

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة أبي بكر بلكايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd– Tlemcen –
Faculté de TECHNOLOGIE



THESE

Présentée pour l'obtention du grade de DOCTEUR EN SCIENCES

En : Hydraulique

Spécialité : Hydraulique

Par : LALLAM FAIZA

Sujet

Conception d'un modèle de prise en charge dans la gestion de conflits environnementaux appliqué à la protection des villes contre les inondations.

Soutenue publiquement, le 13 / 06 / 2019 , devant le jury composé de :

M ^{me} ABDELBAKI Cherifa	MCA, Université de Tlemcen	Président
M. MEGNOUNIF Abdesselam	Professeur, Université de Tlemcen	Directeur de thèse
M. GHENIM Abderrahmane Nekkache	Professeur, Université de Tlemcen	Co-directeur de thèse
M. ACHITE Mohammed	Professeur, Université de Chlef	Examineur
M. TROUZINE Habib	Professeur, Université de Sidi Belabbes	Examineur

Dédicaces

Ce mémoire est dédié à l'âme de mon cher père Boucif, source de mon inspiration dans la vie.

A ma chère mère Fatima pour son soutien et ses sacrifices

A mon cher mari Debbal Mohammed Zakaria qui m'a toujours encouragé et m'a préparé le climat favorable d'avancement.

A mes chères filles Amel Nihel, Fatima Zohra Ibtihel et à mon cher fils Mohammed Yahia.

A la doyenne de notre famille El Hadja Rabcaa, mes frères et sœurs, beaux-frères et belles-sœurs, neveux et nièces.

A toute la famille LALLAM et la famille DEBBAL.

REMERCIEMENTS

Louange à Allah de m'avoir donné la volonté, le courage et la patience pour accomplir ce travail.

Tout d'abord, je voudrais souligner que la réalisation de ce mémoire n'a été possible que grâce au concours de plusieurs personnes à qui je voudrais témoigner toute mes remerciements, mon respect et ma gratitude.

Je voudrais d'abord adresser toute ma reconnaissance à mon directeur de thèse monsieur MEGNOUNIF Abdesselam, pour la confiance qu'il m'a accordé, pour sa disponibilité et ses précieux conseils.

Je tiens à remercier également mon co-directeur de thèse monsieur GHENIME Abderrahmane Nekache pour sa disponibilité, ses orientations et ses encouragements continus.

Je remercie particulièrement madame ABDELBAKI Cherifa de m'avoir toujours encouragé à mener ce travail. Je la remercie également d'avoir accepté de présider le jury de soutenance.

Je voudrais également remercier monsieur ACHITE Mohammed et monsieur TROUZINE Habib pour l'honneur qu'ils m'ont fait d'avoir accepté d'examiner cette thèse.

J'adresse mes s'insères remerciements au professeur DEBBAL Sidi Mohammed El Amine pour sa disponibilité, son écoute et ses conseils.

Merci mon frère, LALLAM Mostepha, enseignant au département de Génie civil, sans toi je ne serais jamais arrivée au bout de ce travail. Tu as toujours fait tout ton possible pour m'aider.

Je remercie également monsieur BENAADA Lotfi pour son encouragement et son aide précieuse dans la collecte des données nécessaires pour cette étude.

Il m'est impossible d'oublier de remercier mon neveu Docteur DEBBAL Mohammed pour son aide précieuse dans ma recherche bibliographique et pour m'avoir fait bénéficier de son savoir-faire en informatique.

Je tiens aussi à témoigner toute ma reconnaissance à messieurs les chefs de département d'Hydraulique monsieur BESSEDIK Madani et monsieur BOUCHELKIA Hamid, pour leurs aide et leurs soutien moral dans la réalisation de ce mémoire.

Je tiens également à remercier l'ensemble des enseignants du département d'Hydraulique et je tiens à leur dire que c'est un grand plaisir de travailler avec eux.

Une grande pensée à madame MERZAGUI Naima et à toutes mes amies de l'école préparatoire des sciences de l'ingénieur de Tlemcen ainsi qu'à mes anciennes collègues du département de mathématiques, Faculté des sciences Université de Tlemcen, je vous remercie toutes pour vos encouragements, votre soutien et votre amitié qui ont été très enrichissants pour moi.

Mes derniers remerciements, les plus vifs, vont à mon cher mari, qui m'a énormément aidé à suivre ma recherche dans les meilleures conditions et qui m'a toujours conseillé, soutenu et encouragé sans limite.

Résumé :

Pour caractériser la capacité d'un bassin versant à ruisseler, un paramètre est très souvent utilisé en hydrologie de surface à savoir le coefficient de ruissellement (CR). L'estimation traditionnelle du CR est souvent faite à partir d'abaques basés sur 2 à 3 paramètres au maximum.

Dans ce travail, on présente trois modèles numériques.

Deux modèles sont établis sur la base de travaux expérimentaux. Le premier est fondé sur trois critères : le couvert végétal, le type de sol et la pente. Le deuxième considère la taille du bassin versant, la pluviométrie journalière maximale et la catégorie du sol.

Dans la pratique il n'est pas évident d'estimer le CR en considérant simultanément l'influence de plusieurs critères. Pour surmonter ce problème un troisième modèle est établi où nous présenterons une méthodologie permettant de capitaliser les informations à travers les deux premiers modèles cités.

Notre but est de pouvoir vérifier la comparabilité de ces critères et d'en apprécier l'importance relative de chacun d'eux.

Mots clés : Coefficient de ruissellement, Processus d'Analyse Hiérarchique, précipitations journalières maximales, type de sol, couvert végétal, pente, surface du bassin versant.

Abstract

The runoff coefficient (RC) is a parameter that is very often used in surface hydrology in order to characterize the drainage capacity of a watershed. The traditional estimate of this coefficient is often made from abacuses based on 2 or 3 parameters to the maximum.

In this work, three numerical models are presented.

Two models are based on experimental work. The first one is based on three criteria : vegetation cover, type of soil, and slope. The second one considers the size of the watershed, the maximum daily rainfall and the type of soil.

In practice, it is not easy to estimate the coefficient of runoff by simultaneously considering the influence of several criteria. In order to overcome this problem, a third model is developed and presented; it allows capitalizing the information from the first two models mentioned above.

The objective of the present work is to be able to verify the comparability of these criteria and to assess the relative importance of each of them.

Keywords : Runoff coefficient; Hierarchical Analysis Process; Maximum daily rainfall; Type of soil; Vegetation cover; Slope; Watershed surface.

ملخص

لوصف قدرة جريان المياه في حوض مائي طبيعي، غالبًا ما يستخدم في الهيدرولوجيا السطحية معامل الجريان السطحي (CR)، حيث يتم تقدير قيمته من الرسوم البيانية على أساس الأخذ بالاعتبار معاملين أو ثلاثة معاملات على الأكثر.

في هذا العمل، نقدم ثلاثة نماذج رقمية.

تم إنشاء نموذجين على أساس الاعمال التجريبية. يعتمد النموذج الأول على ثلاثة معايير هي: الغطاء النباتي ونوع التربة والمنحدر. بينما يعتمد النموذج الثاني على مساحة احواض المياه، والحد الأقصى من الأمطار اليومية ونوع التربة.

من الناحية العملية، ليس من السهل تقدير بصفة دقيقة تأثير عدة معايير على هذا المعامل. للتغلب على هذه المشكلة، تم إنشاء نموذج ثالث حيث سنقدم منهجية لدمج المعلومات من خلال النموذجين الأولين المذكورين. الغرض من ذلك هو التحقق من قابلية مقارنة هذه المعايير وتقدير الأهمية النسبية لكل واحد منها على الجريان السطحي للمياه.

الكلمات المفتاحية:

معامل الجريان السطحي، طريقة التحليل الهرمي، الحد الأقصى من الأمطار اليومية، نوع التربة، الغطاء النباتي، المنحدر، مستجمعات المياه.

TABLE DES MATIÈRES

Introduction générale.....	1
Chapitre I : Généralités sur les inondations.....	5
Introduction :.....	5
1.1. Ampleur des inondations.....	6
1.1.1. A l'échelle mondiale.....	6
1.1.2. A l'échelle nationale.....	8
1.2. Gestion du risque.....	14
1.2.1. Phases et outils de la gestion des risques.....	14
1.2.2. Gestion du risque de crue et de ruissellement de surface.....	15
1.2.2.1.Les mesures structurelles.....	15
1.2.2.2.Les mesures non structurelles.....	22
Conclusion.....	23
Chapitre II : Le ruissellement.	25
Introduction :.....	25
2.1. Formation des précipitations.....	25
2.1.1. Précipitations convectives.....	25
2.1.2 Précipitations orographiques	26
2.1.3. Précipitations frontales ou de type cyclonique.....	26
2.2. Le sol.....	27
2.3. Les écoulements et leurs modélisations.....	30
2.3.1. L'infiltration.....	30
2.3.2. Le ruissellement.....	32
2.4. Le coefficient de ruissellement	36
2.4.1. Les Facteurs exerçant une influence sensible sur le coefficient de ruissellement.....	37
2.4.2. Modélisation du coefficient de ruissellement (CR).....	44
Conclusion.....	51
Chapitre III : Les méthodes d'Analyse Multi Critères.....	52
Introduction :.....	52

3.1. Concepts et terminologies.....	52
3.1.1 Les acteurs.....	53
3.1.2 Les actions.....	53
3.1.3 Les objectifs.....	53
3.1.4 Les critères (ou les agrégations)	54
3.2. La problématique de décision.....	54
3.2.1. Problématique de choix P_{α}	55
3.2.2. Problématique de tri P_{β}	55
3.2.3. Problématique de rangement P_{γ}	56
3.2.4. Problématique de description P_{δ}	56
3.3. Méthodes d'analyse multicritère d'aide à la décision.....	57
3.3.1. Les méthodes de sur classement.....	59
3.3.1.1. Les méthodes ELECTRE.....	59
3.3.1.2. Les Méthodes PROMETHEE.....	70
3.3.2. Les méthodes de l'approche du critère unique de synthèse.....	72
3.3.2.1. La méthode TOPSIS (Technique for Order Preference by Similary to Ideal Solution).....	72
3.3.2.2. La méthode SMART (Simple Multi-Attribue Rating Technique).....	73
3.3.2.3. La méthode MAUT : (Multiple Attribute Utility Theory)	73
3.3.2.4. La méthode AHP : (Analytic Hierarchy Process)	74
Conclusion :.....	78
Chapitre IV : La démarche fonctionnelle.....	79
Introduction :.....	79
4.1. Estimation explicite du CR.....	81
4.1.1. Modélisation de l'abaque 1.....	81
4.1.1.1. Procédure d'estimation des poids P et des notations N.....	81
4.1.1.2. Calcul du CR.....	84

4.1.1.3.	Validation du modèle théorique.....	85
4.1.2.	Modélisation de l'abaque 2.....	85
4.1.2.1.	Procédure d'estimation des poids et des notations.....	86
4.1.2.2.	Calcul du CR.....	88
4.1.2.3.	Validation du modèle théorique.....	89
4.2.	Application du processus d'analyse hiérarchique (AHP).....	90
4.2.1.	Modèle 1.....	90
4.2.1.1	Hiérarchisation du problème.....	90
4.2.1.2.	Comparaison binaire des critères.....	91
4.2.1.3.	Comparaisons des poids.....	91
4.2.2.	Modèle 2.....	92
4.2.2.1.	Hiérarchisation du problème.....	92
4.2.2.2.	Comparaison binaire des critères.....	92
4.2.2.3.	Comparaisons des poids.....	93
4.2.3.	Modèle 3.....	93
4.3.	Exploitation des résultats.....	97
	Conclusion.....	99
	Chapitre V ; Etude du cas d'un bassin versant (OUED BOU-KIOU).....	100
	Introduction :.....	100
5.1.	Présentation du cadre général de la zone d'étude.....	100
5.1.1.	Situation géographique.....	100
5.1.2.	Paramètres géométriques.....	101
5.1.3.	Paramètres de relief.....	102
5.1.4.	La pente.....	103

5.1.5. Les précipitations journalières maximales et période de retour (T)	104
5.2. Estimation du coefficient de ruissellement.....	109
Conclusion et perspectives.....	111
Références.....	114
Web bibliographie.....	121

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 : Nombre de construction par ville sur les zones inondables.....	23
Tableau 2.1 : Principales fonctions utilisées pour modéliser l’infiltration en fonction du temps.....	32
Tableau 2.2. Coefficients de ruissellement.....	47
Tableau 2.3 Classification hydrologique du MTQ des sols selon la texture du sol en surface.....	48
Tableau 2.4 : Coefficients de ruissellement en zone rurale.....	49
Tableau 2.5: La valeur du CR en fonction de la taille du bassin, la pluviométrie journalière maximal et la catégorie du sol (ANRH).....	50
Tableau 2.6 : la valeur des paramètres a, b et c.....	51
Tableau 3.1 : Exemples d’application de l’analyse multicritère.....	58
Tableau 3.2 : Tableau de performance.....	60
Tableau 3.3 : Tableau de performance des projets.....	64
Tableau 3.4 : Les indices de concordances.....	64
Tableau 3.5 : Les indices de discordances.....	64
Tableau 3.6 : Evaluation des critères.....	67
Tableau 3.7 : Définition des seuils et poids des critères.....	67
Tableau 3.8 : L’affectation des tronçons, indice de coupe ; $\lambda=0.76$	67
Tableau 3.9 : Tableau de performance.....	69
Tableau 3.10 : Paramètre α/β pour les seuils d’indifférence, de préférence et de veto.....	69
Tableau 3.11 : Echelle de comparaison binaire de Saaty (Saaty T L., 2003).....	76
Tableau 3.12 : Matrice des comparaisons binaires.....	76
Tableau 3.13 : Calcul de λ_{max}	77
Tableau 3.14 : L’indice aléatoire RI.....	78
Tableau 4.1 : La valeur du CR en fonction du couvert végétal, type de sol et pente. .	79
Tableau 4.2 : La valeur du CR en fonction de la taille du bassin, la pluviométrie journalière maximal et la catégorie du sol (Agence Nationale des Ressources Hydrauliques ; ANRH).....	80
Tableau.4.3 : Poids et notation des critères (Abaque 1).....	84
Tableau 4.4 : la valeur théorique du CR (Modèle 1).....	85
Tableau 4.5 : Poids et notations des critères (abaque n°2).....	88
Tableau 4.6 : La valeur théorique du CR (modèle 2).....	89
Tableau 4.7 : Comparaison binaire des critères et leurs poids correspondants.....	91
Tableau 4.8 : Comparaison entre les poids acquis par les deux approches.....	91

Tableau 4.9 : Comparaison binaire des critères et leurs poids correspondants.	93
Tableau 4.10 : Comparaison entre les poids acquis par les deux approches.	93
Tableau 4.11 : Les facteurs considérés dans le modèle développé.....	95
Tableau 4.12 : Comparaison binaires entre infiltration et surface.	96
Tableau 4.13 : Poids des critères (modèle 3).	97
Tableau 5.1 : Calcul des surfaces cumulées.....	102
Tableau 5.2 : Précipitations maximales journalières P_{jmax} , durant 31ans d'observations.	104
Tableau 5.3 : les caractéristiques de la série pluviométrique (période : 1982- 2012).	105
Tableau 5.4 : Formules pour la détermination de la fréquence expérimentale pour la méthode graphique.....	106
Tableau 5.5 : Fréquence empirique et variable réduite de Gumbel.	107
Tableau 5.6 : Périodes de récurrence recommandée pour certains ouvrages.	109
Tableau 5.7 : Précipitations journalières maximales (P_{jmax}) correspondant à un temps de retour T	109
Tableau 5.8 : Notations des caractéristiques du bassin versant Oued Bou-Kiou	110
Tableau 5.9 : le coefficient de ruissellement pour plusieurs périodes de retour.....	110

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Recensement des catastrophes naturelles survenues dans le monde entre 1990 et 2007.....	6
Figure 1.2 : Nombre de personnes affectées par les catastrophes naturelles entre 2000 et 2007.....	7
Figure 1.3 : Inondation à la Mecque en 1941	8
Figure 1.4: Alger - Bab el Oued.....	9
Figure 1.5 : Skikda – inondations de Novembre 1957.....	10
Figure 1.6 : Skikda, inondations du 28 au 31/12/1984	11
Figure 1.7 : Hydro gramme de la crue de Décembre 1984.....	12
Figure 1.8 : Béchar : inondations du 10 Octobre 2008.....	13
Figure 1.9 : Ghardaia ; inondations du 01-10-2008	14
Figure 1.10 : Positions de la digue par rapport aux cours d'eau.....	16
Figure 1.11 : Digue enroché.....	17
Figure 1.12 : Schéma de fonctionnement d'un barrage excréteur de crue.....	18
Figure 1.13 : Schéma de fonctionnement d'un barrage excréteur de crue.....	19
Figure 1.14 : Correction torrentielle.	19
Figure 1.15 : Implantation des épis.....	20
Figure 1.16 : Fonctionnement d'ouvrage de stockage en dérivation	21
Figure 1.17 : Canal de dérivation au Sud de la ville de Sidi Bel Abbés	21
Figure 1.18 : Technique de banquettes (Benmia K., 2012).	22
Figure 2.1 : Les différentes phases du système convectif	26
Figure 2.2 : Front chaud et froid.	27
Figure 2.3 : Phases du sol	28
Figure 2.4 : Classes granulométriques selon l'United States Department of Agriculture.	28
Figure 2.5 : Cycle de l'eau à l'échelle d'un bassin versant.	30
Figure 2.6 : Etapes de formation des OPS sous l'effet de l'érosion mécanique des gouttes de pluies.....	33
Figure 2.7 : Schéma de fonctionnement du modèle de marcheurs utilisé pour le remplissage progressif des dépressions d'une surface rugueuse. D'après Darboux (1999).	36
Figure 2.8; l'influence des conditions antécédentes d'humidité sur le comportement hydrologique d'un bassin versant.	38
Figure 2.9 : Ruissellement par unité d'aire moyenné pour chaque événement pour deux types de parcelles.	41
Figure 2.10 : Schéma montrant l'évolution au cours du temps du débit à l'exutoire de deux parcelles de tailles différentes pour trois différentes durées de pluie.	42

Figure 2.11 : Variations du coefficient de ruissellement en fonction de la hauteur moyenne des précipitations sur les bassins versants.....	46
Figure 2.12 : Triangle de classification texturale des sols et classes de texture du MTQ.....	47
Figure 3.1 : Problématique de choix.....	55
Figure.3.2 ; Problématique de Tri.....	56
Figure 3.3 : Problématique de Rangement.....	56
Figure 3.4 : Le sur classement des actions.....	65
Figure 3.5 : Classement des scénarios.....	70
Figure3.6 : La structure hiérarchique.....	75
Figure 4.1 : Organigramme schématisant la démarche fonctionnelle du calcul du coefficient de ruissellement (CR).....	81
Figure 4.2 : Comparaison entre les valeurs du coefficient de ruissellement issu de l'abaque 1 et des valeurs théoriques par estimation explicite des critères.....	85
Figure 4.3 : Comparaison entre les valeurs théorique du coefficient de ruissellement et celles issues de l'abaque 2.....	90
Figure 4.4 : La structure hiérarchique du CR (Modèle 1).....	91
Figure4.5 : La structure hiérarchique du CR (Modèle2).....	92
Figure 4.6 ; l'algorithme du modèle 3.....	94
Figure 4.7 : La structure hiérarchique du CR (Modèle 3).....	95
Figure 4.8 : L'impact des critères sur le coefficient de ruissellement (Abaque 1).....	97
Figure 4.9 : L'impact des critères sur le coefficient de ruissellement (Abaque 2).....	98
Figure 4.10 : L'impact des critères sur le coefficient de ruissellement (Modèle 3).....	98
Figure 5.1 : Situation géographique de la zone d'étude (Echelle : 1/50000).....	100
Figure 5.2 : Rectangle équivalent du bassin versant à l'aide du logiciel AUTOCAD.....	101
Figure 5.3 : Courbe hypsométrique du bassin versant.....	103
Figure.5.4 : Ajustement de la loi réduite de Gumbel.....	107

Introduction générale

INTRODUCTION GENERALE

Problématique :

Il est fréquent que des évolutions climatiques engendrent des orages violents, des crues et des inondations. Ces inondations sont considérées comme les formes de risque naturel les plus répandues et les plus dévastatrices dans le monde. D'après les informations de l'International Disaster Database (IDD : la base de données en matière de catastrophes internationales) du Centre de Recherche sur l'Epidémiologie des Désastres (CRED), les inondations représentent 34% des catastrophes enregistrées à l'échelle mondiale entre 1990 et 2007 (Beloulou L, 2008). Le bassin méditerranéen n'échappe pas à cette règle. Selon Menad W (2012) on compte un total de 210 événements hydrométéorologiques intenses, qui ont provoqué plus de 4250 morts et d'immenses dégâts matériels s'élevant à 25 milliards d'euro.

Les évènements les plus catastrophiques observés dans le bassin Méditerranéen sont en grande partie causés par des épisodes météorologiques d'intensité remarquable. Le climat Méditerranéen est connu pour ses épisodes pluvieux de forte intensité et de courte durée. Ce sont des épisodes pluvieux qui résultent de configurations atmosphériques typiques et prévisibles (Chaboureau J-P., Claud C., Cammas J.P., Mascart P., 2001), leur comportement est conditionné par un complexe interactif de plusieurs processus qui, à ce jour, restent mal connus. Ce manque de connaissances peut expliquer les défaillances souvent relevées au niveau des services de prévision météorologique.

Les réponses hydrologiques résultant de ces événements météorologiques intenses sont souvent jugées efficaces (rapidité, forts débits de pointe) et aux conséquences graves voire destructives.

Étant donné l'ampleur croissante du risque hydrométéorologique, les scientifiques en ont fait une priorité. Plusieurs études ont été menées pour analyser les processus atmosphériques générateurs de pluies intenses ainsi que leurs relations avec les facteurs environnementaux (Menad W. 2012).

La grande majorité de ces projets de recherche a adopté une politique favorable à la communication de l'information, et a rendu public les résultats de ces travaux. On

mentionnera à ce titre les cartes de vigilance météorologique publiées sur le net ; elles couvrent des échelles spatio-temporelles différentes et fournissent toutes sortes de données : les températures, la pluviométrie, les cartes de pression, les images satellitaires ainsi que de nombreuses autres données à caractère climatique.

A ce niveau, le comportement d'une averse sur un bassin versant est conditionné par un complexe interactif de plusieurs paramètres dont les plus déterminants sont : la topographie, l'occupation du sol, le type de sol, l'action de l'être humain, etc.

Le milieu physique est donc responsable du mode de conduite de ces pluies. Ainsi, pour une même quantité de pluie une crue pourra apparaître ou pas.

Il est évident que la meilleure manière de réduire le risque des inondations est de repérer tous les paramètres relatifs à ce phénomène, d'estimer leurs impacts sur le ruissellement et par conséquent pouvoir agir contre ce danger.

L'un des paramètres déterminants dans les études d'inondation est le coefficient de ruissellement (CR) qui est défini par le rapport entre la hauteur d'eau ruisselée à la sortie d'une surface considérée et la hauteur d'eau précipitée. Il est fortement influencé par l'imperméabilisation des surfaces mais aussi par l'occupation du sol où la végétation joue un rôle important dans la réduction de sa valeur, la pente, la fréquence de la pluie, etc.

L'estimation traditionnelle du CR est souvent faite à partir d'abaques basés sur deux à trois paramètres au maximum qui sont établis sur un grand nombre d'expériences conduites dans des bassins versants ou parcelles de terre expérimentales ayant différentes caractéristiques morpho-métriques et sous différentes conditions climatiques.

L'étude effective du coefficient CR est un problème très complexe à cause de la panoplie des paramètres qui gèrent ce coefficient et la détermination de l'impact individuelle de chacun des paramètres paraît une tâche très difficile à surmonter et à cerner.

Une nouvelle approche de la gestion environnementale doit être développée prenant en considération les relations fonctionnelles étroites existant entre les différentes disciplines d'influence : Topographie, Hydrologie, Géotechnique, Génie rurale, Hydraulique fluviale etc.

Vu la spécificité des problèmes liés au ruissellement superficiel et la complexité de ce phénomène, il nous paraît approprié d'utiliser la méthode d'analyse multicritère hiérarchique AHP (Analytical Hierarchy Process). Cette dernière offre le double avantage de pouvoir intégrer simultanément tous ces critères et permet aussi de tenir compte de l'importance relative de chaque facteur.

Objectifs :

Notre travail porte sur le développement d'un modèle numérique qui permet d'estimer le coefficient de ruissellement en intégrant l'impact de cinq critères : le couvert végétal, le type de sol, la pente, les précipitations journalières maximales et la surface du bassin versant.

Dans un premier temps nous avons adapté l'AHP pour donner une valeur théorique du CR. Deux modèles sont proposés. Le premier tient compte des trois critères : couvert végétal, type de sol et pente, le deuxième considère les critères : précipitations journalières maximales, surface du bassin versant et catégorie du sol. L'étude est validée par des abaques expérimentaux.

En deuxième lieu, nous proposons un troisième modèle qui nous a permis d'évaluer le CR en combinant tous les critères des deux premiers modèles.

Le but de cette étude est d'estimer l'importance relative de chacun de ces cinq critères et d'expliquer l'impact de leurs variations sur la valeur du CR.

Organisation de la thèse :

La thèse est structurée en cinq chapitres dont l'agencement reflète la démarche utilisée et les étapes d'analyse. Le premier chapitre traite des généralités sur les inondations. Nous commençons par présenter des notions et concepts fondamentaux impliqués dans le risque d'inondation (aléa et vulnérabilité), puis nous décrivons les origines et les caractéristiques des inondations afin de mettre en évidence leur caractère variable et destructeur à travers quelques événements historiques survenus dans le monde. Enfin, quelques moyens de protection et de lutte contre les inondations sont illustrés.

Le chapitre 2 est consacré à une revue de littérature consacrée principalement aux facteurs intervenants dans le ruissellement. Nous donnons un ensemble de notions

et de définitions clarifiant le contexte de cette étude et la problématique du calcul du coefficient de ruissellement.

Au chapitre 3, nous soulignons certaines méthodes d'analyse multicritère, en particulier le processus d'analyse hiérarchique (AHP).

Le chapitre 4 décrit le modèle développé. Il présente le schéma fonctionnel de l'étude ainsi que la justification de l'impact des critères considérés et le système de notation attribué.

Le chapitre 5, présente une étude de cas du bassin versant Oued Bou-Kiou. Le modèle développé est appliqué pour estimer le coefficient de ruissellement de ce bassin.

Nous clôturons cette thèse par une conclusion générale suivie d'une réflexion sur les perspectives et recommandations.

Chapitre I

Généralités sur les inondations

GENERALITES SUR LES INONDATIONS

Suite à un événement pluvieux ou fonte de neige, la réponse hydrologique d'un bassin versant se fait par une augmentation du volume des eaux drainées par le cours d'eau. Une crue est dite aussi, un gonflement du cours d'eau. La montée des eaux est généralement brève, alors que la descente est souvent plus lente. L'alternance entre périodes de la montée des eaux et périodes de la descente des eaux est un phénomène biophysique naturel favorable à la présence d'une faune et d'une flore riches et variées. En plus de l'apport en eau douce, les crues ont plusieurs fonctions. Elles permettent l'auto-curage du lit du cours d'eau, la régénération de la vie aquatique végétales et animales. Aussi, elles acheminent les matières riches en nutriments et matières organiques qui fertilisent les plaines adjacentes au cours d'eau. Par la dynamique qu'elles installent, les crues ont un rôle sur la géomorphologie des bassins versants, puisqu'elles façonnent d'une manière visible le relief et les paysages.

Lorsqu'une crue déborde de son lieu d'écoulement habituel, il y a inondation prépondérante qui est susceptible de présenter un risque sur les biens et populations riveraines. La partie du territoire submergée par les eaux de la crue représente la plaine inondable, dite aussi vallée alluviale fonctionnelle (Lambert R., Prunet C., 2000).

L'inondation est conditionnée par l'aléa hydrométéorologique. Elle devient un événement préjudiciable lorsqu'elle porte atteinte à la vulnérabilité sociétale. Ainsi, le risque d'inondation dépend de deux paramètres l'aléa hydrométéorologique et la vulnérabilité sociétale qui évoluent dans le temps et dans l'espace. Le risque d'inondation peut être appréhendé comme un phénomène dynamique, limité dans le temps et dans l'espace. Salamon (1997) rapporte que « L'inondation est un *phénomène occasionnel qui peut noyer de vastes parties du lit majeur ou de la plaine, à la suite d'une crue particulièrement importante et du débordement des eaux* ». Selon Roche (1986) : « *il y a inondation lorsque le cours d'eau quitte son chenal bien marqué, généralement appelé lit mineur, pour se répandre dans son lit majeur* ». Pour Cosandey (2003), l'inondation inclut tous les phénomènes qui conduisent à une occupation de l'espace terrestre par l'eau.

L'aléa est déterminé selon trois critères classiques : *une magnitude (composante énergétique), une probabilité d'occurrence (composante temporelle) et une aire d'impact (composante spatiale)* (Beck 2006). Fortement liée à l'aléa météorologique, la réaction hydrologique au sein du bassin-versant est influencée par les facteurs géographiques qui conditionnent la répartition spatio-temporelle des précipitations et modifient les contrastes de température. La vulnérabilité mesure le degré de perte et de dommage causé par un aléa. Elle est étudiée pour une meilleure compréhension de la manifestation

de l'aléa sur le territoire (Thouret J.-C., D'Ercole R., 1996). Selon Menad (2012), la vulnérabilité est également assimilée au niveau de conséquences prévisibles d'un phénomène naturel sur les enjeux.

1.1. Ampleur des inondations :

1.1.1. A l'échelle mondiale :

Les inondations peuvent être une menace majeure avec des conséquences humaines et matérielles extrêmement néfastes. A l'échelle mondiale, les inondations constituent les catastrophes les plus récurrentes. Entre 1990 et 2007, elles représentent 34% des catastrophes naturelles enregistrées (Figure 1.1).

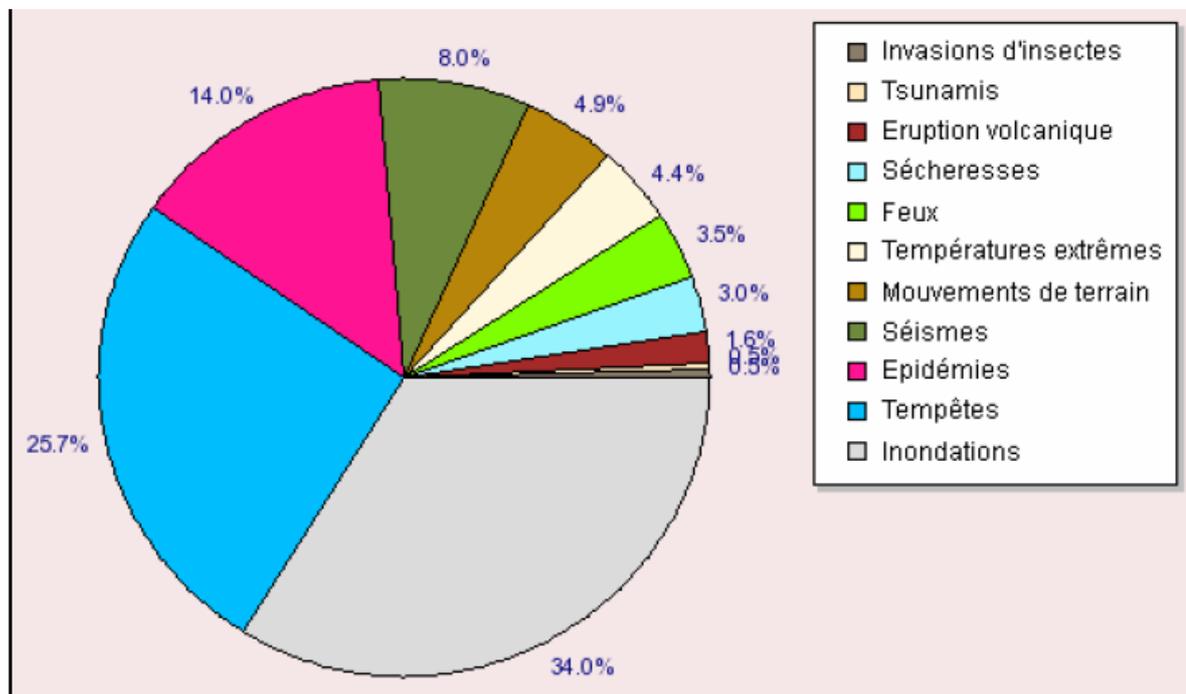


Figure 1.1 : Recensement des catastrophes naturelles survenues dans le monde entre 1990 et 2007 (CRED, 2007).

Selon le CRED (2007), le nombre de victimes des catastrophes a augmenté de manière significative. Entre 2000 et 2006, le nombre cumulé des victimes enregistrés était de 235 millions, dont la grande majorité (96 millions) est victime des inondations (Figure 1.2).

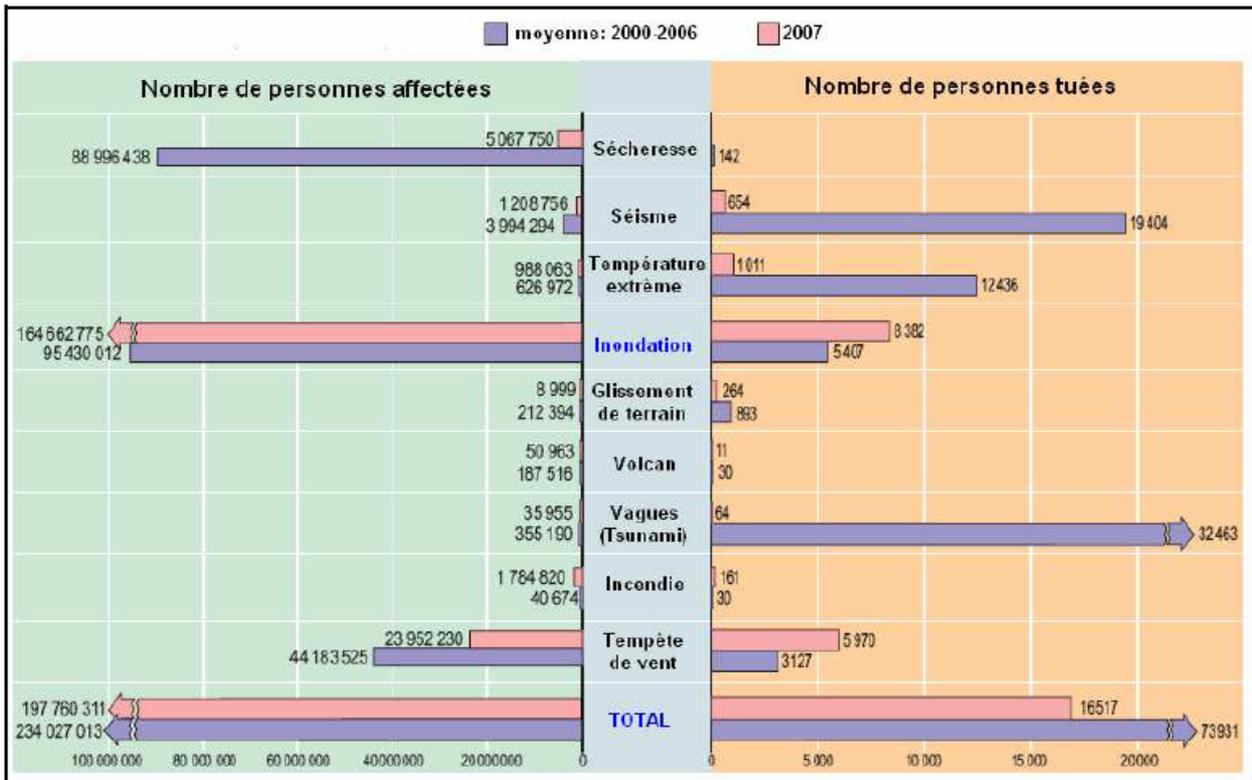


Figure 1.2 : Nombre de personnes affectées par les catastrophes naturelles entre 2000 et 2007 (CRED 2007).

L'inventaire mondial des événements des crues extrêmes survenues entre 1985 et 2007, indique que les inondations provoquées par les cyclones tropicaux sont les plus destructrices (Beloulou.L, 2008). En 2005, l'ouragan Katrina a causé la mort de 1 053 personnes et causé des dégâts estimés à 60 milliards de dollars à la Nouvelle-Orléans (États-Unis). En 2006, aux Philippines, les inondations ont fait 629 morts, 2.45 millions de déplacés et une perte de 3.328 milliards de dollars.

Les fortes pluies associées aux mouvements de masse (coulées de boue), peuvent provoquer de grandes catastrophes. Le bilan des inondations du 24 juillet au 5 août 2005 produite en Inde (Maharashtra) a été estimé à 987 morts, 160 000 personnes déplacées et 3,5 milliards de dollars de dégâts représentant 283 000 maisons et 22 500 hectares de cultures (Annexe 1).

En 1941, les inondations ont touché le lieu saint de la Mecque en Arabie Saoudite (Figure 1.3).

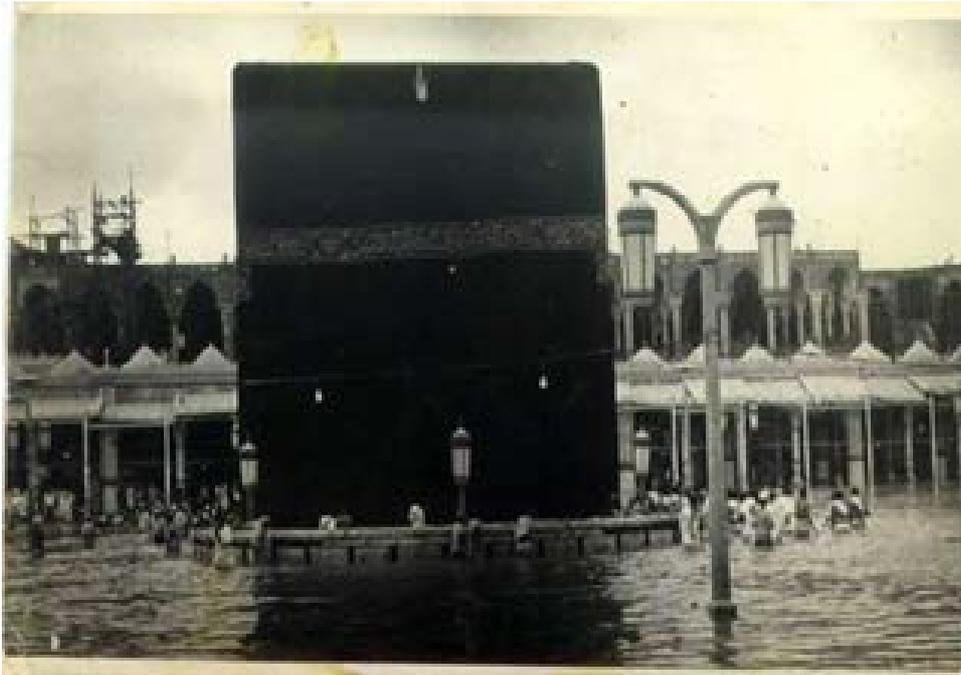


Figure 1.3 : Inondation à la Mecque en 1941 [1].

1.1.2. A l'échelle nationale :

En Algérie les inondations attribuables aux crues des oueds sont plus fréquentes que les tremblements de terre et les glissements de terrain (Beloulou , 2008). Toutes les régions du pays sont touchée par ce phénomène (Annexe 1). Quelques exemples illustrent ce répertoire à travers le pays.

▪ Novembre 2001 à Alger :

La matinée du 10 novembre 2001, la station météorologique de Bouzereah enregistre 130 mm de pluies accompagnées de violentes rafales de vent. En 24 heures le cumul de pluies enregistre 204

mm et atteint 262 mm le 11 novembre. Ces pluies diluviennes provoquent l'une des inondations les plus dramatiques en Algérie. Plus de 700 personnes ont été tuées, 115 disparus et des dégâts estimés à environ 30 milliards de dinars algériens soit 300 millions de dollars (Figure.1.4) (Beloulou , 2008).



Figure 1.4: Alger - Bab el Oued (Giovanola M., Heritier F., 2002).

▪ **Décembre 1984 à Skikda**

Les inondations du 28 au 31 décembre 1984 ont été provoquées par de fortes pluies pendant plusieurs jours. Elles ont été classées comme exceptionnelles et ont été parmi les plus graves enregistrées depuis novembre 1957 (Figure 1.5) au cours desquelles la hauteur pluviométrique dans le bassin de l’oued Saf Saf a atteint en 24 heures 173 mm à Zardezas, 138 mm à Ramdane DJamel et 100

mm à Skikda. Ces fortes pluies ont provoqué l'élévation, puis le débordement des eaux de l'oued Saf Saf et ses principaux affluents à l'aval du barrage (Figure 1.6) (Beloulou , 2008).



Figure 1.5 : Skikda – inondations de Novembre 1957 [2].



Figure 1.6 : Skikda, inondations du 28 au 31/12/1984 (Beloulou, 2008).

L'analyse de l'hydrogramme de la crue enregistré à l'amont du barrage des Zardezas entre le 28 et 31 décembre (Figure 1.7) reflète l'importance de cette crue. Le débit maximum et le volume de crue observés sont respectivement estimés à $558 \text{ m}^3/\text{s}$ et 50 Hm^3 . Ce volume est égal à l'apport annuel moyen en eau de l'oued Saf Saf estimé à $50.5 \text{ Hm}^3/\text{an}$, calculée sur 66 ans de 1939 à 2004 (Beloulou , 2008).

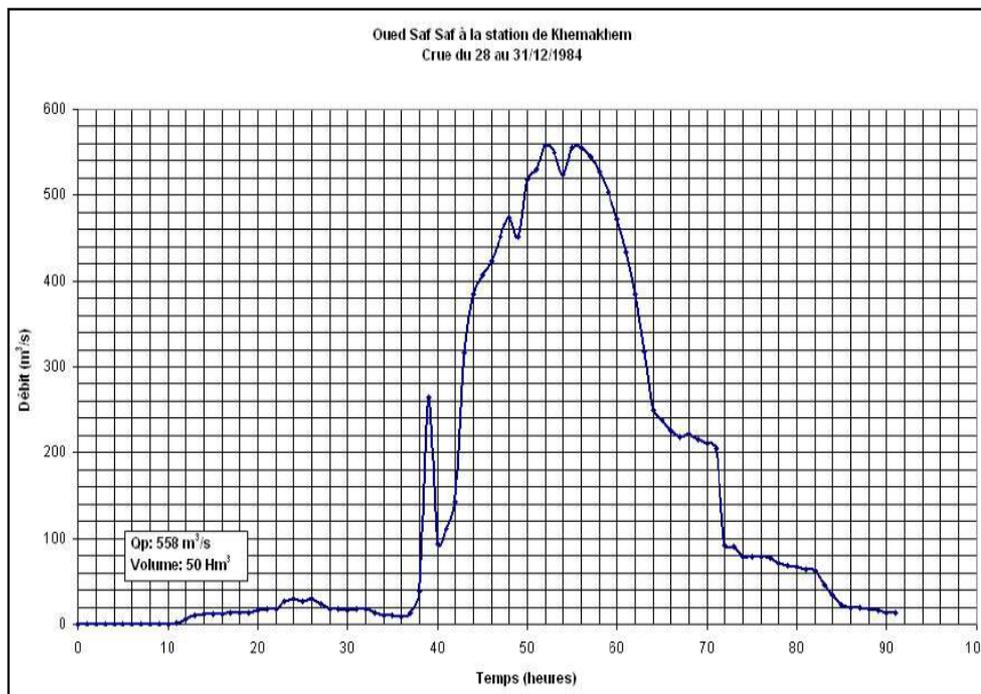


Figure 1.7 : Hydro gramme de la crue de Décembre 1984 (Beloulou, 2008).

La catastrophe a été accentuée par un dysfonctionnement des portes de vidange du barrage de Zardezas à l'amont du bassin suite à des lâchées sécuritaires. Les registres de gestion du barrage montrent que le débit maximal rejeté était de 558 m³/s. Ces inondations ont dévasté la ville de Skikda dont une grande partie est située aux embouchures de l'oued Saf Saf et de son affluent Zeramna (Figure.1.6) (Beloulou , 2008).

Selon le rapport dressé par la cellule de crise, 11 décès et dégâts matériels importants ont été estimés à 50 millions de DA correspondant aux infrastructures de base fortement endommagées, édifices effondrés suite à des mouvements de masse, immersion de 400 hectares et enclavement de la ville pendant 10 jours (Beloulou , 2008).

- **Les inondations du Sud :**

Le sud du pays a également connu des inondations de grandes envergures, notamment dans les régions d'Illizi, Adrar et Tamanrasset en mars 2005, à Tindouf en février 2006, à Béchar en octobre 2007 et 2008 et à Ghardaïa en octobre 2008.

Dans le sud toujours, les lits des oueds et torrents sont souvent à sec. Les averses torrentielles et brèves provoquent une concentration des eaux ruisselées et peuvent provoquer des débordements particulièrement destructeurs. Par exemple, à Tindouf en février 2006, les précipitations journalières de 79 mm étaient suffisantes pour détruire plus de 50% de l'infrastructure dans les camps des Sahraouis.

Suites aux intempéries qui ont duré plus de trois jours, la wilaya de Béchar a été gravement endommagée le 18 octobre 2007. En plus des deux victimes, l'infrastructure de base a été gravement endommagée, les routes ont été fermées suite à l'effondrement de plusieurs dalots et ponts. En moins d'un an, le 10 octobre 2008, la ville de Béchar a de nouveau été frappée par une nouvelle inondation tuant huit personnes et causant des dommages importants. Cette dernière est la plus importante depuis 1959 (Figure.1.8). Dans la majorité des cas, la météorologie est un facteur déterminant dans la genèse des crues, vingt minutes seulement ont suffi aux pluies 'diluviennes' pour causer la mort de plus de 34 personnes et transformer en ruines la vallée du M'zab à Ghardaïa (Figure.1.9), totalement inondée par des eaux boueuses (Beloulou., 2008).

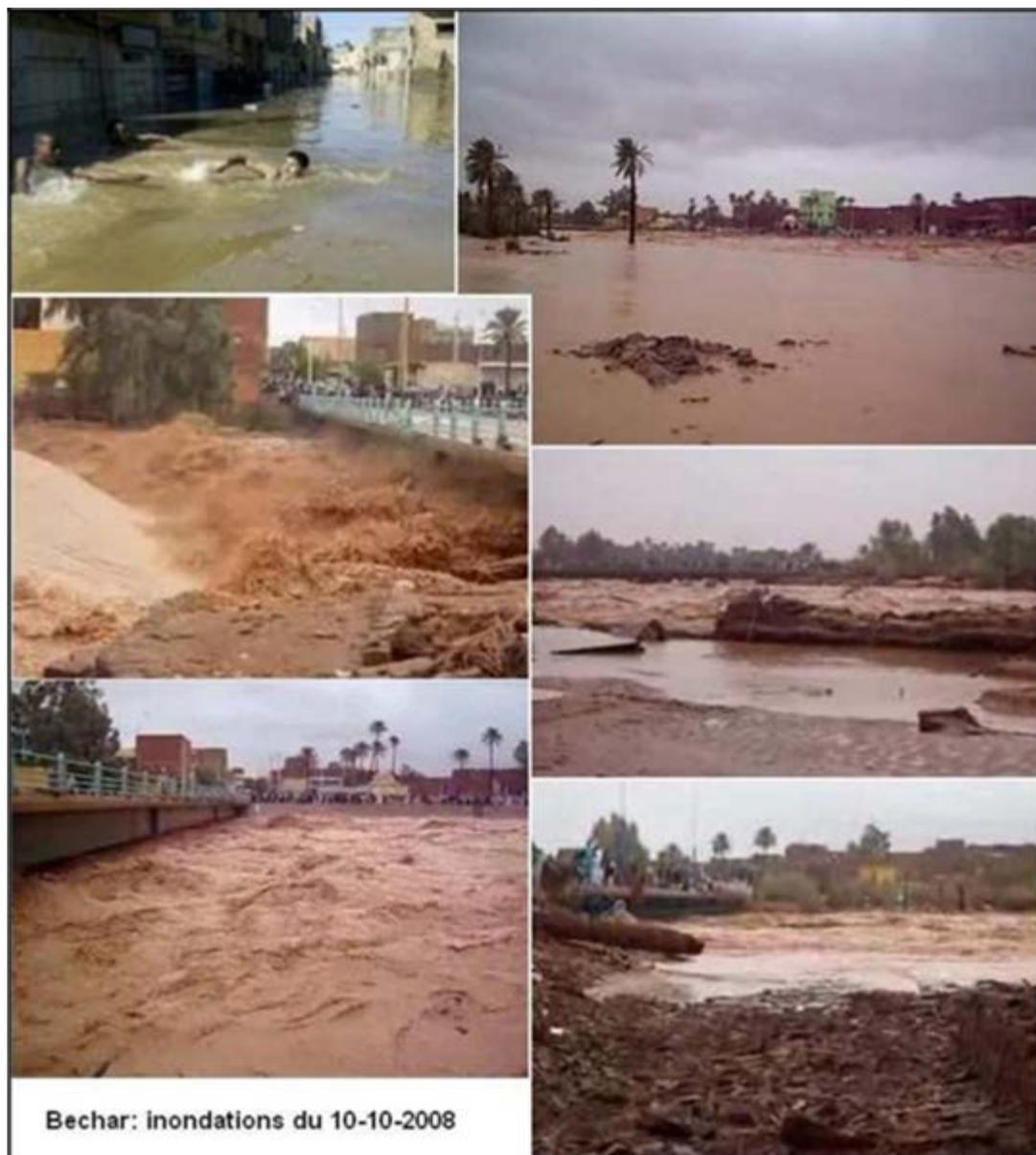


Figure 1.8 : Béchar : inondations du 10 Octobre 2008 [3].



Figure 1.9 : Ghardaia ; inondations du 01-10-2008 [4].

Le cumul pluviométrique accumulée atteint au cours de ces événements est beaucoup plus grand que la capacité de rétention du sol et la capacité de l'évacuation des oueds, le débit de l'oued M'Zab, enregistré le 1er octobre 2008, dépassé la crue centennale estimée à $900 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ et la hauteur d'immersion a été atteinte dans des endroits de 8 m.

1.2. Gestion du risque :

1.2.1. Phases et outils de la gestion des risques :

En général, la gestion des risques se décompose en plusieurs étapes d'analyse et d'action, avec la participation de nombreux acteurs, comme suit :

La prévision : C'est la première étape d'une démarche de gestion des risques. Elle repose sur la modélisation des processus de formation de l'aléa (météorologique et hydrologiques) ainsi que sur les centres de surveillance permanente opérationnels tels les services d'annonce de crues [A.MEG1] et le Réseau de surveillance des radars pluviaux.

L'anticipation : Intervient en préparant les moyens d'intervenir pendant la crise, dès lors que le niveau de l'aléa dépasse un certain seuil critique de probabilité d'occurrence.

La gestion de crise : Lorsqu'une zone est exposée à un aléa inhabituel, une bonne gestion peut réduire considérablement les pertes humaines et matérielles. Les interventions majeures sont assurées par les services de la Protection Civile et de l'Armée Nationale Populaire (ANP); en cas de grandes catastrophes en Algérie (Menad, 2012).

La mitigation : Cette phase comprend tous les travaux de réparation ou au moins de réduction des dommages au passage de l'événement qui vient de frapper (nettoyage, déblaiement, construction, etc.).

Le retour d'expérience : Il s'agit de définir un scénario décrivant le déroulement des événements, d'évaluer l'efficacité des interventions en temps de crise, la cohérence entre différents services d'intervention, etc. Le retour d'expérience est réalisé dans le but de retirer des leçons des événements passés et contribuer ainsi à améliorer la qualité des interventions pour des événements futurs.

La prévention : En utilisant les informations fournies par le retour d'expérience, les services compétents créent des dispositifs capables de minimiser les risques encourus.

1.2.2. Gestion du risque de crue et de ruissellement de surface :

La lutte contre les phénomènes de crue et de ruissellement de surface est complexe en raison de la multiplicité des acteurs en jeu (Etat, experts, économistes, financiers, citoyens). Ces acteurs doivent discuter ensemble des aménagements à réaliser, des mesures qui devraient atténuer le risque sans pour autant affecter le développement socio-économique de la ville.

En général, les moyens de gestion de crues et de ruissellement de surface peuvent être classés comme mesures structurelles ou non structurelles. Selon le passé du territoire et selon l'idéologie d'intervention (agir soit sur l'aléa soit sur la vulnérabilité et le comportement de la population, ou les deux), l'une ou l'autre de ces mesures est applicable.

1.2.2.1. Les mesures structurelles :

Des mesures structurelles sont mises en œuvre pour réduire l'aléa de crue et de ruissellement de surface. Compte tenu de l'impossibilité de contrôler l'intensité et la répartition spatio-temporelle de

l'événement météorologique, l'aléa ne peut être atténué qu'en modifiant les conditions hydrologiques. Selon l'objectif de la protection requise, ces mesures prennent plusieurs formes :

a) L'augmentation des capacités d'écoulement :

Elles peuvent être soutenues par le cours d'eau. Ceci est souvent assuré par les aménagements fluviaux de type :

- Recalibrage du cours d'eau : Le principe du recalibrage est d'augmenter la débitante du lit mineur en augmentant la section d'écoulement. Ceci peut se faire soit en dilatant le lit, en l'approfondissant ou les deux. Cette technique a été réalisée depuis longtemps dans les zones urbaines et périurbaines et s'accompagne souvent d'endiguements étroits pour réduire la fréquence des inondations.
- Les digues de protection contre les inondations : Les digues de protection contre les inondations sont des structures dont au moins une partie est construite en élévation au-dessus du niveau du terrain naturel et visent à contenir épisodiquement un flux d'eau afin de protéger des zones inondables.

On trouve ces digues essentiellement le long des cours d'eau, parfois positionnées directement en contact avec la berge, ou éloignées de plusieurs mètres, ou plus (Figures.1.10 et 1.11).

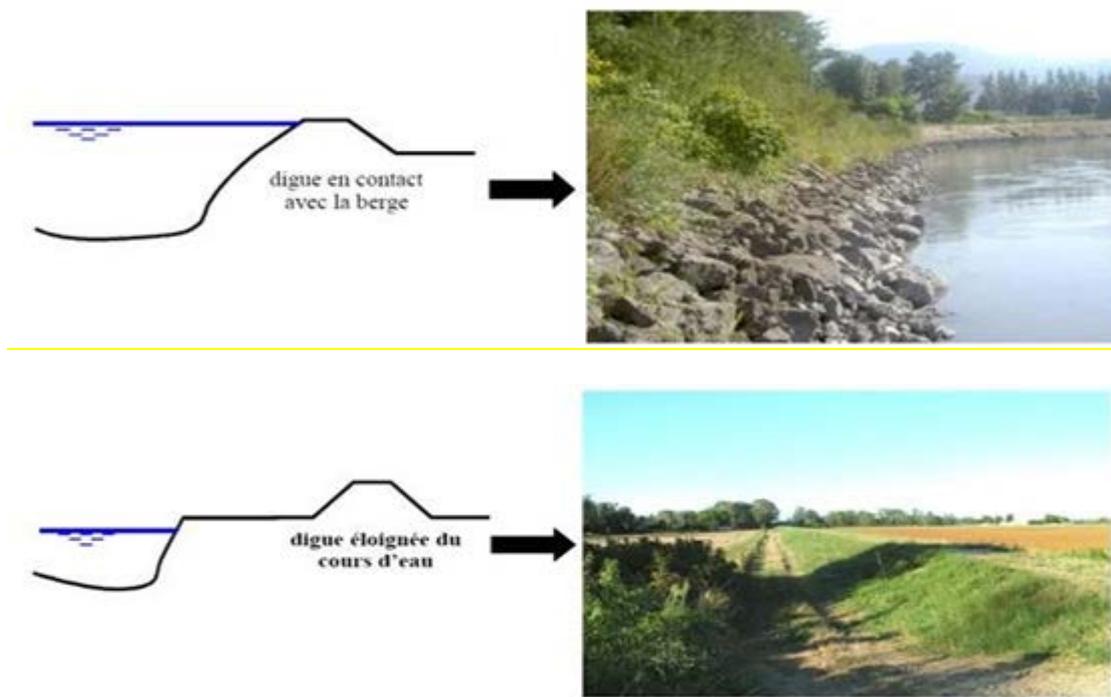


Figure 1.10 : Positions de la digue par rapport aux cours d'eau (Benmia C., 2012).

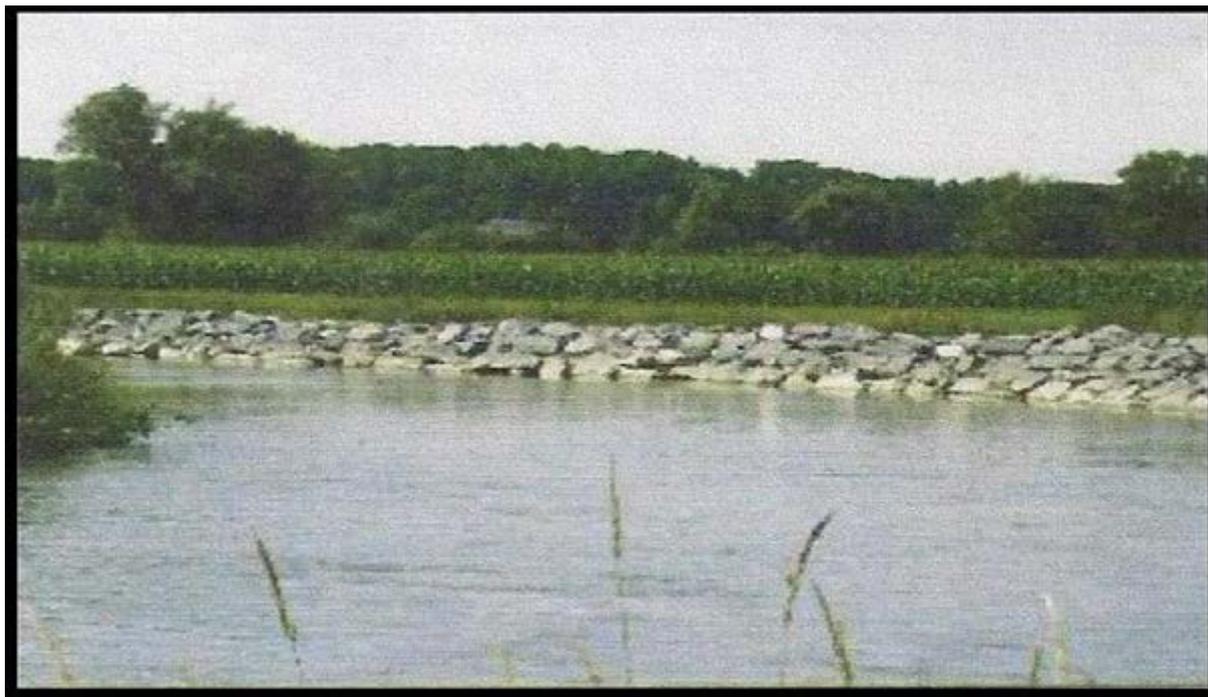


Figure 1.11 : Digue enrochée (Serre D., 2005).

- Recalibrage des systèmes d'évacuation de l'eau : Ce processus consiste à ajuster les capacités d'écoulement dans les systèmes d'évacuation des eaux pluviales pour éviter que leur engorgement en eau ne provoque des inondations sur une zone urbaine. Il peut également modifier un défaut dans les systèmes d'évacuation qui n'empêche pas l'eau du cours en crue d'être refoulée.
- Barrage excréteur : Les barrages excréteurs sont implantés en travers du thalweg et ont pour objet de stocker temporairement un certain volume dans le lit du cours d'eau, afin de réduire le débit de pointe de la crue en aval (Figure 1.12).

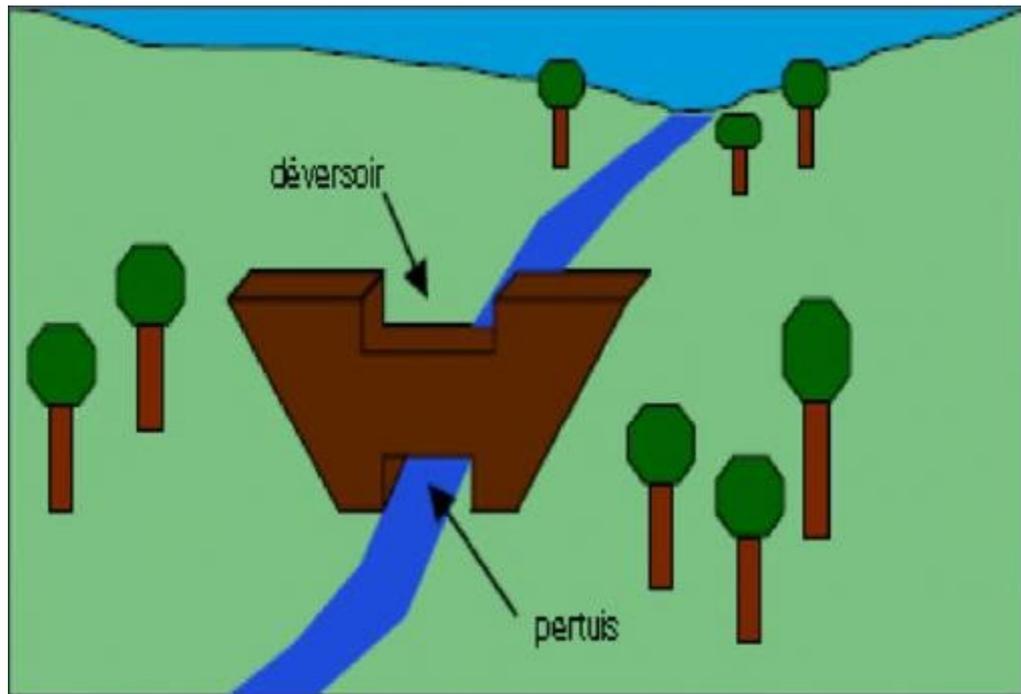


Figure 1.12 : Schéma de fonctionnement d'un barrage excréteur de crue (Naaim M, Degoutte G et Delorme F., 2010).

Le principe général de fonctionnement est basé sur un pertuis de fond qui permet de limiter le débit en aval jusqu'à une valeur compatible avec les enjeux à protéger contre l'inondation, par conséquent, la structure est transparente pour les débits courants ou les crues récurrentes.

Lorsque la capacité du pertuis est saturée, la retenue se remplit progressivement, permettant de stocker temporairement une partie du volume de la crue ; le débit en aval augmente légèrement en fonction de la montée du niveau dans le réservoir ; à la fin de crue, le volume d'eau stocké dans la retenue se vide naturellement par le biais du pertuis (Figure 1.13).

En cas de très forte crue, lorsque le réservoir est plein, le fil de sécurité pénètre dans l'opération pour éliminer la différence entre le débit entrant dans le réservoir et le débit traversant le puits.

En cas de très forte crue, lorsque la retenue est pleine, le déversoir de sécurité entre en opération pour évacuer la différence entre le débit entrant dans la retenue et le débit traversant dans le pertuis (Benmia K., 2012).

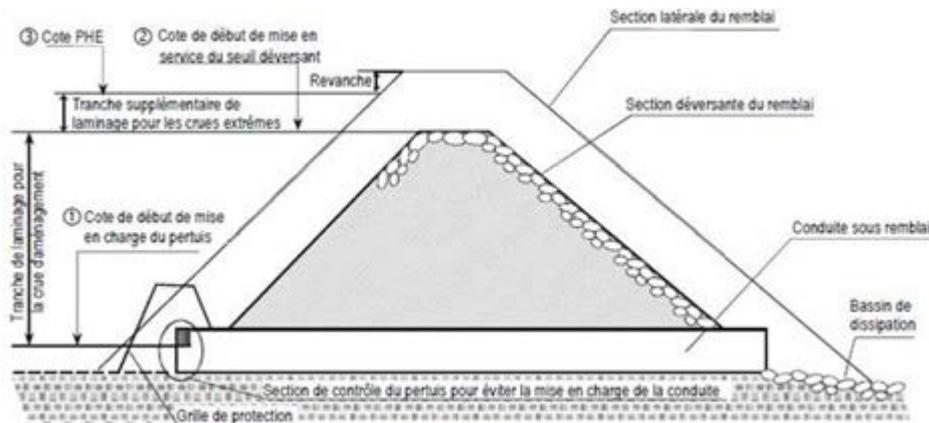


Figure 1.13 : Schéma de fonctionnement d'un barrage excréteur de crue (Aissa Madaoui O., Aissa Madaoui R., 2016).

- Correction torrentielle : C'est une technique qui vise à réduire les vitesses des écoulements dans les cours d'eau ayant des régimes torrentiels (Figure 1.14). Un torrent est corrigé en construisant un certain nombre de digues successives transversales sur les lits des canaux naturels (Abdeddaim H., 2008).



Figure 1.14 : Correction torrentielle (Benmechernane N., 2013).

- Les épis : Un épi en rivière est ouvrage transversal au courant, enfoncé dans la berge, ne barrant qu'une partie du lit et au moins partiellement submersible (Figure 1.15). Les épis sont utilisés pour protéger les berges ou pour faciliter la navigation. (Abdeddaim H., 2008)

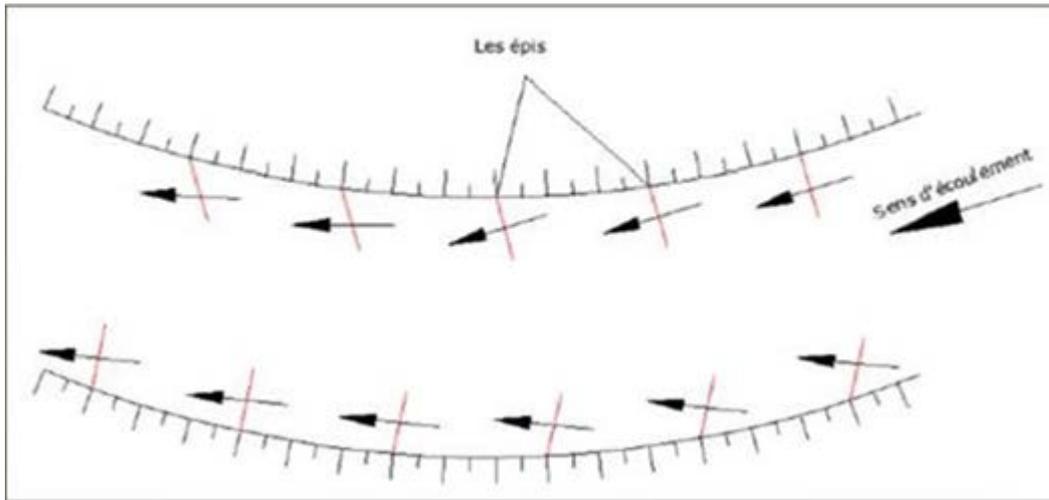


Figure 1.15 : Implantation des épis (Abdeddaim, 2008).

b) L'augmentation de la capacité de stockage de l'eau de ruissellement :

Permettant de réduire la vitesse, le débit de pointe ainsi que les hauteurs de submersion en aval.

Parmi les outils utilisés à cette fin figurent :

- Ouvrage de stockage en dérivation : Ces structures peuvent être implantées dans le lit majeur, voire dans la plaine au-delà. Ils sont alimentés par le détournement de la rivière et nécessitent les aménagements suivants :
 - Une section rétrécie de la rivière (section de contrôle).
 - Un seuil latéral calé à limiter la crue.
 - Un dispositif de limitation du débit dérivé vers les bassins de stockage.
 - Des bassins aménagés par creusement du terrain naturel, par construction de digues ou par une solution mixte entre les deux précédentes (Figures 1.16 et 1.17).

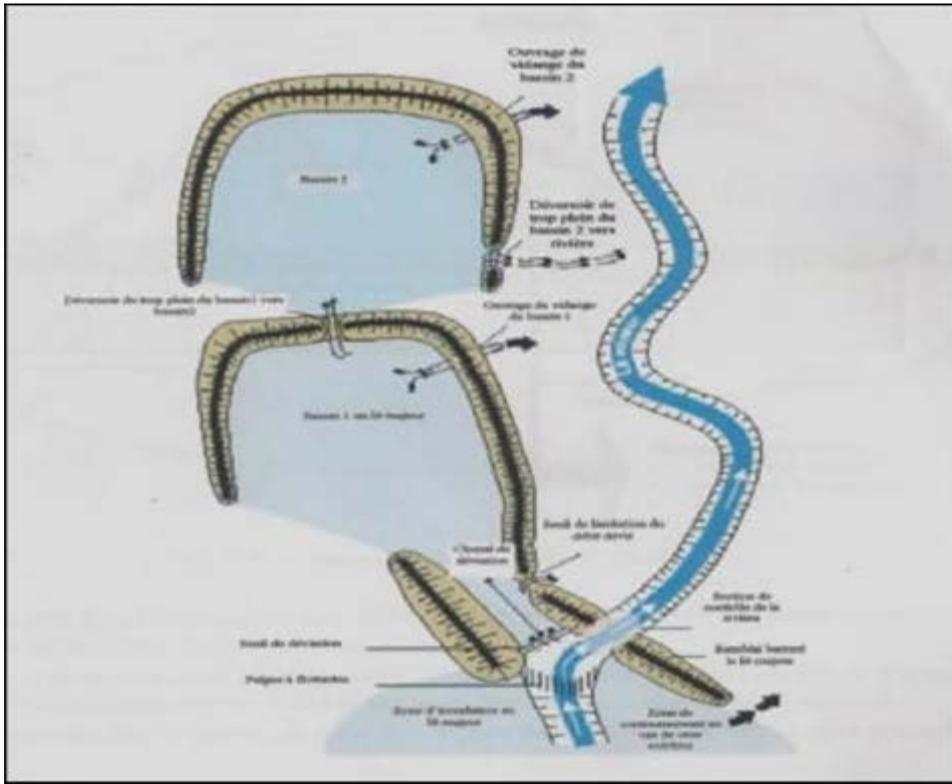


Figure 1.16 : Fonctionnement d’ouvrage de stockage en dérivation (Benmia K., 2012).



Figure 1.17 : Canal de dérivation au Sud de la ville de Sidi Bel Abbés (Hallouche B., 2007).

L’ouvrage n’entre en jeu que lorsque la crue dépasse une certaine hauteur. En cas de crue exceptionnelle, le dispositif de sécurité limite les débits déversés pour protéger les bassins des immersions (Hallouche B., 2007).

- Reboisement : Les forêts jouent un rôle considérable dans la conservation des sol et des eaux et contribuent efficacement au ralentissement de la montée des crues, il est donc nécessaire de préserver les forêts existantes contre le déboisement (Chachoua A., 2010).
- Banquette : La technique des banquettes a un double objectif, anticorrosion et réduit le ruissellement par préférence pour l'infiltration due à la diminution de pente. (Benmia K, 2012).

La banquette mécanique est divisée en quatre zones (Figure 1.18).

- Le fossé large reçoit les eaux de ruissellement de l'impluvium.
- Le talus reçoit la pluie et un apport latéral des eaux du fossé.
- L'impluvium à l'amont du fossé ; zone cultivée entre les bourrelets.
- La zone de l'impluvium à l'aval et proche du bourrelet qui pourrait recevoir un appoint d'eau par drainage à travers le bourrelet lors des grosses averses.

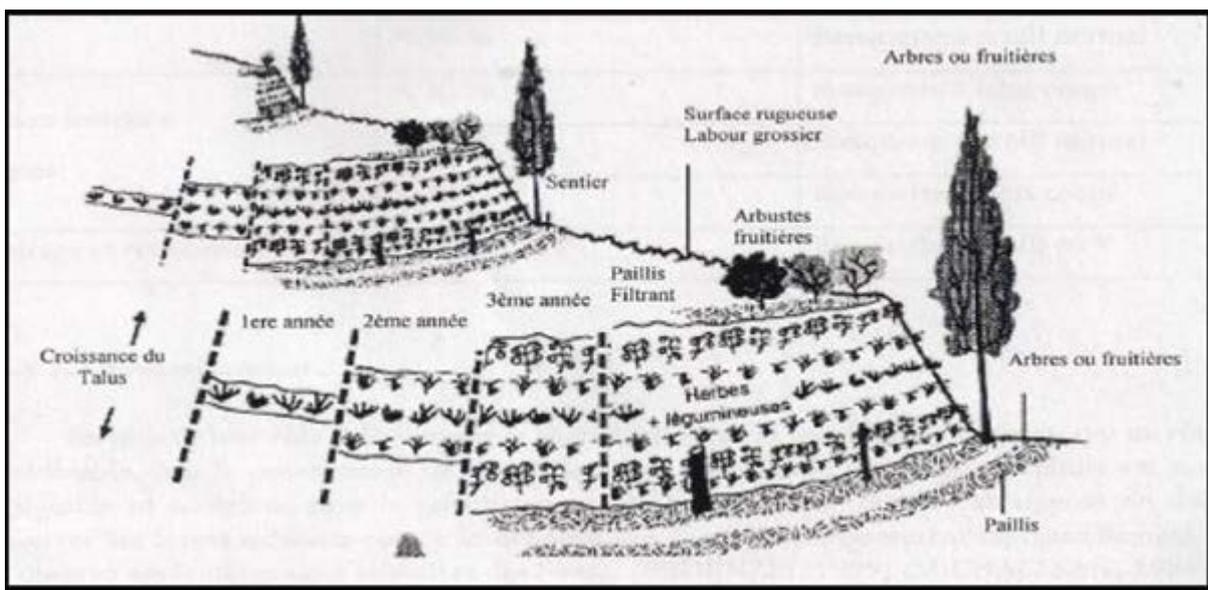


Figure 1.18 : Technique de banquettes (Benmia K., 2012).

1.2.2.2. Les mesures non structurales :

Ce sont des mesures qui ne nécessitent pas de mobilisation significative de matériaux ou d'interventions de génie civil pour changer le comportement hydrologique. Au lieu de cela, ils comptent sur le changement de comportement sur le terrain d'une manière qui minimise l'exposition des enjeux aux aléas. Un large éventail de réponse.

- a) Modification des modes d'occupation et d'usage du sol :

Il arrive des dommages aux personnes et aux biens lorsque l'utilisation des terres et le type de construction dans la zone d'inondation ne sont pas adaptés aux submersions. Ces dégâts augmentent en Algérie et cela ne s'explique pas par le changement climatique ou la gestion des bassins versants. Par

exemple, le tableau 1.1 montre le nombre de constructions en zones inondables dans quelques wilayas de l'Algérie, et illustre que la gravité de la situation peut être générée par le double phénomène d'inondation et d'urbanisation incontrôlée.

Tableau 1.1 : Nombre de construction par ville sur les zones inondables (Beloulou L., 2008)

Wilaya	Nombre de constructions
Skikda	4009
Annaba	30 cités et quartiers
Guelma	360
Constantine	620
El Tarf	2370
Souk Ahras	La plupart des communes présentent des habitations construites en zones inondables.

Les constats post-catastrophes soulignent que les pertes dues aux inondations sont loin d'être exclusivement hydrométéorologiques mais exacerbées par une série de déficits et de non-interférence dans les pratiques de gestion de l'espace urbain : construction dans les zones d'expansion des crues, dans les lits et à proximité des oueds.

- b) Le transfert ou la suppression des activités, l'information des nouveaux arrivants souhaitant s'installer dans la plaine alluviale sur le risque potentiel afin de protéger les constructions, et les réglementations relatives à l'utilisation future des sols.
- c) Modifier la vulnérabilité des éléments physiques tout en préservant les usages initiaux : mesure de protection individuelle, modification des caractéristiques du bâti et renforcement des infrastructures, etc.
- d) L'Engagement de gestion dynamique pour faire face aux problèmes de mobilité : système de prévention, système d'alerte, organisation préalable à la gestion de crise, utilisation des médias pour informer les citoyens immédiatement en cas de danger, etc.
- e) Système de mutualisation ou d'assurance, c'est-à-dire des interventions qui ne travaillent pas directement sur l'événement mais interviennent après qu'il a lieu afin de répartir les coûts de la catastrophe à plus grande échelle.

Conclusion :

La gestion de tout problème présentant un risque quelconque doit impérativement passer d'abord par une première évaluation du niveau de risque encouru. Ceci permettra par la suite d'envisager les mesures à prendre pour réduire ce risque.

Dans ce chapitre nous avons essayé de faire une synthèse sur le phénomène des inondations pluviales en mettant en évidence sa gravité, son ampleur et ses divers aspects.

Nous avons présenté quelques types de solutions et techniques couramment utilisées pour atténuer le risque de ce phénomène.

Les inondations sont étroitement liées aux risques hydrométéorologiques. En fait, pouvoir cerner avec certitude le risque maximal encouru est une tâche très difficile et prétendre arriver à annuler complètement ce risque serait utopique car dans le domaine des sciences appliquées et de l'engineering on dit que « le risque zéro n'existe pas ». Par conséquent, toute démarche de cette réduction est sujette à un certain degré d'incertitude. L'information la plus fiable lorsqu'elle existe n'est que l'extension spatiale de la plus grande inondation connue dans le passé.

Il est évident que l'inondation - comme tout phénomène naturel - est conditionnée et influencée par une panoplie de paramètres plus ou moins importante. Le ruissellement des eaux de surface constitue l'un des plus importants de ces paramètres dans la genèse des crues et le développement des inondations. Ceci nous amène à étudier de près ce paramètre en lui donnant une importance très particulière.

Chapitre II

Le ruissellement

LE RUISSELLEMENT

Ce chapitre est un rappel des bases fondamentales de la physique du sol et des processus hydrologiques impliqués dans les processus de ruissellement, aux échelles de parcelles de terre et des petits bassins versants.

2.1. Formation des précipitations :

Nous appelons « précipitation » toutes les eaux météoriques qui tombent à la surface de la terre sous forme de liquide (bruine, pluie, averse) et solide (neige, grésil, grêle). Les précipitations sont des phénomènes associés aux systèmes nuageux, qui reposent sur des microphysiques des nuages ainsi que sur les mouvements atmosphériques à plus grandes échelles.

La formation des précipitations dépend des changements d'état de l'eau présente dans l'atmosphère. La quantité d'eau présente et ses changements d'état sont liés aux mouvements verticaux dans l'atmosphère.

Lorsqu'une particule d'air relativement chaud et humide s'élève, les transformations thermodynamiques (dépression, refroidissement ...) peuvent entraîner une saturation de l'air et une condensation de la vapeur. Ceci est illustré par l'apparition de gouttelettes d'eau résultant du dépôt de vapeur d'eau initialement autour des fines particules appelées le noyau de condensation, puis sur les gouttelettes déjà formées.

[A.MEG1] Les précipitations sont dues à l'activité d'ascendance de masse d'air chaud et humide et sont classées en fonction des raisons qui ont conduit à cette descente. Ainsi, en fonction des processus initiateurs, les précipitations peuvent être réparties en trois catégories :

2.1.1. Précipitations convectives :

Elles apparaissent lorsque deux masses d'air de températures différentes entrent en contact, notamment lorsqu'une masse d'air froide recouvre un sol plus chaud ou lorsque les basses couches sont chauffées par la lumière du soleil. L'air de ces basses couches se dilate, devient plus léger et monte sous l'influence de la poussée d'Archimède jusqu'au niveau de la condensation et de la hauteur qui constitue la base du nuage. (Roche M, 1963) et (Sanchez - Diesma R, I.Zawadski et D. Semper -Torres ,1970).

Ce système est décrit par trois étapes: développement, maturité et dissipation, comme illustré à la figure 2.1.

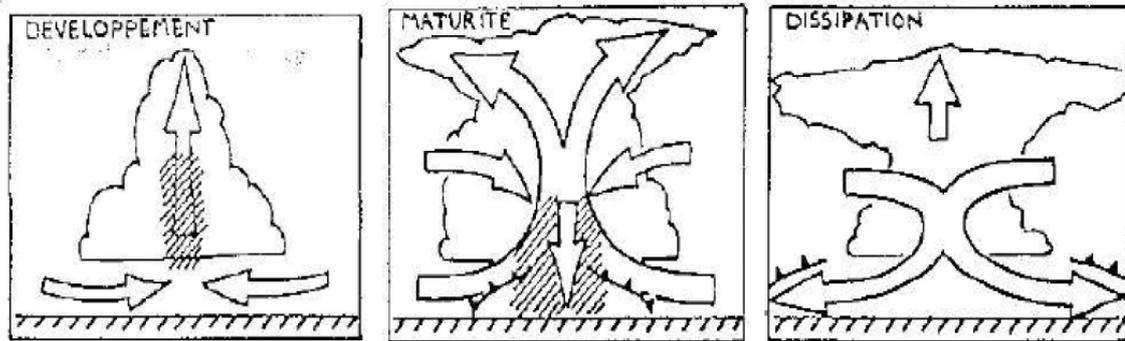


Figure 2.1 : Les différentes phases du système convectif (Roche.M, 1963).

2.1.2. Précipitations orographiques : (oros ; montagne)

Elles se produisent lorsqu'une masse d'air en mouvement franchit une barrière topographique, provoquant ainsi les premiers mouvements ascendants. Le refroidissement induit peut entraîner la formation d'une couverture nuageuse et à des précipitations (Roche.M, 1963).

2.1.3. Précipitations frontales ou de type cyclonique :

Ces précipitations sont engendrées au voisinage des surfaces de contact entre deux masses d'air différentes de température et d'humidité, appelées front. La masse d'air chaud est toujours soulevée en altitude par la masse d'air froid. Suivant que la masse d'air chaud suit ou précède la masse d'air froid, on trouve un front chaud ou froid.

Dans le cas d'un front froid, les nuages ont un développement vertical important et les précipitations sont importantes. Dans le cas d'un front chaud, les nuages ont une grande extension horizontale et les précipitations sont moins importantes que le front froid (figure 2.2) (Marc Morel, 1999).

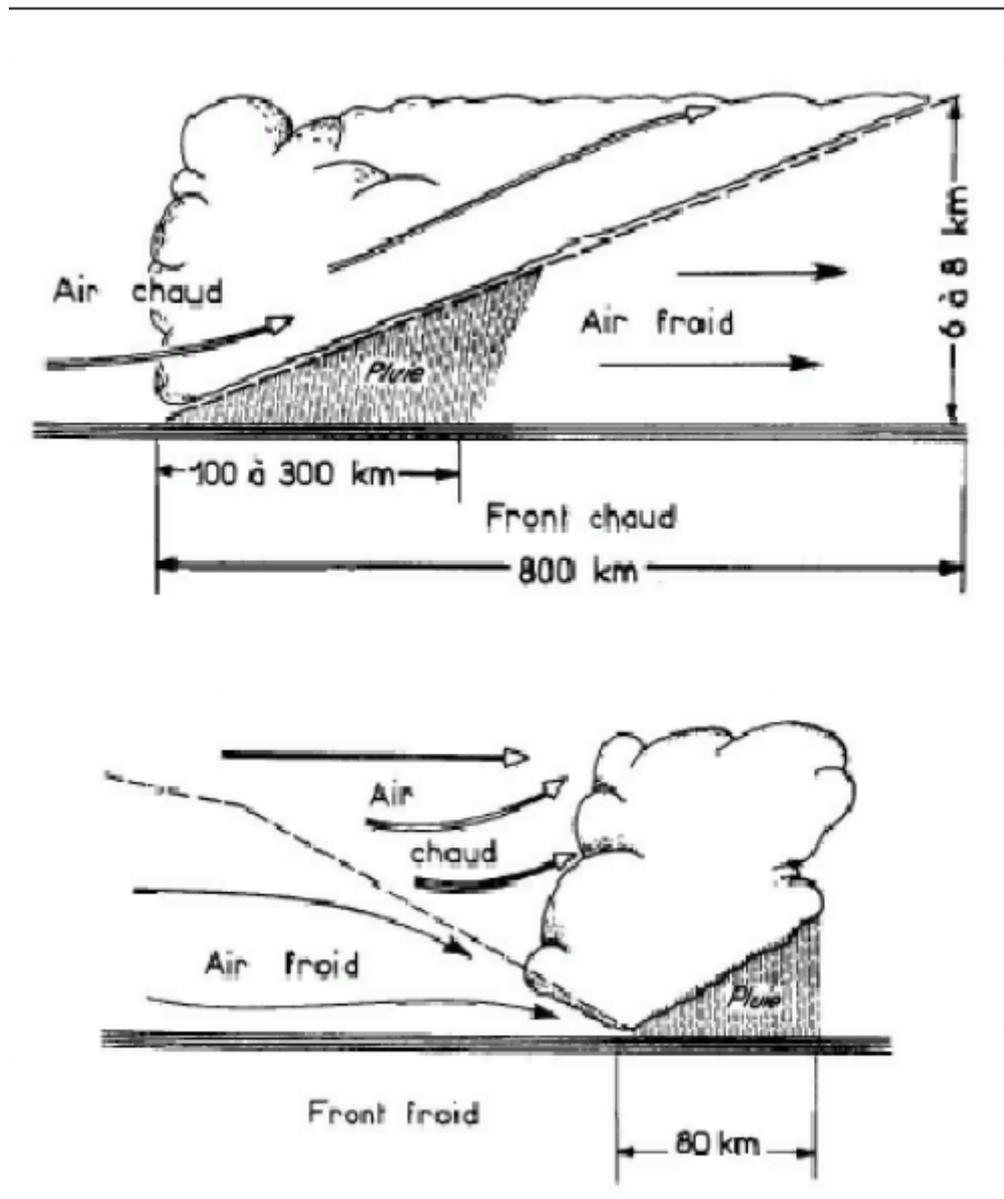


Figure 2.2 : Front chaud et froid (Alexis B., 2002).

2.2. Le sol

Le sol est composé de particules solides à travers lesquels circulent l'eau liquide et l'air (Fig. 2.3). La partie solide est constituée de grains, d'agglomérats et de mottes de terre. En fonction de la compacité, la présence de végétaux, d'animaux, de fissures, le sol sera plus ou moins poreux. En fonction du volume des pores, l'air occupera un volume plus ou moins grand dans un volume de sol donné. La porosité correspond au pourcentage volumique de vide par rapport au volume total de sol (Calvet R., 2003).

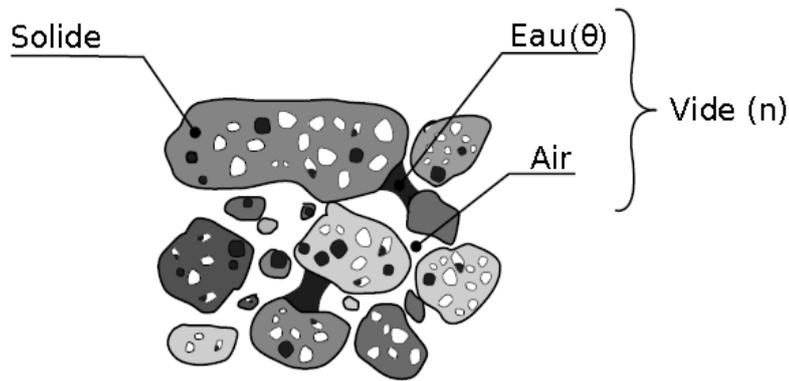


Figure 2.3 : Phases du sol (Matthieu N.2010).

L'eau se trouve dans les pores du sol qui peuvent être à la fois de la macroporosité (tunnel de lombric, voies de racine, ...) et de la microporosité (Calvet, 2003). Le pourcentage volumique de l'eau liquide présente dans le sol est la teneur en eau (notée θ). Le reste du volume des pores est rempli d'air. Dans un état de saturation, l'eau remplit tous les pores et il n'y a plus d'air dans le sol. Dans ce cas, la teneur en eau est à saturation.

Afin de pouvoir comparer les sols entre eux, les pédologues utilisent généralement une classification basée sur la taille des grains présents dans le sol qui comprend quatre catégories (Pansu M. et Gautheyrou J., 2003) : argile, limon, sable et gravier (Fig.2.4). La texture du sol est ainsi déterminée en fonction de la proportion de chaque classe.

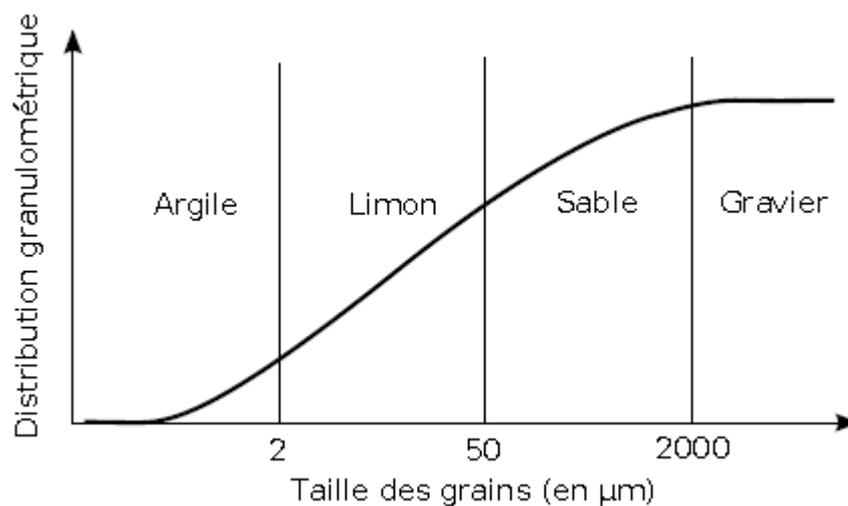


Figure 2.4 : Classes granulométriques selon l'United States Department of Agriculture (Matthieu N, 2010).

Grandeurs et caractéristiques :

La pression (P) de l'eau dans le sol est exprimée par la différence avec la pression atmosphérique (P_{atm}). La pression matricielle dans les sols (h) est donnée par l'équation(2.1).

$$h = \frac{p - p_{atm}}{\rho g} \quad (2.1)$$

Où g est la gravité ($9,81 \text{ m.s}^{-2}$) et ρ est la masse volumique de l'eau (1000 kg.m^{-3}).

Dans un sol non saturé, la pression matricielle est négative. Dans ce cas, l'eau du sol est en succion. Dans le cas d'un sol saturé la pression h est positive.

La pression de l'eau dans le sol est en relation directe avec la teneur en eau (θ) suivant une courbe, dite de rétention. Plus la teneur en eau est élevée et plus la pression de l'eau dans le sol est élevée. Cette relation est fortement hystérétique (Musy A. et Soutter M. 1991), ce qui signifie que la courbe n'est pas la même dans la phase d'imbibition que dans la phase de drainage .

Mualem (1976) et Van Genuchten (1980) ont proposé une équation du modèle de courbe de rétention (Eq.2.2)

$$\theta(h) = \theta_R + (\theta_S - \theta_R) \cdot \left(1 + \left(\frac{h}{h_e}\right)^n\right)^{\frac{1}{n}-1} \quad (2.2)$$

Où θ_R est la teneur en eau résiduelle, h_e est la pression d'entrée d'air et n un paramètre de forme.

Le transfert de l'eau dans le sol est essentiellement dû à deux types de force: la gravité et la force capillaire (Musy A. et Soutter M. 1991). La force capillaire est due à la différence de pression de l'eau dans le sol. A altitudes égales, sous l'effet de la capillarité, l'eau se déplace de la zone de la plus forte pression vers la zone de la moins forte pression. À pression égale, l'eau se déplace de haut en bas sous l'effet de la gravité.

La charge hydraulique (notée H) combine entre la gravité et la capillarité. C'est une quantité physique qui reflète l'énergie d'une particule d'eau. La variation de la charge entre deux points, entraîne le transfert de l'eau du point de la charge la plus élevée vers le point de la charge la moins élevée.

$$H = h - z \quad (2.3)$$

La loi de Darcy généralisée pour un sol homogène (Eq. 2.4) traduit ce transfert d'eau.

$$q = -K(\theta) \cdot \left(\frac{dh}{dz} - 1 \right) \quad (2.4)$$

q ; Le débit d'eau volumique.

$K(\theta)$; La conductivité hydraulique du sol qui dépend de la teneur en eau (θ).

2.3. Les écoulements et leurs modélisations:

Les pluies représentent l'essentiel des apports en eau à un bassin versant. Une partie négligeable tombe directement dans les rivières ou les lacs, une infime partie est interceptée par la végétation (Fig. 2.5). La partie importante ruisselle sur la surface ou s'infiltrate dans le sol. La compréhension de la transformation des pluies en écoulement passe par la compréhension du phénomène des infiltrations et du ruissellement.

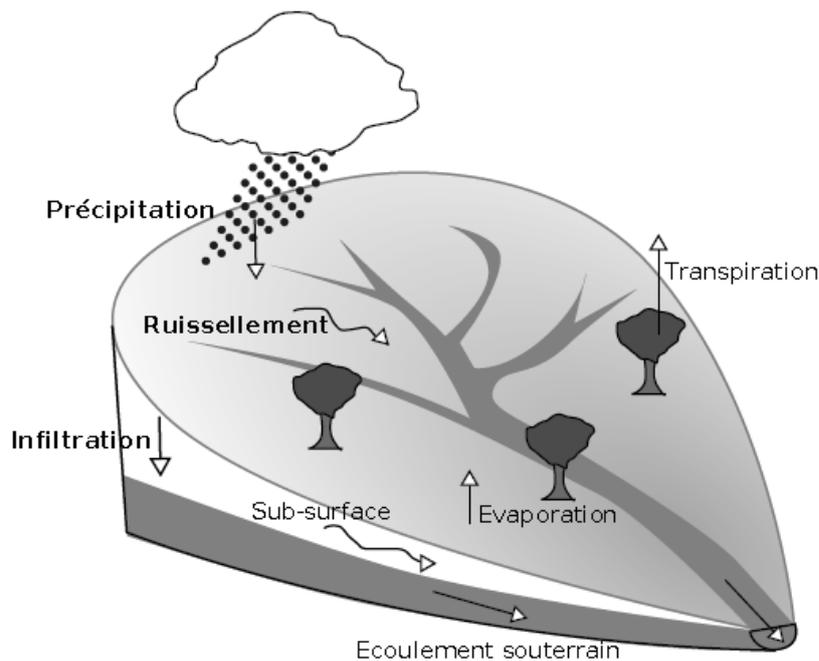


Figure 2.5 : Cycle de l'eau à l'échelle d'un bassin versant (Musy A. Gigy C. 2004).

2.3.1 L'infiltration :

L'infiltration est le transfert de l'eau dans les couches superficielles du sol. L'eau se propage de la surface vers la profondeur sous l'influence de la gravité et de la capillarité (Vandervaere J. P., Vauclin M. Elrick D. E., 2000) et (Musy A. Gigy. C. 2004).

Dans le cas de précipitations sur sol sec, la force capillaire prédomine au début car la différence de pression de l'eau est très importante entre la surface et les premiers centimètres du sol. Ensuite, lorsque le sol se sature et que cette force diminue, la gravité devient prédominante.

L'infiltration dépend en particulier de la texture (granulométrie) et structure du sol. La présence de macro pores peut modifier la conductivité hydraulique d'un sol de plusieurs ordres de grandeur (Beven K. et Germann, 1982).

L'infiltration (i ; mm/s) est définie comme la variation de la lame d'eau infiltrée (I ; mm) au cours du temps (t ; seconde) (Eq.2.5).

$$i(t) = \frac{dI}{dt} \quad (2.5)$$

Les modèles empiriques considèrent le sol comme un réservoir capable de maintenir une quantité maximale fixe d'eau, le ruissellement à la surface se produit lorsque le réservoir est plein (Matthieu N. 2010).

Le (Tableau 2.1) résume les principales formules empiriques utilisées dans l'estimation de l'infiltration.

Tableau 2.1 : Principales fonctions utilisées pour modéliser l’infiltration en fonction du temps (Musy A. et Gigy C. 2004).

Auteur	Fonction	Légende
Horton	$i(t) = i_f + (i_0 - i_f) \cdot e^{-\gamma t}$	i_0 : capacité d'infiltration initiale [cm/s] i_f : capacité d'infiltration finale [cm/s] γ : constante fonction de la nature du sol [min^{-1}]
Kostiakov	$i(t) = i_0 \cdot t^{-\alpha}$	α : paramètre fonction des conditions du sol
Dvorak-Mezencev	$i(t) = i_0 + (i_1 - i_f) \cdot t^{-b}$	i_1 : capacité d'infiltration au temps $t=1$ min [cm/s] b : constante
Holtan	$i(t) = i_f + c \cdot w((IMD) - F)^n$	c : facteur variant de 0,25 à 0,8 w : facteur d'échelle de l'équation de Holtan n : exposant expérimental proche de 1,4
Philip	$i(t) = \frac{S}{2\sqrt{t}} + A$	S : sorptivité [$cm \cdot s^{-1/2}$] A : composante gravitaire fonction de la conductivité hydraulique à saturation [cm/s]
Dooge	$i(t) = a(F_{max} - F_t)$	a : constante F_{max} : capacité de rétention maximale F_t : teneur en eau au temps t
Green et Ampt	$i(t) = K_S \left(1 + \frac{h_0 - h_f}{z_f(t)} \right)$	K_S : conductivité hydraulique à saturation [mm/h] h_0 : charge de pression en surface [mm] h_f : charge de pression au front d'humidification [mm] z_f : profondeur atteinte par le front d'humidification [mm]

Le principal inconvénient des modèles empiriques est l'absence d'une signification physique claire des paramètres et de leur dépendance intrinsèque à chaque évènement (Matthieu.N, 2010).

2.3.2 Le ruissellement :

Le ruissellement constitue la part de la pluie qui n'est pas absorbée par le sol et ne s'accumule pas à la surface, mais s'écoule dans le sens de la pente, sachant que l'épaisseur de la lame d'eau doit être suffisante pour que les forces de gravité compensent les tensions de surface (Yen. B.C. 1986). Un ruissellement de surface apparait lorsque les flaques d'eau se connectent entre elles et permettent

le transfert de l'eau vers l'exutoire. Les mécanismes de ruissellement dépendent de la viscosité, de l'épaisseur de la lame d'eau, des tensions superficielles et de la rugosité de la surface topographique (Menad.W. 2013). Dunne (1978) définit deux types de ruissellement :

Le premier type se produit par refus d'infiltration d'un sol non saturé, appelé ruissellement Hortonien (Horton, 1933). L'impact mécanique (poids, vitesse) des gouttes de pluie sur la surface nue d'un sol provoque l'éclatement de ces agrégats en plusieurs particules élémentaires qui vont se disperser et se réorganiser en surface. Les pores sont fermés progressivement, rendant le sol plus imperméable: il se forme alors ce qu'on appelle la croûte structurale. Ce mécanisme s'appelle organisation pelliculaire superficielle (OPS), dont les principales étapes sont expliquées par la figure 2.6 (Menad.W. 2013).

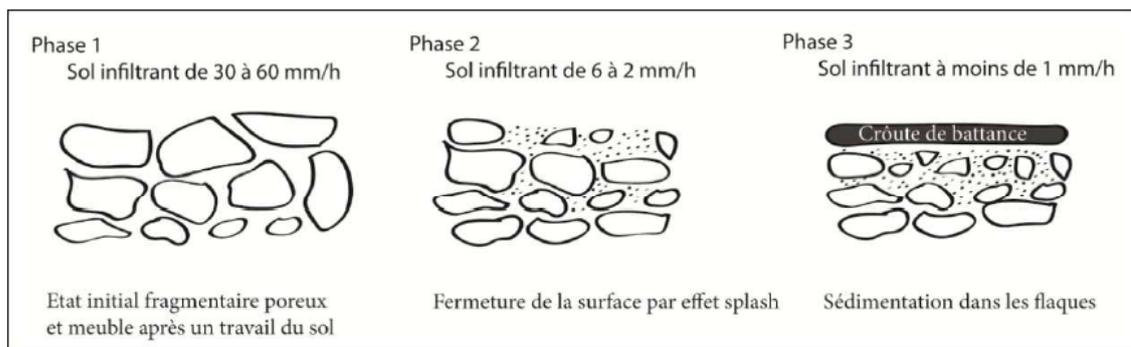


Figure 2.6 : Etapes de formation des OPS sous l'effet de l'érosion mécanique des gouttes de pluies (Menad W. 2013).

Le second type se produit par saturation du sol par le bas, appelé ruissellement hewlettien. Les flaques d'eau apparaissent lorsque tout le profil du sol est saturé. La saturation se fait par le bas et remonte vers la surface. Quand la saturation atteint la surface, le sol n'est plus capable d'absorber l'eau et les flaques d'eau apparaissent à la surface. Ce type de ruissellement est plus courant dans les zones tempérées (Matthieu N.,2010).

Cependant, ces deux types de ruissellement peuvent apparaître simultanément sur le même bassin versant. Selon Beven (1983) le ruissellement par saturation se produit en aval du bassin où la nappe affleure le sol alors qu'au sommet de versant, le ruissellement est plutôt Hortonien.

Le ruissellement est décrit par plusieurs modèles qui peuvent être une simplification des équations de Barré de Saint-Venant, des modèles empiriques ou conceptuels.

- **Equations de Barré de Saint-Venant**

Barré de St-Venant, ingénieur des Ponts et Chaussées, a élaboré un système d'équations en 1871 pour décrire principalement l'écoulement dans les canaux. Ces équations ont été adaptées pour décrire de nombreux écoulements géophysiques de faible profondeur. Elles contiennent une équation de conservation de la masse et une autre décrivant la dynamique de l'écoulement (Matthieu N. 2010).

Zhang W. et Cundy T (1989), Tayfur G., Kavvas M., Govindaraju R. et Storm D.(1993) et Esteves.M, Faucher. X, Galle. S, Vauclin.M (2000) ont adapté ces équations au ruissellement à l'échelle du versant et de la parcelle (Eqs.2.6, 2.7 et 2.8).

$$\underbrace{\frac{\partial uh}{\partial x} + \frac{\partial vh}{\partial y}}_{\text{divergence}} + \underbrace{\frac{\partial h}{\partial t}}_{\text{variation hauteur}} = \underbrace{i_p - I(x, y)}_{\text{apport réel d'eau}} \quad (2.6)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial h}{\partial x} + g(S_{fx} - S_{0x}) = 0 \quad (2.7)$$

$$\underbrace{\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y}}_{\text{inertie/acceleration}} + \underbrace{g \frac{\partial h}{\partial y}}_{\text{gradient de pression}} + \underbrace{g(S_{fy} - S_{0y})}_{\text{force extérieure}} = 0 \quad (2.8)$$

Où u et v représentent les vitesses moyennes locales, h correspond à la hauteur d'eau, i_p à l'intensité de pluie, I au taux d'infiltration, g à la constante de gravité, x et y aux coordonnées spatiales et t au temps. S_{0x} et S_{fx} (respectivement S_{0y} et S_{fy}) correspondent à la pente de la surface du sol et à la pente de frottement selon x (respectivement selon y). Les pentes de frottement sont calculés avec des équations de type Darcy-Weisbach et sont fonctions de la vitesse moyenne locale, de la hauteur d'eau et du coefficient de frottement de Darcy-Weisbach (Eqs. 2.9 et 2.10).

$$S_{fx} = f \left(\frac{u^2}{8gh} \right) \quad (2.9)$$

$$S_{fy} = f \left(\frac{v^2}{8gh} \right) \quad (2.10)$$

- **Modèles à base physique**

Puisque la modélisation des équations de Barré de St-Venant est généralement exigeante en calculs, les modélisateurs utilisent des simplifications pour cette équation (Matthieu N. 2010). La plus couramment utilisée est l'onde cinématique (Julien P. Y. et Moglen G. E. (1990), Zhang W. H. et Aubry B. F. , 1991; Howes D. A. et Abrahams A. D. 2003; Singh V. P. 2005; Fiener P. et Auerswald K. 2005; Gonzalez-Camacho J. M., Munoz-Hernandez B., Acosta-Hernandez R. et Mailhol J. C.2006; Laloy E. et Biielders C. L.2008. Stone J. J., Paige G. B. et Hawkins R. H 2008) et, dans une moindre mesure, l'onde diffusive (Morris E. et Woolhiser D. 1980; Moussa R. et Bocquillon C. 1996; Chahinian N., Moussa R., Andrieux P. et Voltz M. 2006).

Une analyse des ordres de grandeurs des équations de Barré de St-Venant (Eqs. 2.6, 2.7 et 2.8) montrent que les termes d'inertie sont négligeables face aux gradients de pression et aux forces extérieures (Moussa R. et Bocquillon C., 1996). Ainsi le modèle de l'onde diffusive revient à négliger ces termes d'inertie.

Le modèle de l'onde cinématique estime que les termes d'inertie et les gradients de pression sont négligeables par rapport aux termes des forces extérieures (Eqs. 2.7 et 2.8).

- **Modèles conceptuels :**

Les modèles conceptuels ne reposent pas sur une équation physique mais tentent de reproduire le ruissellement observé par une schématisation des processus tels que les fonctions de transferts et les automatismes cellulaires (Menad W.2012).

La première fonction de transfert différentiée est un modèle conceptuel utilisé à l'origine à l'échelle du bassin versant pour déterminer le débit d'une rivière. Duband D., Obled C. et Rodriguez J.(1993), Ruy S., Findeling A. et Chadoeuf J. (2006) ont appliqué ce modèle au ruissellement à l'échelle de la parcelle. Dans ce modèle, la surface du sol est considérée comme un système acceptant en entrée l'excès de pluie et donnant en sortie le ruissellement. Le but n'est pas de décrire le ruissellement en tant que tel (répartition, hauteur d'eau, etc...) mais d'obtenir par itération une fonction résultante de chaque système. La convolution de cette fonction avec l'excès de pluie donne le ruissellement en fonction du temps.

Darboux (1999) a suggéré un modèle de marcheurs conditionnés basés sur les automates cellulaires. Chaque marcheur qui contient une petite quantité d'eau est "projeté" de façon aléatoire sur la surface. Selon la microtopographie de la surface, toute ou une partie de l'eau du marcheur sera stockée en surface, le marcheur continue de se déplacer avec l'eau restante selon la plus grande pente. Chaque marcheur se déplace ainsi de suite jusqu'à ce qu'il n'ait plus d'eau ou atteigne une limite de la parcelle (figure 2.7).

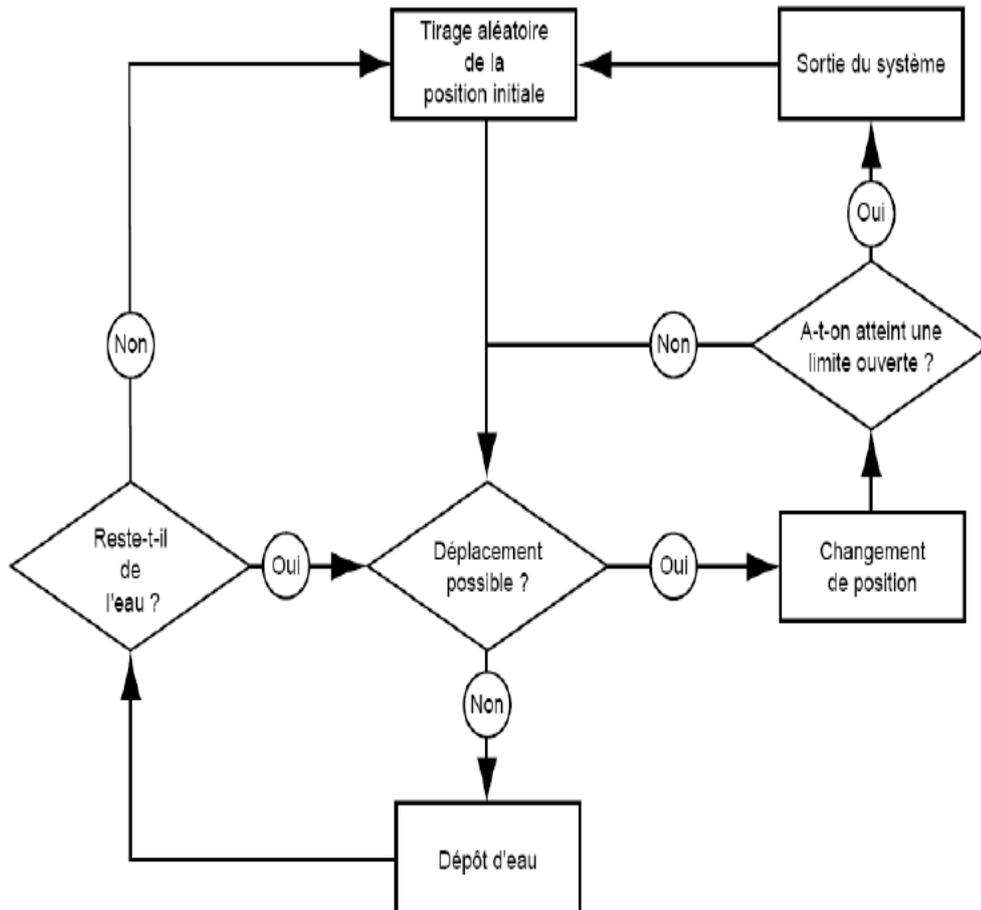


Figure 2.7 : Schéma de fonctionnement du modèle de marcheurs utilisé pour le remplissage progressif des dépressions d'une surface rugueuse. D'après Darboux (1999).

2.4. Le coefficient de ruissellement:

Suite à une pluie, la réponse hydrologique peut être soit rapide quand elle est imputable aux écoulements de surface soit retardée lorsqu'elle est due principalement aux écoulements souterrains. D'après Madi (2012), la réponse peut être totale lorsqu'elle combine à la fois les écoulements de surfaces et souterrains. Lorsque la réponse résulte

seulement de l'une de ces deux composantes, elle est dite partielle. Le rendement d'une pluie qui tombe sur un bassin versant est souvent présenté par le coefficient de ruissellement. Ce coefficient est estimé comme étant le rapport entre la lame d'eau ruisselée et la hauteur de précipitation, ou de manière similaire, c'est le rapport entre le volume total d'eau ruisselé à l'exutoire et l'apport total en eau de pluie.

2.4.1. Les Facteurs exerçant une influence sensible sur le coefficient de ruissellement :

Le coefficient de ruissellement est influencée par l'effet combiné de plusieurs facteurs, liés à la dynamique de la pluie, l'état antécédent d'humidité du sol et la morphologie du bassin versant (forme, dimension, altimétrie, pente) ainsi que les facteurs liés aux propriétés physiques du bassin (nature du sol, couvert végétale,...).

a) Effet de la dynamique de la pluie :

Les expériences menées par Fang H., Cai Q., Chen H. et Li Q. (2008), sur des parcelles situées sur le plateau de loess en Chine, montrent que le régime des précipitations a également un impact sur le ruissellement. En effet, ils ont séparé les événements en fonction du régime de pluies (précipitations fortes et courtes, précipitations faibles et longues, précipitations moyennes et de durées moyennes). Ces différents régimes ont une accumulation similaire moyenne (respectivement 15.8, 23.4 et 23.4 mm). Ils observent que les coefficients de ruissellement sont plus importants pour un régime avec des précipitations fortes et courtes que pour les deux autres régimes.

En revanche, Parsons et Stone (2006) montrent que les cumuls de ruissellement sont peu affectés par la dynamique de la pluie. Pour cela, ils utilisent trois types de sols différents soumis à cinq dynamiques de pluie ayant la même intensité moyenne et le même cumul (intensité constante, intensité croissante, intensité décroissante, intensité croissante puis décroissante et intensité décroissante puis croissante).

Flanagan D., Foster G. et Moldenhauer W. (1987) notent des différences essentiellement sur les pics de ruissellement et concluent que l'intensité moyenne des précipitations a un rôle important dans la production de ruissellement.

Cela souligne la nécessité de ne pas tenir compte uniquement du cumul de la pluie mais aussi de la dynamique de la pluie.

b) Effet de la teneur en eau initiale :

La teneur en eau initiale affecte l'infiltration par les forces capillaires (Musy et Gigy, 2004). Plus le sol est sec, plus les forces capillaires sont fortes et donc plus l'infiltration est élevée. Au fur et à mesure que le sol s'approche de la saturation, l'effet des forces capillaires diminue. L'équation de Green et Ampt (1911) exprime cette influence par la profondeur du front d'infiltration qui est inversement proportionnelle à la différence entre la teneur en eau initiale et finale.

Au niveau du ruissellement, la teneur en eau joue un rôle important sur le temps d'apparition du ruissellement. La saturation de la surface étant d'autant plus longue que le sol est sec. Elle influe également sur le temps de montée du ruissellement. L'atteinte du régime permanent étant plus rapide quand les forces capillaires sont faibles (Madi.M. 2012).

La figure 2.8 donne un exemple de débit simulé pour deux conditions antécédentes particulières à savoir une condition humide et une condition sèche. La condition initiale sèche se traduit par une première crue bien plus faible que dans la situation d'une condition initiale humide puisque l'eau de pluie va commencer par remplir le réservoir sol avant de générer l'écoulement.

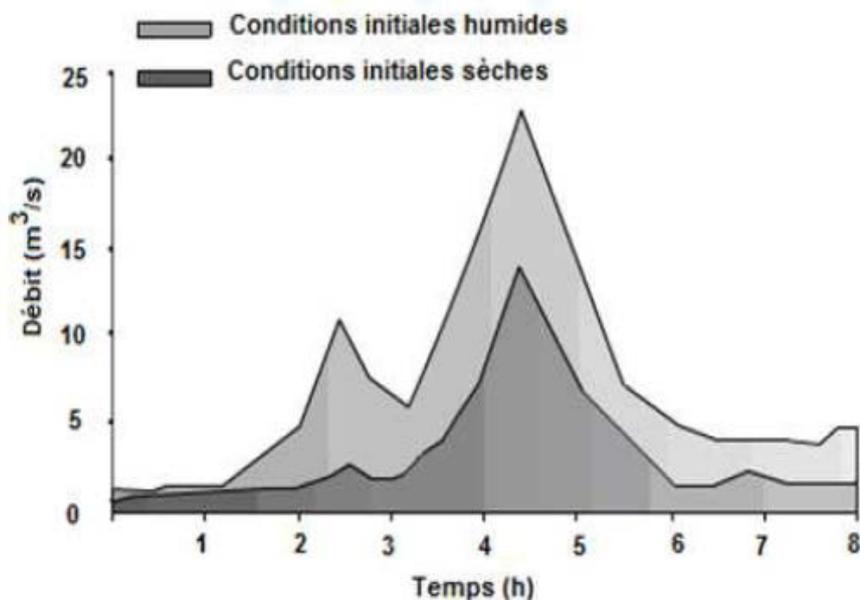


Figure 2.8; l'influence des conditions antécédentes d'humidité sur le comportement hydrologique d'un bassin versant (Madi M. 2012).

c) Effet de la pente :

L'effet de la pente sur le ruissellement n'est pas clairement déterminé. La plupart des auteurs (Deploey. J., Savat J. et Moeyersons J., 1976; Djorovic M., 1980; Sharma K., Singh H. et Pareek O., 1983; Fox D. M., Bryan R. B. et Price A. G., 1997; Chaplot V. et Bissonais Y. L., 2000) ont observé une augmentation du ruissellement avec la pente. Cet effet est attribué à une diminution du stockage de surface et de la profondeur des flaques. Plus la pente est élevée, plus la lame d'eau présente à la surface diminue mais les vitesses des ruissellements augmentent (Chaplot V. et Bissonais Y. L., 2000).

Cependant, Poesen (1984), Bryan et Poesen (1989) et Bradford et Huang (1992) ont observé une diminution du ruissellement avec la pente mais pour des sols sensibles à la formation de croûte de battance et à la formation de rigoles, tel que décrit par Fox D. M., Bryan R. B. et Price A. G. (1997). Bryan et Poesen (1989) attribuent cet effet à une présence plus importante de rigoles incisant la croûte et augmentant ainsi l'infiltration pour les pentes les plus fortes.

D'autres auteurs ont noté une augmentation de l'infiltration avec la pente (Janeau J. L., Bricquet J. P., Planchon O. et Valentin C., 2003; Ribolzi O., Bariac T., Bresson L., Dupin B., Keooudone K., Phanthavong K., Ri-chard P., Thieboux J. P., Silvera N., Soullilab B., Valentin C. et Vandervaere J. P., 2004). Ils observent également une diminution du coefficient de ruissellement avec la pente pour des parcelles cultivées avec des pentes allant de 16 à 63%. L'observation de leurs parcelles a montré une plus grande compaction de la surface des parcelles les moins inclinées.

Leur hypothèse est que la composante horizontale de l'énergie cinétique, qui est importante pour les fortes pentes, sera transformée en cisaillement, limitant ainsi la compaction du sol sur les pentes fortes et permettant de maintenir une forte infiltration.

d) Effet de la microtopographie :

La microtopographie joue un rôle sur le ruissellement essentiellement à travers :

- Le frottement : lié à la rugosité du sol qui se caractérise généralement par des changements de hauteur (Allmaras P., Burwell R., Larson W. et Holt R. 1966). L'augmentation du coefficient de frottement augmentera la hauteur de l'eau et réduira les vitesses d'écoulement comme d'écrit dans l'équation de Manning-Strickler.

- *Le stockage superficiel* : crée essentiellement un effet de retard dû au remplissage des dépressions (Sneddon J. et Chapman T. 1989; Darboux F.1999). Entre deux averses, ces dépressions peuvent être vidées. Il est alors nécessaire de remplir à nouveau ces dépressions avant que le ruissellement n'apparaisse. Une microtopographie aléatoire plus importante a donc tendance à diminuer le ruissellement à l'exutoire.
- *La distribution spatiale de l'écoulement* : l'écoulement est dirigé par la microtopographie du lieu et aura tendance à se concentrer en formant un réseau de drainage. Ainsi, une microtopographie organisée (parallèlement à la pente par exemple) peut augmenter le ruissellement. La répartition des hauteurs d'eau et des vitesses d'écoulement est donc sensible à la variation spatiale de la microtopographie (Esteves M., Faucher X., Galle S. et Vauclin M., 2000).

e) Effet de l'encroûtement :

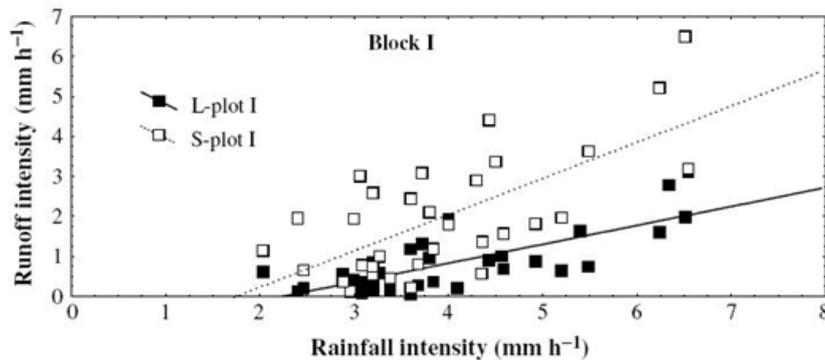
Dans les zones semi-arides, caractérisées par une faible densité de végétation et une intensité de précipitations élevée, l'encroûtement du sol est un phénomène courant. Les croûtes de surface ont un impact certain sur l'infiltration en raison de l'effet d'impédance qu'exerce leur faible conductivité hydraulique ainsi que de la désaturation du sol sous-jacent qu'elles causent ; (Parlange J. Y., Hogarth W. L. et Parlange M. 1984).

La mesure in situ des propriétés hydrodynamiques des sols encroûtés est difficile (Vandervaere J., Peugeot C., Vauclin M., Jaramillo R. A. et Lebel T. 1997). Certains expérimentateurs préfèrent utiliser des grilles d'observation visuelle et des approches statistiques pour illustrer le ruissellement produit par des surfaces partiellement encroûtées (Auzet A., Poesen J. et Valentin C. 2002).

De nombreux modèles prennent en compte l'effet d'une croûte de surface sur l'infiltration, notamment en adaptant le principe de Green et Ampt (Hillel D. et Gardner W. 1969, 1970; Ahuja L. R.1974, 1983; Parlange J. Y., Hogarth W. L. et Parlange M. 1984; Rawls W., Brakensiek D., Simanton J. et Kohl K. 1990; Vandervaere J. P., Vauclin M., Haverkamp R., Peugeot C., Thony J. et Gilfedder M. 1998).

f) Effet de la longueur du bassin versant :

Joel A., Messing I., Seguel O. et Casanova M. (2002) montrent que pour différents événements pluvieux le ruissellement par unité d'aire est plus faible pour la grande parcelle que pour la plus petite (figure 2.9).



- S-plot : 0.5m x 0.5m.
- L-Plot : 5m x 10m

Figure 2.9 : Ruissellement par unité d'aire moyenné pour chaque événement pour deux types de parcelles (Joel A., Messing I., Seguel O. et Casanova M., 2002).

Rainfall intensity : Intensité des précipitations.

Runoff intensity : Intensité de ruissellement.

Cet effet de la longueur de versant sur le ruissellement a été montré aussi dans plusieurs études sous pluies naturelles (Lal R., 1997; Van Giesen N. C., Stomph T. J. et Ridder N., 2000; Joel A., Messing I., Seguel O. et Casanova M., 2002; Esteves M. et Lapetite J. M., 2003; Parsons A. et Stone P., 2006).

L'interprétation de cette hypothèse est la réinfiltration : en supposant une distribution aléatoire de l'infiltration, l'eau qui coule du haut de la parcelle doit parcourir un chemin plus long pour atteindre l'exutoire que l'eau provenant du bas de la parcelle et donc à plus de «chance» de rencontrer une zone avec une plus grande capacité d'infiltration (Van de Giesen N. C., Stomph T. J. et de Ridder N. 2000; Wainwright J. et Parsons A. J. 2002). L'infiltration globale de la parcelle est donc, selon cette idée, plus importante pour une parcelle plus longue.

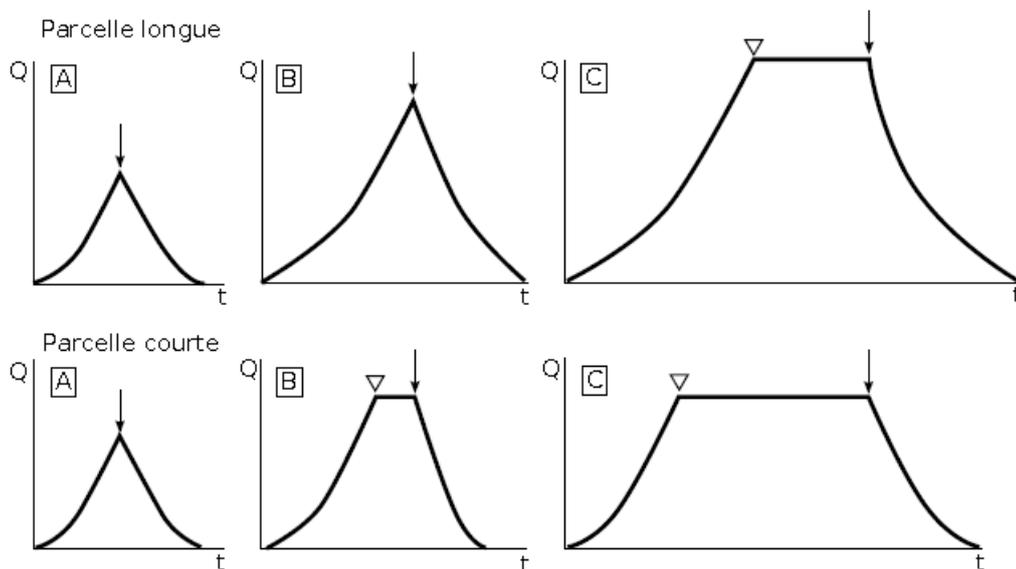
Dunne T., Zhang W. H. et Aubry B. F. (1991) notent que la lame d'eau est plus importante pour une grande longueur de parcelle que pour une petite et donc inonde des zones plus élevées de la microtopographie ; augmentant ainsi l'infiltration des plus grandes parcelles par rapport au plus petites (Fig. 2.10).

Julien P. Y. et Moglen G. E. (1990) déterminent la longueur minimale à laquelle le ruissellement est sensible à la variation spatiale des paramètres du sol et, donc au-

dessus de laquelle, on observe un effet de la longueur de parcelle sur le ruissellement. Cette longueur dépend notamment de la durée et de l'intensité de la pluie. De plus, ils observent que lorsque la durée de la pluie augmente, la variation spatiale des paramètres du sol a un effet plus faible sur le ruissellement. Cela soulève la question de l'importance de la dynamique de la pluie sur l'effet de la longueur de versant sur le ruissellement.

Stomph T. J., Ridder N. D. et van de Giesen N. C. (2001) montrent que l'effet de longueur n'est pas présent en régime permanent, Cela leur fait penser que cet effet est dû à la dynamique des pluies et non à la variabilité spatiale de l'infiltration.

La figure 2.10 (Van de Giesen N. C., Stomph T. J. et de Ridder N. 2000), met en évidence l'effet théorique de la durée d'un créneau de pluie sur le ruissellement de deux tailles de parcelle différentes.



- La flèche indique l'arrêt de la pluie.
- Le triangle l'atteinte du régime permanent.

Figure 2.10 : Schéma montrant l'évolution au cours du temps du débit à l'exutoire de deux parcelles de tailles différentes pour trois différentes durées de pluie (Van Giesen N. C., Stomph T. J. et Ridder N. 2000).

Dans le cas C, la parcelle la plus courte atteint le régime permanent avant la parcelle la plus grande car le temps de parcours depuis le haut de la parcelle est plus long sur une plus grande parcelle.

Dans le cas B, le régime permanent atteint pour la petite parcelle mais non atteint pour la grande, le ruissellement moyen par unité d'aire produit par la petite parcelle sera donc plus fort que pour la grande parcelle.

Dans le cas d'une pluie naturelle (cas A), le régime permanent n'est jamais atteint mais cela montre que le temps de réaction de la parcelle à la pluie a une influence sur le volume de ruissellement.

g) Nature et géologie du sol :

La géologie et la nature du sol influencent fortement la réponse hydrologique, car elles affectent l'écoulement souterrain. On peut donc observer de grandes ou de faibles contributions de l'écoulement souterrain à une rivière selon la nature des formations géologiques du profil hydrique, il est aussi possible que la nappe phréatique soit à un niveau tel que la rivière alimente continuellement en eau les aquifères souterrains.

Le cours d'eau peut être ou bien drainant et être alimenté en permanence par l'écoulement souterrain, ou bien affluent et alimentant alors les nappes aquifère, un cours d'eau peut aussi être affluent en période de crue et drainant en période d'étiage (Madi M., 2012).

h) Effet de la végétation

La couverture végétale réduit la quantité de ruissellement telle que montre (Hino M., Fujita K. et Shutto H., 1987; Dunne T., Zhang W. H. et Aubry B. F., 1991; Wainwright J., 1996; Braud I., Vich A. I. J., Zuluaga J., Fornero L. et Pedrani A., 2001; Angermann T., Wallender W. W., Wilson B. W., Werner I., Hinton D. E., Oliver M. N., Zalom F. G., Henderson J. D., Oliveira G. H., Deanovic L. A., Osterli P. et Krueger W., 2002; Esteves M. et Lapetite J. M., 2003; Fiener P. et Auerswald K., 2005; Pan C. Z. et Shangguan Z. P., 2006).

Par la formation des macros pores dans le sol, la végétation augmente considérablement la conductivité hydraulique du sol et réduit ainsi le ruissellement (Beven K. et Germann., 1982). Grésillon J. (1994) montre que sur une même parcelle, l'enlèvement de l'herbe et de ses racines réduit l'infiltration.

Par ailleurs, les parties aériennes de la végétation augmentent la rugosité du sol et donc augmentent la hauteur d'eau qui réduit la vitesse d'écoulement du ruissellement (Dunne T., Zhang W. H. et Aubry B. F., 1991). De plus, les parties aériennes sont

également impliquées dans l'interception de la pluie, réduisant ainsi la quantité d'eau atteignant la surface (Musy A. et Gigy C., 2004).

Enfin, la transpiration des plantes réduit également la teneur en eau dans le sol entre deux pluies, ce qui augmente le temps d'apparition du ruissellement. (Hino M., Fujita K. et Shutto H., 1987).

2.4.2. Modélisation du coefficient de ruissellement (CR):

Il n'y a aucun doute que ce coefficient est le plus difficile à identifier puisqu'il dépend de plusieurs paramètres dont nous citons par exemples ; la nature du sol (sable, argile, moelleux, ...), la couverture végétale (prairie, forêt, culture, ...), la pente du bassin versant, l'état de saturation du sol lié aux antécédents pluviométriques et de l'intensité de la pluie. Dans la littérature, il n'existe pas de formule mathématique explicitant les effets de ces paramètres sur le CR. Et en pratique, nous travaillons uniquement avec des abaques ou figures estimant la valeur du CR. Nous allons essayer de mettre en évidence certains d'entre eux.

a) Méthode des Résidus [5];

L'application de la méthode des résidus est simple mais elle reste subjective et s'effectue par tâtonnement [A.MEG2]. Elle se présente comme suit :

La hauteur des précipitations est supposée être le facteur principal.

-Etape 1 : Sur un diagramme, sont portés les points représentatifs des crues observées de coordonnées ; le coefficient de ruissellement en ordonnées et la hauteur de pluie en abscisses. A cette étape la corrélation est généralement faible. En effet, dans de nombreux cas, les points du début de la saison des pluies sont trop bas alors qu'on saison humide où les pluies sont fréquentes, le sol est proche de la saturation et les points sont au-dessus de la courbe de régression.

-Etape 2 : Sur un second diagramme, les résidus qui représentent l'écart des coefficients de ruissellement entre la courbe de régression et chacun des points représentatifs sont représentés en fonction d'un autre indice tel que l'humidité du sol correspondant. On obtient une seconde courbe qui coupe l'axe des abscisses en un point X_0 .

-Etape 3 : On corrige sur le premier diagramme la position de chaque point en retranchant ou ajoutant la valeur X_0 , donnée par la 2^{ème} courbe pour chaque crue. On

constitue ainsi un second nuage de points qui doit être plus serré à la courbe de corrélation que le premier.

-Etape 4 : Si on veut améliorer la corrélation, on applique de nouveau ce procédé au nouveau diagramme en choisissant un autre indice.

b) Méthode de Brunet –Moret (1965)

Brunet –Moret (1965) calculent le coefficient de ruissellement en fonction de la hauteur de la lame ruisselée (fig.2.11). Sur le nuage de points lame d'eau ruisselée en fonction de la pluie qui l'a générée, Ils tracent la courbe enveloppant des valeurs fortes (maximale ou presque) des lames ruisselées. Seules les averses à intensités moyennes et fortes sont considérées. Les intensités inférieures à une limite précise sont éliminées. A partir de cette enveloppe, on compte les écarts ΔH_R (l'écart entre la lame d'eau ruisselée et celle déduite par la courbe de corrélation) et on procède comme pour la méthode des résidus. L'amélioration de la corrélation peut porter aussi sur différents indices.

Cette méthode a été appliquée à quatre bassins versant d'une superficie inférieure à 10 km², et a donné d'excellents résultats et des coefficients de corrélation atteignant 0,99 (figure 2.11).

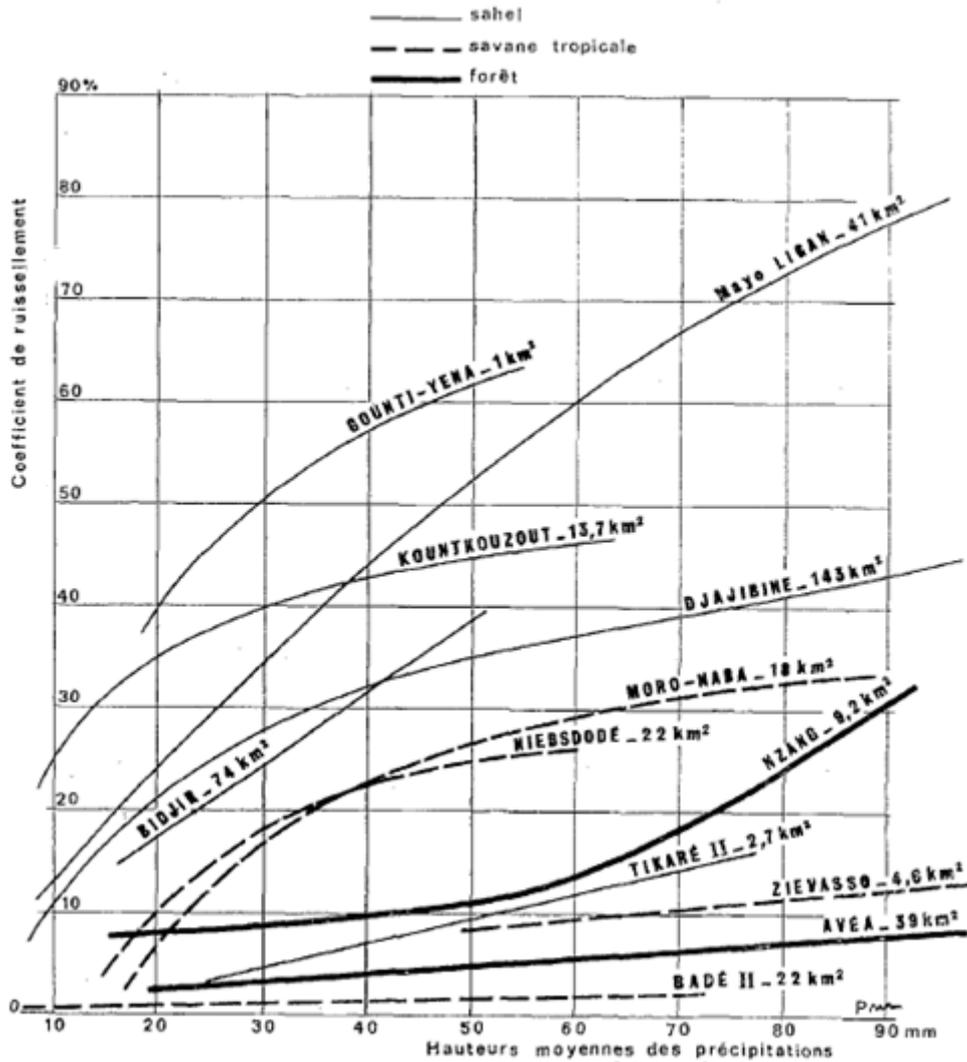


Figure 2.11 : Variations du coefficient de ruissellement en fonction de la hauteur moyenne des précipitations sur les bassins versants [6].

L'une des limites de la méthode de Brunet–Moret (1965) est qu'elle ne s'applique qu'au cas de bassins à courte saison sèche, avec sol assez perméable [6].

- c) Le tableau 2.2 permet de déterminer un coefficient de ruissellement d'un sol naturel en fonction de sa nature, de son occupation des sols et de sa pente. Ce coefficient est constant quelque que soit l'occurrence de la pluie.

Tableau 2.2. Coefficients de ruissellement [7].

Topographie et végétation	Texture du sol		
	Sable	Argile et limon	Argile compacte
Boisé			
Plat Pente 0-5%	0.10	0.30	0.40
Vallonné Pente 5-10%	0.25	0.35	0.50
Montagneux Pente 10-30%	0.30	0.50	0.60
Déboisé et friches			
Plat Pente 0-5%	0.10	0.30	0.40
Vallonné Pente 5-10%	0.16	0.36	0.55
Montagneux Pente 10-30%	0.22	0.42	0.60
Cultures drainées			
Plat Pente 0-5%	0.30	0.50	0.60
Vallonné Pente 5-10%	0.40	0.60	0.70
Montagneux Pente 10-30%	0.52	0.72	0.82

Le Ministère des Transports du Québec (MTQ) en 2004 effectue la classification hydrologique des sols à l'aide des cartes pédologiques (figure 2.12 et tableau 2.3). Les sols sont classifiés en cinq classes hydrologiques (AB, B, BC, C, CD) selon la texture des 15 premiers centimètres du sol [8].

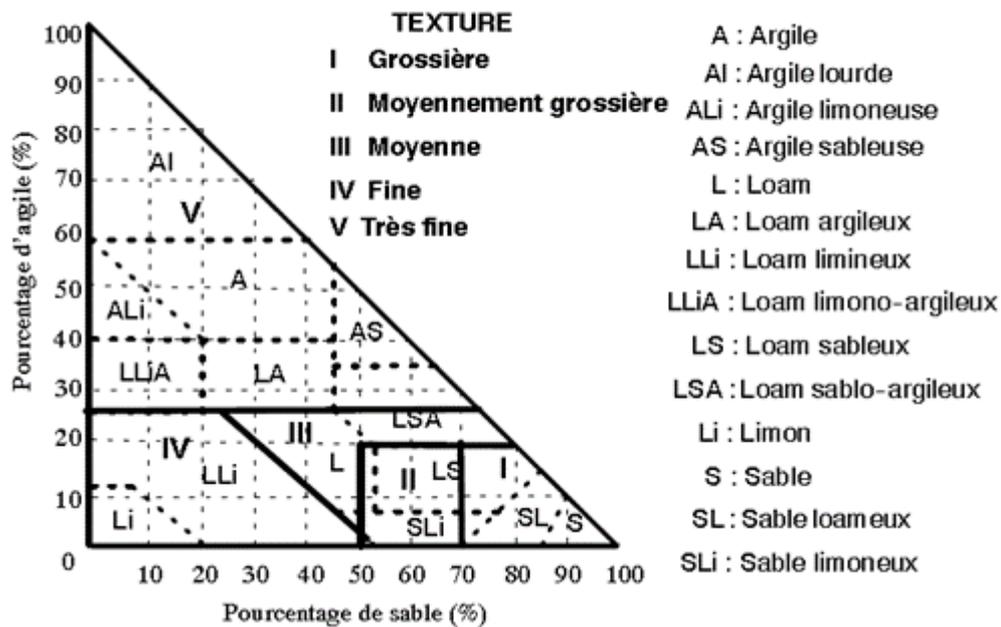


Figure 2.12 : Triangle de classification texturale des sols et classes de texture du MTQ(2004) [9].

Tableau 2.3 Classification hydrologique du MTQ des sols selon la texture du sol en surface (MTQ, 2004) [9].

Classe	Texture	Groupe
1.0	Texture de sol à prédominance grossière	AB
1.1	Gravier, sable et certains loams ¹ grossiers avec un bon drainage	B
1.2	Mince ² couche de gravier, sable et certains loams sableux sur argile ou sur roc	
2.0	Texture de sol à prédominance moyennement grossière	
2.1	Loam moyennement grossier, épais ³ qualifié de graveleux, schisteux et cherteux	AB
2.2	Loam moyennement grossier, épais ou mince couche sur roche ou sur argile	B
3.0	Texture de sol à prédominance moyenne	
3.1	Mince couche de loam moyen sur roc	B
3.2	Loam moyen épais qualifié de graveleux, schisteux ou cherteux	B
3.3	Loam moyen épais avec drainage ⁴ de bon à imparfait	B
3.4	Loam moyen épais avec mauvais drainage	BC
3.5	Loam moyen mince sur argile	BC
4.0	Texture de sol à prédominance fine	
4.1	Loam limoneux et loam fin avec drainage de bon à imparfait	BC
4.2	Loam limoneux et loam fin avec drainage mauvais	C
5.0	Texture de sol à prédominance très fine	C
5.1	Argile, loam argileux, loam argileux-limoneux, argile limoneuse	CD
5.2	Argile lourde	
	<p>1 - Parfois le terme «loam» est remplacé par «terre franche» et «limon»; il existe une certaine équivalence texturale entre les termes, mais il serait avantageux de classier précisément le sol à l'aide de ses pourcentages de sable et d'argile et du graphique de la classification texturale des sols.</p> <p>2 - «Mince» : sol organique ou minéral de moins de 500 mm d'épaisseur reposant sur le roc.</p> <p>3 - «Épais» : sol organique ou minéral de plus de 500 mm d'épaisseur reposant sur le roc.</p> <p>4 - «drainage» est pris ici dans le sens pédologique du terme, c'est-à-dire : bon drainage : bonne infiltration dans le sol.</p>	

Le coefficient de ruissellement est déterminé à base du système de classification des sols du MTQ (tableau 2.4).

Tableau 2.4 : Coefficients de ruissellement en zone rurale [10].

Végétation	Pente	Classification hydrologique				
		AB	B	BC	C	CD
Culture						
Plat	< 3 %	0,30	0,36	0,41	0,47	0,51
Vallonnée	3 - 8 %	0,34	0,43	0,51	0,59	0,67
Montagneux	> 8 %	0,43	0,51	0,61	0,67	0,73
Pâturage						
Plat	< 3 %	0,12	0,17	0,25	0,34	0,43
Vallonnée	3 - 8 %	0,17	0,25	0,33	0,43	0,51
Montagneux	> 8 %	0,22	0,39	0,47	0,56	0,64
Boisé						
Plat	< 3 %	0,09	0,15	0,21	0,29	0,37
Vallonnée	3 - 8 %	0,12	0,19	0,26	0,34	0,43
Montagneux	> 8 %	0,18	0,26	0,34	0,43	0,51
Lac et marécage		0,05				

d) Le tableau 2.5 ci-après fournit une grille de coefficients de ruissellement dressé par L'ANRH (Agence Nationale des Ressources Hydrauliques), où ce coefficient dépend de la taille du bassin, la pluviométrie journalière maximale et la catégorie du sol.

Tableau 2.5: La valeur du CR en fonction de la taille du bassin, la pluviométrie journalière maximal et la catégorie du sol (ANRH).

Catégorie des sols	Appellation des sols	Précipitation journalière maximale Pj (mm)	Surface des bassins versants (en km ²)				
			<0,1	>0,1 <2,0	>2,0 <10,0	>10,0 <100,0	>100,0
A	Sols argileux gras, croûtes et sols encroûtés	>0,8	0,80	0,70	0,65	0,65	0,60
		81 – 150	0,90	0,85	0,80	0,80	0,80
		151 – 200	0,95	0,90	0,90	0,90	0,90
		>200	0,95	0,95	0,95	0,90	0,90
B	Sols argileux, sols forestiers d'argile grise, sols argileux gris et lourds	>0,8	0,70	0,60	0,55	0,55	0,45
		81 – 100	0,80	0,75	0,70	0,65	0,65
		101 – 150	0,85	0,80	0,75	0,65	0,65
		151 – 200	0,85	0,85	0,80	0,70	0,70
>200	0,90	0,90	0,80	0,75	0,75		
C	Sols châtaîns lœss, sols carbonatés	>0,8	0,55	0,45	0,40	0,35	0,30
		81 – 150	0,65	0,55	0,50	0,45	0,40
		151 – 200	0,75	0,70	0,65	0,60	0,55
>200	0,8	0,75	0,70	0,65	0,60		
D	Limos sableux, sols marrons et gris marrons des zones steppiques et désertiques, sols gris limoneux – sableux.	>0,8	0,35	0,28	0,20	0,20	0,15
		80 – 150	0,45	0,35	0,25	0,25	0,20
		151 – 200	0,55	0,45	0,40	0,35	0,30
		>200	0,60	0,55	0,50	0,45	0,40

e) Méthode de Wischmeier :

Wischmeier présente le coefficient de ruissellement (CR) en fonction d'un facteur topographique (*a*), un facteur sol (*b*) et un facteur couvert végétal (*c*) :

$$CR = 1 - (a + b + c) \tag{2.11}$$

Où *a*, *b* et *c* sont définies par le tableau 2.6 .

Tableau 2.6 : la valeur des paramètres a, b et c [11].

Type de surface	Valeur
Topographie : facteur a	
Terrain plat, pente moyenne de 0,2 à 0,5 (m/km)	0,30
Terrain vallonné, pente moyenne de 2 à 4 (m/km)	0,20
Terrain montagneux, pente moyenne de 25 à 50 (m/km)	0,10
Sol : facteur b	
Argile compacte, imperméable	0,10
Mélange d'argile et de loam	0,20
Loam sableux bien aéré	0,40
Couvert végétal : facteur c	
Terrains cultivé	0,10
Boisés	0,20

Chapitre III

Les méthodes d'Analyse Multi Critères

LES MÉTHODES D'ANALYSE MULTI CRITÈRES

Introduction :

La gestion environnementale comporte plusieurs défis sociaux, économiques et écologiques liés aux usages et aux modes d'exploitation de la ressource : eau, sol et environnement (Katerjd N. et Hoflack P., 2004). Ces activités génèrent différents conflits qui mènent les décideurs à développer une réflexion globale sur la cohérence spatiale des activités économiques et aménagements des territoires. Les compétences managériales doivent fournir aux gestionnaires et décideurs les éléments de réflexion nécessaires pour faire les choix stratégiques et concentrer les moyens sur les systèmes de gestion les plus efficaces. Une lecture des critères de gestion par des représentations numériques (pondération et notation des différentes alternatives) s'avère être nécessaire pour la formulation des stratégies qui facilite le partage des convictions et aide à la prise de décision (Roy B., Bouyssou D., 1993). A cet effet des modèles d'analyse multicritère ont été développés pour fournir conseils et recommandations aux décideurs. Selon la nature des conflits sociétaux, une solution optimale est recherchée par l'analyse multicritère pour aboutir à une décision appropriée suite à une procédure de compromis (Roy B. et Bouyssou D., 1993).

Les méthodes AMC (Analyse Multi Critères) représentent un ensemble de méthodes permettant de regrouper plusieurs critères pour l'aide à la décision. Elles supposent que les solutions sont connues et la manière de choisir la meilleure solution dépend de la façon avec laquelle le décideur exprime ses préférences. Selon Vincke P. (1989), il n'existe pas de solution qui convient le mieux à toutes les suppositions. Le mot optimisation, ou plutôt solution optimale, n'a plus de sens le mot aide est plus approprié. Ces méthodes sont élaborées par un groupe diversifié de personnes ayant des perspectives différentes pour prendre les décisions complexes. Elles consistent à créer un cadre structuré pour la discussion et le débat et permettent de mettre en œuvre la décision finale (Saaty T.L., 2003).

3.1. Concepts et terminologies:

La définition et la formulation d'un problème de prise de décision commence

par sa structuration. D'après Belton et Stewart (2002), '*la structuration d'un problème est un processus visant à raisonner une issue, identifier les objectifs, buts, acteurs, actions, incertitudes,...*'

Dans les paragraphes suivants, nous présenterons les définitions les plus importantes à ce stade du processus de prise de décision.

3.1.1. Les acteurs :

Selon Roy (Roy B., 1985) « *un individu ou un groupe d'individus est acteur d'un processus de décision si, par son système de valeurs, que ce soit au premier degré du fait des intentions de cet individu ou groupe d'individus ou au second degré par la manière dont il fait intervenir ceux d'autres individus, il influence directement ou indirectement sur la décision. De plus, pour qu'un groupe d'individus soit identifié comme un seul et même acteur, il faut que, relativement au processus, les systèmes de valeurs, systèmes informationnels et réseaux relationnels des divers membres du groupe n'aient pas à être différenciés* ».

Parmi les acteurs se trouve les **intervenants** qui, par leurs interventions, modifient la décision en fonction du système de valeurs qu'ils portent. Les **agis** sont ceux qui subissent les conséquences de la décision, laquelle est censée prendre en compte leurs préférences (Roy B., Bouyssou D., 1993).

3.1.2. Les actions :

Une action est une représentation d'un élément de solution qui contribue à la décision (Taibi B., 2010), elle peut se présenter de différentes manières ; par exemple, une région, un site, un investissement, une offre, plans d'aménagement, etc...

Roy utilise le terme action potentielle ou alternative lorsqu'une action est réalisable, c.-à-d. une action dont la mise en œuvre en pratique est envisageable (Roy B. 1985).

En aide multicritère à la décision l'ensemble des alternatives A est généralement construit sous forme d'un ensemble ; $A = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$

3.1.3. Les objectifs :

L'objectif indique le sens de l'amélioration que le décideur veut apporter dans le

système lors du changement d'état. Les trois manières de poursuivre un objectif sont de l'optimiser, de le minimiser ou de la maintenir dans une situation donnée. Les exemples industriels typiques de ces cas sont : maximiser le profit, réduire les coûts ou maintenir l'équilibre économique.

3.1.4. Les critères (ou les agrégations):

Ce sont les éléments qui contribuent à juger une action dans le domaine considéré. Ces éléments peuvent être de deux types : des critères ou des contraintes.

Critère : C'est un facteur d'évaluation sur lequel on mesure et on évalue une action ; il est relié aux préférences du décideur (coûts, ressources humaines, sécurité, environnement, etc).

Contrainte : Il s'agit d'un facteur permettant de circonscrire et de limiter les actions considérées et peut aussi être appelé le critère d'admissibilité (par exemple, le site d'implantation d'une usine doit se situer au maximum à 600 mètres d'une auto route).

3.2. La problématique de décision :

Globalement le processus de décision peut être vu comme l'enchaînement des trois phases (Simon H.A.1960) :

- Phase de compréhension* : analyse de la situation et du problème ;
- Phase de modélisation* : formulation du problème (mise en évidence des écarts entre la situation actuelle et la situation objectée) et description des solutions potentielles ;
- Phase de sélection* : Le choix de la solution en fonction de critères spécifiques (objectifs, normes,...) ou abstraits (intuition, motivation, ...).

La problématique de la décision en AMC est la manière dont l'aide à la décision doit être envisagée (ROY B., 1985). Elle reflète les circonstances dans lesquelles le décideur pose le problème et traduit le type de la prescription qu'il souhaite obtenir. Roy (1985) a identifié quatre problématiques décisionnelles de référence : les problématiques de choix, les problématiques de tri, les problématiques de rangement et les problématiques de description.

3.2.1. Problématique de choix $P.a$:

Il s'agit de sélectionner un sous ensemble de « bonnes » alternatives aussi petit que possible de l'ensemble des alternatives A. Bien que l'action qui sera recommandée soit dans cet ensemble, cela ne signifie pas que la procédure de sélection utilisée est orientée vers cette solution. Elle consiste plutôt à éliminer les mauvaises actions.

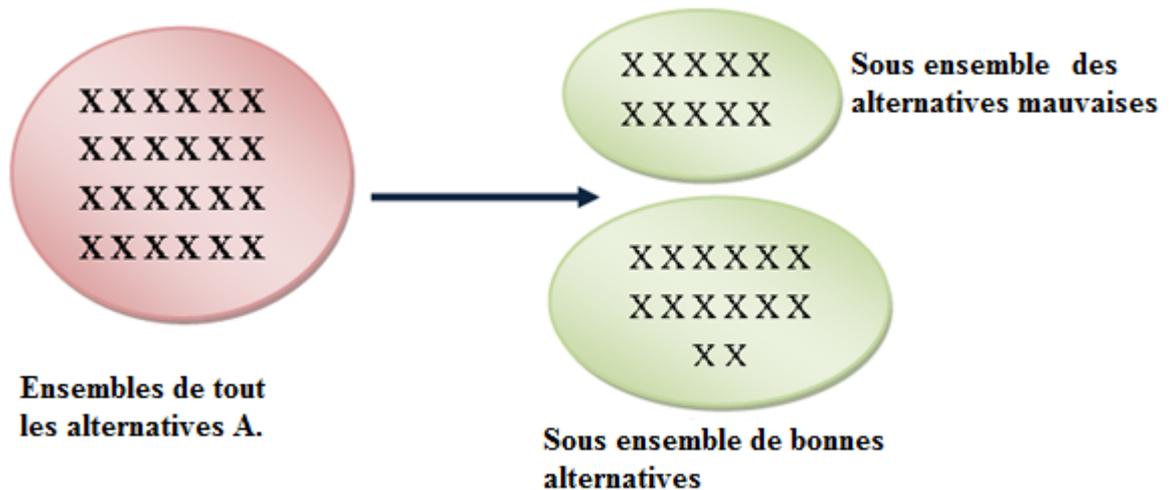


Figure 3.1 : Problématique de choix (Mousseau V. 1993).

3.2.2. Problématique de tri $P.\beta$:

Elle se base sur l'affectation de chaque action à un ensemble de catégories prédéterminées. Le choix de cette catégorie est justifié par le type de jugement que l'on souhaiterait adopter sur les actions et par les traitements que l'on voudrait effectuer. Par exemple, déterminer des catégories de confort pour les offres (inconfortable, confortable, très confortable).

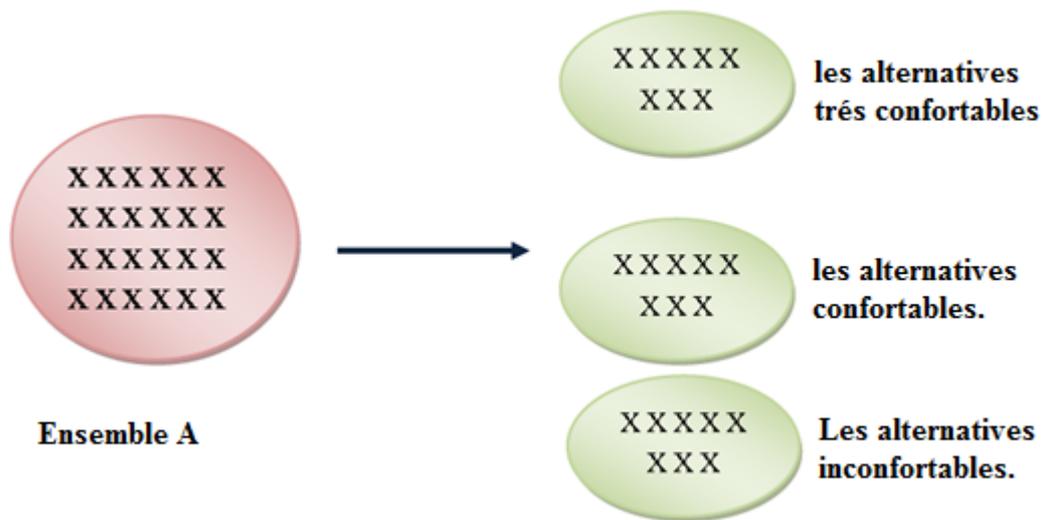


Figure.3.2 ; Problématique de Tri (Mousseau V. 1993).

3.2.3. *Problématique de rangement P γ* :

Elle permet de ranger différentes actions selon un rangement partiel ou total sur l'ensemble A.

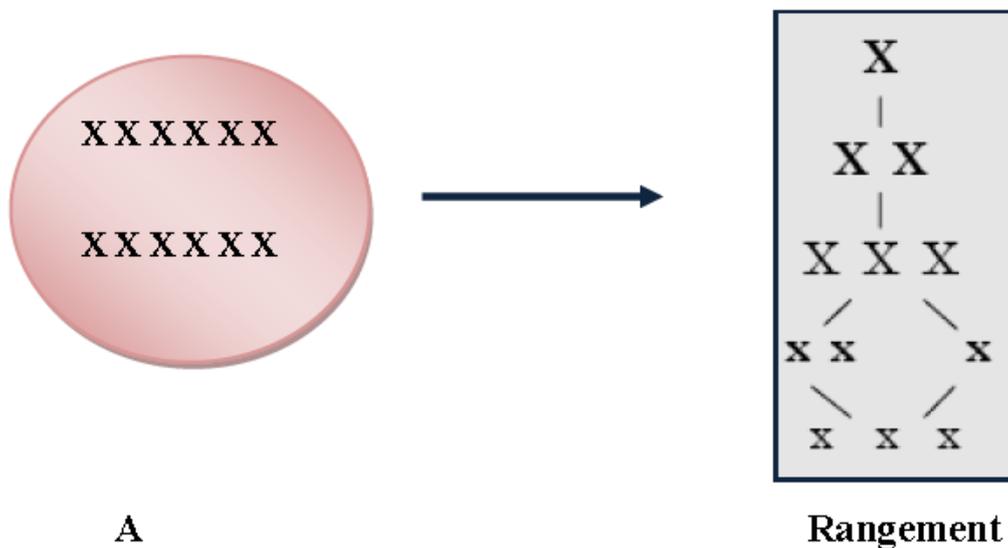


Figure 3.3 : Problématique de Rangement (Mousseau V. 1993).

3.2.4. *Problématique de description P δ* :

Son objectif est d'éclairer la décision en décrivant les actions et leurs conséquences plutôt que de les comparer comme c'est le cas avec les trois autres

problématiques précédentes. Ce type de problème est approprié lorsque le décideur a du mal à identifier le problème, à exprimer son point de vue ou le type de résultat qu'il souhaite obtenir.

3.3. Méthodes d'analyse multicritère d'aide à la décision

Les premières applications des méthodes AMC ont été implémentées dans la prise de décision environnementale :

- Gestion des ressources en eau (Anandalingam, G., et Olsson., 1989).
- Gestion des déchets nucléaires (Briggs Th., Kunsch P.L., Marschal, B. 1990).
- Implantation d'une centrale nucléaire. (Barda O.H., Dupuis J., Lencioni, P., 1990).
- Utilisation du processus d'analyse hiérarchie dans la planification des ressources en eau : sélection des projets de lutte contre les inondations (Willett K., Sharda R.,1991).

Depuis différentes méthodes ont été développées et généralisées à de nouvelles applications (tableau 3.1).

Tableau 3.1 : Exemples d'application de l'analyse multicritère.

Problématique	Références
Modélisation de la dégradation hydraulique et structurelle des réseaux sanitaires et pluviaux.	Ennaouri I., Fuamba M. (2010)
Un indice local de résilience aux catastrophes permettant d'évaluer les communautés côtières sur la base d'un processus d'analyse hiérarchique (AHP)	Orencio P.M., Fujii M. (2013).
Évaluation des facteurs affectant les risques pour la santé publique dus aux inondations dans l'état de Kassala, au Soudan	Abbas H.B., Routray J.K. (2014).
Application du processus d'analyse hiérarchique (AHP) dans l'évaluation des effets du transport solide en rivière	Hachoł J., Hämmerling M., Bondar-Nowakowska E. (2017).

Les méthodes d'analyse multicritère s'articulent sur une démarche commune :

- Identifier l'objectif général de la démarche et le type de décision.
- Dresser la liste des actions ou solutions potentielles.
- Identifier les critères qui orienteront les décideurs.
- Juger les solutions par rapport aux critères.

Dans la littérature, il existe deux grandes familles de méthodes d'aide multicritère à la décision. La première représente les méthodes de sur classement dont le principe consiste à comparer les alternatives par paires. La deuxième famille représente les méthodes utilisant un critère unique de synthèse dont le principe consiste à agréger les performances d'une alternative en un seul critère. Nous allons présenter dans cette section les deux familles de méthodes en illustrant les méthodes les plus connues.

3.3.1. Les méthodes de sur classement :

Le principe de ces méthodes est de comparer les actions deux à deux au moyen d'une relation de sur classement S . Selon Roy (1985) « *On dit qu'une alternative a surclasse une alternative b et on note $a S b$ si, étant donné ce que l'on sait des préférences du décideur, de la qualité des évaluations et de la nature du problème, il y a suffisamment d'arguments pour admettre que a est au moins aussi bonne que b et qu'il n'y a pas d'arguments importants prétendant le contraire.* » (Roy B., 1985).

Puis exploiter cette relation afin de fournir un résultat permettant de répondre à l'un des problèmes suivant : choix, tri ou rangement. Cependant, le résultat n'est pas nécessairement aussi précis qu'un pré ordre total car S n'est pas forcément transitive ou complète.

Le but de ces méthodes n'est pas de décrire une solution au décideur mais de clarifier son choix. C'est-à-dire, écarter les mauvaises solutions, définir les bonnes actions et détecter celles qui rendent la comparaison avec les autres difficile.

Ces méthodes passent par deux phases : la phase de la construction d'une relation de sur classement S et l'exploitation de cette dernière. Les différentes manières d'aborder ces deux phases ont conduit à l'apparition de plusieurs méthodes de sur classement. On peut nommer deux grandes familles : ELECTRE et PROMETHEE.

3.3.1.1. Les méthodes ELECTRE :

Les méthodes **EL**imination **Et** Choix **T**raduisant la **RE**alité (ELECTRE) ont été développées par Roy B (Roy B. 1968). Dans ces méthodes, le sur classement de l'action (a) sur (b) (aSb) repose sur deux principes : la concordance ; il faut qu'une majorité de critères, représentés par leurs poids, soient en faveur de a, et la non discordance, il ne faut pas qu'il y ait un critère qui s'oppose fortement au sur classement de (a) sur (b). L'exemple suivant illustre ces deux principes :

Exemple :

On veut comparer deux projets concurrents (a) et (b) pour réaliser une raffinerie en prenant en compte les critères : la nuisance sonore, la pollution de l'air et l'impact sur l'aménagement du territoire. Si l'alternative (a) a moins d'impact sur la nuisance

sonore et la pollution d'air que (b), et l'impact du projet (a) sur l'aménagement du territoire est nettement plus importante à celui de (b), bien qu'on ait une majorité des critères qui soient en faveur de (a) (principe de concordance), on ne pourrait pas affirmer que (a) surclasse (b) (aSb), d'où la nécessité, dans ce cas, d'un veto de la part du critère, impact sur l'aménagement du territoire sur l'assertion aSb.

Les principes de concordance et de non discordance dans les méthodes ELECTRE sont formalisés par la construction des indices de concordance et de discordance comme suit :

On considère un ensemble A de m actions, qui représentent l'objet de la décision. Le décideur doit définir un ensemble de critères $f = \{1,2, \dots, n\}$ destinés à modéliser ses préférences. Chaque action est appréciée sur le critère j à partir de l'estimation des diverses conséquences qu'elle entraîne au point de vue de ce critère. L'évaluation de l'action a_i sur le critère j est notée e_{ij} . Pour chaque critère j un seuil de préférence p_j , d'indifférence q_j et un seuil de veto v_j sont estimés. L'importance des critères dans la prise de décision est également évaluée par un ensemble de poids ; $\{\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_n\}$. Ces paramètres sont présentés dans un tableau appelé le tableau de performance. Voir tableau 3.2.

Tableau 3.2 : Tableau de performance.

		<i>Les critères</i>			
		C_1	C_2	...	C_n
<i>Les seuils</i>	Poids	π_1	π_2	...	π_n
	Seuils de préférences	P_1	P_2	...	P_n
	Seuils d'indifférences	q_1	q_2	...	q_n
	Véto	v_1	v_2	...	v_n
	a_1	e_{11}	e_{12}	...	e_{1n}
<i>Les actions</i>	a_2	e_{21}	e_{22}	...	e_{2n}

	a_m	e_{m1}	e_{m2}	...	e_{mn}

La concordance :

L'indice de concordance $c(a_i, a_k)$, associe au couple d'actions (a_i, a_k) représente l'importance de la coalition des critères qui sont en faveur de a_i au sens large. Son expression la plus simple est la suivante :

$$c(a_i, a_k) = \sum_{j \in C} \pi_j \quad (3.1)$$

Avec $\sum_{j=1}^n \pi_j = 1$ et $C = \{j \text{ tel que } e_{ij} \geq e_{kj}\}$

C ; est appelée coalition concordante.

Le non discordance :

La non discordance représente le fait qu'il ne devrait pas y avoir de critère dans lequel l'avantage de a_k sur a_i contredit l'affirmation $a_i Sa_k$. Dans les méthodes ELECTRE, un indice $d(a_i, a_k)$ est utiliser pour vérifier l'existence d'un critère qui émet un veto sur le sur classement de a_i par rapport à a_k . La formule la plus simple de cet indice est présentée comme suit :

$$d(a_i, a_k) \begin{cases} 0 & \text{si } \forall j, e_{ij} \geq e_{kj} \\ \frac{1}{E} * \max_{\{j \text{ tel que } e_{ij} < e_{kj}\}} |e_{kj} - e_{ij}| & \text{si non} \end{cases} \quad (3.2)$$

E est l'étendue de la plus grande échelle associée à l'un des critères ;

$$E = \max_{i,k,j} |e_{kj} - e_{ij}| \quad (3.3)$$

L'expression la plus générale de cet indicateur est donnée par l'équation (3.6).

Un des avantages des méthodes ELECTRE est qu'elles peuvent modéliser des aspects importants que l'on observe quand un décideur est interrogé sur ses préférences, qui sont l'incomparabilité et les préférences faibles.

L'incomparabilité :

Si on note $\neg a_i Sa_k$ le fait que : a_i ne surclasse pas a_k , l'incomparabilité 'R' entre deux alternatives a_i et a_k ($a_i Ra_k$) se traduit par : $a_i Ra_k \Leftrightarrow \neg a_i Sa_k$ et $\neg a_k Sa_i$.

Les préférences faibles :

Lorsque les performances e_{ij} et e_{kj} (respectivement des actions a_i et a_k) sont approximativement égaux, le décideur peut hésiter entre l'indifférence ou la préférence de a_i par rapport à a_k . Cela est dû à l'incertitude ou au manque d'information sur ses préférences. Pour modéliser cela, nous introduisons, pour chaque critère, les seuils d'indifférence q_j et de préférence p_j . L'équation (3.1) devient :

$$c^s(a_i, a_k) = \sum_{j \in C} [\pi_j * c_j(a_i, a_k)] \quad (3.4)$$

$$\text{Où } c_j(a_i, a_k) = \begin{cases} 1, & \text{si } e_{kj} - e_{ij} \leq q_j \\ \frac{e_{ij} - e_{kj} + p_j}{p_j - q_j}, & \text{si } q_j \leq e_{kj} - e_{ij} \leq p_j \\ 0, & \text{si non} \end{cases} \quad (3.5)$$

Et l'équation (3.2) devient (le sens de préférence des critères considérés est décroissant):

$$d_j^s(a_i, a_k) = \begin{cases} 1, & \text{si } e_{kj} - e_{ij} > v_j q_j \\ \frac{e_{ij} - e_{kj} + p_j}{p_j - q_j}, & \text{si } p_j \leq e_{kj} - e_{ij} \leq v_j q_j \\ 0, & \text{si non} \end{cases} \quad (3.6)$$

Une fois que la relation de sur classement est déterminée, elle est exploitée pour répondre à l'une des problématiques $P. \alpha, P. \beta$ et $P. \gamma$. Il existe au moins une version d'ELECTRE pour chacune d'eux et nous en proposerons certaines :

3.3.1.1.1. La méthode ELECTRE I (Roy B. 1968) :

Le but de cette méthode est de définir un ensemble (réduit) A^* contenant les meilleures alternatives parmi lesquelles se trouve celle que le décideur choisira. La relation de surclassement S est définie comme suit :

$$a_i S a_k \Leftrightarrow c(a_i, a_k) \geq s \text{ et } d(a_i, a_k) \leq t \quad (3.7)$$

Où s et t sont respectivement les seuils exigés de concordance et de discordance (Almeida A.T. 2005).

La procédure d'exploitation des relations de sur classement repose sur la recherche d'un sous- ensemble d'actions A^* appelé noyau tel que toute action qui n'est pas dans A^* est surclassée par au moins une action de A^* et les actions de A^* sont incomparables entre elles (Azzabi L., Ayadi D., Kobi A., Robledo C et Boujelbene Y. 2008).

Exemple : (Rogers M., Bruen M. and Maystre L-Y. 2000)

Le problème consiste à choisir un projet sur 6 projets concurrents pour réaliser une raffinerie. Chaque projet est évalué sur la base de 5 critères.

Cr_1 : La nuisance sonore.

Cr_2 : La séparation du territoire.

Cr_3 : La pollution de l'air.

Cr_4 : L'impact sur l'aménagement du territoire.

Cr_5 : L'impact sur les activités récréatives.

L'importance de chaque critère dans la prise de décision est traduite par un poids π_j . (Tableau 3.2)

Chaque projet est évalué selon les critères définis à l'aide d'une échelle qualitative et des scores. Plus le score est élevé, plus l'impact du projet sur l'environnement est faible (Tableau 3.3).

Tableau 3.3 : Tableau de performance des projets.*les critères.*

		<i>Cr1</i>	<i>Cr2</i>	<i>Cr3</i>	<i>Cr4</i>	<i>Cr5</i>
Le Poids ; π_j		0,3	0,2	0,3	0,1	0,1
<i>Les actions</i>	<i>P₁</i>	10	20	5	10	16
	<i>P₂</i>	0	5	5	16	10
	<i>P₃</i>	0	10	0	16	7
	<i>P₄</i>	20	5	10	10	13
	<i>P₅</i>	20	10	15	10	13
	<i>P₆</i>	20	10	20	13	13

La problématique à résoudre est de sélectionner un sous-ensemble de projets ayant le moins d'impact sur l'environnement.

Par conséquent, les équations (3.1) et (3.2) sont utilisées pour déterminer respectivement les indices de concordances et de discordances. Voir les tableaux 3.4 et 3.5.

Tableau 3.4 : Les indices de concordances.

	<i>P₁</i>	<i>P₂</i>	<i>P₃</i>	<i>P₄</i>	<i>P₅</i>	<i>P₆</i>
<i>P₁</i>	-	0.9	0.9	0.4	0.4	0.3
<i>P₂</i>	0.4	-	0.8	0.4	0.1	0.1
<i>P₃</i>	0.1	0.6	-	0.3	0.3	0.3
<i>P₄</i>	0.7	0.9	0.7	-	0.5	0.4
<i>P₅</i>	0.7	0.9	0.9	1.0	-	0.6
<i>P₆</i>	0.7	0.9	0.9	1.0	1.0	-

Tableau 3.5 : Les indices de discordances.

<i>Projets</i>	<i>P₁</i>	<i>P₂</i>	<i>P₃</i>	<i>P₄</i>	<i>P₅</i>	<i>P₆</i>
<i>P₁</i>	-	0.30	0.30	0.50	0.50	0.75
<i>P₂</i>	0.75	-	0.25	1.00	1.00	1.00
<i>P₃</i>	0.50	0.25	-	1.00	1.00	1.00
<i>P₄</i>	0.75	0.30	0.30	-	0.25	0.50
<i>P₅</i>	0.50	0.30	0.30	0.0	-	0.25
<i>P₆</i>	0.50	0.15	0.15	0.0	0.0	-

Pour un seuil ; $s = 0,9$ et $t = 0,15$, on obtient les résultats suivants : a_1 est incomparable et $a_6 S a_2$, $a_6 S a_3$, $a_6 S a_4$ et $a_6 S a_5$ (figure 3.4).

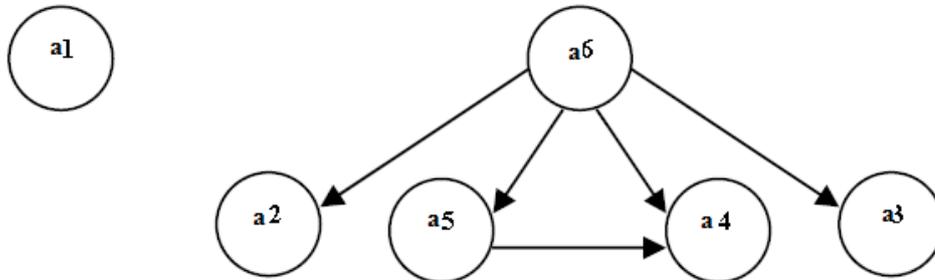


Figure 3.4 : Le sur classement des actions.

En conclusion, les projets à sélectionnés seront les projets a_1 et a_6 .

3.3.1.1.2. La méthode ELECTRE TRI :

Le but de la méthode est d'affecter des alternatives à des catégories (classes) ordonnées et prédéfinies $Cl_k : k = 1 \dots c$ (c ; est le nombre de catégories) et leurs frontière correspondant aux alternatives fictives appelées profils et qu'on note $b_k : k = 1, \dots, c - 1$.

Chaque alternative sera comparée aux frontières de chaque catégorie au moyen de la relation de surclassement S définie comme suit :

$$a S b_k \Leftrightarrow \sigma(a, b_k) \geq \lambda \tag{3.8}$$

Où λ est appelé seuil de crédibilité et $\sigma(a, b_k)$ indice de crédibilité donné par la formule suivante :

$$\sigma(a, b_k) = c^s(a, b_k) * \prod_{j \in \bar{c}} \frac{1 - d_j^s(a, b_k)}{1 - c^s(a, b_k)} \tag{3.9}$$

$$\bar{c} = \{j \text{ tel que } d_j^s(a, b_k) > c^s(a, b_k)\}$$

L'affectation d'une alternative « a » à une classe peut être exécutée avec l'une des deux procédures : procédure optimiste ou procédure pessimiste.

Procédure optimiste :

– l'alternative « a » est comparée successivement avec les profils b_k , en commençant par $k = 1$,

– cette procédure est arrêtée à la première valeur $k=h$ telle que :

$$b_h Sa \text{ et } \neg a S b_h \quad (3.10)$$

– si cette relation est vérifiée, l'alternative « a » est affectée à la catégorie Cl_h .

– s'il n'existe pas $k \in \{1, \dots, c-1\}$ pour lequel la relation (3.10) est vérifiée, alors l'alternative « a » est affectée à la catégorie Cl_c .

Procédure pessimiste :

– l'alternative « a » est comparée successivement avec les profils b_k , en commençant par ; $k=c-1$.

– cette procédure est arrêtée à la première valeur $k=h$ telle que : $a S b_h$

– s'il n'existe pas $k \in \{1, \dots, c-1\}$ pour lequel la relation (3.10) est vérifiée, alors l'alternative « a » est affectée à la catégorie Cl_1 , sinon elle est affectée à la catégorie Cl_{h+1} .

Lors de la comparaison d'une alternative « a » avec un profil b_k , quatre cas se présentent :

- 1) $a S b_k$ et $\neg b_k Sa$
- 2) $b_k Sa$ et $\neg a S b_k$
- 3) $a S b_k$ et $b_k Sa$
- 4) $\neg a S b_k$ et $\neg b_k Sa$

Le résultat de l'affectation par les deux méthodes ne diffère que dans le quatrième cas (in comparabilité avec un profil), l'alternative « a » est affectée à une catégorie supérieure avec la méthode optimiste.

Exemple [12] :

L'exemple traite de la mise en œuvre d'une démarche de gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement. En examinant les tronçons à travers des caméras, nous définissons un ensemble de cinq critères décrivant l'état des tronçons comme suit :

Cr_1 : Le bouchage du tronçon.

Cr_2 : L'effondrement de la paroi du tronçon.

Cr_3 : L'ensablement du tronçon.

Cr_4 : La détérioration de la capacité hydraulique.

C_{r5} : La présence d'infiltrations.

La problématique posée est de définir des classes homogènes de tronçons en fonction de leur état : « Bon », « Moyen » et « Mauvais ». On considère un ensemble de tronçon à classer, avec leurs performances définies dans les tableaux 3.6 et 3.7.

Tableau 3.6 : Evaluation des critères.

Tronçons	Critères				
	C_{r1}	C_{r2}	C_{r3}	C_{r4}	C_{r5}
T_1	2.63	5.26	52.63	84.21	26.32
T_2	0	0	492.31	492.31	0
T_3	0	10.13	20.25	20.25	405.06
T_4	0	0	0	0	0
T_5	0	210.53	280.7	280.7	1171.93

Deux profils b_1 et b_2 sont identifiés, où b_1 dessine la frontière entre la classe état « Bon » et état « Moyen », et b_2 la frontière entre la catégorie état « Moyen » et état «Mauvais ». La valeur de seuil et le poids des critères sont spécifiés dans le tableau 3.7

Tableau 3.7 : Définition des seuils et poids des critères.

	C_{r1}	C_{r2}	C_{r3}	C_{r4}	C_{r5}
$e_j(b_1)$	0.5	2.23	37.53	37.96	40.67
$q_j(b_1)$	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
$p_j(b_1)$	1	1	1	1	1
$e_j(b_2)$	7	29	126.7	128	300
$q_j(b_2)$	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
$p_j(b_2)$	1	1	1	1	1
Poids; π_j	0.1	0.35	0.1	0.1	0.35

L'utilisation de la méthode ELECTRE-TRI permet d'obtenir une affectation des tronçons selon les deux procédures : pessimiste et optimiste (Tableau 3.8).

Tableau 3.8 : L'affectation des tronçons, indice de coupe ; $\lambda=0.76$ [13].

Procédure d'affectation		
Tronçons	Procédure pessimiste	Procédure optimiste
T_1	Moyen	Bon
T_2	Bon	Bon
T_3	Mauvais	Moyen
T_4	Bon	Bon
T_5	Mauvais	Mauvais

3.3.1.1.3. La méthode ELECTRE III (Roy B.1978) :

La méthode ELECTRE III relève de la problématique de rangement ($P \gamma$). L'objectif premier de cette méthode sera de ranger les alternatives de la meilleure à la moins bonne. Le principe de la méthode ELECTRE III se base sur la construction d'une hypothèse de sur classement entre les actions. Les actions sont en effet comparées par paires (a, b). Cette relation est caractérisée par un degré de crédibilité du sur classement $\sigma(a, b)$ donné par l'expression (3.9). Deux pré classements sont ensuite construits par le biais de deux procédures de distillations ; descendante et ascendante.

La première relation est obtenue de manière descendante, en sélectionnant la meilleure action et en classant les autres actions de la meilleure à la moins bonne. La seconde se fait de manière ascendante, en choisissant d'abord la mauvaise action, et en classant de la plus mauvaise à la meilleure action. La construction des deux pré-ordres se base dans un premier temps sur la définition d'un niveau de coupe $\lambda \in [0,1[$ (on préconise $\lambda = \max_{a,b \in A} \{\sigma(a, b)\}$) et une relation de sur-classement nette notée S_A^λ définie par :

$$aS_A^\lambda b \Leftrightarrow \sigma(a, b) \geq \lambda - s(\lambda) \text{ et } |\sigma(a, b) - \sigma(b, a)| \leq s(\lambda) \quad (3.11)$$

Avec $s(\lambda) = 0,3 - 0,15\lambda$ valeurs préconisées.

Ensuite, pour chaque action a_i un nombre de qualification est calculé (appelé $Q(S_i)$), il correspond à la différence du nombre d'actions qui sont surclassées par a_i et le nombre d'actions qui sur classent a_i .

Les actions avec la meilleure qualification reçoivent le rang 1 et sont retirées des actions initiales.

La même procédure est répétée avec le nouvel ensemble d'actions : cela signifie également un nouveau degré maximal de crédibilité $s(\lambda)$, un nouveau nombre de qualification ($Q(S_i)$) et une nouvelle classification.

Ces processus successifs d'itérations constituent une procédure de distillation ascendante. En outre, une procédure de distillation descendante est effectuée, où les actions sont classées des plus mauvaises aux meilleures. Le croisement du résultat de ces deux distillations aboutit au classement final.

Exemple [14] :

Pour réaliser une extension d'une zone d'activité commerciale (ZAC), quatre scénarios ont été proposés. Chaque scénario est évalué en utilisant 5 critères pour mesurer l'impact du projet sur l'activité économique et l'environnement en mesurant les émissions de CO₂ associées à l'augmentation du nombre de fréquentation. Les critères à prendre en compte sont :

- C_{r1} : Coût du projet d'extension en milliers €
- C_{r2} : Durée de réalisation du projet en semaines.
- C_{r3} : Surface de la ZAC commerciale (en km²).
- C_{r4} : Nombre de Places de parking.
- C_{r5} : Emissions en CO₂ (kg par jours).

L'évaluation de chaque critère est donnée dans le tableau 3.9

Tableau 3.9 : Tableau de performance.

	C_{r1}	C_{r2}	C_{r3}	C_{r4}	C_{r5}
Scénario 1	103	7.65	17.13	352	880
Scénario 2	101.3	7.9	20.53	203	783
Scénario 3	156.4	7.9	22.17	391	815
Scénario 4	267.4	10.5	23.07	419	647
Sens de préférence	↘	↘	↗	↗	↘
indifférence	6%	1	2%	50	0
Préférence	10%	2	5%	100	50
Veto	15%	4			150
Poids	0.3	0.25	0.15	0.1	0.2

On utilise pour la résolution du problème posé, le logiciel ELECTRE III. A cet effet on définit les valeurs des coefficients α et β pour chaque critère, ainsi qu'un jeu de poids. Ces paramètres sont présentés dans le tableau 3.10.

Tableau 3.10 : Paramètre α/β pour les seuils d'indifférence, de préférence et de veto.

Indifférence	0.08/-2	0/1	0.02/0	0/50	0/0
Préférence	0.13/-3	0/2	0.05/0	0/100	0/50
Veto	0.9/50	0/4			0/150

L'utilisation de la méthode ELECTRE III permet d'obtenir les deux préordres suivants :



Figure 3.5 : Classement des scénarios.

D'après l'ordre obtenu, le scénario 2 (Sc2) semble être la meilleure solution pour l'extension ZAC, suivi de Sc4, Sc3 et enfin Sc1.

3.3.1.2. Les Méthodes PROMETHEE

La méthode **PROMETHEE** (**P**reference **R**anking **O**rganisation **M**ETHODs for **E**nrichement **E**valuation) a été proposée pour la première fois en 1985 par Jean Pierre Brans et Vincke (Brans J.P et Vincke Ph.1985). Elle permet de classer les alternatives des meilleures aux moins bonnes.

Ces méthodes sont basées sur la construction d'une relation de sur classement reflétant une intensité de préférence. Pour chaque action, une note et un poids sont attribués à chaque critère (tableau 3.2).

On commence par calculer des indices $F_j(e_j(a) - e_j(b))$ pour mesurer les intensités de préférence sur les critères j entre tout couple d'alternatives et pouvant prendre différentes formes. On peut mentionner certaines d'entre elles :

Si on pose $d_j = e_j(a) - e_j(b)$ alors :

$$F_j(d_j) = \begin{cases} 0 & \text{si } d_j \leq 0 \\ 1 & \text{si non} \end{cases} \quad (3.12)$$

$$F_j(d_j) = \begin{cases} 0 & \text{si } q_j \geq d_j \\ q_j \leq d_j & \text{si } q_j \leq d_j \leq p_j \\ 1 & \text{si } d_j \geq p_j \end{cases} \quad (3.13)$$

$$F_j(d_j) = 1 - e^{\frac{-d_j^2}{2s_j^2}} \quad (3.14)$$

Où q_j et p_j sont les seuils de préférence et d'indifférence.

On calcule ensuite pour chaque couple d'actions (a_i, a_k) ; les intensités de préférence multicritères : $P(a_i, a_k) = \sum_{j=1}^n \pi_j \cdot F_j(d_j)$ et pour chaque alternative a_i , les flux de sur classement sortants et entrants :

Sortant : il reflète le caractère de sur classement de a_i par rapport à $m-1$ autres alternatives, ou sa force. Il est d'autant plus grand que a_i surclasse fortement les autres alternatives.

$$\phi^+(a_i) = \sum_{a_k \in A, a_k \neq a_i} P(a_i, a_k) \quad (3.15)$$

Entrant : il exprime la faiblesse de a_i par rapport aux $m - 1$ autres alternatives. Il est d'autant plus petit que a_i est peu surclassée.

$$\phi^-(a_i) = \sum_{a_k \in A, a_k \neq a_i} P(a_k, a_i) \quad (3.16)$$

Toutes les phases d'exploitation se basent sur les valeurs $\phi^+(a_i)$ et $\phi^-(a_i)$.

Dans PROMETHEE I, nous obtenons un rangement partiel d'alternatives car il peut y avoir des incomparabilités dues au fait que la condition pour laquelle une alternative a_i surclasse a_k est assez forte :

$$a_i S a_k \Leftrightarrow \begin{cases} \phi^+(a_i) \geq \phi^+(a_k) \\ \text{et } \phi^-(a_i) \leq \phi^-(a_k) \end{cases} \quad (3.17)$$

On peut donc obtenir $\neg a_i S a_k$ et $\neg a_k S a_i$. En revanche, dans PROMETHEE II, il ne peut y avoir aucune incomparabilité, et le rangement des actions est obtenu selon l'ordre décroissant des flux nets $\phi(a_i)$ définis comme suit :

$$\phi(a_i) = \phi^+(a_i) - \phi^-(a_i) \quad (3.18)$$

3.3.2. Les méthodes de l'approche du critère unique de synthèse

Le principe de ces méthodes est de chercher une fonction g qui est le résultat de l'agrégation des performances : $e_1(a), e_2(a), \dots, e_n(a)$ d'une action a telle que :

$$g(a) = U(e_1(a), e_2(a), \dots, e_n(a))$$

Où U dite fonction d'agrégation qui modélise uniquement les situations :

– d'indifférence : $aIb \Leftrightarrow g(a) = g(b)$,

– de préférence : $aPb \Leftrightarrow g(a) > g(b)$.

Ces méthodes excluent donc l'in comparabilité des préférences ce qui donne une structure de pré ordre total sur A qui est un résultat facilement exploitable dans les diverses problématiques ($P.\alpha, P.\beta, P.\gamma$). Les travaux sur les méthodes multicritères de cette approche traitent les conditions d'agrégation, les formes spéciales de la fonction agréant et de la manière dont elles sont créées (Hammami A. 2003).

3.3.2.1. La méthode TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution):

La méthode **TOPSIS** est développée par Hwang et Yoon en 1981 (Hwang C.R, Yoon K.1981). Son principe est basé sur la recherche de l'alternative dont la distance à l'alternative idéale est la plus courte par rapport aux autres alternatives, et la distance à l'alternative anti- idéale est la plus éloignées par rapport aux autres (Méndez M. Galván B. Salazar D. et Greiner D. 2006).

Nous résumons les différentes étapes de la méthode TOPSIS comme suit :

-Etape 1 : Définir le tableau des performances (déterminer le poids de chaque critère (π_j) et l'importance e_{ij} de chaque action (a_i) par rapport à chaque critère C_j).

-Etape 2 : Normaliser les performances des critères :

$$e'_{ij} = \frac{e_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m [e_{ij}]^2}}, \quad i = 1, \dots, m \text{ et } j = 1, \dots, n \quad (3.19)$$

-Etape 3 : calculer ; $e''_{ij} = \pi_j * e'_{ij}$ (3.20)

-Etape 4 : Déterminer les profils idéal (a^+) et anti-idéal (a^-).

$$a^+ = \{e_1^+, e_2^+, \dots, e_n^+\} \quad \text{avec} \quad e_j^+ = \max_i \{e''_{ij}\} \quad (3.21)$$

$$\text{Et } a^- = \{e_1^-, e_2^-, \dots, e_n^-\} \quad \text{avec} \quad e_j^- = \min_i \{e''_{ij}\} \quad (3.22)$$

-Etape 5 : Calculer la distance euclidienne de chaque action par rapport aux profils (a^+) et (a^-).

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n [e''_{ij} - e_j^+]^2} \quad (3.23)$$

$$d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n [e''_{ij} - e_j^-]^2} \quad (3.24)$$

-Etape 6 : Calculer le coefficient de proximité (CC_i) et classer des alternatives.

$$CC_i = \frac{d_i^+}{d_i^+ + d_i^-} . \quad (3.25)$$

Une alternative a_i avec un coefficient de proximité (CC_i) proche de 1 indique que cette alternative est proche de a^+ et loin de a^- . De ce fait, le classement des alternatives se fait dans l'ordre décroissant des CC_i . L'alternative a_i avec le plus grand CC_i sera le choix le plus satisfaisant (Hammami A. 2003).

3.3.2.2. La méthode SMART (Simple Multi-Attribue Rating Technique) :

La méthode SMART développée par Edwards en 1971 (Edwards W. 1971) se présente comme suit :

-Etape 1 : Définir le tableau des performances (déterminer le poids de chaque critère (π_j) et mesurer l'importance e_{ij} de chaque action (a_i) par rapport à chaque critère C_j .

-Etape 2 : Déterminer la valeur de chaque action selon la somme pondérée suivante :

$$U(a_i) = \sum_{j=1}^n \pi_j e_{ij} \quad , \quad i = 1, \dots, m \quad (3.26)$$

-Etape 3 : Classer les actions selon l'ordre décroissant de $U(a_i)$ (Edwards W. 1971).

3.3.2.3. La méthode MAUT : (Multiple Attribute Utility Theory)

C'est une méthode développée en 1992 par Raph Keeney (Keeney R.L. 1992). Elle peut être mise en œuvre selon les étapes suivantes :

- **Étape 1** : Définir le tableau des performances (déterminer le poids de chaque critère (π_j) et l'importance e_{ij} de chaque action (a_i) par rapport à chaque critère C_j).

- **Étape 2** : vérifier l'hypothèse d'indépendance des critères au sens des utilités (Un critère C_1 est indépendant de C_2 au sens des utilités si les préférences pour des perspectives incertaines sur le critère C_1 ne dépendent pas des valeurs fixées pour C_2).

- **Étape 3** : construire les fonctions d'utilité partielle $u_j(e_{ij})$; elle mesure les préférences du décideur sur le critère j . Comme e_{ij} augmente avec la performance de l'alternative a_i sur le critère j , les fonctions u_j doivent être monotones et non décroissantes par rapport aux valeurs e_{ij} .

- **Étape 4** : calculer les valeurs d'utilités pour chaque action par rapport à chaque critère ;

- **Étape 5** : calculer l'utilité globale pour chaque action pouvant se présenter, par exemple, sous la forme :

$$g(a_i) = U_{a_i}(e_{i1}, e_{i2}, \dots, e_{in}) = \prod_{j=1}^n [1 + K \cdot \pi_j \cdot u_j(e_{ij}) - 1] / K \quad (3.27)$$

(K est une constante d'échelle).

- **Étape 6** : construire le pré ordre total sur l'ensemble des actions en suivant l'utilité globale décroissante.

3.3.2.4. La méthode AHP : (Analytic Hierarchy Process)

Le processus d'analyse hiérarchique est une technique structurée pour organiser et analyser des décisions complexes, basée sur les mathématiques et l'expérience. Elle a été développée par Thomas L. Saaty dans les années 1980 (Saaty T.L.1980) à la Wharton School of Business de l'université de Pennsylvanie.

Cette méthode est capable de résoudre un grand nombre de problèmes décisionnels de façon quantitative en élaborant un modèle d'aide à la décision, et Elle permet de convertir des comparaisons par paire établies sur une échelle sémantique (à 9 niveaux) en un vecteur de priorité.

Les étapes de la méthode AHP se présentent comme suit :

- **Étape 1** : on décompose le problème complexe en une structure hiérarchique. Cette structure pyramidale se compose toujours au sommet (niveau 0) du sujet de décision,

puis d'un niveau de critère de décision (niveau 1), puis d'un niveau des caractéristiques de ces critères (niveau2) ...Le dernier niveau est celui des actions.

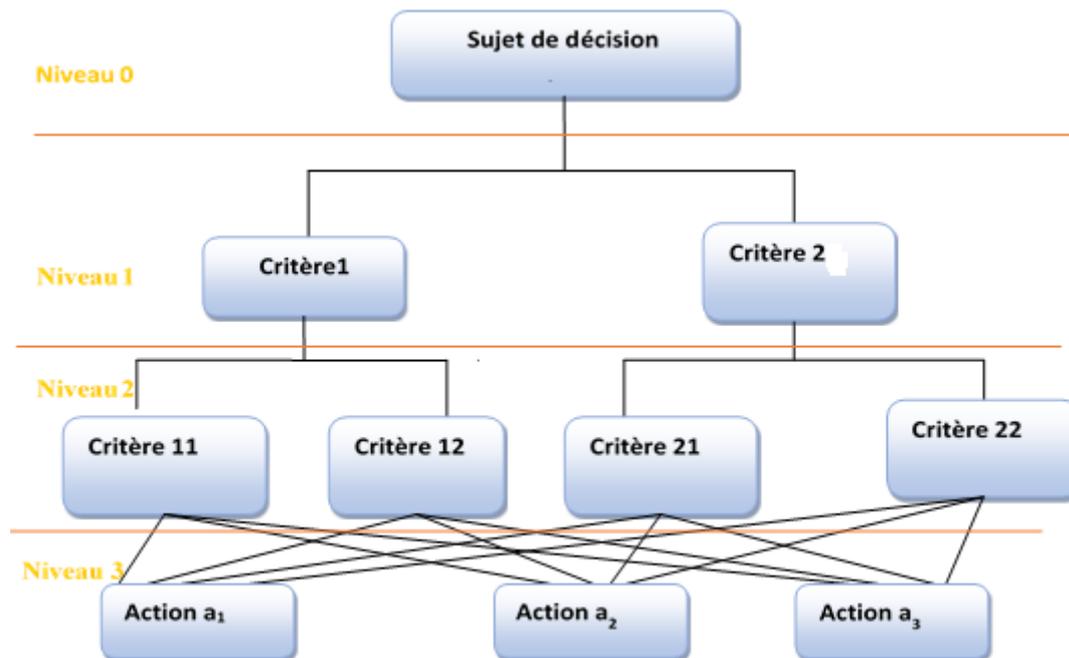


Figure3.6 : La structure hiérarchique.

Il n'y a pas de règle fermement établie pour construire une hiérarchie, cette construction dépend du type de décision qu'un individu ou un groupe d'individu doit prendre.

-Étape2 : Pour chaque niveau du sommet à la base hiérarchique, on doit comparer de manière binaire les critères deux à deux par rapport au critère supérieur en attribuant une note chiffrée sur une échelle prédéfinie (Saaty T. 2003).

Tableau 3.11 : Echelle de comparaison binaire de Saaty (Saaty T L., 2003).

Appréciation	Degré d'importance
Importance égale de deux critères	1
Faible importance d'un critère par rapport à un autre	3
Importance moyenne d'un critère par rapport à un autre	4
Importance forte d'un critère par rapport à un autre	5
Importance attestée d'un critère par rapport à un autre	7
Importance absolue d'un critère par rapport à un autre	9

2, 4, 6, 8 : valeurs intermédiaires entre deux jugements utilisé pour affiner le jugement.

Cette étape permet de construire des matrices de comparaisons (tableau 3.12).

Tableau 3.12 : Matrice des comparaisons binaires.

	Critère 1.1	Critère 1.2	...	Critère 1.n
Critère 1.1	<i>1</i>	<i>a₂₁</i>	...	<i>a_{n1}</i>
Critère 1.2	<i>a₁₂</i>	<i>1</i>	...	<i>a_{n2}</i>
...
Critère 1.n	<i>a_{1n}</i>	<i>a_{2n}</i>	...	<i>1</i>

Avec $a_{ji} = 1/a_{ij}$

Par convention, la comparaison se fait toujours des éléments de gauche (lignes) aux éléments supérieurs (colonnes), pour comparer les éléments, il faut se poser la question suivante : Dans quelle mesure l'un des éléments possède-t-il d'avantage ou domine, satisfait, profite, contribue-t-il au sujet de décision par rapport à l'autre ?

-Étape 3 : On établit le poids de chaque critère en procédant de la manière suivante :

- ✓ Dans la matrice on divise chaque élément par la somme de sa colonne :

$$b_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_i a_{ij}} \tag{3.28}$$

- ✓ On calcule ensuite la moyenne arithmétique des nombres sur chaque ligne. Chaque ligne correspond à un critère, la moyenne associée au critère définit son poids (p_i) par rapport au critère père (supérieur).

$$p_i = \frac{1}{n} \sum_j b_{ij} \tag{3.29}$$

n est le nombre des critères à comparer.

Et de cette manière on définit le poids de chaque critère dans la structure hiérarchique.

Remarque : La somme des poids des critères appartenant au même nœud d'arborescence est égale à « 1 ».

-Étape 4 : Cohérence des jugements ;

Dans un problème de décision, nos jugements seraient fondés sur des appréciations qui pourraient sembler aléatoire. Cependant, il est difficile de se tenir toujours à une cohérence parfaite, un des avantages majeurs de l'AHP est de pouvoir calculer Le ratio de cohérence RC dont la valeur doit être inférieure ou égale à 10% pour déduire que les jugements sont cohérents.

Pour calculer cet indice, Saaty propose de calculer l'indice de cohérence (IC)

$$IC = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \tag{3.30}$$

Avec λ_{\max} est la valeur propre maximale de la matrice de comparaison déduite de la manière suivante :

Tableau 3.13 : Calcul de λ_{\max} .

	Critère 1.1	Critère 1.2	...	Critère 1.n
Critère 1.1	$p_1 \times a_{11}$	$p_1 \times a_{12}$...	$p_1 \times a_{1n}$
Critère 1.2	$p_2 \times a_{21}$	$p_2 \times a_{22}$...	$p_2 \times a_{2n}$
...
Critère 1.n	$p_n \times a_{n1}$	$p_n \times a_{n2}$...	$p_n \times a_{nn}$
	$d_1 = \sum_i p_i \times a_{i1}$	$d_2 = \sum_i p_i \times a_{i2}$...	$d_n = \sum_i p_i \times a_{in}$

$$\text{et } \lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum_j d_j / p_j \tag{3.31}$$

En fin, le ratio de cohérence (RC) est défini par l'expression suivante :

$$RC = IC / RI \tag{3.32}$$

Où RI est l'indice de cohérence aléatoire issu par simulation (tableau 3.14).

Tableau 3.14 : L'indice aléatoire RI (Ennaouri I. 2010).

Nombre de critères : n	3	4	5	6	7	8	9	10	11
RI	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51

Remarque : Une valeur de RC inférieure à 10% est généralement acceptable, sinon, les comparaisons par paires doivent être révisées pour réduire les incohérences.

-Étape 5 : Etablir La performance relative de chaque action (Ayadi D. Azzabi L. Kobi A. Robledo C. Chabchoub H., 2008).

Conclusion :

Il existe toute une panoplie de méthodes d'AMC qui diffèrent. Le choix d'une méthode d'agrégation n'est pas facile, en effet, il n'existe pas une méthodologie bien précise pour faire ce choix, certains pensent même qu'il faut passer par un processus multicritère pour faire un choix qui reste toujours insatisfaisant (Guitouni A, Martel J-M, Vincke Ph.1999).

Guitouni et Martel (Guitouni, A., Martel J.M. 1998) remarquent que la plupart des analystes et chercheurs sont incapables de justifier le choix d'une méthode multicritère, c'est pourquoi, par familiarité ou affinité avec une méthode donnée, on justifie son choix.

Notre choix de la méthode AHP pour l'estimation du coefficient de ruissellement est basé sur les avantages suivants :

- La simplicité de la méthode.
- Les critères peuvent être d'aspect qualitatif ou quantitatif.
- Possibilité d'ajouter ou de retrancher des critères.
- Le nombre des critères et sous critères n'est pas limité.
- La seule méthode permettant de vérifier la cohérence des jugements entre critères.

Chapitre IV

La Démarche Fonctionnelle

LA DÉMARCHE FONCTIONNELLE

Introduction :

Ce chapitre est une présentation d'une démarche fonctionnelle permettant d'estimer le coefficient de ruissellement en intégrant autant de critères jugés pertinent pour la caractérisation du ruissellement superficiel. L'exemple permettant de visualiser l'élaboration de cette démarche, s'est effectué à partir des critères issus de résultats expérimentaux représentés sur des abaques utilisés dans l'estimation du coefficient de ruissellement. Un premier abaque est fonction de trois critères : le couvert végétal, le type de sol et la pente (Tableau 4.1). Le second s'articule sur la taille du bassin versant, la pluviométrie journalière maximale et les caractéristiques du sol (Tableau 4.2).

Tableau 4.1 : La valeur du CR en fonction du couvert végétal, type de sol et pente [15].

Couvert végétal	Pente (%)	Sable grossier	Terrain limoneux	Terrain argileux
Bois ou pâturage	$p < 5$	0,1	0,30	0,40
	$5 \leq p < 10$	0,25	0,35	0,50
	$10 \leq p < 30$	0,30	0,50	0,60
Culture	$p < 5$	0,30	0,50	0,60
	$5 \leq p < 10$	0,40	0,60	0,70
	$10 \leq p < 30$	0,52	0,72	0,82

Tableau 4.2 : La valeur du CR en fonction de la taille du bassin, la pluviométrie journalière maximal et la catégorie du sol (Agence Nationale des Ressources Hydrauliques ; ANRH).

Catégorie des sols	Appellation des sols	Précipitation journalière maximale Pj (mm)	Surface des bassins versants (en km ²)				
			<0,1	>0,1 <2,0	>2,0 <10,0	>10,0 <100,0	>100,0
A	Sols argileux gras, croûtes et sols encroûtés	>0,8	0,80	0,70	0,65	0,65	0,60
		81 – 150	0,90	0,85	0,80	0,80	0,80
		151 – 200	0,95	0,90	0,90	0,90	0,90
		>200	0,95	0,95	0,95	0,90	0,90
B	Sols argileux, sols forestiers d'argile grise, sols argileux gris et lourds	>0,8	0,70	0,60	0,55	0,55	0,45
		81 – 100	0,80	0,75	0,70	0,65	0,65
		101 – 150	0,85	0,80	0,75	0,65	0,65
		151 – 200	0,85	0,85	0,80	0,70	0,70
>200	0,90	0,90	0,80	0,75	0,75		
C	Sols châtaîns lœss, sols carbonatés	>0,8	0,55	0,45	0,40	0,35	0,30
		81 – 150	0,65	0,55	0,50	0,45	0,40
		151 – 200	0,75	0,70	0,65	0,60	0,55
>200	0,8	0,75	0,70	0,65	0,60		
D	Limons sableux, sols marrons et gris marrons des zones steppiques et désertiques, sols gris limoneux – sableux.	>0,8	0,35	0,28	0,20	0,20	0,15
		80 – 150	0,45	0,35	0,25	0,25	0,20
		151 – 200	0,55	0,45	0,40	0,35	0,30
		>200	0,60	0,55	0,50	0,45	0,40

La démarche passe par trois étapes schématisées dans l'organigramme (figure 4.1) et sera détaillée ultérieurement.

1. Estimation explicite du CR
2. Application de processus d'analyse hiérarchique (AHP).
3. L'intégration et combinaison de plusieurs critères dans l'estimation du CR.

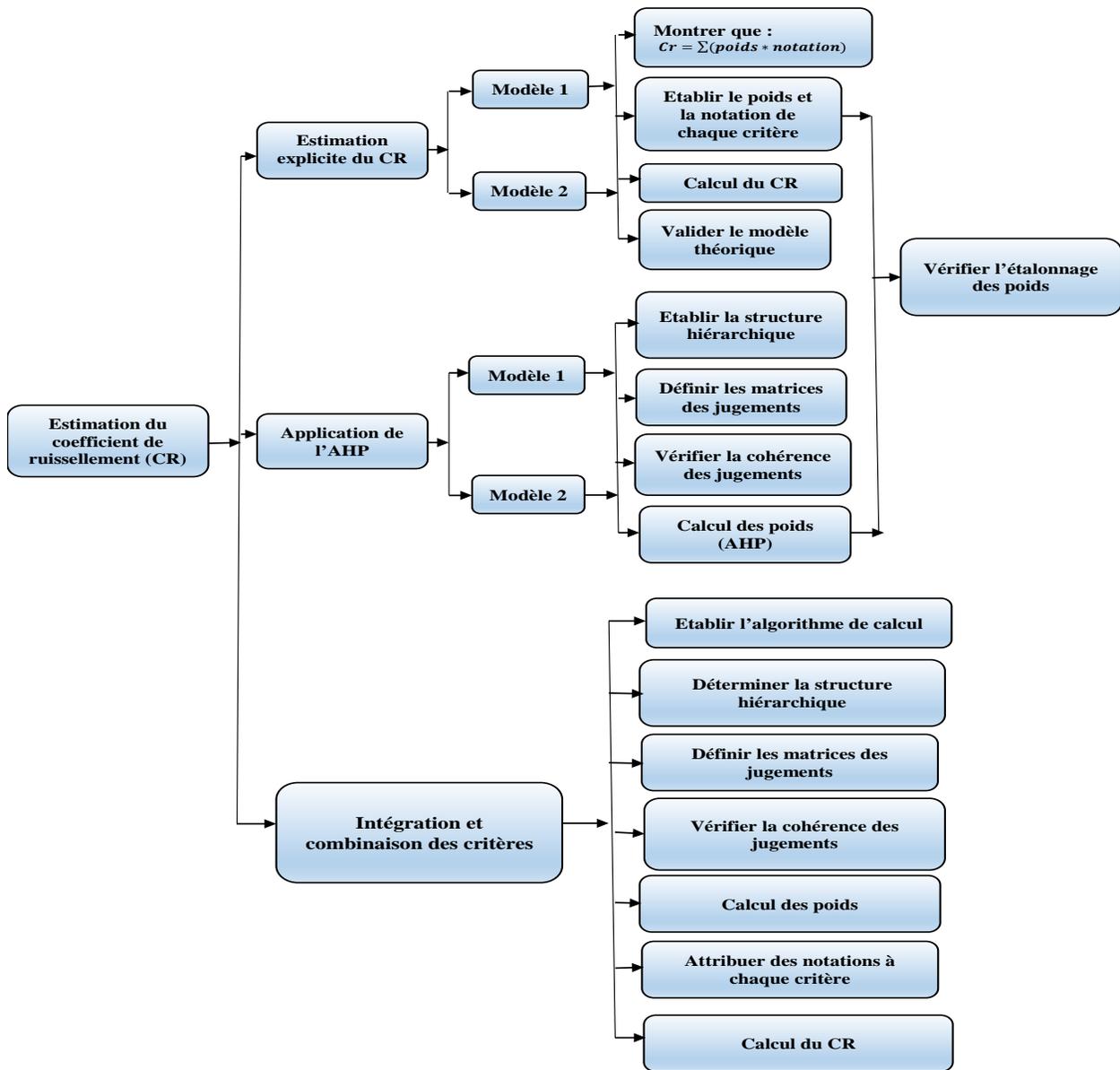


Figure 4.1 : Organigramme schématisant la démarche fonctionnelle du calcul du coefficient de ruissellement (CR).

4.1. Estimation explicite du CR :

4.1.1. Modélisation de l'abaque 1 :

A partir des résultats observés sur le terrain, l'abaque 1 (tableau 4.1) résume l'estimation du coefficient de ruissellement (CR) en fonction de trois critères, le couvert végétal (C_c), le type de sol (C_t) et la pente (C_p).

Notre tâche consiste à déterminer un poids P et des notations N attribués à chacun des trois critères pour lesquels le CR est défini par l'équation suivante :

$$CR = (C_c + C_t + C_p) / 10 \quad (4.1)$$

$$\text{Où } C_t = P_t \cdot N_t \quad (4.2)$$

$$C_c = P_c \cdot N_c \quad (4.3)$$

$$C_p = P_p \cdot N_p \quad (4.4)$$

P_t , P_c et P_p : sont (respectivement) les poids des critères ; type de sol, couvert végétal et la pente.

N_t , N_c et N_p : représentent (respectivement) les notations des critères; type de sol, couvert végétal et la pente.

Les poids P avec des valeurs entre 0 et 1, sont des paramètres intrinsèques qui caractérisent le bassin versant et sont donc considérés des invariants. Les notations N sont des valeurs entières entre 0 et 10 qui varient suivant la variation du critère considéré sur le coefficient de ruissellement (CR).

4.1.1.1. Procédure d'estimation des poids P et des notations N :

a) *Estimation explicite du critère « type de sol » :*

Le poids et la notation sont calculés en fonction du couvert végétal et de la pente. On choisit par exemple un couvert végétal de bois ou pâturage et une pente inférieure à 5%. De ce fait, une notation extrême est attribuée aux estimations extrêmes pour les deux critères fixés. Pour un sable grossier, le processus d'infiltration sera maximum, auquel cas 0 est affecté au paramètre N_t .

Des équations (4.1), (4.2) et du tableau 4.1, on trouve que :

$$C_c + C_p = 1 \quad (4.5)$$

D'après le tableau 4.1, sur un terrain argileux, l'infiltration est minime et très favorable au ruissellement, ainsi une notation de 10 est affectée à N_t . Du tableau 4.1, des équations (4.1), (4.2), (4.5) et de la valeur de N_p , un poids $P_t=0.3$ est attribué au critère type de sol. L'utilisation de ces résultats permet d'estimer la notation $N_t=7$ pour un terrain limoneux.

Remarque : Les mêmes poids et notations sont obtenus en considérant les différents types de sol et différents couverts végétaux.

b) *Estimation explicite du critère « pente » :*

Comme précédemment, pour une lecture explicite du critère « pente », les deux autres critères, couvert végétal et type de sol sont fixés. Exemple, on considère un couvert végétal de bois ou pâturage et un terrain argileux.

Pour une pente inférieure à 5%, la notation attribuée à la pente est nulle, $N_p=0$, car une pente faible génère un ruissellement minime. Des équations (4.1), (4.4) et du tableau.4.1 on trouve que :

$$C_c + C_t = 4 \quad (4.6)$$

Selon le tableau 4.1, une pente supérieure à 10% est susceptible de générer un fort ruissellement superficiel, d'où une notation $N_p=10$. Du tableau 4.1, des équations (4.1), (4.4), (4.6) et de la valeur de N_p , un poids, $P_p=0.2$ est attribué à la pente. L'utilisation des valeurs trouvées, permet d'estimer la notation $N_t=5$ pour une pente entre 5 et 10%.

Remarque .: Les autres types de sol et de couvert végétaux donneront le même poids et les mêmes notations.

c) *Estimation explicite du critère « couverture végétale » :*

Pour un couvert végétal en bois ou pâturage et un sol en sable grossier avec une pente inférieure 5%, les notations pour le type de sol et la pente sont nulles, $N_t=0$ et $N_p=0$, soit ($C_t=0$ et $C_p=0$). Ainsi, on a l'équation suivante :

$$CR.10=C_c \quad (4.7)$$

Si N_{c1} est la notation du bois ou pâturage alors du tableau.4.1 et de l'équation (4.7) on a :

$$N_{c1} P_c = 1 \quad (4.8)$$

$$\text{Donc } N_{c1} = \frac{1}{P_c} = \frac{10}{10.P_c}$$

Et comme $N_{c1} \in \mathbb{N}$ alors, $10.P_c$ est un diviseur de 10.

Ou bien $P_c \in \{0.1, 0.2, 0.5, 1\}$

Nous excluons le cas où $P_c = 1$ car : $P_c + P_t + P_p \leq 1$.

Si N_{c2} est la notation du critère culture, du tableau 4.1 et d'équation (4.7) on a :

$$N_{c2} = \frac{3}{P_c} \quad (4.9)$$

Et comme ; $N_{c2} \leq 10$ alors

$$P_c \geq 0.3 \quad (4.10)$$

Nous excluons ainsi les cas ; $P_c = 0.1$ et $P_c = 0.2$.

En conclusion le poids associé au critère couvert végétal est ; $P_c = 0.5$

Et de (4.8) et (4.9) on a respectivement, $N_{c1} = 2$ et $N_{c2} = 6$

Le tableau 4.3, résume les poids et notations attribués aux critères de l'abaque n°1

Tableau.4.3 : Poids et notation des critères (Abaque 1).

Critère	Poids	Caractéristiques	Notation	
Couvert végétal	$P_c = 0.5$	Bois ou pâturage	N_c	2
		Culture		6
Type de sol	$P_t = 0.3$	Sable grossier	N_t	0
		Terrain limoneux		7
		Terrain argileux		10
Pente	$P_p = 0.2$	$p < 5$	N_p	0
		$5 \leq p < 10$		5
		$10 \leq p < 30$		10

4.1.1.2. Calcul du CR :

La substitution des poids et notations présentés dans le tableau 4.3 dans l'équation 4.1 permet d'estimer le coefficient du ruissellement (voir le tableau 4.4).

Tableau 4.4 : la valeur théorique du CR (Modèle 1).

Couvert végétal	pente	Sable grossier	Terrain limoneux	Terrain argileux
Bois ou pâturage	$p < 5$	0,1	0,30	0,40
	$5 \leq p < 10$	0,2	0,4	0,50
	$10 \leq p < 30$	0,30	0,50	0,60
culture	$p < 5$	0,30	0,50	0,60
	$5 \leq p < 10$	0,40	0,60	0,70
	$10 \leq p < 30$	0,5	0,7	0,8

4.1.1.3. Validation du modèle théorique :

L'ajustement linéaire (figure 4.2) entre la valeur pratique et la valeur théorique du CR illustre la conformité de notre modèle théorique ($Y=0,9985 X$ avec $R^2 = 0,9875$).

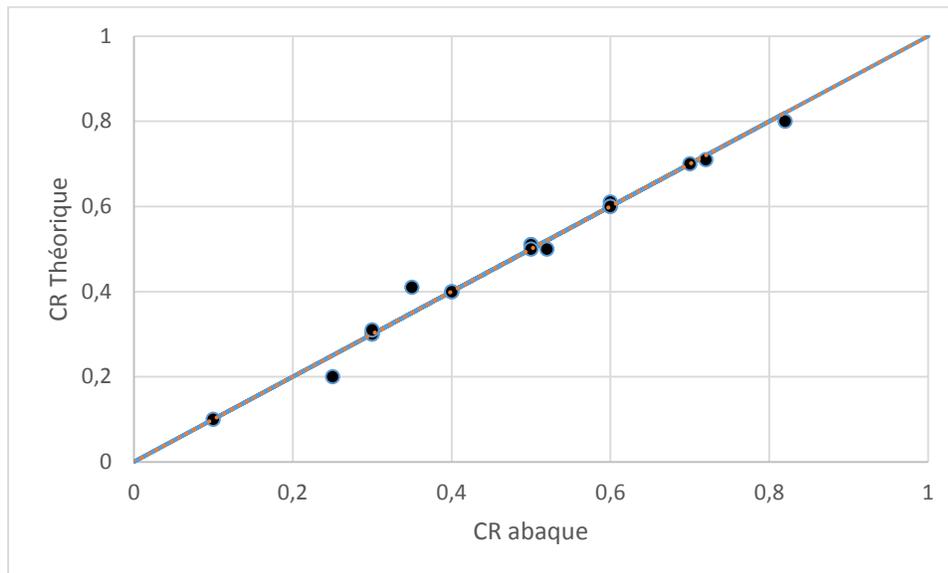


Figure 4.2 : Comparaison entre les valeurs du coefficient de ruissellement issu de l'abaque 1 et des valeurs théoriques par estimation explicite des critères.

4.1.2. Modélisation de l'abaque 2 :

Dans cette étape, on considère l'abaque 2 (tableau 4.2) dressée par L'ANRH, où le coefficient de ruissellement dépend de la taille du bassin, la pluviométrie journalière maximale et la catégorie du sol.

En utilisant la même méthodologie que dans l'abaque 1, nous allons déterminer l'impact de chaque critère sur le CR.

Les mêmes observations sont conservées comme dans l'abaque 1, où le CR est la somme de trois coefficients ; la pluviométrie (C_{pl}) ; la catégorie de sol (C_{ca}) et la taille du bassin (C_s).

$$\text{Avec CR} = (C_{pl} + C_{ca} + C_s)/10 \quad (4.11)$$

Et chacun de ces coefficients dépend d'un poids P et une notation N ;

$$C_{ca} = P_{ca} \cdot N_c \quad (4.12)$$

$$C_s = P_s \cdot N_s \quad (4.13)$$

$$C_{pl} = P_{pl} \cdot N_{pl} \quad (4.14)$$

Où

P_{ca} , P_s et P_{pl} : sont (respectivement) les poids des critères catégorie des sols, surface du bassin et la pluviométrie journalière maximale.

N_{ca} , N_s et N_{pl} : présentent (respectivement) les notations des critères catégorie des sols, surface du bassin et la pluviométrie journalière maximale.

4.1.2.1. Procédure d'estimation des poids et des notations :

a) Estimation explicite du critère « surface du bassin versant »

On choisit la catégorie C des sols et $0.80 < P_j \leq 80$.

Pour une surface S supérieure à 100 Km^2 , le processus d'infiltration sera maximum, auquel cas 0 est affecté au paramètre N_s .

Du tableau 4.2 et de l'équation (4.11), on a ;

$$C_{pl} + C_{ca} = 3 \quad (4.15)$$

Si on considère une surface $S < 0.1 \text{ Km}^2$, l'infiltration est minime et très favorable au ruissellement, une notation de 10 est affectée à N_s .

Des équations (4.11), (4.13) et (4.15) et du tableau 4.2 on trouve : $P_s = 0.25$

C'est résultats permet d'estimer les notations suivantes :

Pour $0.1 \text{ Km}^2 < S < 2 \text{ Km}^2$; $N_s = 6$.

Pour $2 \text{ Km}^2 < S < 10 \text{ Km}^2$; $N_s = 4$.

Pour $10\text{Km}^2 < S < 100\text{Km}^2$, $N_s=2$.

b) Estimation explicite du critère « catégorie du sol » :

Comme précédemment, pour une lecture explicite du critère 'catégorie du sol', les deux autres critères, Précipitation journalière (P_j) et surface sont fixés (S). Exemple, on considère un P_j entre 80 mm et 150 mm et S inférieure à 0.1 Km^2 .

Pour un type de sol de catégorie A la notation attribuée à N_{ca} est 10, car l'infiltration est minimale. Des équations (4.11), (4.12) et du tableau.4.2 on a :

$$9 = C_{pl} + C_s + 10 \cdot P_{ca} \quad (4.16)$$

De même, un type de sol de catégorie D est susceptible de générer un faible ruissellement superficiel d'où l'hypothèse ; $N_{ca}=1$ et on trouve que :

$$4.5 = C_{pl} + C_s + 1 \cdot P_{ca} \quad (4.17)$$

(4.16)- (4.17) donne ; $P_{ca} = 0.5$ et $C_{pl} + C_s = 4$

C'est résultats permet d'estimer les notations suivantes :

$N_{ca}=8$; Si le type de sol est de catégorie B.

$N_{ca}=5$; Si le type de sol est de catégorie C.

c) Estimation explicite du critère « précipitation journalière maximale » :

On fixe les critères ; catégorie du sol de type A ($C_{ca} = 5$) et une surface inférieure à 0.1km^2 ($C_s=2.5$).

Une précipitation journalière maximale supérieure à 200 mm est susceptible de générer un fort ruissellement superficiel, d'où une notation $N_{pl}=10$ est attribuée à cette situation. Des équations (4.11), (4.14) et du tableau.4.2 un poids, $P_{pl}= 0.25$ est estimé au critère précipitation journalière maximale.

L'utilisation des valeurs trouvées, permet d'estimer :

- $N_{pl} = 2$; Si $0.8\text{mm} < P_j \leq 80 \text{ mm}$
- $N_{pl} = 6$; Si $80 \text{ mm} < P_j \leq 150 \text{ mm}$
- $N_{pl} = 8$; Si $150 \text{ mm} < P_j \leq 200 \text{ mm}$

Remarque : Les autres types de sol et de surfaces donneront le même poids et les mêmes notations.

Le tableau.4.5 résume les poids et notations attribués aux critères de l'abaque n°2.

Tableau 4.5 : Poids et notations des critères (abaque n°2)

Critères	Poids	Caractéristiques	Notation
Précipitation journalière max (P_j ;mm)	0.25	$0,80 < P_j \leq 80$	2
		$80 < P_j \leq 150$	6
		$150 < P_j \leq 200$	8
		$P_j \geq 200$	10
Surface (S ;Km ²)	0.25	$S \leq 0,1$	10
		$0,1 < S \leq 2$	6
		$2 < S \leq 10$	4
		$10 < S \leq 100$	2
		$S > 100$	1
catégorie du sol	0.5	Type A	10
		type B	8
		type C	5
		type D	1

4.1.2.2. Calcul du CR :

La substitution des poids et notations présentés dans le tableau 4.3 dans les équations ; (4.11) , (4.12), (4.13), (4.14) permet de déterminer le coefficient du ruissellement. Les résultats acquis sont présentés dans le tableau 4.6.

Tableau 4.6 : La valeur théorique du CR (modèle 2).

Catégorie des sols	Appellation des sols	Pj max (mm)	Surface du bassin versant (en km ²)				
			S≤0,1	0,1<S≤2	2<S≤10	10<S≤100	S>100
A	Sols argileux gras, croûtes et sols encroûtés	0,80<Pj≤ 80	0,8	0,7	0,65	0,6	0,58
		80<Pj≤ 150	0,9	0,8	0,65	0,7	0,68
		150<Pj≤ 200	0,95	0,85	0,7	0,75	0,73
		Pj>200	1	0,9	0,75	0,8	0,78
B	Sols argileux, sols forestiers d'argile grise, sols argileux gris et lourds	0,80<Pj≤ 80	0,7	0,6	0,55	0,5	0,48
		80<Pj≤ 150	0,8	0,7	0,65	0,6	0,58
		150<Pj≤ 200	0,85	0,75	0,7	0,65	0,63
		Pj>200	0,9	0,8	0,75	0,7	0,68
C	Sols châtaîns lœss, sols carbonatés	0,80<Pj≤ 80	0,55	0,45	0,4	0,35	0,325
		80<Pj≤ 150	0,65	0,55	0,5	0,45	0,425
		150<Pj≤ 200	0,7	0,6	0,55	0,5	0,475
		Pj>200	0,75	0,65	0,6	0,55	0,525
D	Limons sableux, sols marrons et gris marrons des zones steppiques et désertiques, sols gris limoneux – sableux.	0,80<Pj≤ 80	0,35	0,25	0,2	0,15	0,13
		80<Pj≤ 150	0,45	0,35	0,3	0,25	0,23
		150<Pj≤ 200	0,5	0,4	0,35	0,3	0,28
		Pj>200	0,55	0,45	0,4	0,35	0,33

Pj : Précipitation journalière maximale.

4.1.2.3. Validation du modèle théorique :

L'ajustement linéaire (Figure 4.3) entre la valeur pratique et la valeur théorique du CR illustre la conformité de notre modèle théorique ($y = 1,0573x + 0,0129$ avec $R^2 = 0,9538$).

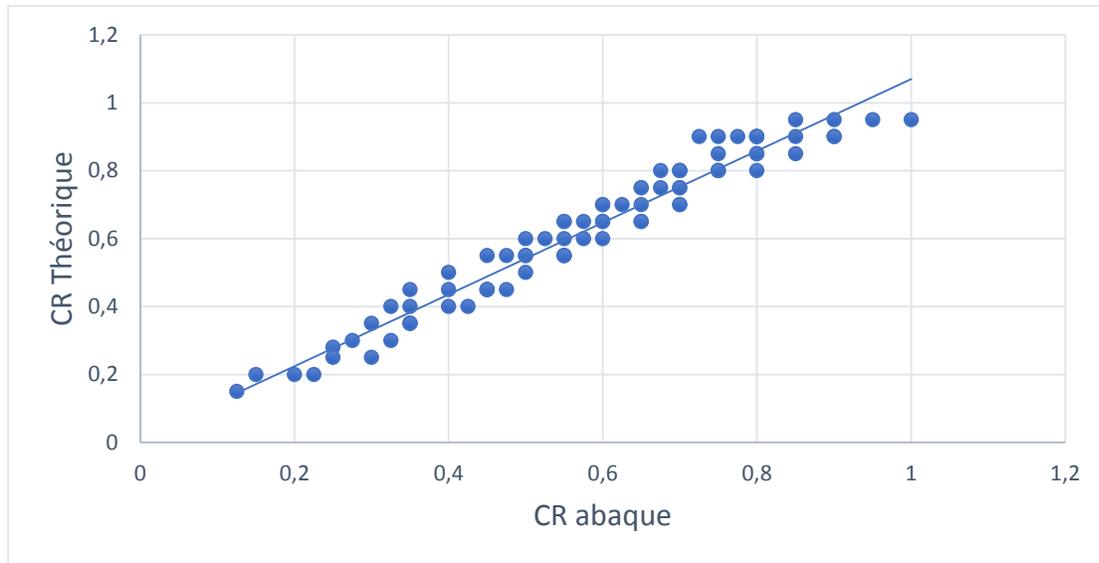


Figure 4.3 : Comparaison entre les valeurs théorique du coefficient de ruissellement et celles issues de l'abaque 2.

4.2. Application du processus d'analyse hiérarchique (AHP).

Tout d'abord, l'objectif de cette partie est d'appliquer l'AHP sur chacun des deux abaques étudiés où une structure hiérarchique est développée et des matrices des jugements sont définies à base des poids explicitement obtenus dans la partie supérieure.

Deuxièmement, on récapitule les résultats issus des deux abaques en les modélisant dans un seul modèle. Ce modèle permet d'évaluer le CR selon cinq paramètres ; type de sol, couvert végétal, pente, précipitations journalière maximale et surface du bassin versant.

4.2.1. Modèle 1 :

4.2.1.1. Hiérarchisation du problème :

La structure hiérarchique est décomposée en deux niveaux (figure 4.4).

Niveau 0 : estimation du coefficient de ruissellement (CR).

Niveau 1 : contient les critères : type de sol, couvert végétal et pente.

On a rassemblé les trois critères dans le même niveau car la somme de leurs poids vaut « 1 » (tableau 4.3).

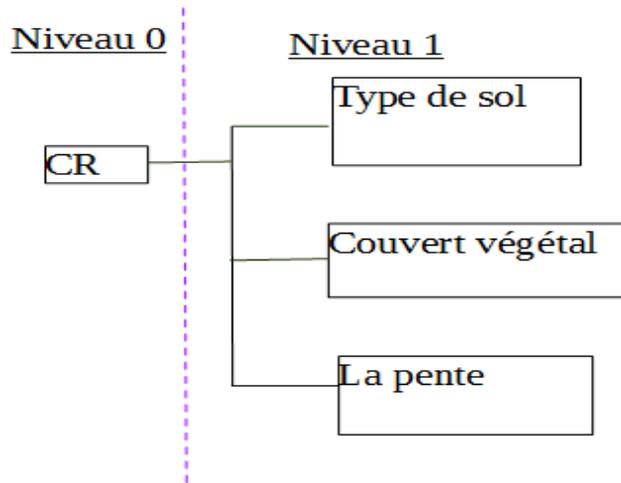


Figure 4.4 : La structure hiérarchique du CR (Modèle 1).

4.2.1.2. Comparaison binaire des critères :

Nous avons supposé d'une part que la couverture végétale est deux fois plus importante que le type de sol et la pente, et d'autre part l'impact du type de sol est deux fois plus élevé que la pente. A partir de ces comparaisons on détermine les poids représentés dans le tableau 6 avec RC inférieur à 0.1 (les comparaisons assumées sont cohérentes)

Tableau 4.7 : Comparaison binaire des critères et leurs poids correspondants.

	Couvert végétal	Type de sol	La pente	Poids (AHP)	IC	RC
Couvert végétal	1	2	2	0.5	0,03	0,05
Type de sol	1 / 2	1	2	0.3		
La pente	1 / 2	1 / 2	1	0.2		

4.2.1.3. Comparaisons des poids :

Le tableau 4.8 illustre la validité de nos jugements.

Tableau 4.8 : Comparaison entre les poids acquis par les deux approches.

Critère	Poids (méthode explicite)	Poids (AHP)
Couvert végétal	0.5	0.5
Type de sol	0.3	0.3
Pente	0.2	0.2

4.2.2. Modèle 2 :

Par la même méthodologie suivit dans le modèle1 on va utiliser l'AHP pour retrouver les poids définies dans la méthode explicite.

4.2.2.1. Hiérarchisation du problème :

Nous avons tenu compte de deux critères principaux ; précipitation et les caractéristiques du bassin versant. Deux sous critères caractérisent à leur tour les caractéristiques du bassin à savoir: catégorie du sol et la surface.

Les éléments considérés sont présentés dans une structure hiérarchique composée de 3 niveaux (figure 4.5).

Niveau 0 : consiste à déterminer le coefficient de ruissellement CR.

Niveau 1 : contient les deux principaux critères ; précipitation et les caractéristiques du bassin versant.

Niveau 2 : Rassemble les sous critères catégorie du sol et surface du bassin.

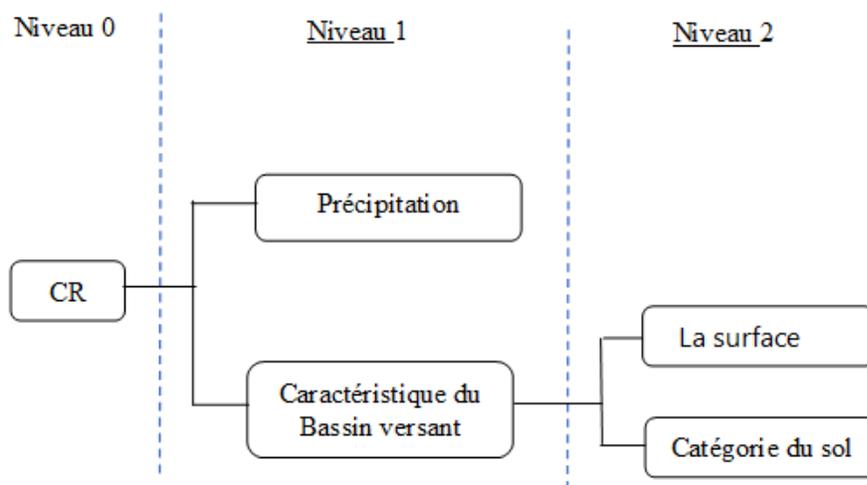


Figure4.5 : La structure hiérarchique du CR (Modèle2)

4.2.2.2. Comparaison binaire :

On doit déterminer deux matrices, l'une contient les critères du niveau1 et l'autre celle du niveau2. Pour cela, on a supposé que l'influence des caractéristiques du bassin est trois fois plus

importante que les précipitations et la catégorie du sol est deux fois plus impacte que la surface du bassin (tableau.4.9)

Tableau 4.9 : Comparaison binaire des critères et leurs poids correspondants.

	précipitation	Bassin versant	Poids (AHP)
précipitation	1	1/3	0,25
Caractéristiques du bassin versant	3	1	0,75
	catégorie du sol	La surface	Poids
catégorie du sol	1	2	0,67
La surface	1/2	1	0,33

4.2.2.3. Comparaisons des poids :

Le tableau 4.10 montre le bon étalonnage des résultats des deux méthodes.

Tableau 4.10 : Comparaison entre les poids acquis par les deux approches.

critères	Poids (AHP)	Poids (méthode explicite)
P _j max	0,25	0,25
Catégorie du sol	0,5 (= 0,67 * 0,75)	0,5
surface	0,25(= 0,33 * 0,75)	0,25

4.2.3. Modèle 3 :

Les figures 4.2 et 4.3 illustrent une bonne concordance entre les valeurs théoriques et pratiques du CR. Néanmoins, nous croyons ignorer Le paramètre moteur (précipitation) et la taille du bassin versant dans l'abaque 1 d'une part et la classification grossière (flou) des catégories des sol dans l'abaque 2 d'autre part, donne à ces abaques (tableaux.4.1 et 4.2) une limitation majeure.

Un des avantages majeur de l'AHP est de considérer simultanément un grand nombre de critères et aussi d'être évolutif du point de vue introduction ou retrait à volonté d'un ou de plusieurs critères à n'importe quel moment.

On tire profit de cette propriété pour poser un nouveau modèle qui permet d'estimer le CR. Ce modèle offre le privilège important de pouvoir prendre en considération simultanément les cinq facteurs considérés dans les deux abaques considérés.

Pour atteindre l'objectif de l'étude, on passe par deux étapes principaux ; bloc A et B (figure4.6).

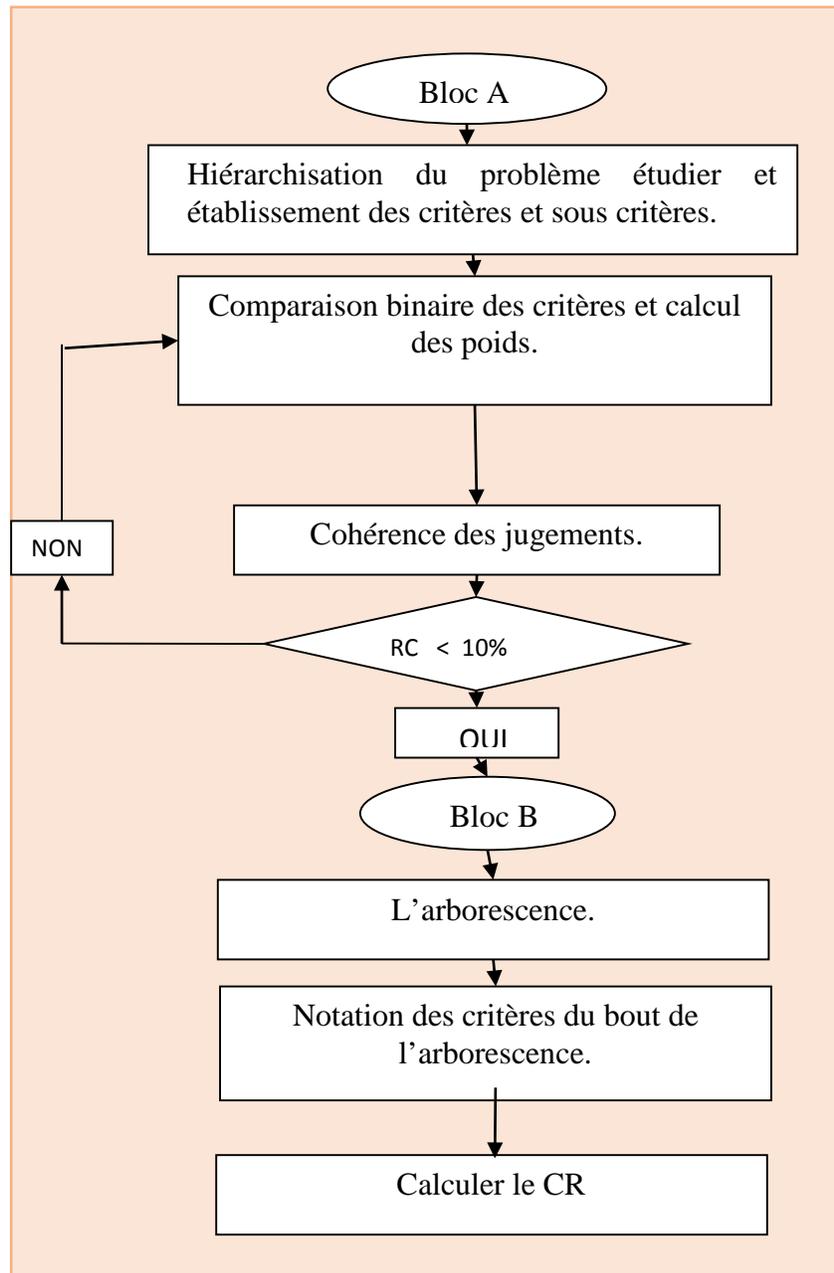


Figure 4.6 ; l'algorithme du modèle 3.

Etape 1 :

Les différents critères étudiés dans ce modèle (tableau 4.11) sont regroupés dans une structure hiérarchique (figure 4.7) composée de quatre niveaux.

Tableau 4.11 : Les facteurs considérés dans le modèle développé.

Numéro	critères	Détails
1	Précipitation journalière maximale	Précipitation journalière maximale de période de retour de 5ans, 10ans, ...
2	Surface du bassin versant(S)	quelconques
3	Pente (P)	Faible ($p < 5\%$), moyenne ($5\% \leq p < 10\%$), forte ($10\% \leq p < 30\%$)
4	Couvert végétale	Bois ou pâturage ; culture
5	Type du sol	Sable grossier ; Terrain limoneux ; Terrain argileux

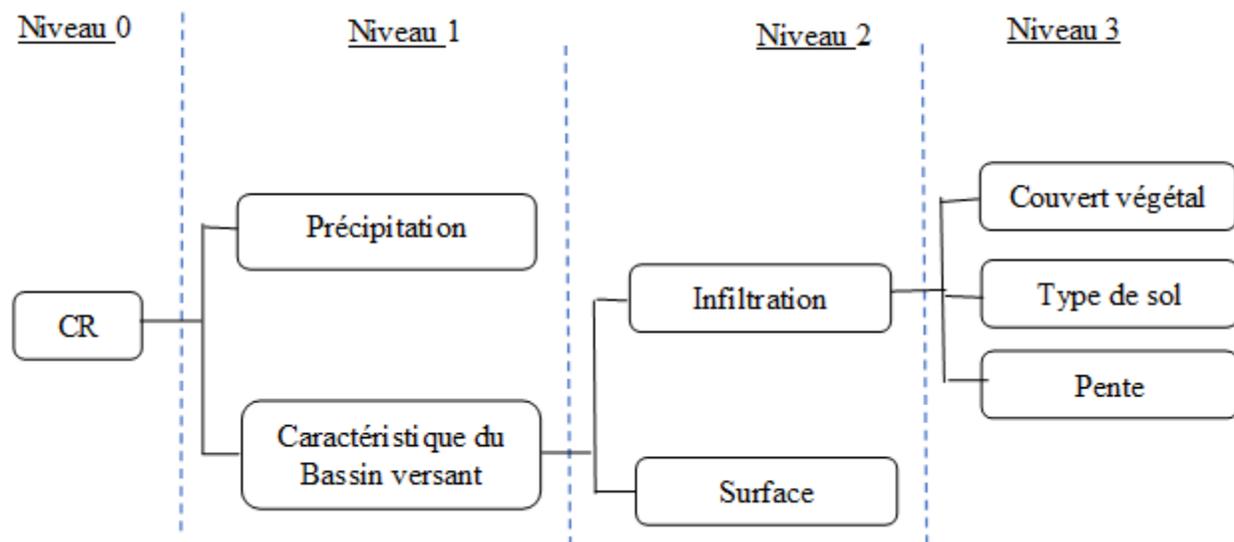
Niveau 0 : calcul du CR.

Niveau 1 : contient les critères principaux ; précipitations et caractéristiques du bassin versant.

Niveau 2 : on a considéré deux critères ; infiltration et surface.

Niveau 3 : possède les critères : type de sol, couvert végétal et la pente.

Les critères du niveau 3 sont rassemblé au même critère père (appelé infiltration) car la somme de leurs poids est égale à 1 (voir modèle 1).

**Figure 4.7** : La structure hiérarchique du CR (Modèle 3).

Étape 2: Composition des matrices de comparaison binaire et élaboration des poids

Nous maintenons les résultats obtenus dans les tableaux 4.7 et 4.9, et seule la matrice de comparaison entre les critères, infiltration et surface sera déterminée.

Pour cela, on note que les critères surface et infiltration appartiennent au même critère père (Figure 4.7).

D'où si P_i est le poids du critère infiltration alors ; $P_s + P_i = 1$

On a aussi, du tableau 4.9; $P_s = 0,33$.

Ainsi, $P_i = 0,67$.

Les comparaisons binaires de ces deux critères sont représentées dans le tableau 4.12 où un bon étalonnage est acquis entre les poids obtenus par la méthode explicite et l'AHP.

Tableau 4.12 : Comparaison binaires entre infiltration et surface.

	Infiltration	Surface	Poids (AHP)	Poids (Explicite)
Infiltration	1	2	0,67	0,67
Surface	1/2	1	0,33	0,33

Le tableau 4.13 résume les poids acquis du modèle 3.

Tableau 4.13 : Poids des critères (modèle 3).

critères	poids	Sous critères	poids	Facteurs	poids
Précipitations journalière maximale (P_{pl})	0,25	Infiltration (P_i)	0,67	Type de sol (P_t)	0,3
Caractéristiques du bassin versant (P_{ca})	0,75			Couvert végétal (P_c)	0,5
				Pente (P_p)	0,2
		Surface (P_s)	0,33		

Étape 3 : Notation des critères.

On maintient les notations des tableaux 4.3 et 4.5.

Etape 4 : Calcul du CR :

La valeur du CR est déterminée par la formule suivante ;

$$CR = (P_{pl} \cdot N_{pl} + P_{ca} (P_s \cdot N_s + P_i (P_c \cdot N_c + P_t \cdot N_t + P_p \cdot N_p)))/10 \quad (4.18)$$

4.3. Exploitation des résultats

- Du modèle 1, on déduit que le coefficient de ruissellement est fortement influencé par le couvert végétal (figure 4.8). Toutefois, l'effet des précipitations journalières maximales et de la taille du bassin versant n'est pas considéré.

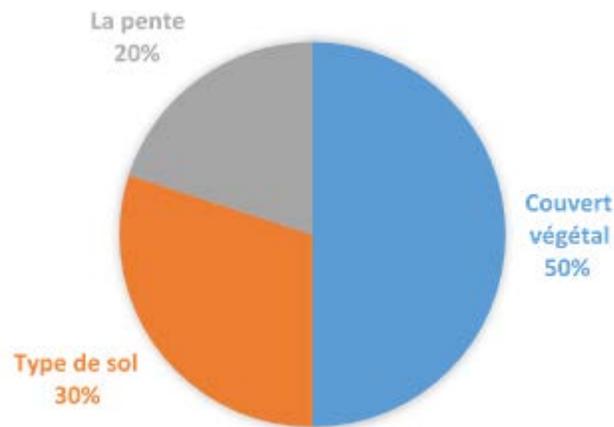


Figure 4.8 : L'impact des critères sur le coefficient de ruissellement (Abaque 1).

- La Figure 4.9 (dédiée du modèle 2) montre que la surface du bassin versant et les précipitations journalières maximales ont pratiquement le même poids d'influence sur le CR. Par contre, la catégorie des sols a le plus fort impact sur le CR. Cependant, dans cette classification la considération du sol est faite de façon grossière.

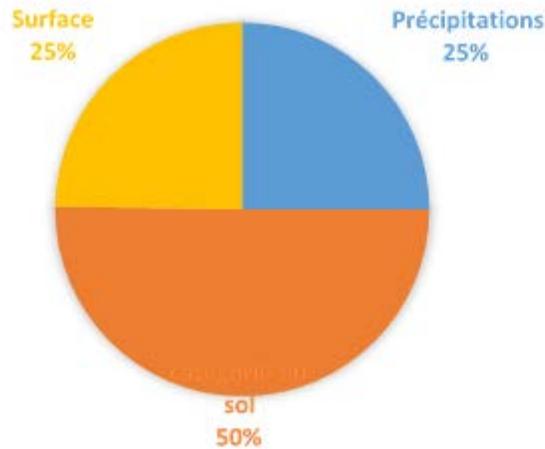


Figure 4.9 : L'impact des critères sur le coefficient de ruissellement (Abaque 2).

- A partir de la Figure 4.10 déduite du tableau 4.13, nous pouvons affirmer que les précipitations journalières maximales et la surface du bassin versant ont aussi d'influence sur le ruissellement que le couvert végétal. Par ailleurs, l'influence du type de sol et de la pente n'est pas négligeable. Ceci plaide en faveur d'une dépendance étroite de la valeur du CR de tous les critères que nous avons considéré.

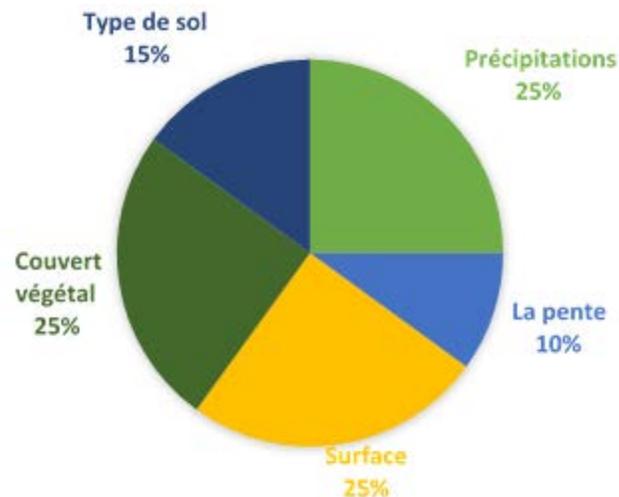


Figure 4.10 : L'impact des critères sur le coefficient de ruissellement (Modèle 3).

Conclusion :

A la lumière des résultats obtenus nous avons pu démontrer que l'influence des différents critères contribuant au ruissellement ont été individualisées, nous affirmons que ce sont bien le couvert végétal et la surface du bassin versant qui ont le plus important impact sur le coefficient de ruissellement. Ce résultat est en harmonie avec les poids que nous avons posés. Nous tenterons par la suite de mettre en application le nouveau modèle 3 par le biais d'une étude de cas.

Chapitre V

Etude du cas d'un bassin versant (OUED BOU-KIOU)

ETUDE DU CAS D'UN BASSIN VERSANT (OUED BOU-KIOU)

Introduction :

Dans ce chapitre, nous allons étudier un cas d'application pratique réel ayant pour but d'estimer le coefficient de ruissellement du bassin versant d'Oued Bou-kiou.

Cette estimation s'est basée sur les différentes caractéristiques de ce bassin tout en utilisant les résultats de la méthodologie (modèle 3) proposée dans le chapitre 4.

5.1. Présentation du cadre général de la zone d'étude

5.1.1. Situation géographique :

Le bassin versant étudié fait partie du versant de Chabet-Chatrou. Ce massif du Nord-Ouest de l'Algérie, appartient administrativement au territoire de la wilaya de Tlemcen (figure.5.1).



Figure 5.1 : Situation géographique de la zone d'étude (Echelle : 1/50000) (Water and Environment Engineering Design Office).

5.1.2. Paramètres géométriques :

Le secteur étudié occupe une superficie (S) de 3,05 Km², un périmètre (P) de 9km et une longueur du thalweg (L) de 3,37 km. Ces paramètres sont déterminés par logiciel AUTOCAD appliqué à la carte d'état-major (Figure 5.1).

Les dimensions du rectangle équivalent du bassin versant sont définies comme suit :

$$\text{Une longueur } L : L = \frac{K_c}{1,12} \times \sqrt{S} \left(1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{K_c} \right)^2} \right) \sim 3,65 \text{ Km.} \quad (5.1)$$

$$\text{Et une largeur } l : l = \frac{K_c}{1,12} \times \sqrt{S} \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{K_c} \right)^2} \right) \sim 0,83 \text{ Km.} \quad (5.2)$$

Avec

K_p ; Coefficient d'allongement donné par la formule :

$$K_p = \frac{p^2}{s} \sim 24,04. \quad (5.3)$$

K_c ; Indice de forme (ou de Compacité) défini par :

$$K_c = 0,28 \times \frac{P}{\sqrt{S}} \sim 1,44 \quad (5.4)$$

On remarque que K_c est supérieur à 1,12 donc le bassin versant est de forme allongé (figure 5.2).

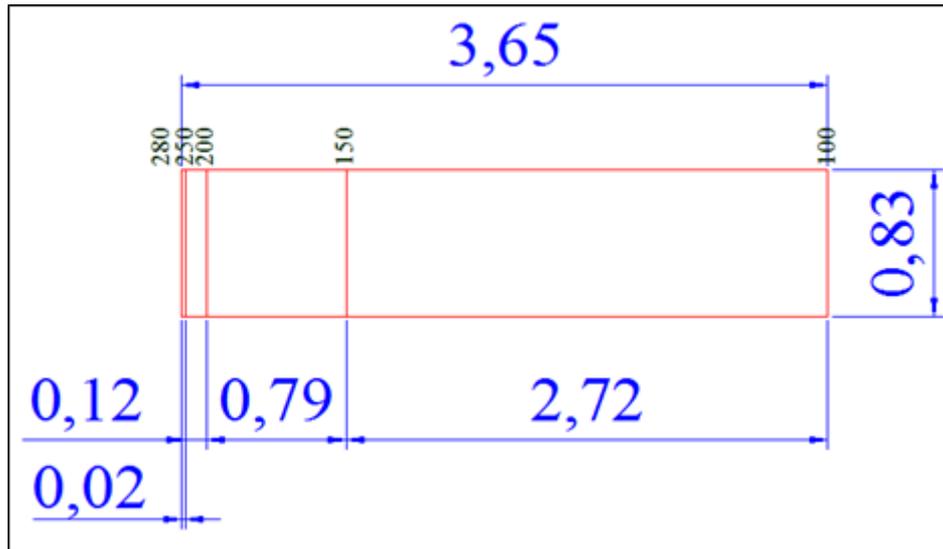


Figure 5.2 : Rectangle équivalent du bassin versant à l'aide du logiciel AUTOCAD (Water and Environment Engineering Design Office).

5.1.3. Paramètres de relief :

Le relief est caractérisé par la courbe hypsométrique du bassin (figure 5.3). Cette courbe issue du tableau 5.1 donne la répartition des altitudes en fonction des surfaces partielles du bassin versant.

Tableau 5.1 : Calcul des surfaces cumulées (Water and Environment Engineering Design Office).

Altitude [m]	Altitude moyenne H_i [m]	Superficie partielle S_i [m ²]	Superficie partielle a_i %	Superficies cumulées [m ²]	Superficies cumulées %
280-270	275	6243	0,20	6243	0,20
270-260	265	6273	0,21	12516	0,41
260-250	255	7490	0,25	20006	0,66
250-240	245	8872	0,29	28878	0,95
240-230	235	12907	0,42	41785	1,37
230-220	225	15024	0,49	56809	1,86
220-210	215	29556	0,97	86365	2,83
210-200	205	34864	1,14	121229	3,98
200-190	195	62264	2,04	183493	6,02
190-180	185	55207	1,81	238700	7,83
180-170	175	64278	2,11	302978	9,94
170-160	165	94418	3,10	397396	13,04
160-150	155	375558	12,32	772954	25,35
150-140	145	377707	12,39	1150661	37,74
140-130	135	404018	13,25	1554679	60
130-120	125	346960	11,38	1901639	62,38
120-110	115	541772	17,77	2443411	80,15
110-100	105	535791	17,57	2979202	97,72
100-95	97,5	69426	2,28	3048628	100

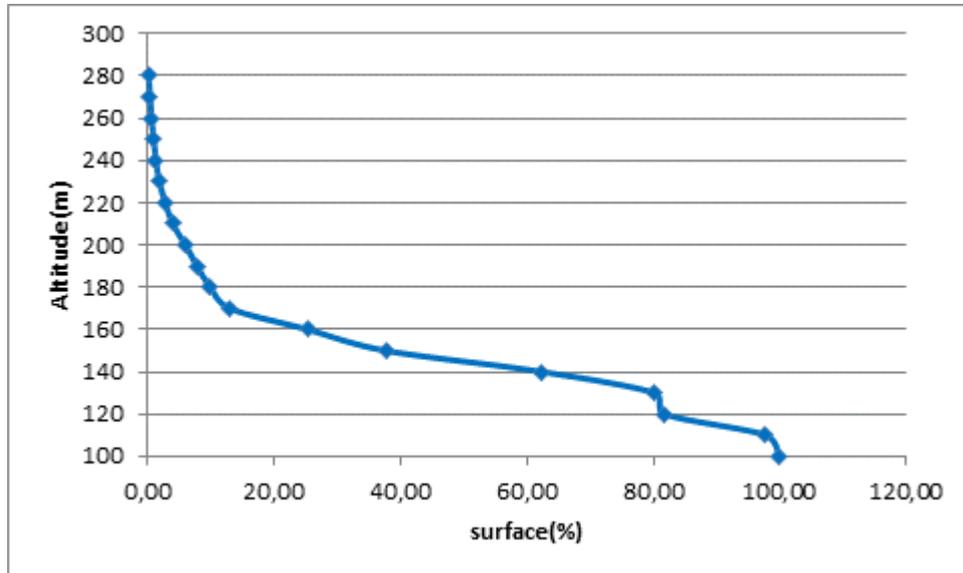


Figure 5.3 : Courbe hypsométrique du bassin versant (Water and Environment Engineering Design Office).

Les paramètres de relief se résument comme suit :

Altitude moyenne :

$$H_{moy} = \frac{1}{S_T} \sum S_i \times \frac{H_{i-1} + H_i}{2} \approx 133,72m \quad (5.5)$$

Avec :

S_i : Surface partielle ;

S_T : Surface totale ;

H_{i-1} : Altitude d'ordre (i-1) ;

H_i : Altitude d'ordre (i)

Altitude minimale : $H_{min} \approx 95m$

Altitude maximale : $H_{max} \approx 280m$

Altitudes de fréquence : $H_{50\%} \approx 150m$; $H_{5\%} \approx 205m$ et $H_{95\%} \approx 100m$

5.1.4. La pente :

La pente globale du bassin versant est caractérisée par l'indice de pente de Roche qui s'exprime par la formule suivante :

$$I_p = \frac{\sum \sqrt{s_i d_i}}{\sqrt{L}} \approx 5,8\% \quad (5.6)$$

Où d_i représente la distance partielle comprise entre deux courbes de niveau voisines, dans notre cas $d_i = 10 \text{ m}$.

5.1.5. Les précipitations journalières maximales et période de retour (T) :

Nous prenons comme base de calcul la série pluviométrique de la station météorologique de Remchi (35° 03' 34" de latitude nord, 01° 25' 33" de longitude ouest, 284 m d'altitude). La série à une période de fonctionnement de 1982 à 2012 qui a été fournie par l'Office Nationale de la Météorologie (ONM).

Le tableau 5.2 Présente les précipitations maximales journalières interannuelles P_{jmax} durant 31 ans d'observations.

Tableau 5.2 : Précipitations maximales journalières P_{jmax} , durant 31ans d'observations.

Années	P_{jmax} (mm)	Années	P_{jmax} (mm)	Années	P_{jmax} (mm)	Années	P_{jmax} (mm)
1982	93,98	1990	29,97	1998	38,1	2006	14,99
1983	29,97	1991	29,97	1999	24,89	2007	41,91
1984	30,99	1992	35,05	2000	25,91	2008	28,96
1985	14,99	1993	50,04	2001	62,99	2009	29,97
1986	71,88	1994	70,1	2002	44,96	2010	37,08
1987	99,06	1995	95,94	2003	48,01	2011	27,94
1988	23,88	1996	17,02	2004	48,01	2012	67,06
1989	72,9	1997	53,09	2005	23,11		

Les caractéristiques de la série pluviométrique entre la période 1982 et 2012, sont représentées dans le tableau 5.3 :

Tableau 5.3 : les caractéristiques de la série pluviométrique (période : 1982-2012).

Caractéristiques	Formule	Valeur
La somme des P_{jmax} en (mm)	$\sum x_i$	1382,72
la moyenne des P_{jmax} en (mm)	$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n}$	44,60
L'écart type S	$S = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$	23,88

a) Ajustement des précipitations journalières maximales :

La loi de Gumbel est utilisée par la plupart des services météorologiques officiels, pour décrire la fréquence des pluies extrêmes. Cette loi a l'avantage d'être très connue grâce à sa simplicité d'application (Benkhaled A. 2007).

Ainsi, la série des Précipitations maximales annuelles est décrite par cette loi dont la fonction de répartition est définie par :

$$F(x) = e^{-e^{-\frac{x-\beta}{\alpha}}} \quad (5.7)$$

α est un paramètre caractéristique de la dispersion et β est le mode.

Ces paramètres sont déterminés par différentes méthodes d'ajustement : méthode graphique (une régression statistique) ou méthode des moments.

Méthode graphique :

C'est une méthode empirique dont les étapes à suivre sont :

- Classer les événements x_i par ordre croissant et affecter l'ordre 1 à la plus petite valeur.
- Calculer la fréquence expérimentale associée à chaque événement à l'aide de la formule générale :

$$P_m = \frac{m-A}{n+1-2A} \quad (5.8)$$

P_m : la probabilité de dépassement de la $m^{\text{ème}}$ valeur

m : le rang qu'occupe la valeur

n : le nombre d'observation

A : paramètre (Voir tableau 5.4).

Tableau 5.4 : Formules pour la détermination de la fréquence expérimentale pour la méthode graphique [16].

Auteur	Formule	A
Hazen	$P_m = \frac{m - 0.5}{n}$	0.50
Weibull	$P_m = \frac{m}{n + 1}$	0
Chegodayev	$P_m = \frac{m - 0.3}{n + 0.4}$	0.30
Blom	$P_m = \frac{m - \frac{3}{8}}{n + \frac{1}{4}}$	0.375
Tukey	$P_m = \frac{m - \frac{1}{3}}{n + \frac{1}{3}}$	0.333
Gringorten	$P_m = \frac{m - 0.44}{n + 0.12}$	0.44
Cunnane	$P_m = \frac{m - 0.4}{n + 0.2}$	0.40

Des simulations ont montré que pour la loi de Gumbel, il faut utiliser la fréquence empirique de Hazen où A=0,5.

- Calcule de la variable réduite U de Gumbel (tableau 5.5) définie par :

$$U = -\ln(-\ln(F(x))) \quad (5.9)$$

Tableau 5.5 : Fréquence empirique et variable réduite de Gumbel.

P_{jmax} (mm)	Rang r	fréquence empirique F	variable réduite U	P_{jmax} (mm)	Rang r	fréquence empirique F	variable réduite U
14,99	1	0,0161	-1,4176	38,1	17	0,5323	0,4610
14,99	2	0,0484	-1,1081	41,91	18	0,5645	0,5590
17,02	3	0,0806	-0,9233	44,96	19	0,5968	0,6612
23,11	4	0,1129	-0,7799	48,01	20	0,6290	0,7688
23,88	5	0,1452	-0,6575	48,01	21	0,6613	0,8829
24,89	6	0,1774	-0,5477	50,04	22	0,6935	1,0053
25,91	7	0,2097	-0,4461	53,09	23	0,7258	1,1380
27,94	8	0,2419	-0,3500	62,99	24	0,7581	1,2838
28,96	9	0,2742	-0,2577	67,06	25	0,7903	1,4468
29,97	10	0,3065	-0,1678	70,1	26	0,8226	1,6332
29,97	11	0,3387	-0,0794	71,88	27	0,8548	1,8525
29,97	12	0,3710	0,0084	72,9	28	0,8871	2,1219
29,97	13	0,4032	0,0962	93,98	29	0,9194	2,4759
30,99	14	0,4355	0,1848	95,94	30	0,9516	3,0038
35,05	15	0,4677	0,2746	99,06	31	0,9839	4,1190
37,08	16	0,5000	0,3665				

- Représentation graphique des couples (u_i, P_{ji}) de la série et un ajustement linéaire est effectué (figure 5.4).

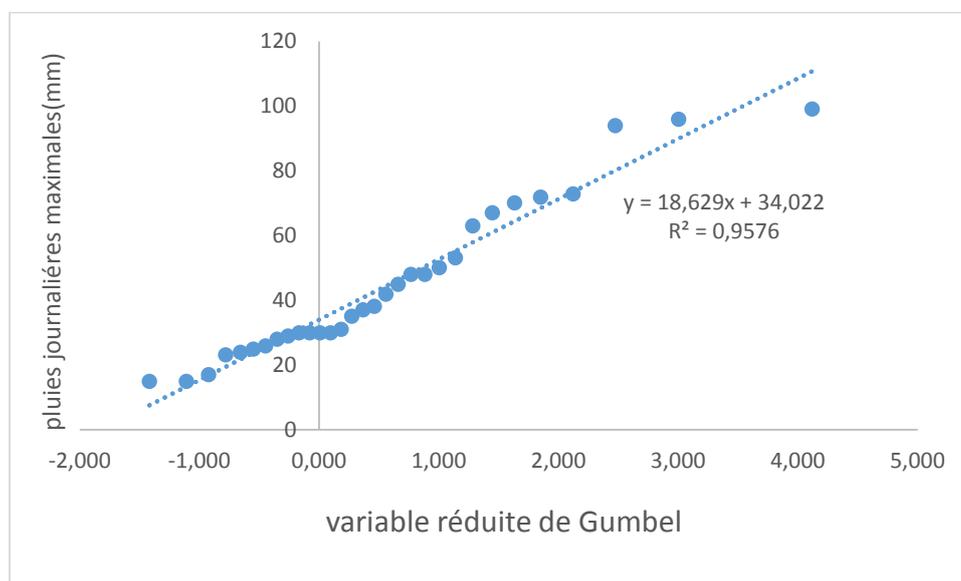


Figure.5.4 : Ajustement de la loi réduite de Gumbel.

- La droite de régression est définie par : $x = 18,629 U + 34,022$ (figure.5.4)

D'où $\alpha = 34,022$ et $\beta = 18,629$.

Méthode des moments :

La méthode d'ajustement des moments, est utilisée pour adapter la distribution Gumbel aux pluies extrêmes (Hosking, J.R.M., Wallis, J.R. et Wood, E.F. 1985). Elle consiste à évaluer les moments des échantillons avec les moments théoriques de la loi. Des paramètres a et b sont calculés selon les formules :

$$\beta = \frac{\sqrt{6}}{\pi} S = 18,62 \quad (5.10)$$

$$\alpha = \bar{x} - b\gamma = 33,85 \quad (5.11)$$

Avec

$\gamma = 0,5772$, constante d'Euler

S : écart-type des valeurs composant l'échantillon.

\bar{x} : Moyenne de l'échantillon.

Ainsi $x = 18,62 U + 33,85$

Remarque : Nous avons obtenu le même ajustement à travers les deux méthodes.

b) Probabilité d'apparition et période de retour :

La probabilité d'apparition d'un phénomène est une notion importante pour le dimensionnement des structures conditionnées par un phénomène naturel. On définit

$$\text{la période de retour } T, \text{ par : } T = \frac{1}{p} \quad (5.12)$$

Où p est la probabilité de dépassement ($p = 1 - F(x_T)$)

Les intervalles de récurrence recommandés pour le dimensionnement de certaines structures sont présentés par le tableau suivant.

Tableau 5.6 : Périodes de récurrence recommandée pour certains ouvrages [17].

Type d'ouvrage	Période de récurrence (T) recommandée
Autoroute, zone habitée	100 ans
Aléa majeur pour la Directive Inondations, barrage rigide	1000 ans
Barrage meuble, centrale nucléaire	10000 ans

A l'aide de l'ajustement par la loi de GUMBEL, il est alors possible d'estimer la pluie maximale pour un temps de retour donné.

Pour notre cas, les résultats obtenus sont résumés dans le tableau 5.7

Tableau 5.7 : Précipitations journalières maximales (P_{jmax}) correspondant à un temps de retour T .

T (ans)	1-P	Loi de Gumbel réduite ; U	P_{jmax} (mm)
200	0,995	5,30	133
100	0,99	4,60	120
50	0,98	3,90	107
30	0,97	3,38	97
20	0,95	2,97	89
10	0,9	2,25	84
5	0,8	1,50	68

5.2.Estimation du coefficient de ruissellement :

Selon le bureau d'étude « Water and Environment Engineering Design Office », le bassin versant Oued Bou-Kiou est principalement constitué de sols argileux et une grande partie de la couverture végétale est composée de forêts et de pâturages.

Ainsi les notations appropriées aux caractéristiques de ce bassin versant sont résumées comme suit :

Tableau 5.8 : Notations des caractéristiques du bassin versant Oued Bou-Kiou .

Critères		Notations
Superficie S = 3,05 Km ²		N _s =4
Pente : P = 5,8%		N _p =5
Couvert végétal : Forêts et pâturage.		N _c =2
Type de sol : sols argileux		N _t =10
Précipitations journalières maximales P _j (mm)	0,80 < P _j ≤ 80	N _{pl} =2
	80 < P _j ≤ 150	N _{pl} =6
	150 < P _j ≤ 200	N _{pl} =8

Et d'après l'équation (4.18) du modèle 3, nous avons :

$$CR = (0,25 * N_{pl} + 0,75 * (0,33 * 4 + 0,67 * (0,5 * 2 + 0,3 * 10 + 0,2 * 5))) / 10$$

$$= (0,25 * N_{pl} + 3,5025) / 10$$

Les résultats obtenus sont présentés comme suit :

Tableau 5.9 : le coefficient de ruissellement (CR) pour plusieurs périodes de retour.

	Période de retour (ans)						
	5	10	20	30	50	100	200
P _{jmax} (mm) Méthode graphique	68	84	89	97	107	120	133
CR	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5

Conclusion et perspectives

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

La réponse hydrologique d'un bassin versant à une précipitation est influencée par l'effet combiné de plusieurs facteurs, liés à la quantité et la dynamique de la pluie, l'état antécédent d'humidité du sol et la morphologie du bassin versant.

Prétendre évaluer de façon exacte l'effet individuel de chacun de ces paramètres serait utopique.

En effet, ces paramètres ne sont pas indépendants et leurs contributions varient d'un cas à un autre. A titre d'exemple, rien que pour l'effet de la pente, les avis des auteurs ne sont pas unanimes. Selon Chaplot V. et Bissonais Y. L. (2000), le ruissellement augmente avec la pente. Par contre, Poesen (1984), Bryan et Poesen (1989) et Bradford et Huang (1992) ont affirmé une diminution du ruissellement avec la pente dans le cas des sols sensibles à la formation de croûte de battance et à la formation de rigoles.

De même, la considération de la longueur du bassin suscite une divergence :

Joel A., Messing I., Seguel O. et Casanova M. (2002) montrent que pour différents événements pluvieux le ruissellement par unité d'aire est plus faible pour la grande parcelle que pour la plus petite (l'interprétation de cette hypothèse est la réinfiltration), alors que, Dunne T., Zhang W. H. et Aubry B. F. (1991) notent que la lame d'eau est plus importante pour une grande longueur de parcelle que pour une petite.

D'autre part, il existe un certain consensus sur les effets des autres paramètres liés aux propriétés physiques du bassin (nature du sol, couvert végétale,...).

Bien que plusieurs travaux soient réalisés pour comprendre l'influence individuelle ou pour modéliser chaque paramètre sur le ruissellement, l'idée n'a pas encore atteint sa maturité. D'où l'originalité de notre étude.

Pour atteindre notre but, nous avons utilisé un paramètre de dimensionnement des ouvrages en l'occurrence le coefficient de ruissellement (CR). Celui-ci témoigne en effet des capacités d'infiltration et de la réponse hydrologique d'un bassin versant.

Le CR varie selon la région ; de ce fait il existe plusieurs référentiels communément admis mais qui restent spécifiques à chaque région.

Le premier abaque considéré (tableau 4.1) répertorie les valeurs moyennes du CR par ; le couvert végétal, le type de sol et la pente. On a montré que le coefficient de ruissellement est fortement influencé par le couvert végétal (50%). Toutefois, l'effet de type de sol et de la pente sont respectivement estimés à 30% et 20%.

Le second s'articule sur la taille du bassin versant, la pluviométrie journalière maximale et les caractéristiques du sol (tableau 4.2). Notre étude a montré que la surface du bassin versant et les précipitations journalières maximales ont pratiquement le même poids (25%) d'influence sur le CR. Par contre, la catégorie des sols en a le plus fort impact (50%).

En troisième étape, ces résultats, nous ont permis de mieux clarifier le phénomène de ruissellement en développant un modèle (modèle 3) qui nous a donné la possibilité d'estimer théoriquement le coefficient de ruissellement en fonction des cinq paramètres ; précipitations journalières maximales, couvert végétal, surface du bassin versant, pente et type de sol, étant donné que l'estimation pratique est impossible.

L'utilisation du processus d'analyse hiérarchique nous a permis aussi une interprétation mathématique aussi qu'une quantification numérisée de l'influence individuelle de chacun des critères opérant.

En fin, une étude de cas a été réalisée sur le bassin versant d'Oued Boukiou où le modèle 3 est appliqué.

Le modèle proposé est évolutif et peut être adapté à plusieurs types et nombres de critères relatifs au phénomène.

Comme suite à ce travail, nous allons introduire d'autres critères pouvant avoir un impact sur le ruissellement d'eau tels que l'action de l'être humain, l'occupation du sol, l'intensité et la durée des précipitations.

RÉFÉRENCES

- Abbas H.B., Routray J.K. 2014 : « Assessing factors affecting flood-induced public health risks in Kassala State of Sudan. » *Operations Research for Health Care*. Vol. 3 p. 215–225.
- Abdeddaim H., 2008 : « Contribution à la mise en œuvre d'une méthode d'analyse du risque d'inondation et de prévision des solutions d'aménagement. » Thèse de Magister, Université de Batna.
- Ahuja L. R., 1974 : « Applicability of the Green-Ampt approach to water infiltration. »
- Aissa Madaoui O., Aissa Madaoui R., 2016 : « Protection des villes contre les inondations cas du centre d'Ain Fezza Tlemcen. » Mémoire de Master en hydraulique ; Université Abou Bakr-Belkaid Tlemcen.
- Alexis B., 2002 : « Précipitations méditerranéennes intenses en milieu urbain : interaction physique et analyse statistique de mesures à fines échelles spatio-temporelles, impact de la variabilité spatiale sur la réponse de bassin versant. »
- Allmaras P., Burwell R., Larson W. et Holt R., 1966 : « Total porosity and random roughness of the interrow zone as influenced by tillage. » *USDA Conserv. Res. Rep. 7*, pp. 1–14.
- Almeida AT., 2005 : « Multicriteria modelling of repair contract based on utility and ELECTRE I method with dependability and service quality criteria, » *Annals of Operations Research*;138:113–26.
- Anandalingam, G. et Olsson., 1989 : « A multi-stage multi-attribute decision model for project selection. » *European journal of Operation Research*, 43(3), 271–283
- Angermann T., Wallender W. W., Wilson B. W., Werner I., Hinton D. E., Oliver M. N., Zalom F. G., Henderson J. D., Oliveira G. H., Deanovic L. A., Osterli P. et Krueger W., 2002 : « Runoff from orchard floors - micro-plot field experiments and modeling. » *Journal of Hydrology* 265(1-4), pp. 178–194.
- Auzet A., Poesen J. et Valentin C., 2002: Soil patterns as a key controlling factor of water erosion. *Catena* 46, pp. 2–3.
- Ayadi D. Azzabi L. Kobi A. Robledo C. Chabchoub H., 2008: « Classification of Human Risks with the Method Analytical Hierarchy Process », Quality and Dependability the 11th international conference, September.
- Azzabi L. Ayadi D. Kobi A. Robledo C. Boujelbene.Y., 2008 : « Une approche multicritère pour la localisation des défauts de production », conférence internationale Maîtrise et Management des Risques Industriels, M2RI
- Barda, O.H., Dupuis, J., Lencioni, P., 1990 : « Multicriteria location of thermal power plants. » *European Journal Of Operational Research*, 45(2-3), 332-346.
- Beck E., 2006 : « Approche multi risques en milieu urbain. Le cas des risques sismique et technologiques dans l'agglomération de Mulhouse (Haut Rhin). » Thèse de doctorat, Université Strasbourg I (Louis Pasteur), 283p.
- Beloulou L, 2008 : « Vulnérabilité aux inondations en milieu urbain. Cas de la ville d'Annaba (Nord-Est Algérien). » Thèse de doctorat en Hydrologie Faculté des Sciences de la Terre ; Département de Géologie Université Badji Mokhtar-Annaba.
- Belton V., Stewart T., 2002 : « Multiple Criteria Decision Analysis. » Kluwer Academic Publishers, USA.
- Beltrando G. 2004 : « Les climats. Processus, variabilité et risques. » Armand Colin, Paris, 261 p.
- Benkhalel A. Juin 2007 : « Distributions statistiques des pluies maximales annuelles dans la région du cheliff comparaison des techniques et des resultats. » *Courrier du Savoir – N°08*, pp.83-91.
- Benmechernane N., 2013 : « Etude de protection de la ville de Bensekrane (w. Tlemcen) contre les inondations. » Master en hydraulique, Université Abou Bakr-Belkaid de Tlemcen.
- Benmia K., 2012 : « Evaluation de la performance des barrages de protection contre les inondations, cas de la ville de Ghazaouet. » Thèse de magister, Université de Tlemcen.

- Beven K. et Germann., 1982 : « Macropores and water flow in soils. » *Water Resources Research* 18(5), pp. 1311–1325.
- Beven K., 1983 : « Surface water hydrology - runoff generation and basin structure. » *Reviews of geophysics and space physics* 21(3), pp. 721–730.
- Bradford J. et Huang C., 1992 : « Mechanisms of crust formation : physical components., Lewis Publishing éd., pp. 55–72.
- Brans J.P, Vincke Ph., 1985 : « A Preference Ranking Organization Method. Management Science », 31, 6. p647-656.
- Braud I., Vich A. I. J., Zuluaga J., Fornero L. et Pedrani A., 2001 : « Vegetation influence on runoff and sediment yield in the andes region : observation and modelling. » *Journal of Hydrology* 254(1-4), pp. 124–144.
- Briggs Th., Kunsch P.L., Marschal B., 1990 : « Nuclear waste management: An application of the multicriteria PROMETTEE methods. » *European Journal of Operational Research*, 44(1), 1-10.
- Bryan R. et Poesen J., 1989: « Laboratory experiments on the influence of slope length on runoff, percolation and rill development. » *Earth Surface Processes and Landforms* 14(3), pp. 211–231.
- Calvet R., 2003: *Le sol. Propriétés et fonctions.*, France Agricole éd.: Issoudun : Dunod, pp.455.
- Chaboureau J-P., Claud C., Cammas J.P., Mascart P., 2001 ; « Large-scale cloud, precipitation and upper- level features during FASTEX as inferred from TOVS observations », *J. Geophys. Res.*, 106 (D15), 17293-17302.
- Chachoua A., 2010 : « Gestion de crue dans un bassin versant -Etude hydrologique, hydraulique et aménagement. » Mémoire de Magister, Université de Tlemcen.
- Chahinian N., Moussa R., Andrieux P. et Voltz M., 2006: Accounting for temporal variation in soil hydrological properties when simulating surface runoff on tilled plots. *Journal of Hydrology* 326(1-4), pp. 135–152.
- Chaplot V. et Bissonnais Y. L., 2000: Field measurements of interrill erosion under different slopes and plot sizes. *Earth Surface Processes and Landforms* 25(2), pp. 145–153.
- Corradini C., Melone F. et Smith R. E., 1994 : « Modeling infiltration during complex rainfall sequences. » *Water Resources Research* 30(10), pp. 2777–2784.
- Cosandey C., 2003 : « Les eaux courantes, Géographie et environnement. » Paris. Belin, "Sup géographie", 239 p.
- CRED, 2007 : « Bilan des catastrophes naturelles dans le monde de 1975 à 2004. » The OFDA/CRED International Disaster Database", Université Catholique de Louvain, Bruxelles, Belgique.
- Darboux F., 1999 : « Modélisations numérique et expérimentale du ruissellement : Effet de la rugosité sur les distances de transfert. » Thèse de Doctorat, Université Rennes 1.
- Deploey J., Savat J. et Moeyersons J., 1976 : « Differential impact of some soil loss factors on flow, runoff creep and rainwash. » *Earth Surface Processes and Landforms* 1(2), pp. 151–161.
- Djorovic M., 1980 : « Slope effect on runoff and erosion, » pp. 215–225.
- Duband D., Obled C. et Rodriguez J., 1993 : « Unit hydrograph revisited : an alternate iterative approach to uh and effective precipitation identification. » *Journal of Hydrology* 150(1), pp. 115–149.
- Duley F. et Ackerman F., 1934 : « Run-off and erosion from plots of different length. » *J. Agric. Res.* 48, pp. 505–510.
- Dunne T., 1978 : « Field studies of hillslope flow processes. » (Wiley éd., pp. 227–293. M.J. Kirkby.
- Dunne T., Zhang W. H. et Aubry B. F., 1991 : « Effects of rainfall, vegetation, and micro-topography on infiltration and runoff. » *Water Resources Research* 27(9), pp. 2271–2285.
- Edwards W., 1971 : « Social utilities. Engineering Economist. » Summer Symposium Series 6, pp.119-129.

- Ennaouri I., 2010 : « Modélisation de la dégradation hydraulique et structurale des réseaux sanitaires et pluviaux. » Memory presented for obtaining the master's degree in applied science. Civil engineering. Polytechnic school of Montreal., p.50-63.
- Esteves M. et Lapetite J. M., 2003 : « A multi-scale approach of runoff generation in a Sahelian gully catchment : a case study in Niger. » *Catena* 50(2-4), pp. 255–271.
- Esteves M., Faucher X., Galle S. et Vauclin M., 2000 : « Overland flow and infiltration modelling for small plots during unsteady rain : numerical results versus observed values. » *Journal of Hydrology* 228(3-4), pp. 265–282.
- Fang H., Cai Q., Chen H. et Li Q., 2008 : « Effect of rainfall regime and slope on runoff in a gullied loess region on the loess plateau in china. » *Environmental Management* 42, pp. 402–411.
- Fiener P. et Auerswald K., 2005 : « Measurement and modeling of concentrated runoff in grassed waterways. » *Journal of Hydrology* 301(1-4), pp. 198–215.
- Flanagan D., Foster G. et Moldenhauer W., 1987 : « Storm pattern effect on infiltration, runoff, and erosion. » *Transactions of the Asae* 31(2), pp. 414–420.
- Fox D. M., Bryan R. B. et Price A. G., 1997 : « The influence of slope angle on final infiltration rate for interrill conditions. » *Geoderma* 80(1-2), pp. 181–194.
- Giovanola M., Heritier F., 2002 : « Les inondations de Bab El Oued. » Cours de Fiabilité et sécurité II, février 2002, Département de génie civil, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, Suisse, 5p.
- Gomi T., Sidle R. C., Miyata S., Kosugi K. et Onda Y., 2008 : « Dynamic runoff connectivity of overland flow on steep forested hillslopes : Scale effects and runoff transfer. » *Water Resour. Res.* 44(8), pp. 16.
- Gonzalez-Camacho J. M., Munoz-Hernandez B., Acosta-Hernandez R. et Mailhol J. C., 2006 : « Kinematic wave model adapted to irrigation with closed-end furrows. » *Agronomie* 40(6), pp. 731–740.
- Graillot D., Londiche H., Dechomets R., Batton-Hubert M., 2001 : « Analyse multicritère spatiale pour l'identification de la vulnérabilité aux inondations. » Actes du Colloque SIRNAT, Sophia-Antipolis.
- Green W. H. et Ampt G. A., 1911 : « Studies on soil physics. 1. the flow of air and water through soils. » *J. Agr. Sci.* 4, pp. 23.
- Grésillon J., 1994 : « Contribution à l'étude de la formation des écoulements de crue sur les petits bassins versants. Approches numériques et expérimentales à différentes échelles. Habilitation à diriger des recherches, Université Joseph Fourier.
- Guitouni A., Martel J. M., Vincke Ph. 1999 : « Un Cadre de Référence pour le Choix d'une Procédure d'Agrégation Multicritère. » Document de travail, FSA-1999-013, Université Laval, Québec, Canada.
- Guitouni, A., Martel J.M., 1998 : « Tentative guidelines to help choosing an appropriate MCDA method. » *European Journal of Operational Research*, 109(2), 501-521.
- Hachoł J., Hämmerling M., Bondar-Nowakowska E. 2017 : « Applying the analytical hierarchy process (AHP) into the effects assessment of river training works. » *Journal of Water and Land Development*. No. 35 p. 63–72. DOI 10.1515/jwld-2017-0069.
- Hallouche B., 2007 : « Cartographie des zones inondables de la plaine de Sidi Bel Abbas par l'approche Hydro géomorphologique. » Mémoire de Magister Université de Sidi Bel Abbas.
- Hammami A. 2003 : « Modélisation technico-économique d'une chaîne logistique dans une entreprise réseau », Thèse de doctorat spécialité Génie industrielle, L'école Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne.
- Hillel D. et Gardner W., 1969 : Steady infiltration into crust-topped profiles. *Soil Sci.* 108, pp. 137–142.
- Hillel D. et Gardner W., 1970 : « Transient infiltration into crust-topped profiles. » *Soil Sci.* 109, pp. 69–76.
- Hino M., Fujita K. et Shutto H., 1987 : « A laboratory experiment on the role of grass for infiltration and runoff processes. » *Journal of Hydrology* 90(3-4), pp. 303–325.

- Horton R., 1933 : « The role of infiltration in the hydrologic cycle. » American Geophysical Union Transactions 14, pp. 446–460.
- Hosking J.R.M., Wallis J.R., Wood E.F. 1985 : « Estimation of the generalized extreme-value distribution by the method of probability-weighted moments. » Technometrics. Vol. 27, no 3, pp 251-261.
- Howes D. A. et Abrahams A. D., 2003 : « Modeling runoff and runoff in a desert shrubland ecosystem, Jornada Basin, New Mexico. » Geomorphology 53(1-2), pp. 45–73.
- Hwang C. R., Yoon K., 1981 : « Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems. » Springer-Verlag Berlin Heidelberg, New York, NY.
- Janeau J. L., Bricquet J. P., Planchon O. et Valentin C., 2003 : « Soil crusting and infiltration on steep slopes in northern Thailand. » European Journal of Soil Science 54(3), pp. 543–553.
- Joel A., Messing I., Seguel O. et Casanova M., 2002 : « Measurement of surface water runoff from plots of two different sizes. » Hydrological Processes 16(7), pp. 1467–1478.
- Julien P. Y. et Moglen G. E., 1990 : « Similarity and length scale for spatially varied overland-flow. » Water Resources Research 26(8), pp. 1819–1832.
- Katerjé N., Hoflack P., 2004 : « Les pressions anthropiques et leurs impacts sur les situations qualitatives et quantitatives de l'eau dans le Bassin versant de la Seine. » Le Courrier de l'environnement de l'INRA, 51, 75–87.
- Keeney R L. 1992 : « Valued-focused thinking: A path to creative decision. » Harvard University Press, Cambridge, USA.
- Lal R., 1983 : « Effects of slope length on runoff from alfisols in western Nigeria. » Geoderma 31, pp. 185–193.
- Lal R., 1997 : « Soil degradative effects of slope length and tillage methods on alfisols in western Nigeria. 1. Runoff, erosion and crop response. » Land Degradation and Development 8(3), pp. 201–219.
- Laloy E. et Biéders C. L., 2008 : « Plot scale continuous modelling of runoff in a maize cropping system with dynamic soil, surface properties. » Journal of Hydrology 349(3-4), pp. 455–469.
- Lambert J., 1996 : « Géographie du cycle de l'eau. » Géographie, 7. Presses Universitaires du Mirail. 439 p.
- Lambert R., Prunet C., 2000 : « L'approche géographique de l'inondation. L'exemple de la Garonne à l'aval de Toulouse. In : Les régions françaises face aux extrêmes hydrologiques. Gestion des excès et de la pénurie. » Sous la direction de J.P. BRAVARD, Édité. SEDES, Paris, p. 39-53.
- Madi M., 2012 : « Etude expérimentale du processus de ruissellement sous pluies simulées. » Thèse de Magister. Université Mohamed Khider – Biskra, pp. 33-40.
- Marc Morel, 1999 : « Acquisition et constitution d'une information hydrologique de base. » Edition H.G.A.Bucarest.
- Matthieu N., 2010 : « Étude expérimentale et numérique du ruissellement de surface: effets des variations d'intensité de la pluie. Application à une parcelle de vigne en Cévennes-Vivarais. » Thèse de doctorat, pp. 9 – 40.
- Mein R. G. et Larson C. L., 1973 : « Modeling the infiltration during a steady rain. » Water Resources Research 9, pp. 384–394.
- Menad W. 2012 : « Risques de crue et de ruissellement superficiel en métropole méditerranéenne : cas de la partie ouest du Grand Alger. » Thèse de doctorat en Géographie. Université Paris Diderot - Paris 7
- Méndez M. Galván B. Salazar D. et Greiner D., 2006 : « Multiple-Objective Genetic Algorithm Using The Multiple Criteria Decision Making Method TOPSIS », MOPGP'06: 7th Int. Conf. on Multi-Objective Programming and Goal Programming.
- Morris E. et Woolhiser D., 1980 : « Unsteady one-dimensional flow-over a plane : Partial equilibrium and recession hydrographs. » Water Resources Research 16(2), pp. 355–360.
- Moussa R. et Bocquillon C., 1996 : « Algorithms for solving the diffusive wave flood routing equation. » Hydrological Processes 10, pp. 105–123.

- Mousseau V., 1993 : « Problèmes liés à l'évaluation de l'importance relative des critères en aide multicritère à la décision : réflexions théoriques, expérimentations et implémentations informatiques », Thèse de doctorat, Université Paris-Dauphine.
- Mualem Y., 1976 : « New model for predicting hydraulic conductivity of unsaturated porous-media. » *Water Resources Research* 12(3), pp. 513–522.
- Musy A. et Gigy C., 2004 : « Hydrologie, science de la nature. » Lausanne : Presses polytechniques et universitaires romandes, pp. 314.
- Musy A. et Soutter M., 1991 : « Physique du sol. » Lausanne : Presses polytechniques et universitaires romandes, pp. 348.
- Naaïm M, Degoutte G, Delorme F., 2010 : « Les vagues dans les retenues d'altitudes analyse et méthodes pour la prévention. » Cemagref, Sciences eaux et territoires, numéro spécial risques naturels.
- Orencio P.M., Fujii M. 2013 : « A localized disaster-resilience index to assess coastal communities based on an analytic hierarchy process (AHP). » *International Journal of Disaster Risk Reduction*. Vol. 3 p. 62–75.
- Pan C. Z. et Shangguan Z. P., 2006 : « Runoff hydraulic characteristics and sediment generation in sloped grassplots under simulated rainfall conditions. » *Journal of Hydrology* 331(1-2), pp. 178–185.
- Pansu M. et Gautheyrou J., 2003: « L'analyse du sol minéralogique, organique et minérale. » Bonchamp-lès-Laval : Springer, pp. 993.
- Parlange J. Y., Hogarth W. L. et Parlange M., 1984 : « Optimal analysis of a surface crust. » *Soil Science Society of America Journal* 48, pp. 494–497.
- Parsons A. et Stone P., 2006 : « Effects of intra-storm variations in rainfall intensity on interrill runoff and erosion. » *CATENA* 67(1), pp. 68 – 78.
- Parsons A. J., Brazier R. E., Wainwright J. et Powell D. M., 2006 : « Scale relationships in hillslope runoff and erosion. » *Earth Surface Processes and Landforms* 31(11), pp. 1384–1393.
- Philip J. R., 1957 : « Numerical solution of equations of the diffusion type with diffusivity concentration-dependent. » *Aust. J. Phys.* 10, pp. 29–42.
- Poesen J., 1984 : « The influence of slope angle on infiltration rate and hortonian overland flow volume. » *Zeitschrift für Geomorphologie* 49, pp. 117–131.
- Rawls W., Brakensiek D., Simanton J. et Kohl K., 1990 : « Development of a crust factor for a Green-Ampt model. » *Transactions of the Asae* 33, pp. 1224–1228.
- Ribolzi O., Bariac T., Bresson L., Dupin B., Keooudone K., Phanthavong K., Ri-chard P., Thiebaut J. P., Silvera N., Soullilab B., Valentin C. et Vandervaere J. P., 2004 : « Why does infiltration rate increase with slope gradient ? » *Luang Phrabang, Laos*.
- Roche M.F., 1986 : « Dictionnaire Français d'hydrologie de surface. » Paris, Masson, 288 p.
- Roche.M, 1963 : « Hydrologie de surface, » Edition Gauthier-Villars, Paris.
- Rogers M., Bruen, M. and Maystre, L-Y. 2000 : « ELECTRE and decision support, method and applications in engineering and infrastructure investment. » Kluwer Academic Publisher, ISBN 0-7923-8647-7, USA.
- Roy B, Bouyssou D., 1993 : « Aide Multicritère à la Décision : Méthodes et cas. » Economica, Paris.
- Roy B., 1968 : « Classement et Choix en Présence de Points de Vue Multiples (la Méthode Electre). » *Revue française d'informatique et de recherche opérationnelle*. Vol 2, N° 8, p57-75.
- Roy B., 1978 : « Electre III, un Algorithme de Classement Basé sur une Représentation Floue des Préférences en Présence de Critères Multiples. » *Cahiers du CERO*, Vol 20, N° 1, p3-24.
- Roy B., 1985 : "Méthodologie multicritère d'aide à la décision", 1er Ed, Economica, Paris.
- Ruy S., Findeling A. et Chadoeuf J., 2006 : « Effect of mulching techniques on plot scale runoff : FDTF modeling and sensitivity analysis. » *Journal of Hydrology* 326(1-4), pp. 277–294.
- Saaty T.L., 1980 : « The Analytic Hierarchy Process. » New York, McGraw-Hill.
- Saaty T.L., 2003 : « Decision-making with the AHP: Why is the principal Eigenvector necessary », *European Journal of Operational Research* 145 -85–91,.

- Salamon J.N., 1997 : « L'homme face aux crues et aux inondations. » Presses universitaires de Bordeaux. 136p.
- Sanchez - Diesma R, I.Zawadski et D. Semper –Torres, 1970 : « Identification of the bright band through the analysis of volumetric radar data. » *Journal of the atmospheric sciences* 27, pp. 299-307.
- Serre D., 2005 : « Evaluation de la performance des digues de protection contre les inondations Modélisation de critères de décision dans un Système d'Information Géographique ». Thèse pour obtenir le grade de Docteur de l'Université de Marne-La-Vallée Paris.
- Sharma K., 1986 : « Runoff behavior of water harvesting macrocatchments. » *Agric. Water Manage.* 11, pp. 137–144.
- Sharma K., Singh H. et Pareek O., 1983 : « Rainwater infiltration into a bare loamy sand. » *Hydrological Sciences Journal-Journal Des Sciences Hydrologiques* 28(3), pp. 417–424.
- Simon H A., 1960 : « *The New Science of Management Decision* », Harper and Brothers, New York.
- Singh V. P., 2005 : « Effects of storm direction and duration on infiltrating planar flow with partial coverage. » *Hydrol. Process.* 19(4), pp. 969–992.
- Smith R. et Hebbert R., 1979 : « Monte-carlo analysis of the hydrologic effects of spatial variability of infiltration. » *Water Resources Research* 15(2), pp. 419–429.
- Sneddon J. et Chapman T., 1989 : « Measurement and analysis of depression storage on a hillslope. » *Hydrological Processes* 3, pp. 1–13.
- Stomph T. J., Ridder N. D. et van de Giesen N. C., 2001 : « A flume design for the study of slope length effects on runoff. » *Earth Surface Processes and Landforms* 26(6), pp. 647–655.
- Stone J. J., Paige G. B. et Hawkins R. H., 2008 : « Rainfall intensity-dependent infiltration rates on rangeland rainfall simulator plots. » *Transactions of the Asabe* 51(1), pp. 45–53.
- Taibi B., 2010 : « L'analyse Multicritère comme outil d'aide à la décision : Application de la méthode PROMETHEE. Etude de cas : l'entreprise SEROR. » Mémoire de Magistère en Sciences Economiques. Université Abou-Bekr-Belkaid Tlemcen. Algérie.
- Tayfur G., Kavvas M., Govindaraju R. et Storm D., 1993 : « Applicability of St-Venant equations for 2-Dimensional overland flows over rough infiltrating surfaces. » *Journal of hydraulic engineering-ASCE* 119(1), pp. 51–63.
- Thouret J.-C., D'Ercole R., 1996 : « Vulnérabilité aux risques naturels en milieux urbains : effets, facteurs et réponses sociales. » *Cahier des sciences humaines*, 32-2, 407-422.
- Van Genuchten M., 1980 : « A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soil. » *Soil Science Society of America Journal* 44, pp. 892–898.
- Van Giesen N. C., Stomph T. J. et Ridder N., 2000 : « Scale effects of Hortonian overland flow and rainfall-runoff dynamics in a West African catena landscape. » *Hydrological Processes* 14(1), pp. 165–175.
- Vandervaere J. P., Vauclin M. et Elrick D. E., 2000 : « Transient flow from tension infiltrometers : II. four methods to determine sorptivity and conductivity. » *Soil Science Society of America Journal* 64(4), pp. 1272–1284.
- Vandervaere J. P., Vauclin M., Haverkamp R., Peugeot C., Thony J. et Gilfedder M., 1998 : « Prediction of crust-induced surface runoff with disc infiltrometer data. » *Soil Sci.* 163, pp. 9–21.
- Vandervaere J., Peugeot C., Vauclin M., Jaramillo R. A. et Lebel T., 1997 : « Estimating hydraulic conductivity of crusted soils using disc infiltrometers and minitensiometers. » *Journal of Hydrology* 188-189, pp. 203–223.
- Vincke, P., 1989 : « L'aide multicritère à la décision. » Édition Ellipses, Paris.
- Wainwright J. et Parsons A. J., 2002 : « The effect of temporal variations in rainfall on scale dependency in runoff coefficients. » *Water Resources Research* 38(12), pp. 10.
- Wainwright J., 1996 : « Infiltration, runoff and erosion characteristics of agricultural land in extreme storm events, » *France. Catena* 26(1-2), pp. 27–47.
- Water and Environment Engineering Design Office.

- Willett K., Sharda R., 1991 : « Using the analytic hierarchy process in water resources planning: Selection of flood control projects. » *Socio-Economic Planning Sciences*. Vol. 25. Iss. 2 p. 103–112.
- Yen B.C., 1986 : « Rainfall-runoff process on urban catchments and its modeling. *Urban Drainage Modeling* », Dubrovnik, Pergamon Press editor, London, UK, 3-26.
- Zhang W. et Cundy T., 1989 : « Modeling of two-dimensional overland-flow. » *Water Resources Research* 25(9), pp. 2019–2035.

WEB BIBLIOGRAPHIE

- [1] <http://www.elyomnew.com/news/nostalgia>.
- [2] <http://ecolerusicade.free.fr/inond.html>.
- [3] <https://www.djazairess.com/fr/elwatan/106169>.
- [4] <http://video-aol.com/video-detail>.
- [5] http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/pleins_textes_4/hydrologie/14828.pdf.
- [6] http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/pleins_textes_5/b_fdi_04-05/04849.pdf.
- [7] http://www.gesteau.fr/sites/default/files/guide-pluvial_tome2miseenpage.pdf.
- [8] http://www.grr.ulaval.ca/gae_3005/Labos/Ref/CH_12_R_Qmax.pdf.
- [9] http://www.grr.ulaval.ca/gae_3005/Labos/Ref/CH_12_R_Qmax.pdf.
- [10] http://www.grr.ulaval.ca/gae_3005/Labos/Ref/CH_12_R_Qmax.pdf.
- [11] http://www.grr.ulaval.ca/gae_3005/Labos/Ref/CH_12_R_Qmax.pdf.
- [12] https://perso.univ-rennes1.fr/pierre.nerzic/Projets2A/Decision/Cours_MCDA_AN.pdfref.
- [13] https://perso.univ-rennes1.fr/pierre.nerzic/Projets2A/Decision/Cours_MCDA_AN.pdf.
- [14] https://perso.univ-rennes1.fr/pierre.nerzic/Projets2A/Decision/Cours_MCDA_AN.pdfref.
- [15] http://www.gesteau.fr/sites/default/files/gesteau/content_files/document/guide-pluvial_tome2miseenpage.pdf.
- [16] <http://amachnoug-hamid.e-monsite.com/medias/files/chapitre4.pdf>.
- [17] <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01128341/document>.

Résumé :

Pour caractériser la capacité d'un bassin versant à ruisseler, un paramètre est très souvent utilisé en hydrologie de surface à savoir le coefficient de ruissellement (CR). L'estimation traditionnelle du CR est souvent faite à partir d'abaques basés sur 2 à 3 paramètres au maximum.

Dans ce travail, on présente trois modèles numériques.

Deux modèles sont établis sur la base de travaux expérimentaux. Le premier est fondé sur trois critères : le couvert végétal, le type de sol et la pente. Le deuxième considère la taille du bassin versant, la pluviométrie journalière maximale et la catégorie du sol.

Dans la pratique il n'est pas évident d'estimer le CR en considérant simultanément l'influence de plusieurs critères. Pour surmonter ce problème un troisième modèle est établi où nous présenterons une méthodologie permettant de capitaliser les informations à travers les deux premiers modèles cités.

Notre but est de pouvoir vérifier la comparabilité de ces critères et d'en apprécier l'importance relative de chacun deux.

Mots clés : Coefficient de ruissellement, Processus d'Analyse Hiérarchique, précipitations journalières maximales, type de sol, couvert végétal, pente, surface du bassin versant.

Abstract

The runoff coefficient (RC) is a parameter that is very often used in surface hydrology in order to characterize the drainage capacity of a watershed. The traditional estimate of this coefficient is often made from abacuses based on 2 or 3 parameters to the maximum.

In this work, three numerical models are presented.

Two models are based on experimental work. The first one is based on three criteria : vegetation cover, type of soil, and slope. The second one considers the size of the watershed, the maximum daily rainfall and the type of soil.

In practice, it is not easy to estimate the coefficient of runoff by simultaneously considering the influence of several criteria. In order to overcome this problem, a third model is developed and presented; it allows capitalizing the information from the first two models mentioned above.

The objective of the present work is to be able to verify the comparability of these criteria and to assess the relative importance of each of them.

Keywords : Runoff coefficient; Hierarchical Analysis Process; Maximum daily rainfall; Type of soil; Vegetation cover; Slope; Watershed surface.

ملخص

لوصف قدرة جريان المياه في حوض مائي طبيعي، غالبًا ما يستخدم في الهيدرولوجيا السطحية معامل الجريان السطحي (CR)، حيث يتم تقدير قيمته من الرسوم البيانية على أساس الأخذ بالاعتبار معاملين أو ثلاثة معاملات على الأكثر. في هذا العمل، نقدم ثلاثة نماذج رقمية.

تم إنشاء نموذجين على أساس الأعمال التجريبية. يعتمد النموذج الأول على ثلاثة معايير هي: الغطاء النباتي ونوع التربة والمنحدر. بينما يعتمد النموذج الثاني على مساحة أحواض المياه، والحد الأقصى من الأمطار اليومية ونوع التربة.

من الناحية العملية، ليس من السهل تقدير بصفة دقيقة تأثير عدة معايير على هذا المعامل. للتغلب على هذه المشكلة، تم إنشاء نموذج ثالث حيث سنقدم منهجية لدمج المعلومات من خلال النموذجين الأولين المذكورين.

الغرض من ذلك هو التحقق من قابلية مقارنة هذه المعايير وتقدير الأهمية النسبية لكل واحد منها على الجريان السطحي للمياه.

الكلمات المفتاحية:

معامل الجريان السطحي، طريقة التحليل الهرمي، الحد الأقصى من الأمطار اليومية، نوع التربة، الغطاء النباتي، المنحدر، مستجمعات المياه.