des SIG en hydrologie et les ressources en eau est devenue une nécessité. Les modèles hydrologiques distribués ont de grandes exigences en matière de données. L'intégration de l'hydrologie et SIG est donc tout à fait logique. Cette intégration doit comprendre trois composantes principales : la construction de données spatiales, l'intégration des couches spatiales de modèles, et la conception de l'interface du modèle sous SIG. Les SIG peuvent aider à la conception, l'étalonnage, la modification et la comparaison des modèles. Cette intégration est répandue dans le monde entier.

III.2.2.2 Les capacités fonctionnelles d'un SIG

Un SIG est défini par ce qu'il peut faire. Cette définition fonctionnelle est très révélatrice de l'utilisation des SIG, car elle indique l'ensemble des capacités qu'un SIG devrait avoir. En 1990, Maguire a conçu un schéma comme une classification hiérarchique des principaux types de fonctions qui caractérisent le SIG. Dans le schéma proposé, dix catégories majeures sont

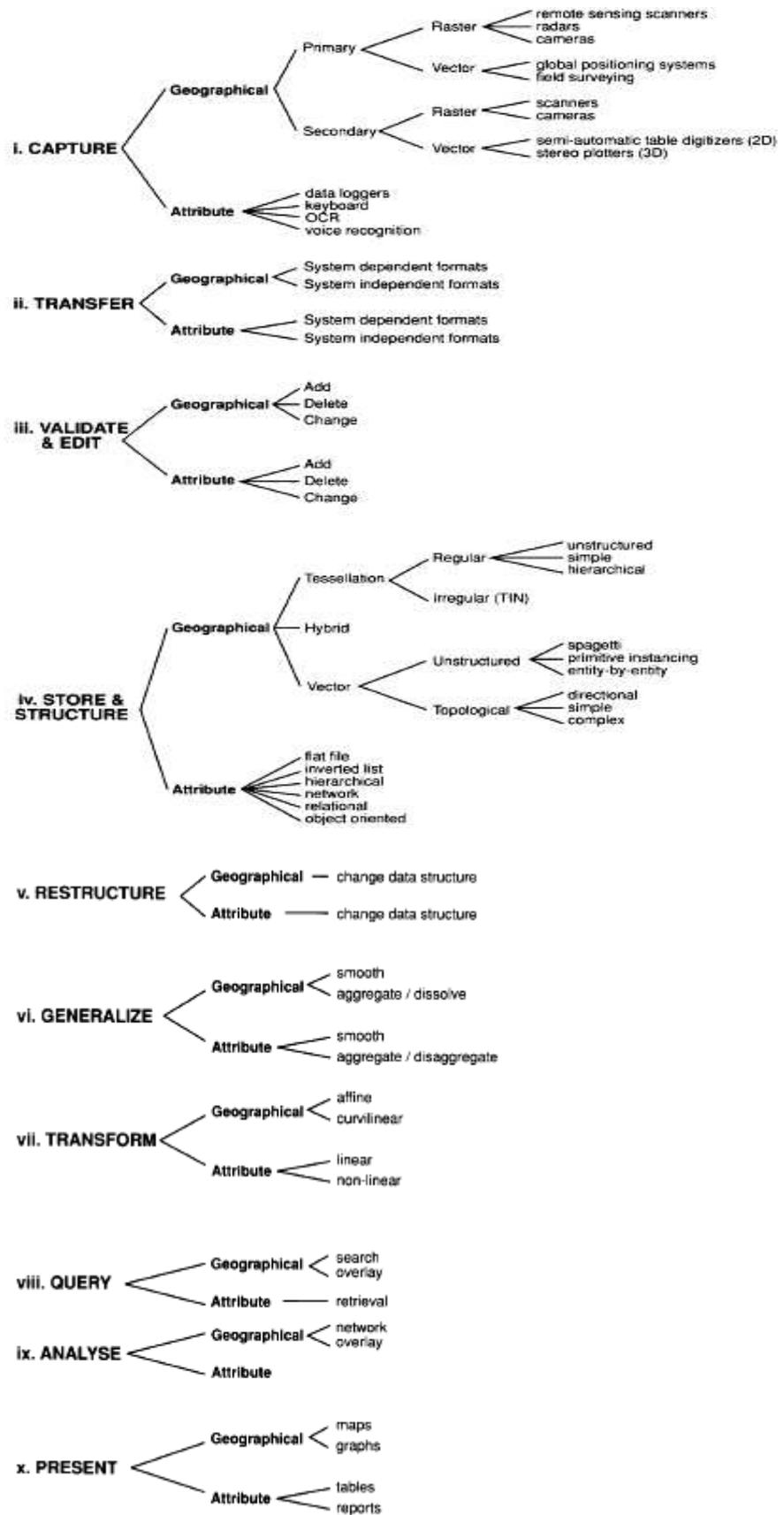


Figure 3.12 : Les composantes fonctionnelles du SIG

identifiées (Figure 3.12). Ces fonctions critiques doivent toujours être présentes pour qu'un logiciel puisse être qualifié comme SIG. La particularité qui distingue les SIG des logiciels de cartographie assistés par ordinateurs (DAO) est le lien construit entre la carte et la base de données associée.

III.2.2.3 Les types de données

III.2.2.3.1 Vecteur : Dans un SIG, les caractéristiques géographiques sont souvent exprimées en vecteurs, en considérant ces caractéristiques comme des formes géométriques (figure 3.13 a) Les entités géographiques sont représentées comme une série de coordonnées x , y ou x , y , z . Les structures de données spatiales vectorielles sont conçues pour représenter la géométrie de l'objet aussi précisément que possible. Les objets vectoriels peuvent avoir plusieurs données attributs, habituellement associés à une table d'attributs. Différentes caractéristiques géographiques sont exprimées par différents types de géométrie comme :

- Le point (0 dimension) : ils sont utilisés pour les entités géographiques qui peuvent être mieux exprimées par une référence ponctuelle, c'est-à-dire par simple localisation comme les puits, les sommets. Les points transmettent le minimum d'informations. Les points peuvent également être utilisés pour représenter des zones lorsqu'ils sont affichés à une petite échelle comme les villes sur une carte du monde. Aucune mesure n'est possible avec les caractéristiques ponctuelles.
- La polyligne (1 dimension) : Les lignes ou polygones unidimensionnelles sont utilisées pour des traits linéaires tels que les rivières, les routes, les chemins de fer. Les caractéristiques de ligne peuvent mesurer la distance.
- le polygone (2 dimensions) : Les polygones bidimensionnels sont utilisés pour les entités géographiques qui couvrent une zone particulière de la surface de la terre comme les lacs, les bâtiments et les villes. Parmi toutes les géométries précédentes, Les polygones offrent la plus grande quantité d'informations. La géométrie du polygone offre la possibilité de mesurer le périmètre et la surface.

III.2.2.3.2 Raster (données matricielles ou tessellation) : Un type de données raster est tout type d'image numérique représentée par des unités spatiales polygonales en une matrice (appelé aussi maillage, treillis ou rang). La plupart des données sont construites autour de cellules carrées ou rectangulaires, mais d'autres formes, telles que des formes triangulaires et hexagonales, sont également possibles (Figure 3.13 b). Le type de données raster se compose de lignes et de colonnes de cellules (ou Pixel), chaque cellule stockant une seule valeur. La

relation entre la taille et le nombre de cellules est exprimée comme la résolution du raster. Une résolution plus fine donne une image plus précise et de meilleure qualité.

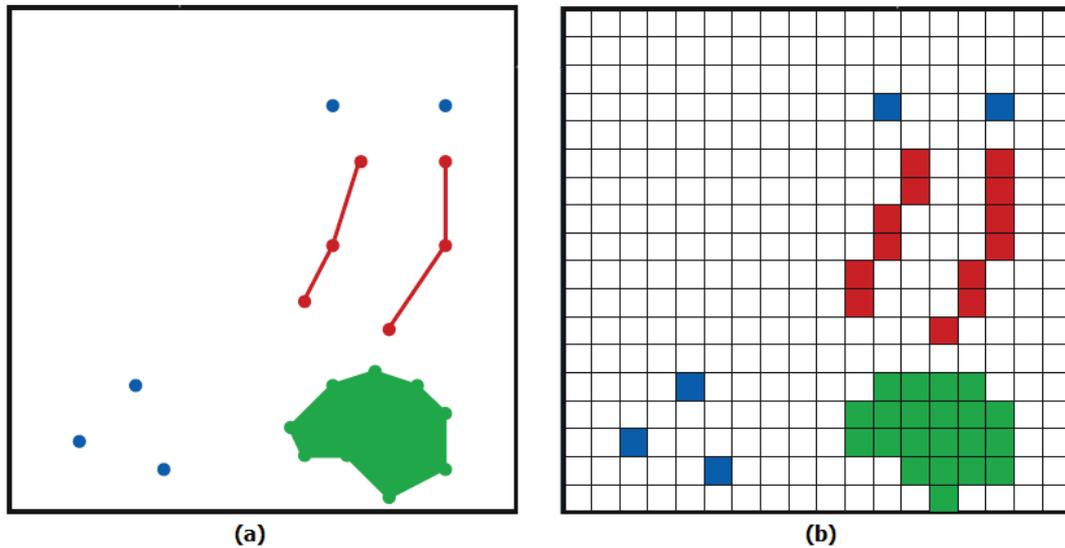


Figure 3.13 : les différents types de données : (a) Vecteur, (b) Raster. (Heywood, 2006).

Quel que soit le type de présentation de données, raster ou vecteur, chacun présente des avantages et des inconvénients (Fazal, 2008). Le tableau 3.5 illustre les avantages et les inconvénients de chaque type.

Tableau 3.5 : Comparaison entre les types de données

Raster	Vecteur
<p style="text-align: center;"><u>Avantages</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Structure de données simple. • Recouvrement simple et efficace. • Compatible avec les images de télédétection. • Une grande variabilité spatiale est efficacement représentée. • Mêmes cellules de grille pour plusieurs attributs. 	<p style="text-align: center;"><u>Avantages</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Structure de données compact. • Efficace pour l'analyse réseau. • Transformation de projection efficace. • Affichage précis de la carte
<p style="text-align: center;"><u>Inconvénients</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Utilisation inefficace du stockage informatique. • Erreurs de périmètre et de forme. 	<p style="text-align: center;"><u>Inconvénients</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Structure de données complexes. • Opérations de superposition difficiles.

<ul style="list-style-type: none"> • Difficulté d'analyse de réseau. • Perte d'information lors de l'utilisation de grandes cellules. 	<ul style="list-style-type: none"> • Une grande variabilité spatiale est représentée de manière ineffective. • Incompatible avec les images de télédétection.
---	---

III.2.4 Les bases de données

Il est devenu habituel de considérer les bases de données SIG comme une série de couches cartographiques géoréférencées et enregistrées dans une projection commune. La plupart des SIG organisent des données par couches, chacune contenant un thème d'information cartographique lié logiquement par son emplacement (Figure 3.14). Chacune de ces cartes thématiques distinctes est appelée couche, couverture ou niveau. Et chaque couche est précisément superposée sur les autres afin que chaque emplacement soit adapté à ses emplacements correspondants sur toutes les autres cartes. L'objectif d'un schéma multicouche est de fournir une base de données entièrement intégrée pour supporter les fonctions techniques décisionnelles à tous les niveaux de la gestion. Par exemple, une proposition de projet de construction pourrait être facilement vérifiée par rapport à la carte de plan d'inondation pour identifier le niveau de risque.

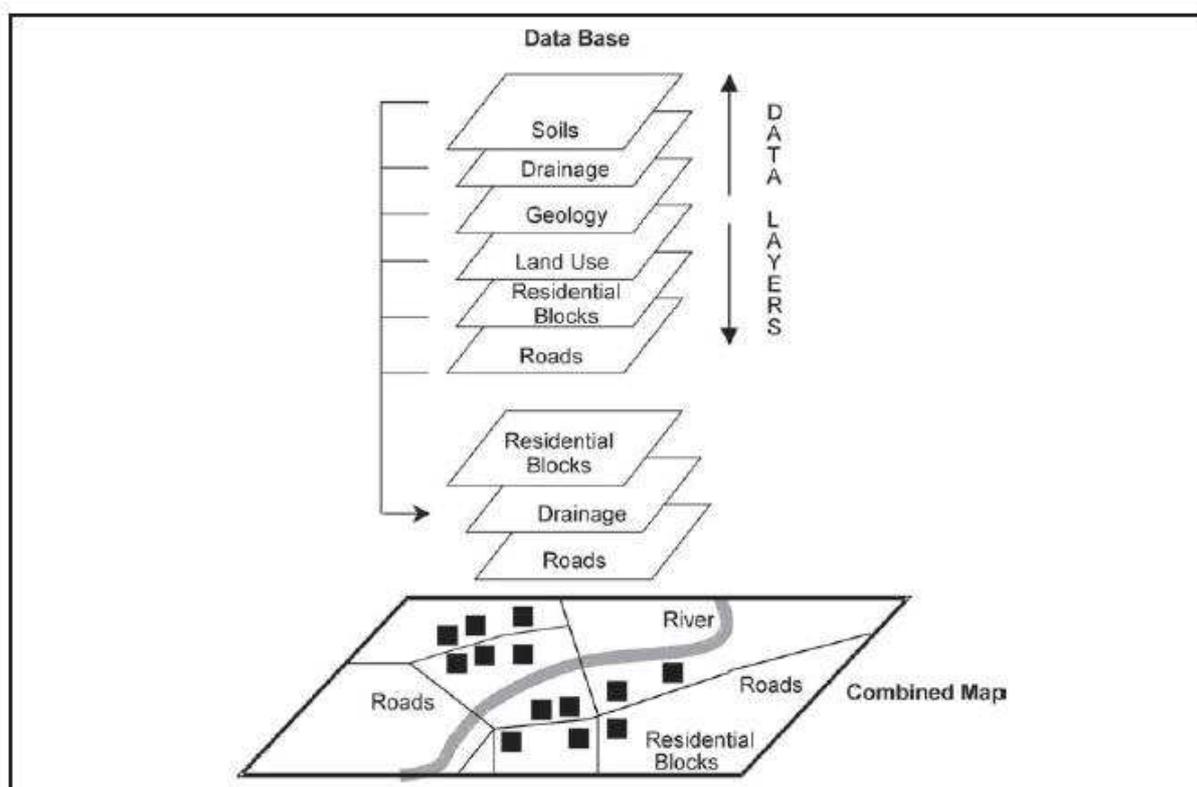


Figure 3.14 : Les couches d'une base de données avec de plusieurs thèmes (Fazal, 2008).

L'entrée ou la saisie de données provient de diverses sources. Les données peuvent être converties à partir des plans papier existants d'enregistrements, ainsi que de données contentant dans des bases de données. Ces conversions peuvent impliquer la digitalisation et la numérisation des images.

Les bases de données SIG incluent deux branches distinctes, la base de données spatiale et les données attributaires associées. De nombreux logiciels SIG conservent cette distinction. Les données spatiales sont caractérisées par, soit une structure "vectorielle" composée de traits représentés par des points, des lignes et des polygones, soit sous forme d'image ou "Raster". Les données attributaires sont traitées dans un logiciel de base de données relationnelle composé des champs d'enregistrements, et la puissance du modèle relationnel est appliquée à ces données. Ces données de caractéristique sont étiquetées dans la base de données spatiale.

Puisque tout dépend de la base de données, elle doit être développée au début, ou au moins des parties majeures doivent être développées pour que les analyses et les affichages désirés puissent être accomplis. Pour cela, l'approche de la construction d'un SIG devrait commencer par la conception et le développement de la base de données.

III.2.5 Les fonctions d'une carte

Tout au long de l'histoire, Les cartes ont été utilisées pour décrire la surface de la Terre, l'emplacement des agglomérations et les relations entre les différents objets. Traditionnellement, les cartes étaient exclusivement des documents dessinés à la main. La pratique de la cartographie était parallèle à l'exploration du monde à mesure que les navigateurs établissaient des schémas de référence de localisation, des classifications de caractéristiques, l'étiquetage et d'autres annotations. Plusieurs des symboles développés sont conservés dans la cartographie moderne, telles que les lignes bleues pour les cours d'eau, les symboles à double ligne pour les routes et les courbes de niveau pour la topographie.

Une carte peut accomplir beaucoup de choses. La lecture d'une carte permet d'observer les formes et la position, certaines informations attributaires et les relations spatiales entre les différentes entités (Johnson, 2009). Certaines choses que les cartes accomplir comprennent :

- Représenter la relation entre les entités en tant que connexion, adjacente, contenue à l'intérieur, en intersection, à proximité, ou supérieur / inférieur.
- Afficher plusieurs attributs d'une zone.

- Permettre la représentation et le discernement entre les distributions, les relations et les tendances.
- Afficher les classifications des caractéristiques attributaires des et des représentations graphiques sous forme de cartes thématiques.
- Codage visuel des attributs en tant que texte, valeurs ou identificateurs.
- Détecter les changements au fil du temps en utilisant des cartes préparées à des moments différents.
- Intégrer des données provenant de diverses sources dans une référence géographique commune.

Le tableau 3.6 illustre les fameux logiciels SIG disponibles.

Tableau 3.6 : les plus importants logiciels SIG

Logiciel	Développeur	Année
ArcGIS	ESRI	1999
MapInfo	Pitney Bowes Software	1986
QGIS	OSGeo	2002
GRASS GIS	GRASS Development Team	1983

III.2.6 Conclusion

Le bassin versant est milieu naturel très compliqué qui dont les composantes sont de différentes nature. Pour une simulation hydrologique crédible, ces composantes doivent être déterminées avec précision. La caractérisation des composantes du bassin versant nécessite deux tâches primordiales : l'obtention de l'information et son traitement. L'outil le plus récent pour obtenir l'information est la télédétection, notamment les images satellitaires. Alors que le SIG offre une plate-forme très puissante pour traiter les données de télédétection et les rendre utile pour la modélisation hydrologique.

Partie II :

*Etude du risque d'inondation en milieu
urbain : application pour la ville de
Sigus*

Chapitre IV

*Caractéristiques morphométriques du bassin
versant*

IV.1 Introduction

L'étude de la morphométrie d'un bassin versant est une évaluation quantitative qui implique des paramètres numériques dont les valeurs sont dérivées à partir d'un MNT. L'analyse morphométriques est basée sur la géométrie du bassin versant et trois catégories de composantes majeurs, le réseau hydrographique, la forme du bassin versant et les caractéristiques du relief (Talampas, 2015). Les paramètres morphométriques tels que la densité de drainage et les caractéristiques du relief sont des mesures pratiques pour estimer le potentiel des inondations (Patton ,1976).

IV.2 Présentation de la zone d'étude

IV.2.1 Situation géographique

La ville de Sigus se situe à 56 Km du chef-lieu de la wilaya d'Oum El Bouaghi, à l'est de l'Algérie (figure 4.1), de 36 Km de la wilaya de Constantine, 23 Km de la commune de Ain M'Lila et 12 Km du la commune de el khroub. Sa spécificité réside dans sa situation géographique entre deux montagnes à l'aval d'un réseau hydrographique dense. La ville est traversée, au centre, par le cours d'eau principal de ce réseau.

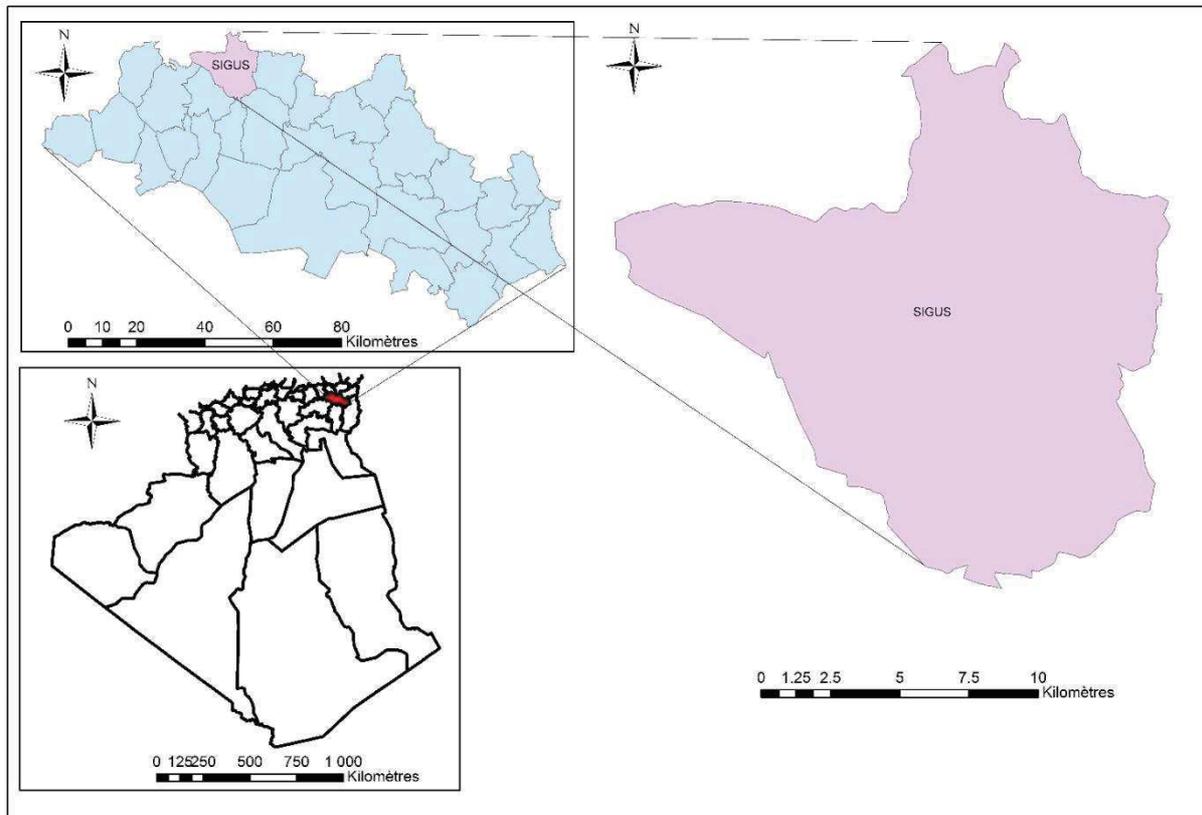


Figure 4.1 : Situation géographique de la ville de Sigus

IV.2.2 Climatologie

L'étude de la climatologie est très importante car la connaissance de la pluviométrie, les températures, le vent, les jours de sirocco (vent très chaud et très sec, chargé de poussières) et de gel, nous permet de mieux comprendre le phénomène hydrologique.

IV.2.2.1 Le climat

La région de Sigus, vu sa situation géographique, est d'un climat continental semi-aride, c'est-à-dire chaud et sec en été, froid et pluvieux en hiver avec des courtes périodes d'automne et de printemps, avec :

- Une irrégularité annuelle en pluie (pluie torrentielle).
- Fréquence de gel en hiver 8 heures / jour.
- Forte aridité pendant la période chaude (période estivale).

IV.2.2.2 La température

Les températures maximales ont pour origine le sirocco, qui vient du Sahara, qui est un vent chaud et sec accompagné par une humidité réduite.

Dans le tableau 4.1 sont présentées les températures moyennes mensuelles pour une période de 15 ans.

Tableau 4.1 : Températures maximales et minimales.

Mois	J	F	M	A	M	J	J	O	S	O	N	D
T _{min} (°C)	1.36	1.57	3.6	5.65	10.81	14.86	17.01	17.83	14.94	10.44	5.35	2.35
T _{max} (°C)	10.98	12.62	15.18	17.98	24.71	30.09	33.4	33.45	27.55	22.73	16.33	11.81

(Source : Centre météorologique O.E.B)

La température maximale absolue peut atteindre 34°C pendant les mois de Juillet et Aout. Les températures minimales peuvent descendre au-dessous de 0°C.

IV.2.2.3 L'humidité : L'humidité est représentée dans le tableau 4.2 :

Tableau 4.2 : Humidité moyenne mensuelle.

Mois	J	F	M	A	M	J	J	O	S	O	N	D
Humidité (%)	77.8	73.06	66.05	66.3	58.59	50.7	47.23	49.96	61.71	65.31	73.9	79.46

(Source : Centre météorologique de OUM EL BOUAGHI)

IV.3 Définition d'un MNT

Un modèle numérique de terrain est un modèle continu de la géophysique du terrain, représenté par une grille cartographique matricielle numérique où chaque cellule (point) de la grille détient une valeur d'élévation (Che, 2005).

IV.4 Les types des MNT

En geomorphometrie, la surface terrestre est généralement décrite par un modelé numérique de terrain (MNT). Les MNT permettent à la fois une analyse discrète et continue des altitudes de la surface à étudier. La caractérisation fine des éléments morphologiques d'un site aussi bien que la caractérisation des directions de flux sur l'ensemble d'un bassin versant est ainsi rendu possible grâce à l'utilisation de ce type de données.

En fonction de leur format et de leur structure, les MNT sont divisés en deux catégories principales : les MNT raster et les MNT vecteur. Ces deux structures permettent d'obtenir une valeur altitudinale pour n'importe quel point de l'espace

IV.4.1 Les MNT Raster

Les MNT raster sont les structures les plus utilisées en hydrologie. Leur disponibilité croissante, la simplicité du format ainsi que leur facilite de traitement ont permis un développement accru de l'utilisation de ce type de donnée pour un panel d'applications toujours plus large.

Dans un MNT raster, les altitudes sont stockées sous forme d'une maille régulière, ou grille, d'une taille identique sur l'ensemble de la surface étudiée (Figure 4.2). Les coordonnées géographiques sont ainsi aisément calculables à la volée grâce à la régularité de l'espacement entre les points de la grille (Maréchal, 2011).

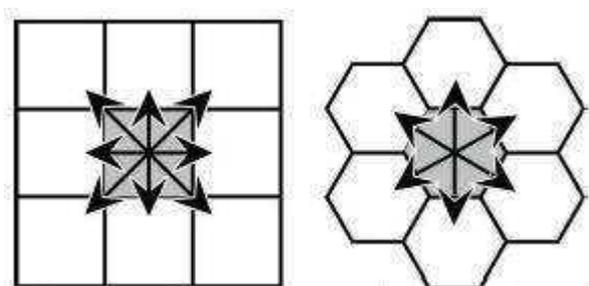


Figure 4.2 : Exemples de mailles raster maille carrée et maille hexagonale (Source : Maréchal, 2011).

IV.4.2 Les MNT TIN

Le réseau irrégulier de triangles (**TIN** : Triangulation Irregular Network) est une autre manière de concevoir le modèle numérique de terrain. Le principe est de conserver les points significatifs du relief, en retenant les sommets obtenus par triangulation (Figure 4.3). Ce maillage irrégulier permet de réduire la redondance dans les zones planes, il est bénéfique dans deux contextes : la gestion du réseau de triangles et le gain en stockage. Le modèle TIN réduit le volume de données à stocker (le stockage de l'information suit un modèle triangulé) ainsi que les temps de calcul pour interpoler une altitude. Sa mise en œuvre nécessite trois tables de base : une première pour les sommets, une deuxième pour les arêtes, et une troisième pour les triangles. Un triangle présente l'avantage de pouvoir être représenté graphiquement en trois dimensions sans approximation puisqu'il n'a qu'une seule pente (amplitude et orientation), ce qui n'est pas le cas d'une grille régulière puisqu'on ne peut pas faire passer un plan par 4 points d'altitudes différentes (Che, 2005).

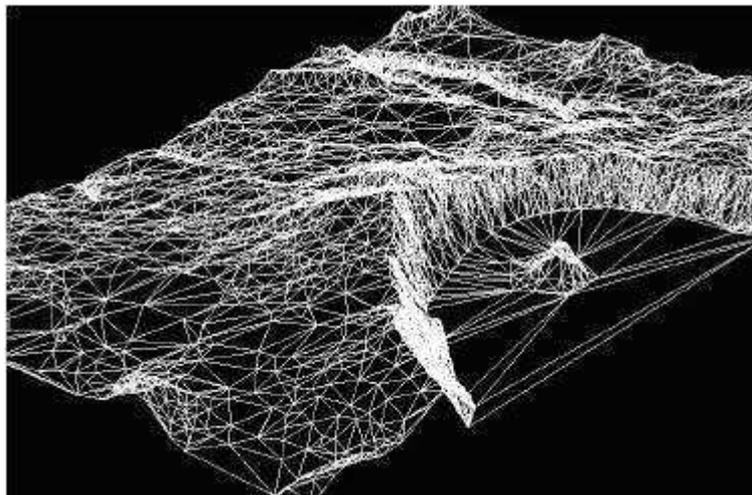


Figure 4.3 : Exemple de raster TIN (Source, Che, 2005)

IV.5 Délimitation du bassin versant

La méthode traditionnelle pour la délimitation des bassins versants à partir des cartes topographiques est imprécise et nécessite beaucoup de temps. Au cours des dernières années, cette méthode a été remplacée par l'extraction automatique de l'information à partir d'un Modélé numérique du terrain (MNT) (Khaddor, 2014). L'usage des modèles numériques de terrain (MNT) est de plus en plus fréquent en hydrologie. Il permet de prendre en compte l'influence du relief sur le processus hydrologique car il peut effectivement apporter des

informations essentielles sur la distribution spatiale des pentes et plus généralement sur l'organisation du réseau de drainage.

Les données MNT ont été utilisées pour obtenir les caractéristiques topographiques telles que la pente du terrain, les altitudes et la ligne de partage des eaux (Figure 4.4). Le MNT utilisé est ASTER-GDEM avec une résolution de 28m. Le MNT a permis d'extraire toutes les caractéristiques physiques du bassin versant sous ArcGIS en utilisant Arc hydro Tool.

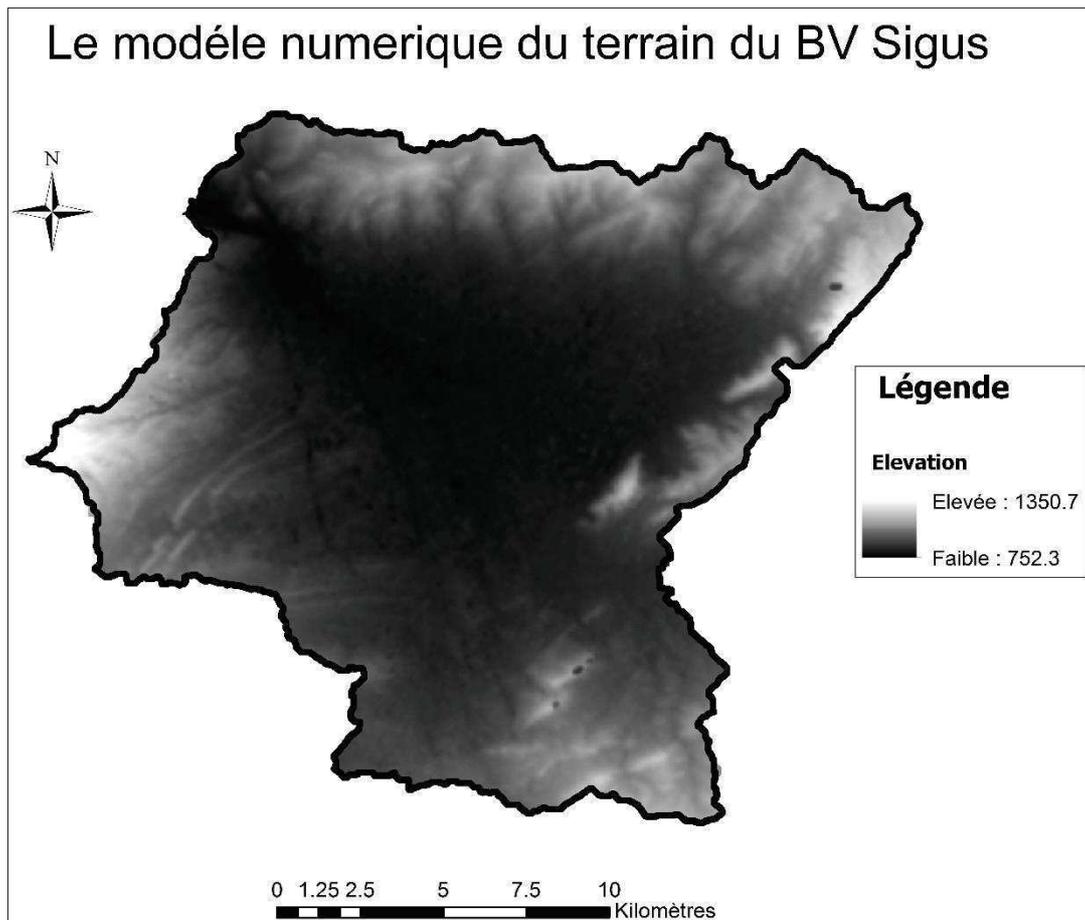


Figure 4.4 : Le modèle numérique du terrain

IV.6 Le réseau hydrographique

IV.6.1 Hiérarchisation du réseau hydrographique

Dans le système de classification européen, le cours d'eau principal est désigné d'ordre 01 alors que les plus petits affluents ont l'ordre le plus élevé. Ces affluents ont, souvent, des caractéristiques morphométriques similaires. Horton (1945), a pensé que le cours d'eau principal doit avoir l'ordre le plus élevé et les petits affluents à l'amont du réseau doivent, toujours, désignés par le même faible ordre. Donc, il a inversé le système européen tout en

donnant l'ordre 01 aux petits affluents en amont, un affluent d'ordre 02 reçoit deux affluents ou plus de l'ordre 01, un cours d'eau d'ordre 03 reçoit deux affluents ou plus de l'ordre 02, et ainsi de suite. En utilisant ce système, le cours d'eau principal reçoit l'ordre maximal possible. La figure 4.5 illustre la hiérarchie du réseau hydrographique du bassin versant Sigus. La carte du réseau hydrographique montre que le bassin versant de Sigus est classé d'ordre 05. Le SBV 05 contient le cours d'eau du rang le plus élevé 05 puisque il se situe à l'aval du bassin versant. Tandis que les SBV 03 et 04 ne dépassent pas l'ordre 03.

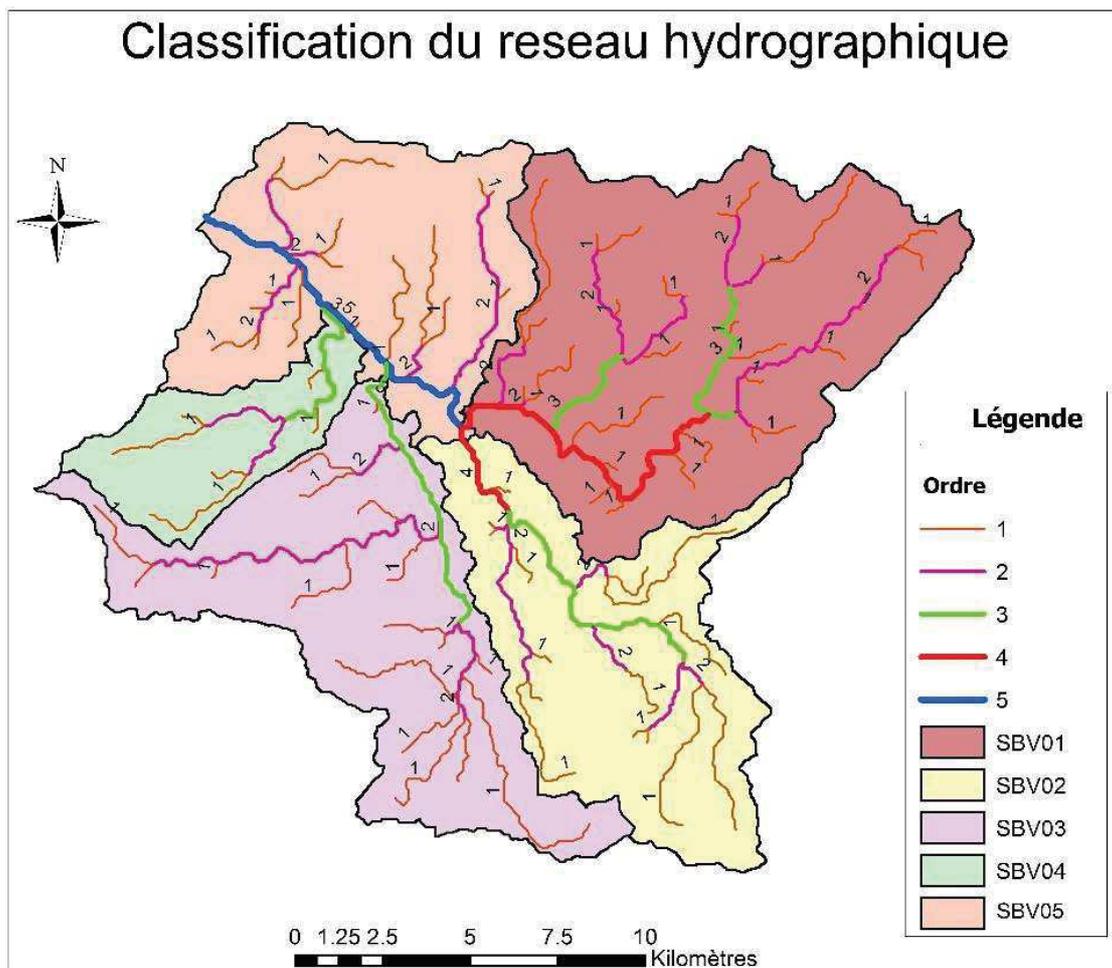


Figure 4.5 : Classification du réseau hydrographique et découpage en sous bassins

IV.6.2 Discrétisation en sous bassins versants

La spatialisé signifie la discrétisation du bassin versant en unités élémentaires (De Sede, 1995). Pour une modélisation spatialisée, le bassin versant doit être décomposé. Ce processus donne, souvent, une bonne représentation des paramètres du bassin versant (Vieux, 2005). Cette décomposition permet une bonne compréhension de la distribution spatiale pour

localiser les zones les plus productrices du ruissellement. On préconise un zonage du bassin versant suivant le réseau hydrographique (Figure 4.4).

IV.6.3 Le ratio de bifurcation (R_b)

C'est un rapport entre le cours d'eau d'ordre N et celui d'ordre N_{+1} (équation 4.1), il sert à décrire les caractéristiques physiographiques du bassin versant (Eyles, 1974). Horton (1945) a estimé que le ratio de bifurcation de 3 à 4 indique que le bassin versant est montagneux et fortement disséqué a environ 2 pour les bassins versants plats ou doucement ondulés. Strahler (1957) indique que le R_b est influencé directement pas la structure géologique et que les valeurs les plus élevées sont trouvées des zones des roches stridentes. Le bassin versant de Sigus est caractérisé par un R_b moyen de 1.79 avec un maximum de 2.09 en N_1/N_2 et un minimum de 1.00 en N_4/N_5 . Le R_b des SBV est variable dont le SBV 02 possède la valeur maximale avec 4.74 et le SBV 04 avec 1.86. Ceci est argumenté par la dominance des terres plates destinées à l'agriculture. Ainsi, le nombre des affluents d'ordre inférieur est toujours plus élevé. Ils se situent à l'amont du réseau hydrographique là ou existe des roches a l'affleurement sous forme de montagnes et les pentes sont excessives. Les valeurs du R_b sont illustrées dans le tableau 4.3.

$$R_b = N_u / N_{u+1} \quad (4.1)$$

Tableau 4.3 : Caractéristiques du réseau hydrographique

BV	Ordre du Cours d'eau					Nombre totale ordre N	longueur totale ordre N	Rapport de Bifurcation R_b				R_b moy
	N1	N2	N3	N4	N5			1/2	2/3	3/4	4/5	
SBV01	46	15	5	11	-	77	81.94	3.07	3.00	0.45	-	2.17
SBV02	19	8	23	2	-	52	57.59	2.38	0.348	11.5	-	4.74
SBV03	23	16	4	-	-	43	66.43	1.44	4	-	-	2.72
SBV04	11	4	4	-	-	19	21.06	2.75	1	-	-	1.88
SBV05	22	15	2	2	15	56	55.41	1.47	7.5	1	0.13	2.53
GBV	121	58	38	15	15	247	282.44	2.09	1.53	2.53	1.00	1.79

IV.6.4 Type de drainage

Le type de drainage désigne la disposition spatiale des différents cours d'eau sur le bassin versant tout en formant un réseau hydrographique. Ces cours d'eau sont fortement influencés par la pente et la structure géologique (Twidale, 2004). L'eau et les sédiments sont transportés

des collines à l'exutoire du bassin par le réseau hydrographique. La forme et la densité des réseaux de drainage varient considérablement d'un bassin à un autre. La figure 4.6 présente les principaux types de schémas de drainage. Un facteur majeur influence la morphologie du réseau de drainage est la géologie sous-jacente, bien que la topographie, les sols, l'histoire tectonique et le climat soient également influents (Charlton, 2009).

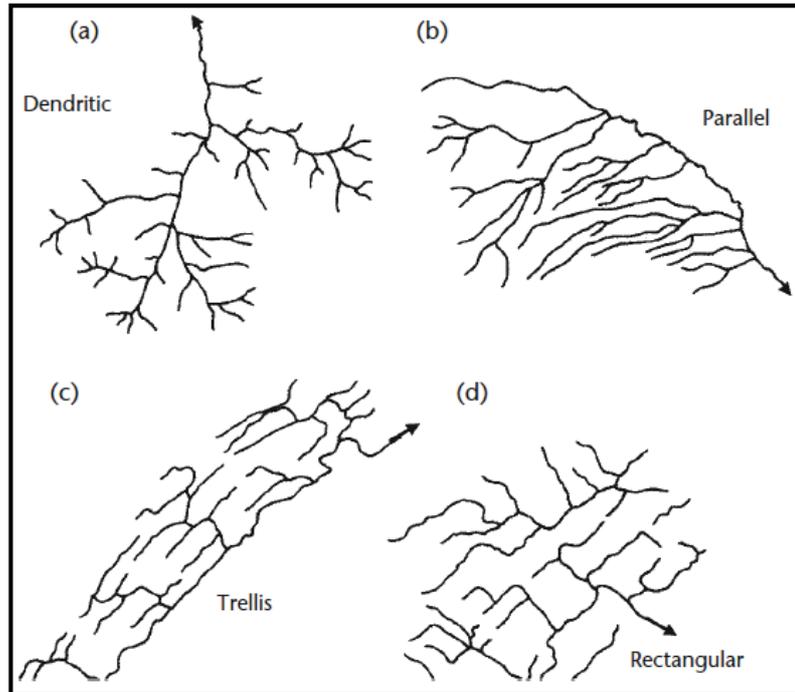


Figure 4.6 : Quelques types de drainage (Dingman, 2009).

Tableau 4.4 : type de drainage du bassin versant de Sigus

Bassin versant	Type de de drainage
SBV01	Dendritique
SBV02	Parallèle
SBV03	Dendritique
SBV04	Dendritique
SBV05	Dendritique
GBV	Dendritique

L'observation du réseau hydrographique du bassin versant ainsi que ceux des sous bassins montre que le type de drainage dominant est dendritique sauf celui du SBV 02 qui est parallèle (tableau, 4.4). Le type de drainage dendritique est caractérisé par des ramifications irrégulières dans toutes les directions avec les affluents joignant le cours d'eau principal à tous les angles. Le motif dendritique parfait se développe quand le drainage est incessant. Il se

peut que certains affluents soient par hasard parallèles mais cela n'a aucune signification dans la classification globale. Le drainage dendritique se développe là où les roches offrent une résistance uniforme dans une direction horizontale. Ces conditions correspondent souvent aux lits plats des plateaux et dans les roches cristallines massives (Zernitz, 1932).

IV.6.5 Fréquence des cours d'eau

C'est le nombre des cours d'eau d'ordre différent N par unité de surface A (équation 4.2). Les résultats de la fréquence du drainage pour les différents SBV ainsi que le bassin versant sont présentés dans le tableau 4.3.

$$F_s = \frac{N}{A} \quad (4.2)$$

IV.6.6 La densité de drainage

En 1932 Horton a comparé deux bassins versants dont le premier est bien drainé alors que le deuxième est mal drainé. Ces termes, bien drainé et mal drainé, utilisés couramment dans les manuels de physiographie, sont purement qualitatifs. Pour mieux connaître le degré de développement du réseau hydrographique dans un bassin, l'outil le plus simple et le plus pratique est la densité de drainage (équation 4.3). Les résultats de la densité de drainage pour les différents SBV ainsi que le bassin versant sont présentés dans le tableau 4.3.

$$D_d = \frac{L_u}{A} \quad (4.3)$$

Tableau 4.5 : Texture de drainage

BV	Fréquence (F_s)	Densité de drainage (D_d)
SBV01	0.74	0.78
SBV02	0.82	0.91
SBV03	0.57	0.88
SBV04	0.77	0.86
SBV05	0.85	0.84
GBV	0.74	0.85

Généralement, une fréquence des cours d'eau faible est reliée à des matériaux de surface et de subsurface imperméables, végétation éparses et des taux d'infiltration faibles (Shaban, 2005). Le bassin versant de Sigus a des valeurs de F_s presque similaires sur tous les SBV qui varient entre 0.74 et 0.85 sauf le SBV 03 avec 0.57 (tableau 4.5). Selon Ritter (1995), les matériaux de surface résistants et ceux avec un potentiel d'infiltration élevés présentent des cours d'eau

largement espacés et par conséquent une faible densité de drainage. Les valeurs de la densité de drainage sont rapprochées sur tous les SBV et par conséquent sur le bassin versant de Sigus ce qui signifie la forte imperméabilité du bassin versant. Les différentes valeurs de la fréquence et de la densité du drainage montrent une forte similitude de l'imperméabilité des différents sous bassins ce qui implique un rôle relativement semblable dans les processus de genèse du ruissellement.

IV.7 La géométrie du bassin versant

La détermination de la forme d'un bassin versant comme étant allongée, ovale ou circulaire n'est que qualitative. Une telle évaluation peut être utilisée pour expliquer le déroulement de certains processus hydrologiques, mais reste subjective tant qu'elle n'est pas associée à une évaluation quantitative. Il est connu que les crues se forment et se déplacent plus rapidement dans un bassin versant circulaire que dans un bassin allongé et que les inondations dans les bassins du premier type sont plus fortes et ont une vitesse plus élevée, donc l'érosion est significative. Par conséquent, la charge en suspension est plus importante, et l'évolution de tels bassins versants est ainsi plus rapide. Ceci est illustré par les différences entre les courbes hypsométriques de deux bassins de surface égale situés dans des conditions physiographiques homogènes mais ayant des formes différentes. Une forme allongée favorise une diminution des crues car les affluents s'écoulent dans le courant principal à des intervalles plus longs du temps et de l'espace. Compte tenu de l'importance de la forme du bassin, de nombreuses recherches ont sollicité à remplacer un certain nombre de descriptions telles que : ovales, carrées ou rectangle par des indices précises pouvant être utilisés dans des formules mathématiques (Zavoianu, 1985).

IV.7.1 Le facteur de forme de Horton (R_f)

En 1932, Horton a développé une description quantitative de la forme du bassin versant en introduisant un facteur de forme R_f qui représente le rapport sans dimension de la surface S_b d'un bassin versant au carré de sa longueur maximale L_m . Les résultats du R_f sont présentés dans le tableau 4.6.

$$R_f = \frac{S}{L_m^2} \quad (4.4)$$

Tableau 4.6 : Facteur de forme de Horton

BV	S	L	R_f
SBV01	104.4	15.69	0.42
SBV02	63.32	15.6	0.26
SBV03	75.34	19.69	0.19
SBV04	24.62	9.42	0.28
SBV05	66.02	10.33	0.62
GBV	333.7	25.22	0.52

IV.7.2 L'indice de compacité (Gravelius)

Ce facteur, conçu par Gravelius (1914), appelé aussi indice de forme ou coefficient de compacité, il caractérise la forme du bassin, et exprime l'allongement des sous bassins versants. (Bendjoui, 2009). Les résultats du K_c sont présentés dans le tableau 4.7.

$$K_c = 0.282 \frac{P}{\sqrt{S}} \quad (4.5)$$

Tableau 4.7 : Indice de compacité

BV	S	P	K_c
SBV01	104.4	66.92	1.85
SBV02	63.32	67.12	2.38
SBV03	75.34	80.49	2.62
SBV04	24.62	34.44	1.96
SBV05	66.02	47.91	1.66
GBV	333.7	126	1.95

IV.7.3 Le rapport de circularité (Miller)

En 1953, Miller a introduit le ratio de circularité qui représente le quotient entre la surface du bassin versant et la surface d'un cercle ayant le même périmètre du bassin. Les résultats du R_c sont présentés dans le tableau 4.8. La formule simplifiée du R_c est :

$$R_c = \frac{4 \cdot \pi \cdot S}{P^2} \quad (4.6)$$

Tableau 4.8 : Rapport de circularité

BV	S	P	R_c
SBV01	104.4	66.92	0.29
SBV02	63.32	67.12	0.18
SBV03	75.34	80.49	0.15
SBV04	24.62	34.44	0.26
SBV05	66.02	47.91	0.36
GBV	333.7	126	0.26

IV.7.4 Le rapport d'élongation (Schumm)

En 1956, Schumm a proposé le ratio d'élongation R_e pour caractériser la géométrie du bassin versant, il donné par le quotient du diamètre d'un cercle ayant la même surface du bassin versant et la longueur maximale du bassin versant. Les résultats du R_e sont présentés dans le tableau 4.9.

$$R_e = \frac{D_c}{L_c} \quad (4.7)$$

Tableau 4.9 : Rapport d'allongement

BV	S	D_c	L	R_e
SBV01	104.4	11.5322864	15.69	0.74
SBV02	63.32	8.981226	15.6	0.58
SBV03	75.34	9.79665873	19.69	0.50
SBV04	24.62	5.60027297	9.42	0.59
SBV05	66.02	9.1707094	10.33	0.89
GBV	333.7	20.6178452	25.22	0.82

Tableau 4.10 : Limites de variation pour les différents indices de forme

N	Nom de l'indice	Limite de variation						
		Circulaire	Carré	Rectangle				
				L = 2B	L = 5B	L = 10B	L = 20B	L = 40B
1	Facteur de forme	1.227	1.000	0.501	0.200	0.100	0.050	0.024
2	Indice de compacité	1	1.128	1.198	1.514	1.971	2.649	3.7
3	Rapport de circularité	1	0.785	0.696	0.436	0.257	0.142	0.073
4	Rapport d'allongement	1.275	1.128	0.799	0.505	0.357	0.252	0.176

L'évaluation de la géométrie du bassin versant offre une meilleure appréhension sur la réponse hydrologique du bassin en terme de genèse du ruissellement. Il est connu que la forme circulaire est la plus avantageuse pour le déplacement des flux d'eau, alors que cette forme n'existe pas en réalité. Les résultats du facteur de forme de Horton montrent que le bassin versant a une forme rectangulaire qui tend vers le carré. Presque tous les SBV ont une forme rectangulaire de $L=5B$ sauf le SBV 05 qui a une forme presque carrée. Les résultats de l'indice de compacité montrent que le bassin versant ainsi que tous les SBV ont une forme rectangulaire avec L qui varie de $5B$ à $10B$. Le ratio de circularité montre aussi que le bassin versant ainsi que tous les SBV ont une forme rectangulaire avec $L = 10B$. Le ratio d'élongation donne des valeurs presque similaires pour le bassin versant et tous les SBV avec $L = 2B$.

Les résultats des différentes formules montrent que le bassin versant de Sigus ainsi que certains SBV ont des formes rectangulaires qui se rapprochent vers le carré ce qui favorise le mécanisme de l'écoulement et augmente la réponse du bassin versant. Bien que certains SBV ont une forme rectangulaire allongée, c'est la disposition des SBV entre eux qui définit l'allure générale du bassin versant.

IV.8 Caractéristiques du relief

IV.8.1 Caractéristiques des altitudes (hypsométrie)

La courbe hypsométrique pour un bassin versant représente la proportion relative entre la surface et les altitudes du bassin versant. Cette courbe est un outil très utile pour caractériser la topographie du bassin et comparer les sous bassins. La forme de courbe signifie le stage de développement geomorphometrie du bassin. La forme convexe est typique pour un bassin en stade jeune, une courbe en forme de S indique un stage de maturité et une courbe concave est un témoin d'un stade pénéplaine (Perez-Pena, 2009). L'analyse hypsométrique est une étude de la distribution des surfaces d'une zone en tenant compte des altitudes. La forme la plus simple d'une courbe hypsométrique est celle contenant, sur l'axe des ordonnées, les altitudes en mètre, et sur l'axe des abscisses le pourcentage des surfaces pour chaque intervalle d'altitude (Strahler, 1952). Les caractéristiques hypsométriques des cinq sous bassins sont étudiées par un intervalle de m (Figure 4.7). Les tableaux 4.11, 4.12, 4.13 4.14, 4.15 ainsi que les figures 4.8, 4.9, 4.10, 4.11 et 4.12 illustrent les caractéristiques hypsométriques des sous bassins versants.

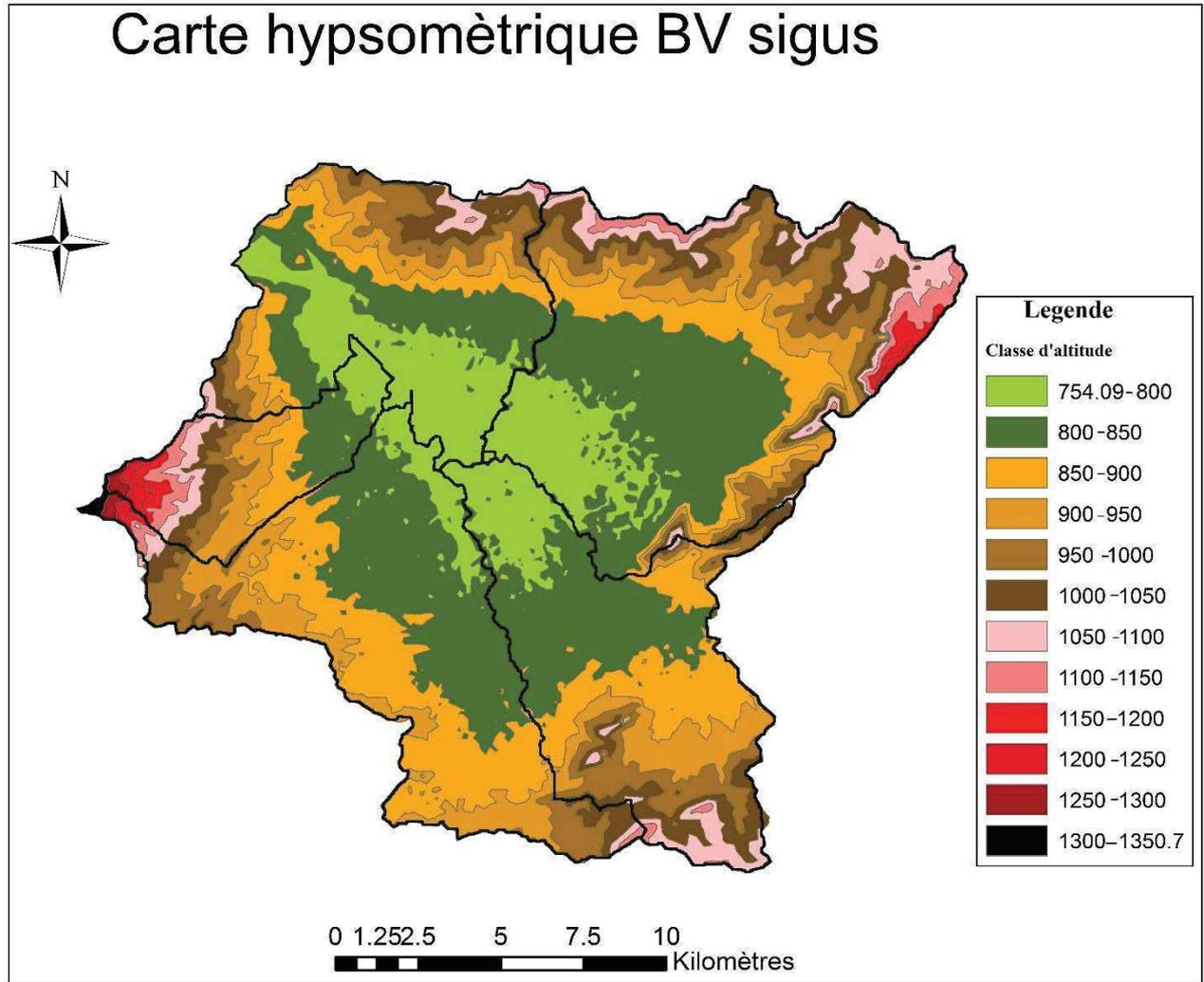


Figure 4.7 : Carte hypsométrique du BV Sigus

Tableau 4.11 : Répartition en pourcentage de la surface élémentaire du SB1.

Tranche d'altitude	ΔH	H_i	Superficie partielle (Km ²)	Superficie partielle (%)	$H_i \times S_i$	$H_i \times S_i$ Cumulé	Superficie cumulée (%)	Hmoy
	(m)	(m)						
778 - 800	22	789	14.74	14.12	11629.24	11629.24	14.12	909.31
800 - 850	50	825	30.79	29.50	25404.55	37033.80	43.61	
850 - 900	50	875	11.75	11.26	10281.53	47315.33	54.87	
900 - 950	50	925	10.94	10.48	10120.45	57435.78	65.35	
950 - 1000	50	975	11.98	11.47	11678.61	69114.39	76.82	
1000 - 1050	50	1025	11.09	10.62	11364.35	80478.74	87.44	
1050 - 1100	50	1075	8.14	7.80	8749.20	89227.94	95.24	
1100 - 1150	50	1125	3.30	3.16	3713.29	92941.23	98.40	
1150 - 1200	50	1175	1.18	1.13	1380.97	94322.20	99.52	
1200 - 1250	50	1225	0.44	0.42	535.50	94857.70	99.94	
1250 - 1276	26	1263	0.06	0.05	71.20	94928.90	100.00	

Avec :

Δh_i : Altitude moyenne entre 2 courbes de niveaux consécutives en(m)

S_i : surface partielle comprise entre 2 courbes de niveaux consécutives en (km²)

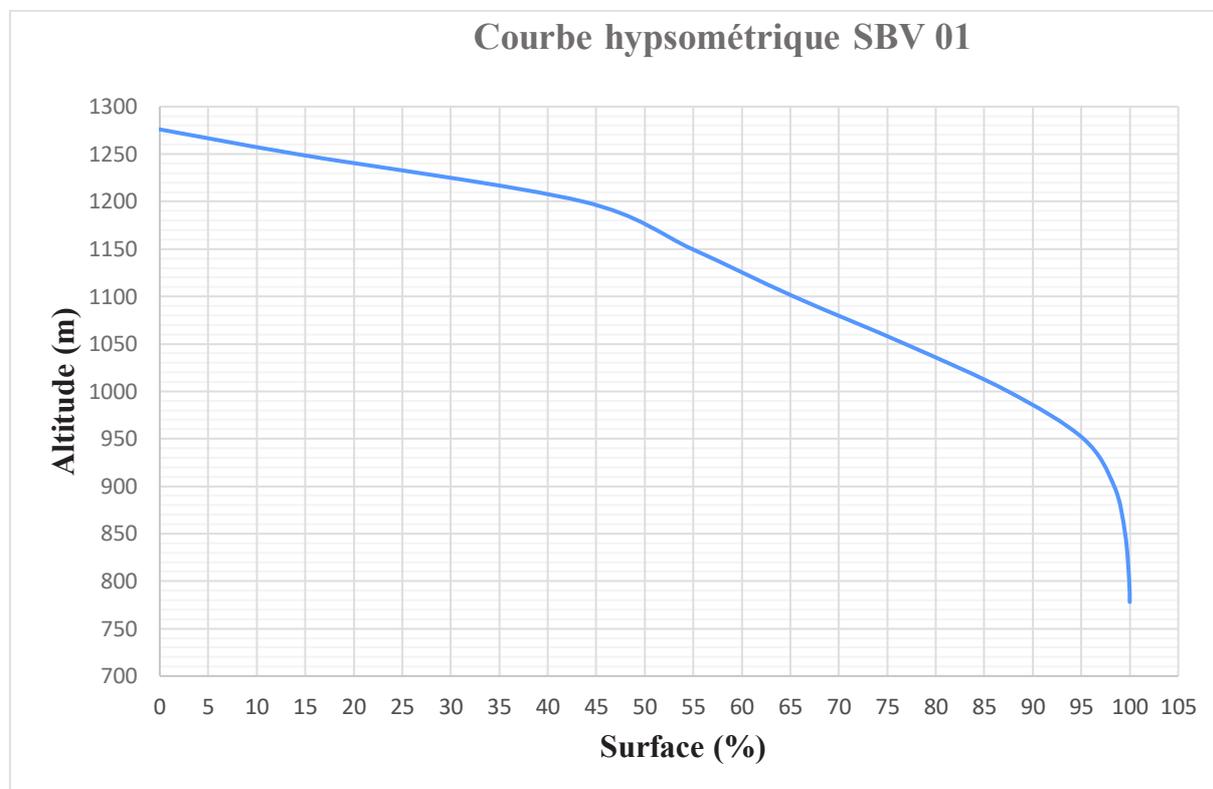


Figure 4.8 : Courbe hypsométrique du sous bassin versant N°01

Tableau 4.12 : Répartition en pourcentage de la surface élémentaire du SB2.

Tranche d'altitude	ΔH (m)	H_i (m)	Superficie partielle (Km2)	Superficie partielle (%)	$H_i \times S_i$	$H_i \times S_i$ Cumulé	Superficie cumulée (%)	H_{moy}
775 - 800	25	789	8.38	12.82	6608.45	6608.45	12.82	891.41
800 - 850	50	825	19.15	29.32	15795.46	22403.91	42.14	
850 - 900	50	875	12.82	19.63	11215.79	33619.69	61.77	
900 - 950	50	925	8.43	12.91	7796.40	41416.09	74.67	
950 - 1000	50	975	7.05	10.80	6874.44	48290.53	85.47	
1000 - 1050	50	1025	5.87	8.98	6012.40	54302.94	94.45	
1050 - 1100	50	1075	3.26	4.99	3502.93	57805.86	99.44	
1100 - 1146	46	1121	0.37	0.56	412.11	58217.98	100.00	

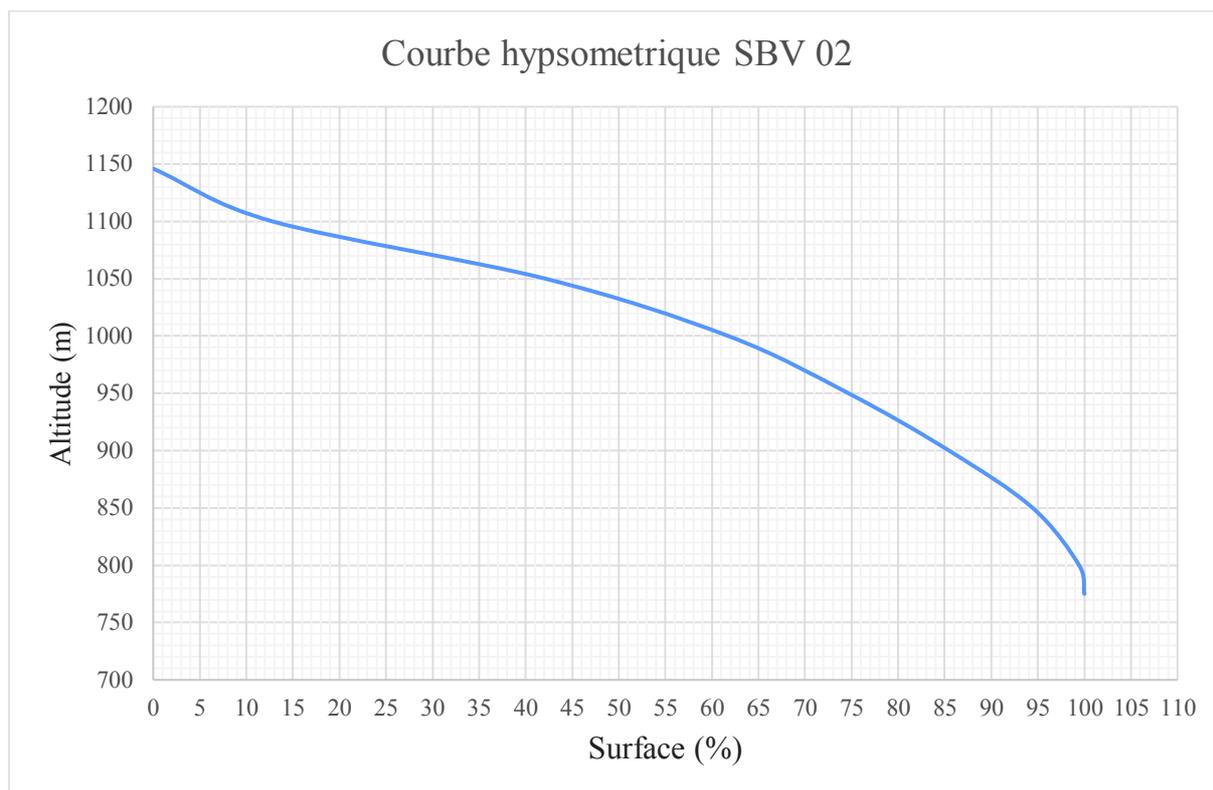


Figure 4.9 : Courbe hypsométrique du sous bassin versant N°02

Tableau 4.13 : Répartition en pourcentage de la surface élémentaire du SB3.

Tranche d'altitude	ΔH	H_i	Superficie partielle (Km ²)	Superficie partielle (%)	$H_i \times S_i$	$H_i \times S_i$ Cumulé	Superficie cumulée (%)	<i>Hmoy</i>
	(m)	(m)						
773 - 800	27	786.5	5.35	6.89	4208.88	4208.88	6.89	880.20
800 - 850	50	825	26.95	34.72	22237.59	26446.48	41.62	
850 - 900	50	875	23.13	29.79	20238.05	46684.52	71.41	
900 - 950	50	925	11.35	14.63	10502.45	57186.97	86.04	
950 - 1000	50	975	6.20	7.98	6043.58	63230.55	94.02	
1000 - 1050	50	1025	2.37	3.06	2431.16	65661.71	97.08	
1050 - 1100	50	1075	0.64	0.83	692.07	66353.78	97.90	
1100 - 1150	50	1125	0.55	0.70	615.51	66969.29	98.61	
1150 - 1200	50	1175	0.21	0.27	242.45	67211.74	98.88	
1200 - 1250	50	1225	0.29	0.37	353.09	67564.83	99.25	
1250 - 1300	50	1275	0.34	0.44	438.89	68003.73	99.69	
1300 - 1345	45	1322.5	0.25	0.32	325.83		100.01	

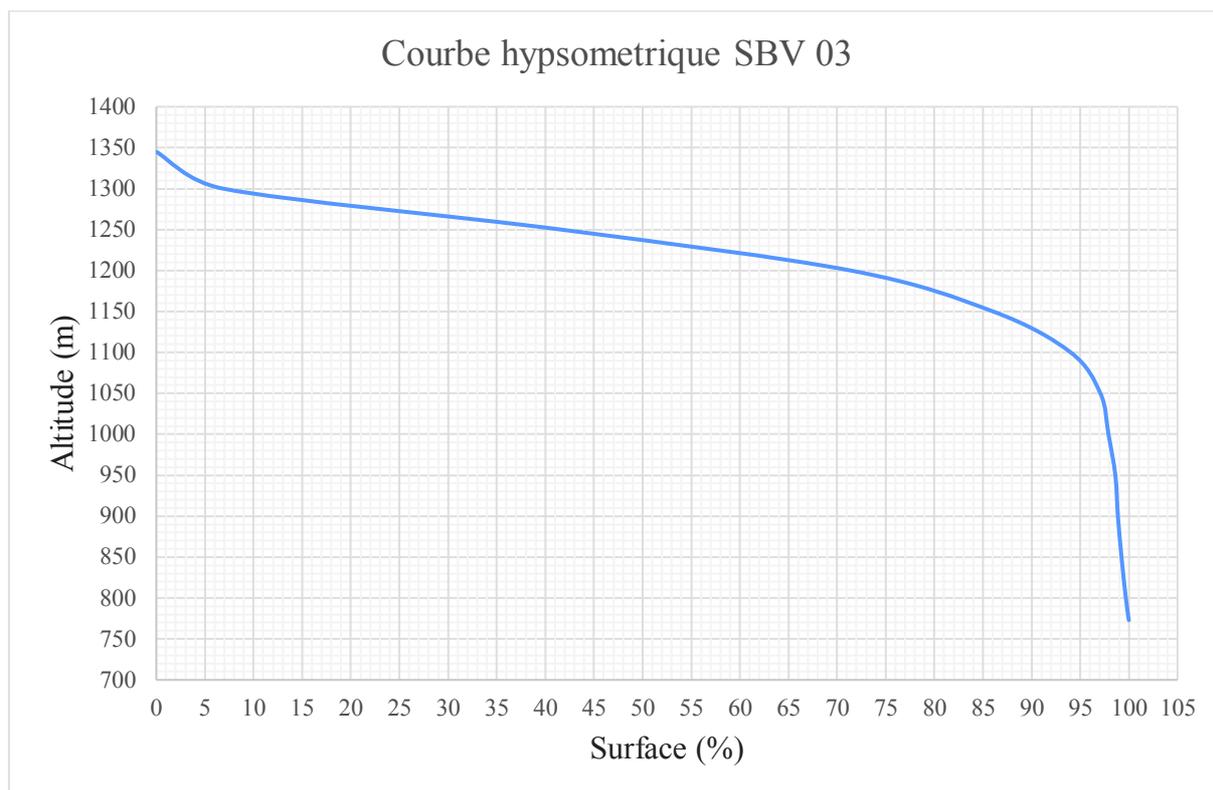


Figure 4.10 : Courbe hypsométrique du sous bassin versant N°03

Tableau 4.14 : Répartition en pourcentage de la surface élémentaire du SB4.

Tranche d'altitude	ΔH (m)	H_i (m)	Superficie partielle (Km ²)	Superficie partielle (%)	$H_i \times S_i$	$H_i \times S_i$ Cumulé	Superficie cumulée (%)	Hmoy
761 - 800	22	789	2.49	10.12	1965.19	1965.19	10.12	950.54
800 - 850	50	825	4.43	18.01	3658.74	5623.93	28.13	
850 - 900	50	875	3.24	13.18	2838.83	8462.76	41.31	
900 - 950	50	925	4.10	16.65	3792.72	12255.48	57.96	
950 - 1000	50	975	2.44	9.91	2377.90	14633.38	67.87	
1000 - 1050	50	1025	2.08	8.43	2127.69	16761.08	76.30	
1050 - 1100	50	1075	2.06	8.38	2216.62	18977.69	84.67	
1100 - 1150	50	1125	1.64	6.67	1847.07	20824.76	91.34	
1150 - 1200	50	1175	0.99	4.02	1162.27	21987.03	95.36	
1200 - 1250	50	1225	0.68	2.74	827.36	22814.39	98.10	
1250 - 1311	26	1263	0.47	1.89	587.90	23402.29	99.99	

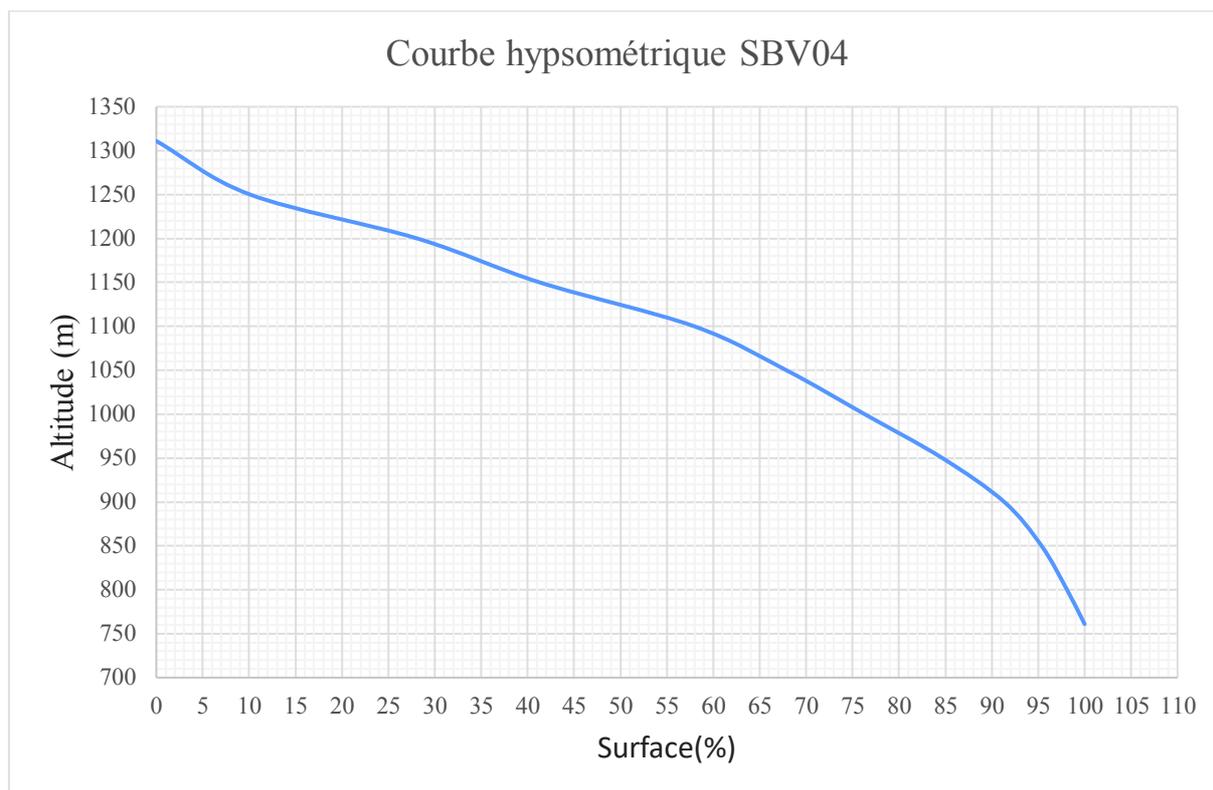


Figure 4.11 : Courbe hypsométrique du sous bassin versant N°04

Tableau 4.15 : Répartition en pourcentage de la surface élémentaire du SB5.

Tranche d'altitude	ΔH (m)	H_i (m)	Superficie partielle (Km^2)	Superficie partielle (%)	$H_i \times S_i$	$H_i \times S_i$ Cumulé	Superficie cumulée (%)	Hmoy
752 - 800	48	789	19.25	30.80	15192.01	15192.01	30.80	871.08
800 - 850	50	825	14.79	23.67	12204.88	27396.89	54.47	
850 - 900	50	875	8.03	12.85	7026.70	34423.59	67.31	
900 - 950	50	925	6.96	11.14	6440.76	40864.35	78.45	
950 - 1000	50	975	6.68	10.68	6512.02	47376.37	89.14	
1000 - 1050	50	1025	4.62	7.39	4734.77	52111.14	96.53	
1050 - 1100	50	1075	1.92	3.07	2063.56	54174.70	99.60	
1100 - 1130	30	1105	0.25	0.40	276.66	54451.36	100.00	

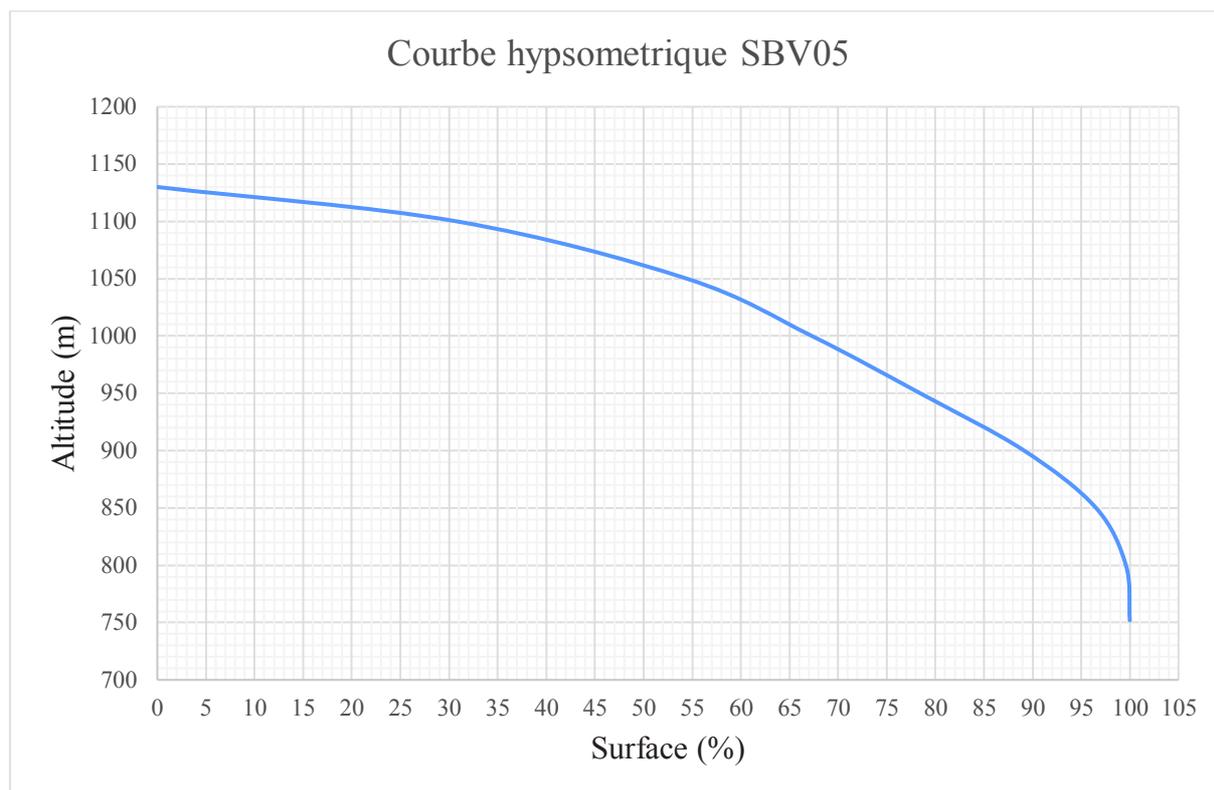


Figure 4.12 : Courbe hypsométrique du sous bassin versant N°05

Selon Ohmori (1993), la forme de la courbe hypsométrique est un indicateur du stade d'érosion du bassin versant. Les bassins versant avec une courbe convexe sont moins érodés. Aussi, la forme convexe indique que les cours d'eau prennent naissance à des altitudes plus élevées dans des zones montagneuses ou les pentes sont plus raides. Le ruissellement sur un terrain pareil est très rapide (Talampas, 2015). Les courbes hypsométriques du bassin versant ainsi que ceux des cinq sous bassins ont une forme convexe ce qui signifie un stade de développement jeune et un terrain très favorable pour accentuer les écoulements.

IV.8.2 Le relief du bassin versant (relief total : B_h)

L'aspect du bassin versant et des sous bassins joue un rôle dans le développement du drainage, dans le ruissellement de surface et hypodermique, la perméabilité et l'érosion du terrain du bassin versant (Reddy, 2004).

$$B_h = H_{\max} - H_{\min} \quad (4.8)$$

L'analyse des résultats du B_h (tableau.) montre que le bassin versant et tous les SBV ont des valeurs élevées sur des surfaces relativement étroites, ce qui signifie un potentiel du ruissellement très élevée.

IV.8.3 Le numéro de robustesse (R_n)

Selon Patton (1976), le numéro de robustesse ainsi que d'autres paramètres morphométriques servent à distinguer la tendance des bassins versants vers les inondations. Les valeurs du R_n les plus élevées indiquent une tendance élevée au ruissellement.

$$R_n = Dd * \frac{B_h}{1000} \quad (4.9)$$

Les résultats (tableau 4.16) montrent que la valeur maximale de R_n se trouve dans bassin versant avec 0.51 alors que les SBV 03 et 04 possèdent les valeurs maximales parmi les cinq SBV. Ce sont les zones les plus susceptibles au ruissellement et à l'érosion.

Tableau 4.16 : Caractéristique du relief

BV	relief total (B_h)	rapport du relief (R_r)	nombre de robustesse (R_n)
SBV01	498	31.74	0.39
SBV02	371	23.78	0.34
SBV03	572	29.05	0.50
SBV04	550	58.39	0.47
SBV05	378	36.59	0.32
GBV	599	23.75	0.51

IV.8.4 Les indices de pente

L'objet de ces indices est de caractériser les pentes d'un bassin et de permettre des comparaisons et des classifications (Laborde, 2009).

IV.8.4.1 Pente moyenne I_m : ce paramètre est calculé à partir des moyennes pondérées sous ArcGIS (Figure 4.13). Le tableau 4.17 illustre les résultats d' I_m et le tableau 4.18 présente les classes numériques des pentes.

Tableau : 4.17 : pentes moyennes des sous bassins I_m .

Sous bassins	01	02	03	04	05
La pente moyenne (%)	5.93	4.86	12.95	5.85	5.18

Tableau 4.18 : Classe numérique des pentes (Selon M.R.N.F.Q, 2012)

Classe de pente (%)	Description	Surface (%)
0 - 3	Nulle	46.70
04_08	Faible	35.20
09_15	Douce	14.63
16 - 30	Modérée	3.25
31 - 40	Forte	0.17
≥ 41	Excessive	0.05

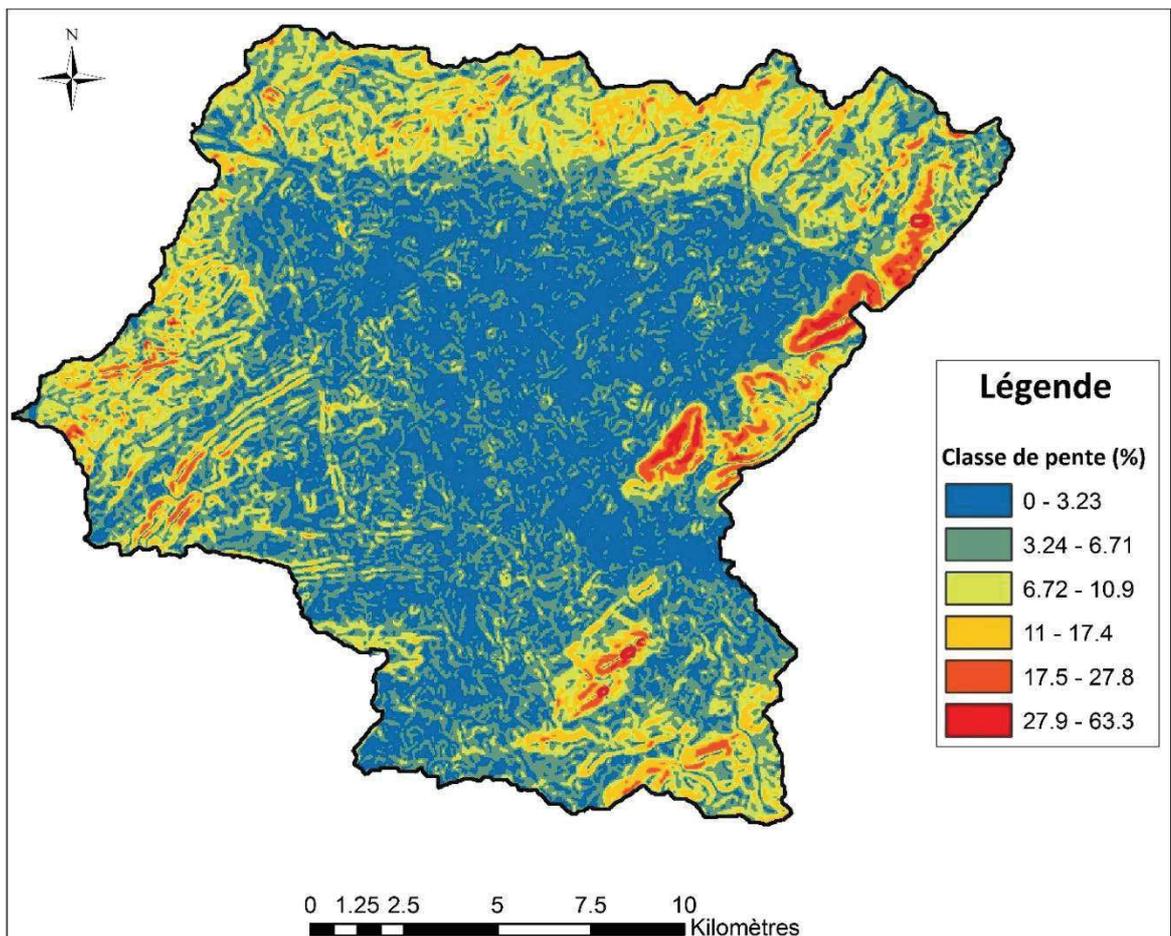


Figure 4.13 : Carte des pentes

IV.8.4.2 **Indice de pente globale I_g** : il est donné par la formule suivante :

$$I_g = \frac{D}{L} \quad (4.10)$$

D étant la dénivelée $h_{5\%} - h_{95\%}$, définie sur la courbe hypsométrique.

L étant la longueur du rectangle équivalent.

Les résultats d'Ig sont présentés dans le tableau 4.19.

Tableau 4.19 : Indice de pente globale Ig.

SBV	H _{5%} (m)	H _{95%} (m)	L (km)	I _g (m/ m)
01	1268	950	29.79	0.0107
02	1128	847	31.38	0.0090
03	1306	1090	38.08	0.0057
04	1267	850	15.55	0.0268
05	1125	862	20.63	0.0127

Tableau 4.20 : classifications O.R.S.T.O.M.

1	relief très faible	I _g <0.002
2	relief faible	0.002< I _g <0.005
3	relief assez faible	0.005< I _g <0.01
4	relief modéré	0.01< I _g <0.02
5	relief assez fort	0.02< I _g <0.05
6	relief fort	0.05< I _g <0.1
7	relief très fort	0.1< I _g

L'indice de pente global sert à classer le relief d'un bassin, mais aussi une comparaison plus efficace et plus poussée des bassins, du point de vue relief. Il convient de calculer la dénivelée spécifique.

IV.8.4.3 Dénivelée spécifique D_s

L'indice Ig décroît pour un même bassin lorsque la surface augmente, il était donc difficile de comparer des bassins de tailles différentes. La dénivelée spécifique D_s ne présente pas cet inconvénient : elle dérive de la pente globale Ig en la corrigeant de l'effet de surface admis étant inversement proportionnel à \sqrt{S} :

$$D_s = I_g \cdot \sqrt{S} \quad (4.11)$$

Tableau 4.21 : Dénivelée spécifique D_s.

Sous bassins	01	02	03	04	05
Dénivelée spécifique D _s	109.08	71.25	49.24	133.04	103.58

Tableau 4.22 : Classifications O.R.S.T.O.M.

R1	Relief très faible	DS<10m
R2	Relief faible	10m<DS<25m
R3	Relief assez faible	25m<DS<50m
R4	Relief modéré	50m<DS<100m
R5	Relief assez fort	100m<DS<250m
R6	Relief fort	250m<DS<500m
R7	Relief très fort	DS>500m

La pente est le facteur le plus déterminant dans le processus de formation du ruissellement de surface. Le bassin versant de Sigus est caractérisé par une pente moyenne faible de 5,2%. Le SBV 03 présente une pente moyenne douce de 12,95%, c'est la valeur la plus élevée parmi tous les SBV. Les autres SBV ont des pentes moyennes faibles qui varient de 4,86 à 5,93 (tableaux 4.17 4.18). Pour l'indice de pente globale, le SBV 04 a un relief fort, les SBV 01 et 05 ont un relief modéré et pour les SBV 02 et 03 le relief est assez faible (tableaux 4.19, 4.20). Les SBV 01, 04 et 05 ont une D_s entre 103,58 et 133,04 ce qui signifie que le relief est assez fort alors que le SBV 02 a un relief modéré et le SBV 03 a un relief faible (tableaux 4.21, 4.22).

L'analyse des résultats des différents indices de pentes montre une grande ambiguïté ce qui ne permet pas l'évaluation du bassin versant en terme d'impact de la pente sur le ruissellement. L'observation de la carte des pentes donne une vision plus claire de la distribution des pentes sur le bassin versant. Les valeurs les plus excessives correspondent aux zones montagneuses plus hautes du bassin versant. Mais les pentes les plus faibles sont observées au milieu là où se trouvent des terres plates qui correspondent aux champs agricoles.

IV.8.5 Le temps de concentration (T_c)

Le temps de concentration est un paramètre important de nombreux modèles hydrologiques modernes utilisés par les professionnels et les scientifiques. Il n'existe cependant pas de définition universellement acceptée de ce paramètre, et on peut trouver dans la littérature plusieurs définitions ainsi que des procédures d'estimation connexes (Grimaldi, 2012). Le temps de concentration est calculé par la formule de Giandotti. Le tableau 4.23 présente les résultats du T_c .

$$T_c = \frac{4 \times \sqrt{S} + 1.5 \times L}{0.8 \times \sqrt{H_{moy} - H_{min}}}$$

S : Surface du bassin versant en Km²

L : longueur du talweg principal en Km

H_{moy}, H_{min} : respectivement la hauteur moyenne et minimale du S.B.V en m.

Tableau 4.23 : Les temps de concentration des SBV

Sous bassin	H _{moy} (m)	H _{min} (m)	L (km)	Tc (h)
01	778	909.31	11.315	6.31
02	775	891.41	3.206	4.24
03	773	880.2	9.363	5.89
04	761	950.54	5.58	2.56
05	752	871.08	11.039	5.62

IV.9 Conclusion

Pour mieux comprendre l'influence du bassin versant sur la genèse du ruissellement, et par conséquent l'inondation des zones urbaines qui se situent à l'exutoire du bassin versant, les paramètres morphométriques du bassin versant de Sigus sont extraits et calculés en utilisant le MNT, un SIG et les différentes formules nécessaires. Les résultats de l'évaluation du réseau hydrographique, de la forme du bassin versant et du relief indiquent que le bassin versant du Sigus a une forte tendance aux inondations.

Chapitre V

Détermination du ruissellement

V.1 Introduction

Les inondations en milieu urbain sont causées, souvent, par des précipitations intenses. Ce chapitre est consacré à déterminer le débit maximal de la crue centennale dans le bassin versant de Sigus. D’abord, l’étude et l’analyse des données pluviométriques. Puis, la détermination du coefficient de ruissellement par la méthode SCS-CN en utilisant une approche couplée SIG-Téledétection. Enfin, l’estimation du débit de crue sur la base des paramètres déterminées précédemment.

V.2 Analyse des données pluviométriques

V.2.1 Pluies maximales journalières

Il est préférable d’estimer le ruissellement à partir des mesures des précipitations disponibles (Souli, 2012). Les données collectées sont celles de la station pluviométrique de Fourchi code 100511 (figure 5.1). Elles ont été collectées auprès de l’Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH). Nous avons considéré les précipitations journalières maximales (P_{jmax}) correspondants aux événements d’inondations du 22/09/1995 et 01/10/2001 montrées sur le tableau 5.1.

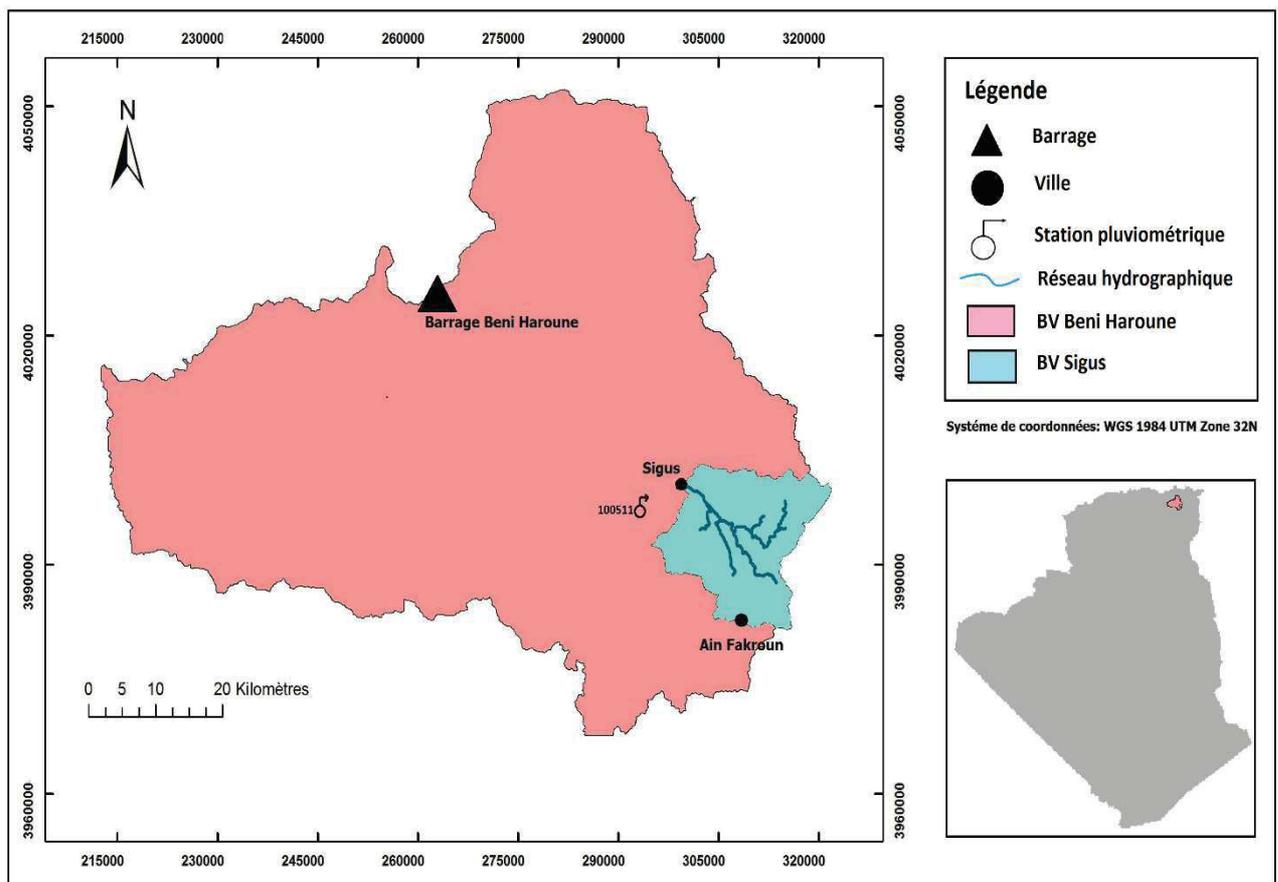


Figure 5.1 : Carte de situation du bassin versant Sigus.

Tableau 5.1 : Pluies journalières maximales observées à la station de Fourchi (en gras les valeurs maximales considérées dans la détermination du ruissellement).

année	P_{jmax} (mm)	année	P_{jmax} (mm)	année	P_{jmax} (mm)
1970	19.4	1985	16.8	2000	25
1971	62	1986	80	2001	80
1972	43	1987	12	2002	39
1973	19	1988	30	2003	38
1974	24	1989	20	2004	33
1975	29	1990	42	2005	18
1976	30.9	1991	31	2006	25.5
1977	60	1992	49.8	2007	33
1978	60.3	1993	41	2008	28.5
1979	39	1994	31	2009	24
1980	28.5	1995	125	2010	41
1981	18	1996	18	2011	22
1982	24	1997	33.8		
1983	60	1998	40		
1984	63	1999	56		

Tableau 5.2 : statistiques de la série pluviométrique

Statistique	Valeur
Nombre d'observations	41
Minimum	12.0
Maximum	125.0
Amplitude	113.0
1 ^{er} Quartile	24.0
Médiane	33.0
3 ^{ème} Quartile	43.0
Moyenne	38.88
Variance (n-1)	474.525
Ecart-type (n-1)	21.784
Coefficient de variation	0.553
Asymétrie (Pearson)	1.816
Aplatissement (Pearson)	4.286

V.2.2 Procédé d'ajustement

V.2.2.1 Présentation du logiciel

HYFRAN est un logiciel qui permet d'ajuster un nombre important des données statistiques et vérifier les hypothèses d'indépendance, d'homogénéité et stationnarité. Il a été développé par l'équipe du Pr. Bernard Bobée (Professeur Émérite à l'Institut National de la Recherche Scientifique, Centre Eau-Terre et Environnement INRS-ETE, Québec).

V.2.2.2 Test d'homogénéité (test de WILCOXON).

On divise notre série en deux échantillons X et Y et on classe ensuite les valeurs de notre série par ordre croissant, par suite nous ne nous intéresserons qu'au rang de chacun des éléments dans cette série, après on calcule la somme des rangs $W_x = \sum rang x$

Wilcoxon a montré que dans le cas où les deux échantillons X et Y constituent une série la quantité W_x est comprise entre deux bornes W_{max} et W_{min} données par les formules suivantes :

$$W_{min} = \frac{(N_1 + N_2 + 1)N_1 - 1}{2} - Z_{1-\frac{\alpha}{2}} \times \sqrt{\frac{N_1 + N_2 (N_1 + N_2 + 1)}{12}} \quad (5.1)$$

$$W_{max} = (N_1 + N_2 + 1)N_2 - W_{min} \quad (5.2)$$

Avec

N_1 et N_2 : Valeur de l'échantillon X et Y,

$Z_{1-\frac{\alpha}{2}}$: Représente la valeur de la variable réduite de la loi normale correspondant à $(1 - \frac{\alpha}{2})$ seuil de la confiance de 95% = 1.96)

Les résultats

$$W_x = \sum rang x = 432$$

$$W_{min} = 388.998$$

$$W_{max} = 601.001$$

Donc $388.998 < 432 < 601.001$ donc $W_{min} < W_x < W_{max}$ **donc la série est homogène**

V.2.2.3 Résultats d'ajustement

V.2.2.3.1 La méthode graphique

Cette méthode consiste à observer les graphes obtenus et désigner la courbe la plus proche aux points. La figure 5.2 regroupe les résultats d'ajustement des différentes lois (Exponentiel, GEV, Gumbel, Gamma, et Lognormal). L'observation du graphe montre que les trois lois Exponentiel, GEV et Lognormal sont loin alors que Gamma et Gumbel sont très proches et presque identiques mais on ne peut pas choisir la loi adéquate pour l'étude de la série d'observation ce qui nécessite une autre méthode de comparaison.

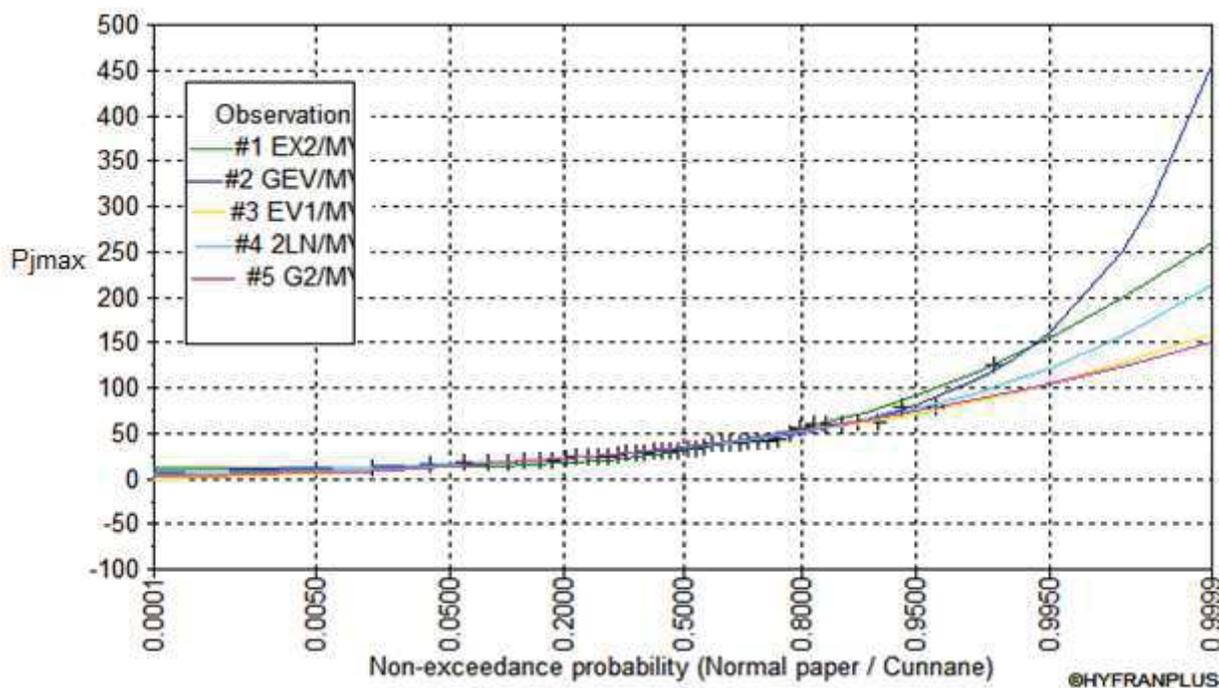


Figure 5.2 : les résultats d’ajustement

V.2.2.3.2 La méthode des critères

Selon Lebarbier (2004), la sélection d’un modèle est un problème très fréquent, c’est pourquoi depuis les années 70 les chercheurs ont développé des méthodes pour ce but. L’une des méthodes apportées par les statisticiens à ce problème est la minimisation d’un critère pénalisé. Les premiers critères qui apparaissent sont : le critère d’information d’Akaike "AIC" (Akaike, 1973) et le critère d’information Bayésien "BIC" (Schwarz, 1978), le MDL (minimum description length, Rissanen, 1978), le C_p (Mallows, 1974). L’AIC est le critère qui a connu plusieurs corrections telles qu’AICC (Hurvich et Tsai, 1989), c-AIC (Sigiura, 1978), AICR (Ronchetti, 1985), QAIC (Burnham et Anderson, 2002) et c-QAIC (Shi et Tsai, 2004). Parmi tous ces critères AIC et BIC sont largement diffusés et appliqués.

Pour la sélection d’un modèle, on choisit celui avec AIC et BIC les plus faibles. Les résultats d’ajustement (tableau 5.3) montrent que la loi Lognormal donne la meilleure valeur.

Tableau 5.3 : résultat d’ajustement pour une période de retour 100 ans

Loi d'ajustement	Nb.param	XT	P(Mi)	P(Milx)	BIC	AIC
Lognormal	2	107.434	20	61.39	362.669	359.193
GEV	3	131.781	20	14.55	365.549	360.336
Gumbel	2	94.459	20	12.2	365.901	362.425
Gamma	2	95.592	20	8.56	366.609	363.133
Exponentiel	2	135.976	20	3.3	368.515	365.04

V.2.3 la pluie de courte durée

V.2.3.1 Pluie de courte durée et leurs intensités à différentes Fréquences

Les précipitations exceptionnelles (P_{ct}) de durée (t) inférieure à 24h (de courte durée) sont reliées à la précipitation journalière fréquentielles P_{jmax} selon la relation de MONTANARI (Mohymont, 2014).

$$P_{CT} = P_{maxj} \left(\frac{t}{24} \right)^b \quad (5.3)$$

Avec :

P_{ct} : La pluie de courte durée de fréquence égale à celle de P_{jmax} en (mm) ;

P_{jmax} : La pluie maximale journalière pour différentes fréquences ;

t : la durée en heures ;

b : L'exposant climatique. Il est calculé en fonction de $f(X, Y, Z, P_{jmax})$ par la formule (5.4) (Habibi, 2012. Bouaïchi, 2014).

$$b = - 0,00003 X + 0,00094 Y - 0,00009 Z + 0.0024 P_{jmax} - 0,03 \quad (5.4)$$

$$b = 0.42$$

V.2.3.2 Intensités maximales à différentes Fréquences

La détermination des intensités maximales pour différentes périodes de retour se fait par le biais de la formule :

$$I_{max} = \frac{P_{CT} (mm)}{\Delta T(h)} \quad (5.5)$$

I_{max} : Intensité maximale (mm/h)

Les différentes valeurs de Pluie de courte durée et leurs intensités à différentes Fréquences sont représentées dans le tableau 5.4 ainsi que les courbes IDF (figure 5.3) et Courbe Pluies de courte durée fréquentiel (figure 5.4).

Tableau 5.4 : Pluie de courte durée et leurs intensités à différentes fréquences.

100 ans			50 ans			20 ans			10 ans		
t	P _{ct}	I _{max}	t	P _{ct}	I _{max}	t	P _{ct}	I _{max}	t	P _{ct}	I _{max}
0.5	21.14	42.27	0.5	18.46	36.92	0.5	15.07	30.14	0.5	12.58	25.16
1	28.28	28.28	1	24.70	24.70	1	20.16	20.16	1	16.83	16.83
1.5	33.53	22.35	1.5	29.28	19.52	1.5	23.90	15.93	1.5	19.96	13.31
2	37.83	18.92	2	33.04	16.52	2	26.97	13.49	2	22.52	11.26

2.5	41.55	16.62	2.5	36.29	14.52	2.5	29.62	11.85	2.5	24.73	9.89
3	44.86	14.95	3	39.18	13.06	3	31.98	10.66	3	26.70	8.90
3.5	47.86	13.67	3.5	41.80	11.94	3.5	34.12	9.75	3.5	28.49	8.14
4	50.62	12.65	4	44.21	11.05	4	36.09	9.02	4	30.13	7.53
4.5	53.18	11.82	4.5	46.45	10.32	4.5	37.92	8.43	4.5	31.66	7.04
5	55.59	11.12	5	48.55	9.71	5	39.63	7.93	5	33.09	6.62
5.5	57.86	10.52	5.5	50.54	9.19	5.5	41.25	7.50	5.5	34.44	6.26
6	60.02	10.00	6	52.42	8.74	6	42.79	7.13	6	35.73	5.95
6.5	62.07	9.55	6.5	54.21	8.34	6.5	44.25	6.81	6.5	36.95	5.68
7	64.03	9.15	7	55.92	7.99	7	45.65	6.52	7	38.11	5.44
7.5	65.91	8.79	7.5	57.57	7.68	7.5	46.99	6.27	7.5	39.24	5.23
8	67.72	8.47	8	59.15	7.39	8	48.28	6.04	8	40.31	5.04
8.5	69.47	8.17	8.5	60.67	7.14	8.5	49.53	5.83	8.5	41.35	4.87
9	71.16	7.91	9	62.15	6.91	9	50.73	5.64	9	42.36	4.71
9.5	72.79	7.66	9.5	63.58	6.69	9.5	51.90	5.46	9.5	43.33	4.56
10	74.38	7.44	10	64.96	6.50	10	53.03	5.30	10	44.27	4.43
10.5	75.92	7.23	10.5	66.31	6.31	10.5	54.12	5.15	10.5	45.19	4.30
11	77.41	7.04	11	67.61	6.15	11	55.19	5.02	11	46.08	4.19
11.5	78.87	6.86	11.5	68.89	5.99	11.5	56.23	4.89	11.5	46.95	4.08
12	80.30	6.69	12	70.13	5.84	12	57.25	4.77	12	47.80	3.98
12.5	81.68	6.53	12.5	71.34	5.71	12.5	58.24	4.66	12.5	48.62	3.89
13	83.04	6.39	13	72.53	5.58	13	59.20	4.55	13	49.43	3.80
13.5	84.37	6.25	13.5	73.69	5.46	13.5	60.15	4.46	13.5	50.22	3.72
14	85.67	6.12	14	74.82	5.34	14	61.07	4.36	14	50.99	3.64
14.5	86.94	6.00	14.5	75.93	5.24	14.5	61.98	4.27	14.5	51.75	3.57
15	88.19	5.88	15	77.02	5.13	15	62.87	4.19	15	52.49	3.50
15.5	89.41	5.77	15.5	78.09	5.04	15.5	63.74	4.11	15.5	53.22	3.43
16	90.61	5.66	16	79.14	4.95	16	64.60	4.04	16	53.94	3.37
16.5	91.79	5.56	16.5	80.17	4.86	16.5	65.44	3.97	16.5	54.64	3.31
17	92.94	5.47	17	81.18	4.78	17	66.26	3.90	17	55.33	3.25
17.5	94.08	5.38	17.5	82.17	4.70	17.5	67.07	3.83	17.5	56.01	3.20
18	95.20	5.29	18	83.15	4.62	18	67.87	3.77	18	56.67	3.15
18.5	96.31	5.21	18.5	84.11	4.55	18.5	68.66	3.71	18.5	57.33	3.10
19	97.39	5.13	19	85.06	4.48	19	69.43	3.65	19	57.97	3.05
19.5	98.46	5.05	19.5	85.99	4.41	19.5	70.19	3.60	19.5	58.61	3.01
20	99.51	4.98	20	86.91	4.35	20	70.94	3.55	20	59.24	2.96
20.5	100.55	4.90	20.5	87.82	4.28	20.5	71.68	3.50	20.5	59.85	2.92
21	101.57	4.84	21	88.71	4.22	21	72.41	3.45	21	60.46	2.88
21.5	102.58	4.77	21.5	89.59	4.17	21.5	73.13	3.40	21.5	61.06	2.84
22	103.57	4.71	22	90.46	4.11	22	73.84	3.36	22	61.66	2.80
22.5	104.56	4.65	22.5	91.32	4.06	22.5	74.54	3.31	22.5	62.24	2.77
23	105.53	4.59	23	92.17	4.01	23	75.23	3.27	23	62.82	2.73
23.5	106.48	4.53	23.5	93.00	3.96	23.5	75.92	3.23	23.5	63.39	2.70
24	107.43	4.48	24	93.83	3.91	24	76.59	3.19	24	63.95	2.66

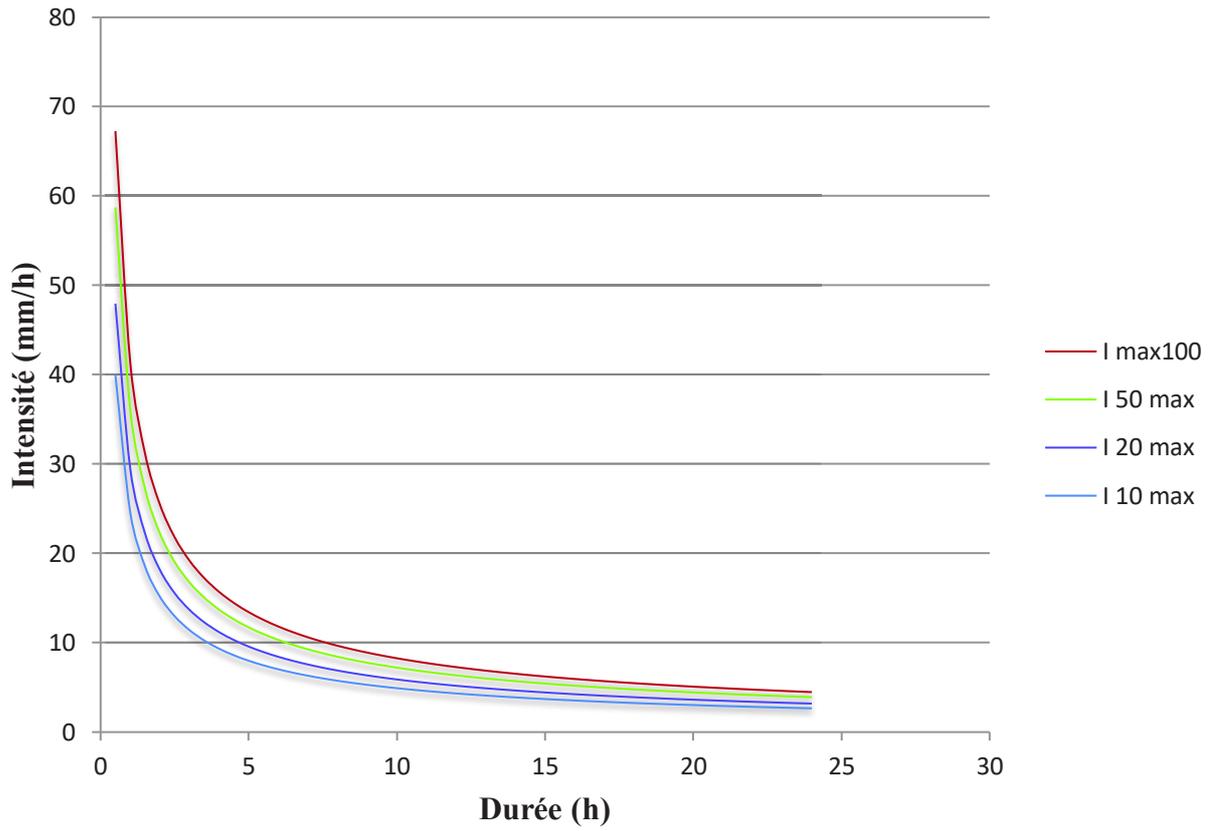


Figure 5.3 : Courbes Intensité-Durée-Fréquence à la station de Fourchi

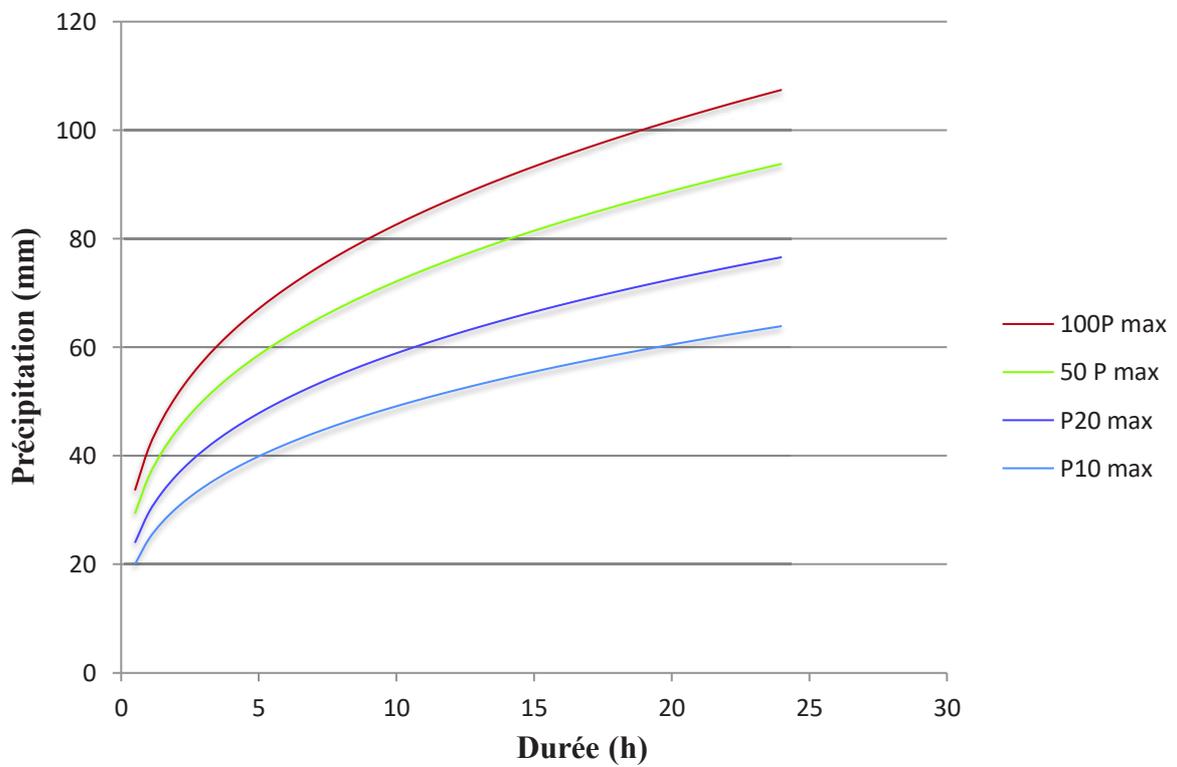


Figure 5.4 : Courbe de pluies fréquentielles de courte durée

V.3 Le débit de crue

V.3.1 Le concept du période de retour

Les termes décennale, centennale et millénaire signifient des périodes de retour. Cette notion est destinée à caractériser la fréquence d'apparition d'un événement catastrophique extrême Ponce (1994). En hydrologie, les périodes de retour varient généralement de 10 ans à 100 ans, pour les régions où les précipitations maximales probables (PMP) n'ont pas été définies, jusqu'à 10.000 ans. Le choix de la période de retour dépend de divers facteurs, y compris l'étendue du bassin versant, le degré du risque, l'importance de la structure, et le degré de conservatisme souhaité. La période de retour la plus basse est de 5 à 10 ans, elle est applicable dans l'assainissement urbain. En règle générale, ces périodes de retour sont associées à des zones de drainage inférieures à 100 ha. Pour ces zones, la méthode rationnelle peut être utilisée pour estimer le débit de pointe. Dans certains cas, en particulier pour les zones de plus de 100 ha, des périodes de retour plus longues peuvent être justifiées. Dans l'hydrologie des petits bassins versants, le débit de pointe est liée à l'intensité des précipitations, qui à son tour est liée au temps de la concentration (à travers les courbes intensité-durée-fréquence applicables). Les petites surfaces de drainage ont un temps de concentration réduit et cela va produire une intensité élevée et un débit de pointe élevé par unité de surface. Cependant, étant donné que la zone est faible, le débit de pointe est proportionnellement faible. Ainsi, pour les petites zones où le temps de concentration est mesuré en minutes, il n'est pas rentable de concevoir pour de longues périodes de retour.

Les travaux de protection contre les inondations régionales dans les zones urbanisées sont des structures telles que des digues et des élargissements des canaux. Dans ce cas, les périodes de retour peuvent varier entre 50 et 100 ans. Le temps de concentration est beaucoup plus grand, disant quelques heures, et l'intensité des précipitations est d'autant plus faible, ce qui entraîne un débit de pointe relativement faible par unité de surface. Cependant, le débit de pointe peut être grand, ce qui reflète plus la taille de la zone de drainage que l'intensité des précipitations. La période de retour de 100 ans équivaut à quatre générations humaines. La valeur de 100 ans ne signifie pas que la structure sera exposée à risque exactement tous les 100 ans. Au contraire, cela signifie que la structure sera exposée au risque, soit 10 fois tous les 1000 ans. Le débit de pointe d'une crue de 100 ans est appliqué pour l'estimation des plaines inondables et les travaux de protection contre les crues. Les Directives pour la sélection de la période de retour selon le projet sont illustrées dans le tableau 5.5.

Tableau 5.5 : Directives pour la sélection de la période de retour

Type de projet	Période de retour (année)
Assainissement urbaine (risque faible) (jusqu'à 100 ha)	5 à 10
Assainissement urbaine (risque moyen) (plus de 100 ha)	25 à 50
Assainissement routier	25 à 50
Evacuateur de crue principal (Barrage)	25 à 100
Assainissement des autoroutes	50 à 100
Digues (risque moyen)	50 à 100
Assainissement urbaine (risque élevé) (plus de 1000 ha)	50 à 100
développement des plaines inondables	100
conception des ponts (pilles)	100 à 500
Digues (risque élevé)	200 à 1000
Evacuateur de crue d'urgence (Barrage)	100 à 10,000 (PMP)

V.3.2 Calcul du débit de crue

Selon Taha (2001), il existe plusieurs méthodes empiriques pour le calcul du débit de pointe qui engendre, souvent, des inondations. Ces méthodes sont classées en trois catégories, des méthodes utilisant uniquement la superficie du bassin versant telles que : Froncou-Radier (1969), Hong (1984). Des formules faisant intervenir la période de retour telles que : Fuller (1914), Maillet et Gauthier (1903). Des formules faisant intervenir les précipitations telles que Turazza (1880). Cette dernière est donnée par la formule 5.6 :

$$Q = \frac{C_r \cdot H \cdot A}{3,6 \cdot t_c} \quad (5.6)$$

Q : débit de crue maximum en m³/s

C_r : coefficient de ruissellement du bassin pour la crue considérée

H : hauteur totale maximale de précipitation correspondant au temps de concentration du bassin, en mm

T_c : temps de concentration en heures

A : aire du bassin versant en km²

Parmi toutes les formules existantes, le choix de celle de Turazza semble plus judicieux car elle englobe des paramètres signifiant tous les processus indispensables pour générer le ruissellement. La surface reflète l'étendu du bassin versant. Le facteur pluviométrique est présenté sous forme d'intensité (hauteur de pluie et temps de concentration). Le coefficient de

ruissellement représente le paramètre ayant plus de signifiante sur le comportement hydrologique du bassin versant. Il exprime le degré d'imperméabilité du bassin versant, cela est lié directement à la composition physique de la surface et la subsurface du bassin versant. Sa détermination reste un défi pour les ingénieurs, vu l'étendu et la complexité du milieu. La partie suivante de ce chapitre est consacré à la détermination du coefficient de ruissellement du bassin versant de Sigus.

V.4 Détermination du coefficient de ruissellement par la méthode SCS-CN

Le ruissellement de surface est fonction de plusieurs facteurs tel que, la durée et l'intensité des précipitations, le type de sol, l'occupation du sol, le couvert végétal, la pente et la densité du réseau hydrographique (Ponce, 1996 ; Perrone, 1998 ; Mirsha, 2003). Généralement, le ruissellement important prend naissance dans un bassin versant naturel. Ce bassin, qui est un système physique extrêmement hétérogène et compliqué, transforme les précipitations en flux dans les rivières et les canaux vers les exutoires qui sont, souvent, des zones urbaines (Brooks, 2013). Dans les études sur les inondations en milieu urbain causées par des précipitations intenses, la fonction de production se limite, souvent, à un simple coefficient de ruissellement car le volume d'eau ruisselé concerné par les pertes initiales est négligeable par rapport au volume total (Lhomme, 2006). Dans les villes de petites et moyennes importances, la majorité des flux inondant viennent du débordement du lit majeur du cours d'eau, ce dernier étant alimenté par le bassin versant qui entoure la ville (Zevenbergen, 2010). Dans ce cas, la fonction de production est plus complexe vu l'hétérogénéité du milieu. Le volume d'eau provenant du bassin versant naturel est plus important que celui produit dans la ville et son estimation est l'un des problèmes hydrologiques majeurs dans les bassins versants non jaugés. Compte tenu du nombre des variables et des incertitudes relatives au ruissellement, l'utilisation d'un modèle conceptuel semi-distribué est indispensable. Elle nécessite des investigations in-situ, des prélèvements et des vérifications sur terrains pour mieux assimiler le milieu naturel. Parmi les méthodes développées pour l'estimation du ruissellement dans les bassins versants non jaugés, la méthode SCS (U.S.D.A, 1986) largement utilisée en raison de sa simplicité et du nombre limité de paramètres exigés (Mary, 1995 ; Banasik, 2010 ; Xiao, 2011 ; Mirsha, 2012, Ji-Hong, 2014 ; Giridhar, 2014). La méthode du SCS est basée sur deux paramètres pour estimer le ruissellement sous forme de hauteur à partir de la pluviométrie. Ces deux paramètres sont, le potentiel de rétention maximale S , et l'abstraction initiale I_a . Ils sont exprimés en termes de Curve Number ou CN (Elhakeem, 2009). Le terme CN est en fonction du type de sol, de l'occupation de sol, du couvert végétal et des conditions

antécédentes d'humidité (USDA, 1986). La méthode SCS-CN a été utilisée sur les bassins versants ruraux non jaugés, elle a évolué de son objectif initial pour être adoptée à l'estimation de ruissellement dans les bassins versant urbains et forestiers (Hawkins, 2009).

Le terme coefficient de ruissellement (C_r) désigne le rapport entre la hauteur d'eau ruisselée à la sortie d'une surface considérée (dite "pluie nette") et la hauteur d'eau précipitée (dite "pluie brute"). Dans une étude hydrologique d'un bassin versant naturel, l'estimation de ce paramètre est indispensable car il offre une meilleure interprétation de la réponse hydrologique des différentes zones du bassin versant. Mais l'estimation du C_r reste un défi majeur pour les ingénieurs car elle nécessite un nombre de données énormes sur un territoire assez vaste.

Le coefficient de ruissellement est une variante spatio-temporelle. Il varie dans le temps puisque l'infiltration est variable car les premières fractions de la pluie sont, souvent, absorbées par le sol ce qui donne un coefficient de ruissellement faible, au fur et à mesure, le sol se sature et le coefficient de ruissellement augmente. La variation spatiale est due, d'une part, à l'hétérogénéité du complexe type-occupation des sols, et d'autre part à la variation de la distribution spatiale des précipitations au sein du bassin versant.

Le coefficient de ruissellement est un paramètre crucial pour l'estimation du débit des crues dans les bassins versants non jaugés. Les tableaux et les graphiques permettent de le déterminer d'une manière empirique ce qui peut conduire à des incohérences dans l'application, par conséquent, il est important d'identifier d'autres paramètres qui peuvent être utilisés pour l'évaluer plus directement (Del Giudice, 2012). Pour une détermination rigoureuse du coefficient de ruissellement, la connaissance des composantes physiques du bassin versant est primordiale. Ces composantes sont : les types des sols et l'occupation des sols.

V.4.1 La base de données type des sols

Pour la détermination du coefficient du ruissellement C_r , la connaissance de la formation des sols et sa distribution spatiale dans le bassin versant est indispensable (Shadeed, 2010). Les SIG se présentent comme un support efficace pour la cartographie des sols. Ils rendent l'observation sur le terrain et le processus de cartographie plus facile et rapide (Weber, 2008). Pour cela, une base des données "Type des Sols" est réalisée sous ArcGIS.

V.4.1.1 Méthode d'investigation indirecte

Les méthodes indirectes d'investigation du sol peuvent être utilisées afin de mieux localiser les zones cibles à échantillonner. Ces méthodes ne remplacent pas les méthodes d'échantillonnage mais peuvent être utilisées conjointement avec celles-ci. Elles ont l'avantage d'optimiser les travaux de terrain et les résultats obtenus sont généralement qualitatifs (C.E.A.E.Q, 2008). Parmi ces méthodes, la télédétection se présente comme un outil performant. Elle a été largement utilisée au cours des dernières années (Manchanda, 2002 ; Wulf, 2014). Elle permet d'obtenir des données d'un processus à partir d'un emplacement éloigné de l'utilisateur (Shamsi, 2005). Le processus le plus récent en télédétection est l'extraction des caractéristiques des sols à partir d'un traitement d'images satellitaires (Aksoy, 2009 ; Mitchell, 2013). Pour cela, L'image utilisée est celle multispectrale du satellite "Landsat 8 OLI" du 21/07/2015. La combinaison des bandes spectrales la plus utilisée pour distinguer les différents types des sols est 6-7-8 (rouge-vert-bleu) (Boettinger, 2009 ; Loyd, 2013). Pour le traitement de l'image, le logiciel utilisé est "ERDAS IMAGINE 2014" basée sur la technique de classification non supervisée selon 10 classes (Boettinger, 2008). Chaque classe est une réponse spectrale du sol, donc un type probable. La figure illustre les classes des sols obtenues.

V.4.1.1.1 Logiciels et données utilisés

Le processus le plus récent en télédétection est l'utilisation des images satellitaires et le traitement de ces images à l'aide des logiciels.

- L'image utilisée est une image du satellite "LANDSAT 8 OLI" du 21/07/2015
- Les logiciels utilisés sont :
 - ERDAS 2014 : pour le traitement d'image
 - ArcGIS 10.2.2 : pour la production et la finalisation des cartes

Sur ERDAS, la combinaison des bandes 6-7-8 (R-V-B) est l'optimale pour visualiser et distinguer les différents type de sols. En utilisant la technique de la classification supervisée suivant 10 classes on obtient 10 zones différentes chacune correspond à un type de terrain unique (figure 5.5).

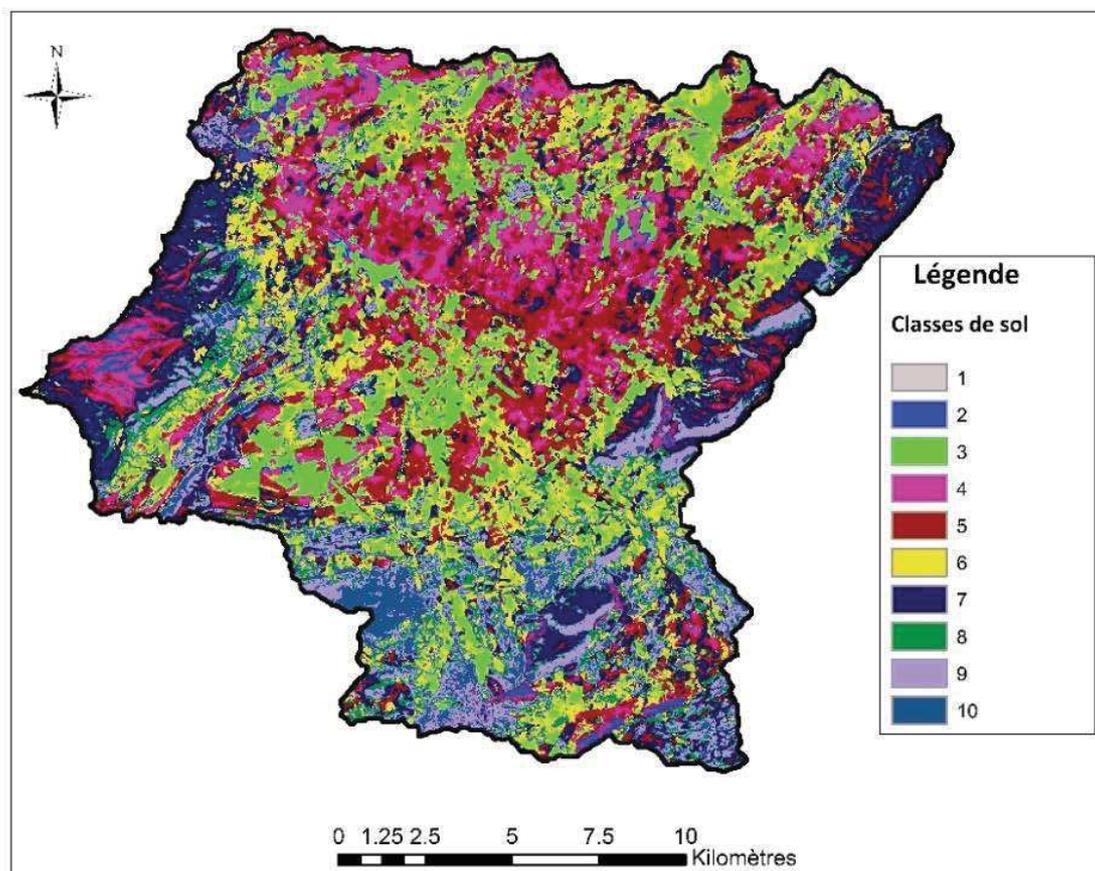


Figure 5.5 : Carte des classes de sol obtenues par ERDAS

V.4.1.2 Campagne d'échantillonnage

Avant commencer l'échantillonnage, on doit définir l'objectif qui est dans ce cas la détermination de la texture des sols du bassin versant de Sigus pour une étude hydrologique. Une bonne planification de la campagne d'échantillonnage est nécessaire pour optimiser le temps et le cout d'un part et éviter les erreurs d'autre part. Elle nécessite la compréhension et la maîtrise des différentes approches de localisation des points de prise et les méthodes d'échantillonnage.

Dans cette étude on opte pour l'approche de localisation sur plan vu l'étendu du bassin versant, elle se fait généralement sur des cartes. Comme méthode d'échantillonnage, celle combiné entre la méthode ciblée et la méthode aléatoire simple plus rigoureuse. On sélectionne chaque classe séparément (ciblé) puis dans la même classe l'emplacement des points s'effectue d'une façon aléatoire. En poursuivant les étapes précédentes, 41 points sont obtenus et distribués sur la carte (tableau 5.6).

Tableau 5.6 : Points d'échantillonnage préliminaire

Classes	Nature	Num Point d'échantillonnage	Accessibilité
2	Forets	2.1	oui
		2.2	oui
		2.3	oui
		2.4	oui
		2.5	non
		2.6	oui
		2.7	non
3	Terre Agricole	3.1	oui
		3.2	oui
		3.3	non
		3.4	non
		3.5	non
		3.6	oui
		3.7	oui
		3.8	non
		3.9	oui
		3.10	non
4	Terre Agricole	4.1	oui
		4.2	oui
		4.3	oui
		4.4	non
		4.5	non
		4.6	oui
		4.7	oui
		4.8	oui
		4.9	non
		4.10	non
5	Terre Agricole	5.1	oui
		5.2	oui
		5.3	oui
		5.4	oui
		5.5	oui
6	Terre Agricole	6.1	non
		6.2	oui
		6.3	oui
		6.4	oui
		6.5	oui
		6.6	oui
8	Terrain nu	8.1	oui

		8.2	non
		8.3	Oui
9	Zone urbaine	Sig 9.1	oui
		Sig 9.2	oui
10	Zone urbaine	Sig 10.1	oui

Un autre critère doit être pris en considération, c'est l'accessibilité à la zone de prise. Après l'analyse de la carte suivant ce critère le nombre des points est devenu 18 (figure 5.6 et tableau 5.7).

Tableau 5.7 : Points accessibles

Classes	Nature	Num Point d'échantillonnage	Commune ou lieu	route d'accession
2	Forets	2,1	Sigus	RN10
		2,2	Sigus	RN10
		2,3	Sigus	RN10
3	Terre agricole	3,1	Ain Fakroune - Taxas	RN10
		3,2	Ain Fakroune - Taxas	RN10
		3,7	Mechta Ben Raiane	W3
4	Terre agricole	4,1	Mechta Ouled Nacer	W3
		4,2	Sigus	RN10 - Piste
5	Terre agricole	5,1	Ain Fakroune - Taxas	RN10
		5,2	Mechta Ben Raiane	W3
		5,5	Sigus	RN10
6	Terre agricole	6,2	Ain Fakroune	W3
		6,4	Taxas	RN10
8	Terre nu	8,1	Ain Fakroune	RN10
		8,3	Sigus	RN10
9	Zone urbaine	Sig 9.1	Sigus	RN10
		Sig 9.2	Sigus	RN10
10	Zone urbaine	Sig 10.1	Sigus	RN10

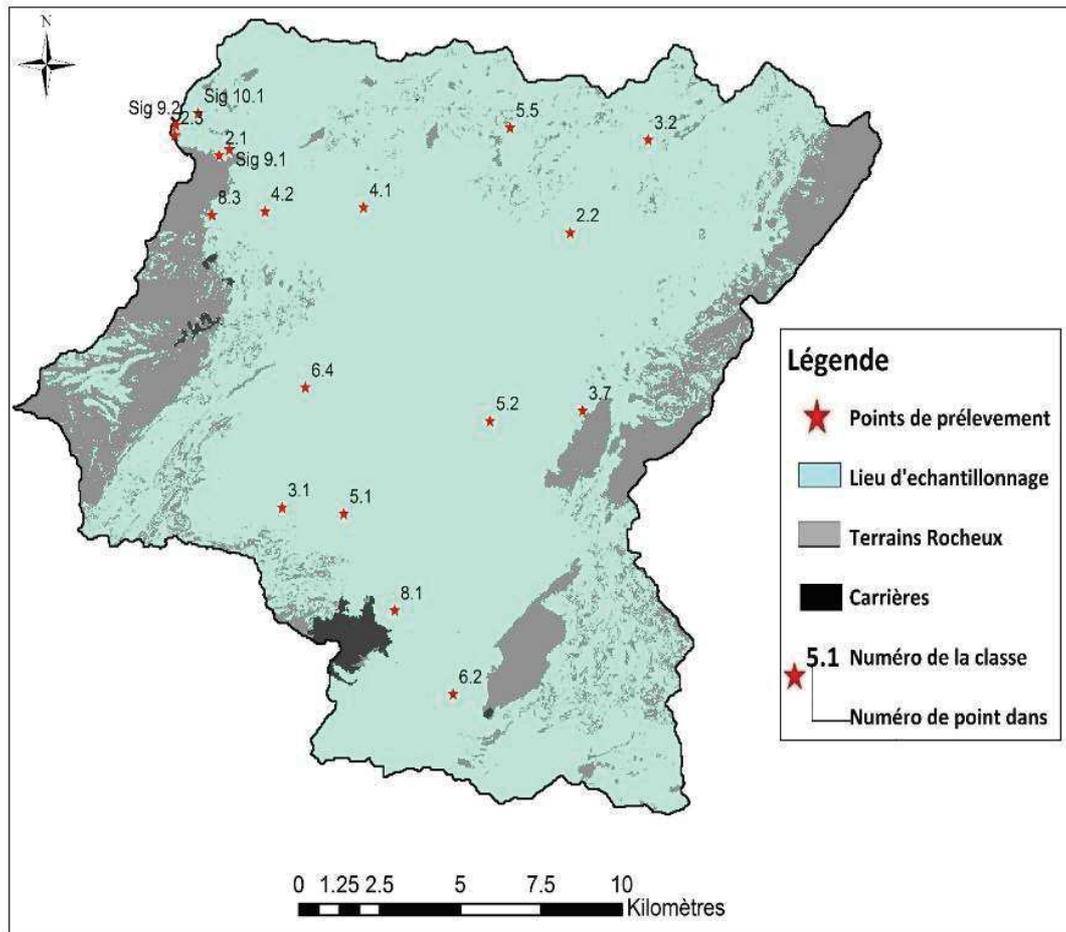


Figure 5.6 : Carte des points d'échantillonnage du sol

V.4.1.2.1 Méthode d'échantillonnage

L'échantillon doit être représentatif de toute une zone prédéterminé. Pour cela il existe plusieurs méthodes :

- L'échantillonnage de faible profondeur
- L'échantillonnage dans un puits d'exploitation ou une tranchée
- L'échantillonnage à partir d'un forage

Dans cette étude on opte pour l'échantillonnage de faible profondeur.

V.4.1.2.2 Liste du matériel utilitaire sur le terrain

- Pour le prélèvement : Une pelle, truelle et pioche
- Pour la conservation et l'identification des échantillons : Un carnet du terrain contient plusieurs copies du formulaire, Les sachets, Les étiquettes et le crayon à encre indélébile
- Pour nettoyage : Une Brosse et un chiffon

- Divers : Cahier de note, Carte de localisation, PC connecté à internet, Appareil photo/caméra, Trousse des premiers soins, bac pour mélanger l'échantillon.

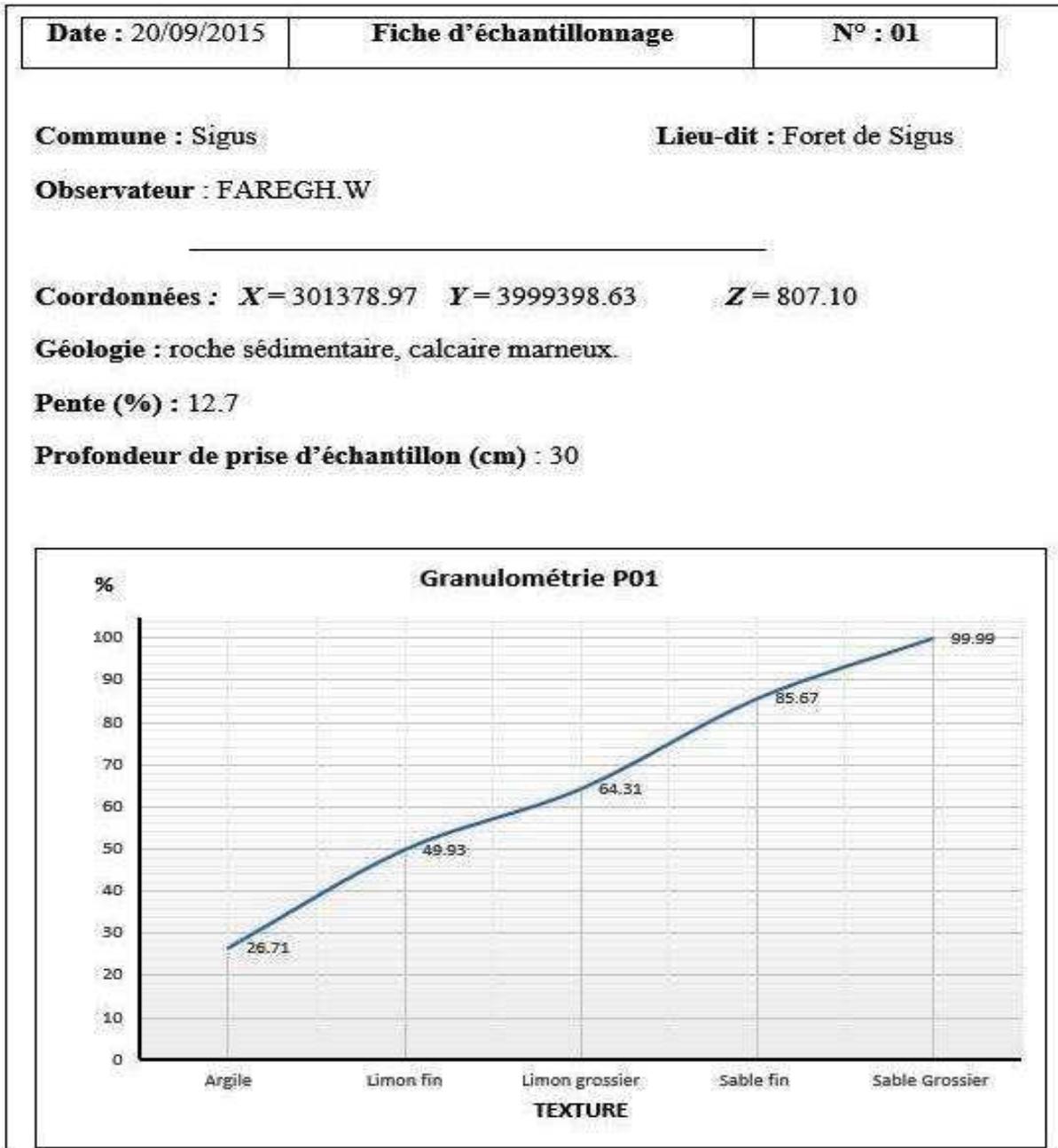


Figure 5.7 : exemple d'une fiche d'échantillonnage

La figure 5.8 illustre la distribution spatiale des types des sols sur le bassin versant. Les fractions de chaque type de sols en % et en Km² sont détaillées dans le tableau 5.8.

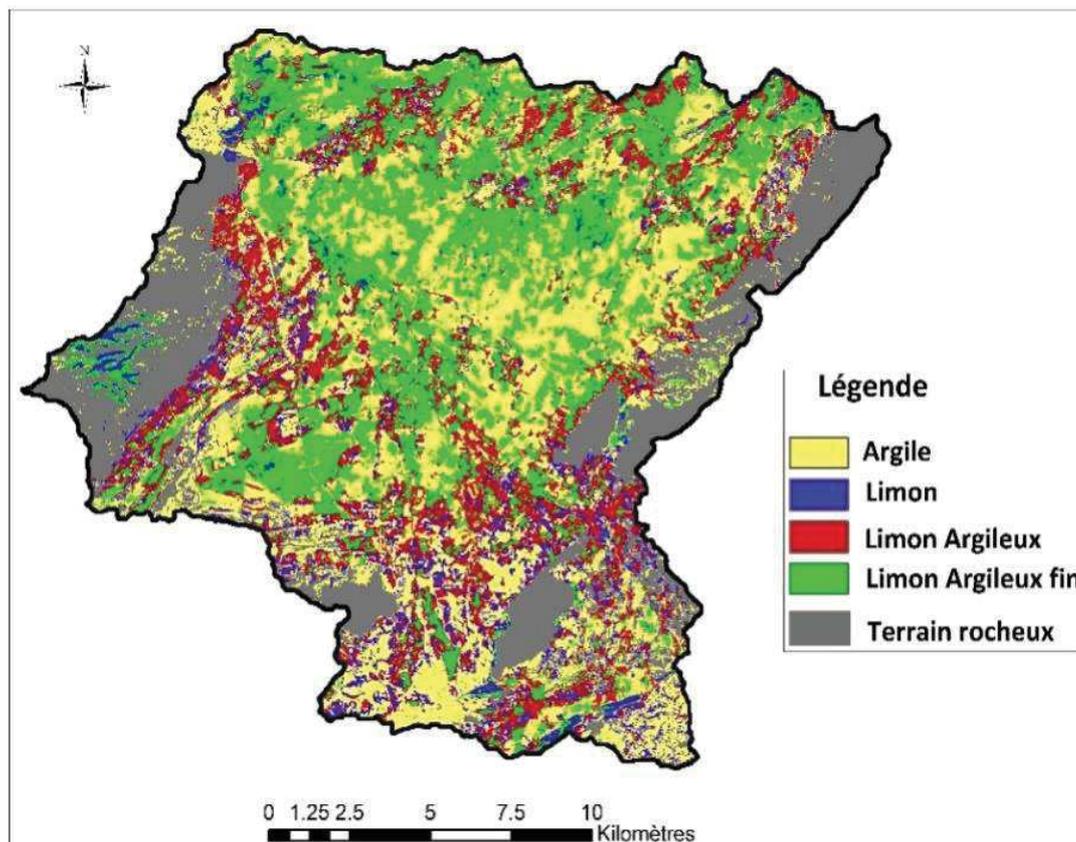


Figure 5.8 : Carte des types de sols bassin versant Sigus

Tableau 5.8 : Pourcentage des types des sols dans le bassin versant Sigus

Type de sol	Surface (Km ²)	Surface (%)
Argile	96.49	28.91
Limon	37.81	11.33
Limon Argileux	51.79	15.52
Limon Argileux fin	83.99	25.17
Terrains rocheux	63.63	19.07

V.4.2 La base des données occupation des sols

L'effet de l'occupation des sols sur l'hydrologie a été un important domaine de recherche au cours de la dernière décennie, particulièrement, sur la genèse du ruissellement (Liu, 2012). Pour cela, il était primordial de créer une base des données d'occupation des sols nommée "Occupation des sols". D'abord, on a utilisé l'image satellitaire LANDSAT 8 OLI avec une combinaison des bandes (rouge-vert-bleu) 4-3-2 qui donne les couleurs naturelles. Puis, sous ERDAS, on a effectué une classification non supervisée suivant 36 classes, sachant que le nombre des classes réelles est prédéterminé de 09. Une étape de vérification finale est indispensable, celle-ci consiste à vérifier les entités de la base de données à l'aide des images

satellitaires de haute résolution du serveur ArcGIS "World Imagery" avec une résolution de 0.3m. Le tableau 5.9 et la figure 5.9 illustrent les différents types d'occupation des sols obtenus.

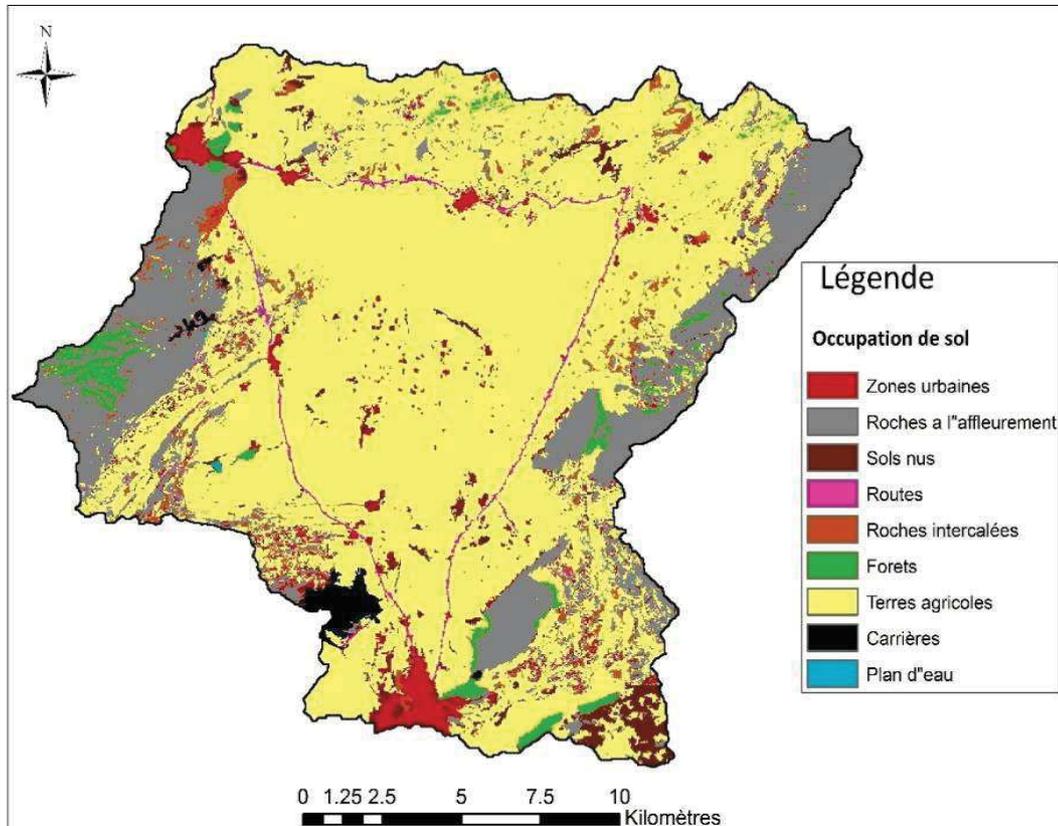


Figure 5.9 : Carte d'occupation des sols bassin versant Sigus

Tableau 5.9 : Occupation des sols sur le bassin versant Sigus

Occupation	Surface (Km ²)	Surface (%)
Carrières	3.34	1.00
Forêts	6.81	2.04
Plan d'eau	0.07	0.02
Roches à l'affleurement	60.77	18.21
Roches intercalées	6.28	1.88
Routes	2.60	0.78
Sols nus	10.56	3.16
Terres agricoles	232.21	69.59
Zones urbaines	11.06	3.31

V.4.2.1 Evaluation de la précision thématique de la carte d'occupation des sols

Avec l'avènement des techniques de télédétection, la nécessité d'effectuer une évaluation de la précision a devenu une nécessité. Traditionnellement, l'exactitude de la photo-interprétation a été acceptée sans aucune confirmation. En fait, les classifications numériques sont souvent évaluées par référence à la photo-interprétation. Une hypothèse absolue est que la photo-interprétation est 100% correcte. Cette hypothèse est rarement valable et peut conduire à une mauvaise et injuste évaluation de la classification numérique (Congalton, 1991).

Il existe plusieurs méthodes d'évaluation de la précision thématique d'une carte, parmi lesquelles la matrice de confusion et l'indice de Kappa sont largement utilisés. La matrice de confusion, connu aussi matrice d'erreur ou tableau de contingence donne une évaluation de la précision globale de la cartographie et des résultats de classification pour chaque classe thématique. La matrice de confusion se construit en mettant respectivement sur les lignes et sur les colonnes les données de référence et la classification. Ceci permet de calculer : la précision totale, l'erreur d'excédents, l'erreur de déficits, la précision pour le réalisateur.

L'indice de Kappa (Cohen, 1960), aussi nommé "Cohen's kappa" évalue dans la matrice de confusion l'accord entre les résultats obtenus (la carte) et la vérité sur terrain (la base de données) (Chalifoux, 2006). Le tableau 5.10 illustre les différentes catégories avec les valeurs de l'indice de Kappa correspondantes.

$$K = \frac{a-b}{1-b} \quad (5.7)$$

a : Précision globale

b : Accord par hasard

$$a = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N_c} X_{ii} \quad (5.8)$$

$$b = \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^{N_c} (X_{+i} \cdot X_{i+}) \quad (5.9)$$

N_c : nombre de classes.

N : Nombre totale d'observation.

X_{ii} : nombre d'observation dans la colonne i, ligne i.

X_{+i} : total des observations dans la colonne i.

X_{i+} : total d'observation dans la ligne i .

Tableau 5.10 : valeurs de l'indice de Kappa

Valeur de l'indice de Kappa	Catégories
0 – 0.20	Accord faible
0.21 – 0.40	Accord modéré
0.41 – 0.60	Accord substantiel
0.61 – 0.80	Accord presque parfait
0.81 – 1	Accord parfait

Une base de données de vérité sur terrain a été conçue et réalisée pour analyser la fiabilité de la carte "Occupation de sol". Cette base de données contient 181 points de contrôle dans les neuf catégories dont chacune possède 20 points (Figure 5.10).

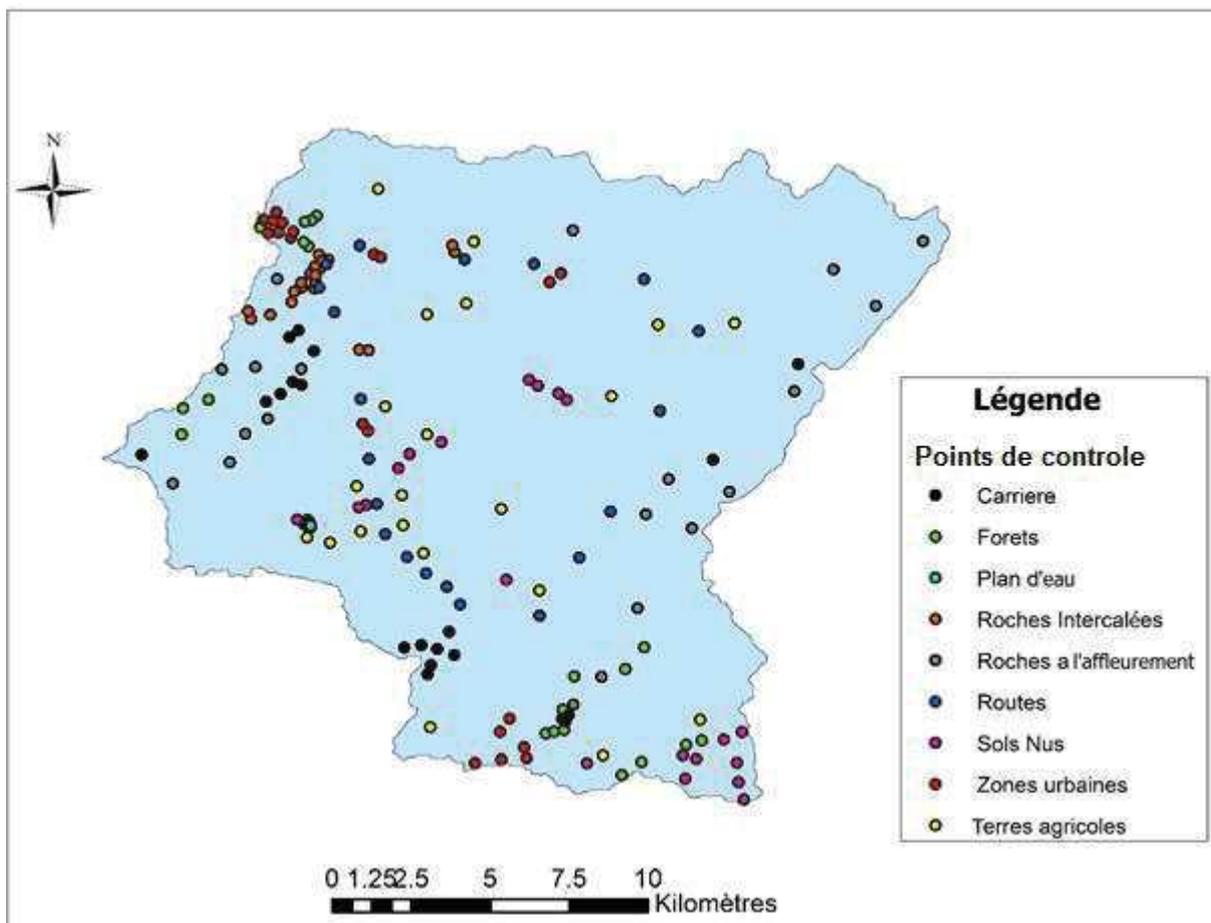


Figure 5.10 : Carte des points de contrôle sur terrain.

Tableau 5.11 : Matrice de Confusion

Classes	PE	TA	Fo	ZU	RI	SN	RA	Ro	Ca	Points de contrôle au sol
PE	19	0	0	0	0	0	0	0	0	19
TA	0	18	0	0	1	0	0	7	1	27
Fo	1	0	20	0	0	0	0	0	0	21
ZU	0	0	0	20	0	0	1	0	0	21
RI	0	1	0	0	16	0	0	0	0	17
SN	0	1	0	0	0	20	0	0	0	21
RA	0	1	0	0	3	0	19	0	2	25
Ro	0	0	0	0	0	0	0	13	0	13
Ca	0	0	0	0	0	0	0	0	17	17
Total	20	21	20	20	20	20	20	20	20	181
Précision globale										0.895
Indice de Kappa										0.882

Les résultats de l'évaluation (tableau 5.11) montrent que l'indice de Kappa est de 0.88 ce qui indique que la carte d'occupation des sols produite est parfaite et peut être utilisée pour notre étude.

V.4.3 Traitement de données

Toutes les données doivent être regroupées dans la même Geodatabase (fichier.mxd) sous ArcGIS pour qu'on puisse les traiter. Les fichiers nécessaires pour HEC-GeoHMS sont :

- Le fichier Hydro DEM est créé à partir du MNT et fichier de forme du réseau hydrographique en utilisant "Arc Hydro Tools"
- Le fichier "Type_occupation_sol" est la résultante de la combinaison du "Occupation des sols" et "Type des Sols". Ce fichier est créé par l'outil "Intersection" de "Arc Tool Box".
- La table CN-Look Up est la table attributaire qui contient toutes les informations nécessaires de l'occupation des sols, les groupes hydrologiques des sols et le CN correspondant.

V4.4 Les résultats (cartes du coefficient de ruissellement "Cr").

Le coefficient de ruissellement est défini comme la fraction des précipitations qui devient ruissellement direct (Merz, 2006). Donc le Cr est le rapport entre la lame d'eau ruisselée et la pluie brute. L'obtention du coefficient de ruissellement nécessite le calcul de la hauteur de la

lame d'eau ruisselée par rapport à un évènement pluvial connu en utilisant la méthode SCS-CN (voire CH II).

V.4.4.1 Présentation du logiciel HEC-GeoHMS

HEC-GeoHMS (extension de HEC-HMS sous ArcGIS) est un logiciel de modélisation hydrologique conceptuel semi-distribué développé par *Hydrologic Engineering Center* (HEC) du corps des ingénieurs de l'armée américaine (Merwade, 2012). Ce modèle a été utilisé déjà en Algérie, Bachi (2011) dans l'étude du risque d'inondation dans les zones urbaine et Araf (2012) pour la gestion des ressources hydriques dans la région de Tlemcen.

V.4.4.2 Résultats et discussion

Les premiers résultats de ce travail sont les bases des données type des sols et occupation des sols produites. Le complexe type-occupation des sols est le facteur le plus influençant sur la genèse du ruissellement. Le type de sol désigne la composition granulométrique. Le bassin versant Sigus est caractérisé par deux types de sols dominants, argileux et limoneux argileux fin réparti d'une façon déséquilibrée. Les sous bassins 01 et 03 possèdent l'immense proportion d'argile avec 10% et 08% respectivement. Pour le limon argileux fin, les sous bassins 01 et 05 occupent 9.5% et 7% de la surface totale du bassin versant. Ces deux types de sol représentent le groupe hydrologique du sol "D". Ceci est caractérisé par un taux d'infiltration trop faible donc un potentiel de ruissellement élevé. De plus, presque 70% du bassin versant sont des terres agricoles, 25% dans le sous bassin 01. Les sous bassins 02, 03 et 05 ont un taux de 13 à 17%. La plupart de ces terres sont exploitées dans la céréaliculture. Elles ont une texture argileuse et des pentes nulles à faibles. Les terres rocheuses, constituées des roches à l'affleurement et des carrières, présentent 19% du bassin versant dont la majorité se localise dans les sous bassins 01 et 02 avec un taux de 5.6% et 4.2%. Elles ont un rôle déterminant dans la production du ruissellement vu leur imperméabilité. En examinant la carte topographique et à l'aide des images satellitaires à haute résolution, on trouve que la majorité des terres rocheuses sont des montagnes sans aucun couvert végétal avec des pentes excessives. C'est la répartition de ces deux types d'occupation du sol sur le bassin versant qui donne tendance au ruissellement puisque les terres rocheuses se situent à l'amont des sous bassins suivi par les terres agricoles. Les roches intercalées sont des terres rocheuses séparées par des sols nus, dont les roches sont estimées à 80% et le sol nu à 20%. Aussi, les zones urbaines présentent un milieu excellent pour l'écoulement vu le degré d'imperméabilité des constructions et des routes. Mais elles sont, beaucoup plus, réceptrices que contributives à l'écoulement puisque elles se situent, souvent, à l'exutoire du bassin versant.

La simulation a permis d'obtenir une carte CN de l'ordre moyen à élevé (figure 5.11). Le coefficient de ruissellement est défini comme la fraction des précipitations qui devient ruissellement direct (Merz, 2006). Le bassin versant de Sigus a connu deux événements pluvieux remarquables, l'un en octobre 1986 avec de 80 mm, l'autre au mois de septembre 1995 avec 125 mm. A partir de ces données, deux cartes du Cr_{80} et Cr_{125} sont produites (figures 5.12 et 5.13). Pour $P_{jmax} = 125$ mm, le bassin versant Sigus est caractérisé par un coefficient de ruissellement moyen pondéré par rapport à la surface de 0.76 avec un maximum de 0.98 dans les zones de roches à l'affleurement, les carrières et les routes et un minimum de 0.18 dans les terres forestiers. Tous les sous bassins ont un coefficient de ruissellement moyen pondéré presque similaire entre 0.70 et 0.73. Les résultats des paramètres CN, Cr_{80} et Cr_{125} montrent que les zones les plus productrices du ruissellement sont celles situées à l'amont de la ville de Sigus.

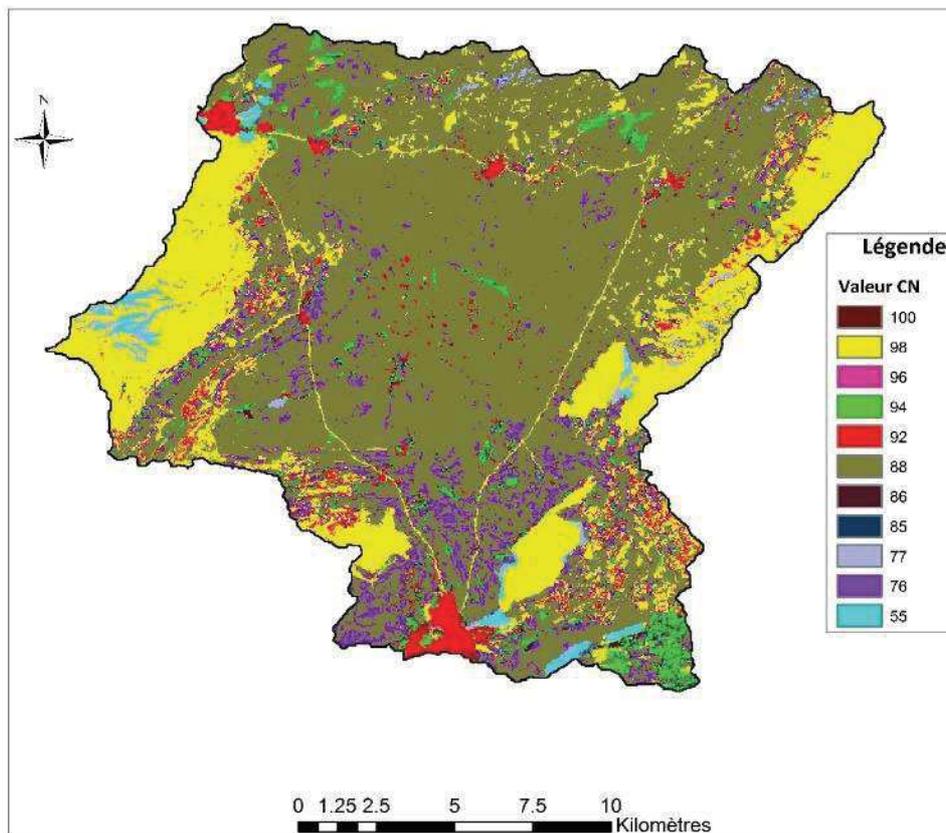


Figure 5.11 : Carte du CN bassin versant Sigus

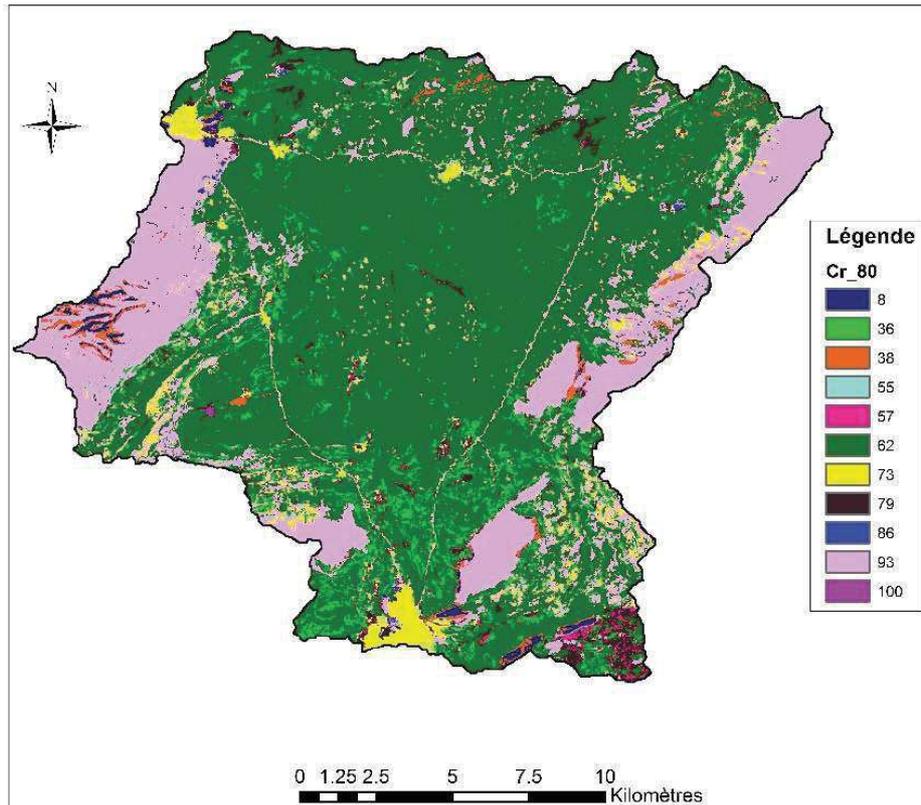


Figure 5.12 : Carte du coefficient de ruissellement pour P = 80 mm.

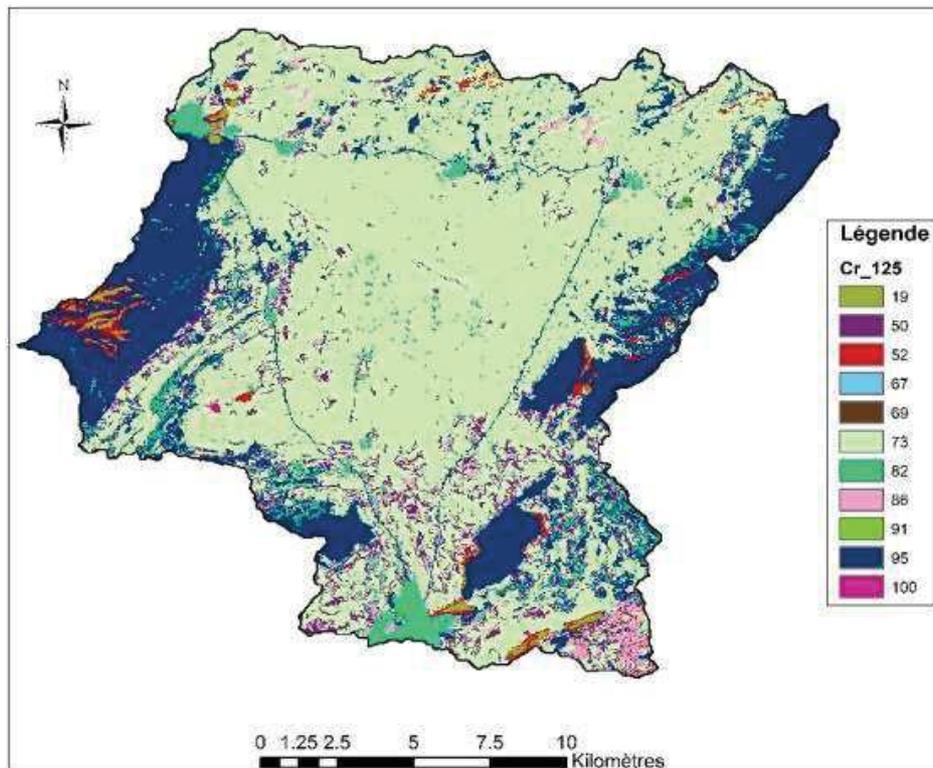


Figure 5.13 : Carte du coefficient de ruissellement pour P = 125 mm.

Après avoir déterminé le coefficient de ruissellement de chaque sous bassin, il est possible de calculer le débit de chaque sous bassin. Les résultats de calcul sont présentés dans le tableau 5.12.

Tableau 5.12 : les débits des SBV

SBV	C	A (Km ²)	H (mm)	T _c (h)	Q (m ³ /s)
1	0.7	104.4	50.65	6.31	162.94
2	0.73	63.32	51.83	4.24	156.77
3	0.73	75.34	45.60	5.89	118.34
4	0.72	24.62	42.54	2.56	81.76
5	0.76	66.02	45.31	5.62	112.38
					632.20

L'estimation du débit maximal de la crue centennale est une étape cruciale pour tous les projets de protection contre les inondations en milieu urbain. Les résultats de calcul montrent une grande variation entre les cinq sous bassins. Le SBV 01 présente la valeur maximale avec 162,94 m³/s alors que le SBV 05 possède une valeur minimale de 81.76 m³/s. Cette variation remarquable est due à la différence considérable de la surface et du temps de concentration.

V.5 Conclusion

Pour mieux comprendre le comportement hydrologique d'un bassin versant vis à vis un phénomène de ruissellement, l'utilisation des modèles hydrologiques semi-distribué et conceptuels est indispensable. Elle nécessite un nombre important des données, particulièrement pour la modélisation hydrologique des bassins versants car elle nécessite une bonne connaissance des différentes composantes du bassin versant ainsi que les caractéristiques des précipitations.

Dans ce chapitre, il s'agit d'évaluer le comportement hydrologique du bassin versant Sigus en termes de coefficient de ruissellement et déterminer le débit maximal de la crue centennale.

L'élaboration des bases de données type des sols et occupation des sols était une étape cruciale dans cette étude. Celles-ci ont été exploitées sous deux logiciels, ArcGIS et HEC-GeoHMS pour estimer CN, Cr₈₀ et Cr₁₂₅.

Les résultats montrent que le bassin versant est caractérisé par un type de sol argileux et occupé par les terres agricoles. Le CN du bassin versant Sigus est de l'ordre moyen à élevé.

Les zones les plus productrices du ruissellement ont un coefficient de ruissellement élevé et correspondent aux terres rocheuses ou zones urbaines. Le calcul des débits a montré que les SBV 01 et 02 génèrent les débits les plus importants.

Chapitre VI

Analyse multicritères pour l'évaluation et la cartographie de la vulnérabilité en situation d'inondation

VI.1 Introduction

La gestion du risque d'inondation peut être divisée en deux parties : L'analyse et l'évaluation des risques d'inondation d'une part et l'atténuation des risques de l'autre. D'une manière générale, le but de l'évaluation des risques d'inondation est de mieux connaître sa distribution spatiale, c'est-à-dire les zones à risque fort où des mesures d'atténuation seraient nécessaires. L'atténuation des risques signifie évaluer, proposer sélectionner et des mesures pour minimiser les dégâts des zones bâties (Meyer, 2009).

Ce chapitre est consacré à analyser, évaluer et cartographier la vulnérabilité de Sigus en situation d'inondation. La première partie de ce chapitre consiste à présenter la zone d'étude et constater l'état actuel en matière de protection contre les flux inondant tout en vérifiant la capacité du canal existant à évacuer un débit centennal. Puis, l'étude de transmissivité des zones bâties. La dernière partie est l'analyse multicritère pour évaluer et cartographier les différents critères composant la vulnérabilité.

VI.2 Présentation de la zone d'étude

VI.2.1 Choix de la zone d'étude

La région d'Oum el bouaghi a connu des événements d'inondations désastreuses, le long de son histoire (figure 6.1). Parmi toutes les communes de la wilaya, Sigus est choisie particulièrement pour cette étude vue son contexte orographique et hydrographique unique.

VI.2.2 Historique des inondations

Suivant les services de la D.R.E Oum el Bouaghi, la ville de Sigus a connu plusieurs événements d'inondation, mais seulement trois qui sont remarquables (figure 6.2) :

- le 22/09/1995 : les précipitations atteignent 125 mm ce qui engendre la démolition d'une école et 63 autres constructions.
- Le 07/09/1986 : les précipitations atteignent 80 mm. Une victime morte et une maison détruite.
- Le 01/10/2001 : 80 mm plusieurs logement démolis.

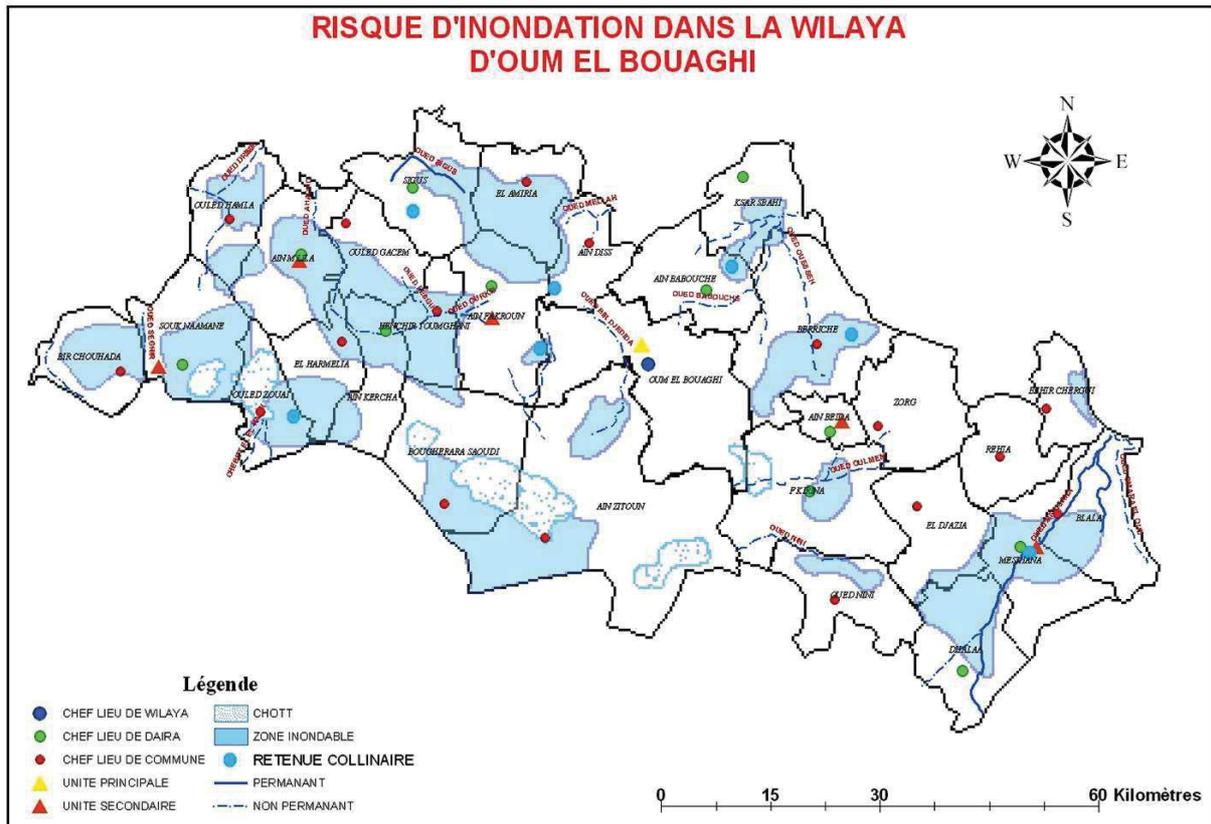


Figure 6.1 : Carte des zones inondables de la wilaya d'Oum El Bouaghi (Source : D.P.C 2013).

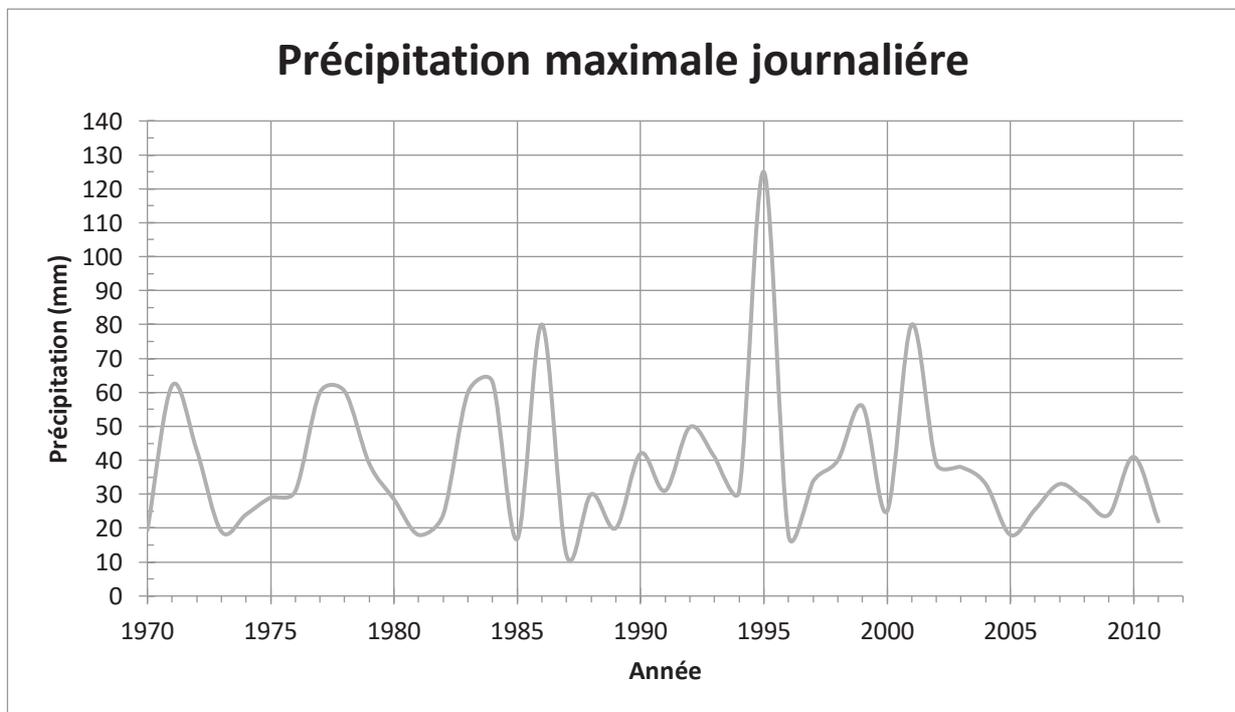


Figure 6.2 : Chronique des précipitations journalières maximales à la station de Fourchi (Source : ANRH).

On observe sur le graphe 3 peaks remarquables qui correspondent aux événements cités

VI.2.3 Développement et organisation spatiale des villes

VI.2.3.1 Développement du tissu urbain de la ville de Sigus

VI.2.3.1.1 Étape avant 1954

La plupart de la population vivait alors dans des zones dispersées, tandis que le centre contient un petit groupe de personnes, la plupart d'entre eux sont des Européens.

Le premier noyau de la ville constituait sur les deux côtés de la route principale (route nationale N° 10 actuelle), mais au cours de cette période, le tissu urbain a connu une stabilité au niveau de l'urbanisation.

VI.2.3.1.2 Étape entre 1954 - 1962

Durant cette période, le centre urbain se compose de deux types de logements européens en parallèle avec la route principale. À la fin de cette étape, la population a bénéficiée des logements dans les camps dans le cadre du plan de Constantine.

VI.2.3.1.3 Étape après 1962

Après l'indépendance, les habitants locaux ont occupé tous les logements abandonnés par les colonisateurs, l'évolution du tissu urbain était autour de la vallée. Dans l'année 1970 Sigus a connu une expansion dans les constructions le long des axes routiers nationaux "10" et de la wilaya "03". Mais cette expansion est caractérisée par habitation chaotique et un manque d'équipement.

La scène entre les années 1980 et 1990 savait des changements importants où elle a laissé un grand impact sur le tissu urbain courant. La construction des logements collectifs et semi-collectifs dans toutes les directions était dans le cadre de la promotion de logements sociaux. Mais après l'abandon de l'état pour le logement social après la crise économique, les lotissements ont commencé à apparaître vus à la grande demande de logement. La demande incessante aux logements a été accompagnée par une grande consommation sur le territoire.

Cette phase de reconstruction a permis la mise en place de certaines installations de base. À travers tout cela, nous pouvons dire que Sigus actuellement est considéré, à l'échelle locale, comme un pôle urbain attractif.

VI.2.3.1.4 Taux d'urbanisation

Le tableau 6.1 montre l'évolution urbaine de la ville de Sigus.

Tableau 6.1 : Taux d'urbanisation de la ville de Sigus.

Etape	Surface totale de la ville	Surface de chaque étape	Taux d'urbanisation
1954 – 1929	6.84	6.84	0.27
1962 – 1954	14.04	7.2	0.9
1983 – 1962	51.68	37.64	1.79
1995 – 1983	89.08	37.4	3.12
2006 – 1995	150.55	61.47	6.14

VI.2.3.2 L'organisation de la ville

La ville de Sigus s'étend sur une surface de 225,4 hectares séparée en deux parties par cours d'eau permanent aménagé en béton armé. Dans cette étude, on s'intéresse par les éléments constituent la ville : Bâties, routes, canal et les vides qui font l'objet d'une base de données nommée "*Fond de plan*". On désigne par bâties toutes les constructions telles que : les maisons (individuelles et collectives) et les équipements publics (Administrations, jardins...etc.). Les routes principales et secondaires sont prises en considération dans la digitalisation. Le mot vide signifie tout terrain non urbanisé au sein du POS y compris les parcelles non bâties et les espaces laissés comme servitude comme celui alentour du canal.

La ville est décomposée en cinq plans d'occupation des sols, le POS 01 a la plus grande surface de 80,83 ha alors que la surface minimale est observée dans le POS 03 avec 20,71 ha (D.U.C, 2013). La carte d'occupation des sols (figure 6.3) et le tableau 6.2 illustrent des proportions variables entre les différents éléments de la ville sur les cinq POS. Le grand pourcentage est occupé par les vides avec 65,02%, bien que la faible proportion soit occupée par le canal avec presque 3%. Les POS 02 et 04 sont presque saturés avec un taux de vides moyen de 55% puisque ces deux POS constituent anciens quartiers coloniaux. Les POS 03 et 05 sont urbanisés d'une façon modérée tandis que le POS 01 est totalement vierge pour des futures constructions.

Tableau 6.2 : Statistiques des POS

P.O.S	Surface totale (Ha)	Bâties		Rues		Canal		Vides	
		Surface (ha)	%						
1	27.47	0	0.00	0.68	2.48	1.08	3.93	25.71	93.59
2	80.89	25.95	32.08	7.31	9.04	0	0.00	47.63	58.88
3	20.71	1.26	6.08	1.74	8.40	2.17	10.48	15.54	75.04
4	65.86	21.03	31.93	6.87	10.43	3.41	5.18	34.55	52.46
5	30.47	4.9	16.08	2.45	8.04	0	0.00	23.12	75.88
ville	225.4	53.14	23.58	19.05	8.45	6.66	2.95	146.55	65.02

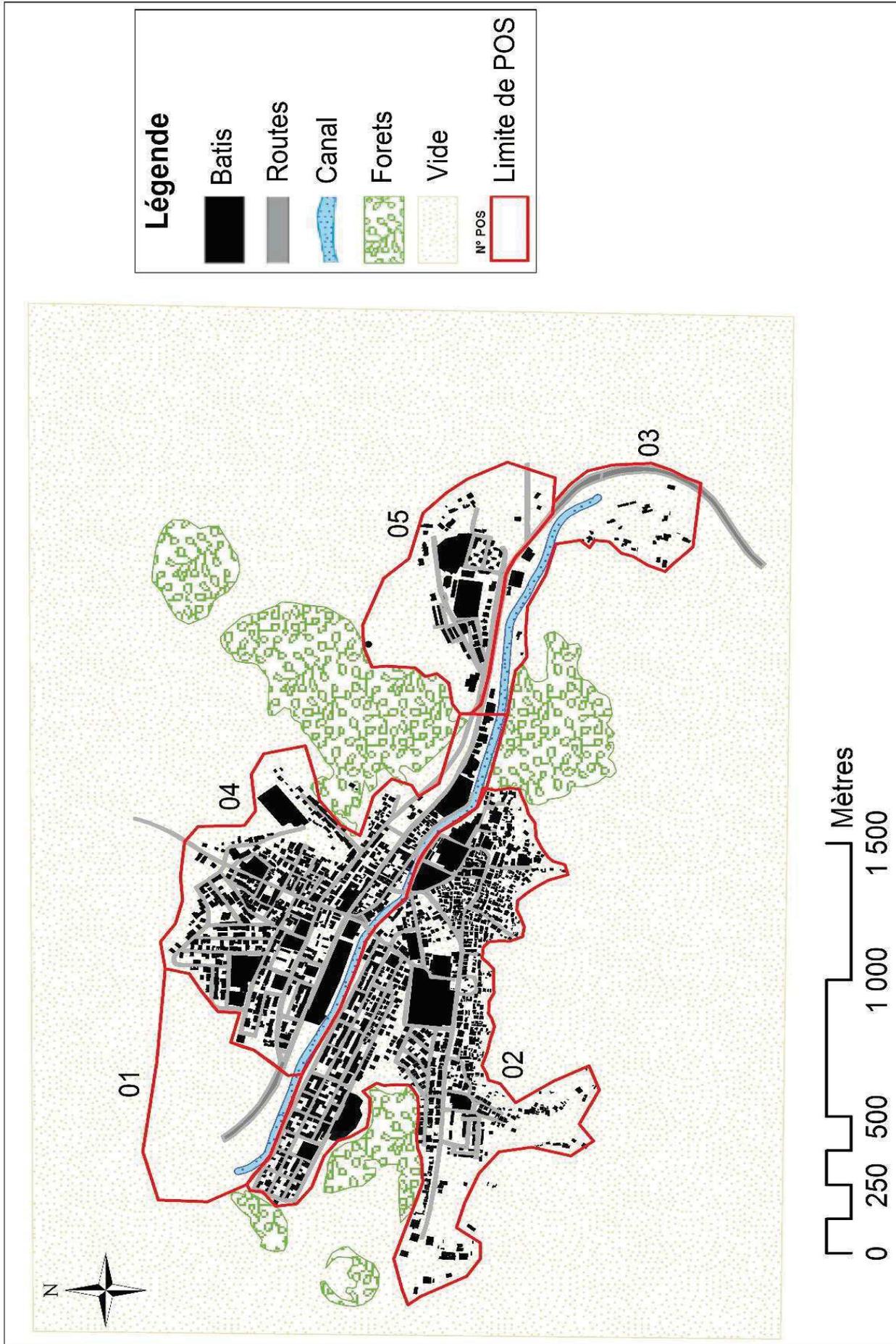


Figure 6.3 : Plan de masse de la ville de Sigus

VI.2.4 Le système d'évacuation des eaux de ruissellement

VI.2.4.1 Situation actuelle des systèmes d'évacuation des eaux de ruissellement

En milieu urbain, les eaux de ruissellement causées souvent par les précipitations sont évacuées par les canaux (naturels ou artificiels) et par les réseaux d'assainissement (unitaires ou séparatifs). La ville de Sigus est dotée d'un réseau d'assainissement unitaire dont les diamètres varient entre 200 en tête du réseau et 600 mm aux exutoires. L'état du réseau est considéré moyenne, une partie importante se date des années 1970 et trouve sous les maisons individuelles précaires. Ainsi le réseau n'a jamais été expertisé pour déterminer les diamètres réels et définir les points noirs notamment au moment d'une inondation

Pour les canaux, la ville est traversée par un cours d'eau récemment aménagé en béton armé (figures 6.4 et 6.5) dont la forme est variable entre rectangulaire et composé trapézoïdal-rectangulaire.



Figure 6.4 : la partie composée de l'oued Sigus (coté amont)



Figure 6.5 : La partie composée de l'oued Sigus (côté aval)

VI.2.4.2 Vérification de la capacité d'évacuation du canal existant

En 2010, la direction des ressources en eau de la wilaya d'Oum el bouaghi a lancé un projet de protection de la ville de Sigus contre les inondations. Ce projet consiste à aménager le cours d'eau principal qui traverse la ville sur une longueur de 2,5 km. Le canal était réalisé sur deux parties, la première en section composée trapézoïdale – rectangulaire, et la deuxième seulement rectangulaire. Selon les documents de la DRE, le canal a été dimensionné par rapport à une période de retour de 50 ans avec une capacité d'évacuation de 400 m³/s. Dans ce qui suit, on va vérifier la capacité du canal existant par rapport au débit centennal (CH 05)

VI.2.4.2.1 Présentation du logiciel HEC-RAS

HEC-RAS, dont l'extension sous ArcGIS s'appelle HEC-GeoRAS, est un modèle hydraulique développé par le Corps des ingénieurs de l'armée américaine (HEC : Hydrologic Engineering Centre). En 1964, HEC a publié le modèle informatique HEC-2 pour aider les ingénieurs hydrauliques dans l'analyse des canaux et la détermination de la plaine d'inondation. HEC-2 est rapidement devenu le programme d'analyse hydraulique standard, et ses capacités ont été développées au cours des années suivantes pour prévoir, entre autres, des analyses de ponts et différentes constructions en milieu urbain. HEC-RAS utilise un certain nombre de paramètres d'entrée pour l'analyse hydraulique de la géométrie des canaux et du débit. Ces paramètres sont

utilisés pour établir une série de sections transversales le long du cours d'eau. Sur chaque section en travers, les rives du cours d'eau sont identifiées.

HEC-RAS résout les problèmes des écoulements à surface libre permanent ou non-permanent de calcul de ligne d'eau en graduellement varié. Il résout l'équation de l'énergie unidimensionnelle, les pertes étant évaluées par la formule de frottement au fond de Manning-Strickler et par des formules de contraction/expansion de l'écoulement. Pour les situations rapidement variées telles que les ressauts hydrauliques, les écoulements à proximité des ponts, et les confluences de rivière, l'équation de l'énergie est remplacée par l'équation de quantité de mouvement. Pour les écoulements débordants, la section totale est divisée en sous-sections homogènes en termes de forme et de rugosité, et chaque débit partiel $QRiR$ est calculé selon la Divided Channel Method à l'aide de la formule de Manning-Strickler.

Pour la simulation de la crue centennale, l'oued de Sigus, connu aussi oued Kleb, est divisé en 21 sections en travers (figure 6.6).

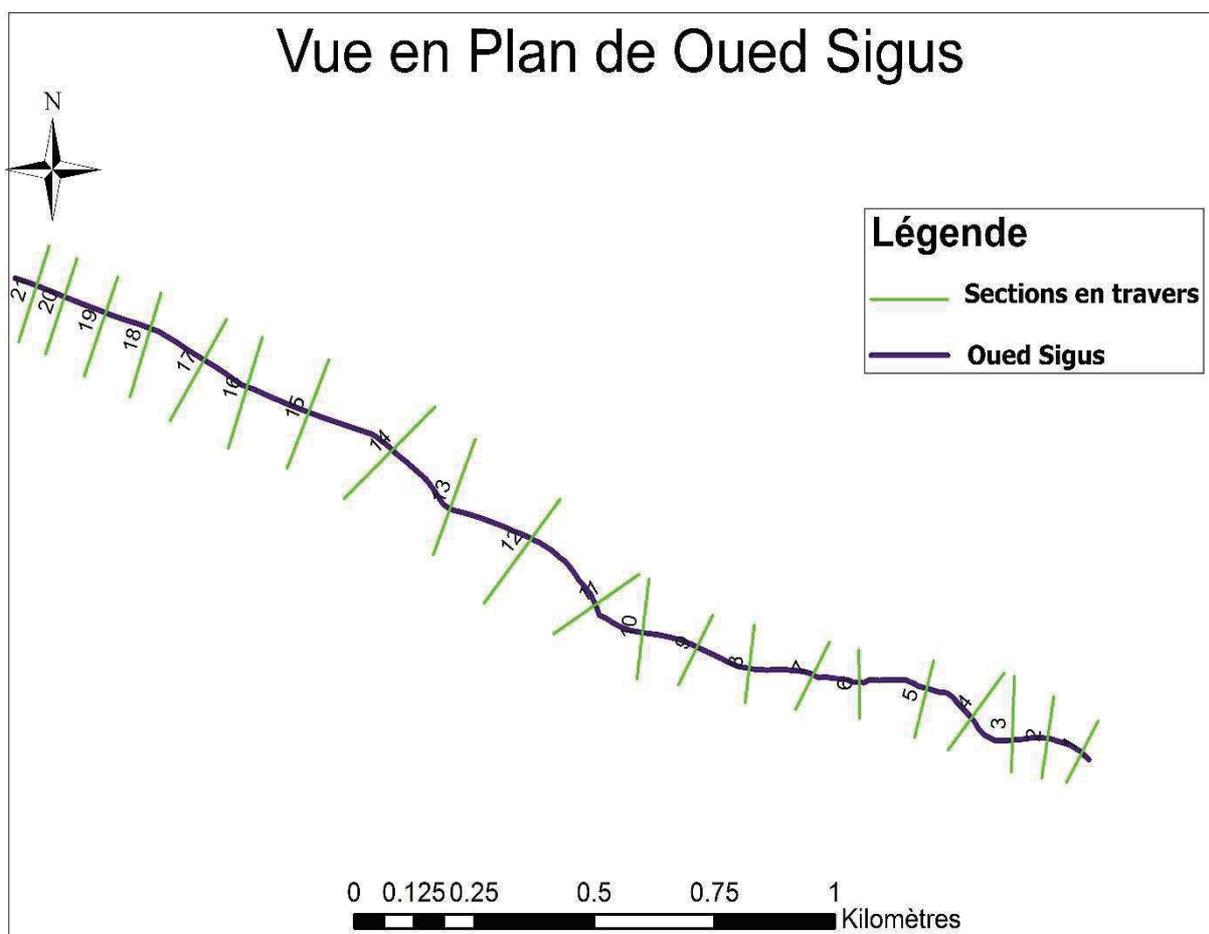


Figure 6.6 : Vue en plan + les sections en travers de l'oued Sigus

Les résultats de simulation (Figure 6.7) montrent que l'oued de Sigus est complètement débordé pour un débit centennal ce qui présente un risque d'inondation majeur.

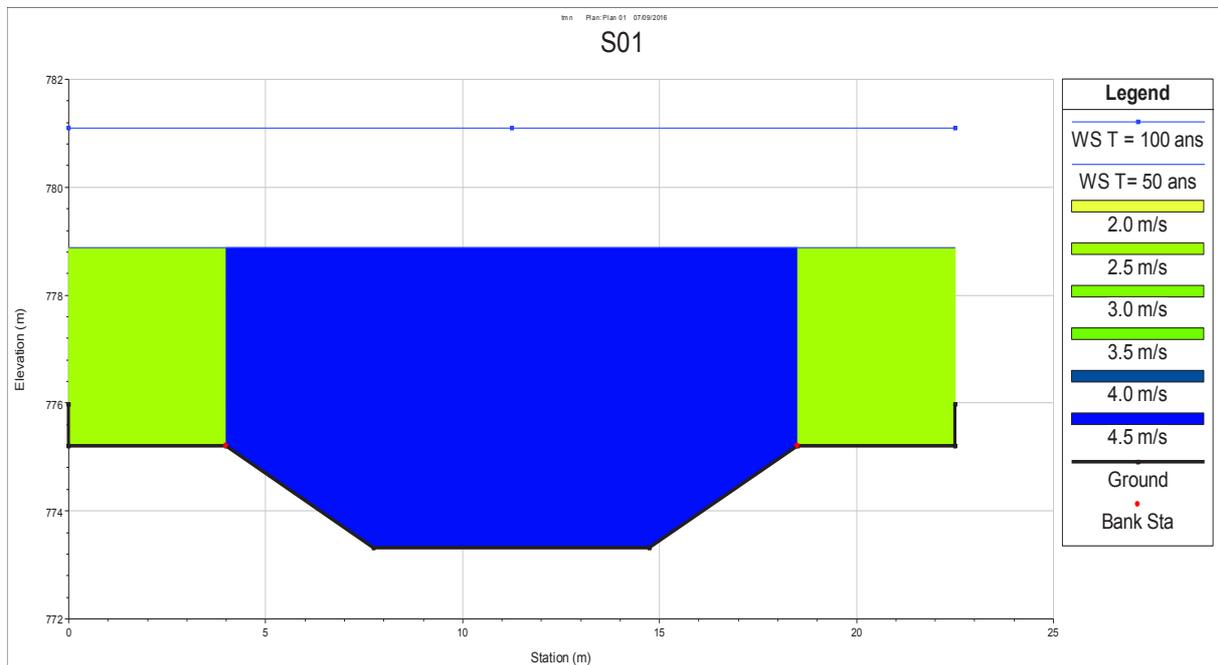


Figure 6.7 : Résultat de simulation pour un débit centennal

VI.3 Etude de la transmissivité des zones bâties

Dans un milieu urbain, les zones bâties jouent un rôle important sur la dynamique des crues du fait qu'elles constituent environ 60%. Il est assez difficile, voire impossible, d'évaluer leur comportement sans tenir compte de la géométrie de ces composants. Cela ne peut être effectué qu'avec un travail de terrain précis qui sert à observer, mesurer et noter les différentes caractéristiques du milieu. La première apparition d'un tel travail était en 1999 par Hingray qui a étudié le comportement hydraulique des zones bâties en situation d'inondation.

VI.3.1 Le relevé de pénétrabilité

Le relevé de pénétrabilité (figure 6.8) est une description géométrique des éléments de la ville (routes et bâtis) suivant un axe d'écoulement en tenant compte des ouvertures et des obstacles. Cette description sera, plus tard, utilisée pour déterminer des propriétés de transmissivité. En premier lieu, un travail de planification était nécessaire pour faciliter la tâche d'enquête. Ceci consiste à préparer le formulaire d'enquête et les éléments à décrire. Après avoir effectué une sortie sur terrain, on a pu déterminer les éléments principaux constituant les façades des zones bâties qui sont : les murs, les portes, les fenêtres, les barreaudages, les chantiers, les vides et les routes. Chaque élément est défini par un code tel présenté dans le tableau 6.3.

Tableau 6.3 : Les éléments d'un relevé de pénétrabilité

Type élément	Code	Nature	Abréviation	Matériau	Abréviation
Mur	1	Mur	M	Parpaing	Pa
		Mur + Barreaudage	M+B	Parpaing + Acier	Pa + AC
		Mur de soutènement	MS	BA	Béton Armé
Porte	2	Porte	P	Tôle en acier	T
				Bois	B
Chantier	3	Chantier	C	-	-
Route	5	Route	RG	Béton Bitumineux	BB
			RNG	Terrain naturel	TN
Vide	7	Terrain vide	TV	-	-
Barreaudage	8	Barreaudage	Bar	Acier	AC
Fenêtre	9	Fenêtre	F	Bois	B

Tableau 6.4 : Légende du dessin

Eléments	Mur	Porte	Barreaudage sur muret ou sur portail	Route goudronnée	Route non goudronnée	Fenêtre
Symboles						

VI.3.2 La transmissivité

La transmissivité est la possibilité d'un élément d'être traversé par un flux inondant. Elle dépend des ouvertures des façades du milieu. Etudier la transmissivité d'une zone permet de déterminer le comportement des éléments d'obstacles et ceux de drainage d'un part, et faire une étude comparative entre eux d'autre part. Pour ce faire, les critères de perméabilité partielle, la densité et la largeur moyenne des chemins hydrauliques sont présentés ci-dessous.

VI.3.2.1 Perméabilité partielle

VI.3.2.1.1 Perméabilité d'une concession : soit une concession d'une longueur et hauteur connues, hydrauliquement isolée des concessions voisines. On peut définir sa perméabilité P_c par :

$$P_c = \frac{L_{ouv}}{L_c} \quad (6.1)$$

L_{ouv} : la longueur de l'ouverture située à la façade de la concession permettant le passage de l'eau (m).

L_c : la longueur totale de la concession (m).

CEP N° : 01

Coté : Gauche

Code éléments	01	02	01	02	01	02	01	02	01	02	01	02	01	02	01	02	01	02	01	02	01	02
Nature	M	P	M	P	M	P	M	P	M	P	M	P	M	P	M	P	M	P	M	P	M	P
Matériau	Pa	T	Pa	B	Pa	T	Pa	B	Pa	T	Pa	B	Pa	T	Pa	B	Pa	T	Pa	B	Pa	T
Longueur (m)	0,5	3	2	1	10	3,5	0,2	1,2	0,6	3	0,8	0,6	2,5	2,2	1,2	2,4	1,4	5,6	4	1,0	0,3	2,2
Hauteur (m)	3,4	2,2	3,4	2,2	3,4	/	2,8	3,8	2,4	2,8	3,2	3,8	3	2,6	3	2,2	3	2,4	3	2,2	2,5	2,2
L _{tot} Bande	54,4																					
Σ L _{rue}	3,5																					
Σ Louverture	20,3																					

Coté : Gauche

Code éléments	01	02	03	05	01	02	01	02	01	02	01	02	01	02	01	02	01	02	01	02	01	02
Nature	M	P	M	RNG	M	P	M	P	M	P	M	P	M	P	M	P	M	P	M	P	M	P
Matériau	Pa	T	Pa	TW	Pa	T																
Longueur (m)	2,5	2,2	2	4,4	5,4	1,6	3	1,4	3	1,8	3	1,8	3	1,8	3	1,8	3	1,8	3	1,8	3	1,8
Hauteur (m)	3,2	2,5	3,2	/	1,2	3,6	2,4	3,6	2,4	3,6	2,4	3,6	2,4	3,6	2,4	3,6	2,4	3,6	2,4	3,6	2,4	3,6
L _{tot} Bande	56,3																					
Σ L _{rue}	7,9																					
Σ Louverture	22,7																					

Figure 6.8 : Exemple d'un relevé de pénétrabilité

VI.3.2.1.2 Perméabilité partielle d'un bloc : soit un bloc qui contient N concessions situées dans une bande B, sa perméabilité partielle P_b est défini par :

$$P_b = \frac{1}{L_b} \sum L_{ouv} \quad (6.2)$$

L_b : la longueur totale de la bande (m).

VI.3.2.1.3 Perméabilité partielle des routes : soit une bande de N routes reliant les deux voies support de bande, la perméabilité partielle P_r est défini par :

$$P_r = \frac{1}{L_b} \sum L_{rj} \quad (6.3)$$

L_{rj} : la longueur de route d'ordre j.

VI.3.2.1.4 Perméabilité partielle des vides : soit une bande de N vides, la perméabilité partielle P_v est défini par :

$$P_v = \frac{1}{L_b} \sum L_{vj} \quad (6.4)$$

L_v : la longueur de vide d'ordre j.

VI.3.2.2 Densité des chemins hydrauliques

La densité des routes : $D_R = 1000.N_{route}/L_F$

Tout élément bâti dont la perméabilité est non nulle constitue un chemin hydraulique de type bâti. Leur densité est calculée comme suit : $D_B = 1000.N_{C,B}/L_F$

VI.3.2.3 Largeur moyenne des chemins hydrauliques

Largeur moyenne des routes : $L_R = 1000.P_R/D_R$

Largeur moyenne des chemins type bâti : $L_B = 1000.P_B/D_B$

VI.3.3 La zone d'étude

Les résultats de la simulation hydraulique et les informations obtenues à partir des enquêtes avec les habitants locaux, ont permis de définir les limites de la zone inondable. Celle-ci est concernée par l'étude de la transmissivité. La carte de la zone inondable montre qu'il existe 05 CEP (couloir d'écoulement principal). Généralement, les CEP correspondent aux grandes routes de la ville parallèles avec l'axe du cours d'eau principal. Lors d'une situation d'inondation, ils jouent le rôle des collecteurs à surface libre avec une capacité d'évacuation beaucoup plus supérieure à celle des collecteurs d'assainissement. Pour chaque CEP, nous avons effectué une étude détaillée de transmissivité, basée sur les différentes informations et mesures des relevés de pénétrabilité. Chaque CEP est composé des bandes de 300 m chacune. La figure 6.9 illustre la position des différents CEP dans la ville.

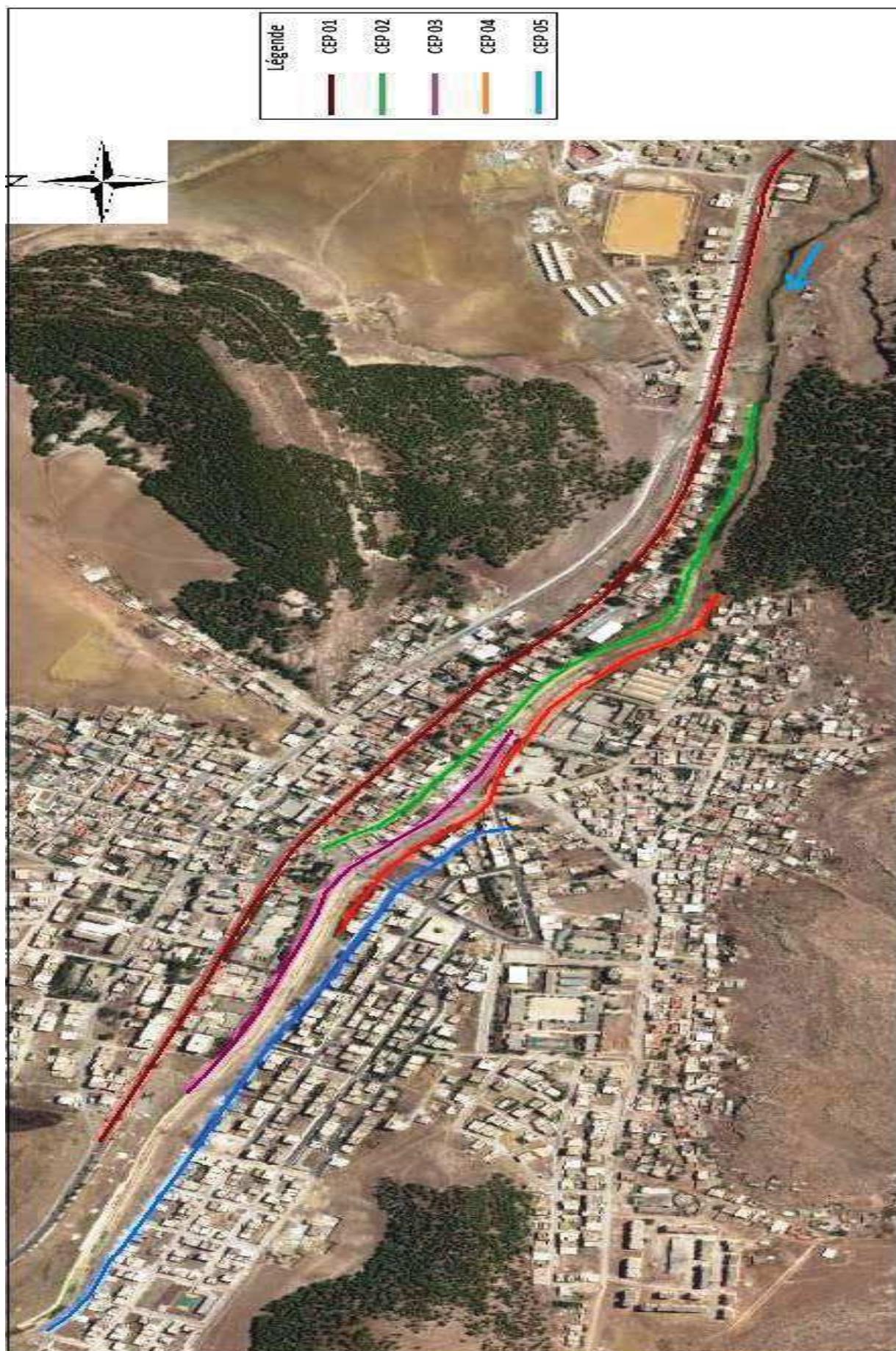


Figure 6.9 : les couloirs d'écoulements principaux

- **CEP 01**

Il s'agit du CEP le plus long avec $L = 2000\text{m}$ et le plus dense en terme d'occupation. Il correspond à la route nationale RN 10. La première moitié est caractérisée par une densité de construction relativement faible surtout sur le côté droit. Il existe un mur de soutènement d'une longueur de 430m suivi par un jardin public. Le côté gauche est constitué de nouvelles maisons avec des surfaces importantes dont les rez-de-chaussée sont destinés à fins des commerciales ou artisanales. La deuxième moitié est fortement urbanisée sur les deux côtés de la RN10 car elle constitue le noyau de l'ancien village. Le côté droit est presque occupé par les équipements tels que la mairie, la poste et la gendarmerie, alors que le côté gauche est formé des anciennes constructions coloniales. Ces dernières sont construites à un niveau inférieur à celui de la RN10.

- **CEP 02**

Ce CEP est limitrophe avec le lit majeur droit du cours d'eau principal, jusqu'au premier pont de la ville. Il est urbanisé juste sur le côté droit, les façades sont souvent des clôtures des constructions constituant les CEP01. A partir du premier pont, le CEP est urbanisé sur les deux côtés. La plupart des constructions sont coloniales dont les rez-de-chaussée sont des locaux commerciaux.

- **CEP 03**

Il débute du premier pont jusqu'à la limite de la ville en parallèle avec le cours d'eau. Il est urbanisé, seulement, sur le côté droit. La partie de 0 à 300 m est constituée des maisons individuelles dont les façades sont en face au cours d'eau alors que le reste du CEP est composé des clôtures des différents équipements comme le jardin public et l'école.

- **CEP 04**

Similairement au CEP 03, le CEP 04 est complètement situé sur la limite du lit majeur gauche du cours d'eau. A l'amont du CEP, il existe une dizaine de maisons précaires dont les façades sont entourées par des clôtures en grillage métallique. Le reste du CEP est composé des maisons individuelles, locaux commerciaux et des équipements.

- **CEP 05**

Il est constitué totalement des maisons individuelles. Les premiers 300 m sont urbanisés sur les deux cotés alors que le reste du CEP seulement sur le côté gauche avec des maisons ayant des

surfaces entre 120 et 300 m². Les façades contiennent, souvent, une porte d'entrée, portail pour garage et une fenêtre. Le nombre de vide est important.

VI.3.4 Les résultats de l'étude de transmissivité

Nous exposons, pour les différentes bandes étudiées sur les cinq CEP, les résultats obtenus pour les critères de comparaison des trois composantes du tissu urbain les bâtis, les routes et les vides. Nous avons supposé que chaque élément se situant dans la zone inondable est submersibles. La longueur des bandes est quasiment identique sur de tous les CEP. Elle est prise égale à 300 m. Sauf les dernières bandes qui ont des longueurs variables puisque les CEP ont des longueurs irrégulières.

VI.3.4.1 La perméabilité partielle des CEP

- CEP 01

Il est d'une longueur de 2000m et contient 7 bandes. La perméabilité totale est très variable, due à la très forte variabilité des perméabilités partielles. La figure 6.10 présente les perméabilités totales et partielles du CEP 01.

La perméabilité totale de la bande B1 est la plus faible avec $P_t = 0.486$. Elle est caractérisée par une perméabilité des vides dominante. Les perméabilités des bâtis et des routes sont assez réduites parce que le nombre des bâtis est très faible sur le côté gauche alors que le côté droit est complètement occupé par un mur de soutènement.

La bande B2 connaît une hausse remarquable des perméabilités partielles des bâtis et des routes, et par conséquence, la perméabilité totale est $P_t = 0.57$. Les maisons commencent à apparaître sur le côté gauche. Elles constituent 30% de la bande et se caractérisent par un des larges ouvertures. Le côté droit se compose d'un mur de soutènement, totalement imperméable, suivi par une large route et la clôture du jardin. Cette dernière est quasiment perméable car elle est composé d'un mur de 2,2m dont 0,7m est en parpaing et le reste en barreaudage.

La perméabilité totale ne cesse de croître sur la bande B3 avec $P_t = 0.65$ dont P_b présente 0.59. Cela est dû à la perméabilité totale du mur du jardin public qui occupe tout le côté droit et la présence des maisons individuelles sur le côté gauche. La perméabilité partielle de ces maisons peut atteindre 0.6 puisque c'est une zone d'activité où les portails des rez-de-chaussée sont suffisamment larges pour satisfaire les besoins. Les routes présentent 12% de la bande tandis que les vides commencent à disparaître.

Les bandes B4 et B5 sont caractérisées par une perméabilité de bloc élevée de 0.45, par rapport à $P_t = 0.58$, à cause des clôtures totalement perméables des différents équipements situés sur le côté droit tels que la mairie, la poste et la gendarmerie nationale. Elles sont constituées des murs en parpaing de 0.2 à 0.6m et le reste en barreaudage. Le côté gauche est constitué d'anciennes constructions coloniales dont la P_b atteint 0.4 dans le cas favorable. La P_r est relativement faible par rapport à P_b alors que la P_v est nulle.

La bande B6 a une P_t de 0.49 influencée par la P_b car elle est de l'ordre de 0.36. Cela est due à la clôture du jardin public sur le côté gauche. Le côté droit présente un tissu urbain assez uniforme qui contient des maisons individuelles dont les rez-de-chaussée sont des locaux commerciaux ce qui signifie que la largeur et le nombre des ouvertures est significatif.

La bande B7 contient la perméabilité totale P_t la plus élevée avec un chiffre de 0.86 causée par la présence dominante des vides qui présente une $P_v = 0.43$, mais les bâtis aussi jouent un rôle significatif dans cette valeur élevée car la $P_b = 0.36$.

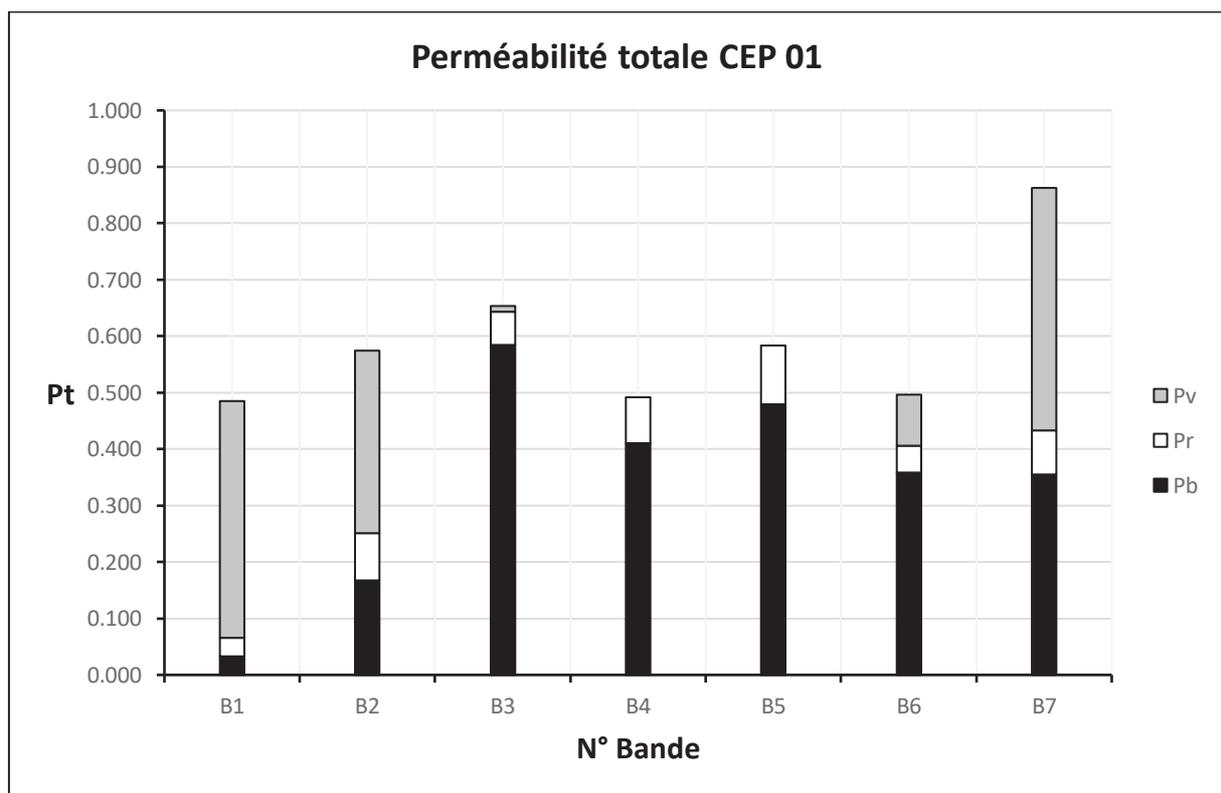


Figure 6.10 : Perméabilité totale du CEP 01

- **CEP 02**

Il est d'une longueur de 1000 décomposée en quatre bandes dont les perméabilités totales et partielles sont très variables. La figure 6.11 présente les perméabilités totales et partielles du CEP 02.

La bande B1 présente la perméabilité totale P_t la plus faible du CEP 02 avec 0.46 dont la $P_b = 0.36$ et $P_v = 0.14$. Ces chiffres déclinés sont causés par la faible présence des ouvertures sur les façades, le nombre réduit des vides et l'absence totale des routes puisque toutes les constructions sont sur le côté gauche alors que le côté droit se localise sur le lit majeur du cours d'eau.

La bande B2 est la bande ayant une P_t la plus élevée de 0.82 dont les $P_b = 0.6$, $P_v = 0.2$ et $P_r = 0.02$. Ces valeurs évoluées sont dues à la présence de la longue clôture du C.C.L.S (Coopérative des Céréales et Des Légumes Secs) en parpaing et barreaudage, aussi les clôtures, en grillage métallique simple torsion, des petits jardins devant les maisons. Les routes commencent à apparaître sur cette bande, nous en avons compté quatre.

La bande 03 connaît une décroissance de la perméabilité totale avec $P_t = 0.47$. Elle est très variable puisque la distribution spatiale des éléments le long de la bande est irrégulière de la manière suivante : la première partie (0 – 90m) est urbanisée seulement sur le côté droit avec maisons individuelles formant un seul bloc, mais la deuxième partie (90 – 300m) est urbanisée sur les deux côtés. La perméabilité des route connaît une progression assez remarquable avec $P_r = 0.103$.

La bande 04 est caractérisée par une forte perméabilité totale. Elle de l'ordre de 0.63 dont $P_t = 0.37$ et $P_r = 0.26$. Les routes deviennent plus larges et plus importantes sur cette bande ce qui explique la valeur élevée de P_r .

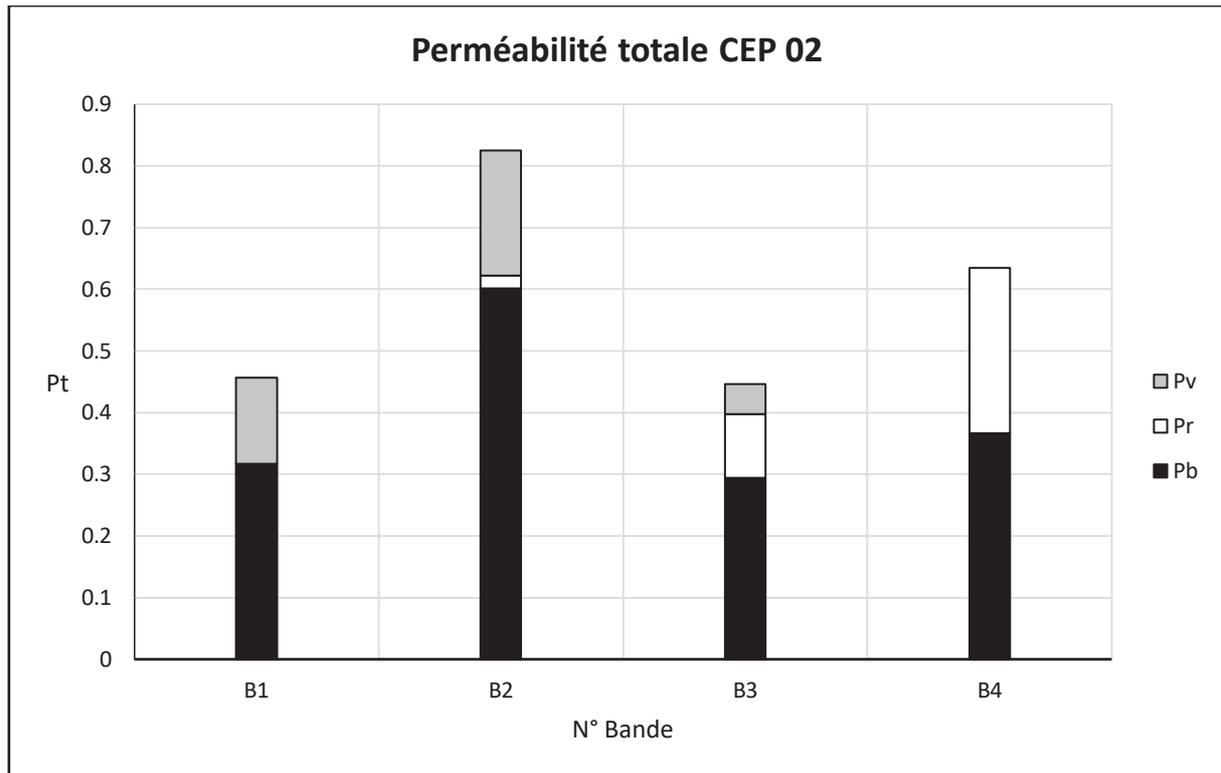


Figure 6.11 : Perméabilité totale du CEP 02

- **CEP 03**

Il s'étend sur une longueur de 752 m décomposée en trois bandes. Les perméabilités totales et partielles sont extrêmement variables sur les différentes bandes. La figure 6.12 présente les perméabilités totales et partielles du CEP 03.

La bande B1 est caractérisée par une perméabilité totale modérée dont la $P_b = 0.22$. Cette dernière est causée par les différentes ouvertures situant sur les façades des maisons. Les perméabilités partielles des routes et des vide sont assez régulières avec $P_r = 0.11$ et $P_v = 0.12$ ce qui reflète le nombre signifiant de ces éléments.

La bande B2 a une perméabilité totale la plus faible du CEP 03, elle presque nulle $P_t = 0.08$. Puisque cette bande est complètement composée des clôtures, totalement imperméables, des équipements formant la bande B6 du CEP 01. Le nombre de routes est très bas avec une faible largeur ce qui implique une perméabilité partielle des routes quasiment nulle alors que les vides n'existent pas.

La bande B3 présente la perméabilité totale la plus élevée du CEP 03. Elle correspond à la perméabilité partielle des bâtis $P_t = P_b = 0.836$ car cette bande n'est composée que des clôtures en grillage métallique simple torsion et des barreaudages.

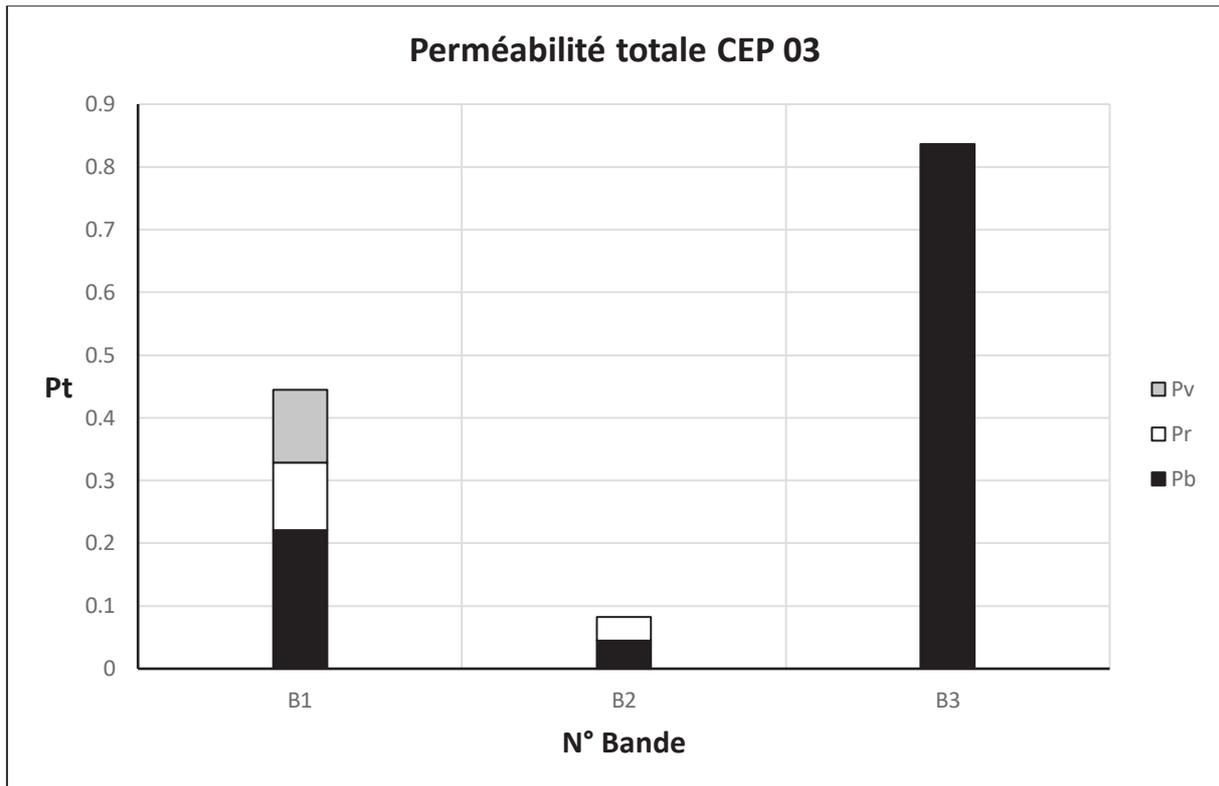


Figure 6.12 : Perméabilité totale du CEP 03

- **CEP 04**

Avec une longueur totale de 734 m décomposée en trois bandes, le CEP 04 est similaire à son homologue le CEP 03. Il est caractérisé par des perméabilités totales et partielles extrêmement variables sur les différentes bandes. La figure 6.13 présente les perméabilités totales et partielles du CEP 04.

La bande B1 est caractérisée par une perméabilité totale modérée $P_t = 0.45$ avec une perméabilité partielle des bâtis dominante $P_b = 0.28$ à cause des maisons précaires dont les façades sont entourées avec de clôtures en grillage métallique. Les perméabilités partielles des routes et des vide sont assez faibles avec $P_r = 0.08$ et $P_v = 0.07$ ce qui reflète le nombre réduit de ces éléments.

La bande B2 présente une perméabilité totale modérée. Elle est de l'ordre de 0.38, dont la perméabilité partielle des vide est dominante avec $P_v = 0.32$. La perméabilité partielle des bâtis est presque nulle car la plupart des constructions sont des clôtures totalement imperméables, construites en parpaing et dont la hauteur moyenne est de 3.2m.

La bande B3 présente la perméabilité totale la plus faible du CEP 04 avec $P_t = 0.04$ car il n'existe qu'une seule ouverture le long de la bande et une seule route alors que les vides n'existent pas.

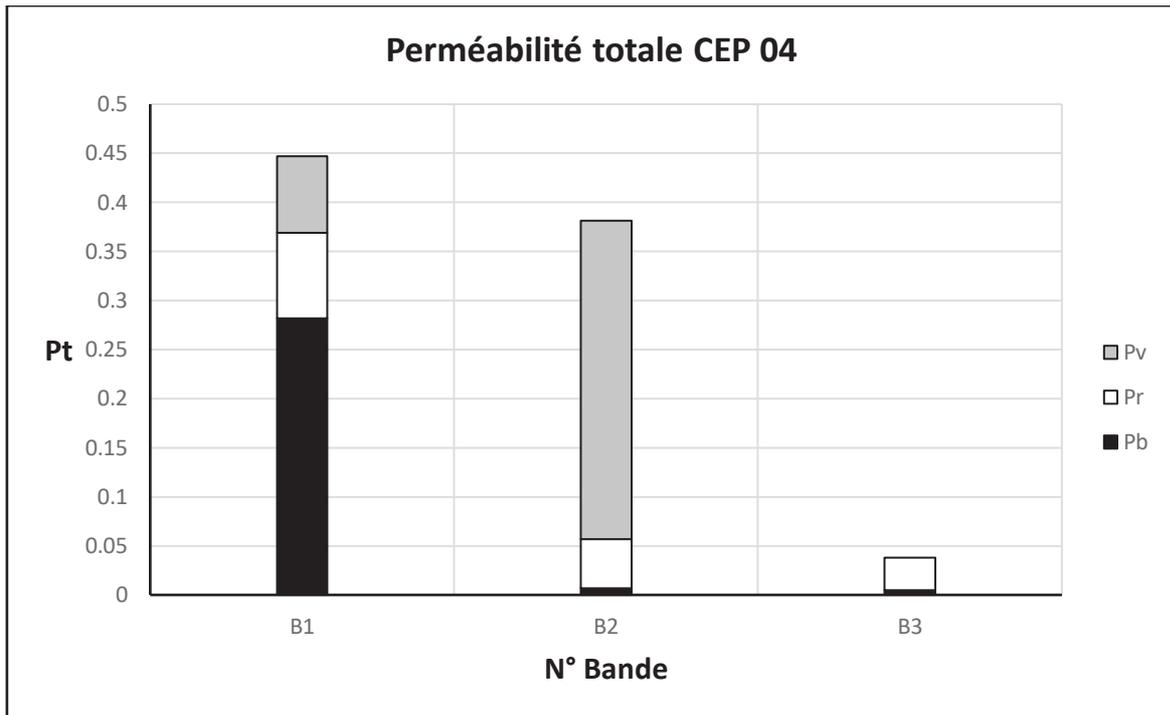


Figure 6.13 : Perméabilité totale du CEP 04

- **CEP 05**

Il s'étend sur une longueur de 1087 m décomposée en quatre bandes. Les perméabilités totales et partielles sont équilibrées sur les différentes bandes. Cela est due à l'homogénéité des bâtis le long du CEP. La figure 6.14 présente les perméabilités totales et partielles du CEP 05.

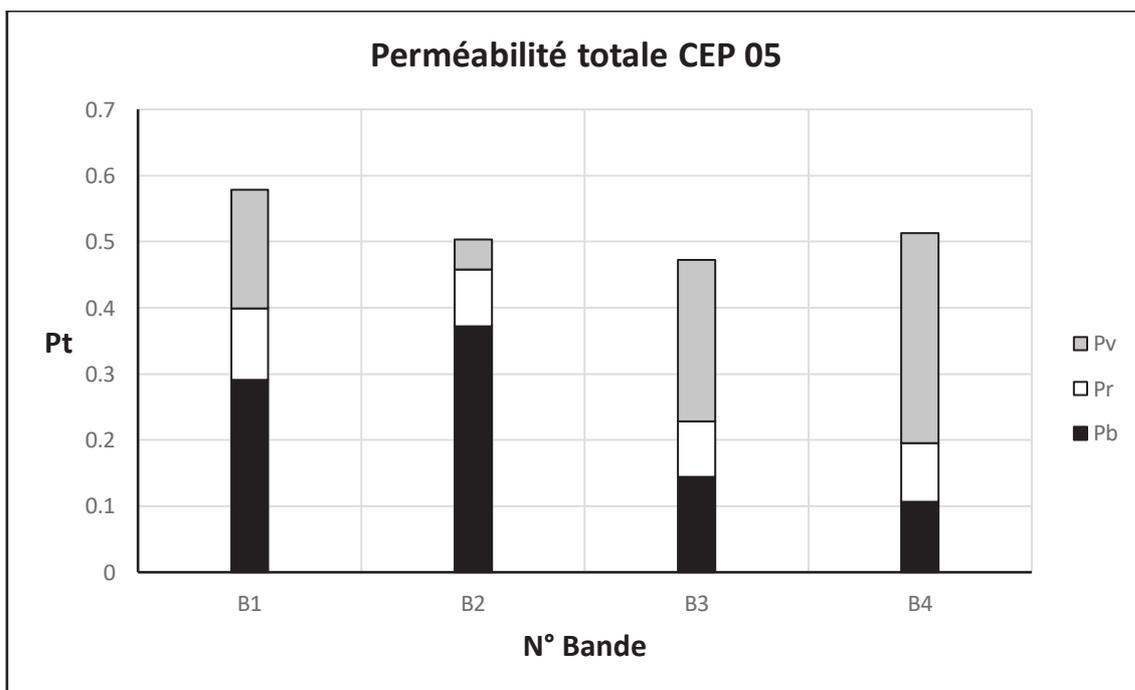


Figure 6.14 : Perméabilité totale du CEP 05

- **Les perméabilités totales moyennes des CEP**

La perméabilité totale moyenne est variable sur les cinq CEP. Elle est maximale et presque similaire, sur les CEP 01 et 02 avec $P_{tm} = 0.59$. Puis elle décroît sur les CEP 03 et 04. Enfin, elle augmente sur le CEP 05 avec $P_{tm} = 0.51$. Cette variation est due aux perméabilités partielles des éléments de la ville. Les résultats des perméabilités moyennes sur les différentes CEP sont représentés sur la figure 6.15.

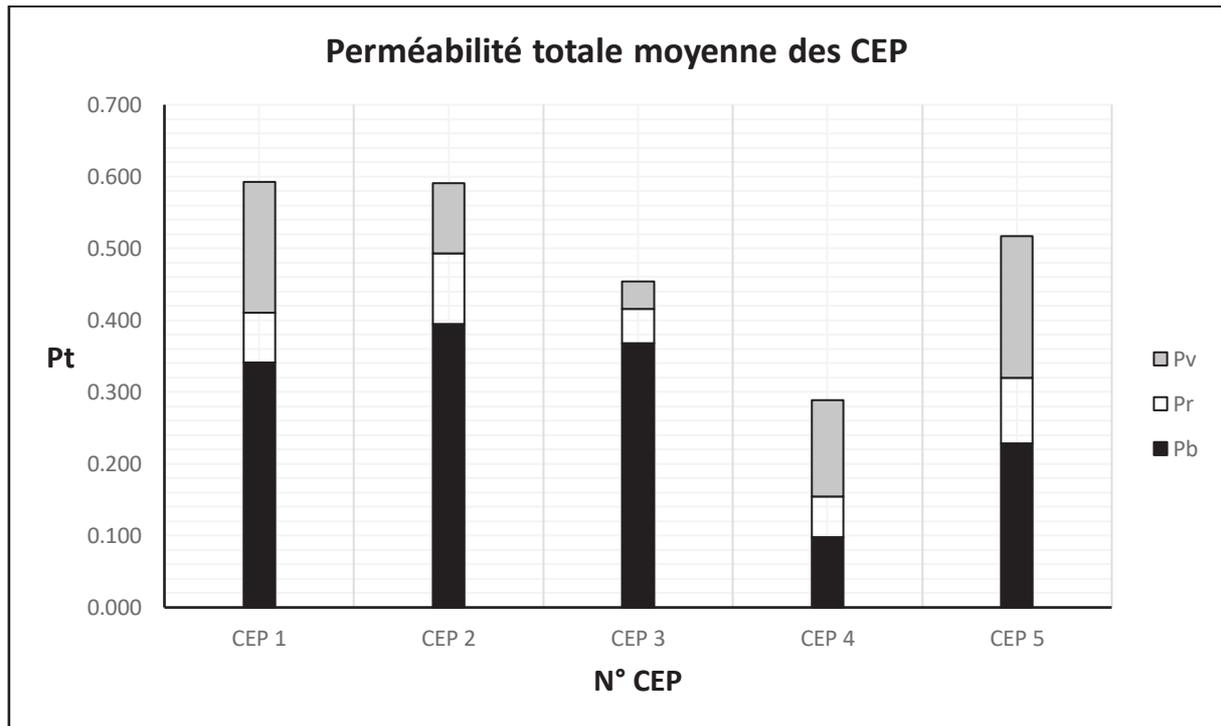


Figure 6.15 : Perméabilité totale moyenne des CEPs

VI.3.4.2 Densité des chemins hydrauliques

- **CEP 01**

Le CEP 01 est caractérisé par une densité des chemins hydrauliques très variable le long des sept bandes. La figure 6.16 illustre les valeurs de la densité des chemins hydrauliques bâtis et routes du CEP 01.

Parmi toutes les bandes du CEP 01, la bande B1 possède la densité des chemins du type bâtis la plus faible avec $D_{ch,b} = 26.7$. Cela est due, tout simplement, au faible nombre des bâtis sur le côté gauche alors que le côté droit en est complètement dépourvu. La densité des chemins du type routes est considéré faible avec $D_{ch,r} = 6.7$ puisque ce type de chemin est quasiment nul.

Sur la bande B2, la $D_{ch.b}$ connaît une augmentation par rapport la bande B1 puisque les bâtis commencent à apparaître sur le côté gauche. La $D_{ch.r}$ est la plus faible parmi toutes les bandes du CEP 01 avec 3.3 car le côté droit est quasiment occupé par le mur de soutènement tandis que le côté gauche ne présente aucune route.

La $D_{ch.b}$ continue à augmenter sur les bandes B3 et B4 qui atteint 103.3 et 136.7 successivement, cela est dû à la présence des bâtis les deux côtés, mais aussi à la clôture du jardin qui occupe presque 1/3 du côté droit. La $D_{ch.r}$ connaît aussi une augmentation significative sur les deux bandes B3 et B4 de 10 et 30. Elle est relativement faible sur la B3 à cause de la clôture du jardin, par contre celle-ci disparaît sur les derniers 200 m de la B4 ce qui augmente la $D_{ch.r}$ dans cette bande.

Sur la B5 la densité des différents chemins hydrauliques a diminué. La $D_{ch.b} = 56.6$ alors que $D_{ch.r} = 23.3$ à cause des clôtures totalement perméables des différents équipements situés sur le côté droit. Le côté gauche est constitué des anciennes constructions coloniales adhérentes avec peu d'ouvertures.

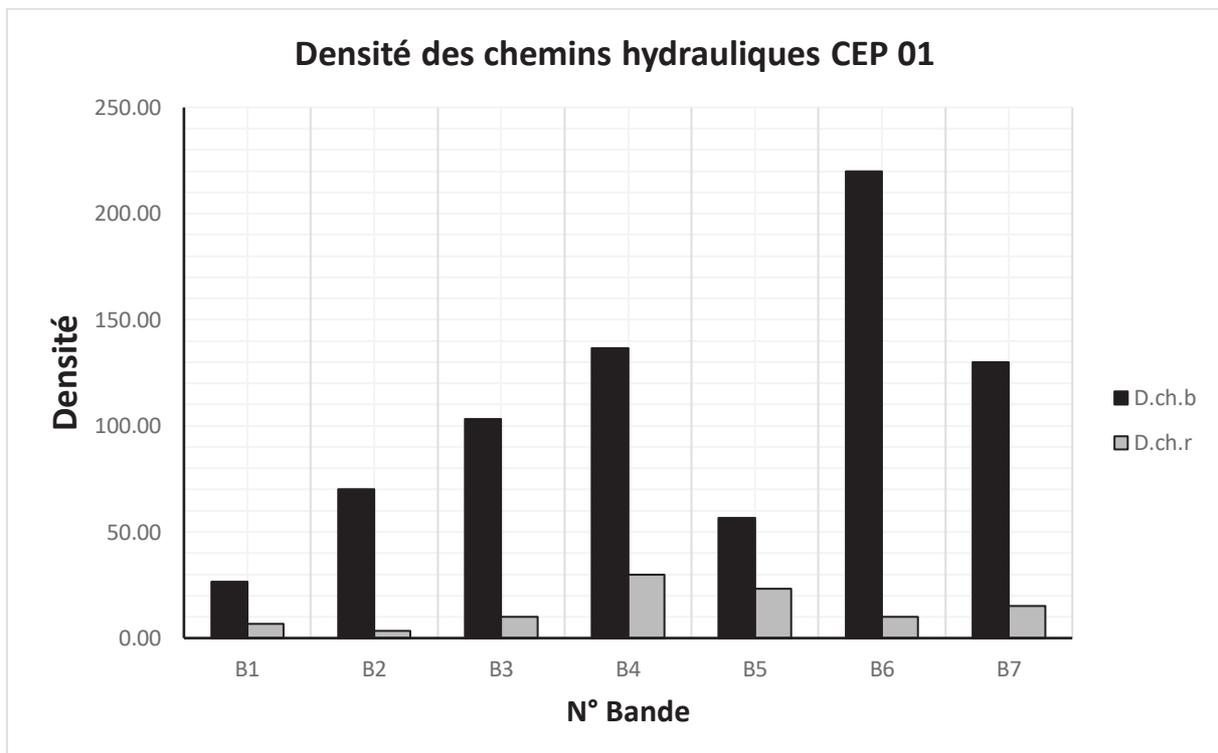


Figure 6.16 : Densité des chemins hydrauliques CEP 01

La bande B6 connaît la $D_{ch.b}$ la plus élevée du CEP 01 de l'ordre de 220, car le côté droit est constitué des maisons individuelles dont les rez-de-chaussée sont des locaux commerciaux ce qui implique un nombre important des chemins de type bâtis. En sens opposé, la $D_{ch.r}$ a diminué. Le nombre des routes est faible à cause de l'adhérence des bâtis.

Contrairement la B6, la B7 connaît la baisse de la $D_{ch.b}$ avec 130 et la hausse de $D_{ch.r}$ avec 15 car l'adhérence des bâtis a diminué et par conséquent le nombre des routes augmente.

- CEP 02

Le CEP 02 est caractérisé par une densité des chemins hydrauliques variable d'une façon homogène. Elle très faible sur la bande B1, accroit sur les bandes B2 et B3 jusqu'au maximum sur la B4. La figure 6.17 présente les densités des chemins hydrauliques sur le CEP 02.

La bande B1 possède la $D_{ch.b}$ la plus faible du CEP 02, égale 10. Cette valeur insignifiante est due au faible nombre des ouvertures sur le côté droit (il s'agit des façades arrière des maisons ayant les façades principales sur le CEP 01). Alors que la $D_{ch.r}$ est nul vu l'inexistence des routes sur cette partie.

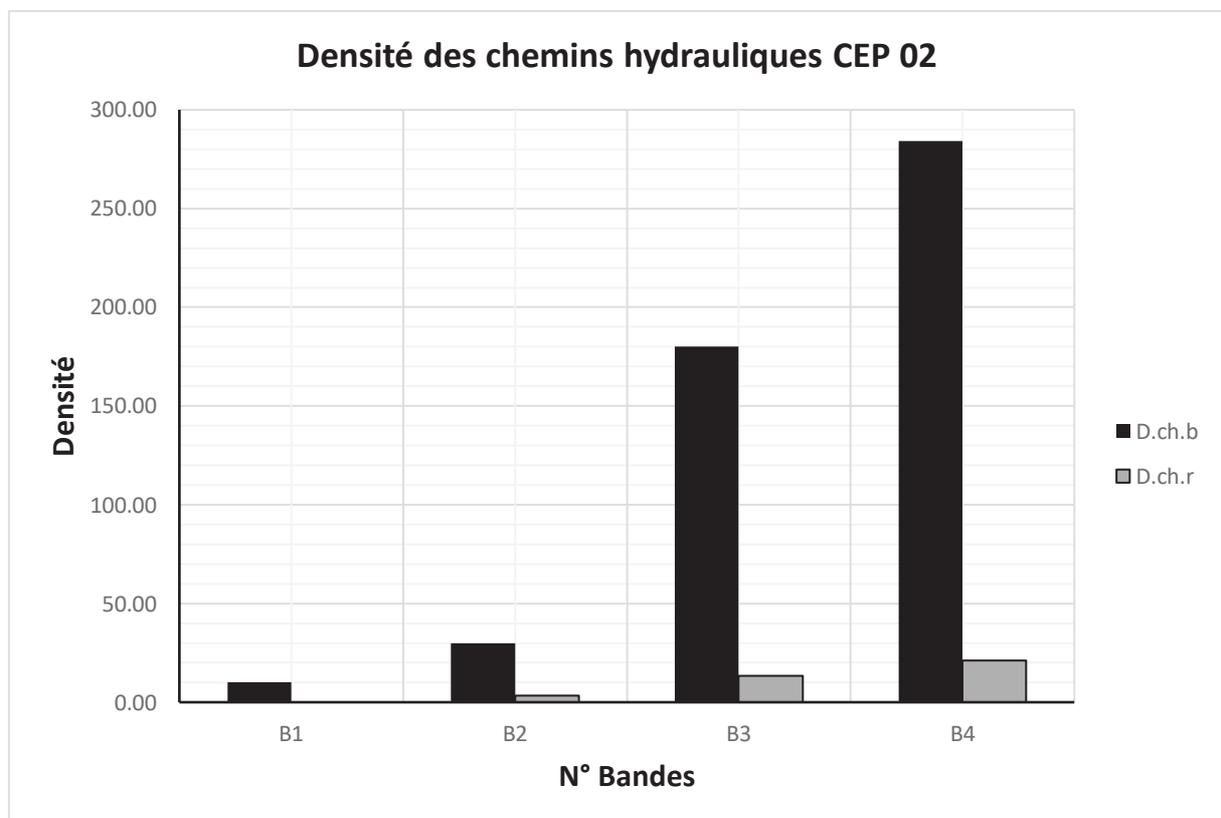


Figure 6.17 : Densité des chemins hydrauliques CEP 02

Sur la bande B2, les densités commencent à accroître avec $D_{ch.b} = 30$ et $D_{ch.r} = 3.3$. Cela est dû à la présence des ouvertures des clôtures des jardins domestiques. Les routes aussi commencent à apparaître.

Les densités continuent à se développer sur les bandes B3 et B4 et atteignent le maximum sur la B4 avec $D_{ch.b} = 284.2$ et $D_{ch.r} = 21$.

- **CEP 03**

Inversement au CEP 02, les densités des chemins hydrauliques sur le CEP 03 décroissent de la bande B1 jusqu'à la bande B3. La figure 6.18 présente les densités des chemins hydrauliques sur le CEP 03.

La bande B1 connaît la valeur maximale de la $D_{ch.b} = 50$ car cette partie du CEP contient un nombre important des maisons. La $D_{ch.r}$ est aussi maximale avec 6.7, mais elle est relativement faible car le nombre des routes est insignifiant vu la densité des anciens maisons.

Les densités sur la bande B2 commencent à baisser. La $D_{ch.b}$ connaît une diminution remarquable avec $D_{ch.b} = 6.7$. Cette valeur correspond seulement aux locaux commerciaux sur les premières 70 mètres. Le reste de la bande est constitué des clôtures totalement en parpaing. La $D_{ch.r}$ a aussi diminué en atteignant la moitié avec $D_{ch.r} = 3.3$ car il existe une seule impasse.

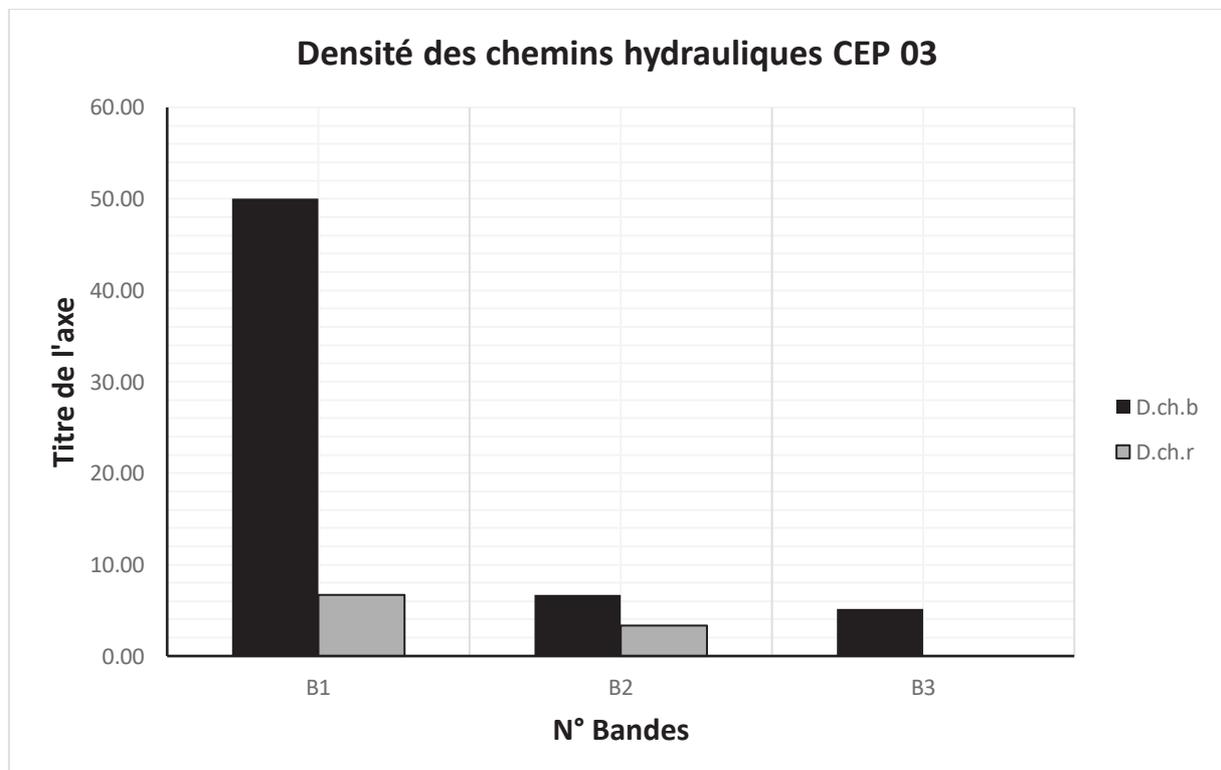


Figure 6.18 : Densité des chemins hydrauliques CEP 03

La bande B3 connaît les valeurs les plus faibles. La $D_{ch.b}$ est seulement 5.2 puisque cette bande est composée quasiment de clôtures des équipements sauf quelques clôtures des jardins en grillage métallique. La $D_{ch.r}$ est nulle car il n'existe pas de routes sur cette bande.

- **CEP 04**

Les densités sur les différentes bandes du CEP 04 sont très variables. La figure 6.19 présente les densités des chemins hydrauliques sur le CEP 04.

La bande B1 possède la $D_{ch.b}$ la plus élevée avec $D_{ch.b} = 26.7$ car il existe plusieurs clôtures des jardins en grillage en plus des façades des maisons. Cette valeur relativement faible de la $D_{ch.b}$ est causée par l'existence d'une clôture de l'annexe du C.C.L.S et aussi des terrains vides. La $D_{ch.r}$ est maximale sur cette bande avec $D_{ch.r} = 6.7$. Elle est relativement faible car il existe seulement deux routes.

Les densités sur la bande B2 connaissent une diminution. La $D_{ch.b} = 3.3$ car les premiers 30 mètres sont des locaux commerciaux, le reste de la bande est composé de la clôture de l'école et des terrains vides. La $D_{ch.r}$ est aussi faible avec seulement 3.3 puisqu'il existe une seule route.

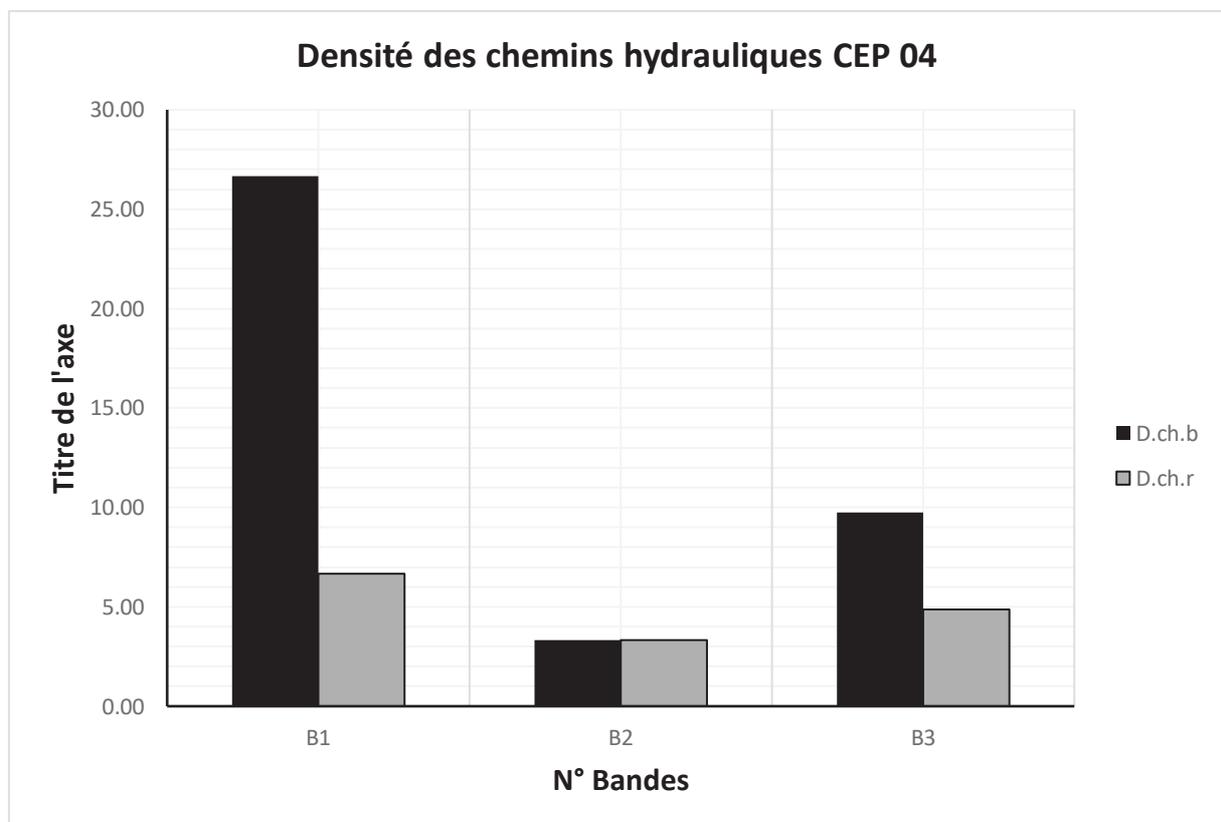


Figure 6.19 : Densité des chemins hydrauliques CEP 04

Les densités augmentent sur la bande B3. La $D_{ch.b} = 9.8$ alors que la $D_{ch.r} = 4.9$. Cette bande est caractérisée par quelques bâtis, une seule route et plusieurs terrains vides ce qui justifie les valeurs faibles des densités.

- **CEP 05**

Ce CEP est caractérisé par des densités variables sur toutes les bandes partant de la bande B1 jusqu'à la bande B4. La $D_{ch.b}$ décroît d'une façon non homogène alors que la $D_{ch.r}$ varie d'une façon aléatoire. La figure 6.20 présente les densités des chemins hydrauliques sur le CEP 05.

La bande B1 possède la $D_{ch.b}$ la plus élevée, elle est de l'ordre de 136.7. Ce chiffre étonnant est dû au nombre important des maisons sur les deux côtés du CEP. Aussi, La $D_{ch.r}$ est la plus élevée avec $D_{ch.r} = 20$ car il existe deux routes principales et un nombre important des ruelles et d'impasses.

La bande B2 connaît une faible diminution de la $D_{ch.b}$ avec 130. Bien que les maisons commencent à disparaître sur le côté droit, c'est la densité des maisons qui nous donne ce chiffre important. La $D_{ch.r}$ connaît une baisse importante de la moitié avec $D_{ch.r} = 10$ car le nombre des routes diminue.

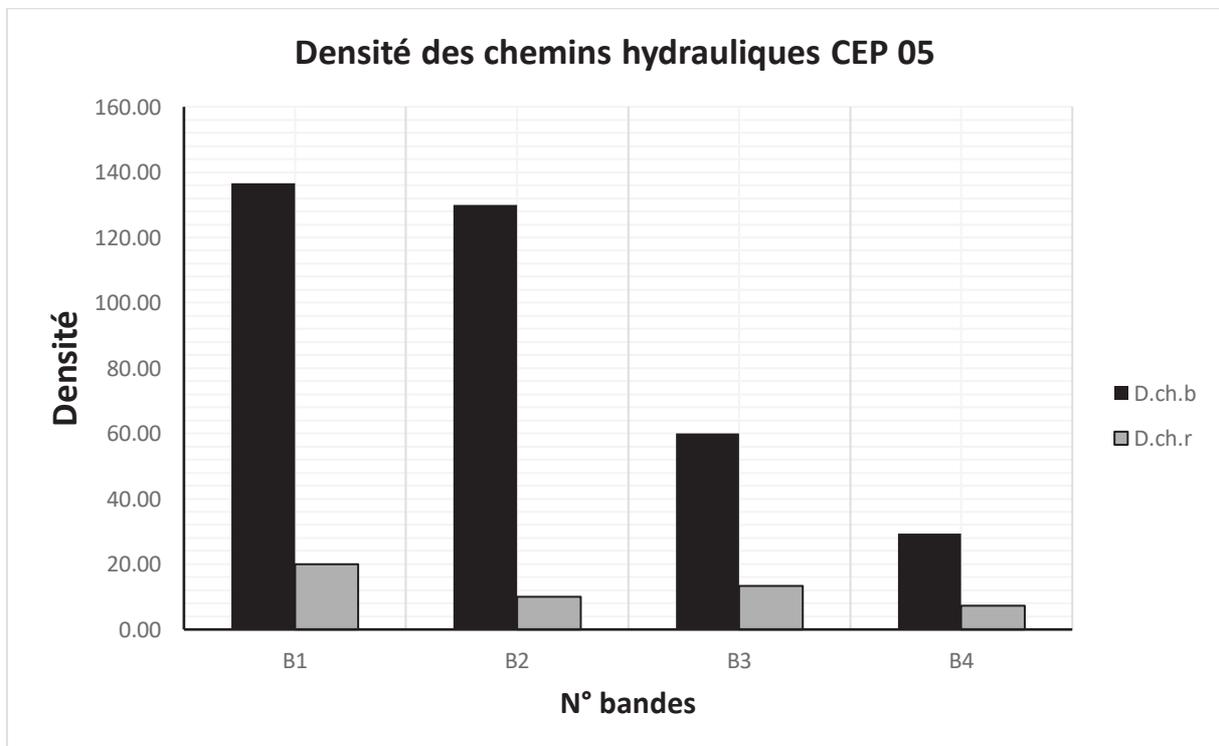


Figure 6.20 : Densité des chemins hydrauliques CEP 05

Sur les bandes B3 et B4, la $D_{ch,b}$ continue à diminuer avec un taux remarquable en atteignant la valeur minimale sur la B4 avec $D_{ch,b} = 29.4$. La $D_{ch,b} = 13.3$ sur la bande B3 et 7.4 sur la bande B4. Sur ces deux bandes, les terrains vides sont nombreux (il s'agit des lots non bâtis sur le côté gauche). Le côté droit est non urbanisé car il s'agit de la zone de servitude du canal.

VI.3.4.3 Largeur moyenne des chemins hydrauliques

- CEP 01

La largeur moyenne des chemins hydrauliques est très variable sur le CEP 01. La figure 6.21 présente les largeurs moyennes des chemins hydrauliques sur le CEP 01.

La bande B1 est caractérisée par une largeur moyenne des chemins hydrauliques la plus faible avec seulement $L_{ch,b} = 1.2$. Cette valeur insignifiante est due à l'absence quasi-totale des bâtis au début du CEP sauf le cimetière des martyrs et quelques locaux commerciaux. Puis, le côté droit est presque occupé par le mur de soutènement et le côté gauche est vide. La $L_{ch,r}$ est moyennement significative à cause de la route principale du POS 05.

La bande B2 connaît une faible augmentation de la $L_{ch,b}$ avec 2.4. Les maisons commencent à apparaître sur le côté gauche. Sur le côté droit, une partie de la clôture du jardin public joue un rôle aussi important. La $L_{ch,r}$ atteint la valeur maximale avec 25 grâce à la route d'évitement.

Sur la bande B3 la $L_{ch,b}$ connaît un accroissement important avec 5.7 car le côté droit de cette bande est complètement occupé par la clôture du jardin public. Le côté gauche est totalement bâti. La $L_{ch,r}$ connaît un abaissement remarquable car les chemins du type route sont juste des ruelles pour les piétons dont la largeur ne dépasse pas 2.5m.

Sur la bande B4, les différentes largeurs moyennes ont diminué avec $L_{ch,b} = 3$ et $L_{ch,r} = 2.7$. Cette diminution est due aux bâtis du type résidentiel adhérents qui ont généralement des ouvertures de 1.2 à 1.5m.

Les largeurs moyennes connaissent un accroissement remarquable sur la bande B5. La $L_{ch,b} = 8.5$ car sur cette bande les équipements publics, dont les ouvertures sont relativement large, commencent à apparaître comme la poste et la gendarmerie. La $L_{ch,r}$ a aussi augmenté avec $L_{ch,r} = 4.4$ car il existe deux routes principales, dont la largeur de chacune est 12.5 m, et le nombre des ruelles est significatif.

Sur les deux bandes B6 et B7 la $L_{ch,r}$ est presque stable. Elle varie de 4.8 à 5.1. Cette stabilité est due à l'organisation urbaine homogène. Les îlots ont des formes et des surfaces similaires ce qui donne des routes du même ordre et de même largeur. La $L_{ch,b}$ est variable, de l'ordre de 1.6 sur la bande B6 et augmente à 2.7 sur la bande B7. La cause principale de cette variation est la présence de terrains vides sur le côté droit.

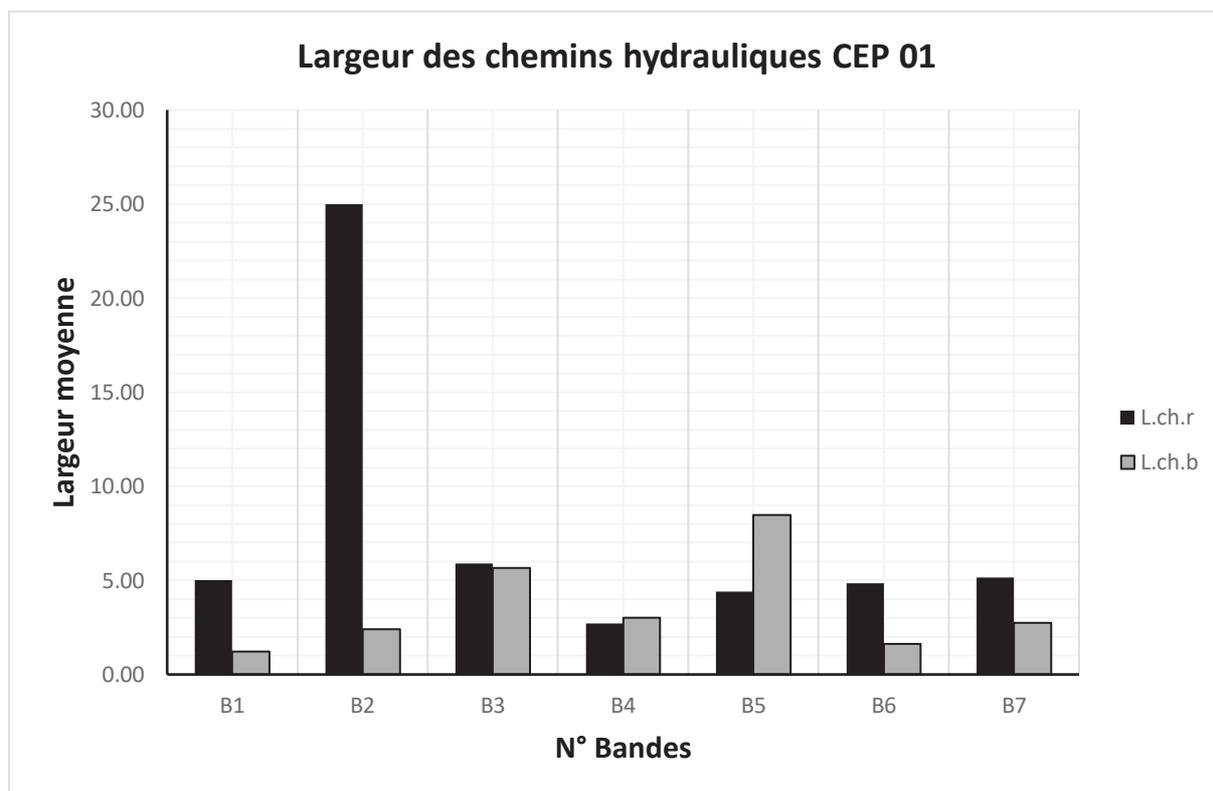


Figure 6.21 : Largeur des chemins hydrauliques CEP 01

- CEP 02

Le CEP 02 est caractérisé par des largeurs moyennes des chemins hydrauliques qui varient d'une façon contradictoire. La $L_{ch,r}$ n'existe pas sur la bande B1 et atteint le maximum sur la bande B4. La $L_{ch,b}$ est maximale sur la bande B1 alors qu'elle diminue au minimum sur la bande B4. La figure 6.22 présente les largeurs moyennes des chemins hydrauliques sur le CEP 02.

La bande B1 connaît la $L_{ch,b}$ maximale. Elle de l'ordre de 31.7. La $L_{ch,r}$ est nulle. Cette bande est caractérisée par l'absence totale des routes, le côté droit est occupé par les clôtures des jardins en grillage métallique qui sont totalement perméables. Cette partie du CEP est non goudronnée.

Sur la bande B2, la $L_{ch,b}$ diminue en atteignant 20. Les clôtures des jardins commencent à disparaître sur cette bande donc le flux est en contact direct avec les façades des bâtis. La $L_{ch,r}$

apparaît pour la première fois sur ce CEP avec $L_{ch,r} = 6.7$ puisque les ruelles commencent à apparaître. Aussi, la route principale, qui constitue le CEP, est devenue goudronnée.

Sur les deux bandes B3 et B4, la $L_{ch,b}$ diminue d'une façon remarquable avec $L_{ch,b} = 1.6$ sur la B3 et $L_{ch,b} = 1.6$ sur la B4. Cette chute de $L_{ch,b}$ est due au tissu urbain dense et régulier qui est composé des anciennes maisons coloniales dont le nombre d'ouvertures est faible et leurs dimensions sont peu importantes. La $L_{ch,r}$ connaît une légère augmentation sur la B3 avec $L_{ch,r} = 7.7$. Elle continue à augmenter sur la bande B4 avec $L_{ch,r} = 12.7$. Ces deux bandes sont caractérisées par la présence des routes sur les deux côtés.

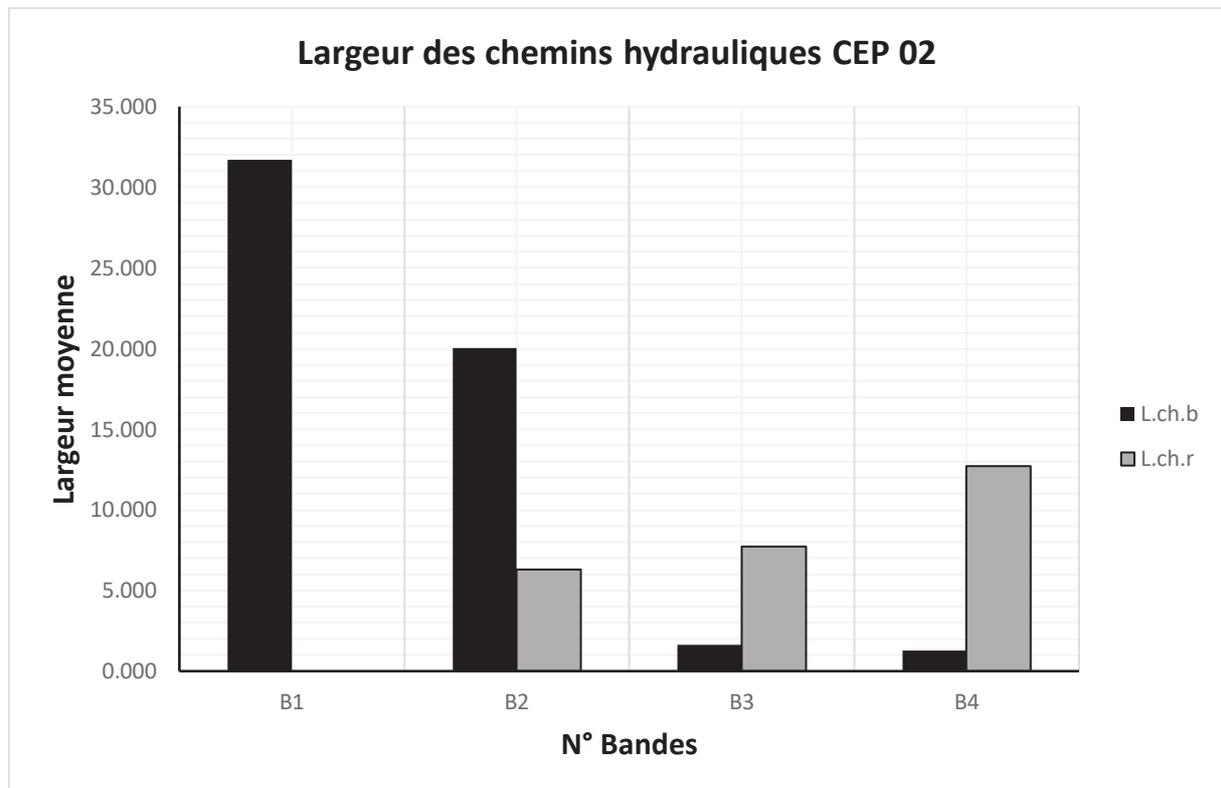


Figure 6.22 : Largeur des chemins hydrauliques CEP 02.

- CEP 03

D'une façon similaire au CEP précédent, les largeurs des chemins hydrauliques varient d'une façon opposée sur le CEP 03. La $L_{ch,b}$ commence par une valeur maximale sur la bande B1 et finit par le minimum sur la bande B3. La figure 6.23 présente les largeurs moyennes des chemins hydrauliques sur le CEP 03.

Sur la bande B1, la $L_{ch,b}$ est minimale avec 4.4. Cette valeur faible est due à la présence des anciennes constructions, quelques clôtures des jardins et des terrains vides. La $L_{ch,r}$ est maximale, mais relativement faible, avec $L_{ch,b} = 16.2$ car il existe une seule route principale dont la largeur égale à 8m.

La $L_{ch,b}$ connaît une légère augmentation sur la bande B2, puisqu'il existe quelques locaux commerciaux. Le reste est composé des murs sans aucune ouverture. La $L_{ch,r}$ commence à baisser avec $L_{ch,r} = 1.1$ du fait qu'il existe une route et une impasse.

Sur la bande B3, la $L_{ch,b}$ atteint la valeur maximale avec $L_{ch,b} = 161.3$. Ce chiffre étonnant est dû à la présence des clôtures des jardins, qui sont totalement perméables, avec des dimensions importantes. La $L_{ch,r}$ est nulle car il n'existe pas de routes.

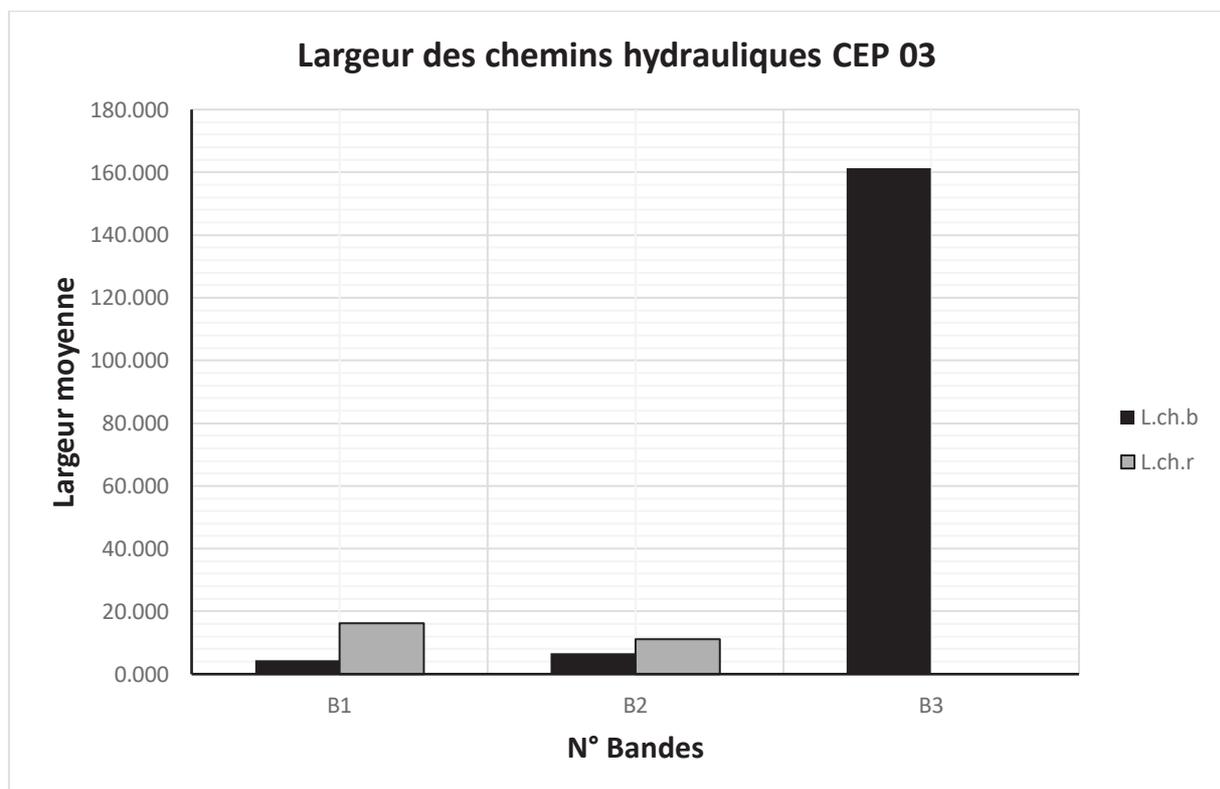


Figure 6.23 : Largeur des chemins hydrauliques CEP 03

- **CEP 04**

Sur le CEP 04, les largeurs moyennes des chemins hydrauliques sont variables. La $L_{ch,b}$ décroît de la bande B1 jusqu'à la bande B3. La figure 6.24 présente les largeurs moyennes des chemins hydrauliques sur le CEP 04.

La bande B1 connaît la $L_{ch,b}$ la plus élevée. Elle est de l'ordre de 10.6. Elle est due aux différentes ouvertures (locaux commerciaux, clôtures des jardins en grillage métallique). La $L_{ch,r}$ est aussi élevée. Elle est de l'ordre de 13 à cause des différentes ruelles et impasses.

Sur la bande B2, la $L_{ch,b}$ connaît un décroissement remarquable avec $L_{ch,b} = 2.1$. Cette chute est due à la présence du mur de l'école, qui est totalement imperméable. La $L_{ch,r}$ atteint la valeur maximale avec $L_{ch,r} = 15$ puisqu'il existe deux routes dont la largeur de chacune est 8.

La bande B3 connaît les valeurs de $L_{ch,b}$ et $L_{ch,r}$ les plus faibles. La $L_{ch,b} = 0.5$. Cette valeur, pratiquement nulle, est due à l'existence dominante des terrains vides et des clôtures imperméables. La $L_{ch,r}$ diminue, mais reste toujours significative, jusqu'à $L_{ch,r} = 6.6$ à cause d'une seule route principale.

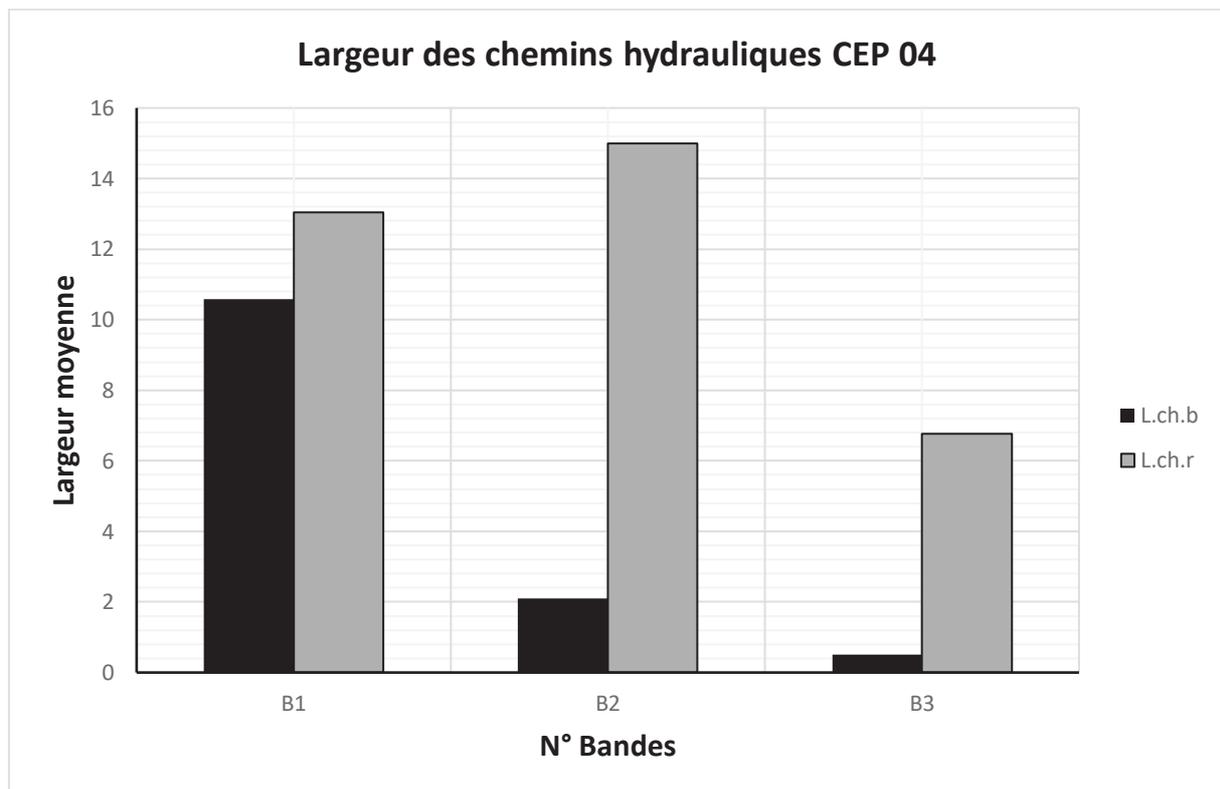


Figure 6.24 : Largeur des chemins hydrauliques CEP 04

- **CEP 05**

Le CEP 05 est caractérisé par des largeurs moyennes des chemins hydrauliques qui varient d'une façon hasardeuse. La figure 6.25 présente les largeurs moyennes des chemins hydrauliques sur le CEP 05.

Sur la bande B1, la $L_{ch.b} = 2.1$, c'est la valeur minimale sur toutes les bandes. Cette valeur est due à la présence de plusieurs terrains vides ainsi que le type des bâtis est essentiellement résidentiel. La $L_{ch.r} = 5.4$, c'est la valeur minimale à cause d'une seule route dont la largeur est 7m.

Sur la bande B2, les largeurs moyennes des chemins hydrauliques connaissent une augmentation. La $L_{ch.b} = 2.9$ alors que la $L_{ch.r} = 8.6$. La cause de cette augmentation est la structure organisée des ilots et l'absence des terrains vides. Les routes se trouvent chaque 90 m avec une largeur moyenne de 7m.

Sur la bande B3, les largeurs moyennes des chemins hydrauliques ont diminué. La $L_{ch.b} = 2.4$ et la $L_{ch.r} = 6.3$. La structure des ilots est toujours la même de la bande B2 mais il existe quelques terrains vides. La densité des chemins hydrauliques de type route implique la diminution de la $L_{ch.r}$.

Sur la bande B4, les largeurs moyennes des chemins hydrauliques ont augmenté. La $L_{ch.b} = 3.6$ et la $L_{ch.r} = 12$. L'augmentation de la $L_{ch.b}$ est due aux dimensions des ouvertures situées dans les rez-de-chaussée. La $L_{ch.r}$ atteint une valeur maximale car la densité est minimale.

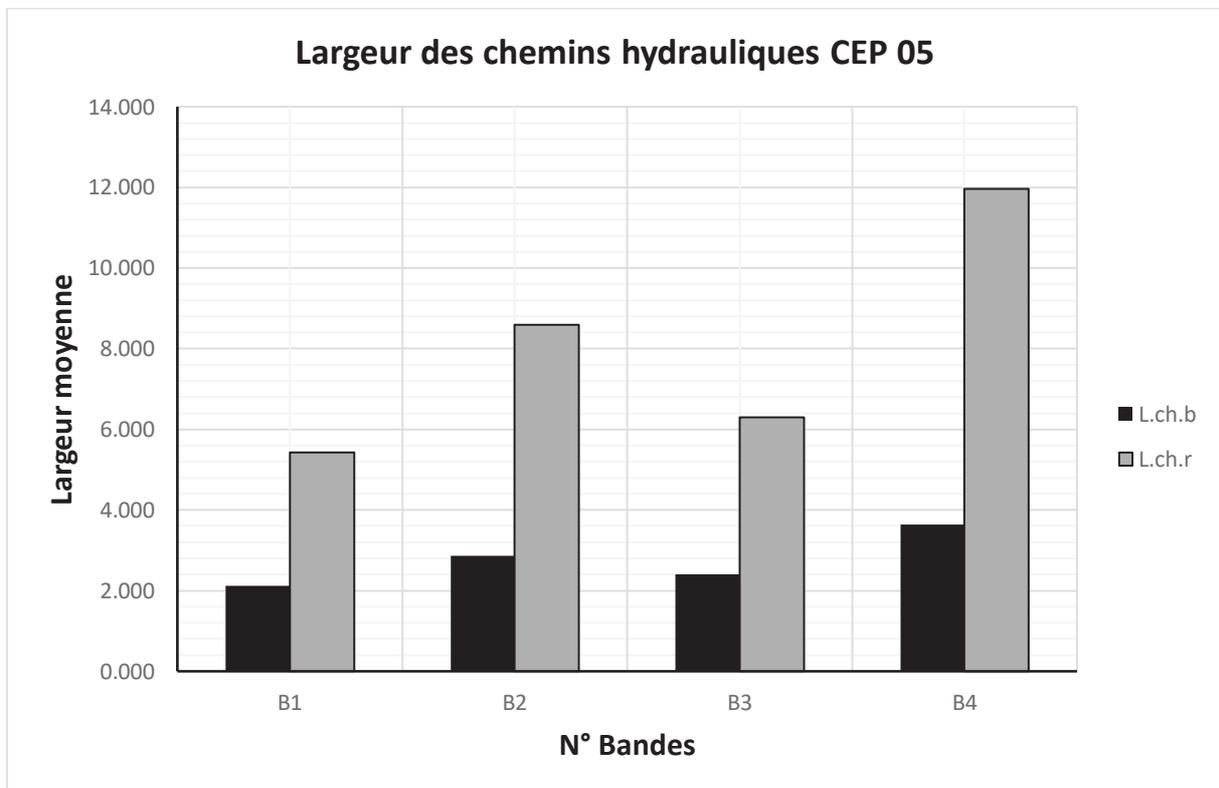


Figure 6.25 : Largeur des chemins hydrauliques CEP 05.

VI.3.5 Conclusion partielle

Les résultats des paramètres de la transmissivité (perméabilité partielle, densité et largeur moyenne des chemins hydrauliques) sont très variables sur les cinq CEPs, et au sein de chaque CEP sur les différentes bandes. On peut constater que cette variabilité est due aux facteurs suivants :

- Le type des éléments composant le CEP (Bâti, route et vide)
- La distribution spatiale des éléments le long du CEP (urbanisé sur les deux cotés ou non).
- Le mode d'utilisation des bâtis (résidentiel, commercial ou activité artisanale).
- La longueur du CEP.

VI.4 Analyse multicritère pour l'évaluation et la cartographie de la vulnérabilité de la ville de Sigus au risque d'inondation.

Pour les gestionnaires des communautés, des agences gouvernementales et des entreprises, la prise de décision est une procédure perturbante et compliquée qui nécessite le retour des expériences précédentes, l'avis des experts et l'utilisation des techniques de recherche opérationnelles dites classiques. Celles-ci préoccupent essentiellement de la fonction économique (Ben Mena, 2000). Ces méthodes doivent être remplacées par d'autres intégrant des différents critères. Les méthodes d'analyse multicritères fournissent un outil très puissant d'aide à la décision car elles permettent d'intégrer tous type de critères au sein d'un processus d'analyse pour aboutir à une décision rationnelle justifiée par des calculs.

Notamment, les décideurs sont plus hésitants à prendre des décisions basées sur des sentiments et des intuitions et préfèrent plutôt utiliser des outils analytiques et quantitatifs, pour fonder et analyser leurs décisions sur un terrain solide. Plusieurs méthodes basées sur les mathématiques appliquées et la recherche opérationnelle se révèlent utiles pour aider les décideurs à prendre des décisions éclairées. Parmi ces méthodes, il existe également celles qui exigent, en tant qu'instruments, des jugements subjectifs d'un décideur ou d'un expert. C'est dans ce contexte que l'Analyse Hiérarchique des Procédés (AHP : Analytic Hierarchy Process) devient un outil utile pour analyser les décisions. D'une manière générale, l'AHP est une théorie et une méthodologie pour la mesure relative dont on ne s'intéresse pas aux mesures exactes de certaines quantités, mais plutôt aux proportions entre elles (Brunelli, 2015).

La gestion des risques naturels constitue le cas le plus délicat pour les gestionnaires. Une bonne gestion d'un risque d'inondation nécessite, d'abord, la quantification et la connaissance de la propagation de ce risque. Cela doit explicitement dépasser l'approche classique, qui se limite souvent la simple cartographie des zones inondables, et faire intervenir une approche plus crédible qui s'appuie sur l'analyse de la vulnérabilité des différents enjeux. Dans ce contexte la méthode AHP a été largement utilisée (Willett, 1991), (Pawattena, 2013), (Lawal, 2012), (Gicovic, 2017).

VI.4.1 Principe de la méthode AHP

L'AHP est un outil d'analyse multicritère performant qui a été introduit par le mathématicien Thomas Saaty en 1980. La méthode permet d'intégrer plusieurs critères et arriver à un choix justifié. Donc la décision est alors dite rationnelle, systématique et correctement prise. Elle repose sur le principe d'obtention des poids pour les alternatives. Dans ce contexte, Saaty a développé une méthode de comparaison par paire (PCM : Pair-wise Comparison Method) selon une échelle d'importance (tableau 6.5). La première étape pour la prise de décision consiste à diviser le problème général en sous-problèmes qui forment, plus tard, la structure hiérarchique. Cette structure aide à comprendre et simplifier le problème. Dans chaque niveau hiérarchique, les poids sont calculés. Les figures 6.26 et 6.27 illustrent le principe de la méthode AHP.

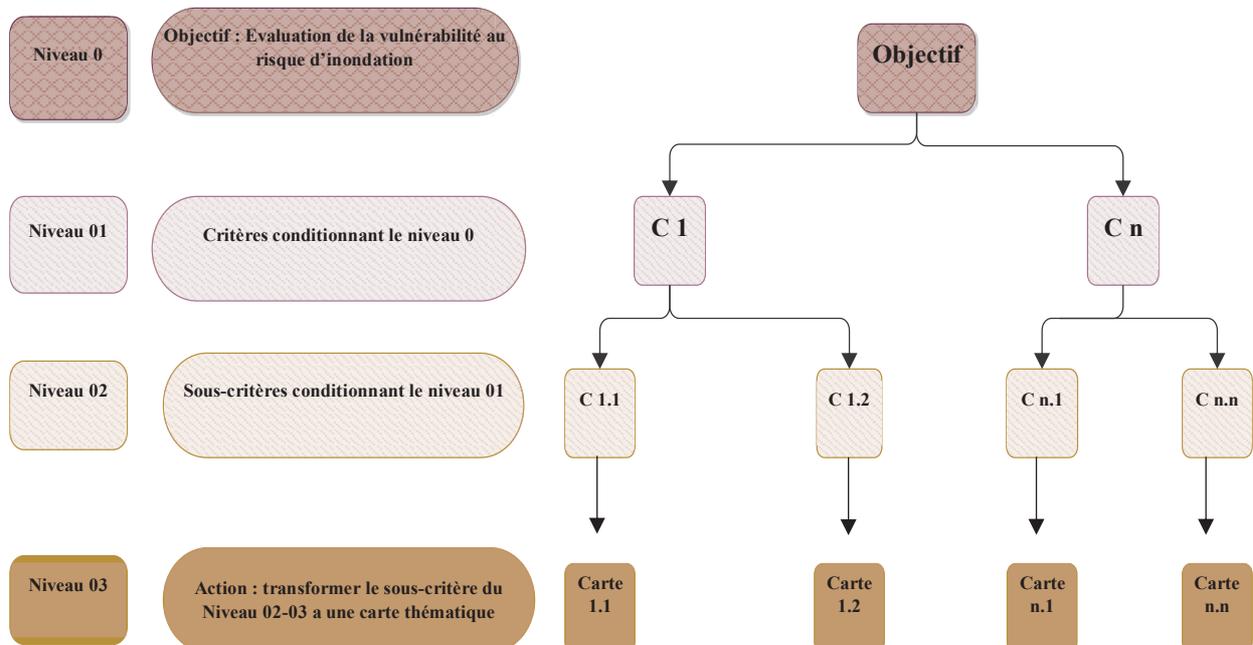


Figure 6.26 : exemple d'une structure hiérarchique de l'AHP

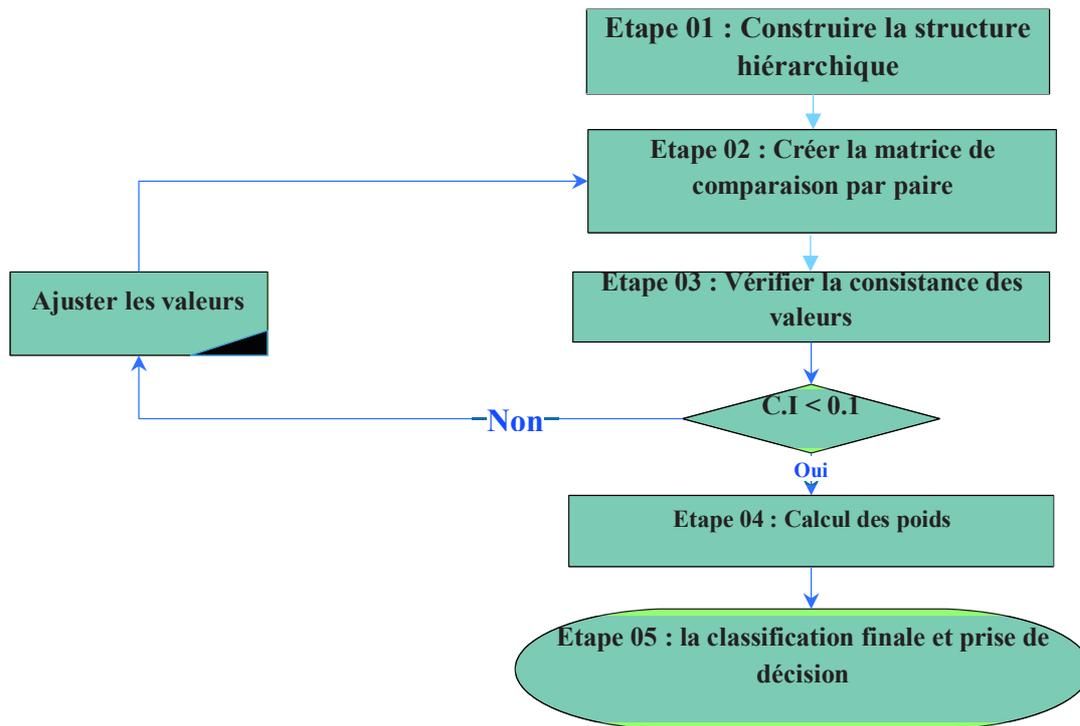


Figure 6.27 : Schéma de principe de la méthode AHP

Tableau 6.5 : Echelle fondamentale des comparaisons par paire.

Importance	Définition
1	Importance égale
3	Importance modérée de l'un sur l'autre
5	Importance forte
7	Très forte importance
9	Importance extrême
2, 4, 6, 8	Valeurs intermédiaires entre deux jugements adjacents pour affiner les jugements

Tableau 6.6 : Comparaison par paire de critères

Critère 01	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Critère 02
Critère 01	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Critère 03
Critère 02	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Critère 03

Pour faire la comparaison par paire, on fait recours à un questionnaire pour obtenir l'importance relative des critères entre eux (tableau 6.6). Le cercle en rouge indique l'importance d'un critère par rapport à l'autre. Dans l'exemple proposé tableau 6.8 le critère 01 est cinq fois plus important que le critère 02, alors que le critère 03 est trois fois plus important que le critère 01. Ces jugements seront transformés en matrice dite "*Matrice de Comparaison par Paire*" indiquée comme suit :

$$M_p = \begin{bmatrix} 1 & r_{12} & \dots & r_{1j} \\ 1/r_{12} & 1 & \dots & r_{2j} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1/r_{1j} & 1/r_{2j} & \dots & 1 \end{bmatrix}$$

Eventuellement, la matrice de comparaison par paire est constituée par des valeurs variant entre 1/9 et 9. Les éléments de la diagonale ont toujours la valeur 1.

Les valeurs attribuées aux critères reflètent des opinions et des préférences, ce qui signifie qu'il n'y a pas une règle pour les quadriller. Mais cela peut conduire à une matrice qui n'est pas vraiment cohérente surtout dans le cas où le nombre de critères est important. La cohérence de la matrice est déterminée par le calcul du "*Rapport de Cohérence*" R.C. Ceci est obtenu en suivant les étapes suivantes :

- Calcul de la matrice des jugements qui est le produit de la matrice de comparaison par paire et la somme des lignes de celle-ci

Tableau 6.7 : Matrice de comparaison par paire

Critère	C1	C2	C3
C1	1	r ₁₂	r ₁₃
C2	1/r ₁₂	1	r ₂₃
C3	1/r ₁₃	1/r ₂₃	1
somme	S1	S2	S3

Tableau 6.8 : Matrice de jugement

Critère	C1	C2	C3	Poids
C1	1*S1	r ₁₂ *S2	r ₁₃ *S3	= $\sum_{i=1}^n r_{ij} * Si/n$
C2	1/r ₁₂ *S1	1*S2	r ₂₃ *S3	= $\sum_{i=1}^n r_{ij} * Si/n$
C3	1/r ₁₃ *S1	1/r ₂₃ *S2	1*S3	= $\sum_{i=1}^n r_{ij} * Si/n$

- Calcul de de l'indice de cohérence "I.C"

$$I. C = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (6.5)$$

n : le nombre de critères

λ : la valeur propre maximale de la matrice, calculée par la formule suivante :

$$\lambda = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{W_i} \quad (6.6)$$

- Calcul du rapport de cohérence " R.C "

$$R. C = \frac{I.C}{I.A} \quad (6.7)$$

I.A : Indice de l'incohérence aléatoire. Il dépend du nombre de critères comme le montre le tableau (6.9). Pour une bonne cohérence des jugements le R.C doit être < 0,1 sinon les jugements sont considérés incohérents et la comparaison par paire doit être vérifiée.

Tableau 6.9 : valeurs de l'indice de l'incohérence aléatoire I.A (Saaty, 1980).

n	1	2	3	4	5	6	7	8
I.A	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41

VI.4.2 Conception du modèle hiérarchique

L'utilisation de la méthode AHP, pour évaluer la vulnérabilité au risque d'inondation, nécessite d'abord, la conception de la structure hiérarchique (Pugnet, 2015). Les critères qui composent le modèle sont ordonnés dans plusieurs niveaux de la manière suivante (figure 6.28) :

- **Niveau 0** : signifie l'objectif qui est : l'évaluation de la vulnérabilité de Sigus au risque d'inondation.
- **Niveau 01** : correspond aux critères qui vont définir, éventuellement, l'objectif. Dans ce modèle, ces critères sont "la topographie" et "la transmissivité". Ces deux critères ne sont pas directement mesurables.
- **Niveau 02** : les critères du niveau 01 sont décomposés en sous-critères du niveau 02. A ce stade, le critère topographie est divisé en trois sous-critères directement mesurables qui sont : la distance à partir des rives du cours d'eau, l'élévation du site et la pente. Le critère transmissivité est divisé en trois sous-critères qui ne sont pas directement

mesurables : la perméabilité partielle, la densité des chemins hydrauliques et la largeur moyenne des chemins hydrauliques.

- Niveau 03 : contient seulement des sous-critères qui conditionnent les sous-critères du niveau 02.

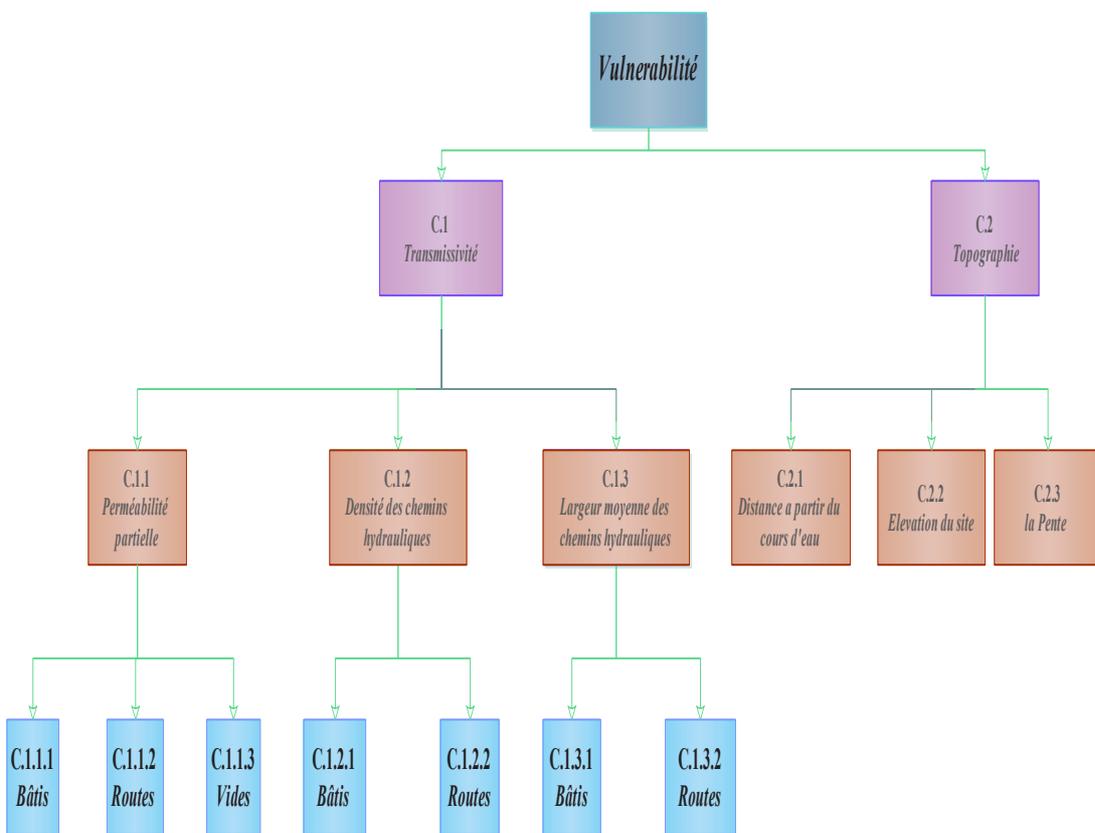


Figure 6.28 : Structure hiérarchique générale

VI.4.2.1 Le critère "Transmissivité"

Le critère transmissivité se décompose en trois sous-critères du niveau 02 qui sont :

- La perméabilité partielle (bâtis, routes et vides).
- La densité des chemins hydrauliques (bâtis et routes).
- La largeur moyenne des chemins hydrauliques (bâtis et routes).

Donc il est indispensable d'évaluer ces trois critères et leurs sous-critères du niveau 02 pour aboutir à la carte de vulnérabilité selon le critère transmissivité.

VI.4.2.1.1 Le sous-critère "Perméabilité partielle"

Il se décompose en trois sous-critères du niveau 03 (figure 6.29). Ces derniers ont une importance différente. Le critère C.1.1.1 a plus d'importance car il concerne les bâtis qui sont des biens immeubles alors que les routes sont moins vulnérables au risque d'inondation, sauf les ouvrages d'art. Le sous-critère C.1.1.3 a moins d'importance car il concerne des terrains vides. Le tableau 6.10 montre la comparaison par paire entre les sous-critères C.1.1.1, C.1.1.2 et C.1.1.3.

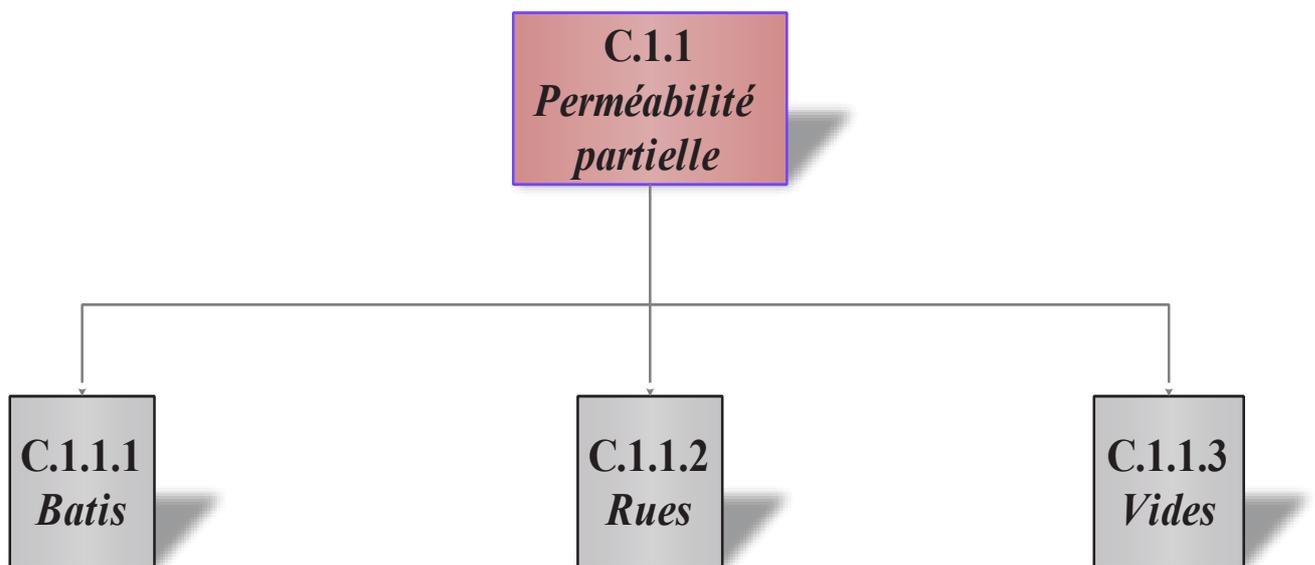


Figure 6.29 : Structure hiérarchique du sous-critère "Perméabilité partielle"

Tableau 6.10 : Comparaison par paire des critères de la perméabilité partielle

Critère 1.1.2	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Critère 1.1.1
Critère 1.1.2	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Critère 1.1.3
Critère 1.1.1	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Critère 1.1.3

Tableau 6.11 : Matrice de comparaison par paire

	Critère 1.1.1	Critère 1.1.2	Critère 1.1.3
Critère 1.1.1	1	7	9
Critère 1.1.2	0.14	1	3
Critère 1.1.3	0.11	0.33	1
	1.25	8.33	13

Tableau 6.12 : Matrice de jugement

	Critère 1.1.1	Critère 1.1.2	Critère 1.1.3	Score	Score (%)
Critère 1.1.1	0.797	0.840	0.692	0.777	77.659
Critère 1.1.2	0.114	0.120	0.231	0.155	15.490
Critère 1.1.3	0.089	0.040	0.077	0.069	6.851
	1	1	1	1	100

Tableau 6.13 : Résultat de calcul du C.R pour le critère C 1.1

	Poids	Ci	n	λ	C.I	C.R
Critère 1.1.1	0.777	3.190	3	3.082	0.041	0.071
Critère 1.1.2	0.155	3.043				
Critère 1.1.3	0.069	3.013				

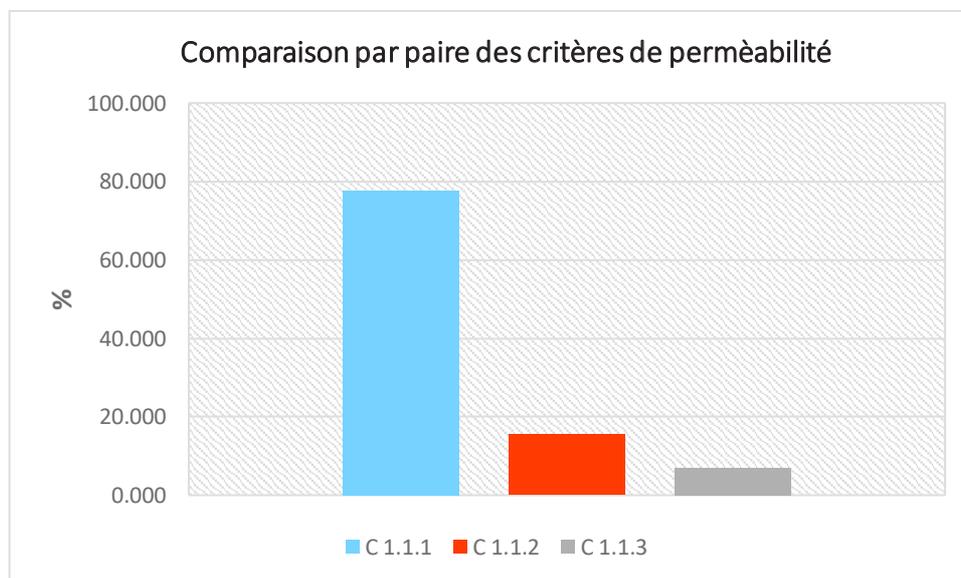


Figure 6.30 : Comparaison par paire des critères C1.1.1, C1.1.2 et C1.1.3

Les résultats de l'AHP sur le critère C 1.1 (perméabilité partielle) donnés au tableau 6.12 montrent que le critère C 1.1.1 (bâtis) est le critère ayant plus d'importance avec 77.% suivi par 15.5% sur le critère C 1.1.2 Les résultats du tableau 6.13 indiquent que le CR < 0.10 ce qui signifie que les jugements sont cohérents.

Pour l'établissement de la carte de vulnérabilité selon le critère "Perméabilité" on a classé les résultats de la perméabilité des différents éléments en cinq classes. Chaque classe correspond à un indice de vulnérabilité comme il est représenté dans le tableau 6.14. Le lecteur peut s'adresser à l'annexe 04 pour voir les cartes des critères composants la perméabilité partielle.

Tableau 6.14 : Classification des indices vulnérabilité pour les critères de la perméabilité partielle

Indice de vulnérabilité	Perméabilité des bâtis	Perméabilité des routes	Perméabilité des vides
Très faible	1	0 – 0.05	0 – 0.05
Faible	2	0.05 – 0.2	0.05 – 0.2
Modéré	3	0.2 – 0.4	0.2 – 0.4
Fort	4	0.4 – 0.6	0.4 – 0.6
Très fort	5	0.6 – 0.836	0.6 – 0.836

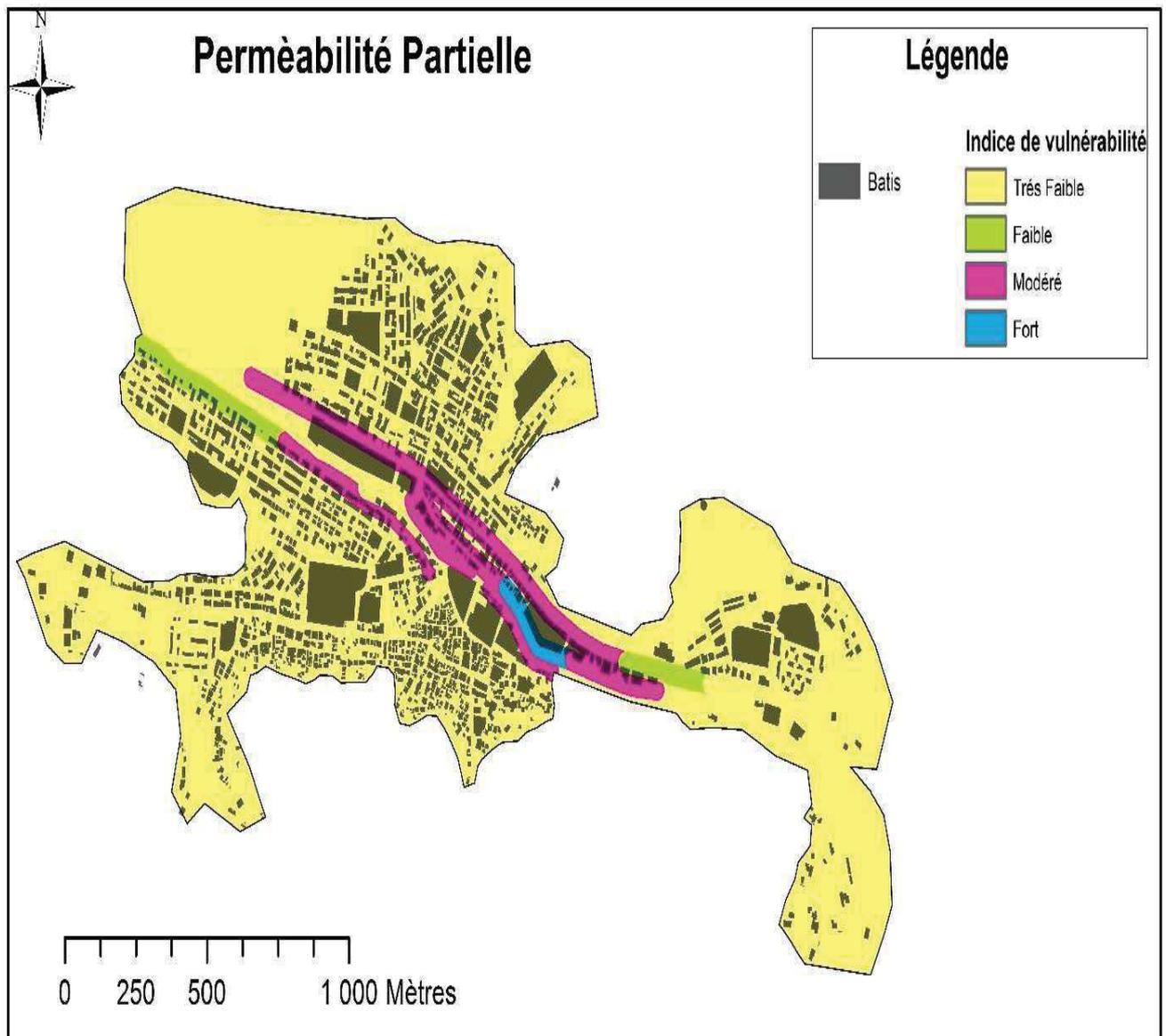


Figure 6.31 : carte de vulnérabilité selon le critère "Perméabilité partielle"

VI.4.2.1.2 Le sous-critère "Densité des chemins hydrauliques"

Ce critère se divise en deux sous-critères du niveau 03 (figure 6.32) dont l'importance est inégale. Le critère C1.2.1 est trois fois plus important que le critère C1.2.2. Le tableau 6.15 montre la comparaison par paire entre les sous-critères C.1.2.1, C1.2.2.

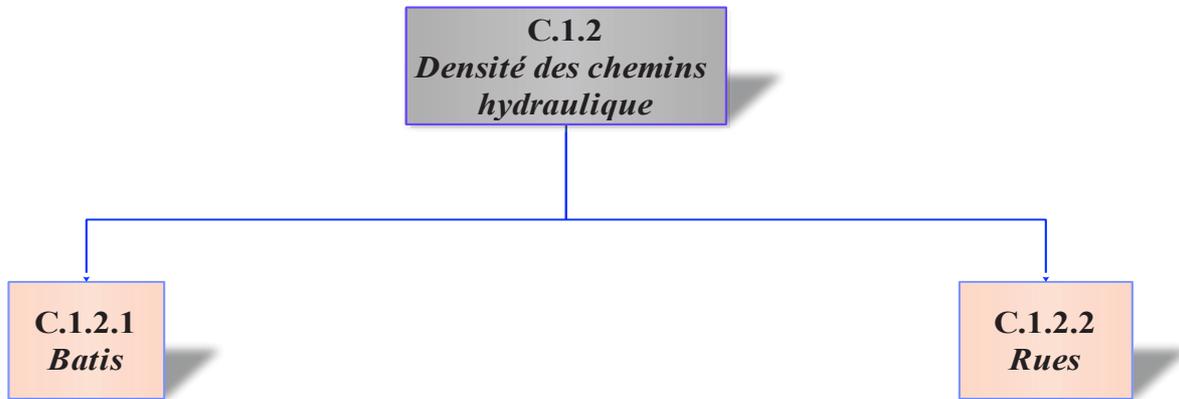


Figure 6.32 : Structure hiérarchique du critère "densité des chemins hydrauliques"

Tableau 6.15 : Comparaison par paire des critères de la densité

Critère 1.2.1	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Critère 1.2.2
---------------	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---------------

Tableau 6.16 : Matrice de comparaison par paire

	Critère 1.2.1	Critère 1.2.2
Critère 1.2.1	1	3
Critère 1.2.2	0.33	1
	1.33	4

Tableau 6.17 : Matrice de jugement

	Critère 1.2.1	Critère 1.2.2	Score	Score (%)
Critère 1.2.1	0.75	0.75	0.75	75
Critère 1.2.2	0.25	0.25	0.25	25
	1	1	1	100

Les résultats de l'AHP sur le critère C 1.2 indiquent que le critère C 1.2.1 est le plus important avec 75 % et le critère C 1.2.2 avec 25% (tableau 6.17). Pour une comparaison par paire entre deux critères seulement, la cohérence est toujours vérifiée car C.R= 0. Les résultats de la densité des chemins hydrauliques ont été classés selon cinq classes comme le montre le tableau 6.18.

Tableau 6.18 : Classification des indices vulnérabilité pour les critères de la densité

Indice de vulnérabilité		Densité des bâtis	Densité des routes
Très faible	1	0 – 3.33	0 – 3.33
Faible	2	3.33 – 10	3.33 – 10
Modéré	3	10 – 50	10 – 50
Fort	4	50 – 100	50 – 100
Très fort	5	100 - 285	100 - 285

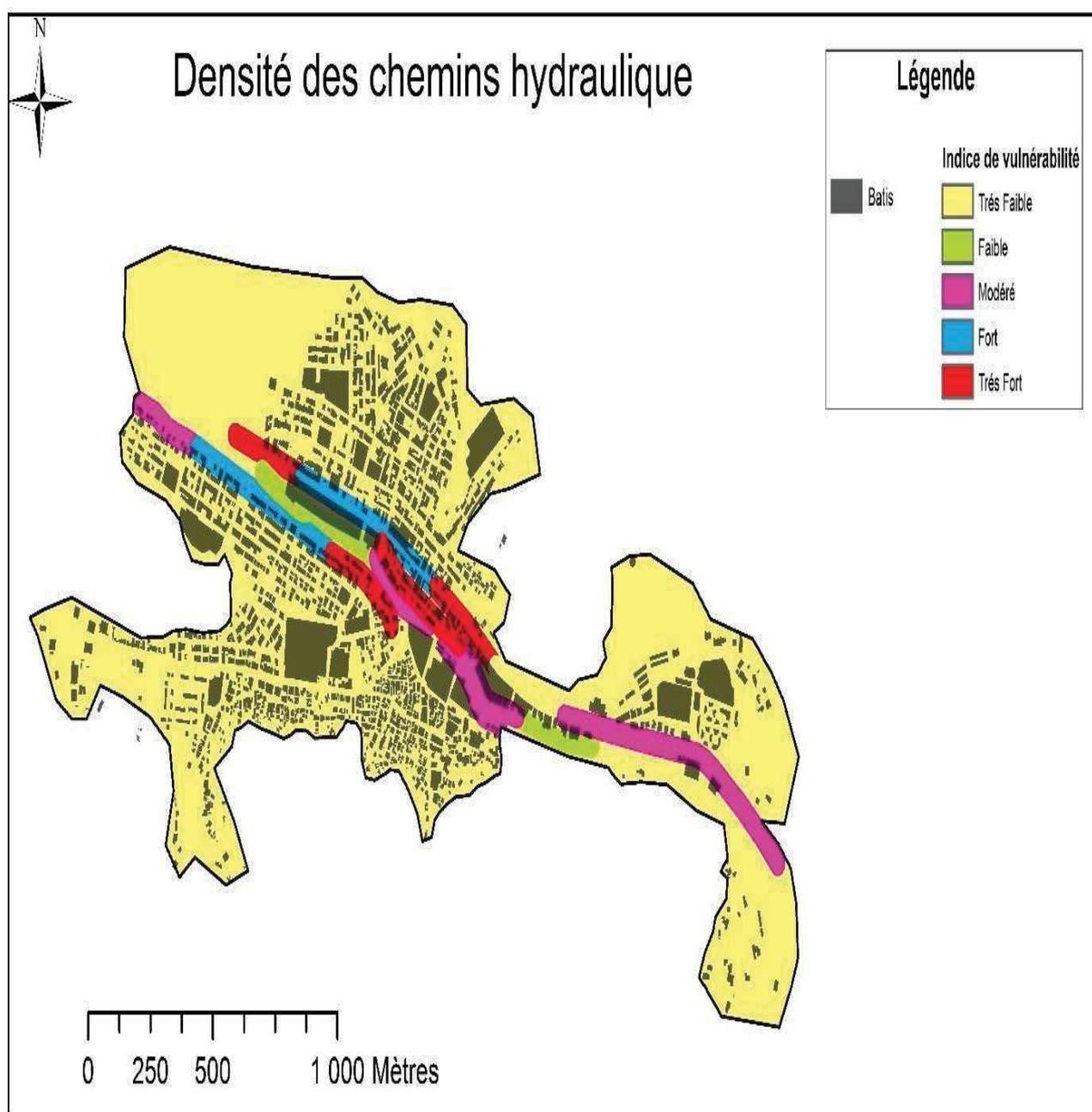


Figure 6.33 : carte de vulnérabilité selon le critère "densité des chemins hydrauliques"

VI.4.2.1.3 Le sous-critère "Largeur moyenne des chemins hydrauliques"

Ce critère, aussi, se divise en deux sous-critères du niveau 03 (figure 6.34) avec une importance inégale. Le critère C1.3.1 est trois fois plus important que le critère C1.3.2. Le tableau 6.19 montre la comparaison par paire entre les sous-critères C.1.3.1, C1.3.2.

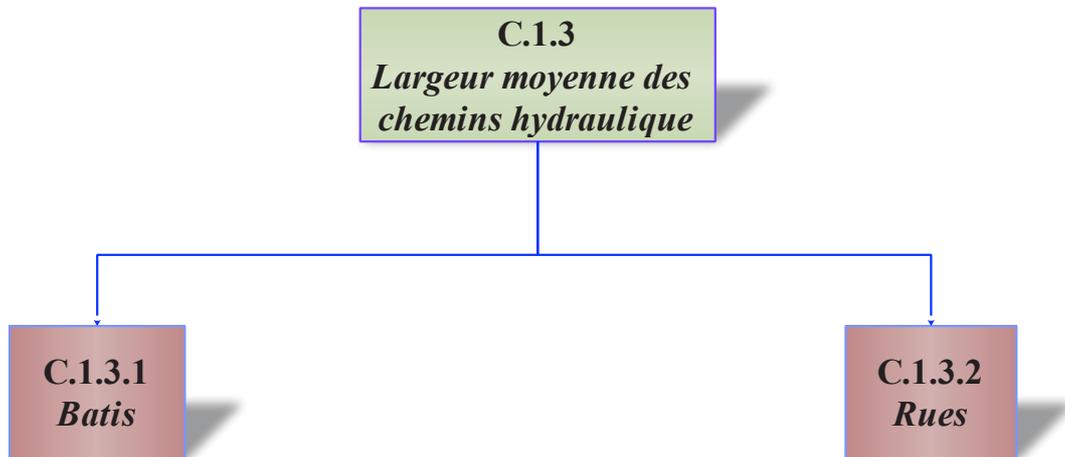


Figure 6.34 : Structure hiérarchique du critère "largeur moyenne des chemins hydrauliques"

Tableau 6.19 : Comparaison par paire des critères de la largeur moyenne

Critère 1.3.1	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Critère 1.3.2
---------------	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---------------

Tableau 6.20 : Matrice de comparaison par paire

	Critère 1.3.1	Critère 1.3.2
Critère 1.3.1	1	3
Critère 1.3.2	0.33	1
	1.33	4

Tableau 6.21 : Matrice de jugement

	Critère 1.3.1	Critère 1.3.2	Score	Score (%)
Critère 1.3.1	0.75	0.75	0.75	75
Critère 1.3.2	0.25	0.25	0.25	25
	1	1	1	100

Les résultats de l'AHP sur le critère C 1.3 indiquent que le critère C 1.3.1 est le plus important avec 75 % et le critère C 1.3.2 avec 25% (tableau 6.21). Pour une comparaison par entre deux critères seulement, la cohérence est toujours vérifié car C.R= 0. Les résultats de la largeur

moyenne des chemins hydrauliques ont été classés selon cinq classes comme le montre le tableau 6.22.

Tableau 6.22 : Classification des indices vulnérabilité pour les critères de la largeur moyenne

Indice de vulnérabilité		Largeur moyenne des bâtis	Largeur moyenne des routes
Très faible	1	0 – 10	0 – 10
Faible	2	10 – 50	10 – 50
Modéré	3	50 - 100	50 - 100
Fort	4	100 – 150	100 – 150
Très fort	5	150 - 176	150 - 176

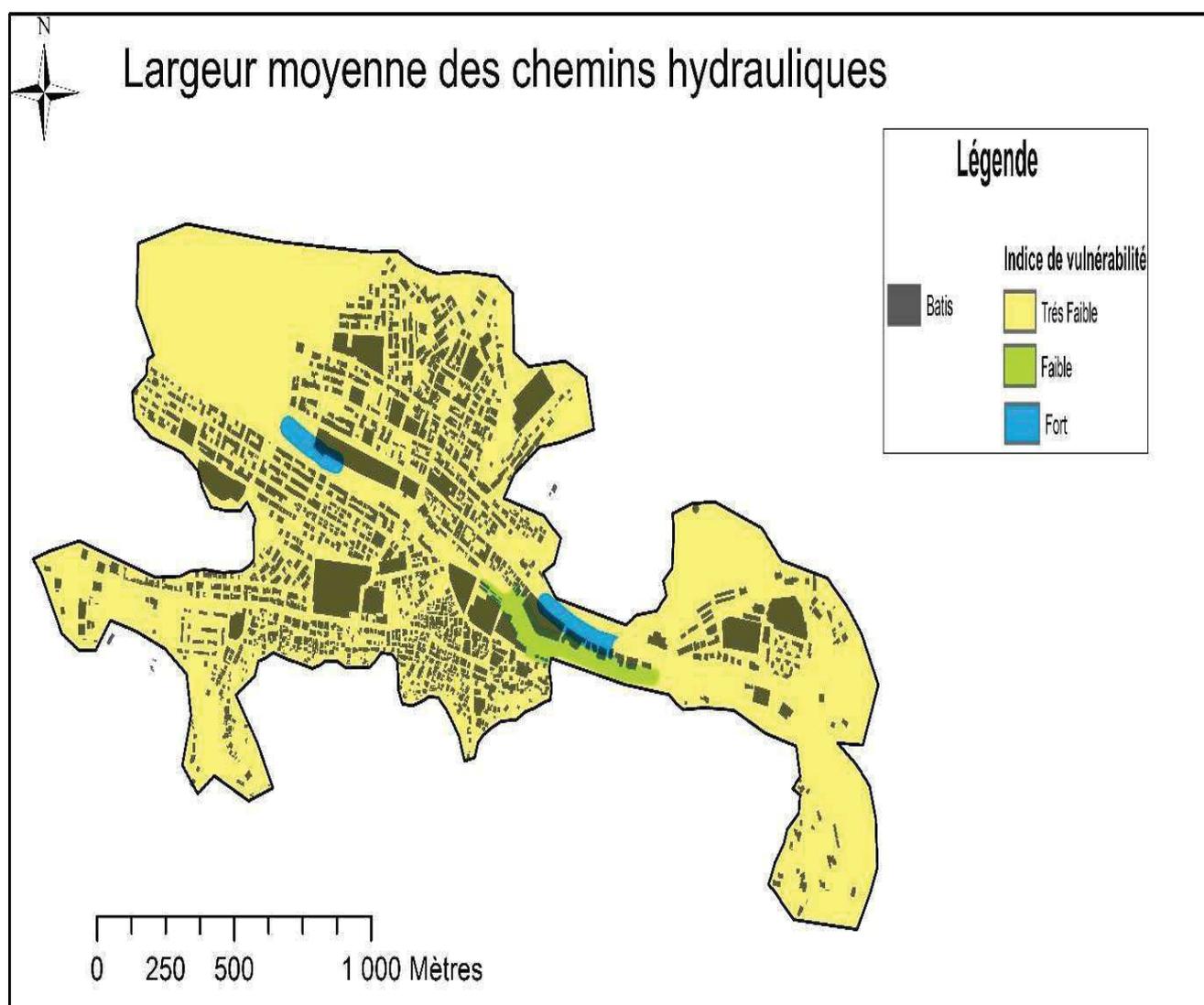


Figure 6.35 : carte de vulnérabilité selon le critère "largeur moyenne des chemins hydrauliques"

VI.4.2.1.4 La transmissivité

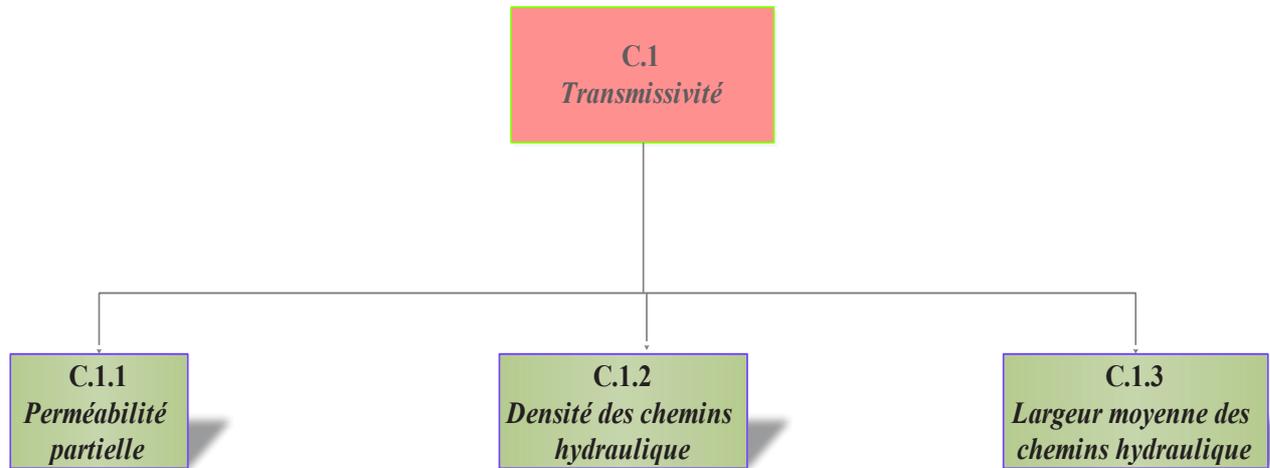


Figure 6.36 : Structure hiérarchique du critère "Transmissivité"

Tableau 6.23 : Comparaison par paire des critères de la transmissivité

Critère 1.1	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Critère 1.3
Critère 1.1	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Critère 1.2
Critère 1.3	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Critère 1.2

Tableau 6.24 : Matrice de comparaison par paire

	Critère 1.1	Critère 1.2	Critère 1.3
Critère 1.1	1	0.167	0.5
Critère 1.2	6	1	3
Critère 1.3	2	0.333	1
	9	1.50	4.50

Tableau 6.25 : Matrice de jugement

	Critère 1.1	Critère 1.2	Critère 1.3	Score	Score (%)
Critère 1.1	0.11	0.11	0.11	0.11	11.11
Critère 1.2	0.67	0.67	0.67	0.67	66.67
Critère 1.3	0.22	0.22	0.22	0.22	22.22
	1	1	1	1	100

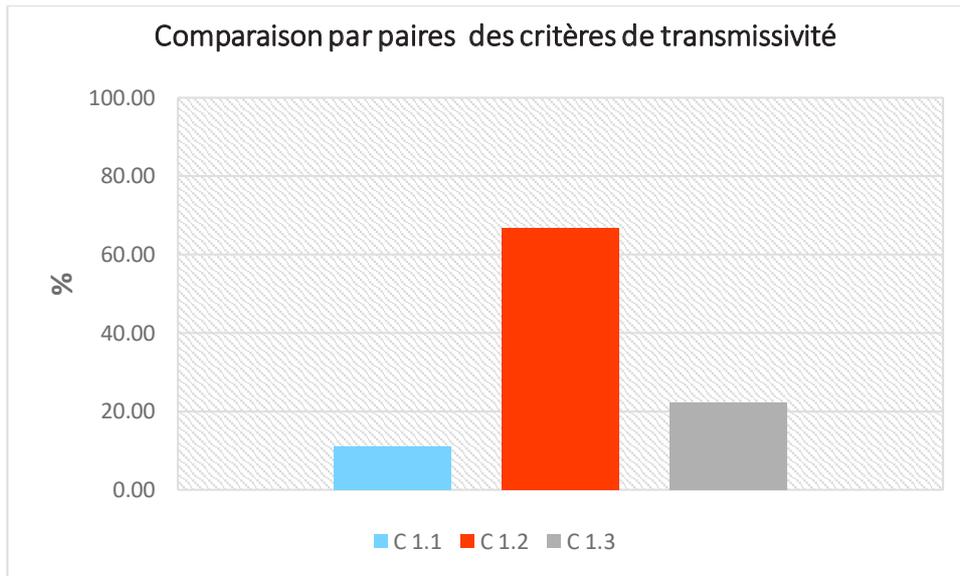


Figure 6.37 : Comparaison par paire des critères C1.1, C1.2 et C1.3

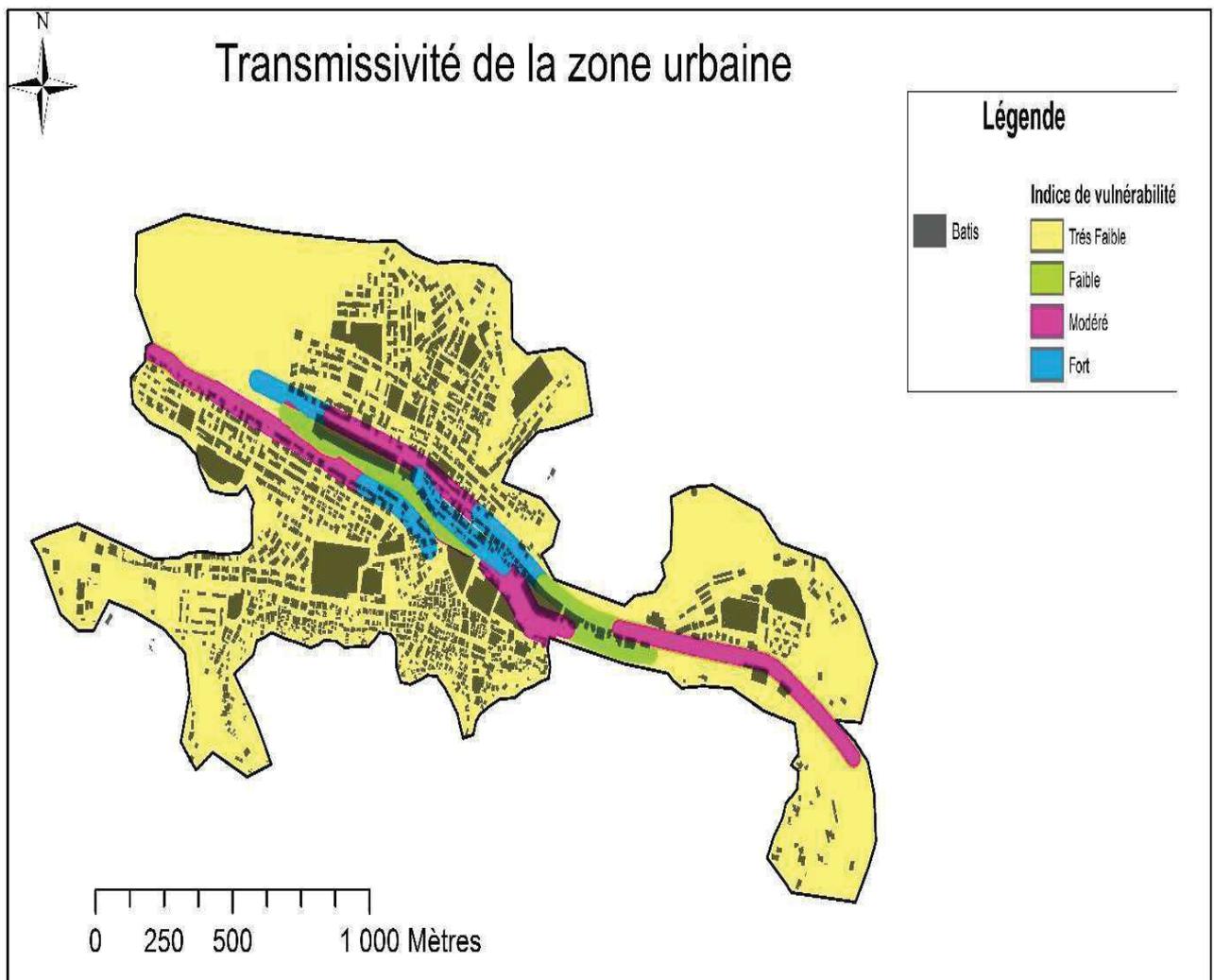


Figure 6.38 : carte de vulnérabilité selon le critère "Transmissivité"

Tableau 6.26 : Résultat de calcul du C.R pour le critère C 1

	Critère 1.1	Critère 1.2	Critère 1.3	λ	C.I	C.R
Critère 1.1	0.111	3.000	3	3.000	0.000	0.000
Critère 1.2	0.667	3.000				
Critère 1.3	0.222	3.000				

Les résultats de l'AHP du tableau 6.25 sur le critère C 1 (transmissivité) montrent que le critère C 1.2 (perméabilité partielle) est le critère ayant plus d'importance avec 66.7 % suivi par 22 % sur le critère C 1.3 (largeur moyenne des chemins hydraulique). Les résultats du tableau 6.26 indiquent que le CR < 0.10 ce qui signifie que les jugements sont cohérents.

VI.4.2.2 Le critère "Topographie"

En plus du critère de transmissivité, la topographie se présente comme un facteur déterminant pour aggraver les flux inondants. Ce critère contient, dans son sens physique, trois aspects qui sont (figure 6.40) :

- topographie horizontale (distance à partir du cours d'eau).
- topographie verticale (élévation du site).
- la pente du site.

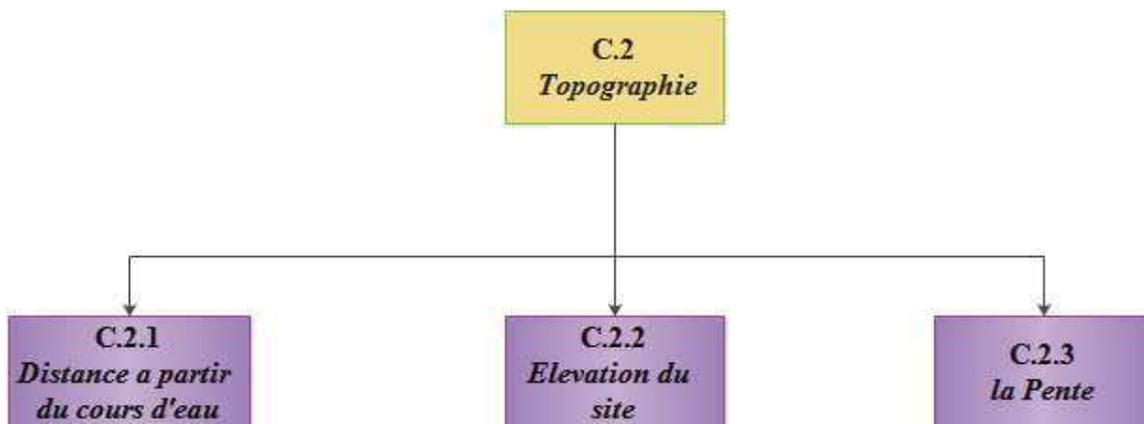


Figure 6.39 : la structure hiérarchique du critère "Topographie"

Tableau 6.27 : Comparaison par paire des critères de la topographie

Critère 2.1	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Critère 2.2
Critère 2.1	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Critère 2.3
Critère 2.2	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Critère 2.3

Tableau 6.28 : Matrice de comparaison par paire

	Critère 2.1	Critère 2.2	Critère 2.3
Critère 2.1	1	3	7
Critère 2.2	0.33	1	5
Critère 2.3	0.14	0.2	1
	1.48	4.2	13

Tableau 6.29 : Matrice de jugement

	Critère 2.1	Critère 2.2	Critère 2.3	Score	Score (%)
Critère 2.1	0.68	0.71	0.54	0.64	64.34
Critère 2.2	0.23	0.24	0.38	0.28	28.28
Critère 2.3	0.10	0.05	0.08	0.07	7.38
	1	1	1	1	100

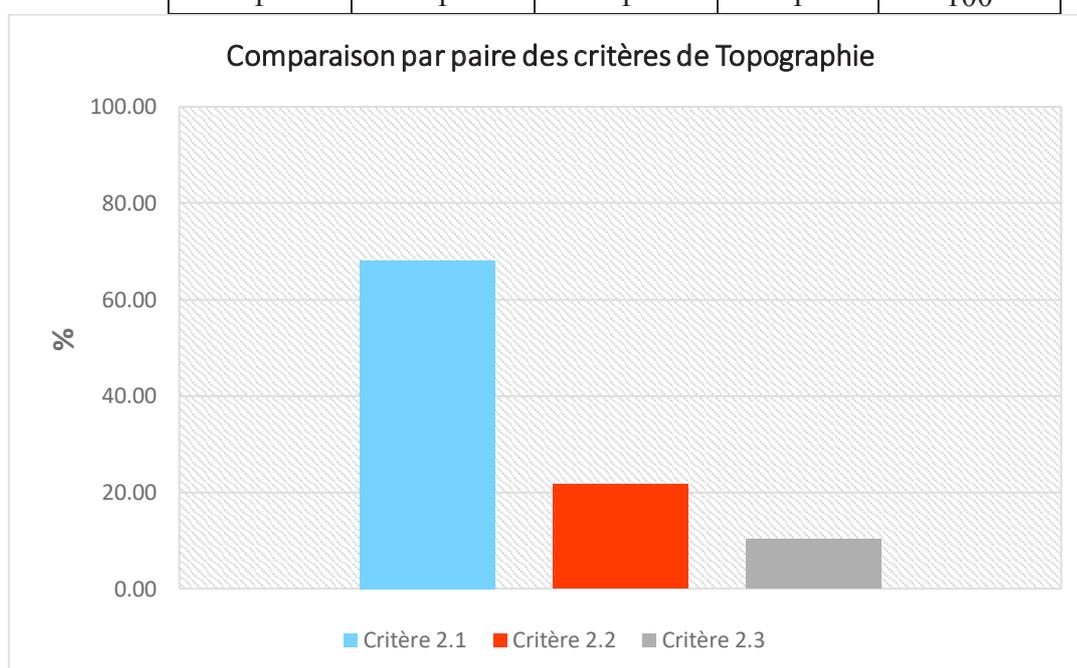


Figure 6.40 : Comparaison par paire des critères C2.1, C2.2 et C2.3.

Tableau 6.30 : Classification des indices vulnérabilité pour les critères de la topographie.

Indice de vulnérabilité		Distance à partir du cours d'eau (m)	Elévation du site (m)	Pente (%)
Très faible	1	228 - 934.6	804 - 897	0 - 3
Faible	2	150 - 228	743 - 756	3 - 8
Modéré	3	100 - 150	756 - 776	8 - 15
Fort	4	50 - 100	776 - 790	15 - 30
Très fort	5	0 - 50	790 - 804	> 30

Pour établir l'indice de vulnérabilité sur les trois critères partant de l'indice 01 qui signifie "vulnérabilité très faible" a "vulnérabilité très forte" qui correspond à l'indice 05 (tableau 6.30).

CH VI : Analyse multicritères pour l'évaluation et la cartographie de la vulnérabilité de Sigus au risque d'inondation

Parmi les trois critères composants la topographie, la distance à partir du cours d'eau est celui ayant plus d'impact. Cette distance se mesure à partir de chacune des rives et non à partir de l'axe du cours d'eau. Les indices 5, 4 et 3 correspondent aux intervalles réguliers 0-50, 50-100 et 100-150. La distance 228 m correspond au point le plus éloigné de la zone inondable. L'intervalle 150-228 m correspond à l'indice de vulnérabilité "Faible". La distance 934,6 m marque le point le plus éloigné de la zone bâtie par rapport au cours d'eau. Finalement, on attribue l'indice "01" à la zone comprise entre 228 m et 934,6 m puisque elle est exceptée de la zone inondable.

Le critère "élévation du site" signifie l'altitude du bâti. Il est relatif aux différentes altitudes de la zone inondable et la position géographique du site. Ce critère est moins performant, en termes d'évaluation de la vulnérabilité, par rapport au critère précédent. Si l'altitude d'une construction est comprise dans l'intervalle de la zone inondable mais elle est loin de celle-ci elle sera moins vulnérable. Les limites de la zone inondable sont comprises entre 743 m et 804. Ceci nous permet d'estimer que les indices 2, 3,4 et 5 reflètent la variation de l'importance de la vulnérabilité au sein de la zone inondable. L'indice "01" correspond à la fourchette 804 – 897 puisque toutes les constructions comprises dans cet intervalle sont considérées moins vulnérables.

Le critère "Pente" est moins influent car il s'agit d'une pente locale (parcelle de quelques mètres) qui ne permet pas de générer un écoulement destructif. Ce critère, comparé au critère 2.1, peut jouer un rôle aggravant ou ralentissant de l'écoulement. La classification des indices de vulnérabilité par rapport aux classes de pente est faite selon les classes de pentes établie au chapitre 04.

La figure 6.42 illustre vulnérabilité de Sigus au risque d'inondation selon le critère topographie. Celle-ci est divisée en cinq classes. Presque la moitié (48%) de la ville est soumise à un risque faible suivi par le risque fort avec 22%.

Plus que la moitié des bâtis de la ville sont soumis à un risque faible alors que 22% se situent dans des zones à risque fort. Les routes sont aussi soumises à un risque faible avec 41.5% suivi par 33% dans des zones à risque fort. Les terrains vides, qui occupent la majorité de la surface, se localisent dans des zones à risque faible avec 48%. Les zones à risque très faible et modéré présentent des taux presque similaires d'environ 16%.

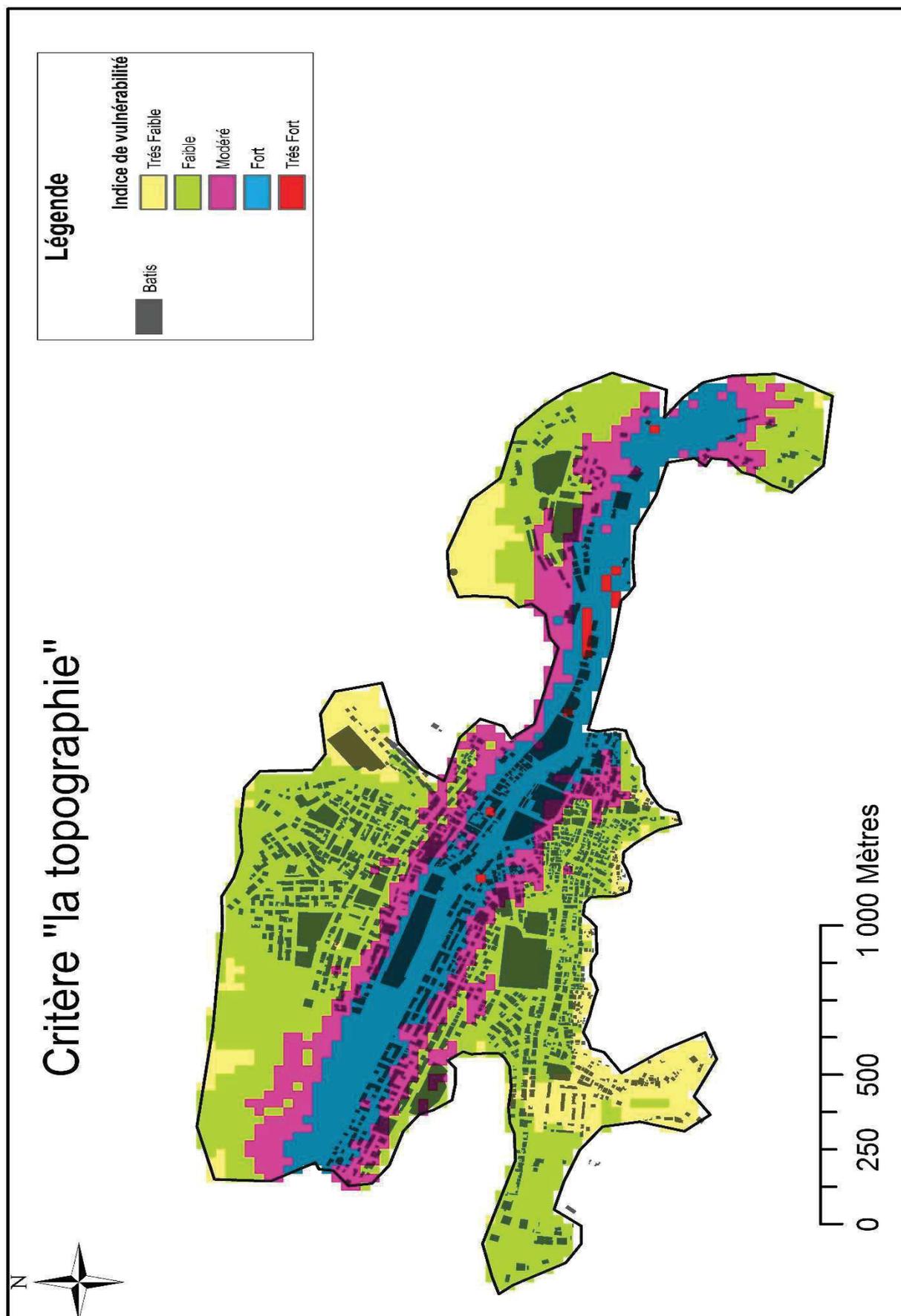


Figure 6.41 : carte de vulnérabilité selon le critère "Topographie".

VI.4.2.3 L'objectif "la vulnérabilité"

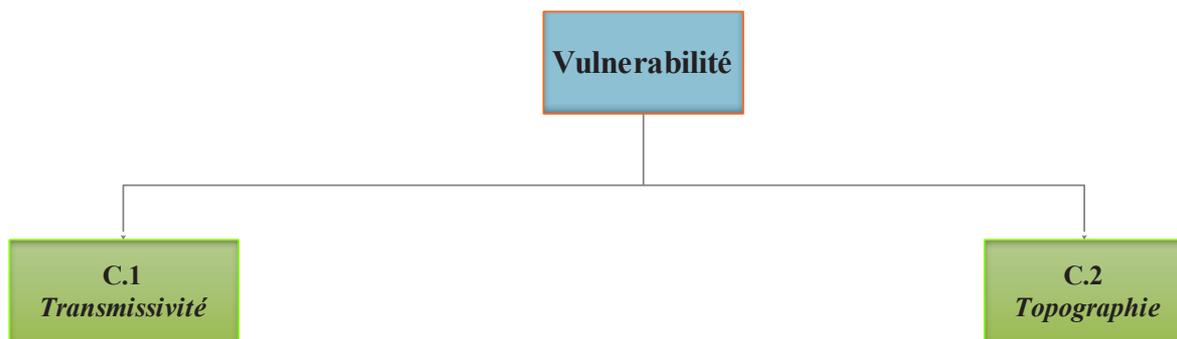


Figure 6.42 : Structure hiérarchique de la vulnérabilité

Tableau 6.31 : Comparaison par paire des critères de la largeur moyenne

Critère 1	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Critère 2
-----------	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	-----------

Tableau 6.32 : Matrice de comparaison par paire

	Critère 1	Critère 2
Critère 1	1	0.5
Critère 2	2	1
	3	1.5

Tableau 6.33 : Matrice de jugement

	Critère 1	Critère 2	Score	Score (%)
Critère 1	0.3	0.3	0.3	33.3
Critère 2	0.7	0.7	0.7	66.7
	1	1	1	100

Pour une comparaison par entre deux critères seulement, la cohérence est toujours vérifiée car C.R= 0.

La vulnérabilité dans son sens globale, est répartie sur le territoire de Sigus selon cinq classes dont 65% de la ville est située dans des zones à risque faible alors que 14% se localisent dans des zones risque modéré. Ces zones correspondent à des parties relativement denses. Les zones à risque fort ne représentent que 9.5 %. Elles correspondent aux parties de la ville les plus

proches du cours d'eau. Le risque très fort est insignifiant. La figure 6.44 illustre la vulnérabilité de Sigus au risque d'inondation.

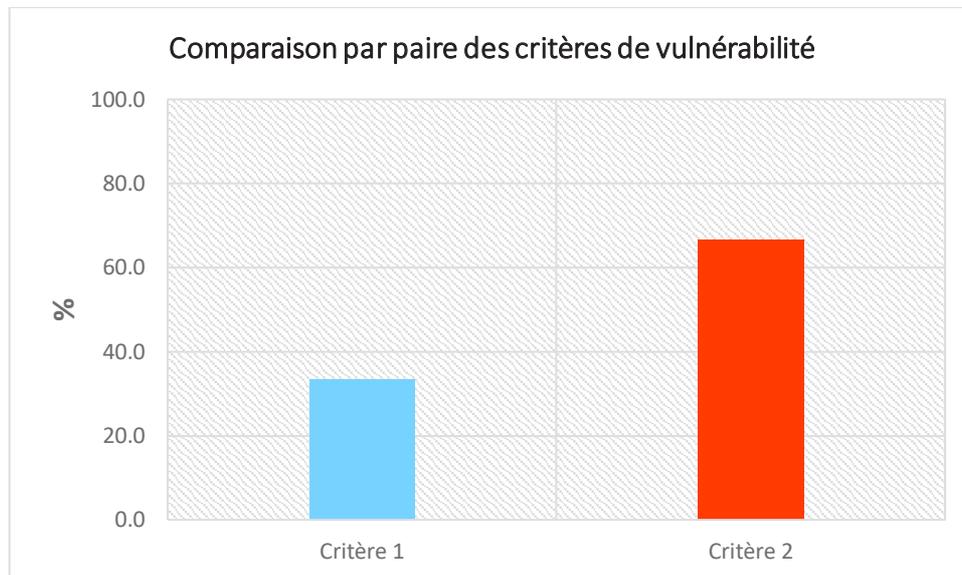


Figure 6.43 : Comparaison par paire des critères C1 et C2.

Presque 69% des bâtis sont affrontés à un risque faible suivi par 14% dans des zones de risque modéré et 10% à risque fort. Les routes, qui servent à transporter l'eau, sont aussi exposées de 59% à un risque faible alors que 21% sont exposées à un risque fort. 65% des terrains vides sont soumis à un risque faible tandis que 14% se situent dans des zones à risque modéré.

Le découpage de la ville en POS a permis de mieux comprendre la distribution spatiale du risque. Cette dernière est pratiquement identique sur les cinq POSs. L'indice "faible" est le plus dominant. Les POS 01, 02, 04 et 05 sont exposés au risque faible avec un taux 62% à 73% alors que le POS 02 est soumis à ce risque avec 44%. Pour l'indice "modéré", le POS 03 contient une proportion remarquable avec 42%. Alors que les autres POS ont des faibles pourcentages entre 6 et 15%. Le risque "fort" est présent avec des proportions timides entre 4 et 14% alors que le risque "très fort" est négligeable.

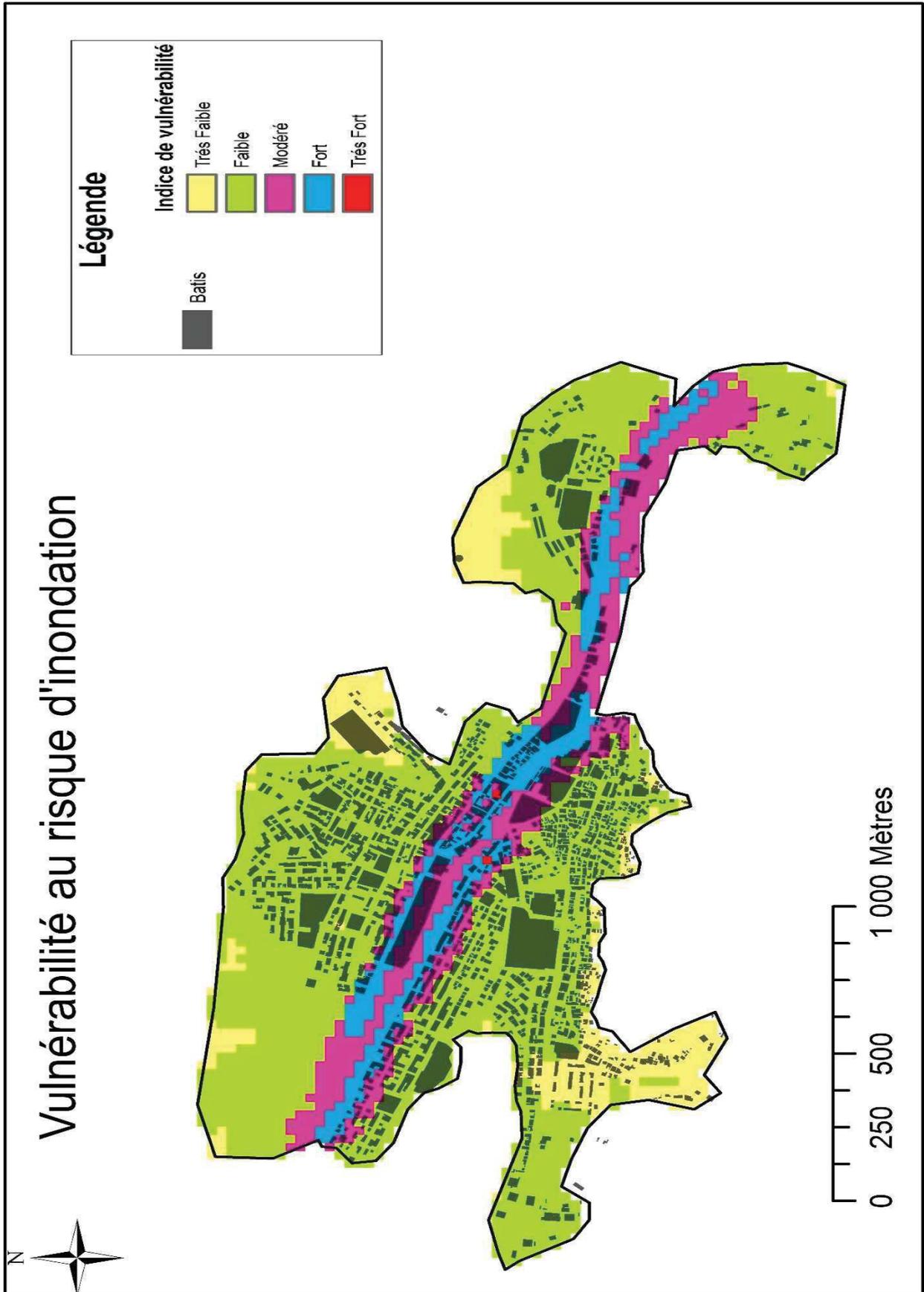


Figure 6.44 : Carte de vulnérabilité de la ville de Sigus au risque d'inondation.

Sur le POS 01, qui est totalement non urbanisé, la moitié des routes sont exposées à un risque modéré, alors que 30% sont soumises à un risque faible. Les terrains vides, qui occupent l'immense partie du POS, sont exposés au risque faible avec 80%. Cela offre une excellente possibilité de l'urbaniser en toute sécurité.

Presque 78% des bâtis du POS 02 sont situés dans des zones à risque faible. 63 % des routes se localisent dans les mêmes zones de risque. Alors qu'entre 12 et 15% sont situés dans des zones de risque modéré à fort. Plus que la moitié des terrains vides se trouvent dans la zone de risque faible.

La moitié des bâtis du POS 03 se situent dans des zones de risque modéré suivi par 42% dans des zones à risque faible. Pour les routes, la grande partie (36%) se situe dans des zones à risque fort suivi par risque faible et 20% risque modéré. On estime que 33 à 48% des terrains vides se trouvent dans des zones de risque faible à modéré. Le risque très fort est nul sur ce POS.

Pour le POS 04, la grande proportion des différents éléments se situent dans des zones à risque faible : bâtis 62%, routes 66% et vides 64%. Les routes sont, aussi, soumises à un risque fort avec un taux signifiant de 22%. Le risque très fort est négligeable.

La quasi-totalité des bâtis du POS 05 se localisent dans des zones de risque faible ainsi que la moitié des routes (53%). Alors que 34% des celles-ci se trouvent dans des zones à risque fort. Les terrains vides occupent 66% des zones de risque faible. Le risque très fort est nul.

VI.5 Conclusion

L'évaluation et l'analyse de la vulnérabilité d'une ville au risque d'inondation est un processus difficile qui nécessite une approche multicritère. La vérification des systèmes d'évacuation des eaux de ruissellement révèle une forte incapacité car, d'un part, le réseau d'assainissement est sous-dimensionné et vieux. Les collecteurs d'assainissement rejettent dans le canal en milieu urbain ce qui n'est acceptable car ils aggravent les flux au lieu de les minimiser, donc ils doivent être prolongé en dehors du tissu urbain. D'autre part, le canal est aussi sous-dimensionné avec seulement un débit cinquantennal ce qui ne répond pas aux recommandations.

L'étude de transmissivité a permis d'étudier le comportement des éléments de la ville en situation d'inondation. Sur les cinq CEP et pour les différents critères de transmissivité le comportement des éléments est très variable. L'évaluation de la vulnérabilité par la méthode

CH VI : Analyse multicritères pour l'évaluation et la cartographie de la vulnérabilité de Sigus au risque d'inondation

multicritères AHP a abouti à une carte finale de la vulnérabilité de Sigus au risque d'inondation. Les résultats montrent qu'une grande partie de la ville se situe dans des zones à risque faible qui sont plus éloignées du cours d'eau alors que les zones du risque fort sont celles les plus proches du fait que le critère topographie est plus important que la transmissivité.

Conclusion générale

Conclusion générale

Ce travail s'inscrit dans la cadre de la problématique générale de l'évaluation des risques hydrologiques en milieu urbain, particulièrement les inondations, en utilisant les nouvelles techniques de traitement d'information.

La caractérisation du risque d'inondation nécessite d'abord la compréhension de ces composantes qui sont l'aléa et la vulnérabilité. Aussi la connaissance des mécanismes de genèse du ruissellement est indispensable pour appréhender l'outil nécessaire pour le simuler et évaluer. La modélisation des phénomènes hydrologiques est devenue une nécessité vue la complexité des processus. Pour cela il existe une multitude de modèles. Pour notre étude, le choix de la méthode SCS-CN optimale vu que l'origine des flux inondant est le bassin versant naturel. L'utilisation d'une telle méthode nécessite l'identification des composantes physiques du bassin versant.

L'étude de la morphométrie du bassin versant est une évaluation quantitative de l'impact de ces paramètres sur le ruissellement. Les différents paramètres sont regroupés en trois catégories : le réseau hydrographique, la forme du bassin versant et les caractéristiques du relief. Les paramètres morphométriques du bassin versant de Sigus sont extraits et calculés en utilisant le MNT, un SIG et les différentes formules nécessaires. Les résultats de l'évaluation du réseau hydrographique, de la forme du bassin versant et du relief indiquent que le bassin versant du Sigus a une forte tendance aux inondations.

La détermination des composants du bassin versant nécessite l'utilisation d'une approche couplée SIG-Téledétection. A l'heure actuelle, c'est la technique la plus récente qui permet d'identifier les composants du bassin tels que le type des sols et le mode d'occupation des sols. La tâche de télédétection consiste à utiliser des images satellitaires récentes du satellite LANDSAT 8 OLI qui permet, avec la bonne combinaison des bandes spectrales, de visualiser les composants voulu. Mais cette tâche est insuffisante et ne peut être utile qu'avec l'association d'un SIG qui permet de manipuler et extraire des informations de l'image.

L'élaboration de la base de données "Type des sols" a comme objectif de déterminer la texture des sols du bassin versant Sigus. Elle est décomposée en deux parties :

Conclusion générale

- L'évaluation préliminaire : dont l'objectif est de déterminer les zones cibles à échantillonner sur la base de l'image satellitaire LandSAT 8 OLI. Les résultats montrent qu'il existe 10 classes spectrales de sols.
- La campagne d'échantillonnage : dont l'objectif est de déterminer les points de prélèvements. Le nombre final des points est 18.

Les résultats montrent que le type de sol dominant est argileux. Ceci est caractérisé par une forte imperméabilité ce qui engendre un potentiel de ruissellement élevé.

L'élaboration de la base de données "Occupation des sols" est réalisée sur la même image satellitaire. Elle est vérifiée puis corrigée sur le fond de plan "World Imagery". L'évaluation de cette base de données avec l'indice de Kappa montre un accord parfait ce qui permet de faire une simulation hydrologique crédible.

Les résultats des coefficients de ruissellement obtenus montrent que le bassin versant est caractérisé par un type de sol argileux et occupé par les terres agricoles. Le CN du bassin versant Sigus est de l'ordre moyen à élevé. Les zones les plus productrices du ruissellement ont un coefficient de ruissellement élevé et correspondent aux terres rocheuses ou zones urbaines.

L'évaluation et l'analyse de la vulnérabilité de Sigus ville au risque d'inondation est un processus difficile qui nécessite une approche multicritère. La vérification des systèmes d'évacuation des eaux de ruissellement révèle une forte incapacité car, d'un part, le réseau d'assainissement est sous-dimensionné et vieux. Les collecteurs d'assainissement rejettent dans le canal en milieu urbain ce qui n'est acceptable car ils aggravent les flux au lieu de les minimiser, donc ils doivent être prolongés en dehors du tissu urbain. D'autre part, le canal est aussi sous-dimensionné avec seulement un débit cinquantennal ce qui ne répond pas aux recommandations.

L'étude de transmissivité a permis d'étudier le comportement des éléments de la ville en situation d'inondation. Sur les cinq CEP et pour les différents critères de transmissivité le comportement des éléments est très variable. L'évaluation de la vulnérabilité par la méthode multicritères AHP a abouti à une carte finale de vulnérabilité de Sigus au risque d'inondation. Les résultats montrent qu'une grande partie de la ville se situe dans des zones à risque faible qui sont plus loin du cours d'eau alors que les zones du risque fort sont celles les plus proches du fait que le critère topographie est plus important que la transmissivité.

Conclusion générale

On constate que les premières mesures de prévention doivent être prises sur le bassin versant pour minimiser le ruissellement en cas de précipitations intenses :

- Trouver des champs d'expansion en cas de crue dans d'autre milieu aquatique comme les lacs.
- L'arborisation pour les zones de fortes réponse hydrologique car celle-ci joue un rôle primordiale comme ralentisseur du ruissellement.
- Eviter de modifier les trajectoires en méandre en tronçons rectilignes car ceci réduit le temps de réponse et la singularité.

Annexes

Annexe 01 : Fiches d'échantillonnage des sols.....	1
Annexe 02 : Résultats de simulation hydraulique pour le canal existant	19
Annexe 03 : les relevés de pénétrabilité	27
Annexe 04 : Résultats de cartographie la de vulnérabilité par la méthode AHP.....	35

Annexe 01

Fiche d'échantillonnage des sols

Date : 20/09/2015	Fiche d'échantillonnage	N° : 01
--------------------------	--------------------------------	----------------

Commune : Sigus

Lieu-dit : Foret de Sigus

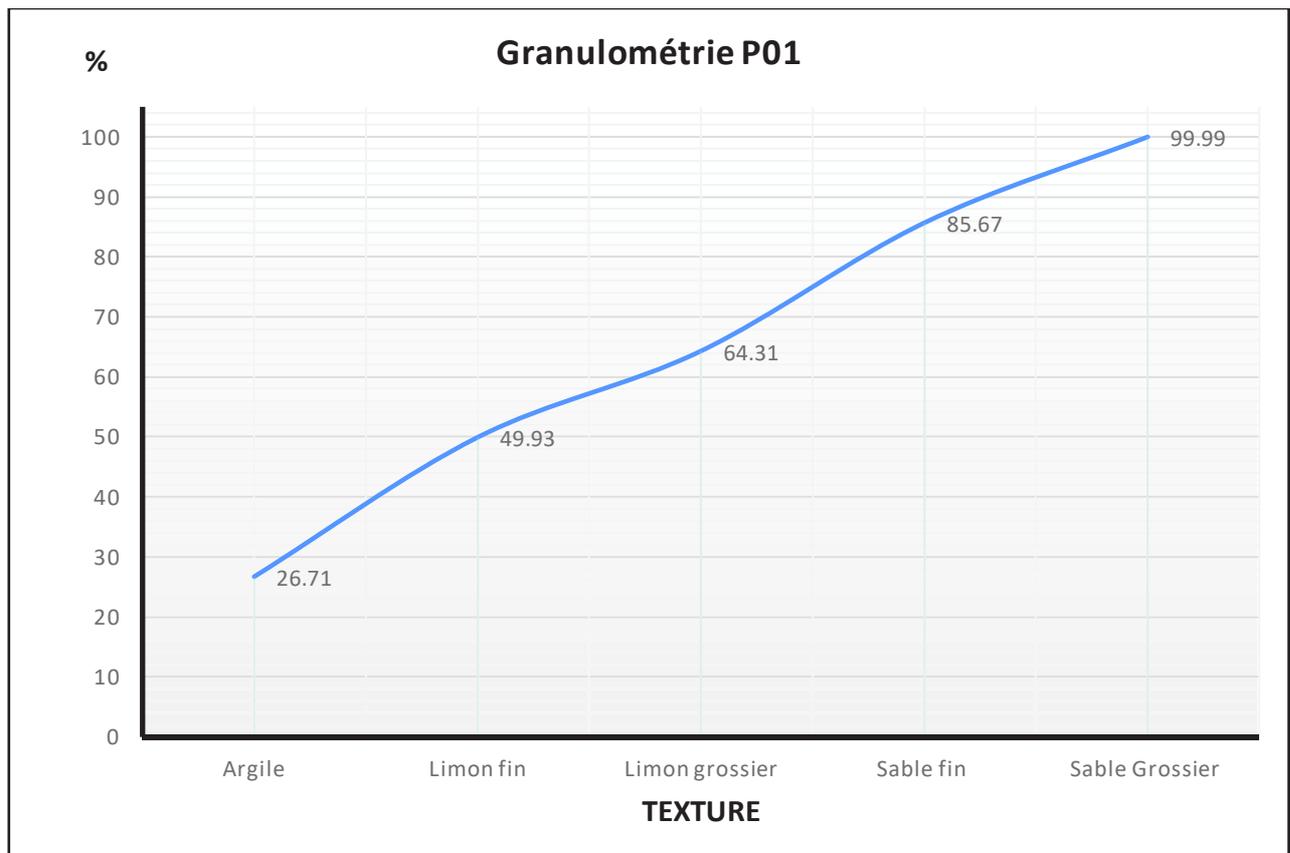
Observateur : FAREGH.W

Coordonnées : X = 301378.97 Y = 3999398.63 Z = 807.10

Géologie : roche sédimentaire, calcaire marneux.

Pente (%) : 12.7

Profondeur de prise d'échantillon (cm) : 30



Date : 20/09/2015	Fiche d'échantillonnage	N° : 02
--------------------------	--------------------------------	----------------

Commune : Al Amiria

Lieu-dit : Ain el Bordj

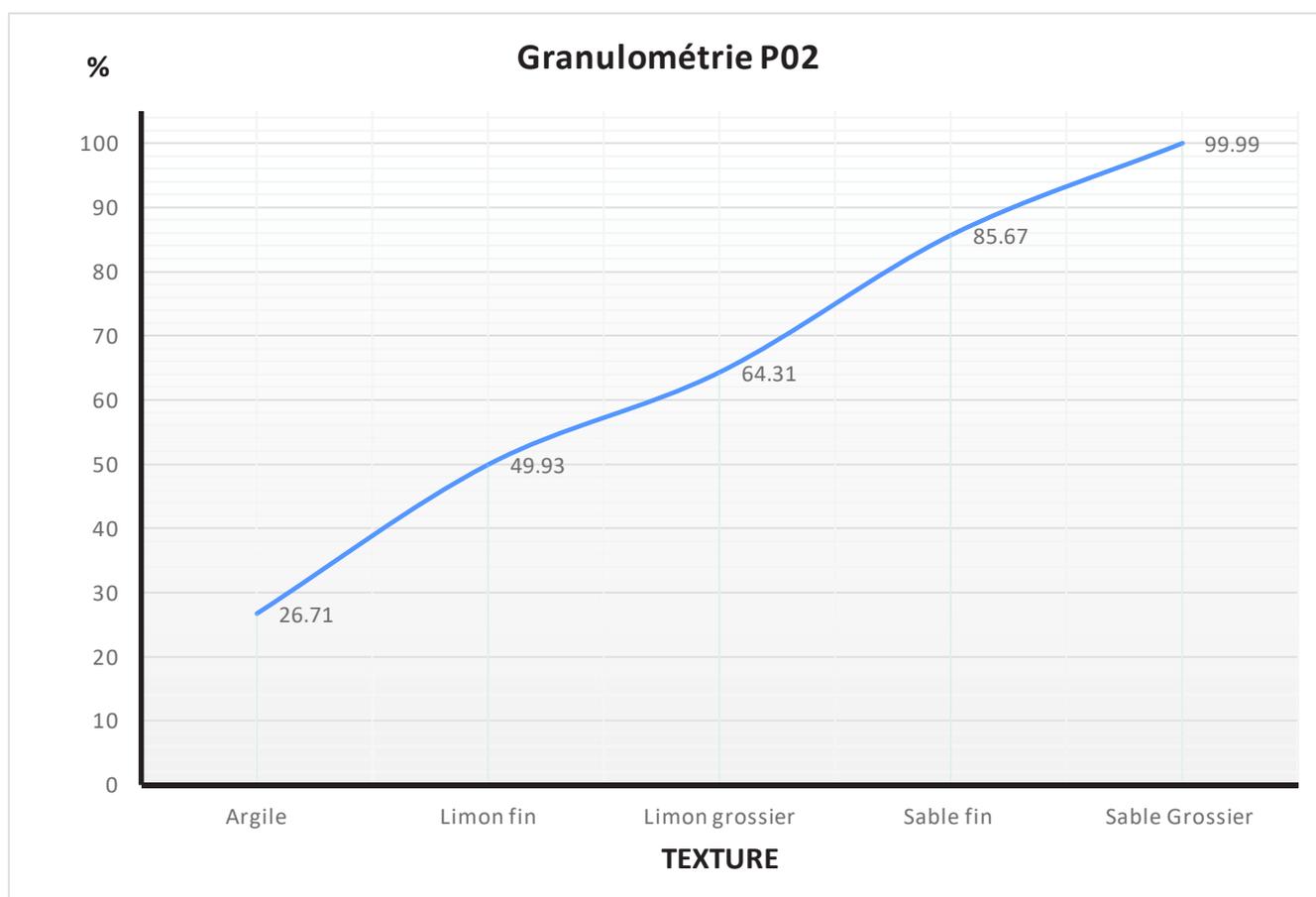
Observateur : FAREGH.W

Coordonnées : X = 312240.131 Y = 3997301.73 Z = 815.70

Géologie : dépôt meuble à texture moyenne.

Pente (%) : 4.58

Profondeur de prise d'échantillon (cm) : 30.



Date : 20/09/2015	Fiche d'échantillonnage	N° : 03
--------------------------	--------------------------------	----------------

Commune : Sigus

Lieu-dit : Foret de Sigus

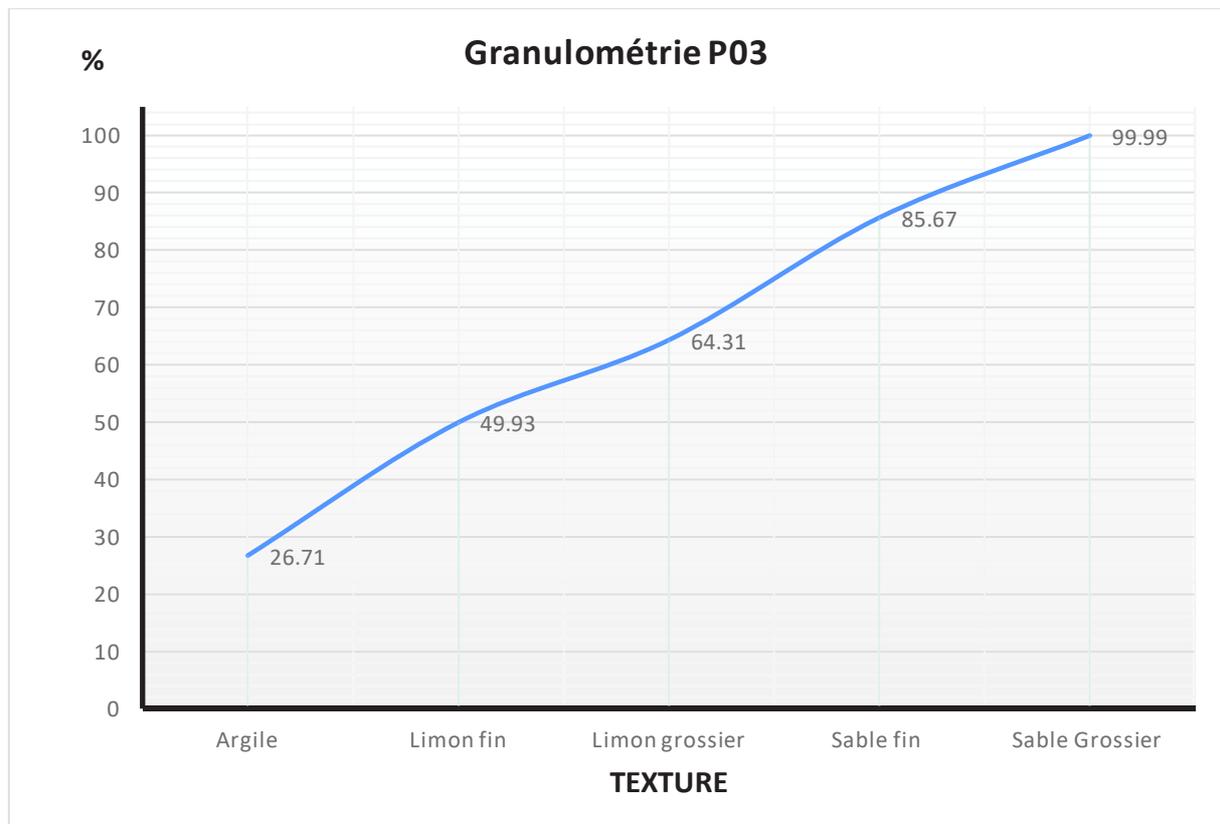
Observateur : FAREGH.W

Coordonnées : X = 300000.362 Y = 3999944.46 Z = 788.60

Géologie : Roche sédimentaire, calcaire marneux.

Pente (%) : 7.11

Profondeur de prise d'échantillon (cm) : 30



Date : 20/09/2015	Fiche d'échantillonnage	N° : 04
--------------------------	--------------------------------	----------------

Commune : Ain Fakroune

Lieu-dit : /

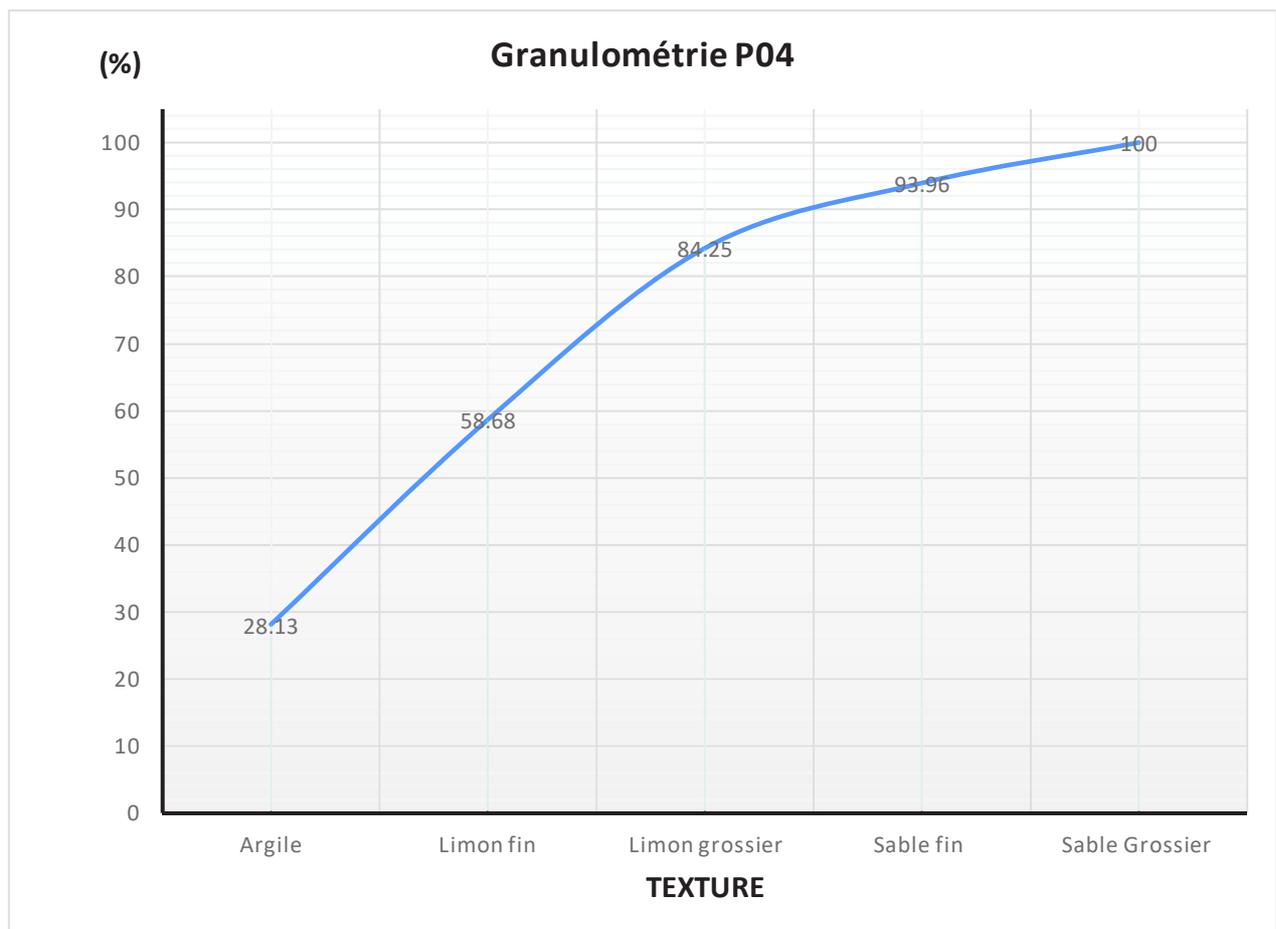
Observateur : FAREGH.W

Coordonnées : $X = 303327.079$ $Y = 3989853.16$ $Z = 851.30$

Géologie : dépôt meuble à texture moyenne.

Pente (%) : 1.63

Profondeur de prise d'échantillon (cm) : 30



Date : 20/09/2015	Fiche d'échantillonnage	N° : 05
--------------------------	--------------------------------	----------------

Commune : Al Amiria

Lieu-dit : Ain el Bordj

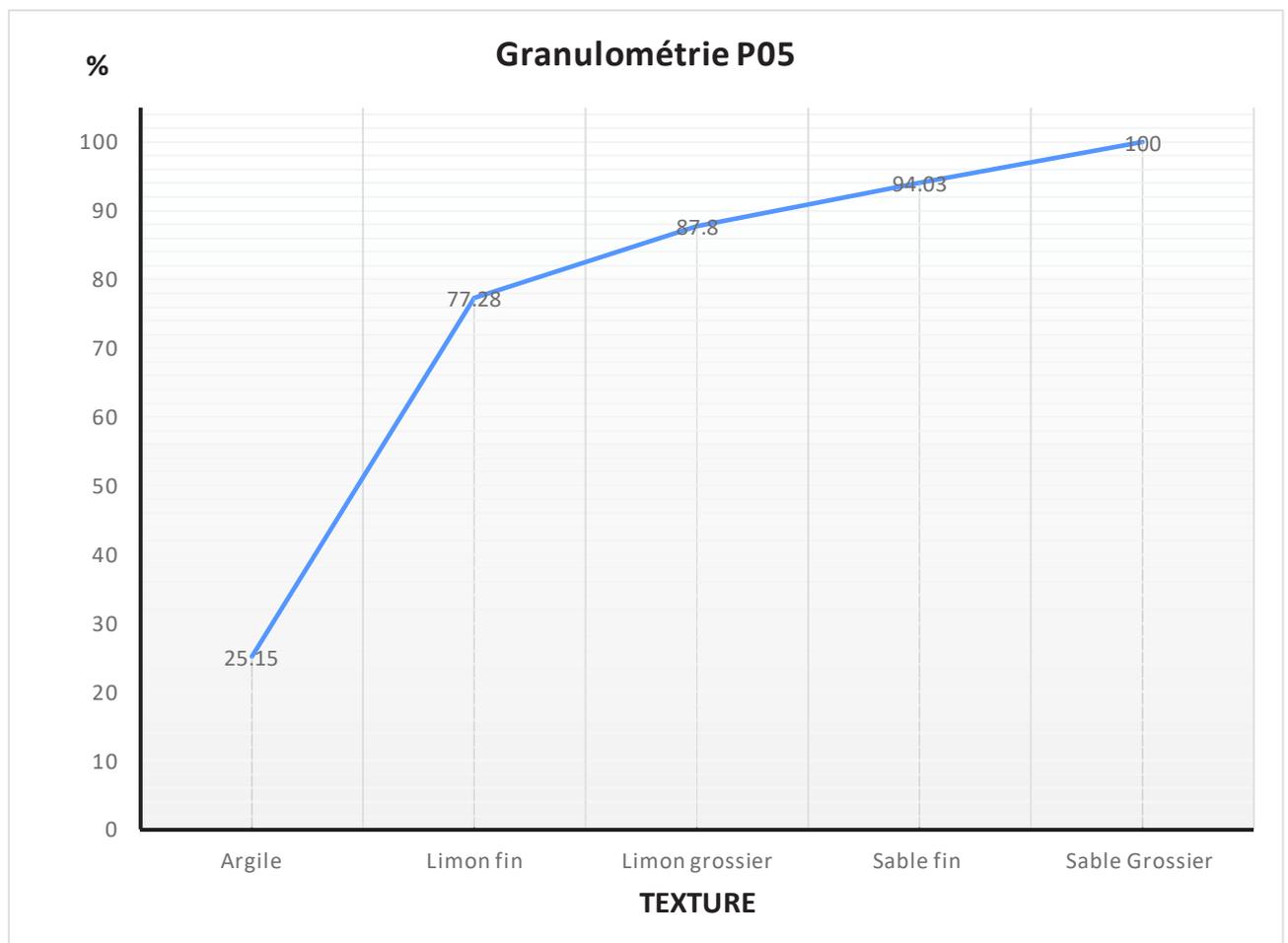
Observateur : FAREGH.W

Coordonnées : X = 314655.509 Y = 3999821.17 Z = 945.00

Géologie : Roches sédimentaires, Marne.

Pente (%) : 10.41

Profondeur de prise d'échantillon (cm) : 30



Date : 20/09/2015	Fiche d'échantillonnage	N° : 06
--------------------------	--------------------------------	----------------

Commune : Al Amiria

Lieu-dit : Ain el Bordj

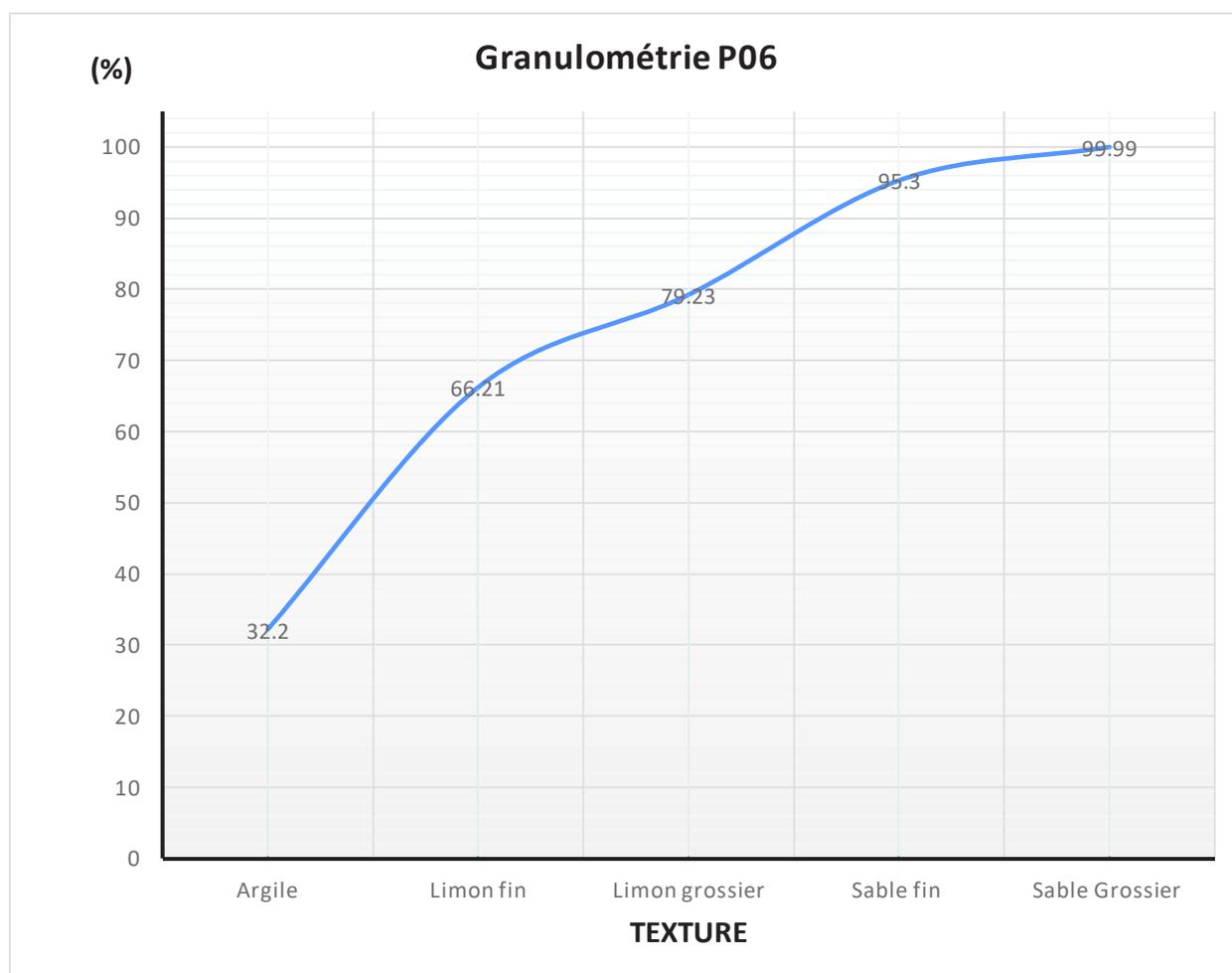
Observateur : FAREGH.W

Coordonnées : $X = 312624.821$ $Y = 3992477.32$ $Z = 797.30$

Géologie : Dépôt meuble à texture moyenne.

Pente (%) : 2.06

Profondeur de prise d'échantillon (cm) : 30



Date : 20/09/2015	Fiche d'échantillonnage	N° : 07
--------------------------	--------------------------------	----------------

Commune : Al Amiria

Lieu-dit : Ouled Nacer

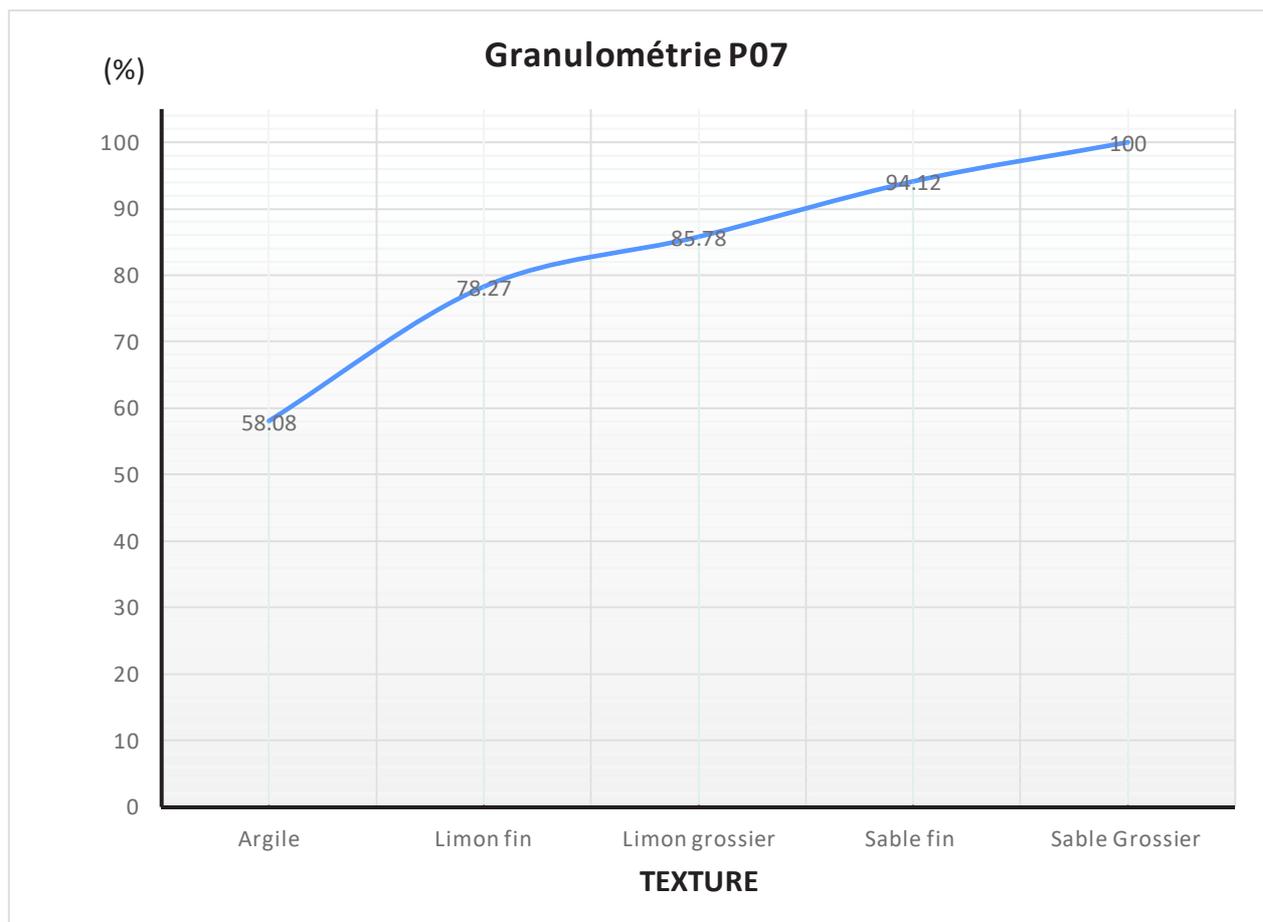
Observateur : FAREGH.W

Coordonnées : $X = 305848.079$ $Y = 3997987.75$ $Z = 805.90$

Géologie : Dépôt meuble à texture moyenne.

Pente (%) : 0.33

Profondeur de prise d'échantillon (cm) : 30



Date : 20/09/2015	Fiche d'échantillonnage	N° : 08
--------------------------	--------------------------------	----------------

Commune : Sigus

Lieu-dit : Sigus

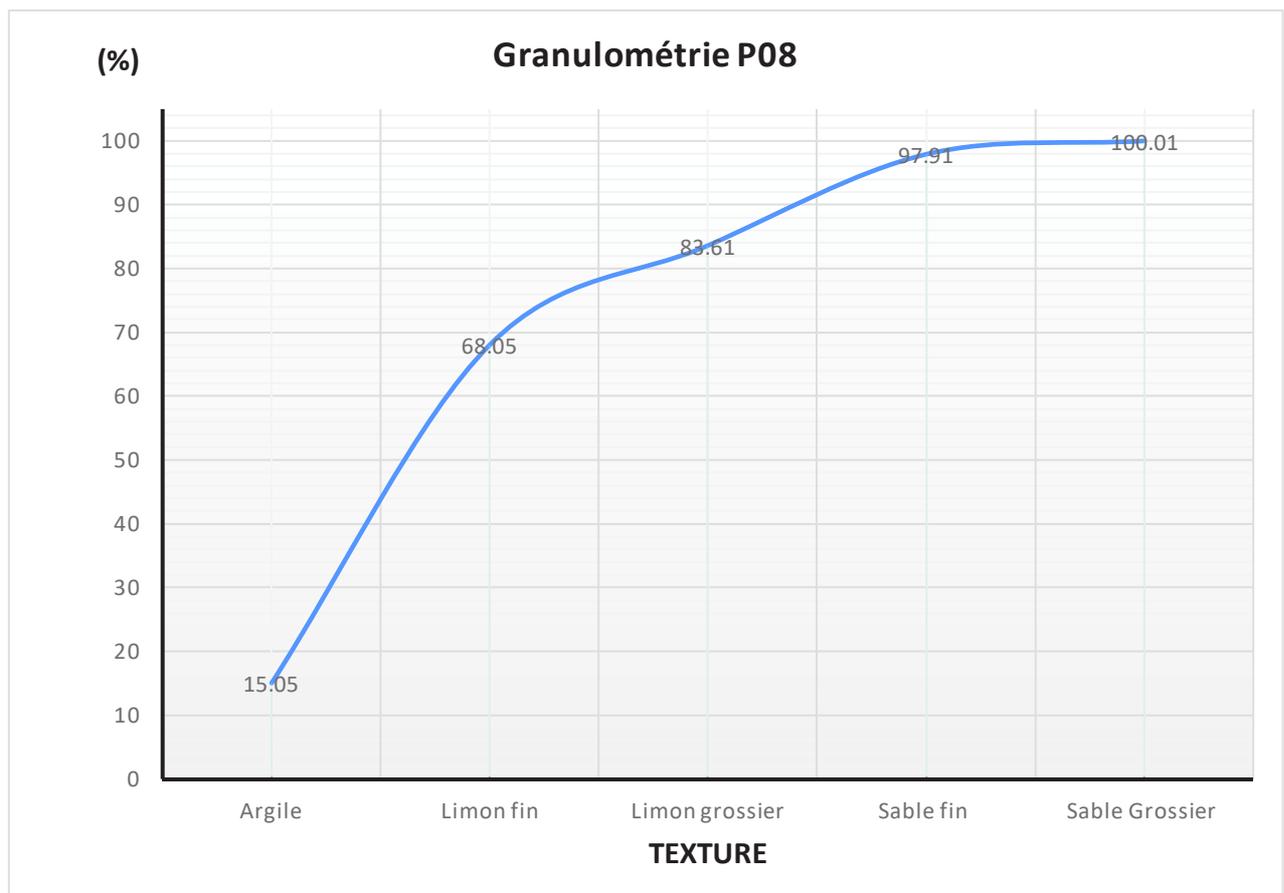
Observateur : FAREGH.W

Coordonnées : X = 302798.184 Y = 3997880.94 Z = 766.30

Géologie : Dépôt meuble à texture moyenne.

Pente (%) : 2.77

Profondeur de prise d'échantillon (cm) : 30



Date : 20/09/2015	Fiche d'échantillonnage	N° : 09
--------------------------	--------------------------------	----------------

Commune : Ain Fakroune

Lieu-dit : /

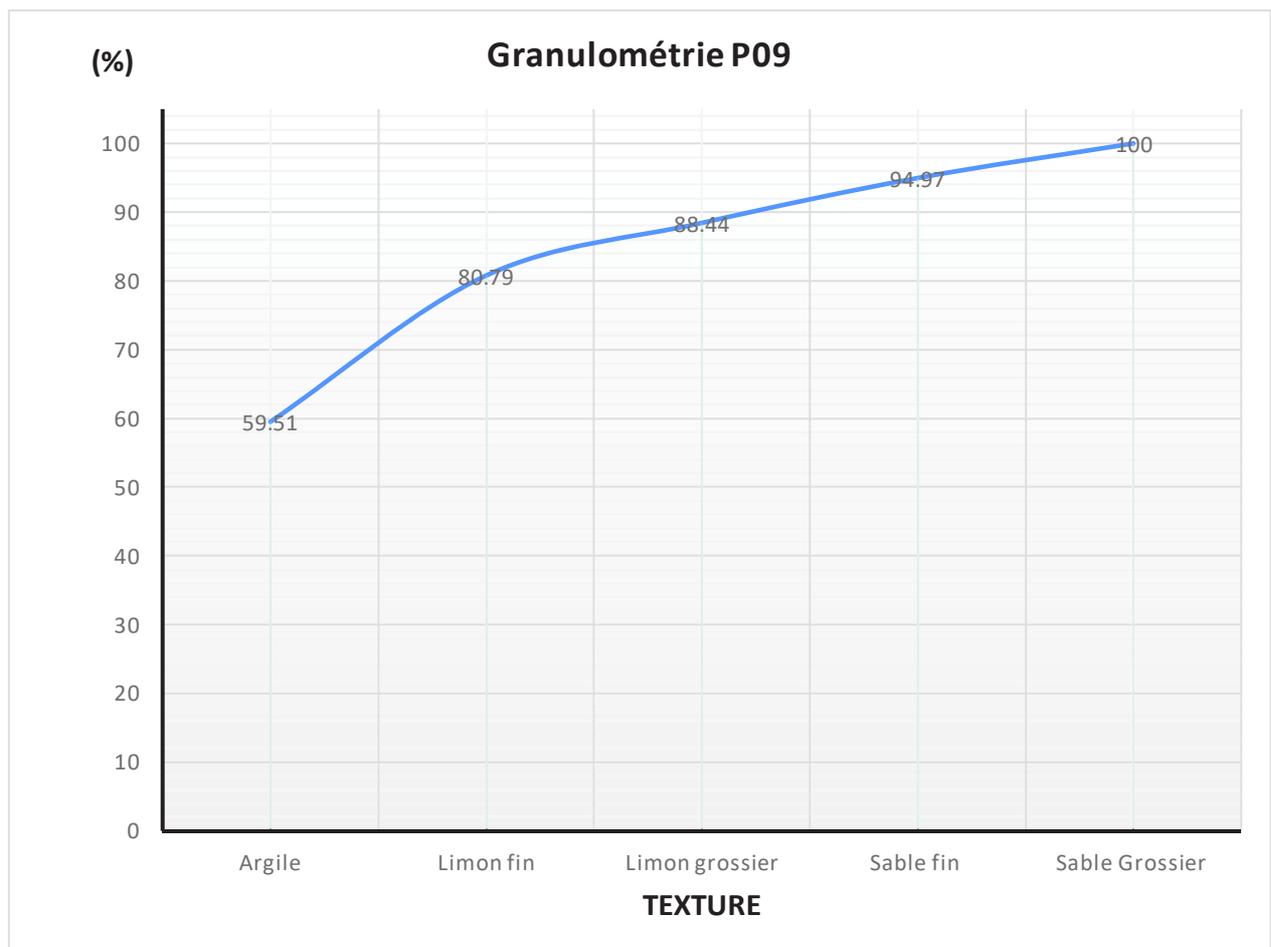
Observateur : FAREGH.W

Coordonnées : $X = 305231.491$ $Y = 3989681.81$ $Z = 824.70$

Géologie : Dépôt meuble à texture moyenne.

Pente (%) : 2.61

Profondeur de prise d'échantillon (cm) : 30



Date : 20/09/2015	Fiche d'échantillonnage	N° : 10
--------------------------	--------------------------------	----------------

Commune : Ain Fakroune

Lieu-dit : Ain El Bordj

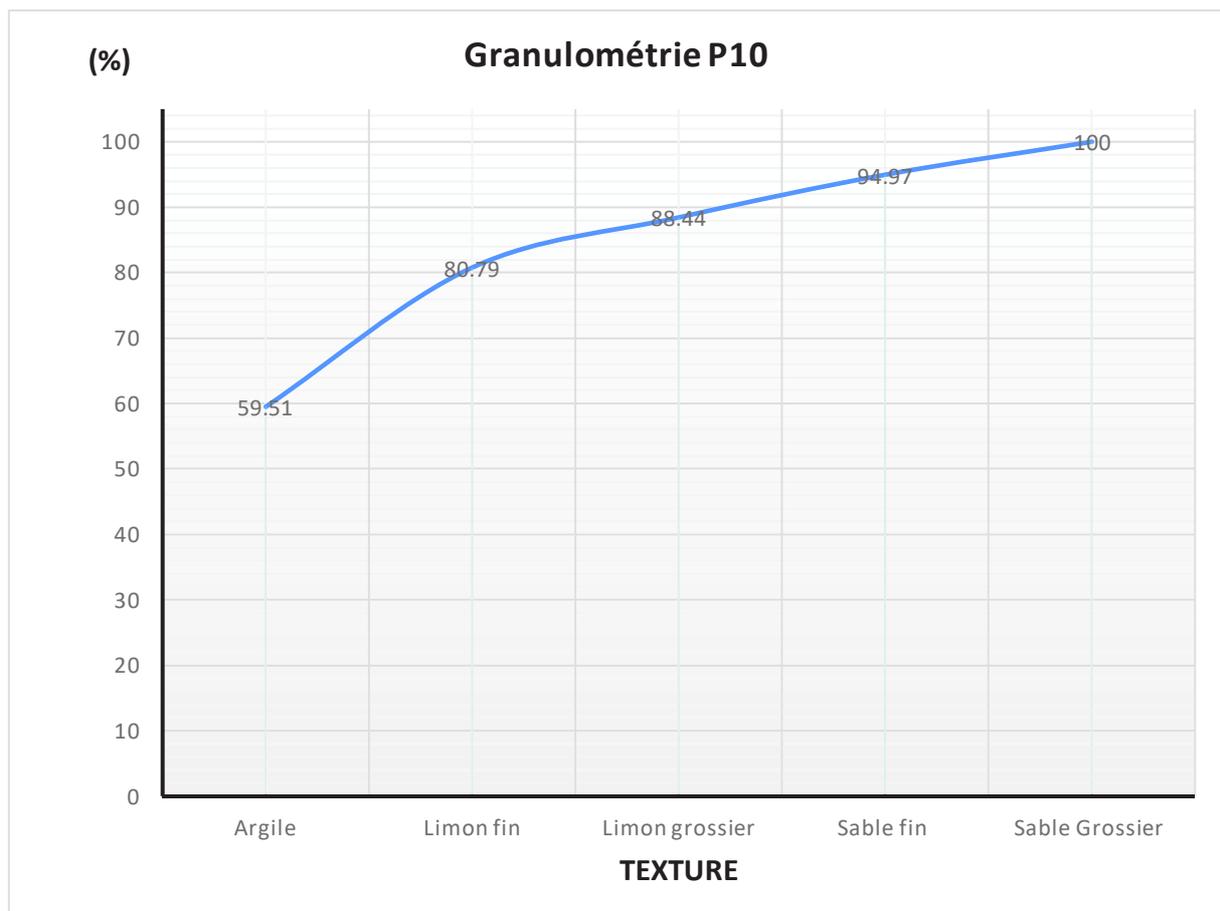
Observateur : FAREGH.W

Coordonnées : $X = 309760.128$ $Y = 3992199.07$ $Z = 797.40$

Géologie : Dépôt meuble à texture moyenne.

Pente (%) : 1.32

Profondeur de prise d'échantillon (cm) : 30



Date : 20/09/2015	Fiche d'échantillonnage	N° : 11
--------------------------	--------------------------------	----------------

Commune : Al Amiria

Lieu-dit : Al Amiria

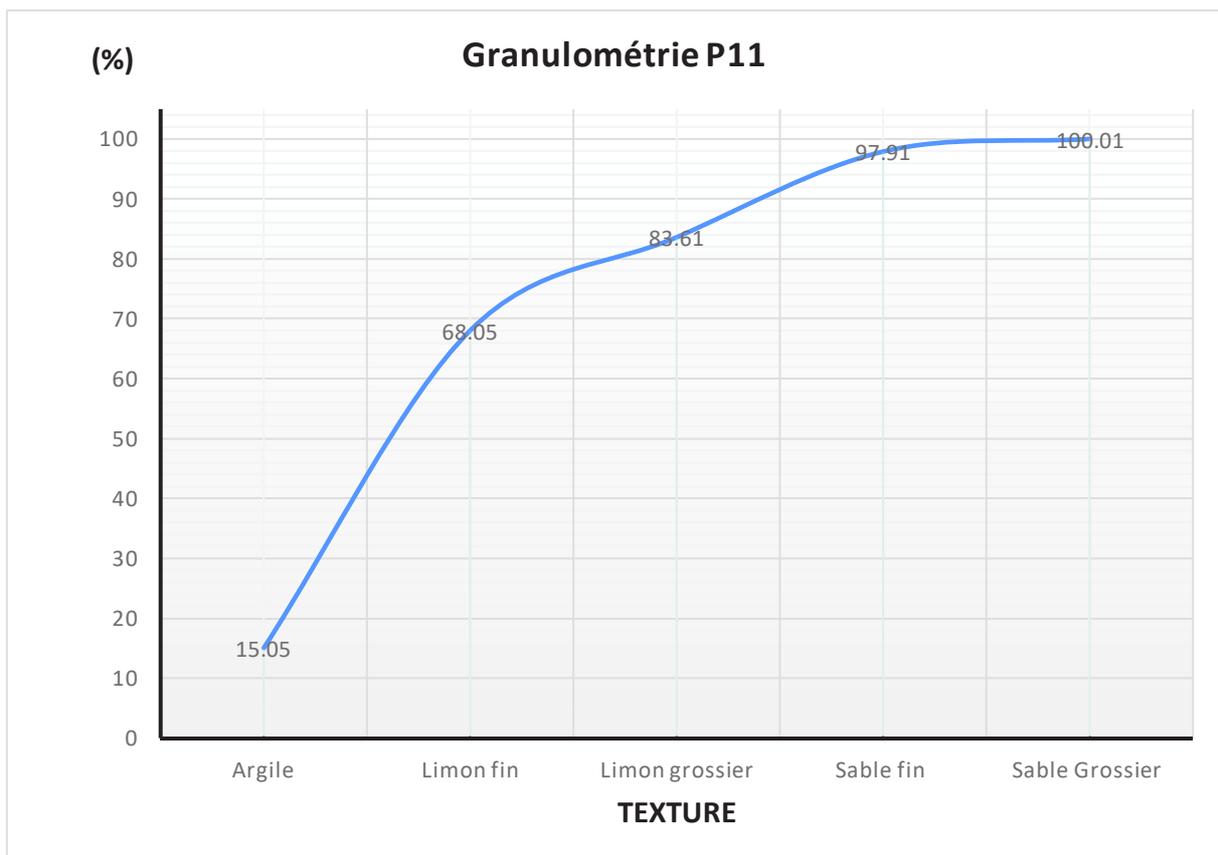
Observateur : FAREGH.W

Coordonnées : X = 310374.928 Y = 4000148.9 Z = 1012.59

Géologie : Roches sédimentaires, marnes.

Pente (%) : 7.32

Profondeur de prise d'échantillon (cm) : 30



Date : 20/09/2015	Fiche d'échantillonnage	N° : 12
--------------------------	--------------------------------	----------------

Commune : Ain Fakroune

Lieu-dit : Ain Fakroune

Observateur : FAREGH.W

Coordonnées : X = 308617.762

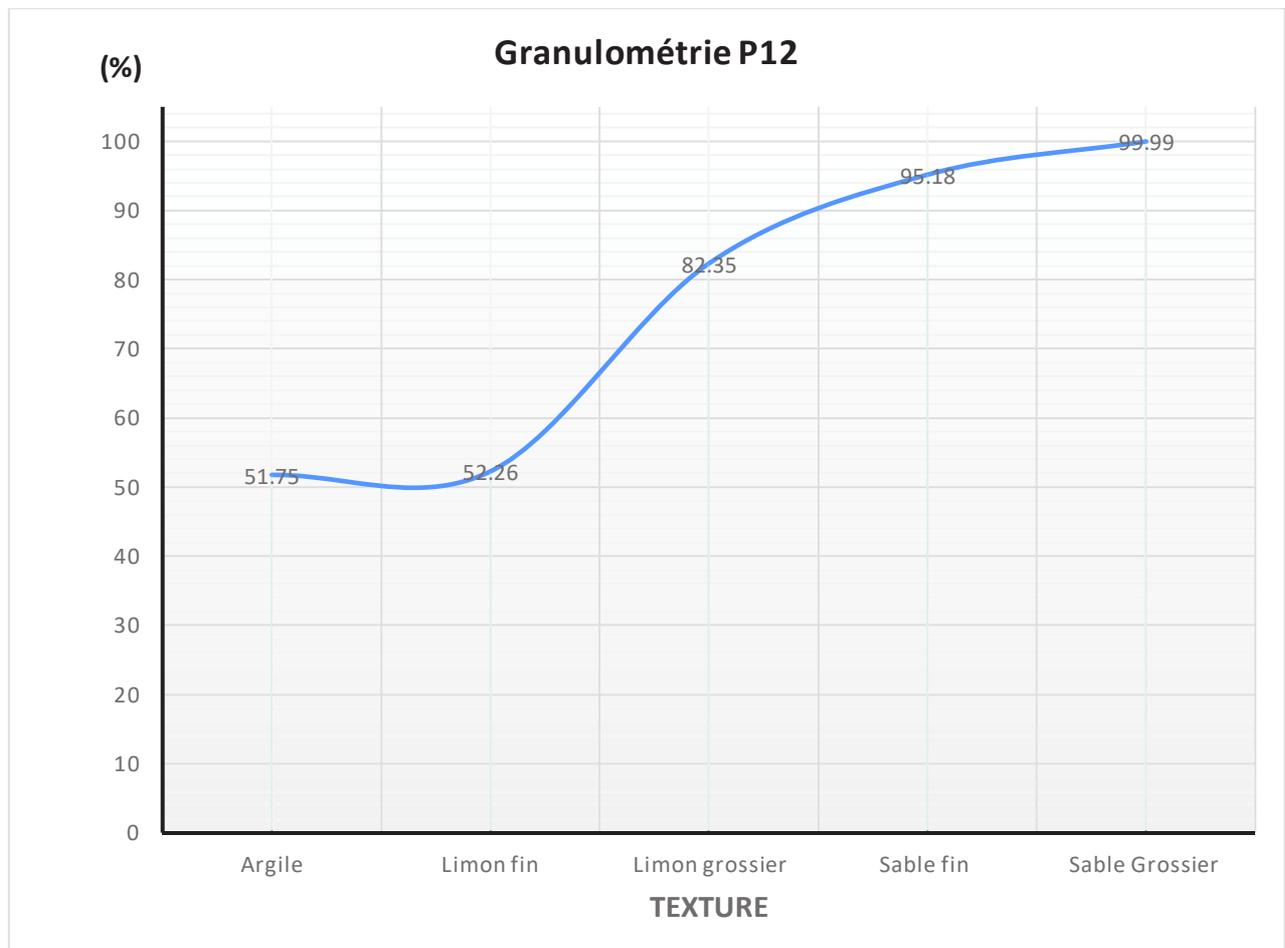
Y = 3984794.36

Z = 871.30

Géologie : Roches sédimentaires, shale.

Pente (%) : 1.03.

Profondeur de prise d'échantillon (cm) : 30



Date : 20/09/2015	Fiche d'échantillonnage	N° : 13
--------------------------	--------------------------------	----------------

Commune : Sigus

Lieu-dit : Taxas

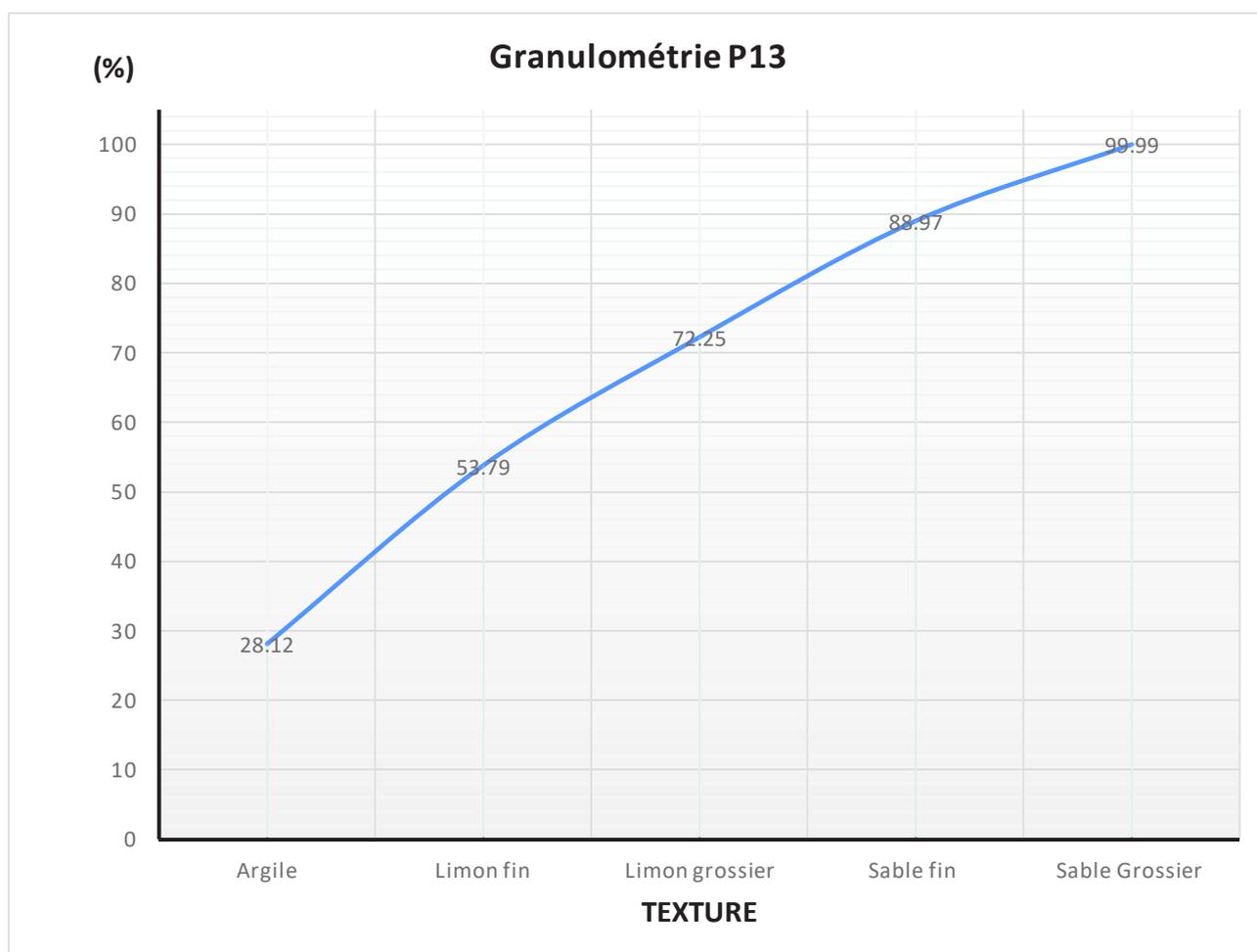
Observateur : FAREGH.W

Coordonnées : $X = 304047.274$ $Y = 3993104.83$ $Z = 800.50$

Géologie : Roches sédimentaires, shale.

Pente (%) : 5.31.

Profondeur de prise d'échantillon (cm) : 30



Date : 20/09/2015	Fiche d'échantillonnage	N° : 14
--------------------------	--------------------------------	----------------

Commune : Ain Fakroune

Lieu-dit : /

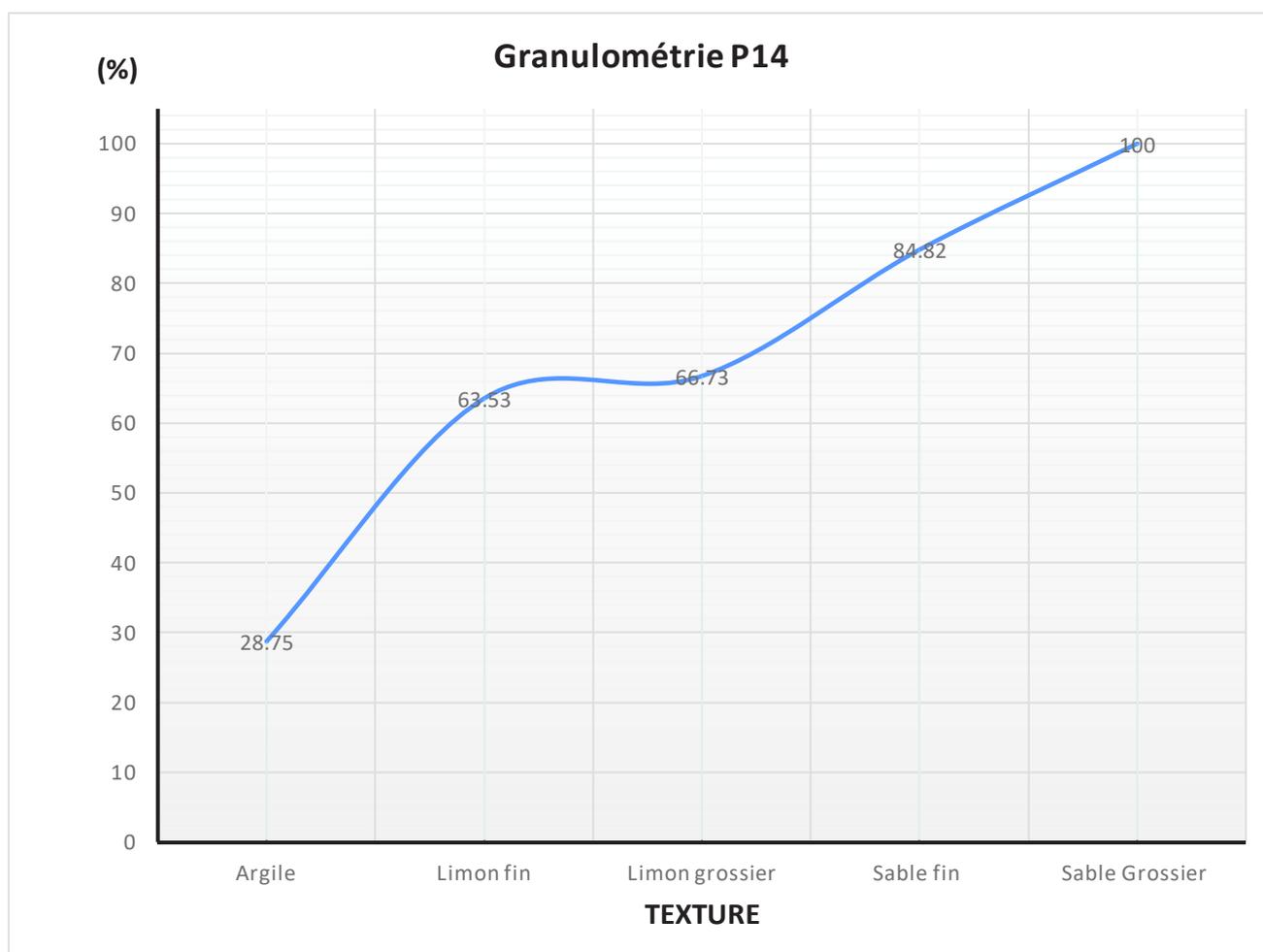
Observateur : FAREGH.W

Coordonnées : $X = 306809.595$ $Y = 3987064.31$ $Z = 832.10$

Géologie : Roches sédimentaires, shale.

Pente (%) : 3.28

Profondeur de prise d'échantillon (cm) : 30



Date : 20/09/2015	Fiche d'échantillonnage	N° : 15
--------------------------	--------------------------------	----------------

Commune : Ain Fakroune

Lieu-dit : /

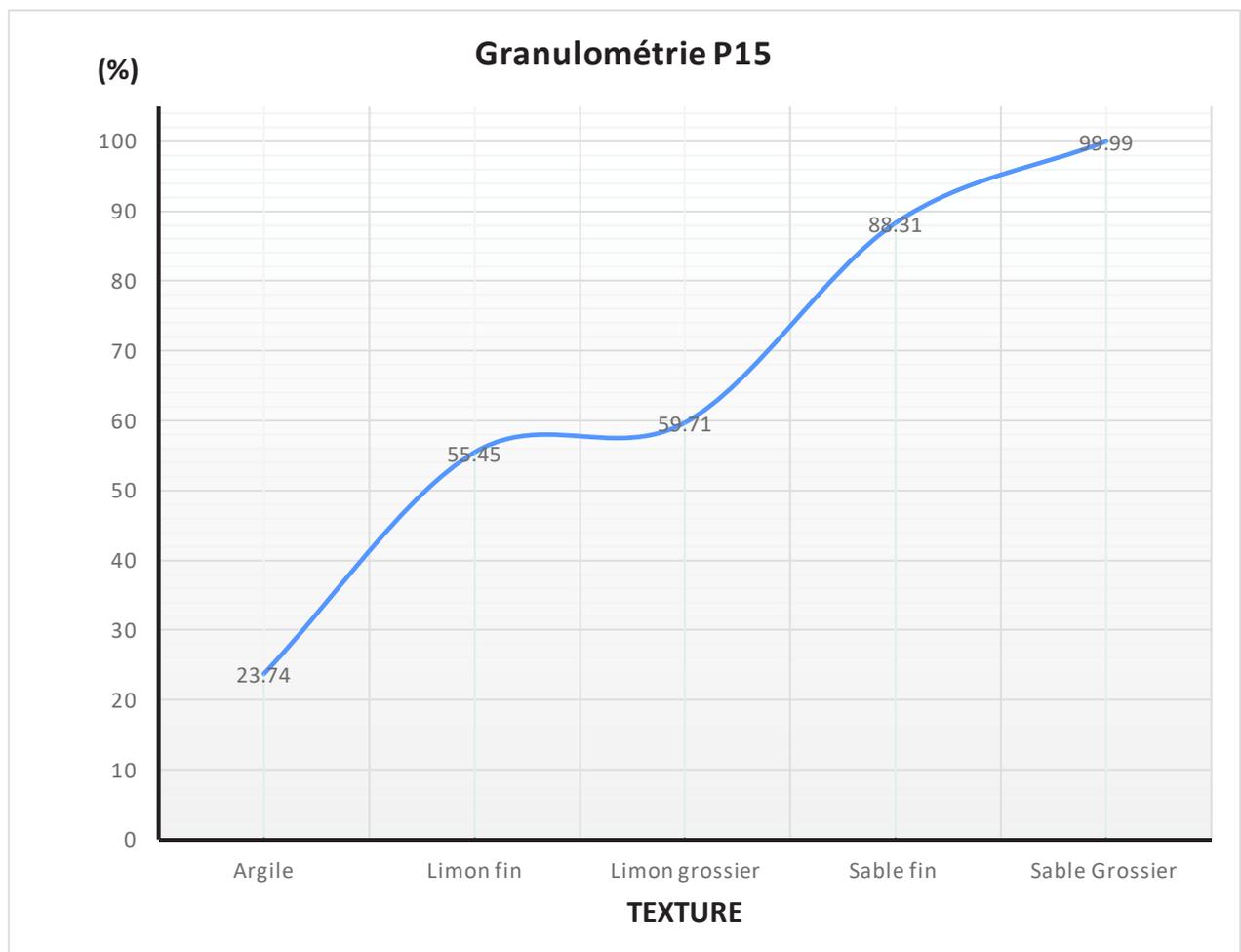
Observateur : FAREGH.W

Coordonnées : $X = 301160.576$ $Y = 3997782.34$ $Z = 813.20$

Géologie : Roches sédimentaires, calcaire marneux.

Pente (%) : 3.78

Profondeur de prise d'échantillon (cm) : 30



Date : 20/09/2015	Fiche d'échantillonnage	N° : 16
--------------------------	--------------------------------	----------------

Commune : Sigus

Lieu-dit : Sigus

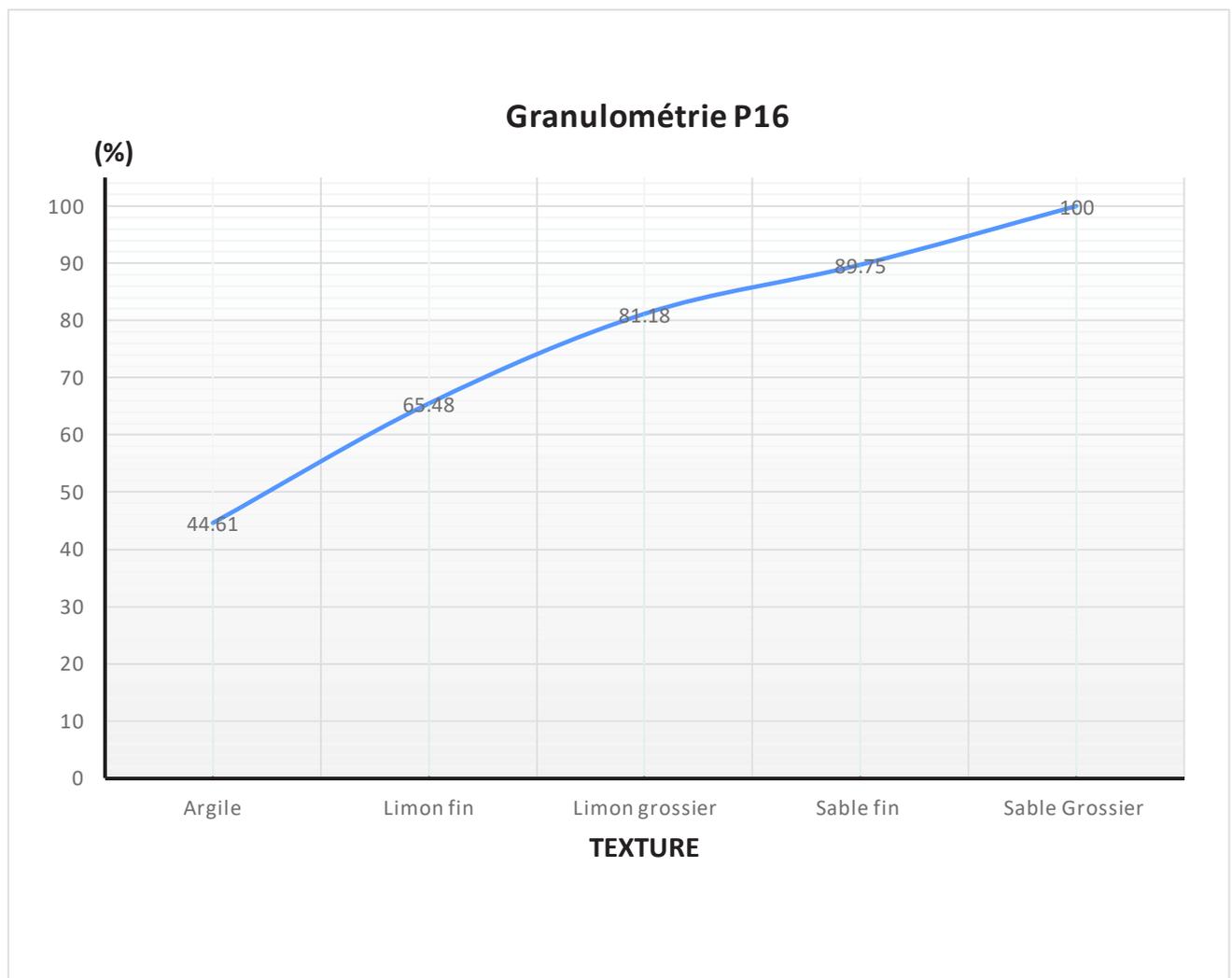
Observateur : FAREGH.W

Coordonnées : X = 301695.993 Y = 3999555.4 Z = 773.80

Géologie : Dépôt meuble a texture grossière.

Pente (%) : 3.24

Profondeur de prise d'échantillon (cm) : 30



Date : 20/09/2015	Fiche d'échantillonnage	N° : 17
--------------------------	--------------------------------	----------------

Commune : Sigus

Lieu-dit : Sigus

Observateur : FAREGH.W

Coordonnées : $X = 300042.064$

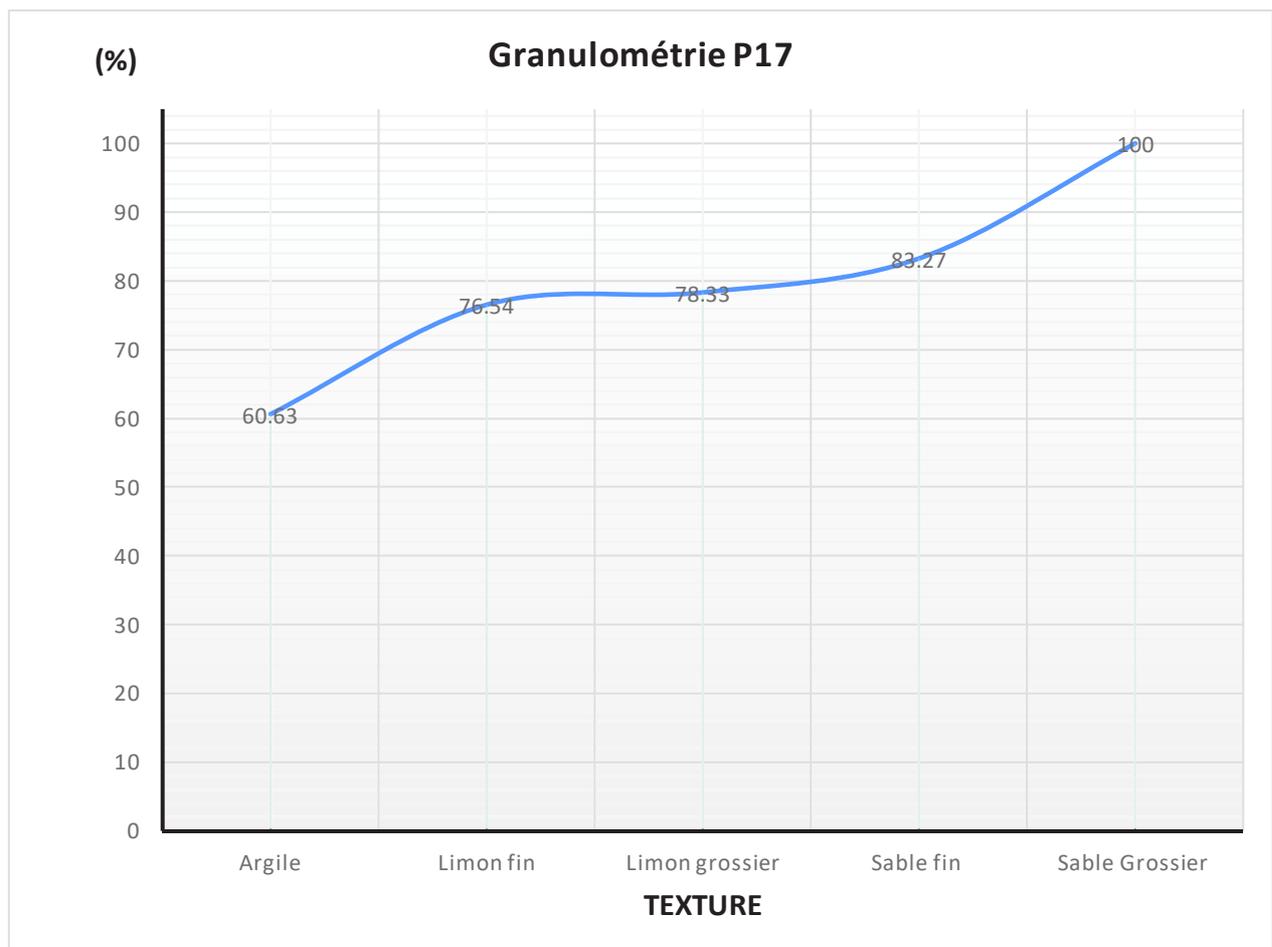
$Y = 4000216.22$

$Z = 759.90$

Géologie : Dépôt meuble a texture grossière.

Pente (%) : 2.24

Profondeur de prise d'échantillon (cm) : 30



Date : 20/09/2015	Fiche d'échantillonnage	N° : 18
--------------------------	--------------------------------	----------------

Commune : Sigus

Lieu-dit : Sigus

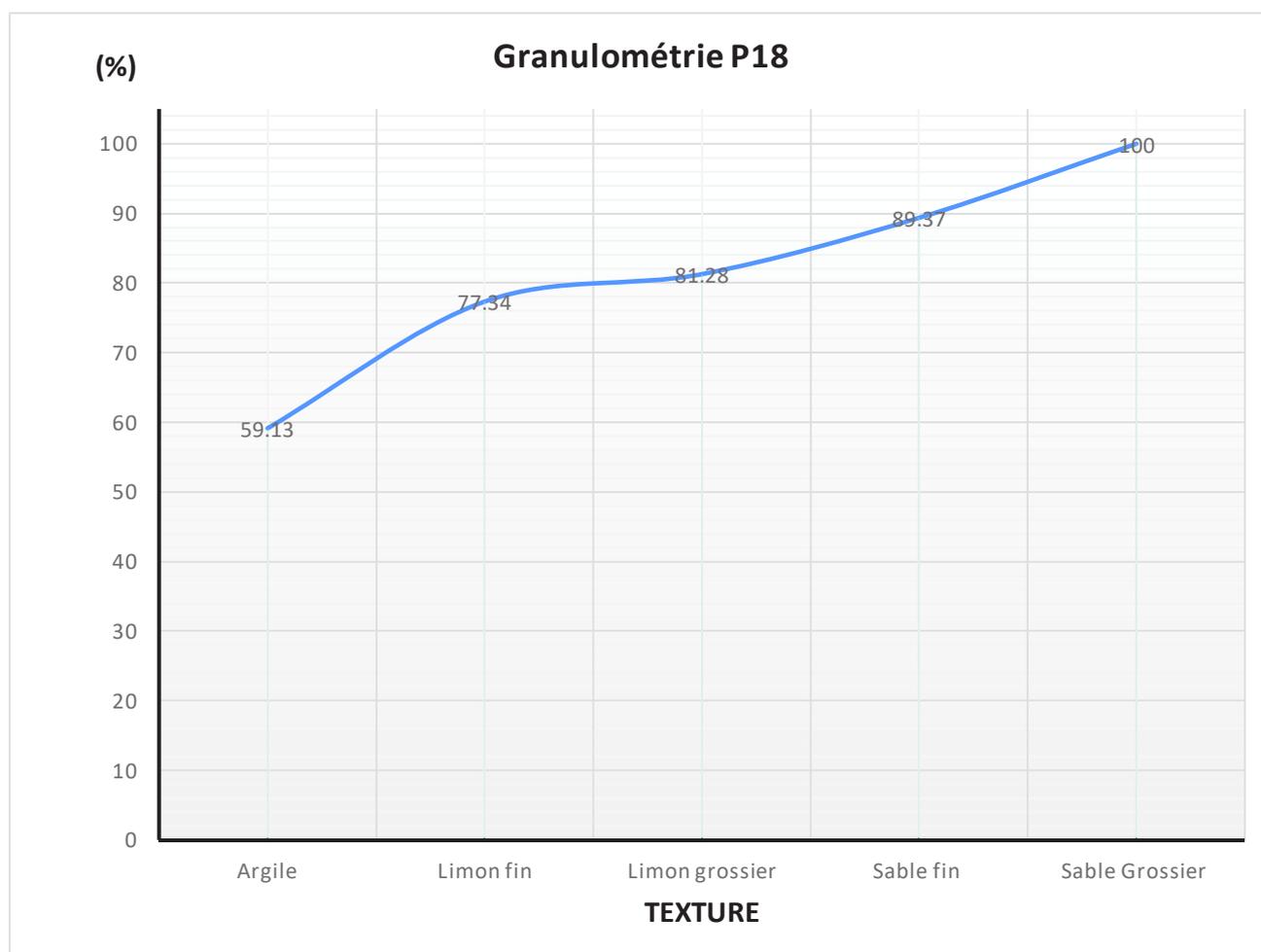
Observateur : FAREGH.W

Coordonnées : $X = 300725.945$ $Y = 4000539.39$ $Z = 783.20$

Géologie : Dépôt meuble a texture grossière.

Pente (%) : 2.37

Profondeur de prise d'échantillon (cm) : 30



Annexe 02

Résultats de simulation du canal existant

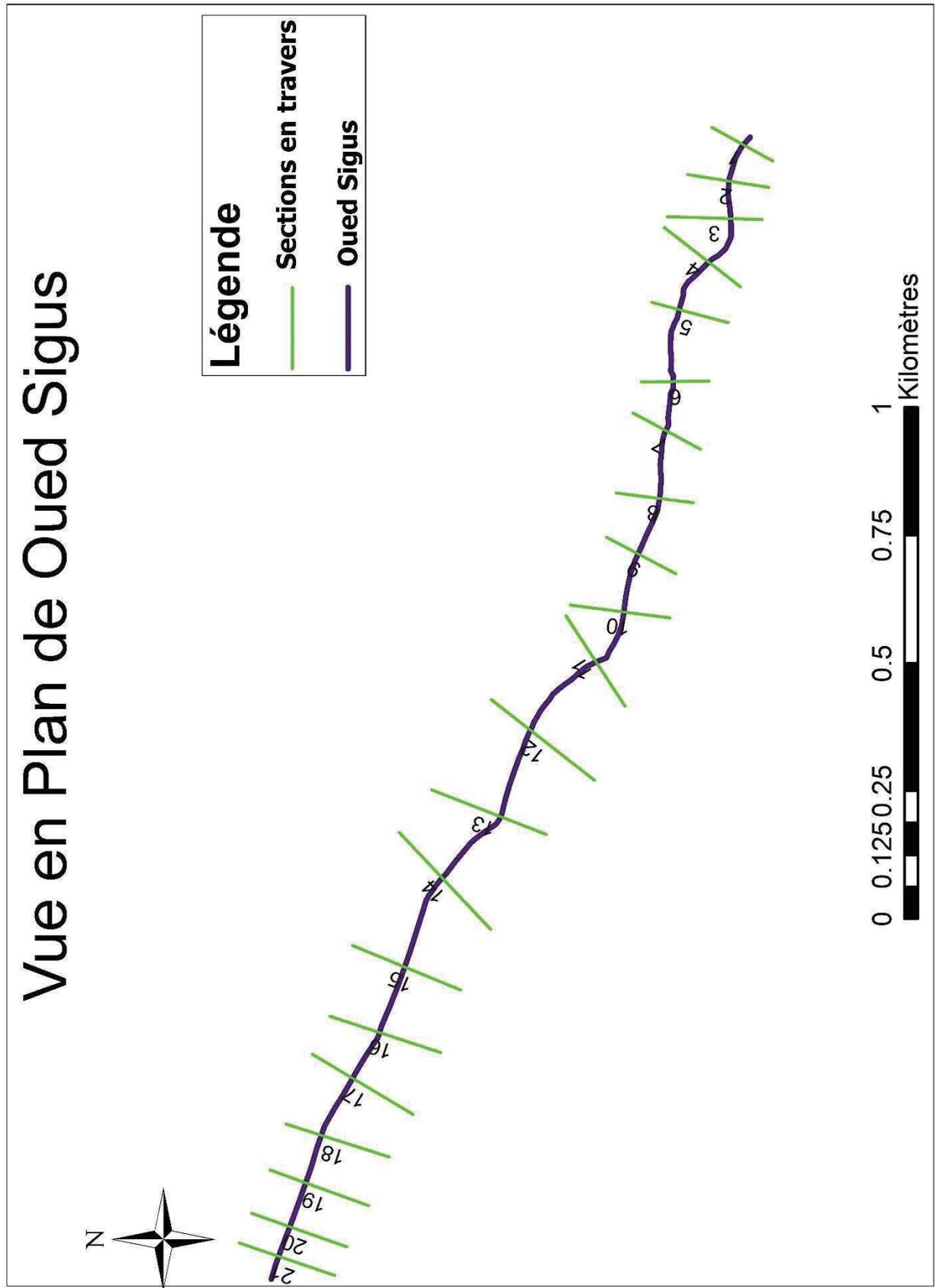
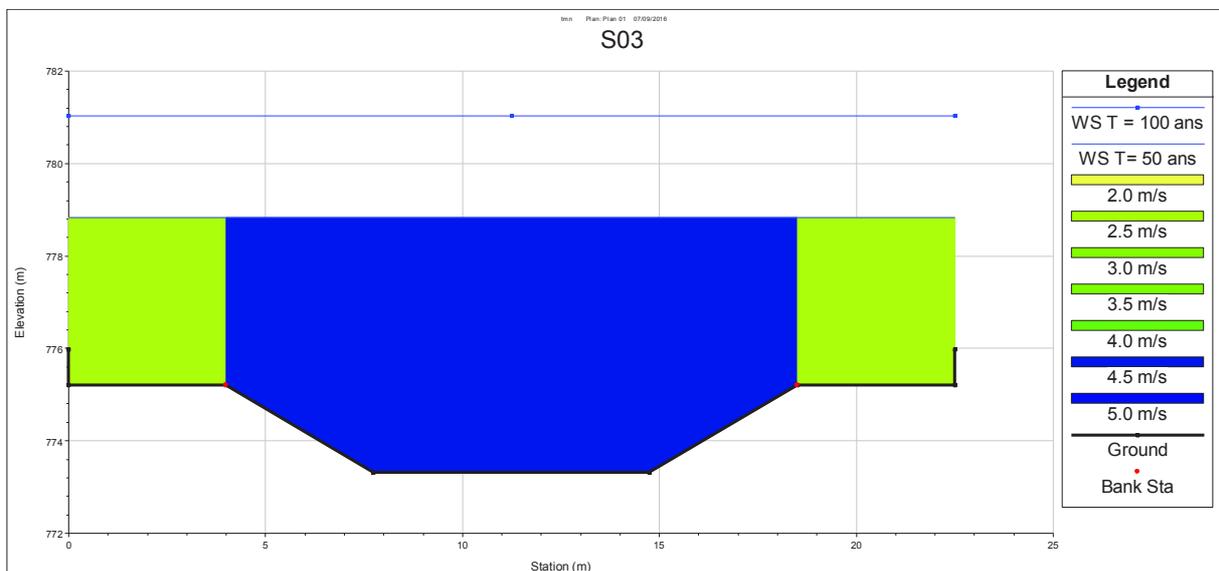
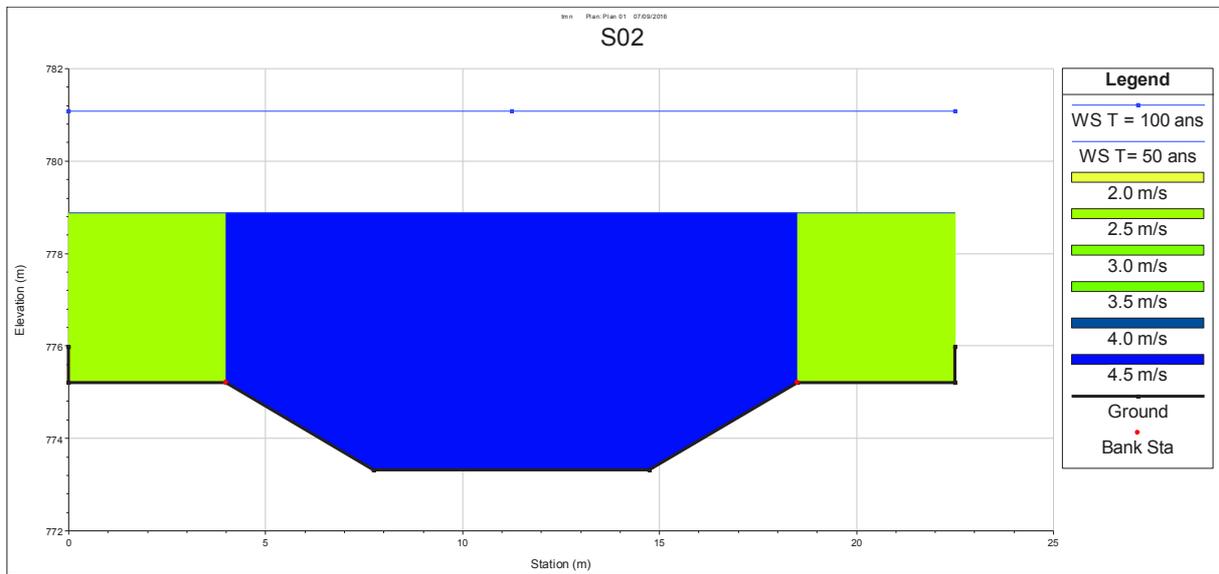
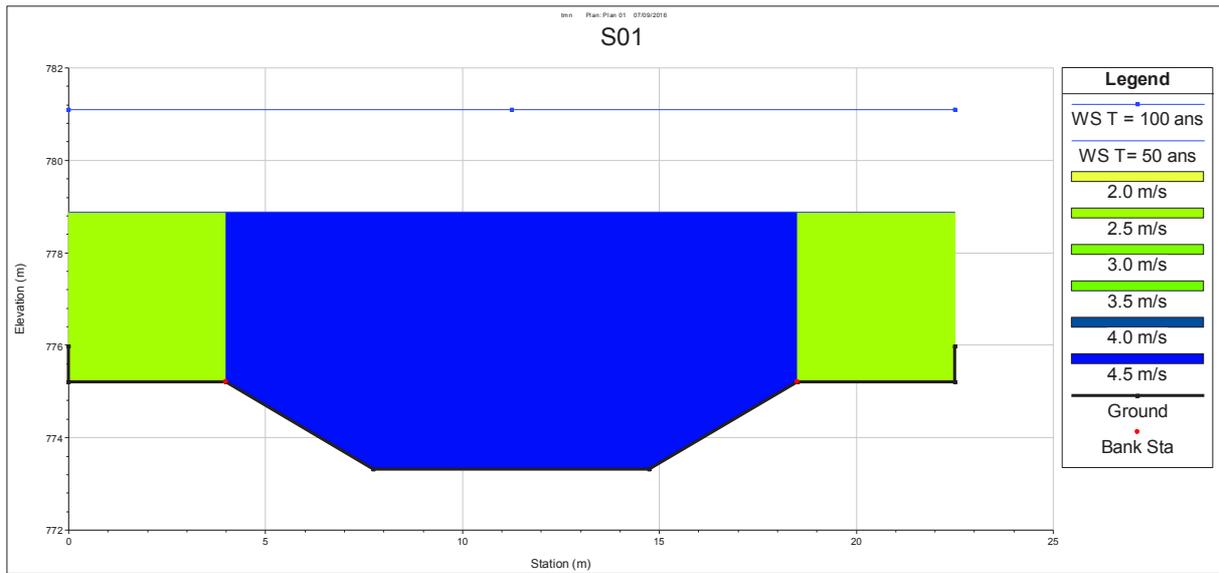
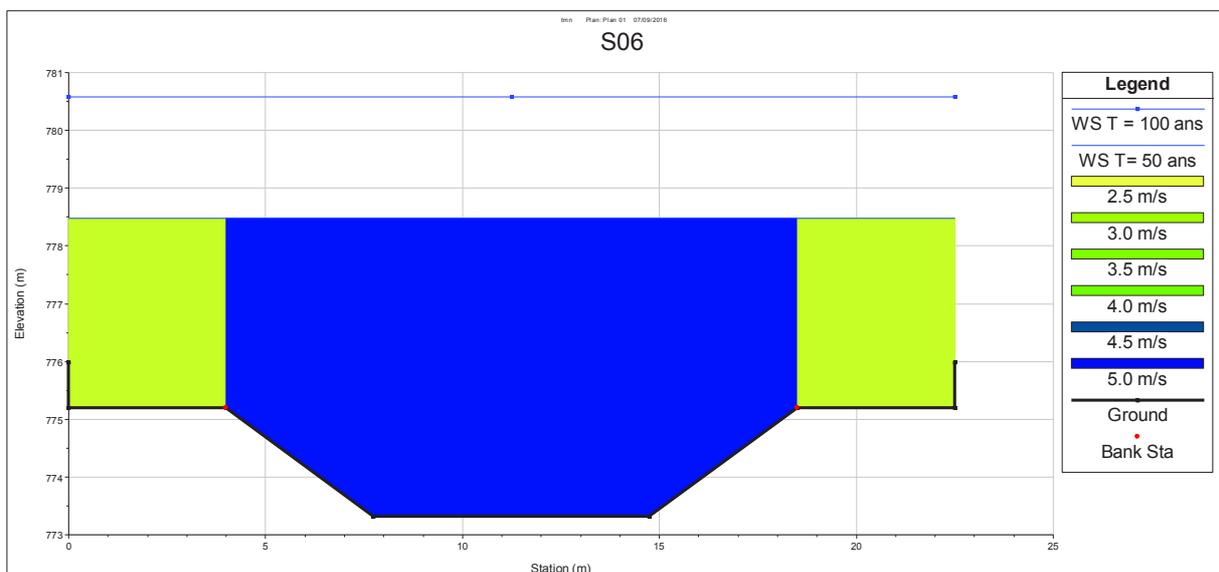
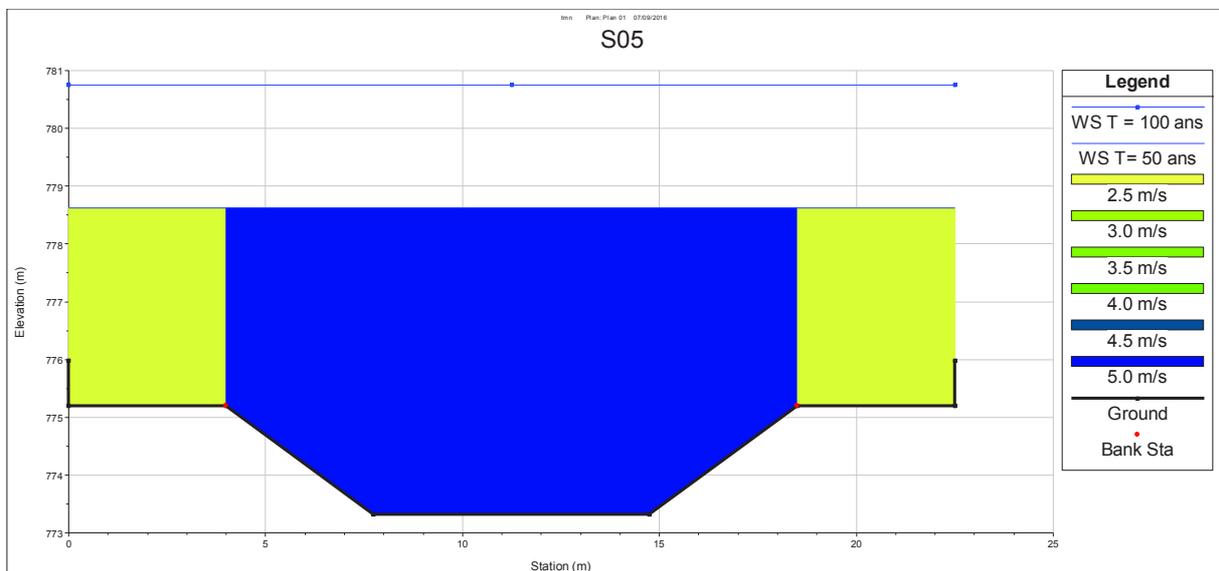
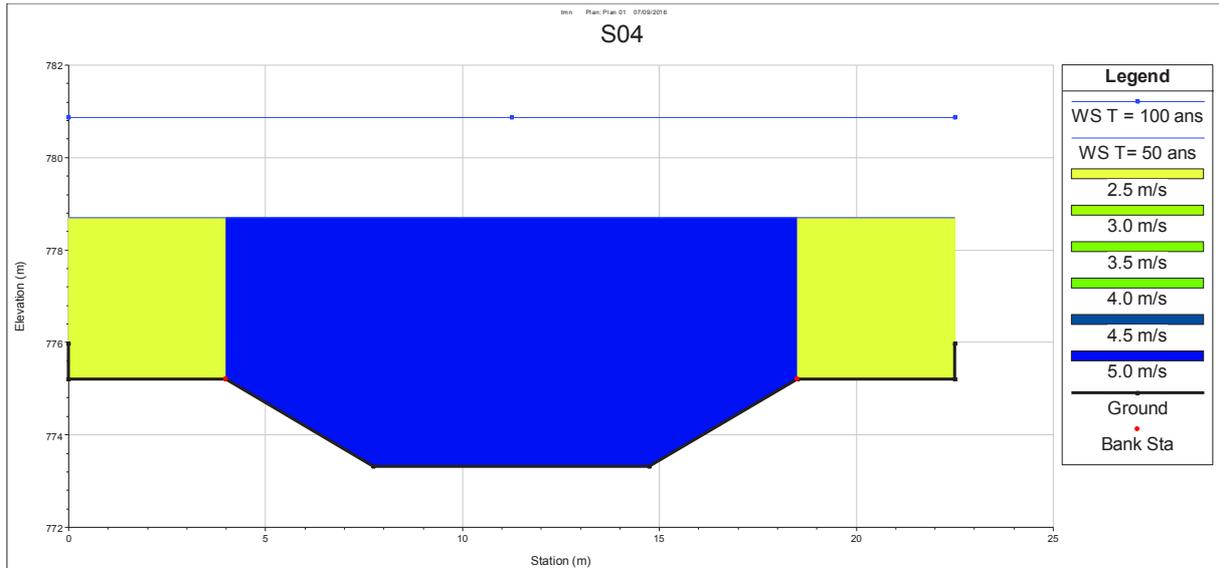
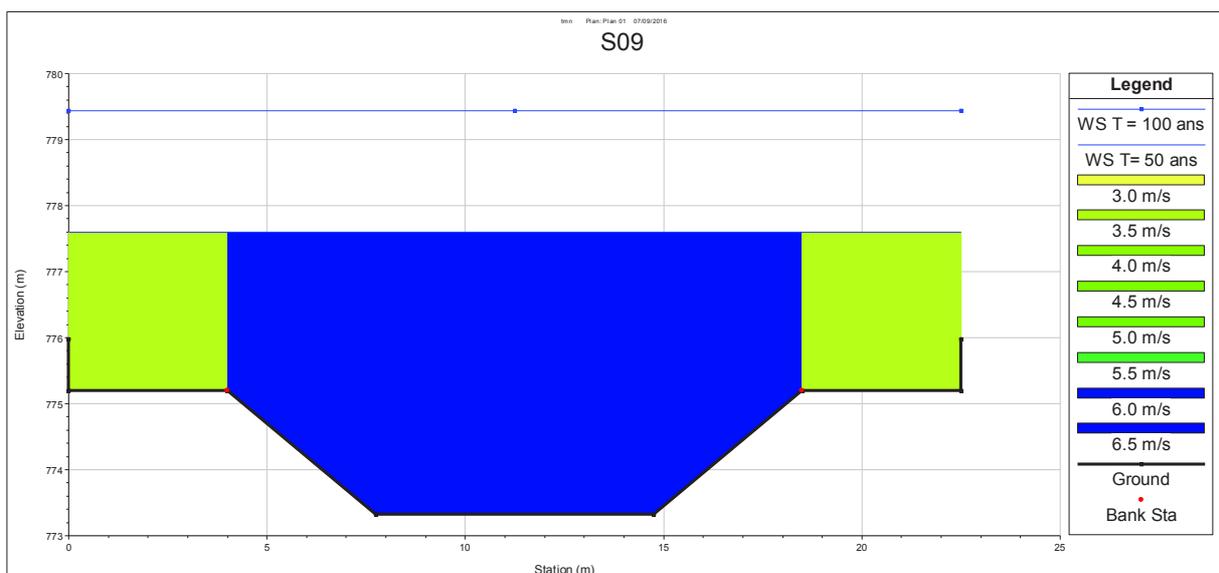
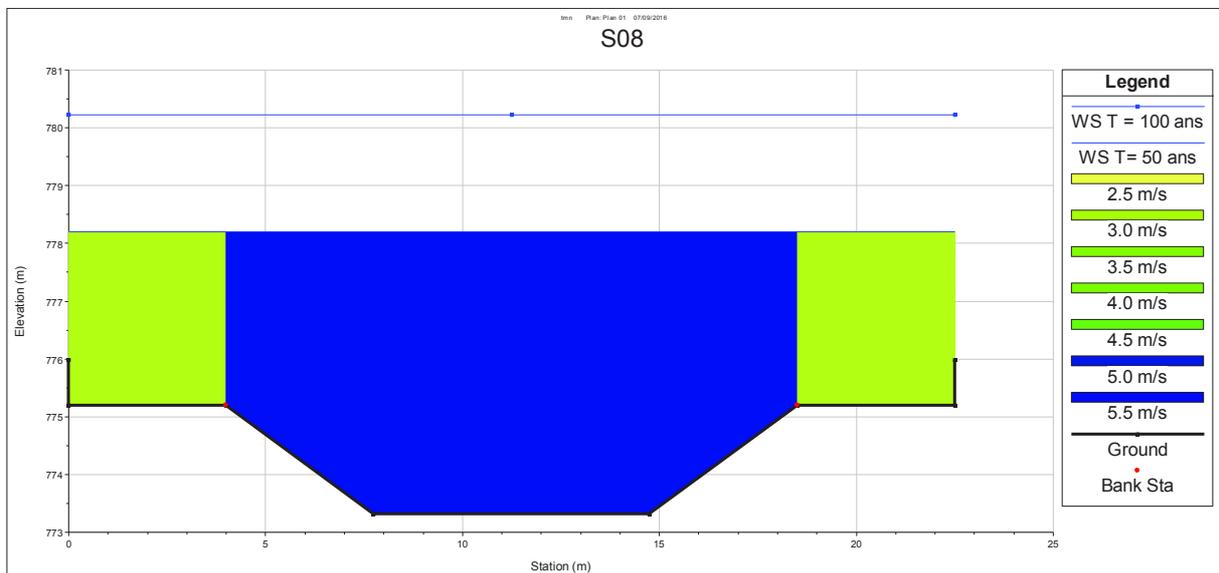
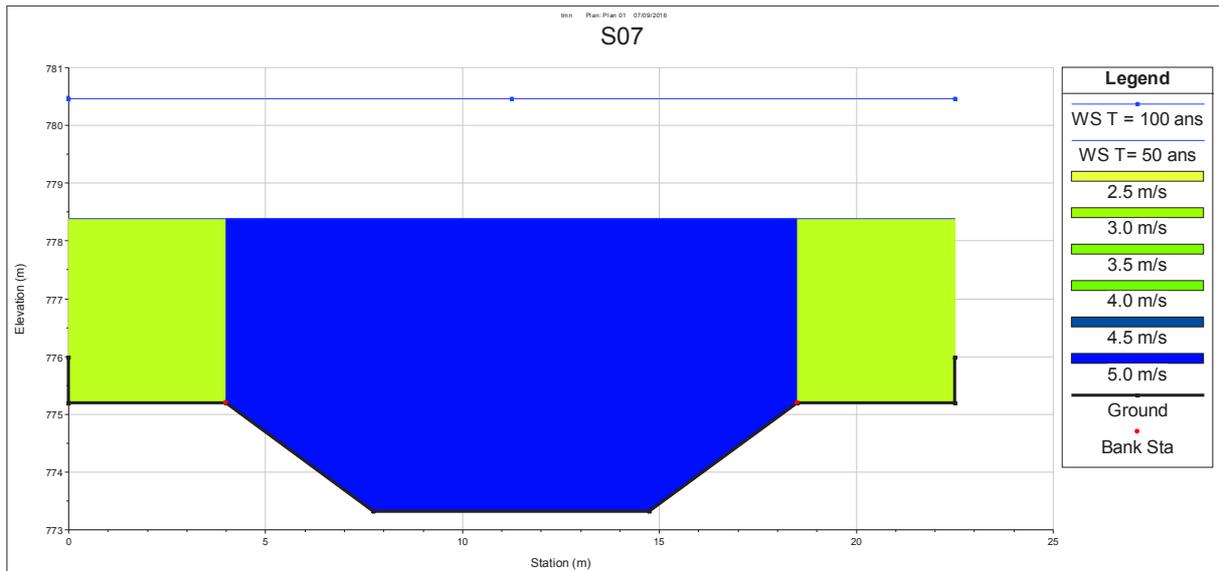


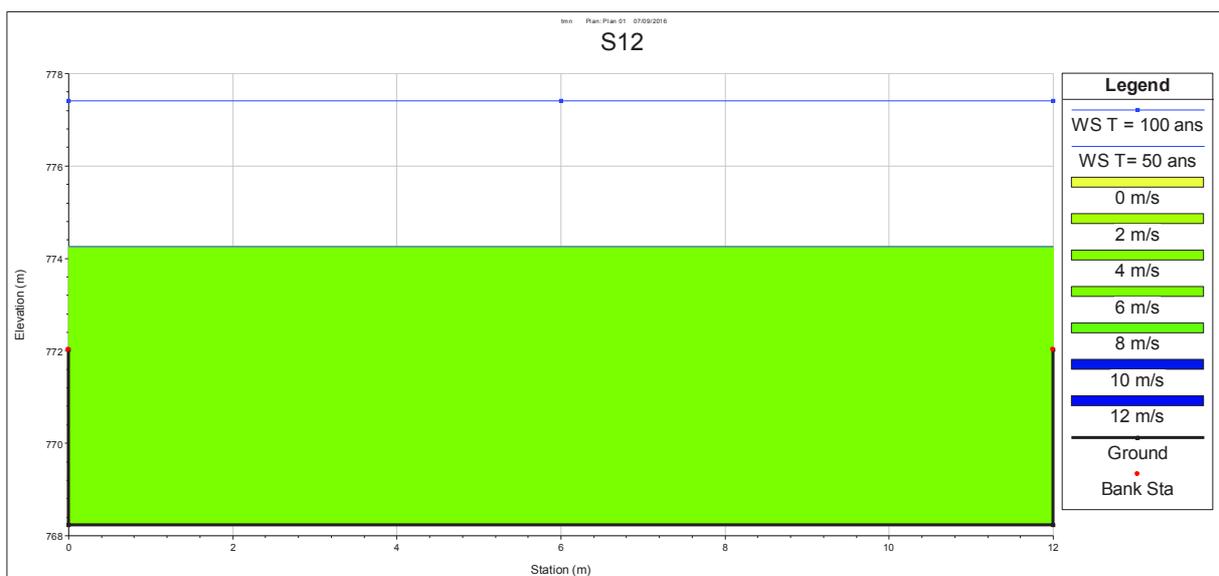
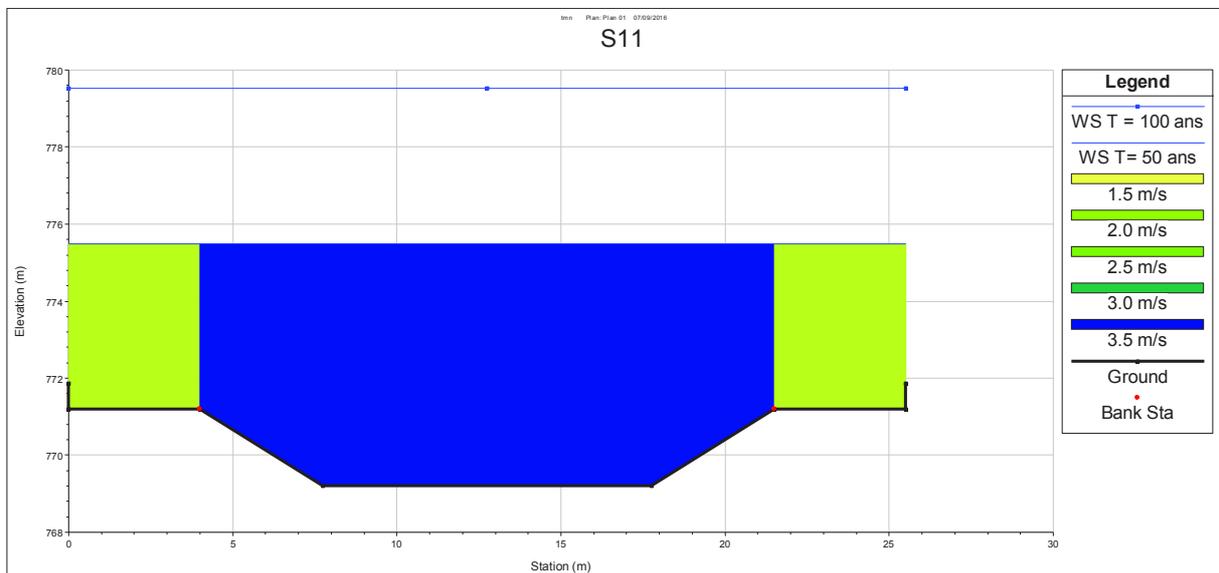
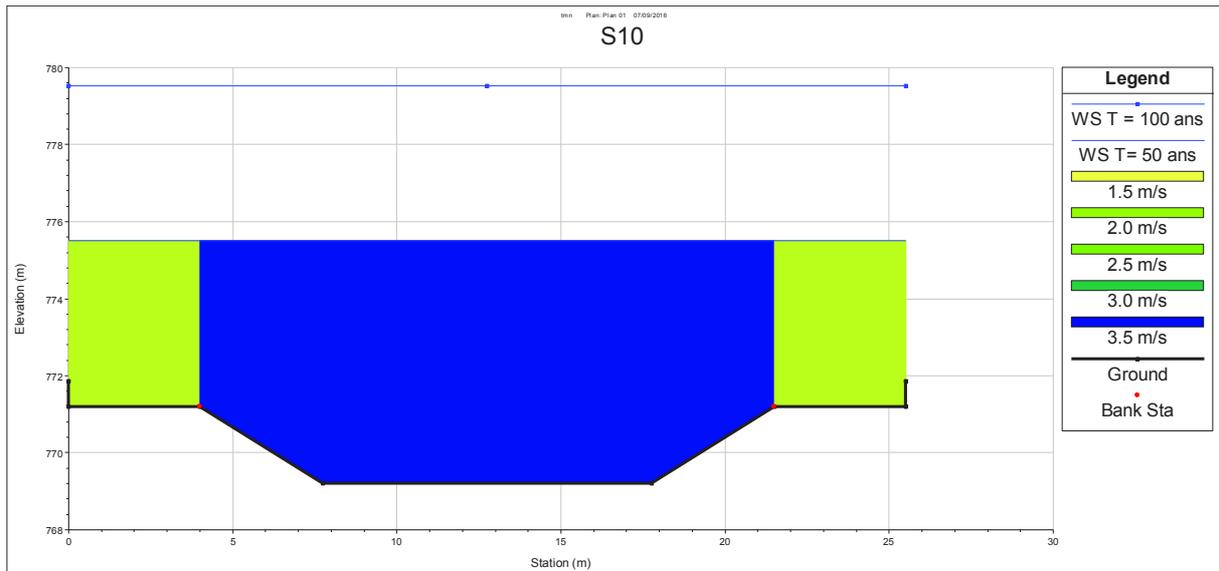
Figure : Vue en plan + les sections en travers de l'oued Sigus

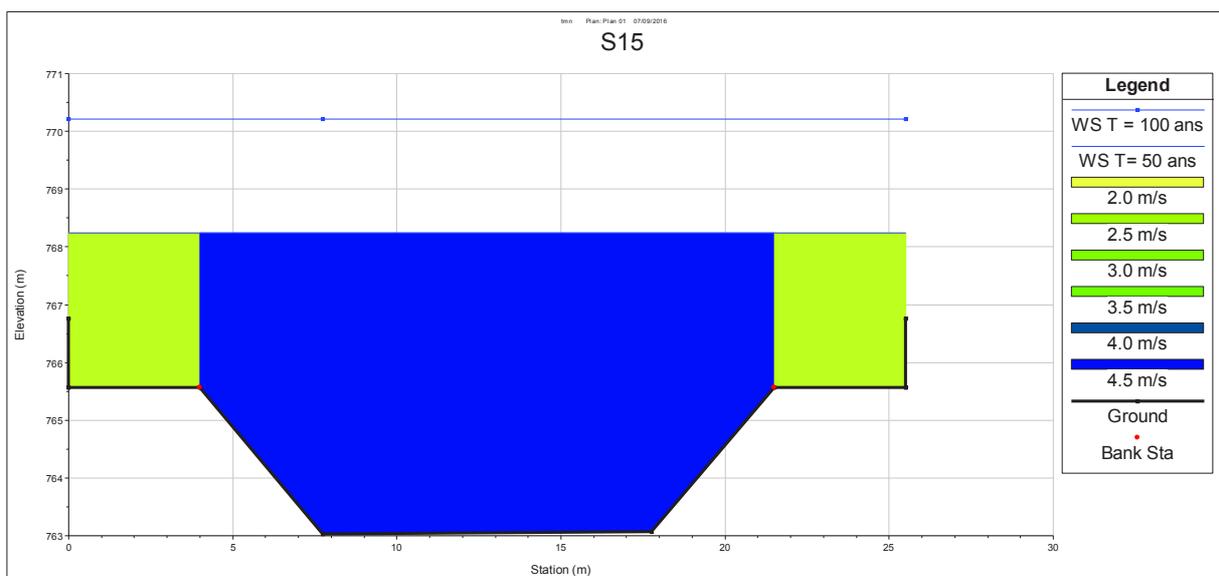
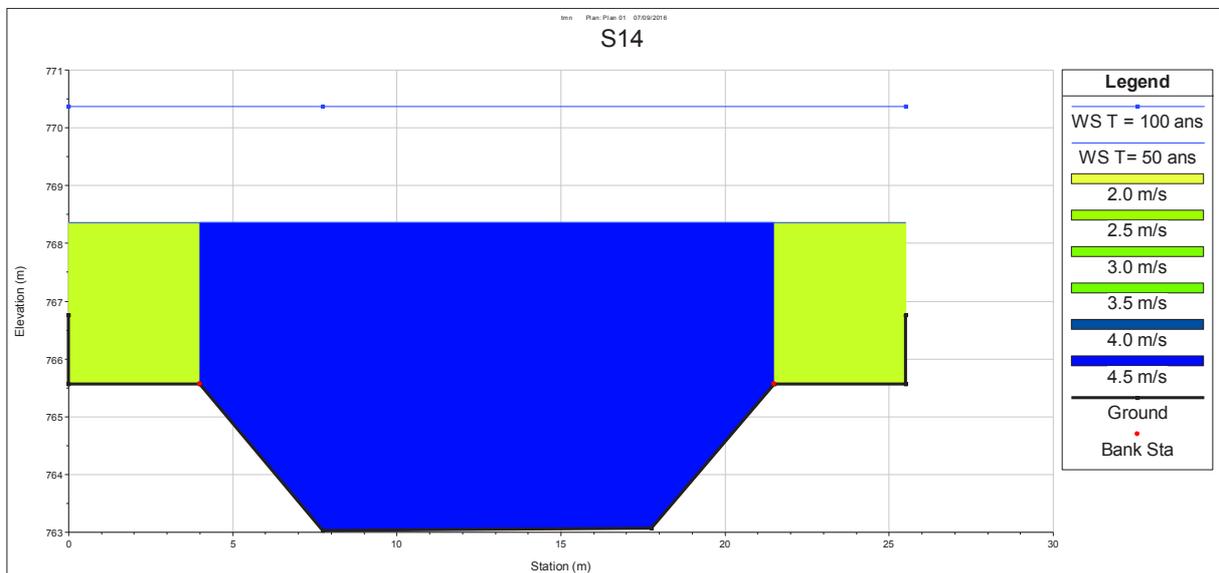
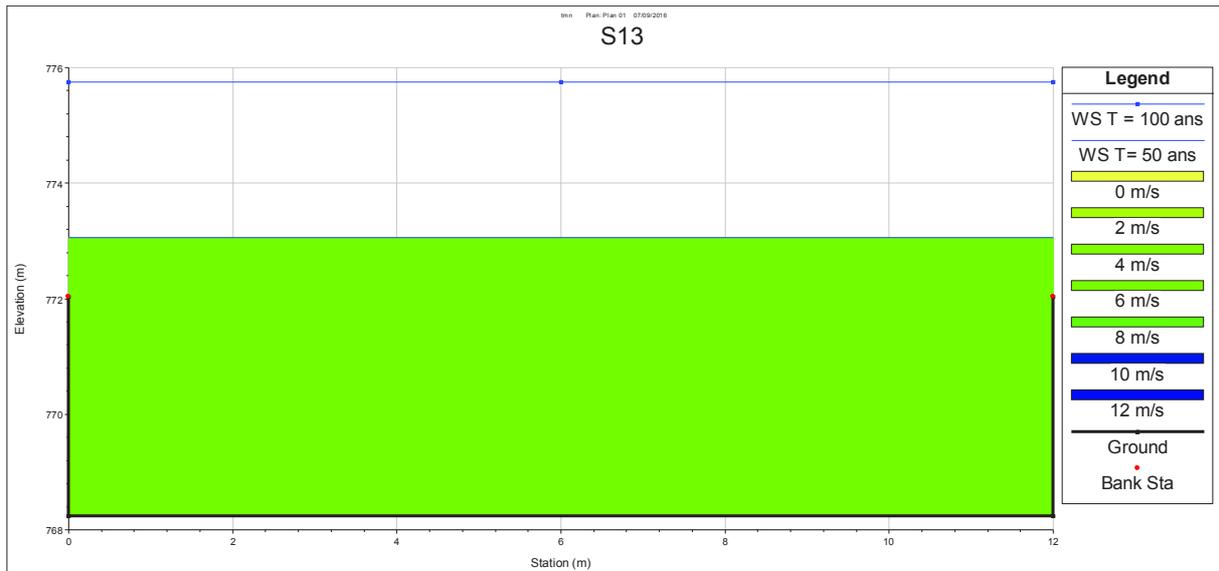
Les sections du canal existant

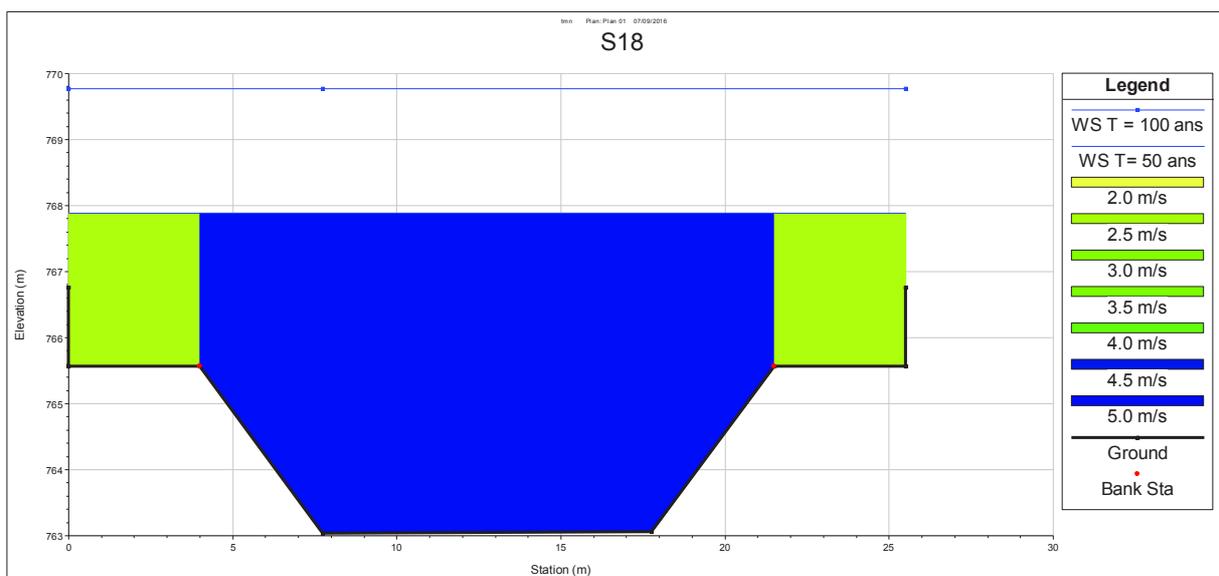
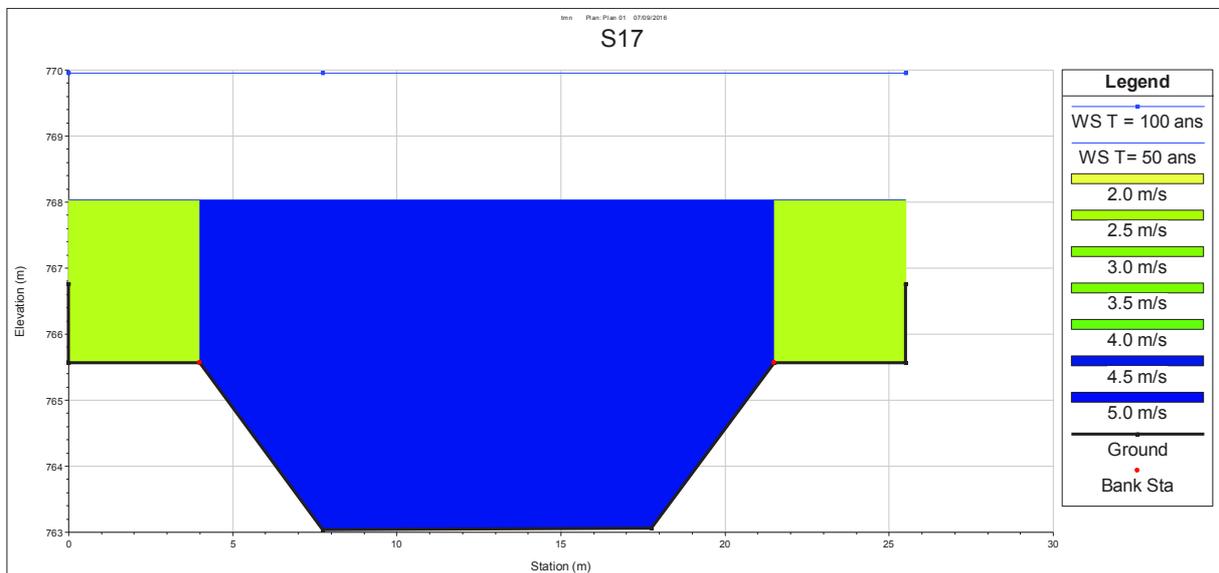
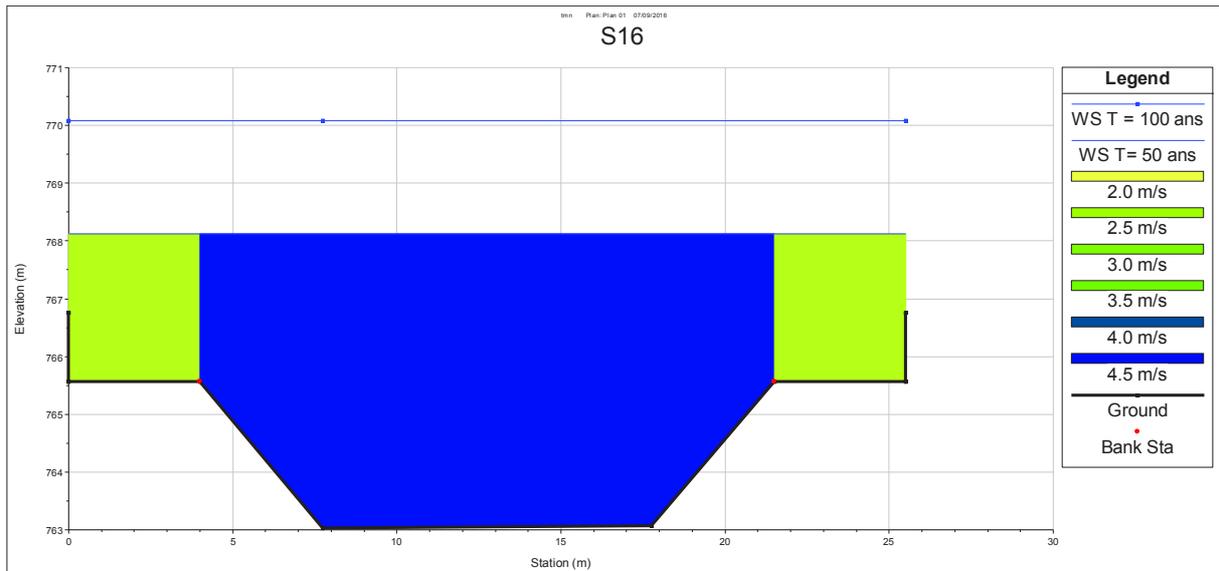


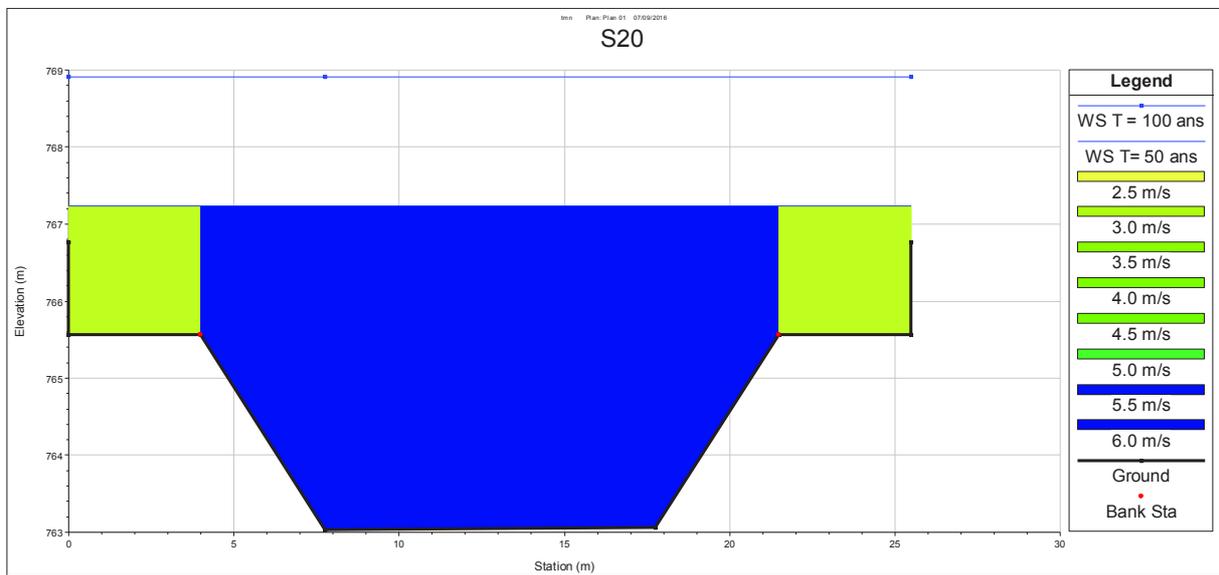
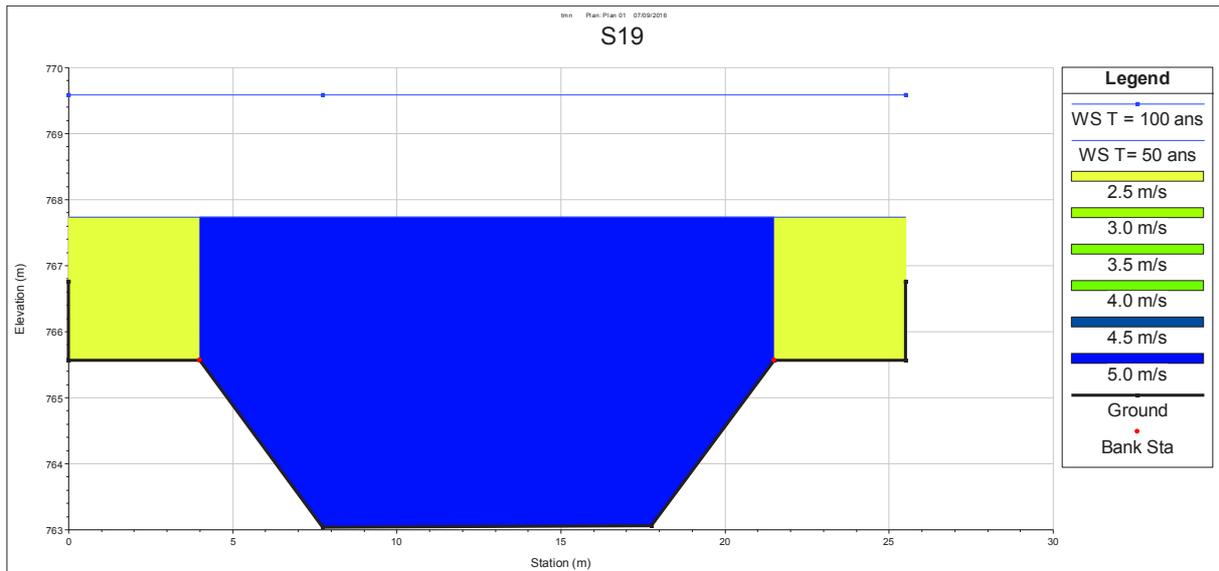












Annexe 03

Relevés de pénétrabilité

Annexe 04

*Résultats de cartographie la de vulnérabilité par la
méthode AHP*

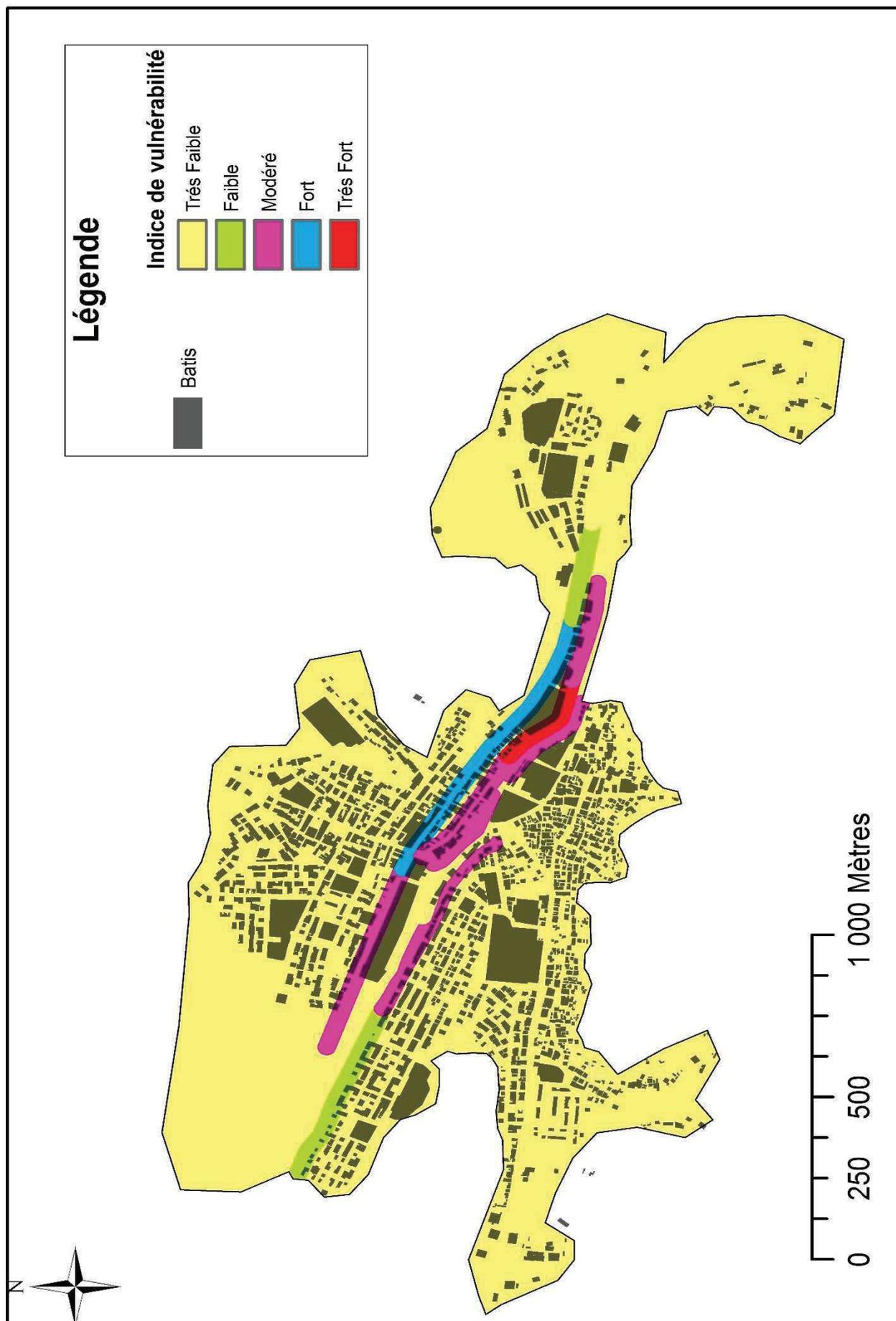


Figure A.4.1 : Carte de vulnérabilité selon le critère "Perméabilité partielle des bâtis"

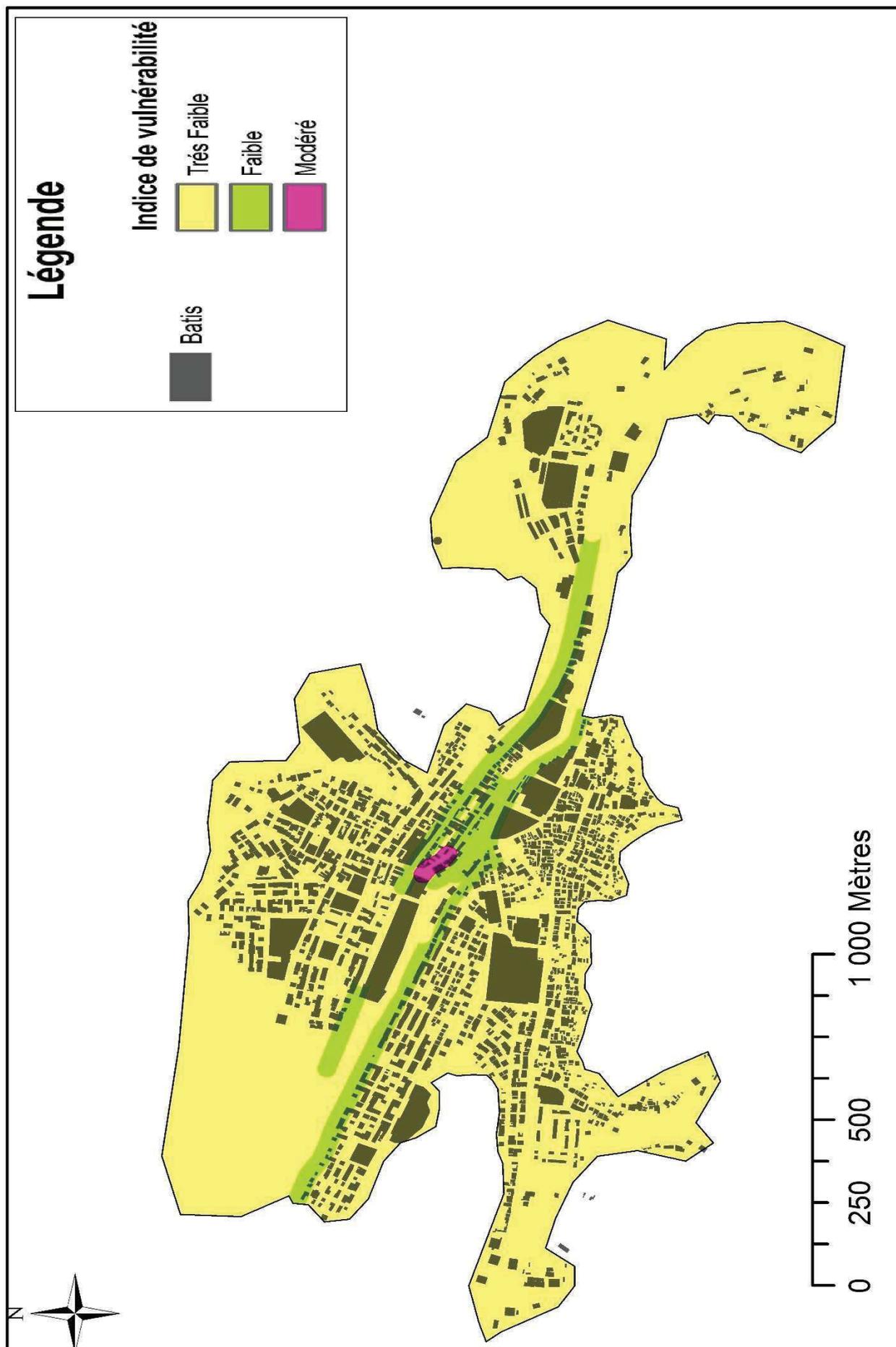


Figure A.4.2 : Carte de vulnérabilité selon le critère "Perméabilité partielle des routes"

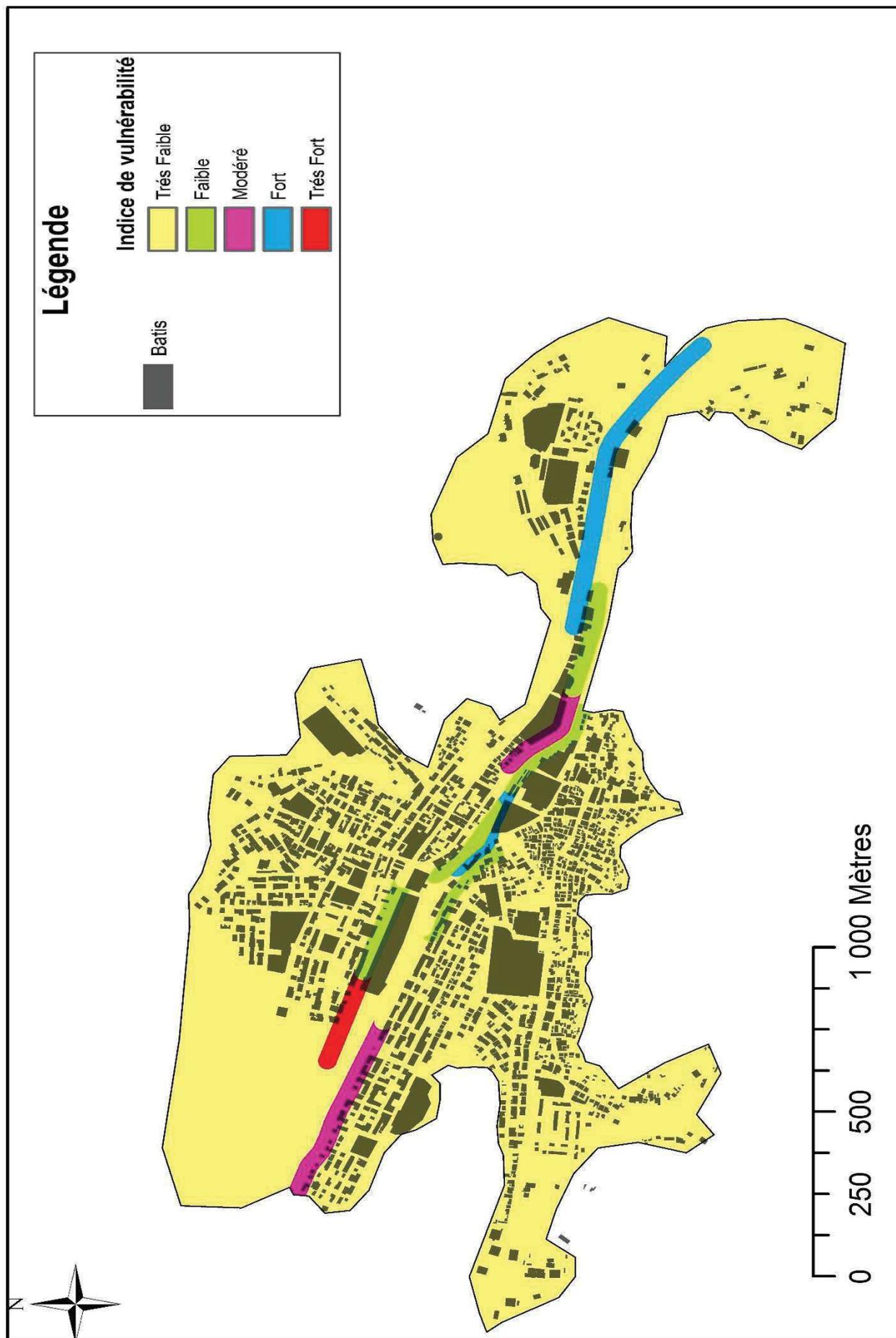


Figure A.4.3 : Carte de vulnérabilité selon le critère "Perméabilité partielle des vides"

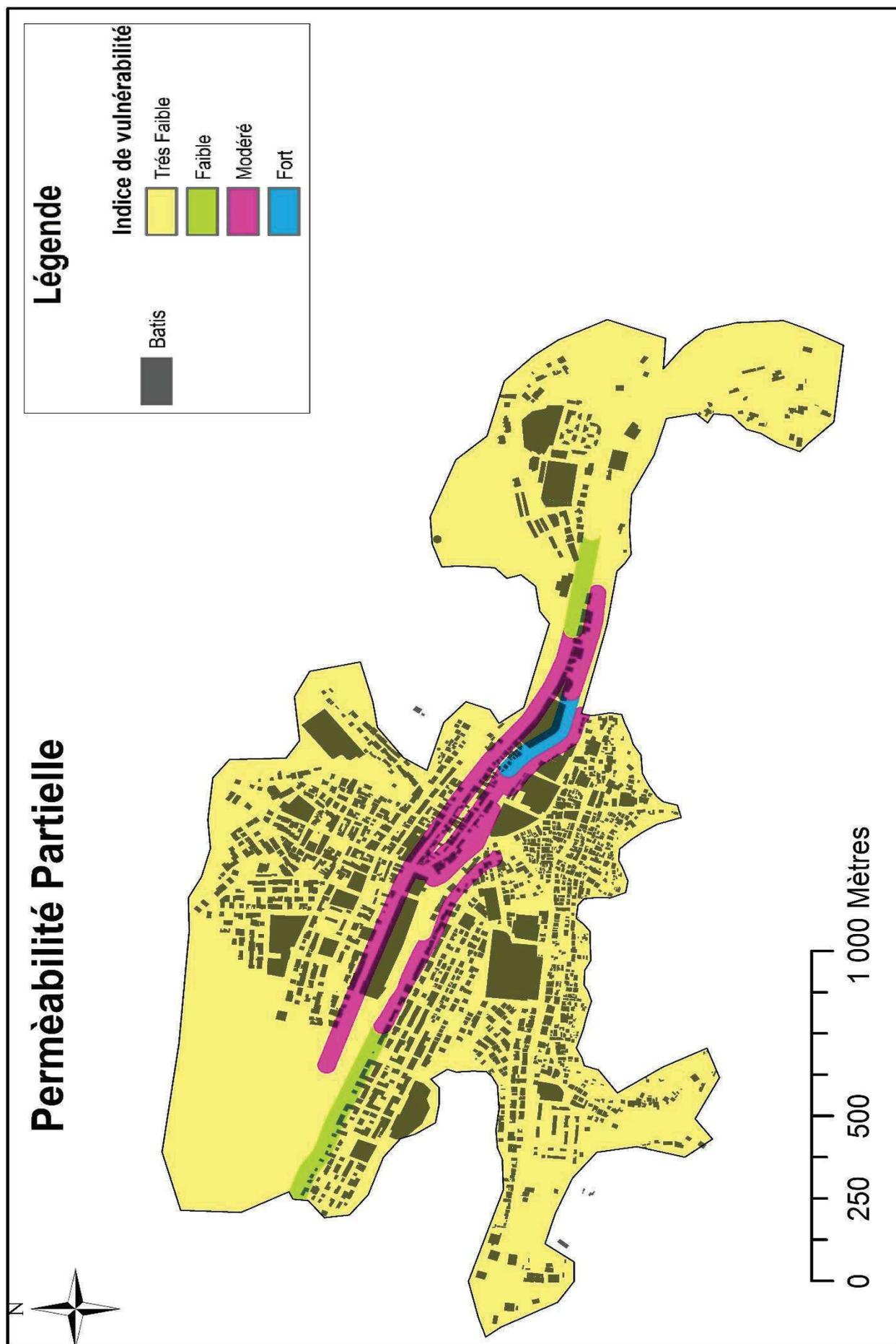


Figure A.4.4 : Carte de vulnérabilité selon le critère "Perméabilité partielle"

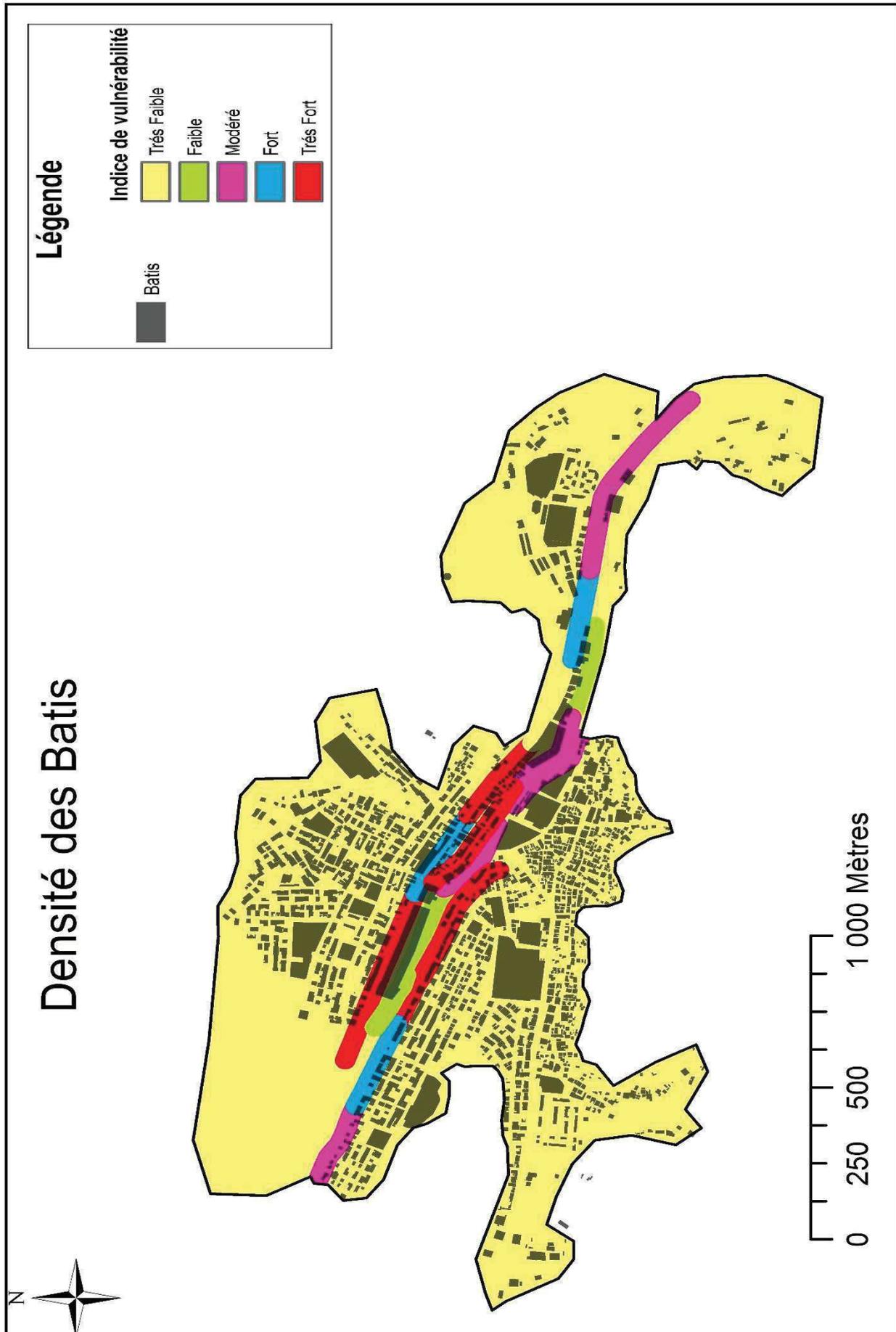


Figure A.4.5 : Carte de vulnérabilité selon le critère "Densité des bâtis"

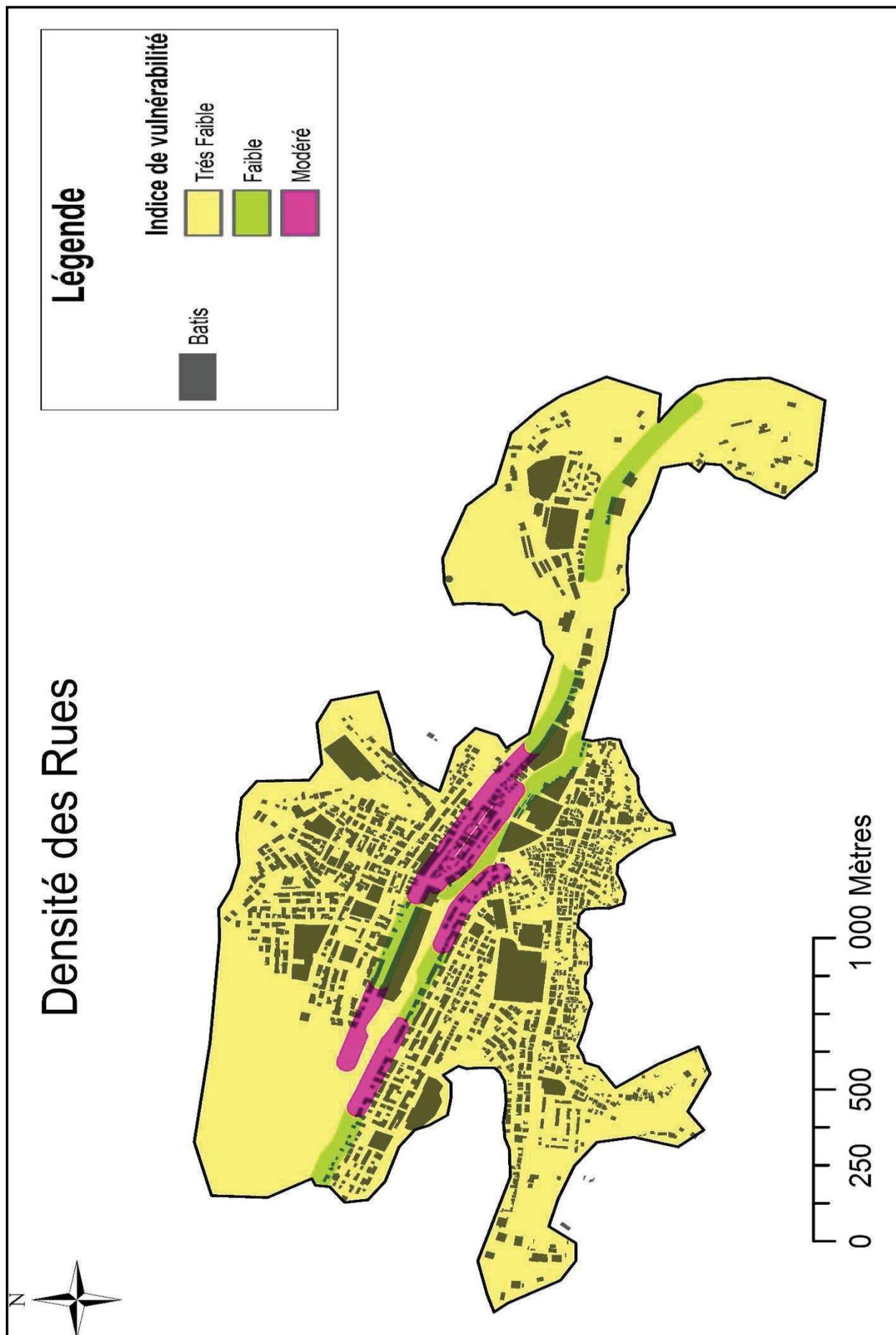


Figure A.4.6 : Carte de vulnérabilité selon le critère "Densité des routes"

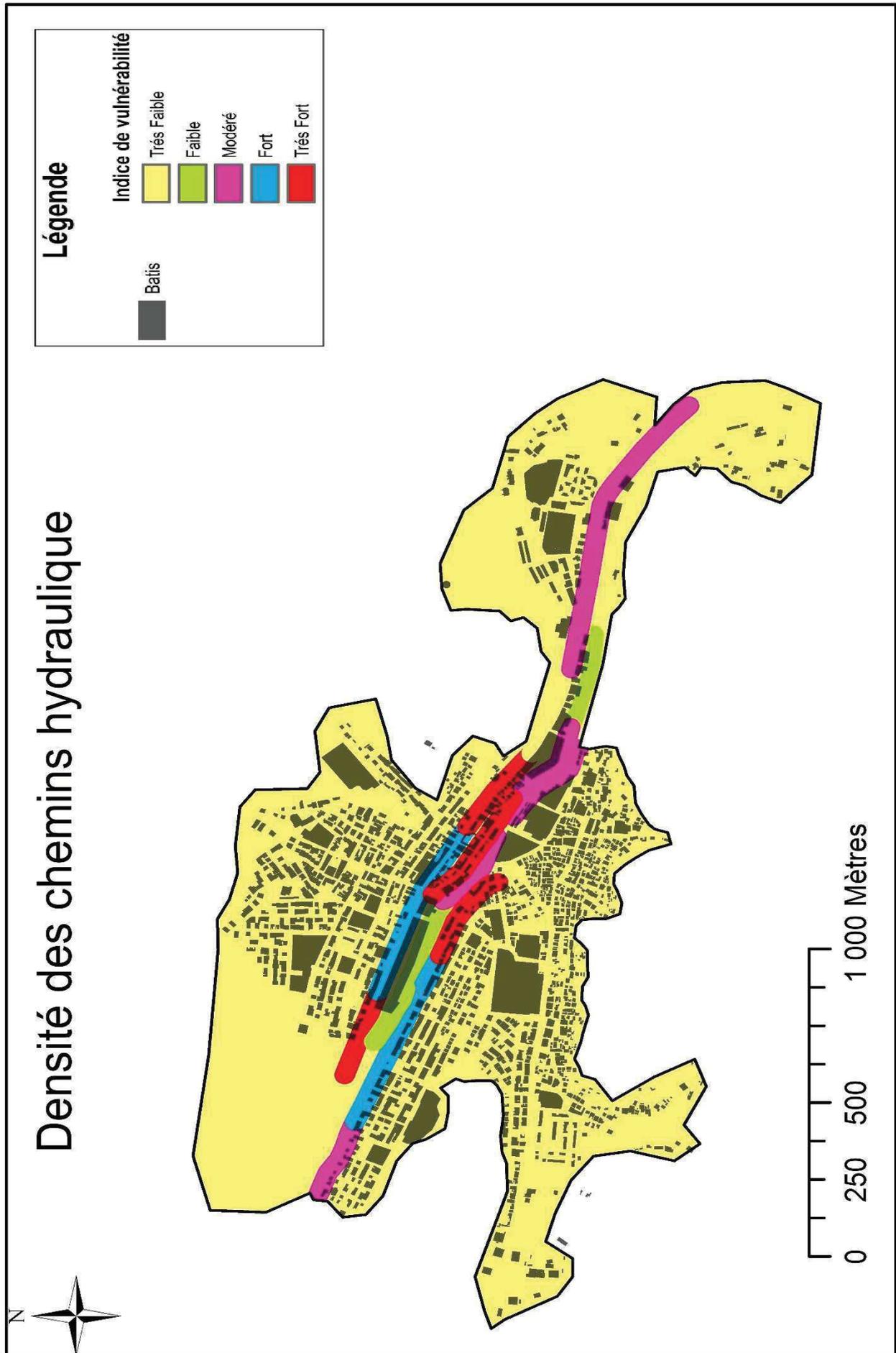


Figure A.4.7 : Carte de vulnérabilité selon le critère "Densité des chemins hydraulique"

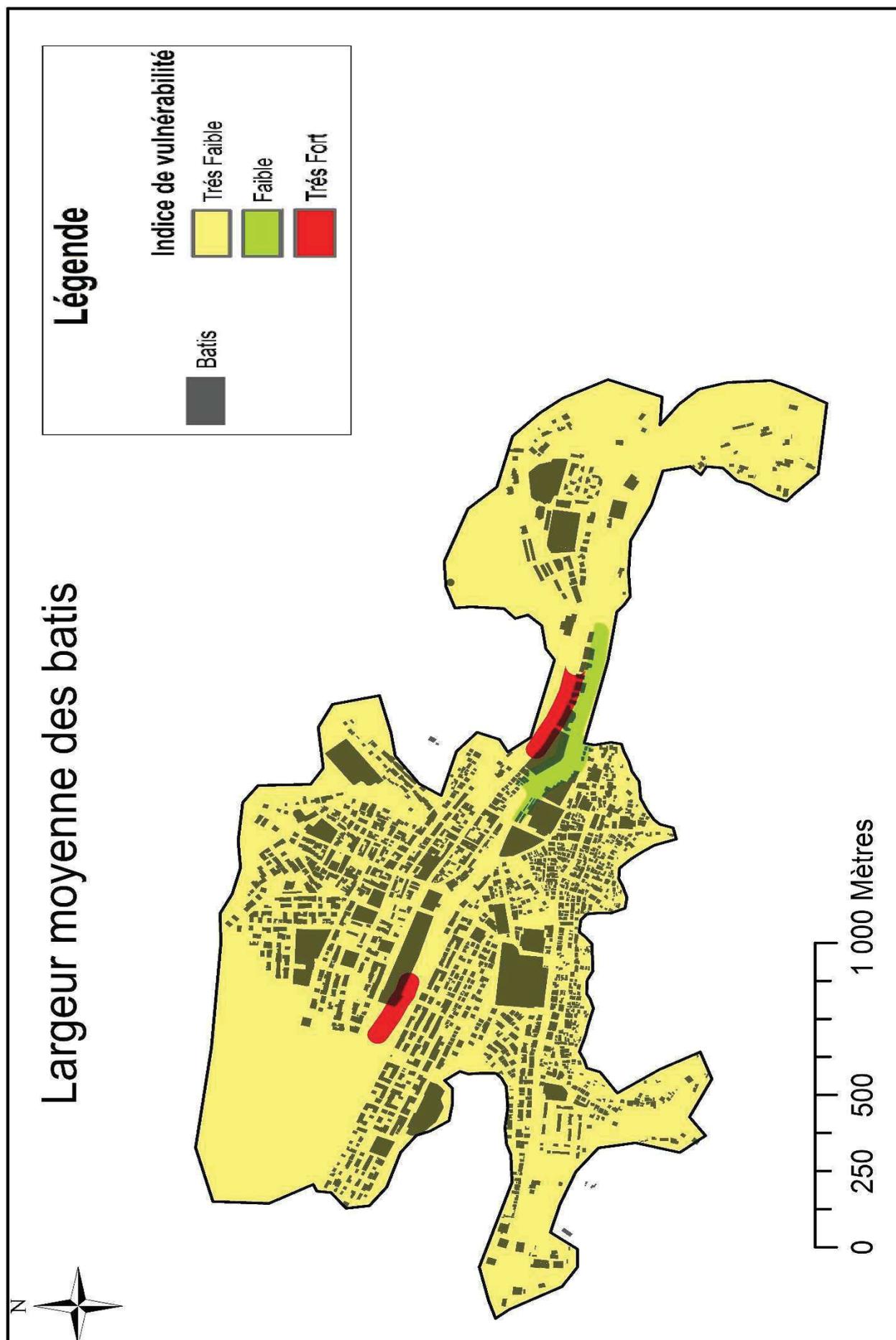


Figure A.4.8 : Carte de vulnérabilité selon le critère "Largeur des bâtis"

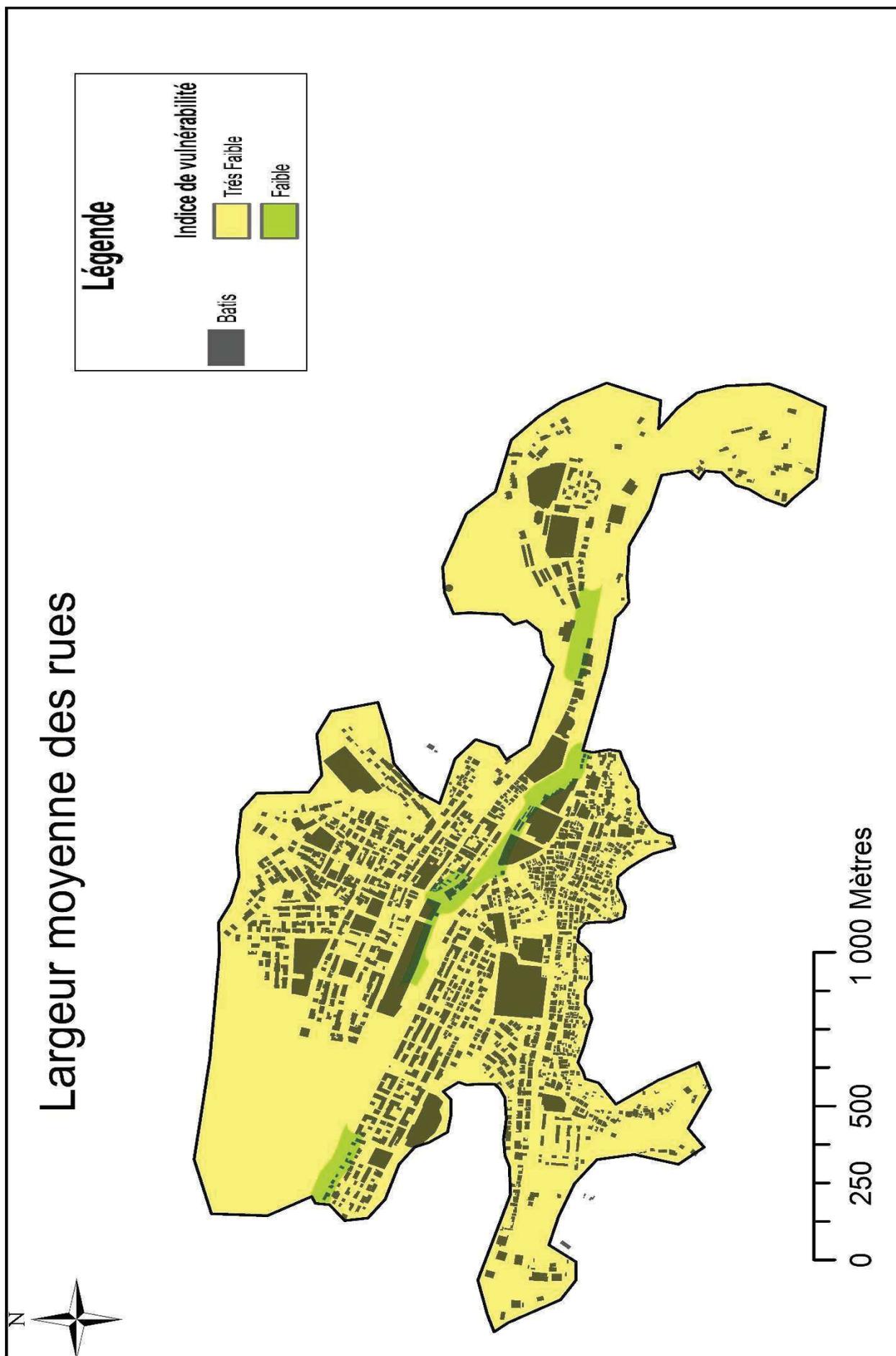


Figure A.4.9 : Carte de vulnérabilité selon le critère "Largeur des routes"

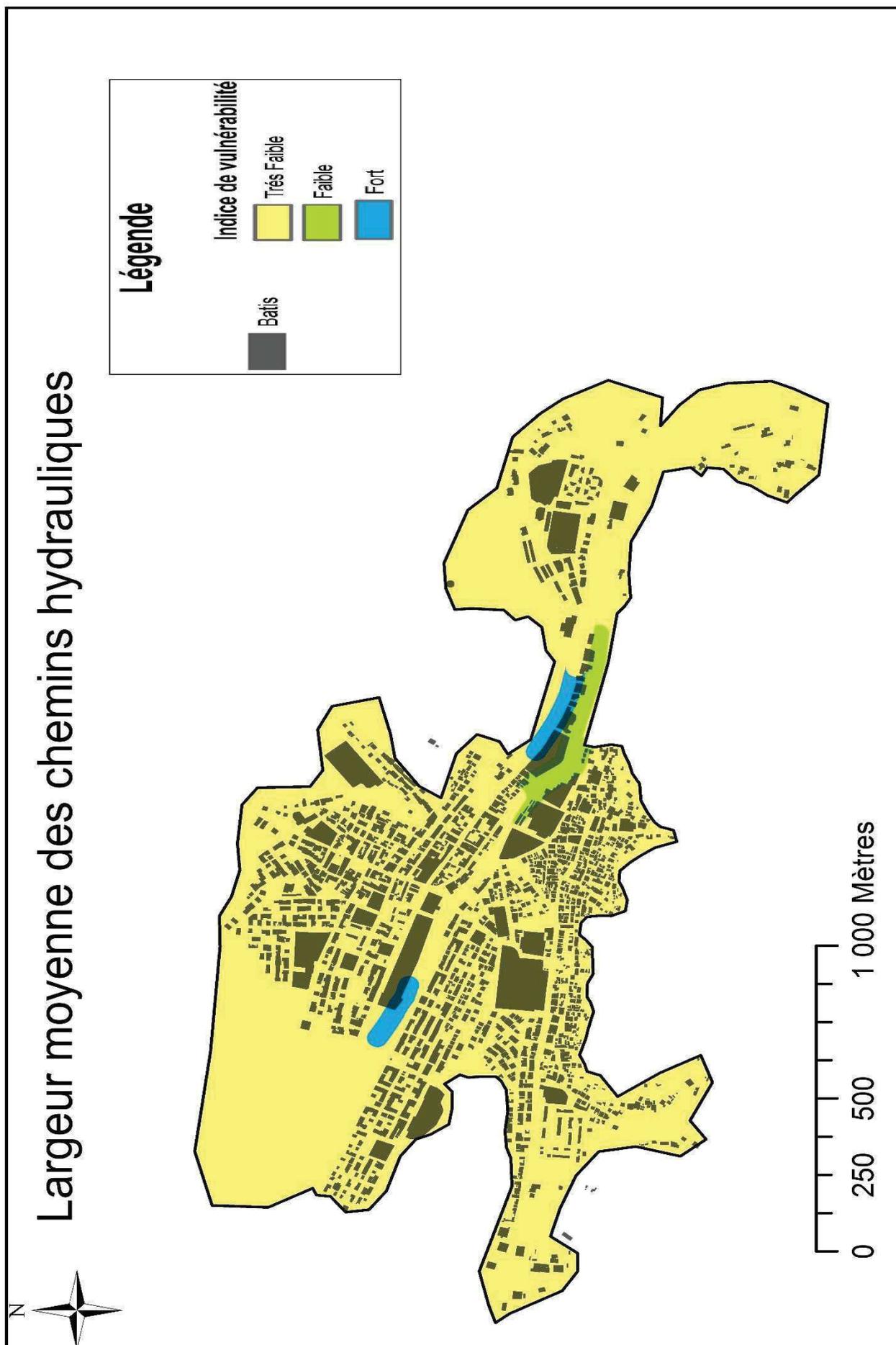


Figure A.4.10 : Carte de vulnérabilité selon le critère "Largeur moyenne des chemins hydrauliques"

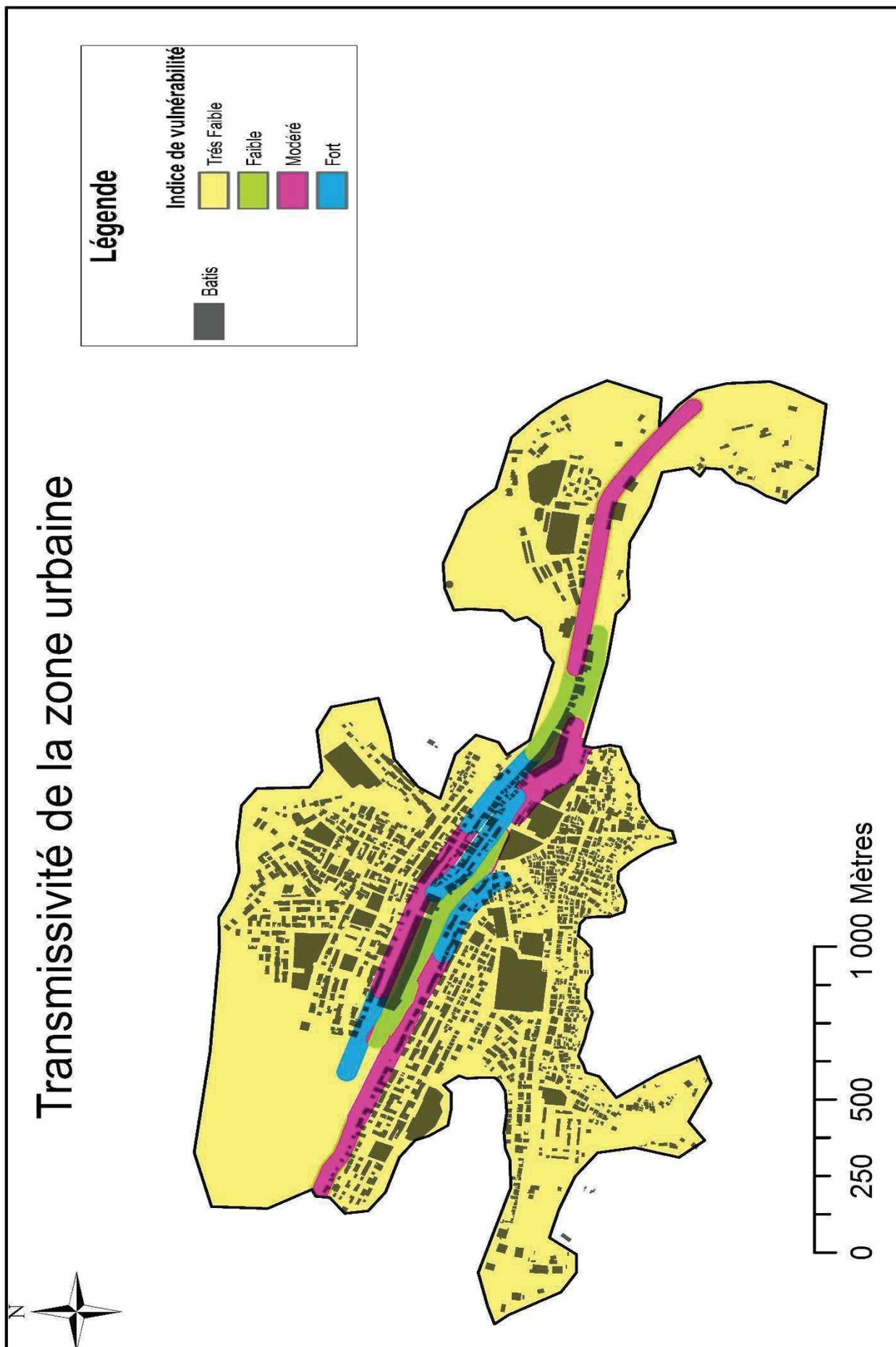


Figure A.4.11 : Carte de vulnérabilité selon le critère "transmissivité"

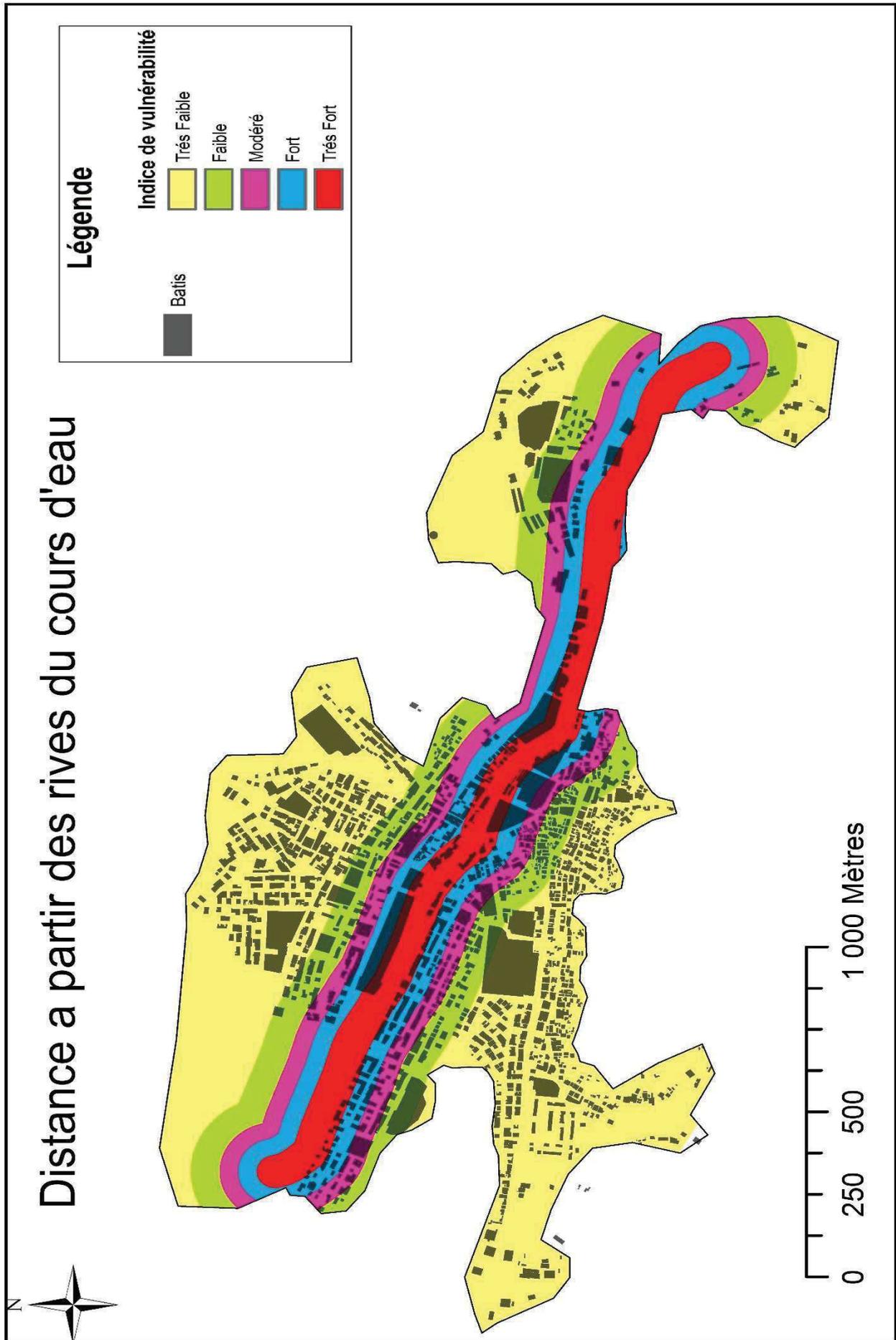


Figure A.4.12 : Carte de vulnérabilité selon le critère " Distance à partir du cours eau "

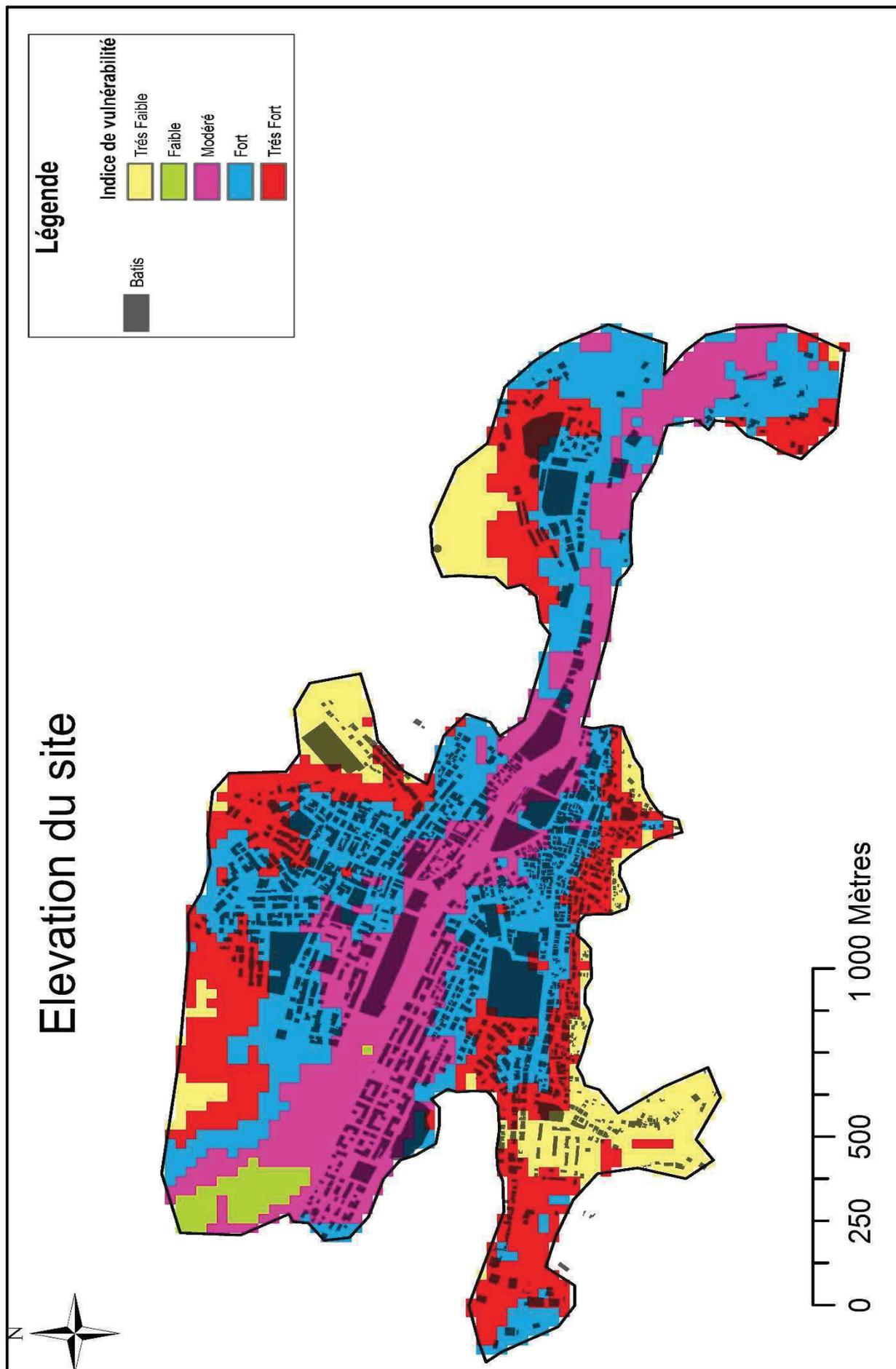


Figure A.4.13 : Carte de vulnérabilité selon le critère " Elevation du site"

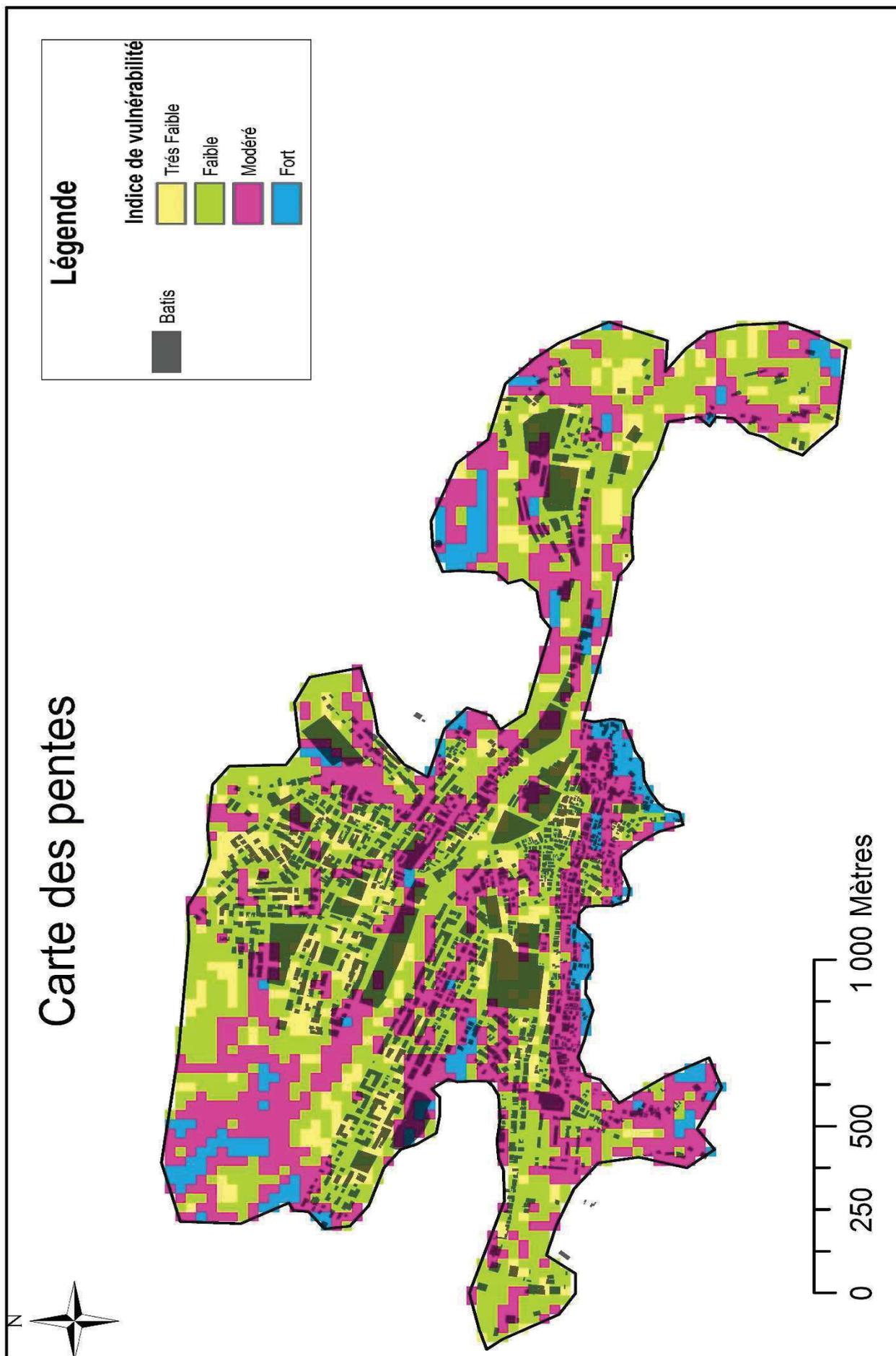


Figure A.4.14 : Carte de vulnérabilité selon le critère " La pente"

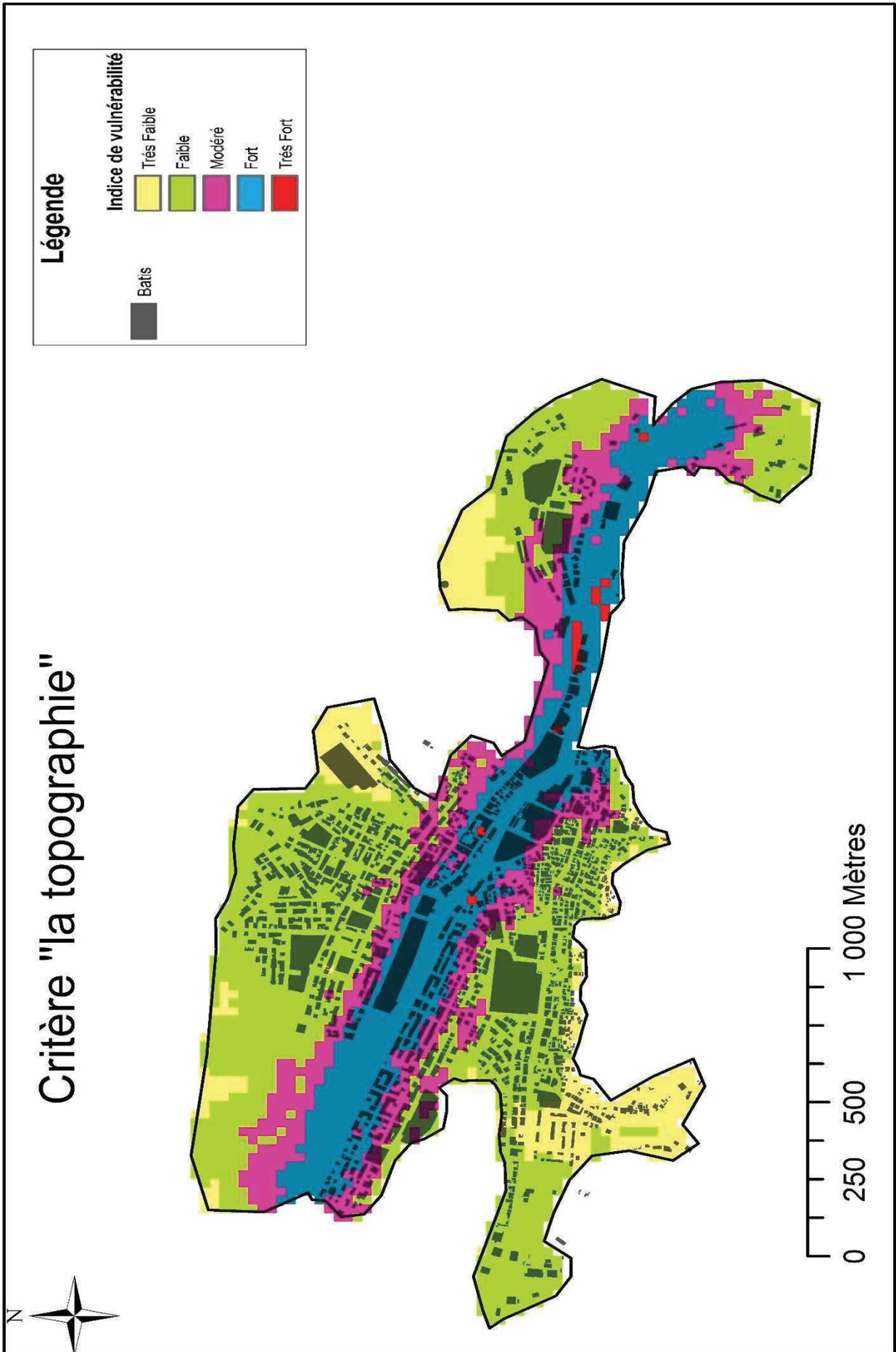


Figure A.4.15 : Carte de vulnérabilité selon le critère "La topographie"

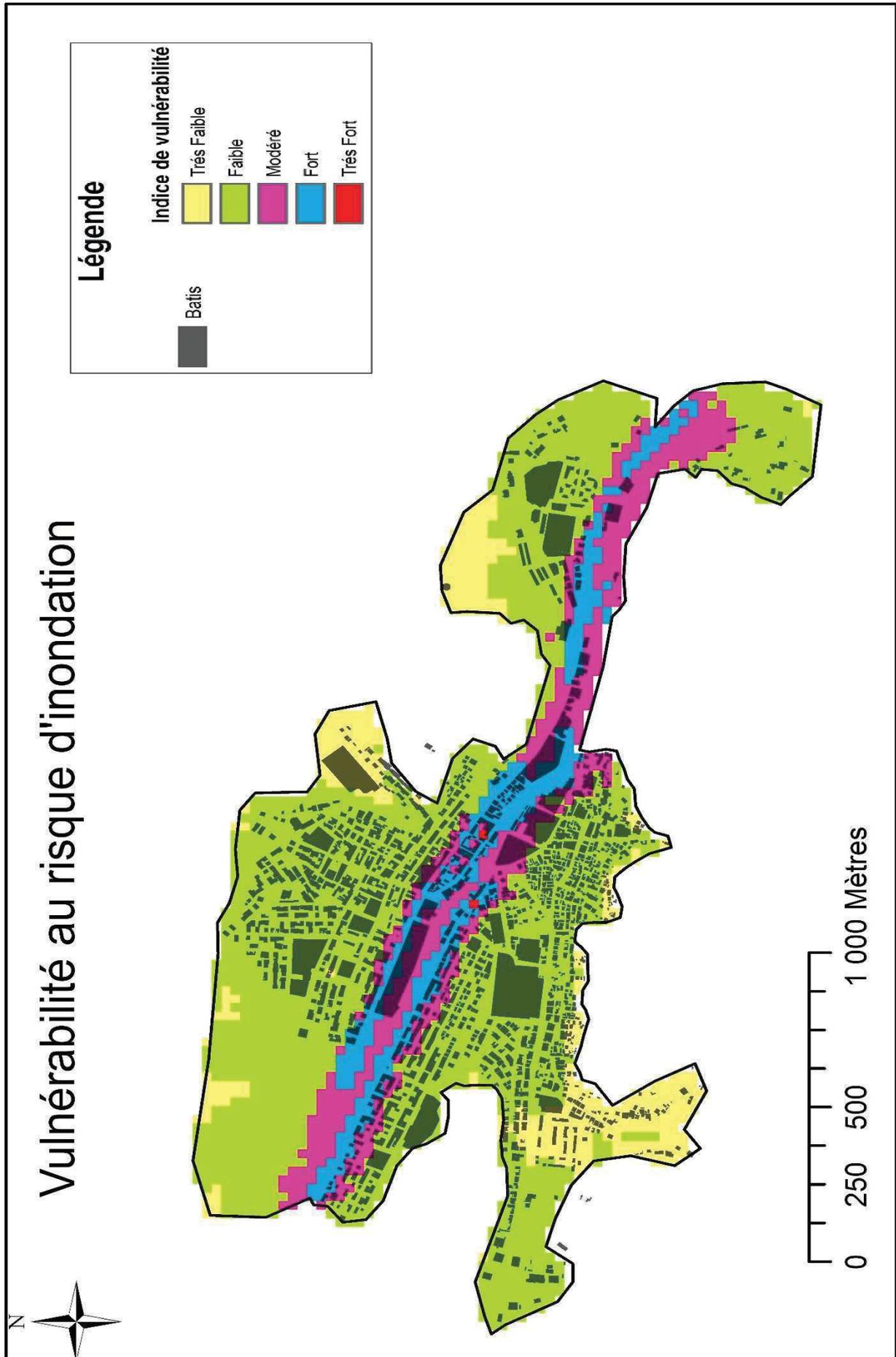


Figure A.4.16 : Carte de vulnérabilité selon le critère "Vulnérabilité au risque d'inondation"

Références bibliographiques

- ABDULRAHMAN.K.A, 2010.** Remote sensing, third class, first edition (2010), 75p.
- AGGARWAL.S, 2003.** Principles of remote sensing. Satellite Remote Sensing and GIS Applications in Agricultural Meteorology pp. 23-38, 16p.
- AKSOY.E.R, ÖZSOY.G, 2009.** Soil mapping approach in GIS using Landsat satellite imagery and DEM data. African Journal of Agricultural Research, volume 4, 11p.
- AMBROISE.B, 1998.** Genèse des débits dans les petits bassins versants ruraux en milieu tempéré : 1 – Processus et facteurs. Revue des sciences de l'eau, vol. 11, n° 4, 1998, p. 471-496, 26 p.
- ANDERSON.J.A, HARDY.E.E, 1976.** A Land Use and Land Cover Classification System for Use with Remote Sensor Data. GEOLOGICAL SURVEY PROFESSIONAL PAPER 964, 38p.
- ANDREWS.R.G, 1954.** The use of relative infiltration indices for computing runoff (unpublished), Soil Conservation Service, Fort Worth, Texas, 6p.
- ARAF.A, 2012.** Application de HEC-RESSIM, SWAT, et HEC-HMS dans la gestion de l'eau de la Wilaya de Tlemcen. Thèse de Magister en Hydraulique Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed BOUDIAF, 243p.
- BACHI.M, 2011.** Problématique du risque inondation en milieu urbain ; cas de l'agglomération de sidi bel Abbas. Thèse de Magister en Hydraulique Université Aboubakr BELKAÏD – Tlemcen, 128p.
- BANASIK.K, 2010.** Empirical determination of runoff curve number for a small agricultural watershed in Poland. Second Joint Federal Interagency Conference, Las Vegas, NV, June 27 - July 1, 11p.
- BANNARIA, MORIN.D, 1995.** A review of vegetation indices. Remote Sensing Reviews, 1995, Vol. 13, pp. 95-120, 28p.
- BARRETT.E.C, 2000.** Satellite remote sensing of precipitation: progress and problems. Remote Sensing and Hydrology 2000, 8p.
- BELOULOUL.L, 2008.** Vulnérabilité aux inondations en milieu urbain. Cas de la ville d'Annaba (Nord-Est Algérien). Thèse de Doctorat en hydrologie, Université Badji Mokhtar-Annaba, 342p.
- BENDJOUDI.H, HUBERT.P, 2009.** Le coefficient de compacité de Gravelius : analyse critique d'un indice de forme des bassins versants. Journal des Sciences Hydrologiques, 12p.
- BENDIX.J, 2010,** Adjustment of the Convective- Stratiform Technique (CST) to estimate 1991/93 El Nino rainfall distribution in Ecuador and Peru by means of Meteosat-3 IR data. int. j. remote sensing, 1997, vol. 18, no. 6, 1387-1394, 10p.
- BENMENA.S, 2000.** Introduction aux méthodes multicritères d'aide à la Décision. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* 2000 4 (2), 83–93, 11p.
- BEVEN.K, 1979.** A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. Bulletin-des Sciences Hydrologiques, 2, 28p.
- BEVEN.K, 1982.** On subsurface storm flow: an analysis of response times. Hydrological Sciences Journal, 18p.

BEVEN.K.J, 2000. Rainfall-Runoff Modelling: The Primer. England. John Wiley and sons LTD, 377p.

BOETTINGER.J, RAMSEY.R.D, BODILY.J.M, 2008. Landsat Spectral Data for Digital Soil Mapping. In HARTEMINK.A.E. Digital soil mapping with limited data; Springer, p. 193-202.

BOETTINGER.J, 2009. Remote sensing for soil survey application. Utah State University, 29p.

BONDELID.T.R, MCCUEN.R.H, JACKSON.T.J (1982). Sensitivity of SCS models to curve number variation,' Water Resources Bull., 18(1), pp. 111-116.

BOUAÏCHI ILHEM, TOUAÏBIA1 BENINA, 2014. Approche méthodologique de calcul du débit pluvial en cas d'insuffisance de données. Cas de la région de Tipaza. Algérie. Revue semestrielle scientifique et technique-Le Journal de l'Eau et de l'Environnement, 8p.

BOULGHOBRA.N. 2012. Les inondations exceptionnelles de décembre 1984 au bassin versant du Saf-Saf et ville de Skikda : genèse, propagation et impacts. 1ier Congrès international de génie civil et d'hydraulique Guelma, 10-11 décembre 2012, 7p.

BOUTOUTAOU.D. 2014. Méthode de calcul des crues des oueds de l'Algérie. Revue scientifique et technique, LJEE N°24 et 25, 14p.

BROWN.V.A, MCDONNELL.J.J. 1999. The role of event water, a rapid shallow flow component, and catchment size in summer stormflow. Journal of Hydrology 217 (1999) 171–190, 20p.

BROOKS.N.K, FFOLLIOTT.P.F, MAGNER.J.A, 2013. Hydrology and the management of watersheds, fourth edition. USA: John Wiley& Sons, Inc. 545p.

BRUNELLI. M, 2015. Introduction to the Analytic Hierarchy Process. SpringerBriefs in Operations Research, 88p.

BRUZZONE.L.2006. A Multilevel Context-Based System for Classification of Very High Spatial Resolution Images. IEEE transactions on geoscience and remote sensing, vol. 44, no. 9, 14p.

CAKMAK.S, DALES.R.E. 2011. The risk of dying on days of higher air pollution among the socially disadvantaged elderly. Environmental Research, 6p.

CAMPBELL.J.B, WYNNE.R.H. 2011. Introduction to remote sensing. Fifth edition. The Guilford press, 718p.

C.C.T (Centre Canadien De Télédétection), 2012. Notions fondamentales de télédétection, 266p.

C.E.A.E.Q (Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec), 2008. Guide d'échantillonnage à des fins d'analyses environnementales. Cahier 1, Généralités, 66p.

CHALIFOUX.S, NASTEV.M, 2006. Cartographie de l'occupation et de l'utilisation du sol par imagerie satellitaire LandSAT en hydrogéologie. Télédétection, 2006, Vol 6, n° 1, 9p.

CHARLTON.R.O, 2009. Fundamentals of fluvial geomorphology. Taylor & Francis Group, 275p

- CHE.X. 2005.** Extraction et reconstruction du réseau hydrographique à partir du modèle numérique de terrain. Thèse de doctorat, Université de la Méditerranée Aix-Marseille II, 129p.
- CHEN.J, 2007.** Rapid urbanization in China: A real challenge to soil protection and food security. Elsevier, CATENA, Volume 69, Issue 1, 15p.
- CHOCAT.B. 1997.** Aménagement urbain et hydrologie. La Houille Blanche/N° 7 1997, 8p.
- COHEN.J, 1960.** A coefficient of agreement for nominal scales. Educational and psychological measurement vol. XX, No. 1, 1960, 11p.
- COLLIER.C.G. 1985.** Accuracy of rainfall estimates by radar, part 1: calibration by telemetering raingauges. Journal of hydrology, 83 (1986) 207-233, 17p.
- CONGALTON.R.G, 1991.** A Review of Assessing the Accuracy of Classifications of Remotely Sensed Data. REMOTE SENS. ENVIRON. 37:35-46 (1991), 12p.
- COWAN.W.L. (1957)** (In: Rallison and Miller (1982)), Personal communications, Letter to H.O. Ogrosky dated Oct. 15, 1957, 7 pp.
- CRAWFORD.R.K, LINSLEY.N.H. (1966).** Digital simulation in hydrology, Stanford watershed model IV. Technical report N° 39, 225p.
- CUTTER.S.L, 1996.** Vulnerability to environmental hazards. Progress in human geography 20,4 (1996), pp 529-539.
- DARTMOUTH FLOOD OBSERVATORY. 2008.** <http://www.dartmouth.edu/~floods/>. Juin 2015.
- DELGADO.G. 2007.** Basis for a rainfall estimation technique using IR–VIS cloud classification and parameters over the life cycle of mesoscale convective systems. Journal of applied meteorology and climatology volume 47, 18p.
- DEL GIUDICE.G, PADULANO.R, RASULO.G, 2012.** Factors affecting the runoff coefficient. Hydrology and Earth System Sciences Discussions. 9, 4919–4941, 2012, 23p.
- DE SEDE.M.H, 1995.** Potentiels et limites de la carte écologique pour la discrétisation des bassins-versants. Thèse de doctorat, institut National de la Recherche Scientifique, Québec, Canada, 246p.
- DINGMAN.S.L, 2009.** Fluvial hydraulics, Oxford University Press, 570p.
- D.R.E, 2012.** Direction des ressources en eau, wilaya d'Oum El Bouaghi.
- DUBAYAH.R.O, WOOD.E.F. 2000.** Remote sensing in hydrology and water management. Chapter 5 remote sensing in hydrological modeling. Springer Verlag Berlin Heidelberg New York, 486p.
- D.U.C, 2013.** Direction d'urbanisme et de construction Oum El Bouaghi.
- DUNNE.T, BLACK.R.D. 1970.** Partial area contribution to storm runoff in a small new England watershed. Water resources research, Vol. 6, N° 5, 16p.
- DVORAK.J, NOVAK.L. 1994.** Soil conservation and silviculture. ELSEVIER, 401p.
- ECOLERUSICADE. 2006.** <http://ecolerusicade.free.fr/inond.html>. Aout 2016.

ELHAKEEM.M, PAPANICOLAOU.A.N, 2009. Estimation of the runoff curve number via direct rainfall simulator measurements. Via direct rainfall simulator measurements. Water Resource Management, 2009, 19p.

EM-DAT. 2007. <http://www.emdat.be>.

ESCLAFFER.T. 2003. Etude Théorique De La Formation Des Débits De Crues A L'échelle Du Versant. These DEA, Université paris XII, 55p.

EYLES.R.J, 1974. Bifurcation Ratio, a useless index? New Zealand Geographer, 30, 1974, 166-177, 6p.

FRANKLIN.S. E, WULDER.M.A. 2002. Remote sensing methods in medium spatial resolution satellite data land cover classification of large areas. Progress in Physical Geography 2002 26: 173, 34p.

FREEBAIM.D.M, GUPTA.S.C, ONSTAD.C.A, AND RAWLS.W.J. (1989). Antecedent rainfall and tillage effects upon infiltration,' Soil Sci. Soc. Am. Jour., Vol. 53, pp. 1183-1189.

FIorentino.M, SINGH.V.P, 1996. Geographical information systems in hydrology. Water science and technology library, Volume 26, 452p.

GEBREMICHAEL.M, VIVONI.E.R. 2007. Submesoscale spatiotemporal variability of North American monsoon rainfall over complex terrain. American meteorological society, 23p.

GENEVIEVE.A. 2010. Utilisation du concept de connectivité en hydrologie Définitions, approches expérimentales et éléments de modélisation. Thèse de doctorat en géographie, Université de Montréal, 386p.

GIDDENS.A. 1991. The Consequences of Modernity. Polity press, Great Britain, 100p.

GIGOVIC.L, PAMUCAR.D, 2017. Application of GIS-Interval Rough AHP Methodology for Flood Hazard Mapping in Urban Areas. Water 2017, 9, 360; doi: 10.3390, 26p.

GIRI.C. 2012. Remote sensing of land use and land cover. Principal and application. CRC Press, Taylor & Francis Group, 469p.

GIRIDHAR.M.V.S.S, VISWANADH.G.K, 2014. Runoff estimation in an ungauged watershed using RS and GIS. Journal of Indian association Water works 03/2009, 9p.

GRIMALDIS, PETROSELLI.A, 2012. Time of concentration: a paradox in modern hydrology. Hydrological Sciences Journal, 57(2) 2012, 3p.

GROVE.M, HARBOR.J, ENGEL.B (1998). Composite vs. distributed curve numbers: Effects on estimates of storm runoff depths,' J. Am. Water Resources Association, Vol. 34, No.5, pp. 1015-1033.

HABIBI.B, MEDDI.M, 2012. Analyse fréquentielle des pluies journalières maximales Cas du Bassin Chott-Chergui Nature & Technologie. n° 08/Janvier 2013. Pages 41 à 48, 8p.

HAWKINS.R.H. (1975). The importance of accurate curve numbers in the estimation of storm runoff,' Water Resources Bull., 11(5), pp. 887-891

HAWKINS.R.H. (1984). A comparison of predicted and observed runoff curve numbers,' Proc., Spec. Conf., Irrig. and Drain. Div., A.S.C.E., New York, N.Y., pp. 702-709.

HAWKINS.R.H. (1993). Asymptotic determination of runoff curve numbers from data, J. Irrig. and Drain. Engrg., A.S.C.E., Vol. 119, No.2, pp. 334-345.

- HAWKINS.R.H, 2009.** Curve number hydrology. The American Society of Civil Engineers, USA, 117p.
- HEWLETT.J.D, HIBBERT.A.R. 1967.** Factors affecting the response of small watersheds to precipitation in humid areas. 16p.
- HINGRAY.B. 1999.** Comportement et modélisation hydraulique des zones bâties en situation d'inondation : le cas des zones cloisonnées d'habitat individuel de Ouagadougou. Thèse de doctorat en Sciences de l'Eau dans l'Environnement Continental, UNIVERSITE DE MONTPELLIER II – ORSTOM, 390p.
- HJEMFELT.A.T, 1991.** Investigation of curve number procedure. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 117, No. 6, 13p.
- HORNER, W.W. 1940.** The analysis of hydrologic data for small watersheds,' Tech. Paper 30, Soil Conservation Service, U.S. Dept. of Agri., Washington D.C., p. 30.
- HORTON.R.E, 1932.** Drainage basin characteristics. Transactions, American geophysical union, 12p.
- HORTON.R.E, 1933.** The role of infiltration in the hydrologic cycle,' Trans., Am. Geophysical Union, 14,446-460.
- HORTON.R.E, 1945.** Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology. Bulletin of the geological society of America Vol. 56, pp. 275-370, 97p.
- HUBERT.H, SAVENIJE.G. 1995.** New definitions for moisture recycling and the relationship with land-use changes in the Sahel. *Journal of Hydrology* 167 (1995) 57-78.
- HUBERT.J, MORE1-SEYTOUX, VERDIN.J.P, 1981.** Extension of the Soil Conservation Service rainfall runoff methodology for ungauged watersheds." *Rep. No. FHWA/RD-81/060*, Federal Highway Administration, Washington, D.C., 14p.
- HUFFMAN.G.J. 1997.**The Global Precipitation Climatology Project (GPCP) Combined Precipitation Dataset. *Bulletin of the American Meteorological Society*. Voh78, No. 1, January 1997, 18p.
- INDIANA GEOLOGICAL SURVEY. 2015.** [www. Igs.indiana.edu](http://www.igs.indiana.edu). Juin 2015.
- JACKSON.T.J. 1984.** Passive microwave remote sensing of soil moisture from an aircraft platform. *Remote sensing of environment* 14:135-151, 17p.
- JI-HONG.J, KYOUNG.J AND BERNARD A. ENGEL, 2014.** Regional Calibration of SCS-CN L-THIA Model: Application for Ungauged Basins. *Water* 2014, 6, 1339-1359, p21.
- JOERIN.C, 2000.** Etude des processus hydrologiques par l'application du traçage environnemental. Association à des mesures effectuées à l'échelle locale et analyse d'incertitude. Thèse De Docteur En Sciences Techniques, Ecole Polytechnique Fédérale De Lausanne, 283p.
- KANG.I.S, PARK.J.I, SINGH.V.P, 1998.** Effect of urbanization on runoff characteristics of the On-Cheon Stream watershed in Pusan, Korea. *Hydrological processes*, vol. 12, 351-363 (1998), 13p.

- KHADDOR.I, ALAOUI.A.H, 2014.** Production of a Curve Number map for Hydrological simulation - Case study: Kalaya Watershed located in Northern Morocco. International Journal of Innovation and Applied Studies Vol. 9 No, 9p.
- KHORRAM.S, 2012.** Remote sensing. Chapter 2, Data Acquisition. Springer Briefs in Space Development, DOI: 10.1007/978-1-4614-3103-9_2, 22p.
- KLEMES.V, 1975.** Applications de l'hydrologie à la gestion des ressources en eau. Organisation météorologique mondiale, Hydrologie opérationnelle, Rapport N° 4, 121p.
- KUMAR.N.** Remote sensing-remote sensing systems spatial and spectral resolutions. Module – 2lecture notes – 2, spatial and spectral resolutions, 11p.
- KUMMEROW.C, GIGLIO.R. 1993.** A passive microwave technique for estimating and vertical structure information from space. Part I: Algorithm Description. Journal of applied meteorology, volume 33, 16p.
- LABORDE.J.P, 2009.** Eléments d'hydrologie de surface. Ecole polytechnique de l'université de Nice - Sophia Antipolis, département hydroinformatique et ingénierie de l'eau, 202p.
- LAHLAH. S. 2004. LES INONDATIONS EN ALGERIE.** Actes des Journées Techniques/ Risques Naturels : Inondation, Prévision, Protection /Batna 15/16/décembre 2004, 15p.
- LAMBIN.E.F, MEYFROIDT.P. 2011.** Global land use change, economic globalization, and the looming land scarcity. PNAS, March 1, 2011, vol. 108, no. 9, 3465–3472, 8p.
- LAWAL.D.U, MATORIA.N, 2012.** Detecting Flood Susceptible Areas Using GIS-based Analytic Hierarchy Process. 2012 International Conference on Future Environment and Energy IPCBEE vol.28(2012), 12p.
- LEBARBIER.E, MARY-HUARD.T, 2004.** Le critère BIC : fondement théorique et interprétation. Institut National De Recherche En Informatique Et En Automatique, rapport de recherche n°5315, 16p.
- LHOMME.J, 2006.** Modélisation des inondations en milieu urbain : Approche unidimensionnelle, bidimensionnelle et macroscopique. Thèse de doctorat, Université de Montpellier II, 298p.
- LOYD.C, 2013.** Putting Landsat 8's bands to work.NASA Landsat Science. [www.http://landsat.gsfc.nasa.gov/](http://landsat.gsfc.nasa.gov/).
- LILLESAND.T.M, KIEFER.R.W, 2004.** Remote sensing and image interpretation, fifth edition. John Wiley & sons, 812p.
- LINDGREN.D.T, 1985.** Land use planning and remote sensing. SPRINGER SCIENCE+BUSINESS MEDIA, B.V, 180p.
- LIU.Z, HUANG.H, 2012.** Land use and climate changes and their impacts on runoff in the yarlung zangbo river basin, china Land degradation & development 2012, p13.
- LUHMANN.N, 1993.** Risk: A Sociological Theory. Walter de Gruyter & Co., Berlin, Germany, 242p.
- LYZENG.A.D.R, 1978.** Passive remote sensing techniques for mapping water depth and bottom features. Optical Society of America. Vol. 17, No. 3 / applied optics, 5p.

- MANCHANDA.M.L, KUDRAT.M, TIWARI.K.A, 2002.** Soil survey and mapping using remote sensing. *Tropical Ecology* 43(1) : 61-74, 2002 ISSN 0564-3295, 14p.
- MAGNE.L, 2010.** Histoire sémantique du risque et de ses corrélats : suivre le fil d'Ariane étymologique et histoire d'un mot clé du management contemporain. Université Paris-Dauphine, 24p.
- MARECHAL.D. 2011.** Du drain potentiel au drain réel : Utilisation de données satellitaires à très haute résolution pour l'étude de l'origine géomorphologique des chemins de l'eau sur des bassins versants méditerranéens soumis aux crues éclair. Thèse de doctorat, l'École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne, 364p.
- MARY.J.M,** HER-hydrologic evaluation of runoff; the soil conservation service curve number technique as an interactive computer model. *Computers & Geosciences* Vol. 21, No. 8, 7p.
- MERZ.R, BLÖSCHL.G, PARAJKA.J, 2006.** Spatio-temporal variability of event runoff coefficients. *Journal of Hydrology*, Volume 331, 14p.
- MERWADE.V, 2012.** Creating SCS Curve Number Grid using HEC-GeoHMS. School of Civil Engineering, Purdue University, 10p.
- MERWIN.I.A, STILES.W.C. 1994.** Orchard Groundcover Management Impacts on Apple Tree Growth and Yield, and Nutrient Availability and Uptake. *J. AMER. SOC. HORT. SCI.* 119(2):209–215. 199THOUR4, 7p.
- MEYER.V, SCHEUER.S, 2009.** A multicriteria approach for flood risk mapping exemplified at the Mulde river, Germany. *Nat Hazards* (2009) 48:17–39, 23p.
- MICHAELIDES.S, LEVIZZANI.V. 2009.** Precipitation: Measurement, remote sensing, climatology and modeling. *Atmospheric Research* 94 (2009) 512–533, 22p.
- MILLER.V.C, 1953.** A quantitative geomorphic study of drainage-basin characteristics in the Clinch Mountain area, Virginia and Tennessee. *Off. Nav. Res. (U. S.), Geogr. Branch*, Project 389-042, Tech. Rep., 3.
- MISHRA.S.K, SINGH.V.P, 2003.** Soil conservation service curve number (SCS-CN) methodology. *Water Science and Technology Library*, volume 42, 534p.
- MIRSHA.S.K, KANSAL.A.K, AGGARWAL.N, 2012.** Assessment of design runoff curve number for a watershed. *Water Practice & Technology* Volume 7 No 4, 8p.
- MITCHELL.J.J, SHRESTHA.R, MOORE-ELLISON.C.A, 2014.** Single and Multi-Date LANDSAT Classifications of Basalt to Support Soil Survey Efforts, *Remote Sensing*. 2013, 5, 4857-4876, 21p.
- MOCKUS, V. 1949.** Estimation of total (peak rates of) surface runoff for individual storms, Exhibit A of Appendix B, Interim Survey Report Grand (Neosho) River Watershed, U.S.D.A., Dec. 1.
- MOCKUS, V. 1964.** Letter to Orrin Ferris, March 5, 6p, In: Rallison, R.E, Origin and evolution of the SCS runoff equation, Proc., A.S.C.E. Symp. Watershed Management, Boise, Idaho, July 1980.
- MOGLEN.G.E. 2000.** Effect of orientation of spatially distributed curve numbers in runoff calculations, *J. Am. Water Resources Association*, Vol. 36, No. 6.

- MOHYMONT.B, DEMARÉE.G.R, 2014.** Courbes intensité-durée-fréquence des précipitations à Yangambi, Congo, au moyen de différents modèles de type Montana. *Hydrological Sciences–Journal–des Sciences Hydrologiques*, 51(2) avril 2006, 16p.
- MOLENAT.J, 2008.** Hydrologie et transfert de substances dissoutes dans les aquifères superficiels. Thèse d'Habilitation à diriger des Recherches, Université de Rennes 1, 86p.
- MUSGRAVE, G.W., 1955.** How much of the rain enters the Soil? In *The Yearbook of Agriculture 1955 Water* USDA Washington DC.
- MUSY.A, HIGY.C, 1998.** Hydrologie appliquée. Edition H.G.A, Bucarest, 368
- N.A.S.A (National Aeronautics and Space Administration), 2016.** www.nasa.gov, Juin 2016.
- NEGRI.A.J, R.F.ADLER. 1983.** Rain estimation from satellites: an examination of the Griffith-Woodley technique. *NASA scientific and technical information facility*, 46p.
- OHMORI.H, 1993.** Changes in the hypsometric curve through mountain building resulting from concurrent tectonics and denudation. *Geomorphology*, 8 (1993) 263-277 263, 15p.
- O.N.S, 2013.** Office national des statistiques, l'Algérie en quelque chiffres, résultats : 2011 – 2013, 71p.
- PANDIT.A, GOPALAKRISHNAN.G, 1996.** Estimation of annual storm runoff coefficients by continuous simulation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, A.S.C.E., Vol. 122, No. 4, pp. 211-220.
- PARASURAMAN.S.B, MISHRA.S.K, SINGH.V.P, 2007.** SCS-CN method revisited. *Advances in Hydraulics and Hydrology*. Water Resources Publication Colorado, pp36.
- PATTON.P.C, BAKER.V.R, 1976.** Morphometry and Floods in Small Drainage Basins Subject to Diverse Hydrogeomorphic Controls. *Water resources research*, vol. 12, no. 5, 12p.
- PAWATTANA.C, TRIPATHI.N.K, 2013.** Analytical Hierarchical Process (AHP) - Based Flood Water Retention Planning in Thailand. *IScience & Remote Sensing*, 45:3, 343-355, 14p.
- PEEL.M.C. 2009.** Hydrology: catchment vegetation and Runoff. *Progress in Physical Geography* 33(6) (2009) pp. 837–844, 8p.
- PEREZ-PENA.J.V, AZANON.J.M, 2009.** CalHypso: An ArcGIS extension to calculate hypsometric curves and their statistical moments. Applications to drainage basin analysis in SE Spain. *Computers & Geosciences* 35 (2009) 1214–1223, 11p.
- PERRONE.J, MADRAMOOTOO.C.A, 1998.** Improved curve number selection for runoff prediction. *Canadian Journal of Civil Engineering*, volume 25, 7p.
- PIETRONIRO.A, PROWSE.D.T. 2002.** Applications of remote sensing in hydrology. *Hydrological Processes* 16, 1537–1541 (2002), 5p.
- PONCE.V.M, 1989.** *Engineering Hydrology: Principles and Practices*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- PONCE.V.M, 1994.** *Engineering hydrology, principles and practices*. Chapter 6: frequency analysis, 640p.
- PONCE.V.M, 1996.** Notes of my conversation with Victor Mockus.
<https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detailfull/?cid=stelprdb1044214>

- PONCE.V.M, HAWKINS.R.H, 1996.** Runoff curve number: has it reached maturity? Journal of hydrologic engineering, January 1996/11, 9p.
- PRADIER.P.C, 2004.** Histoire du risque. Matisse, Université Paris-I, 174p.
- PUGNET. 2015.** Vulnérabilité des interfaces habitat-forêt à l'aléa incendie de forêt. : Evaluation couplant dires d'experts et simulation physique d'exposition. Thèse de doctorat en géographie et aménagement, université de Nice-Sophia Antipolis, 374p.
- RALLISON.R.E, CRONSHEY.R.C, 1979.** Discussion to 'Runoff curve numbers with varying soil moisture,' J. Irrig. and Drain. Div., A.S.C.E., 105(4), 439-441.
- RALLISON.R.E, MILLER.N, 1982.** Past, present, and future,' Proc., Int. Symp. Rainfall-Runoff Relationship, (ed. V.P. Singh), Water Resources Pub., P.O. Box 2841, Littleton, Colorado 80161.
- RAMANKUTTY.N, FOLEY.J.A, 1998.** Characterizing patterns of global land use: An analysis of global croplands data. Global biogeochemical cycles, vol. 12, no. 4, pages 667-685, December 1998, 19p.
- REDDY.G.P, MAJLI.A.K, 2004.** Drainage morphometry and its influence on landform characteristics in a basaltic terrain, Central India – a remote sensing and GIS approach. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 6 (2004) 1–16, 16p.
- REFSGAARD.J.C, ABBOTT.M.B, 1995.** Distributed hydrological modelling. Water science and technology library, volume 22, 322p.
- REMBOLD.F, ATZBERGER.C. 2013.** Using low-resolution satellite imagery for yield prediction and yield anomaly detection. Remote Sensing. 2013, 5, 1704-1733, 30p.
- RENARD.F, RIQUIER.J, 2008.** Analyse territorialisée du risque de débordements de réseau d'assainissement liés aux eaux pluviales : application au Grand Lyon. *Norois*, n° 208, 2008/3, p. 45-60.
- RICHARDS.J.A, XIUPING.J. 2006.** Remote Sensing Digital Image Analysis. An introduction. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2006, Germany, 454p.
- RITTER.D.F, KOCHEL.R.C, 1995.** Process geomorphology, Chapter 05: initiation of channels and the drainage networks, 146-158p.
- SAATY.T.L, VARGAS.L.G, 2000.** Models, Methods, Concepts Sc Applications of the Analytic Hierarchy Process. Springer Science + Business Media, LLC, 334p.
- SAHANIM, 2011.** Le contexte urbain et climatique des risques hydrologiques de la ville de Butembo (Nord-Kivu /RDC). Thèse de doctorat, Université de Liège, 300p.
- SALAS.J.D, SMITH.R.A (1981).** "Physical basis of stochastic models of annual flows", Water Resour. Res., 17(2), 428-430.
- SAUER.V.B, THOMAS.W, 1984.** Flood Characteristics of Urban Watersheds in the United States. United States Geological Survey Water-Supply Paper 2207, 69p.
- SCHUELER, T.R. (1987).** Controlling urban runoff: a practical manual for planning and designing urban BMPs,' Department of Environmental Programs, Metropolitan Washington Council of Governments, Washington, D.C., Pub, No. 87703.

- SCHULTZ, G.A, E.C. BARRETT, 1989.** Advances in remote sensing for hydrology and water resources management. UNE SCO, International Hydrological Programme, Paris, 102pp.
- SCHULTZ.G.A, ENGMAN.E.T. 2000.** Remote Sensing in Hydrology and Water Management. Springer Verlag Berlin Heidelberg New York, 486p.
- SCHUMM.S.A, 1956.** Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Amboy, new jersey. Bulletin of the geological society of America vol. 67. Pp. 697-646, 57p.
- SHABAN.A, KHAWLIE.M, 2005.** Hydrological and watershed characteristics of the El-Kabir River, North Lebanon, Lakes & Reservoirs: Research and Management 2005 **10**: 93–101, 9p.
- SHADEED.S, ALMASRI.M, 2010.** Application of GIS-based SCS-CN method in West Bank catchments, Palestine. Water Science and Engineering, volume 3,13p.
- SHAMSL.U.M, 2005.**GIS Applications for Water, Wastewater, and Stormwater Systems .USA: Taylor&Francis, 453p.
- SHELP.M.L, ZHAN.G, UPTON.B. 2011.** The applications of satellite based remote sensing techniques in the hydrological assessment of mine water supply and management systems. Mine Water Environ (2011) 30:242–251, 10p.
- SIMANTON.J.R, RENARD.K.G, SUTTER.N.G (1973).** Procedures for identifying parameters affecting storm runoff volumes in a semiarid environment,' Rep. W-1, U.S.D.A., Agriculture Research Service, Washington D.C.
- SOUDANI.K. 2007.** Introduction générale a la télédétection Partie I : Bases physiques et exemples d'applications aux couverts végétaux (Version 1.0 – Mars 2005). Faculté des Sciences d'Orsay – Université Paris Sud XI (2006-2007), 26p.
- SOULIS.K.X, VALIANTZAS.J.D, 2012.** SCS-CN parameter determination using rainfall-runoff data in heterogeneous watersheds – the two-CN system approach. Hydrology and Earth System Sciences, 16, 1001–1015, 2012, 15p.
- STANKOWSKI, S.J. 1974.** Magnitude and frequency of floods in New Jersey with effects of urbanization,' Spec. Rep. 38, U.S. Geological Survey, Water Resources Division, Trenton, N.J.
- STEENHUIS.S.T, BON.J. 1995.** Environmental hydrology. Chapter 07, Transport of moisture and solutes in the unsaturated zone by preferential flow, 193-243p.
- STRAHLER.A.N, 1952.** Hypsometric (area-altitude) analysis op erosional topography. Bulletin of the geological society of America vol. 63. PP. 1117-1142, 27p.
- STRAHLER.A.N, 1957.** Quantitative Analysis of Watershed Geomorphology. Transactions, American Geophysical Union December 1957, 8p.
- SUN.Z, WANG, Q. 2009.** Development of a simple remote sensing evapotranspiration model (SIM-ReSET): algorithm and model test. Journal of Hydrology 376 (2009) 476–485, 10p.
- TAHA.B.M.J, GINGRAS.H, 2001.** Synthèse des méthodes simples de régionalisation. Institut national de la recherche scientifique, INRS-eau, rapport de recherche no r-600, 71p.
- TALAMPAS.W.D, CABAUG.R.R, 2015.** Catchment characterization to understand flooding in Cagayan de Oro river basin in northern Mindanao, Philippines. Mindanao Journal of Science and Technology Vol. 13 (2015) 213-227, 15p.

- TECSULT. 2006.** Étude de la protection du bassin versant du barrage Beni-Haroun. Phase III— identification et évaluation du degré d'érosion, 41p.
- THEAU.J.P. A. ZEROUROU.A, 2008.** Herb'âge, une méthode de calcul des sommes de températures pour la gestion des prairies. Les Cahiers d'Orphée, pages 93–102, 2008.
- THOURET.J.C, D'ERCOLE.R. 1996.** Vulnérabilité aux risques naturels en milieu urbain : effets, facteurs et réponses sociales. Cahier Sciences humaines 32 (2) 96: 407-422, 17p.
- TEMPFLI.K, KERLE.N. 2009.** Principal of remote sensing, an introductory textbook. The international institute for geo-information science and earth observation (ITC), 591p.
- TESSEMA.M.A. 2001.** Estimation of rainfall using METEOSAT TIR data for the Naivasha catchment. International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences, 89p.
- TECSULT. 2006.** Étude de la protection du bassin versant du barrage Beni-Haroun. Phase III— identification et évaluation du degré d'érosion, 41p.
- TWIDALE. C.R, 2004.** River patterns and their meaning. Earth Science Reviews 67 (2004) 159–218, 60p.
- UPADHYAYA.S, RAMSANKARAN.R, 2013.** Review of satellite remote sensing data based rainfall estimation methods. Proceedings of hydro 2013 international, 4-6 dec 2013, iit madras, india, 16p.
- U.S.D.A (United States Department of Agriculture), 1986.** Medium spatial resolution satellite characterization, JACIE Workshop, 14 mars 2006.
- VIEUX.B.E, 2005.** Distributed hydrologic modeling using GIS. Second Edition. Water Science and Technology Library, volume 48, 312p.
- VIÑA.A, GITELSON.A.A, 2011.** Comparison of different vegetation indices for the remote assessment of green leaf area index of crops. Remote Sensing of Environment 115 (2011) 3468–3478, 11p.
- VINET.F, 2010.** Le risque inondation. Diagnostic et gestion. Lavoisier, 315p.
- WAGNER.W, VERHOEST.N.E.C, 2009.** Remote sensing in hydrological sciences. Hydrol. Earth Syst. Sci., 13, 813–817, 2009, 5p.
- WEYMAN.D.R, 1975.** Theory and Practice in Geography, Runoff Processes and Streamflow Modelling. Oxford University Press, 55p.
- WEBER.E, 2008.** GIS as a Support to Soil Mapping in Southern Brazil. Digital Soil Mapping with Limited Data, Chapter 9, p. 103-112.
- WIGNERON.J.P, SCHMUGGE.T, 1998.** Use of passive microwave remote sensing to monitor soil moisture. Agronomie (1998) 18, 27-43, 18p.
- WIKIPEDIA, 2016.** https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_deadliest_floods. Aout 2016
- WILLETT.K, SHARDA.R, 1991.** Using the Analytic Hierarchy Process in Water Resources Planning brbe: Selection of Flood Control Projects. Socio-Eco. Plan.Sci Vol. 25. No. 2. pp. 103-112, 10p.
- WOODWARD.D.E, HAWKINS.R.H, HJELMFELT.A.T.JR, VAN MULLEM.J.A, 2002.** Curve number method: Origins, applications and limitations. Second Federal Interagency Hydrologic Modeling Conference, Las Vegas, NV, 10p.

WULDER.M.A, HALL.R.J, 2015. High Spatial Resolution Remotely Sensed Data for Ecosystem Characterization. Biosciences Vol. 54 No. 6, 11p.

WULF.H, 2014. Remote Sensing of Soils. Laboratories, department of Geography, university of Zurich, 72p.

XIAO BO, QING-HAI.W, 2011. Application of the SCS-CN Model to Runoff Estimation in a Small Watershed with High Spatial Heterogeneity. Beijing Research & Development Center for Grass and Environment, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Pedosphere **21(6):** 738–749, 2011, 21p.

YAHIAOUI.A, 2012. Inondations Torrentielles Cartographie des Zones Vulnérables en Algérie du Nord (Cas de l'oued Mekerra, Wilaya de Sidi Bel Abbès). Thèse de doctorat en hydraulique, Ecole Nationale Polytechnique, 210p.

ZAVOIANU.I, 1985. Morphometry of drainage basins. Developments in water science, vol 20, 251p.

ZERNITZ.E.R, 1932. Drainage patterns and their significance. The journal of geology, vol. 40, no. 6 (aug. - sep., 1932), pp. 498-521, 23p.

ZEVENBERGEN.C, CASHMAN.A, EVELPIDOU.N, 2010. Urban Flood Management. USA: Taylor&Francis, 338p.