

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Mohamed Seddik Benyahia Jijel
Faculté de la Technologie



Département de Génie Civil et Hydraulique

MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Hydraulique

Option : Hydraulique Urbaine

Présenté par :

**ASSAOUS YAMNA
KEMMACHE RANIA**

MODELISATION PLUIE-DEBIT DES CRUES ECLAIRS DANS TROIS BASSINS VERSANTS DE L'EST DE L'ALGERIE

Dirigé par :

- Mr. ABDI ISHAK

Soutenu publiquement le 13 / 09 / 2021 devant le jury composé de :

- Président : AINAS BELKACEM
- Examineur : BELAABED FARES

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciements

Tout d'abord, nous remercions Dieu Tout-Puissant de nous avoir donné la santé, la volonté et la patience pour accomplir ce travail.

Nos sincères remerciements à notre encadrant Mr 'ABDI Ishak', pour son aide, ses conseils, sa patience, et le temps qu'il nous a accordé pour notre encadrement.

Notre profonde gratitude aux membres du jury qui ont bien voulu juger notre modeste travail.

Et à tous les enseignants du département d'hydraulique qui ont contribué à notre formation, sans oublié Mr « RATIAT Abd El-Kader »

Nous exprimons nos sincères remerciements à nos adorables parents qui nous ont encouragés à poursuivre ce travail.

Dédicace

A ma mère,

A mon père,

*Qui n'ont jamais cessé, de formuler des prières à mon égard, de me soutenir et de m'épauler
pour que je puisse atteindre mes objectifs.*

A mon cher frère, Chakib,

A mes sœurs jumelles, Rahma et Hadia,

Pour ses soutiens moral et leurs conseils précieux tout au long de mes études.

A mon cher grand-père et ma chère grand-mère,

Qui je les souhaite une bonne santé.

A mon fiancé,

Qui m'a aidé et supporté dans les moments difficiles.

*A mes chères amies Rania (chère amie avant d'être binôme), Meriem, Ghada, Soumia et
Roukaya,*

Qui m'ont aidé qu'elles le sachent.

A toute ma famille,

A tous mes autres ami(e)s,

A tous ceux que j'aime et ceux qui m'aiment,

A vous cher lecteurs.

Yamna.

Dédicace

Je dédie avec grand plaisir, ce modeste travail à :

Tout d'abord je tiens à remercier Dieu Tout puissant ;

A mes très chers parents qui m'ont guidé durant les moments les plus pénibles de ce long chemin,

Ma mère qui a été à mes côtés et m'a soutenu durant toute ma vie,

Mon père qui a sacrifié toute sa vie afin de me voir devenir ce que je suis,

'Merci mes parents'.

À ma jumelle Ghada ;

A mes frères et à mes chères sœurs ;

Sans oublier mes nièces et mes neveux

Et à mon ange Romaisa qui est partie si tôt

A mon cher binôme Yamna ;

Et tous mes amis proches : Meriem, Soumia, Yousra ,Ahlam et Khadidja

A tous ceux que j'aime et ceux qui m'aiment, et a tous ceux qui ont contribué de loin ou de près à la réalisation de mon travail.

Rania

Résumé

L'Algérie, est parmi les régions méditerranéennes qui sont affectées par des crues qui engendrent des inondations, l'apparition de ces crues est soudaine, souvent difficilement prévisibles, le temps de montée rapide et de débit spécifique relativement important. L'objectif du travail présent sert d'identifier les modèles pluie-Débit qui s'adapte le mieux et adéquat pour reproduire les hydrogrammes des crues observés selon les critères de performance, Pour cela on a testé quatre fonctions de production ; Soil Conservation Curve Number (SCS-CN), Modified Mishra Singh (MMS), Horton et Philip, qui diffèrent selon leur structure et hypothèses et qui ont été comparé selon les critères MAE, MARE et Pbias.

Le modèle MMS était plus efficace que les autres, les meilleurs résultats ont été observés dans le Bassin El Kebir, pour lequel 'The mean absolute error' (MAE) et 'The mean absolute relative error' (MARE) dans la validation étaient respectivement de 0.509 et 0.263. La meilleure fonction de production qui est MMS a été couplée avec deux modèles de transfert à servi Nash et Weibull, la performance des modèles de transfert utilisés a également été évaluée visuellement et statistiquement à l'aide des critères de, ' Nash et Sutcliffe efficiency'(NSE) et 'The mean relative peak flow error' (PPEAK), on constate que ces deux modèles réagissent, globalement, de façon similaire.

Mots clés : SCS-CN, MMS, hydrogramme de crue, fonction de production, fonction de transfert

Abstract

Algeria, is one of the Mediterranean regions which are affected by floods which generate floods, the onset of these floods is sudden, often difficult to predict, the rapid rise time and relatively high specific flow. The objective of this work is to identify the most suitable and adequate rainfall-flow models to reproduce the hydrographs of the observed floods according to the performance criteria. For this we tested four production functions; Soil Conservation Service-Curve Number (SCS-CN), Modified Mishra Singh (MMS), Horton and Philip, which differ according to their structure and assumptions and which were compared according to the MAE, MARE and Pbias criteria.

The MMS model was more efficient than the others, the best results were observed in the El Kebir basin, for which the "mean absolute error" (MAE) and "mean absolute relative error" (MARE) in the validation were 0.509 and 0.263, respectively. The best production function that is the MMS was coupled with two transfer models served Nash and Weibull, the performances of the transfer models used were also evaluated visually and statistically using the criteria of "the efficiency of Nash and Sutcliffe "(NSE) and" the relative average "peak flow error" (PPEAK), we see that these two models react, overall, in a similar way.

Key words: SCS-CN, MMS, flood hydrograph, production function, transfer function

ملخص

تعتبر الجزائر من بين مناطق البحر الأبيض المتوسط المتأثرة بالفيضانات التي تولد فيضانات، وظهور هذه الفيضانات مفاجئ، وغالبًا ما يصعب التنبؤ به، وهو وقت الارتفاع السريع والتدفق النوعي المرتفع نسبيًا. الهدف من العمل الحالي هو تحديد نماذج تصريف المطر الأنسب والكافية لإعادة إنتاج مخطط هيدروغرافي للفيضانات المرصودة وفقًا لمعايير الأداء لهذا اختبارنا أربع وظائف إنتاجية؛ رقم منحنى حفظ التربة (SCS-CN)، تعديل ميشرا سينغ (MMS)، هورتون (Horton) وفيليب (Philip)، والتي تختلف وفقًا لبنيتها وفرضياتها والتي تمت مقارنتها وفقًا لمعايير MAE و MARE و Pbias،

كان نموذج MMS أكثر كفاءة من النماذج الأخرى، ولوحظت أفضل النتائج في حوض الكبير (El-Kebir)، حيث كان "متوسط الخطأ المطلق MAE" و "متوسط الخطأ النسبي المطلق MARE" في التحقق على التوالي 0.509 و 0.263. تم ربط أفضل وظيفة إنتاج وهي MMS بنموذجي نقل خدمتا Nash و Weibull، كما تم تقييم أداء نماذج النقل المستخدمة بصريًا وإحصائيًا باستخدام معايير كفاءة وهي (NSE) و "المتوسط النسبي خطأ تدفق الذروة" (PPEAK)، نرى أن هذين النموذجين يتفاعلان بشكل عام بطريقة مماثلة.

الكلمات المفتاحية: MMS، SCS-CN، هيدروغراف الفيضان، وظيفة الإنتاج، وظيفة النقل.



Sommaire

Remerciement	
Dédicaces	
Résumé	
Abstract	
ملخص	
Sommaire	
Liste des symboles	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Introduction générale	

Chapitre I : Généralités sur le processus hydrologique

I.1.Introduction.....	1
I.2.Le cycle hydrologique:	1
I.2.1. Les différentes phases du cycle de l'eau :	2
I.2.1.1. L'évaporation :	2
I.2.1.2. La transpiration.....	2
I.2.1.3. L'évapotranspiration (ET)	2
I.2.1.4. La condensation :	3
I.2.1.5. Les précipitations :	3
I.2.1.6. L'infiltration	4
I.2.1.7. Le ruissellement.....	4
I.2.1.8. Écoulement des eaux.....	5
I.2.2. Les principales causes de dérèglement du cycle de l'eau	6
I.2.3. Impact du dérèglement du cycle.....	7
I.3. Bassin versant	7
I.3.1. Le fonctionnement hydrologique d'un bassin versant.....	8
I.3.2. Réponse hydrologique	9
I.3.2.1. Interrelations pluie-débit	9

I.4. Les crues	10
I.4.1. Caractéristique des crues.....	10
I.4.2. Origine des crues	11
I.4.3. Les phénomènes associés aux crues	11
I.4.4. Causes de formation des crues et des inondations.....	11
I.4.4.1. Abondance des précipitations.....	11
I.4.4.2. Fusion brutale des neiges	11
I.4.4.3. Débâcles des glaces fluviales	12
I.4.4.4. Accidents.....	12
I.4.4.5. La propagation de l'onde de crue	12
I.4.5. La typologie des crues	12
I.4.5.1. Crue soudaine ou crue-éclair	12
I.4.5.2. Crue rapide	12
I.4.5.3. Crue lente	12
I.4.6. Les crues éclairs	13
I.4.6.1. La prévision des crues éclairs	13
I.4.6.2. processus du ruissellement au cours des crues éclairs	14
I.4.7. Les impacts des crues	15
I.5. Les inondations	15
I.5.1. Le risque d'inondation.....	15
I.5.1.1. L'aléa	16
I.5.1.2. La vulnérabilité.....	16
I.5.2. La typologie des inondations	16
I.6. Les crues et les inondations en Algérie	18
I.7. Conclusion	21

Chapitre 2: L'état de l'art de la modélisation hydrologique

II.1. Introduction	22
II.2. Modélisation hydrologique.....	22
II.3. Historique de la modélisation	22
II.4. But de la modélisation hydrologique	24
II.5. Processus de transformation Pluit-Débit	24
II.6. Qu'est ce qu'un modèle ?.....	25

II.6.1. Etapes d'élaboration d'un modèle.....	26
II.6.2.Critères de qualité d'un modèle hydrologique	27
II.6.3.Les domaines d'application des modèles Pluit-Débit	27
II.7. Classification des modèles pluie-débit.....	28
II.7.1.Modèles stochastiques	29
II.7.2. Modèles déterministes	29
II.7.2. a. Modèles à base physique.....	30
II.7.2. b. Modèles paramétriques	30
II.8. Présentation de quelques modèles hydrologiques	31
II.8.1. Présentation du modèle Géni Rural (GR).....	31
II.8.1.1.Introduction.....	31
II.8.1.2.Historique.....	32
II.8.1.3.Mode de développement	32
II.8.1.4.Objectifs de développement.....	33
II.8.1.5.Principales caractéristiques	33
II.8.2.Description du modèle pluie débit annuel GR1A	33
II.8.3.Description du Modèle Pluie-Débit Mensuel GR2M.....	34
II.8.4.Description du Modèle Pluie-Débit journalier GR4J	35
II.8.5. Le modèle HBV	36
II.8.5.1. Description du modèle de base HBV.....	37
II.9.Mise en œuvre d'un modèle hydrologique	38
II.9.1.Choix d'un modèle	38
II.9.2.Calage du Modèle Hydrologique	38
II.9.2.1. Méthodes de Calage des Modèles Pluies-Débits.....	39
II.9.3. Validation :	39
II.9.4.Incertitudes.....	40
II.10. Conclusion	40

Chapitre III: Présentation de la zone d'étude

III.1. Introduction	41
III.2.Présentation de la zone d'étude.....	41
III.2.1.Zone d'étude N° 1 « bassin versant El Kebir »	41
III.2.1.1.Présentation de la Wilaya de Mila	41

III.2.1.2. Généralités sur le bassin versant El Kebir	44
III.2.2. Zone d'étude N°2 « bassin versant de Timgad »	46
III.2.2.1. Présentation de la Wilaya de Batna	46
III.2.2.2. Présentation du Bassin de Timgad :	47
III.2.3. Zone d'étude N° 3 « bassin versant Zerdasas »	48
III.2.3.1. Présentation de la wilaya de Skikda :	48
III.2.3.2. Présentation du Bassin de Zerdasas :	49
III.3. Délimitation de la zone d'étude	51
III.4. La couverture végétale des bassins versants étudiés	52
III.5. Analyse morpho-métrique du Bassin versant	53
III.5.1. Caractéristique de forme	53
III.5.1.1. Indice de compacité de Gravelius (Kc)	53
III.5.1.2. Le rectangle équivalent	54
III.5.2. Caractéristiques hydrographiques	54
III.5.2.1. Rapport de confluence	55
III.5.2.2. Rapport des longueurs	55
III.5.2.3. Densité de drainage	55
III.5.2.4. Densité hydrographique	55
III.6. Les résultats	56
III.7. Conclusion	57

Chapitre IV: Application de la modélisation Pluie-Débit

IV.1. Introduction	58
IV.2. La séparation des écoulements	58
IV.2.1. La méthode du filtre digital	58
IV.3. La fonction de production:	59
IV.3.1. Modélisation de l'infiltration à l'échelle du bassin versant	60
IV.3.1.1. Modèle SCS-CN:	60
IV.3.1.2. Modèle MISHRA-SINGH (MMS)	64
IV.3.2. Modélisation de l'infiltration à l'échelle de la parcelle :	65
IV.3.2.1. Modèle de Horton	65
IV.3.2.2. Le modèle de Philip :	66
IV.4. Fonction du Transfert :	67

IV.4.1. L'Hydrogramme Unitaire :	68
IV.4.2. Le Modèle de NASH :	69
IV.4.3. Le Modèle du Weibull :	69
IV.5. Les critères de performances	70
IV.6. L'optimisation automatique	71
IV.6.1. Les algorithmes génétiques	71
IV.6.2. Le front de Pareto	72
IV.7. Analyse et traitement des données	72
IV.7.1. Modélisation de la relation pluie-débit	73
IV.7.2. Application des modèles	74
IV.7.2.1. Fonction de production.....	74
IV.7.2.2. Fonction du transfert	79
IV.7.2.2.1. les résultats.....	79
IV.7.2.3. Hydrogramme de crue	86
IV.8. Conclusion	88

Conclusion générale

Liste des références

La liste des symboles

Q : le débit (m^3/s).

Kc : Indice de compacité de Gravelius.

P : périmètre du bassin versant (Km)

S : Surface du bassin versant (Km^2)

L : la longueur du rectangle équivalent (Km)

l : la largeur du rectangle équivalent (Km)

Rc : rapport de confluence.

Nn : nombre de cours d'eau d'ordre n.

Nn+1 : nombre de cours d'eau d'ordre n+1.

Ln : longueur de cours d'eau d'ordre n (Km)

Ln+1 : longueur de cours d'eau d'ordre n+1 (Km)

Dd : densité de drainage(km/km^2).

L : longueur cumulée de tous les thalwegs du bassin (km)

Lce : La longueur principale du cours d'eau (Km)

F : Densité hydrographique.

af : paramètre du filtre digitale.

P : précipitation totale (mm).

Ia : prélèvement initial dépend du CN et λ .

F: infiltration cumulative.

R : ruissellement direct.

S : la rétention maximale potentielle.

λ : le coefficient de prélèvement initial.

F (t) : Capacité d'infiltration au temps t (mm/h).

f₀ : Capacité d'infiltration initiale (mm/h).

f_c: Capacité d'infiltration finale (mm/h).

t : Temps écoulé depuis le début de l'averse (h).

c : Constante empirique, fonction de la nature du sol (min⁻¹).

S: la « sorptivité » du sol.

u(t) : hydrogramme unitaire instantané du bassin versant simulé

N : nombre de réservoirs en série.

K : coefficient de stockage, t est le temps

Γ : fonction gamma.

La liste des figures

Figure I.1 : Processus du cycle hydrologique.....	2
Figure I.2 : Cheminement possible de l'eau sur un versant (Ambroise, 1998).....	5
Figure I.3 : Bassin versant topographique.....	7
Figure I.4 : Bassin versant hydrogéologique	8
Figure I.5 : Interrelations pluie-débit.....	10
Figure I.6 : Définition du risque.....	16
Figure I.7 : les types d'inondations d'après Merabet (2006).....	18
Figure I.8 :les dégâts causés par les inondations dans quelques wilayas en Algérie	20
Figure II.1 : Processus de transformation Pluit-Débit.....	25
Figure II.2 : schéma du modèles pluie-débit.....	26
Figure II.3 : les domaines d'application des modèles Pluit-Débit.....	28
Figure II.4 : Les différentes classifications des modèles	29
Figure II.5 : Schéma de la structure du modèle GR2M.....	35
Figure II.6 : Schéma de la structure du modèle GR4J.....	36
Figure III.1 : La situation géographique de la wilaya de Mila.....	42
Figure III.2 : Bassin versant de Barrage Beni Haroun.....	43
Figure III.3 : Situation de la ville de Batna.....	46
Figure III.4 : Situation géographique de la wilaya de Skikda.....	49
Figure III.5 : Vue du Barrage de Zerdasas depuis le versant rive droite.....	50
Figure III.6 : Délimitation des bassins versants étudiés.....	52
Figure III.7 : la couverture végétale des bassins versants étudiés.....	53
Figure IV.1 : Méthode du SCS. (Musy, 1998).....	60
Figure IV.2 : Infiltration par l'équation de Horton.....	65
Figure IV.3 : Les différentes caractéristiques de l'Hydrogramme Unitaire.(Musy et al. 2009b).....	68

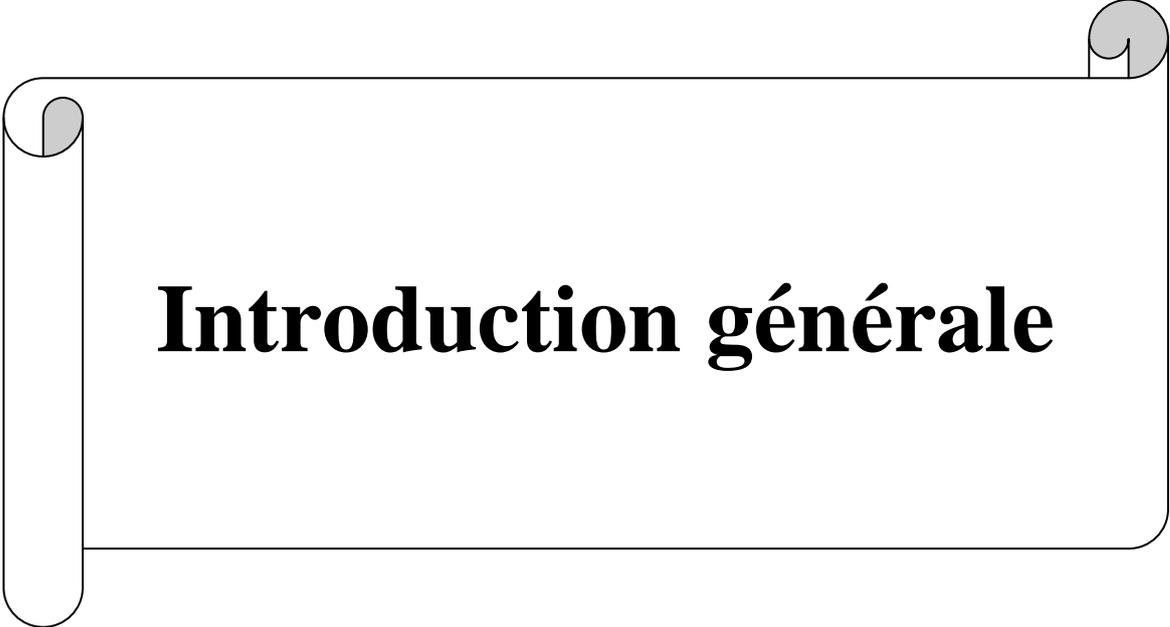
Figure IV.4 : Le front de Pareto.....	72
Figure IV.5: la répartition des événements selon le calage et la validation.....	74
Figure IV.6 : la répartition des débits observés et les débits simulés pour les trois bassins Selon les modèles de la fonction de production du Bassin El Kebi.....	75
Figure IV.7 : la répartition des débits observés et les débits simulés pour les trois bassins selon les modèles de la fonction de production du Bassin de Timgad	75
Figure IV.8 : la répartition des débits observés et les débits simulés pour les trois bassins selon les modèles de la fonction de production du Bassin de Zerdasas.....	76
Figure IV.9 : les statistiques et la comparaison des modèles d'infiltration basées sur le pourcentage de biais (PBIAS) du Bassin El Kebir.....	76
Figure IV.10 : les statistiques et la comparaison des modèles d'infiltration basées sur le pourcentage de biais (PBIAS) du Bassin de Timgad.....	77
Figure IV.11 : les statistiques et la comparaison des modèles d'infiltration basées sur le pourcentage de biais (PBIAS) du Bassin de Zerdassas.....	77
Figure IV.12: la répartition des débits observés et simulés selon les deux fonction de transfert pour le bassin El Kebir.....	80
Figure IV.13: : la répartition des débits observés et simulés selon les deux fonction de transfert pour le bassin de Timgad.....	80
Figure IV.14: : la répartition des débits observés et simulés selon les deux fonction de transfert pour le bassin Zerdasas.....	81
Figure IV.15: les boites à moustaches des deux fonctions de transfert selon Nash pour le bassin El Kebir.....	82
Figure IV.16: les boites à moustaches des deux fonctions de transfert selon Nash pour le bassin de Timgad.....	82
Figure IV.17: les boites à moustaches des deux fonctions de transfert selon Nash pour le bassin de Zerdasas.....	83
Figure IV.19: les boites à moustaches des deux fonctions de transfert selon PPEAK pour le bassin de Timgad.....	84
Figure IV.20: les boites à moustaches des deux fonctions de transfert selon PPEAK pour le bassin de Zerdasas.....	84
Figure IV.21 : L'hydrogramme de crue pour le plus pluvieux évènement Bassin d'El Kebir.....	86

Figure IV.22 : L'hydrogramme de crue pour le plus pluvieux évènement Bassin de Timgad.....87

Figure IV.23 : L'hydrogramme de crue pour le plus pluvieux évènement Bassin de Zerdasas.....87

La liste des tableaux

Tableau L1 : Diverses inondations en Algérie.....	19
Tableau III.1 : Principaux caractéristiques du bassin versant El Kebir, Timgad et Zerdasas.	56
Tableau IV.1 :CN pour des conditions normales d'humidité du sol.(Chow et al., 1988).....	62
Tableau IV.2 : Classification des classes d'humidité antécédentes (AMC) pour la méthode SCS des prélèvements pluviométriques.....	63
Tableau IV.3 : Valeurs indicatives des paramètres de l'équation de Horton pour différents types de sol (D'après Horton, 1940 cité dans ASCE,1996).(Musy et al., 2009b).....	66
Tableau IV.4 : Les valeurs indicatives de ces paramètres pour différents types de classes texturale (d'après Hillel,1982).(Musy et al., 2009b).....	67
Tableau IV.5 : Valeurs moyennes des critères de performance pour les modèles d'infiltration.....	78
Tableau IV.6 : Statistiques sur les critères de performance NSE et PPEAK pour les deux modèles de transfert sur les trois bassins versants étudiés.....	85



Introduction générale

Introduction générale

L'eau est une ressource naturelle précieuse dont la bonne gestion s'inscrit dans la politique du développement durable tant au niveau d'un pays que d'une région pour ne pas dire mondial. Une bonne gestion de cette ressource est un défi permanent lié à l'évolution démographique, à l'urbanisation et au développement économique de la société tout en tenant compte des changements climatique et de la pollution.

L'eau ne pose pas seulement des problèmes par sa rareté, elle peut aussi être par son abondance à l'origine de catastrophes provoquant des pertes humaines et matérielles considérable tels que les inondations.

Les inondations sont des catastrophes naturelles auxquelles l'humanité est confrontée de nos jours. Plusieurs régions du monde sont touchées avec des dommages considérables. Au cours de ces dernières années, plusieurs pays ont été gravement affectés en Asie (Chine, Bengladesh et Viêt-Nam en 2002 par exemple), en Europe (France, Allemagne, Hongrie et République Tchèque en 2000) et ailleurs dans le monde (Venezuela en 1999, Canada en 1996, Etats-Unis en 2005, etc.). Les coûts engendrés par ces catastrophes naturelles ont doublées ces dix dernières années

L'Algérie, est parmi les régions méditerranéennes qui sont affectées par des crues qui engendrent des inondations dues généralement aux débordements des cours d'eau traversant des villes et des agglomérations. Ces crues dont l'apparition est soudaine, souvent difficilement prévisibles, de temps de montée rapide et de débit spécifique relativement important, elles sont généralement liées à des épisodes pluvieux intenses et se manifestent sur des bassins de taille modérée. Plusieurs catastrophes provoquées par ses crues ont été recensées en Algérie (Alger en novembre 2001, Sidi Bel Abbès en avril 2007, Ghardaïa et Béchar en octobre 2008, etc.).

Pour pouvoir faire face aux risques des inondations provoquées par les crues, les décideurs ont besoin d'outils leur permettant de mieux gérer ces situations de crise. Il faut pouvoir disposer d'outils opérationnels et fiables pour pouvoir prendre les dispositions nécessaires afin d'atténuer les dégâts éventuels.

L'amélioration des outils de modélisation hydrologique est une thématique de recherche très active. Cette amélioration s'évalue grâce au calcul de la performance des modèles pluie-débit, donc la capacité d'un modèle à reproduire des débits observés, qui s'estime à l'aide des critères de performances. Cependant, une amélioration de simulation des débits observés sur un bassin donné peut ne pas être reproductible sur un autre bassin, que ce soit à cause des caractéristiques hydrologiques et des conditions climatiques variables dans le temps.

La modélisation hydrologique est devenue un outil indispensable, il s'agit d'une représentation mathématique simplifiée de tout ou partie des processus du cycle hydrologique par un ensemble de concepts hydrologiques exprimés en langage mathématique et reliés entre

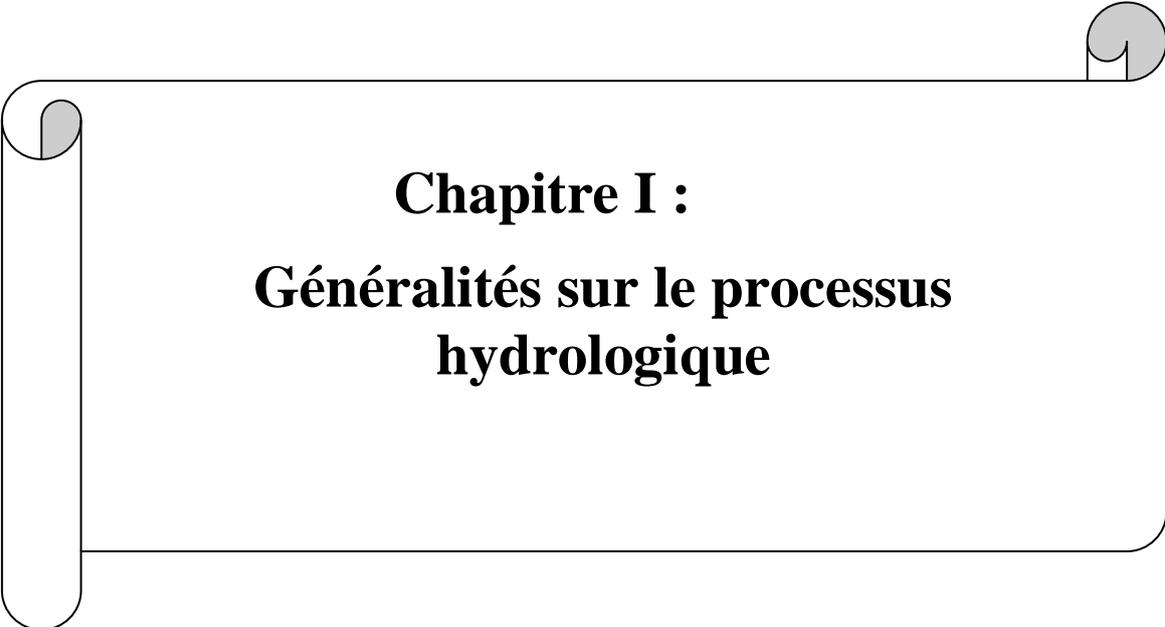
eux dans des séquences temporelles et spatiales correspondant à celles que l'on observe dans la nature

De ce fait le modèle pluie-débit trouve sa nécessité dans la mesure où le modèle conçu à partir des chroniques de pluies observées, peut générer des débits qui soient les plus proches possibles des débits observés, c'est à dire à partir des observations de pluie tombée, on peut arriver à reproduire (ou à prédire) la réponse en débit du bassin.

C'est dans ce contexte que s'inscrit notre mémoire intitulé « Modélisation Pluie-Débit des crues éclairs dans trois bassins de l'Est de l'Algérie », il se divise en quatre chapitres :

- Chapitre I : nommé « Généralités sur le processus hydrologique » consacré à l'étude des processus hydrologiques, nous a donné l'occasion de détailler les divers phénomènes intervenants dans de la génération des débits.
- Chapitre II : nommé « L'état de l'art de la modélisation hydrologique » où nous avons présenté les notions principales de la modélisation hydrologique ainsi que la présentation de quelques modèles.
- Chapitre III : nommé « Présentation de la zone d'étude » où nous avons présenté notre zone d'étude ainsi que les caractéristiques morpho-métrique des bassins versants étudiés.
- Chapitre IV : nommé « Application de la modélisation Pluie-Débit » où nous avons appliqué des modèles de production et de transfert sur les trois bassins étudiés.

Enfin une conclusion générale sera donnée à la fin du travail.



Chapitre I :
Généralités sur le processus
hydrologique

I.1.Introduction

Les crues éclair sont l'une des catastrophes naturelles les plus dévastatrices, causant de nombreux dommages matériels et pouvant souvent entraîner la perte de vies humaines. C'est un problème particulier dans la région méditerranéenne. Ce chapitre présente des notions et concepts fondamentaux liés à l'hydrologie en générale, Tels que le cycle hydrologique, les bassins versants et les crues, avec les concepts de base des crues éclair et de leur prévision, ainsi que les risques d'inondation. À la fin de ce chapitre, on va citer quelques cas des crues et des inondations confrontées en Algérie.

I.2.Le cycle hydrologique:

L'eau sur terre existe dans un espace appelé hydrosphère qui s'étend à environ 15 km dans l'atmosphère et à environ 1 km dans la lithosphère, la croûte terrestre. L'eau circule dans l'hydrosphère à travers le dédale de chemins constituant le cycle hydrologique. (Chow et al., 1988)

Qu'est-ce que le cycle hydrologique? Le « cycle hydrologique», appelé aussi cycle de l'eau, définit l'ensemble des mécanismes qui concernent les mouvements d'eau et de renouvellement d'eau sur la Terre. C'est le circuit naturel de l'eau dans ses différents états entre les océans, l'atmosphère et les eaux des continents. C'est un cycle sans fin et continu.

Comme le montre schématiquement (la Figure I.1) l'eau s'évapore des océans et de la surface terrestre pour faire partie de l'atmosphère; la vapeur d'eau est transportée et soulevée dans l'atmosphère jusqu'à ce qu'elle se condense et précipite sur la terre ou les océans; l'eau précipitée peut être interceptée par la végétation, devenir un écoulement terrestre sur la surface du sol, s'infiltrer dans le sol, s'écouler à travers le sol sous forme d'écoulement souterrain, et rejet dans les cours d'eau sous forme de ruissellement de surface. Une grande partie de l'eau interceptée et du ruissellement de surface retourne dans l'atmosphère par évaporation. L'eau infiltrée peut percoler plus profondément pour recharger les eaux souterraines, émergeant plus tard dans les sources ou suintant dans les cours d'eau pour former un ruissellement de surface, et finalement s'écouler vers la mer ou s'évaporer dans l'atmosphère au fur et à mesure que le cycle hydrologique se poursuit (Chow et al., 1988),(Horton, 1933)

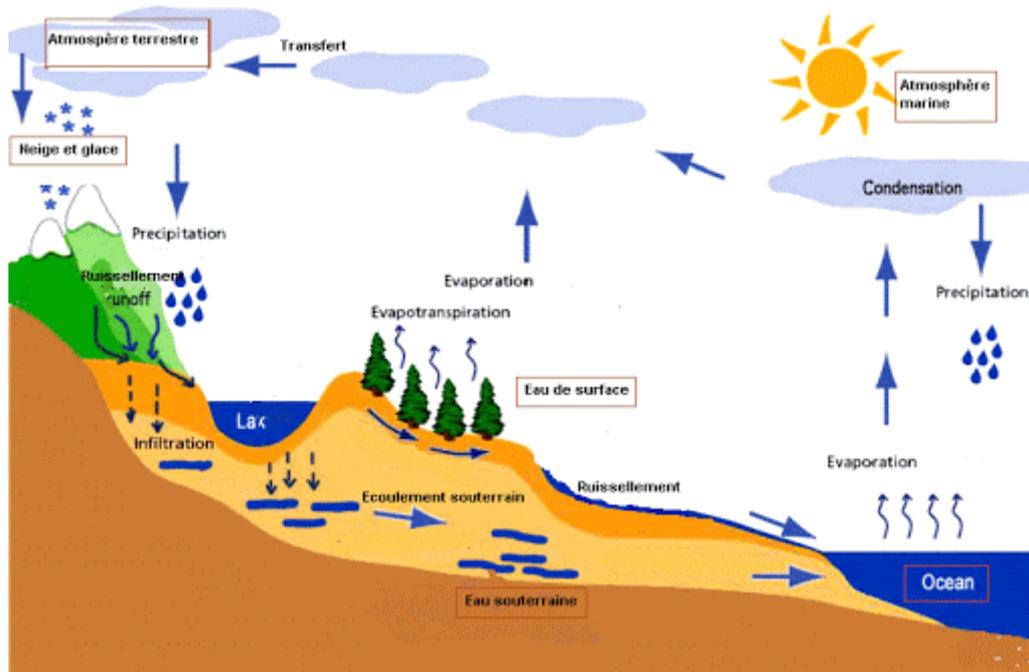


Figure I.1 : Processus du cycle hydrologique (<http://eduterre.ens-lyon.fr/thematiques/hydro/cycleau/modeliser>)

I.2.1. Les différentes phases du cycle de l'eau :

I.2.1.1. L'évaporation :

L'évaporation est la première des phases dynamiques du cycle qu'elle amorce en injectant dans l'atmosphère les masses de vapeurs d'eau prises par échange énergétique à la surface des océans, des lacs, des sols et de la végétation. Emportées par les vents, eux-mêmes produits au moins en partie par l'importance de ces échanges énergétiques, ces masses de vapeur d'eau se transformeront bientôt en nuages et en pluies, dont une partie engendrera sur les continents, rivières et fleuves, et l'océan bouclant ainsi l'immuable cycle hydrologique.

L'évaporation est l'élément invisible de ce cycle, dont l'évaluation sera bien souvent indirecte, fruit du bilan hydrique, exprimant la conservation de l'élément EAU dans un système (échelle spatiale) et pour un intervalle de temps (échelle temporelle) donnés.

I.2.1.2. La transpiration

La transpiration est le processus par lequel l'humidité circule dans les plantes des racines aux fins pores qui se situent sous les feuilles, où elle se transforme en vapeur et relâchée dans l'atmosphère. La transpiration est l'évaporation de l'eau des feuilles des plantes.

I.2.1.3. L'évapotranspiration (ET)

Décrit le transport de l'eau depuis la surface vers l'atmosphère, soit la somme de l'évaporation directe de l'eau du sol et la transpiration par les plantes.

Mis à part les précipitations, l'évapotranspiration est un des termes les plus significatifs du cycle de l'eau. Ce processus est un des principaux consommateurs d'énergie solaire. On distingue deux types de l'évapotranspiration :

➤ ***L'évapotranspiration potentielle (ETP)***

Également nommée **ET_o** (évapotranspiration de référence) est une mesure de la capacité de l'atmosphère à éliminer l'eau de la surface d'un sol avec couvert végétal disposant de l'eau en abondance. Autrement dit, C'est la quantité maximale d'eau susceptible d'être perdue en phase vapeur, sous un climat donné, par un couvert végétal continu spécifié (gazon) bien alimenté en eau et pour un végétal sain en pleine croissance.

➤ ***L'évapotranspiration réelle (ETR)***

Est la quantité de vapeur d'eau évaporée par le sol et par les plantes quand le sol est à une certaine humidité et les plantes à un stade de développement physiologique et sanitaire spécifique.

I.2.1.4. La condensation :

Au contact de l'atmosphère, la vapeur d'eau se refroidit et se transforme en petites gouttelettes qui vont être à l'origine de la formation des nuages, c'est la condensation.

I.2.1.5. Les précipitations :

Les précipitations comprennent toutes les eaux météoriques qui tombent sur la surface de la terre, tant sous forme liquide-bruine, pluie, averse – que sous forme solide- neige, grésil, grêle. Elles résultent de la condensation de la vapeur d'eau présente dans l'air, qui au contact d'air plus froid, s'élève, se condense autour de noyaux de condensation pour former des nuages. Si la condensation est importante, les gouttes d'eau s'alourdissent et finissent par tomber, pour donner de la pluie ou d'autres formes de précipitations suivant les conditions de température. La formation de précipitations intenses nécessite un apport continu d'air humide dans la région considérée. Ces processus impliquent un nombre important de mécanisme différents (Musy et al., 2009a).

Selon Musy, Les caractéristiques des précipitations sont fortement conditionnées par la circulation de l'atmosphère du moment et par les caractéristiques des masses d'air en présence. On distingue :

I.2.1.5.1. Les précipitations convectives

Résultent, par exemple, de la condensation d'une masse d'air instable chargée d'humidité qui se refroidit s'élevant du fait de son instable. Elles sont en général de courte durée, de forte intensité, peu étendues et fortement variable dans le temps et dans l'espace.

Elles peuvent conduire à la formation de cellules pluvieuses uniques ou multiples regroupées dans des systèmes à méso-échelles.

I.2.1.5.2. Les précipitations frontales

Résultent de la confrontation d'une masse d'air froid et d'une masse d'air chaud. Les précipitations générées par un front froid sont souvent brèves et intenses, peu étendues, stratiformes si l'air chaud est stable. Si l'air chaud est instable, les précipitations sont alors convectives et peuvent conduire à des lignes de grains. Les précipitations générées par un front chaud sont généralement longues, étendues et peu intenses. Leur variabilité spatiale et temporelle est limitée.

I.2.1.5.3. Les précipitations orographiques

Les précipitations sont aussi fortement conditionnées par les caractéristiques de la surface terrestre aux petites échelles - orographie, contraste terre/ océan, couverture des sols. Les précipitations orographiques par exemple sont liées à la présence des massifs montagneux qui forcent les masses d'air à s'élever et à se condenser sur les versants au vent. Elles présentent en général une intensité et une fréquence assez régulières. Elles peuvent conduire à des hauteurs précipitées importantes sur des zones étendues dans le cas où les masses d'air sont bloquées de façon prolongée par le relief. Les précipitations orographiques sont généralement non homogènes -- la structure spatiale dépendant du relief et de l'orientation du vent. (Musy et al., 2009a)

I.2.1.6. L'infiltration

L'infiltration est le processus de passage de l'eau à travers les couches superficielles du sol. L'eau s'infiltré sous l'action de la gravité et des forces de pression. Le processus d'infiltration se produit lorsque les précipitations atteignent la surface du sol ou lorsque cette surface est exposée à une submersion. Une fois infiltrée, l'eau peut être reprise par le couvert végétal au travers du système racinaire, retournée dans l'atmosphère par évaporation, se déplacer latéralement et participer à un écoulement de subsurface ou encore percoler plus profondément et participer à la recharge de la nappe. (Musy et al., 2009a)

I.2.1.7. Le ruissellement

L'eau de pluie s'écoule lorsqu'elle rencontre un sol imperméable et dévale de l'amont vers l'aval. Elle ruisselle le long des pentes jusqu'à se déverser dans les rivières, les fleuves et les lacs pour ensuite être transportée jusque dans les mers et les océans. Les rivières, les fleuves ou les lacs qui reçoivent les eaux de ruissellement sont appelés cours d'eau de drainage.

Trois hypothèses permettent d'expliquer la genèse du ruissellement: le ruissellement d'après HORTON (1933), le ruissellement selon les aires contributives, et l'occurrence d'organisations pelliculaires superficielles (OPS). (COSANDEY, 1996)

I.2.1.8. Écoulement des eaux

La figure I.2 schématise les différents processus de génération de l'écoulement des eaux.

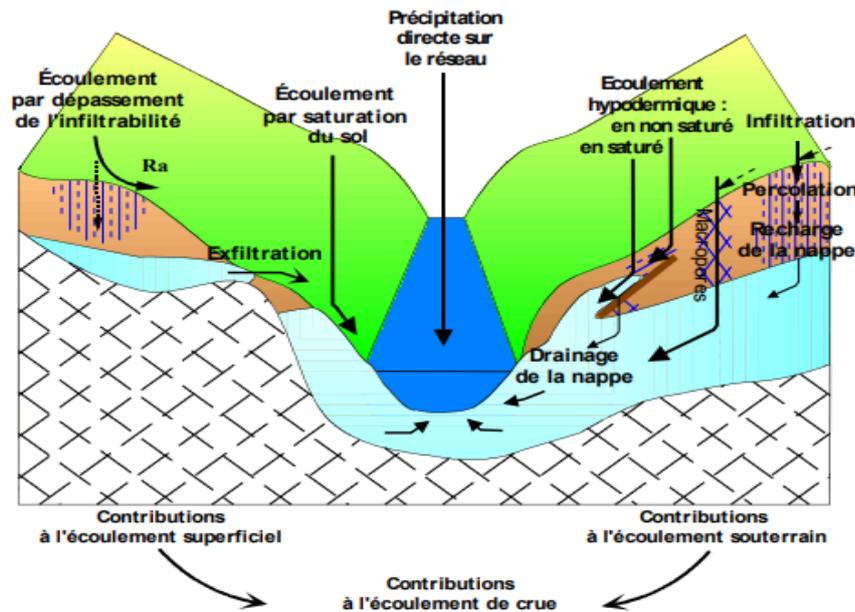


Figure I.2 : Cheminement possible de l'eau sur un versant (Ambroise, 1998)

Les différents processus de l'écoulement des eaux sont expliqués comme suit :

➤ *les précipitations directes à la surface libre du cours d'eau* ("direct précipitation")

Ce type de processus est souvent marginal car la surface occupée par les cours d'eau de type pérenne ne représente qu'une très faible fraction de la surface totale du versant. Dans le cas où le bassin versant développe un réseau hydrologique important suite à des précipitations de longues durées ou si ce dernier présente d'importantes zones lacustres ou marécageuses, l'importance des précipitations directes croît.

➤ *L'écoulement de surface* ("Overland flow")

L'écoulement de surface se divise en :

- Écoulement par dépassement de la capacité d'infiltration ou ruissellement Horton, l'écoulement par excès d'infiltration apparaît lorsque l'intensité de la pluie dépasse la capacité maximale du sol à absorber l'eau. Cette capacité, caractérisée par la capacité d'infiltration du sol, est supposée décroissante dans le temps jusqu'à une valeur constante.
- Écoulement par saturation, L'écoulement sur surfaces saturées se produit lorsque la capacité du sol à stocker l'eau est épuisée et lorsque la capacité à transmettre

latéralement le flux d'eau est dépassée. Par conséquent, la quantité d'eau supérieure à la capacité du sol au stockage et à la transmission latérale par écoulement de subsurface ne pourra pas s'infiltrer et va s'écouler totalement en surface. Cette définition implique que l'écoulement par saturation est produit seulement par les précipitations.

➤ *les écoulements de subsurface* ("Sub-surface flow").

La condition essentielle pour voir apparaître des écoulements de subsurface est que la conductivité hydraulique latérale du milieu doit être nettement supérieure à la conductivité hydraulique verticale.

➤ *Écoulement souterrain* ("Groundwater flow")

L'eau souterraine joue un rôle aussi important dans la génération des écoulements et notamment dans la composante "débit de base" de l'hydrogramme. L'écoulement souterrain en milieu saturé c'est une partie de l'eau qui rejoint la nappe après percolation, va transiter à travers l'aquifère avec une vitesse de quelques mètres par jour à quelques millimètres par an avant de rejoindre le cours d'eau.

I.2.2. Les principales causes de dérèglement du cycle de l'eau

Le cycle de l'eau peut être dérégler suivant des perturbations et des modifications qui provoquent leur processus, pour cela on va citer quelques-uns parmi ceux-ci :

- La déforestation, certaines pratiques agricoles, l'urbanisation ont pour effet d'augmenter le ruissellement des eaux de pluie sur le sol. L'imperméabilisation du sol en milieu urbain, l'absence de couverture végétale en milieu rural sont autant de facteurs qui entraînent une diminution de la capacité d'infiltration par les sols ou d'évacuation par des réseaux de drainage des eaux pluviales.
- Le prélèvement de l'eau des nappes pour des usages domestiques ou agricoles peut contribuer à l'abaissement de leur niveau surtout durant des périodes de pluviométrie moindre.
- Les végétaux ont une influence sur le cycle de l'eau. L'eau est pompée par les racines des végétaux et en partie relâchée dans l'atmosphère par évapotranspiration ce qui permet de réguler les températures.
- La modification des cours d'eau (détournement des cours d'eau, approfondissement du lit, bétonnage des berges et parfois du fond, augmentation de la hauteur des berges, rectification des cours, la mise en place de barrages,...) provoque des changements durables de leurs composantes physiques (pente, profondeur, vitesse du courant, forme des berges,...). Ces modifications ont des

répercussions sur le fonctionnement des écosystèmes qui ne sont pas toujours prévisibles à long terme.

I.2.3. Impact du dérèglement du cycle

- Des événements météorologiques extrêmes et plus nombreux : vagues de chaleur, cyclones, sécheresse des sols, submersions marines ;
- Des écosystèmes perturbés : 20 à 30 % des espèces animales et végétales seraient menacées d'extinction ;
- Des productions agricoles en baisse notamment à cause de l'inadaptation des cultures aux nouvelles conditions climatiques, du manque possible d'eau ...
- Des risques sanitaires accrus notamment en raison de l'avancée d'insectes vecteurs de maladies ...

I.3. Bassin versant

Le bassin versant en une section d'un cours d'eau est défini comme la surface drainée par un cours d'eau et ses affluents en amont de la section. Tout écoulement prenant naissance à l'intérieur de cette surface doit donc traverser la section considérée, appelée exutoire, pour poursuivre son trajet vers l'aval. (Laborde, 2009)

Selon la nature des terrains, nous serons amenés à considérer deux définitions :

- Bassin versant topographique Si le sous-sol est imperméable, le cheminement de l'eau ne sera déterminé que par la topographie. Le bassin versant sera alors limité par des lignes de crêtes et des lignes de plus grande pente comme le montre la figure I.3

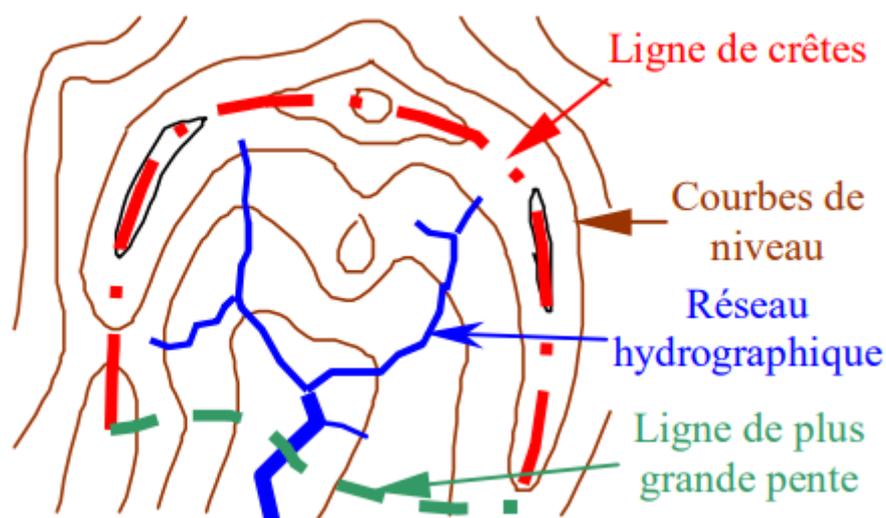


Figure I.3 : Bassin versant topographique (<http://fr.scribd.com/doc/187308448/Hydro-Logie>)

- Bassin versant hydrogéologique : Dans le cas d'une région au sous-sol perméable, il se peut qu'une partie des eaux tombées à l'intérieur du bassin topographique s'infilte puis sorte souterrainement du bassin.

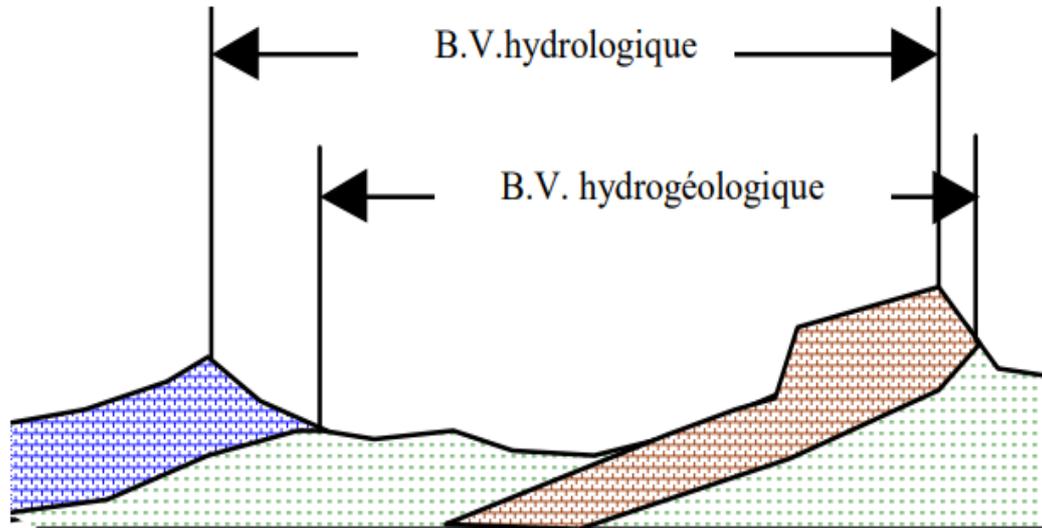


Figure I.4 : Bassin versant hydrogéologique. (<http://fr.scribd.com/doc/187308448/Hydro-Logie>)

I.3.1. Le fonctionnement hydrologique d'un bassin versant

Le fonctionnement de tout bassin versant obéit à quelques grands principes physiques, dont la prise en compte explicite permet de faciliter grandement son analyse et sa compréhension. Comme pour tout système - ensemble d'éléments en interaction - ce fonctionnement se manifeste par l'évolution au cours du temps et dans l'espace de certaines grandeurs décrivant les propriétés du milieu. (Ambroise, 1999)

Le fonctionnement hydrologique d'un bassin versant se manifeste par 3 grands types de processus:

- processus de stockage/déstockage dans le bassin, puisque l'eau (sous ses 3 phases vapeur, liquide, solide) peut y être plus ou moins retenue dans différents réservoirs: couche limite de surface atmosphérique, manteau neigeux, couvert végétal (sur et dans les plantes), surface du sol, sol non saturé, nappes, réseau hydrographique
- processus de transfert aux limites du bassin, puisque des flux d'eau (sous chacune des 3 phases) peuvent être échangés entre le bassin et son environnement: verticalement, à travers la couche limite atmosphérique (précipitations, évapotranspiration); latéralement, par advection de vapeur d'eau dans la couche limite de surface, ou par des écoulements souterrains entre bassins voisins lorsque les limites hydrogéologiques ne coïncident pas avec les limites hydrographiques;

par définition même du bassin versant les échanges latéraux en surface se limitent aux écoulements (essentiellement liquides) à l'exutoire.

- processus de transformation interne, puisque l'eau présente dans le bassin peut y subir des changements de phase: condensation liquide ou solide de la vapeur d'eau, vaporisation ou congélation de l'eau liquide, liquéfaction ou sublimation de l'eau solide; et même, mais en quantité le plus souvent négligeable, y être impliquée dans des réactions biogéochimiques (photosynthèse-respiration, hydratation,...).

A ces processus naturels s'ajoutent les activités humaines, aux impacts hydrologiques rapidement croissants: ainsi, la gestion des ressources en eau se traduit par des stockages, exportations ou importations artificiels d'eau. (Ambroise, 1999)

I.3.2. Réponse hydrologique

La réponse hydrologique correspond à la réaction d'un bassin versant lors d'événements climatiques comme la pluie ou la sécheresse.

I.3.2.1. Interrelations pluie-débit

Le débit correspond à un volume d'eau qui circule par unité de temps. Dans le cas des cours d'eau, le débit (Q) est généralement exprimé en mètres cubes par seconde (m^3/s). Lors d'événements pluvieux, il est possible de réaliser un hydrogramme de crue, qui peut renseigner sur les relations pluie-débit d'un bassin versant étudié sur une échelle de temps

La figure I.5 illustre la relation pluie-débit. Dans le haut, nous avons un pluviogramme qui reporte la quantité de précipitations sur une échelle de temps. Le diagramme du bas correspond quant à lui à la courbe de débit du cours d'eau. Les deux diagrammes sont représentés sur la même échelle de temps, ce qui permet de voir les différentes formes de réponse du cours d'eau.

On observe ainsi des données intéressantes, qui renseignent sur la réponse hydrologique d'un bassin versant donné par rapport aux précipitations liquides, notamment sur :

- **Le temps de montée** (t_m): intervalle de temps correspondant à l'augmentation du débit du cours d'eau, lié à la courbe de crue;
- **Le temps de réponse** (t_r): intervalle de temps entre le pic de pluie et le pic de crue;
- **Le temps de concentration** (t_c): est le temps nécessaire à une goutte d'eau tombée au point le plus éloigné du bassin versant atteigne l'exutoire, cela veut dire qu'à ce moment là et si la pluie continue à tomber, tout le bassin participe à l'écoulement. il dépend du chemin et de la vitesse d'écoulement, or la vitesse est en fonction de la pente et le parcours dépend de la superficie du bassin ;
- **Le temps de base** (t_b) : intervalle de temps regroupant la courbe de crue et la courbe de décrue.

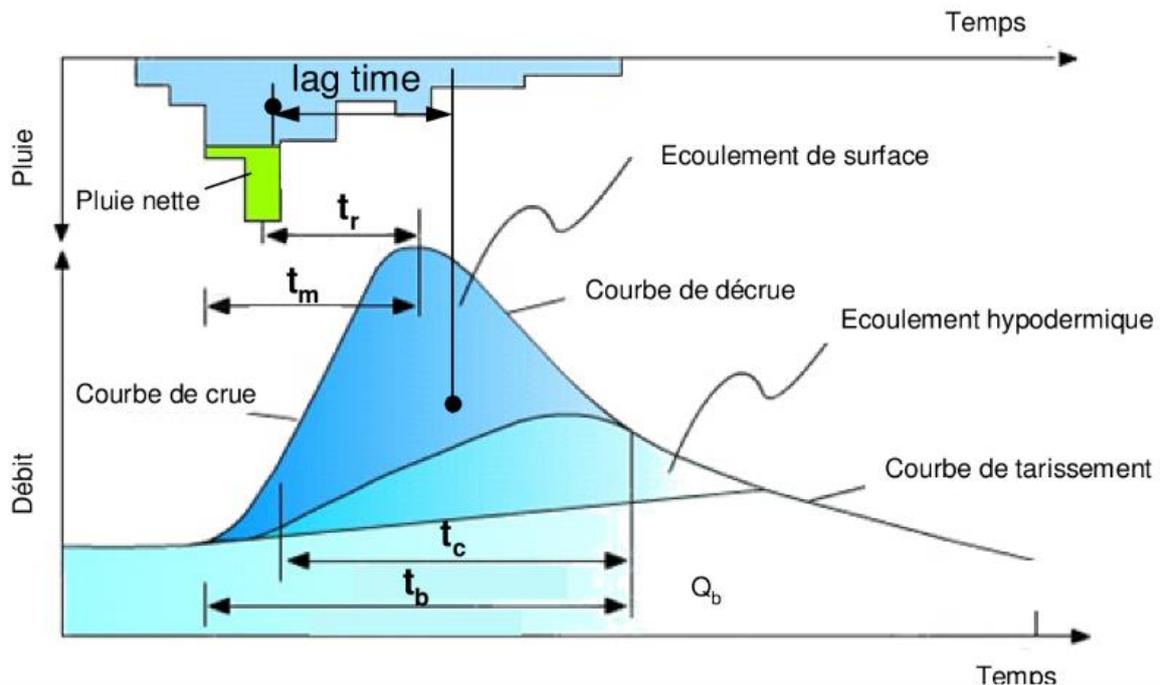


Figure I.5 Interrelations pluie-débit. (https://agrcq.ca/wp-content/uploads/2016/11/GuideAGRCQ_Chapitre-3)

I.4. Les crues

Selon, le glossaire international d'hydrologie (WMO et al., 1974) une crue est définie comme la montée, en général brève, du niveau d'un cours d'eau jusqu'à un maximum, cette montée précédant la décrue généralement plus lente. Cette définition de la crue fait référence à la seule partie ascendante de l'hydrogramme. Donc le terme « crue » désigne l'épisode complet de crue\ décrue jusqu'au retour à un régime non-influencé.

I.4.1. Caractéristique des crues

Les variables généralement utilisées pour caractériser les crues sont :

- le débit de pointe Q_P [m^3/s] ou le débit spécifique de crue en [$\text{m}^3/\text{s}/\text{m}^2$] ;
- le débit moyen maximum sur une durée d donné $Q_{max}(d)$ [m^3/s] ;
- le volume [m^3], le temps de montée T_m [h] ;
- la durée pendant laquelle le débit est supérieur à un débit seuil donné (cf. capacité d'évacuation) ;
- la vitesse d'écoulement [m/s].

La caractérisation d'une crue nécessite souvent la détermination de sa fréquence de non-dépassement exprimé généralement en temps de retour en années. La connaissance de celle-ci est primordiale puisqu'elle permet en particulier de connaître la probabilité d'occurrence de l'événement au cours d'une période de n années. Par la suite, seules les crues

importantes sont considérées, c'est-à-dire les crues dont le débit maximal dépasse largement le débit annuel moyen (période de retour supérieure à 10 ans). (Musy et al., 2009a)

I.4.2. Origine des crues

Les facteurs les plus courants susceptibles de déclencher des crues sont des pluies importantes ou extraordinaires en intensité et/ou en durée, une fonte extraordinaire des neiges ou de glace, une fonte normale combinée à d'autres facteurs.

Il existe d'autres causes de génération des crues, par exemple la rupture de barrages naturels et artificiels ; le déversement au niveau du couronnement d'un barrage du à une sous-capacité du déversoir des crues ; le remplissage brusque d'une retenue par des matériaux, du bois flottant ou encore des chutes des roches.

I.4.3. Les phénomènes associés aux crues

Il s'agit principalement : des laves torrentielles (transport des matériaux solides par l'eau) ; des glissements de terrain (aux abords du cours d'eau ou sur son parcours lors de débordement) et des phénomènes d'érosion torrentielles (à l'intérieur du lit de la rivière et dans sa proximité). Ils ont des conséquences souvent toutes aussi importantes mais font généralement l'objet d'études et d'analyses spécifiques. (Musy et al., 2009a)

I.4.4. Causes de formation des crues et des inondations

Il est important de connaître les manières de formation des crues et des inondations ; un même territoire peut être inondé dans des proportions identiques par des crues différentes, leur hydrogramme respectif traduisant des modalités de déroulement différentes.

I.4.4.1. Abondance des précipitations

C'est le principal facteur explicatif des crues et des inondations. On peut distinguer plusieurs types :

- Les averses brutales de type orageux.
- Les averses durables
- Les pluies de type orographique et cyclonique

En règle générale, la puissance de la crue et les dégâts qu'elle occasionne sont d'autant plus forts que les précipitations sur le bassin versant ont été fortes, intenses et durables, que les quotients d'écoulement sont plus élevés et que la morphologie et la nature des matériaux se prêtent à l'érosion. (Salomon, 1997)

I.4.4.2. Fusion brutale des neiges

En effet, en fin d'hiver l'arrivée de front chaud (avec vent et pluie) va fusionner rapidement la neige qui couvre les bassins versants montagneux (Alpes, Pyrénées en France par exemple) ce qui provoque de grandes crues particulièrement importantes sur un sol parfois

gelé et sans végétation. Mais le plus souvent l'alimentation d'origine neigeuse se combine à celle des averses. (Salomon, 1997)

I.4.4.3. Débâcles des glaces fluviales

Celle-ci intervient à la suite de la rupture de barrages naturels de glace que ce soit en haute montagne (Alpes) ou dans les pays des hautes latitudes (cas de grands fleuves sibériens ou canadiens).(Salomon, 1997)

I.4.4.4. Accidents

Rupture accidentel de barrage naturel ou artificiel. Parfois cet accident est lui-même lié à un autre phénomène exceptionnel (glissement de terrain, lié à des précipitations importantes, volcanisme, séisme...).

I.4.4.5. La propagation de l'onde de crue

Elle est fonction de la structure du lit et de la vallée alluviale, notamment de la pente et des caractéristiques du champ d'inondation

I.4.4.5.1.Onde de rupture de barrage

Le risque de rupture de barrage, est un problème majeur pour la sécurité publique. Une rupture de barrage entraîne la formation d'une onde de submersion se traduisant par une élévation brutale du niveau de l'eau à l'aval. Cette onde de submersion ainsi que l'inondation et les matériaux transportés (issus du barrage et de l'érosion intense de la vallée) peuvent occasionner des dommages considérables sur les hommes, les biens ou encore l'environnement. C'est pourquoi il est obligé d'établir une carte du risque représentant les zones menacées par l'onde de submersion qui résulterait d'une rupture totale de l'ouvrage.

I.4.5. La typologie des crues

I.4.5.1. Crue soudaine ou crue-éclair

A un temps de montée très court, inférieur à quelques heures et se produit sur un petit bassin versant (jusqu'à une centaine de km², souvent assez pentu. Elle peut être torrentielle, urbaine ou périurbaine. Le torrent, le ruisseau, ou la rivière sort subitement de son lit à la suite de pluies torrentielles, généralement de durée assez limitée, souvent sous des orages. Ce phénomène est fréquent dans les régions montagneuses où le ruissellement des pentes vers les vallées est très rapide.

I.4.5.2. Crue rapide

A un temps de montée compris entre 2 et 12 heures et se produit sur un bassin versant assez grand (plusieurs centaines à quelques milliers de km²) ou lors d'intensité pluviométrique moins forte. Parfois la pluie est tombée assez loin de la zone inondée car la crue résulte de la concentration de l'eau tombant sur l'ensemble du bassin hydrique vers les points les plus bas.

I.4.5.3. Crue lente

A un temps de montée supérieur à 12 heures et se produit sur un grand bassin versant (supérieur à une dizaine de milliers de km²) en plaine sur les fleuves et les grandes rivières. Les pluies continues sur de larges zones, comme la mousson, vont ruisseler vers les cours d'eau. Dans ces cas, même si la pente est faible, la quantité importante de pluie peut les faire déborder.

Le type de crue dépend aussi :

- du sol (nature, état de saturation en eau, couverture (végétale, imperméable)) ;
- des précipitations : selon leur intensité - durée - extension spatiale ;
- des caractéristiques géographiques du bassin versant (pentes (des versants, du cours d'eau), forme (du bassin versant, du cours d'eau, du temps de concentration)).

On distingue aussi les crues selon :

- leur origine : crue cévenole, crue océanique, crue méditerranéenne ;
- leur prise en compte dans un projet de barrage / d'aménagement hydraulique (ex: évacuateur de crue) : crue de projet, crue de sécurité, crue de protection, crue de référence ;
- leur époque : crue d'automne, crue estivale.

I.4.6. Les crues éclairs

Les crues éclairs sont un type « des inondations fluviales » qui se distingue par la rapidité de la réponse au ruissellement, généralement de quelques minutes à plusieurs heures dues à des pluies orageuses. Ces courtes échelles de temps correspondent à des bassins versants à des surfaces de quelques km² à la centaine de km².

Les crues éclair sont étudiées comme des phénomènes climatologiques ou comme des phénomènes hydrologiques. Plusieurs facteurs sont responsables de l'occurrence des crues éclair, notamment les caractéristiques météorologiques telles que l'intensité, durée, quantité et variation spatio-temporelle des précipitations et les caractéristiques des bassins versants telles que la superficie, la longueur, la pente, le type de sol, la couverture végétale et l'utilisation des terres. Cependant, il existe également de nombreux autres facteurs inconnus. Les crues éclair peuvent être accompagnées d'autres événements tels que des glissements de terrain, mais très rares. Les crues éclair sont également classées parmi les catastrophes naturelles.

Des études récentes indiquent qu'il y a une tendance à la hausse des inondations sur environ la moitié du globe, mais avec une plus grande variabilité régionale et locale.

1.4.6.1. La prévision des crues éclairs

Les crues éclair sont l'un des événements naturels les plus dangereux et sont souvent responsables de pertes en vies humaines et de graves dommages aux infrastructures et à l'environnement. Les recherches sur l'utilisation de nouvelles techniques de modélisation et de nouveaux types de données dans la prévision des crues éclair ont augmenté au cours de la dernière décennie

Un certain nombre de méthodologies de prévision des crues éclair basées sur les estimations radar des précipitations ont vu le jour au cours des dernières décennies. Georgakakos (1986) a décrit les composants nécessaires pour concevoir un système d'alerte aux crues soudaines.

Parmi ces recommandations, des améliorations de la précision et de la résolution des observations des précipitations, des prévisions météorologiques numériques et des résultats des modèles hydrologiques ont été obtenues au cours des 25 dernières années; Pourtant, plusieurs des objectifs mis en évidence n'ont été que partiellement atteints. Plus précisément, la capacité de fournir des prévisions quantitatives précises des précipitations (QPF) au niveau du bassin propre au site en fonction des conditions météorologiques n'a pas encore été prouvée comme efficace. Les méthodes d'assimilation des données radar dans les systèmes de prévision d'ensemble ont augmenté leur valeur, mais les QPF actuels pour la surveillance et la prévision des crues éclair opérationnelles doivent reposer sur des observations radar et des techniques de mélange d'estimation quantitative des précipitations (EQP) –QPF

Les résultats des modèles hydrologiques n'ont historiquement eu qu'un impact modeste à l'échelle des crues soudaines, principalement en raison de leur dépendance au débit observé pour estimer correctement les paramètres du modèle. Les observations d'écoulement fluvial sont plus courantes dans les bassins à grande échelle, où les exigences en matière d'électricité, de transmission de données et d'accès routier pour les jauges sont plus facilement satisfaites. Le problème des crues éclair a été classé comme un défi majeur en termes d'observation des crues éclair, de compréhension des processus et de prévision dans les bassins non jaugés (National Research Council, 2006),(Borga et al., 2008), (Gruntfest et al., 2009).

1.4.6.2. processus du ruissellement au cours des crues éclairs

Etant donné les cinétiques de transfert mises en jeu lors des crues « éclair », un ruissellement direct de surface quasi-généralisé, passé un certain cumul de pluie, peut être, dans un premier temps, une hypothèse acceptable. Ce ruissellement peut être déclenché :

- Par l'absence ou la quasi-absence de sols sur certains terrains, Une roche mère affleurant et imperméable laisse à la pluie tout le loisir de ruisseler. Il peut expliquer une part non négligeable du ruissellement de surface. Néanmoins la situation de ces sols, généralement en haut de versant laisse penser que le ruissellement ainsi généré, à moins d'être intercepté par le réseau de drainage, peut être ré infiltré en aval sur des terrains où les sols sont plus développés.(Marchandise, 2007)

- Par un ruissellement de type hortonien, Horton (1933) décrit le sol comme un filtre capable de réaliser un partage ruissellement-infiltration en fonction à la fois de l'intensité et la durée de la pluie mais aussi sous l'influence de paramètres pédologiques tels que la porosité. Différents méthodes ont été proposées pour estimer cette capacité d'infiltration et son évolution au cours d'une averse : équations empiriques (Horton, 1933) ou à base physique (Green & Ampt, 1911);(Philip, 1957);(Bar-Hillel, 1980);(Haverkamp et al., 1994)

Ce ruissellement est provoqué par un dépassement de la capacité d'infiltration du sol. Les sols soumis au ruissellement hortonien sont des sols qui se déstructurent facilement sous l'effet de fortes intensités de pluie. Les pores superficiels sont obstrués et les vitesses d'infiltration diminuent sans que pour autant le sol soit saturé en dessous de la couche superficielle. L'eau qui ne s'infiltré pas ruisselle ensuite en surface. La végétation, la rugosité du sol et les remous causés par les gouttes de pluie, sont les principaux facteurs qui influencent l'écoulement(Albergel et al., 2003)

- Par un ruissellement sur surface saturée, Dans le processus de ruissellement sur surface saturée, l'état de surface du sol n'est plus limitant. L'eau de pluie s'infiltré tant que le profil local du sol n'est pas saturé. Une fois qu'il est saturé, c'est le ruissellement total. (Marchandise, 2007)

I.4.7. Les impacts des crues

Selon leur importance et leur localisation géographique, les crues et les inondations peuvent provoquer des dégâts et même d'effroyables désastres. L'analyse des communes ayant fait l'objet d'un arrêté de catastrophe naturelle « inondations»

En règle générale, la puissance de la crue et les dégâts qu'elle occasionne sont d'autant plus forts que :

- les précipitations sur le bassin versant ont été fortes, intenses et durables ;
- les quotients d'écoulement sont plus élevés ;
- la morphologie du bassin versant et la structure du réservoir permettent mieux abaissant le seuil d'intensité, l'établissement d'un gros apport entre débit maximum fluvial et débit pluvial
- la morphologie et la nature des matériaux se prêtent à l'érosion et au charriage.

Il est à noter que, plus le bassin versant est grand, moins la précipitation risque d'être homogène dans l'espace et dans le temps. Dans ce cas, le temps de concentration, depuis les parties les plus arrosées jusqu'au l'exutoire s'allonge. A ce moment-là, le rapport débit fluvial /débit pluvial a tendance à baisser. Par contre, pour de petits bassins versants, ce rapport tend à augmenter si bien que des débits record sont obtenus.(Yahiaoui, 2012)

I.5. Les inondations

I.5.1. Le risque d'inondation

Le risque peut se définir comme la résultante du croisement entre aléa et vulnérabilité (Desbordes, 1997). Pour le risque d'inondation et comme illustre la figure I.6, il dépend du :

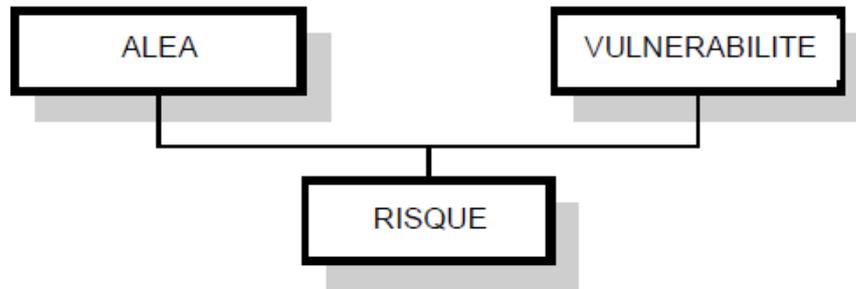


Figure I.6 : Définition du risque.

I.5.1.1. L'aléa

Représente le phénomène naturel aléatoire traduit par le débordement de cours d'eau ou de canaux de drainage et l'extension de l'eau dans le champ d'inondation. Il dépend du comportement hydrologique du bassin versant et du fonctionnement hydraulique du réseau hydrographique. Il peut être quantifié sur une parcelle (avec une précision plus au moins bonne) grâce aux variables hydrologiques classiquement utilisées que sont la profondeur d'eau et la durée d'inondation, associée à une période de retour.

I.5.1.2. La vulnérabilité

De l'occupation des sols aux inondations traduit le fait que les dommages économiques directs et indirects, et plus au moins sévères, apparaissent lorsque l'eau inonde une parcelle. De façon classique, des courbes de dommages qui relient entre eux les paramètres de profondeur d'eau et le coût des dommages correspondants peuvent être construites d'une manière classique. La vulnérabilité se définit dans le même espace que l'aléa, à savoir en termes de profondeur, durée et période de retour (h, d, T) (Gilard & Gendreau, 1998)

Il n'est pas envisageable, pour une société, de se protéger pour tous les niveaux de risque. Elle doit donc définir un niveau de risque acceptable où les événements naturels extrêmes et leurs conséquences devront être tolérés. (Gilard, 1995)

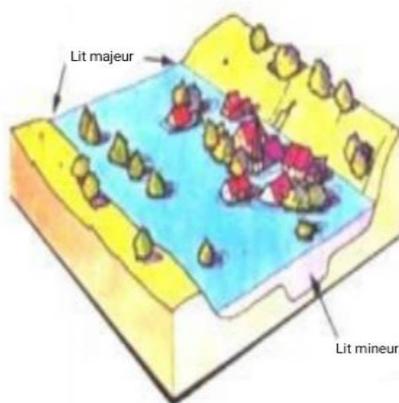
I.5.2. La typologie des inondations

Sous les termes de crues et d'inondations se cache un phénomène multiforme. Selon Veyret&Meschinet de Richemond, 2003: « La crue définit les hautes eaux qui peuvent demeurer dans le lit mineur du cours d'eau. Dès que celui-ci ne suffit plus à contenir

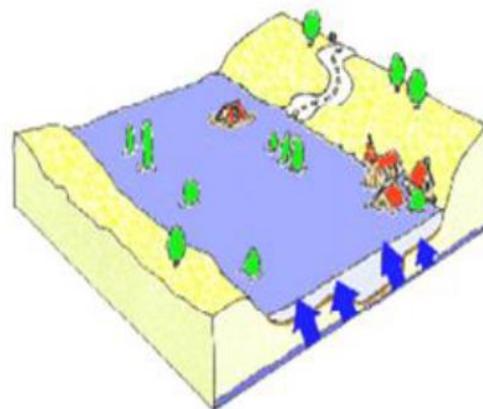
l'écoulement, l'eau déborde et se répand dans le lit majeur provoquant une inondation. Il peut donc y avoir une crue sans inondation » La crue se caractérise donc comme une augmentation des eaux d'un cours d'eau tandis que l'inondation induit la notion de débordement et d'invasion d'un territoire. Les inondations sont considérées comme des phénomènes d'origine climatique et hydrologique.

En fonction de l'événement créateur de la catastrophe, On peut distinguer plusieurs types d'inondation : inondations de plaine, par remontée de nappe, par crues torrentielles, par ruissellement en secteur urbain ou rural, inondation par rupture d'une digue et inondations marines. Dans les quatre premiers cas, le phénomène générateur est la pluie et l'inondation engagera à partir des fleuves et des rivières ; la classification consiste donc à distinguer les inondations provoquées par des crues à cinématique lente (inondations de plaine, remontée de nappe) de celles générées par des crues à cinématique rapide (crues torrentielles, ruissellement). Tandis que dans les deux derniers cas ; le premier c'est les circonstances locales qui jouent pour faire d'une inondation un événement particulier et le deuxième c'est l'action de la mer qui est le facteur principal déterminant la survenance des désordres.

Le risque d'inondation peut donc être défini comme étant un phénomène naturel lié aux caractéristiques géomorphologiques et météorologiques d'un bassin versant qui se manifeste par une submersion, rapide ou lente, d'une zone pouvant être habitée; et qui occasionne des dommages de tout genre



(a)



(b)

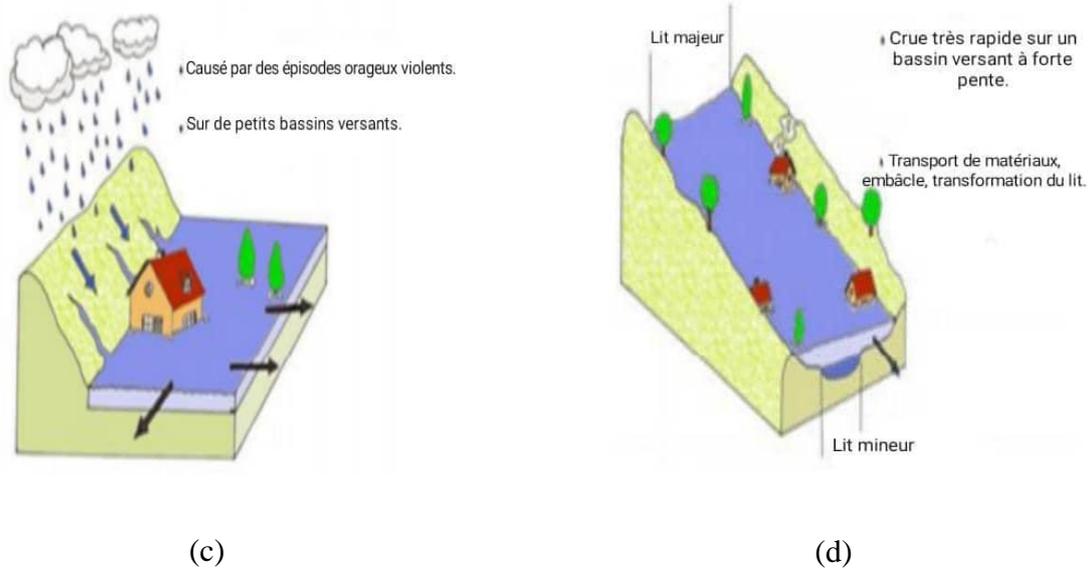


Figure I.7 les types d'inondations d'après Merabet (2006): a) Inondation de Plaine, b) Inondation par remontées des nappes Phréatique, c) Inondation par ruissellement urbain, et d) Inondation par crues torrentielles

I.6. Les crues et les inondations en Algérie

Les crues et les inondations sont plus fréquentes que les séismes et les glissements de terrains. Ces phénomènes provoquent des catastrophes et occasionnent d'importants dégâts humains et matériels. Ces crues, variables dans le temps et dans l'espace, sont violentes, parfois rapides et soudaines et surtout imprévisibles.

L'Algérie est confrontée aux phénomènes de crues et inondations, qui se manifestent de façon catastrophique constituant ainsi une contrainte majeure pour le développement économique et sociale (LAHLAH, 2000). Plusieurs régions, de part leur topographie sont menacées par ces catastrophes hydrologiques aussi bien au Nord qu'au Sud. (Touaïbia, 2000)

Les inondations attribuables aux crues d'oueds et aux tempêtes de pluies se produisent dans toutes les régions du pays. Dans le tableau I.1 on va citer des inondations se sont produites en Algérie avec leurs bilans des dégâts humains et matériels.

Tableau I.1 : les Diverses inondations en Algérie

Lieu	Date	Bilan des dégâts
Tizi Ouzou	28-31/03/1974	52 décès dans la wilaya, 18000 sinistrés, dégâts estimés à 27 millions de DA
Jijel	29/12/1984	29 décès, 11000 sinistrés
Ghilizane	20 octobre 1993	22 décès et 14 blessés à Oued Rhiou.
Bordj Bou Arreridj	23/09/1994	16 décès, dégâts (10 millions DA)
Sidi Bel Abbes	24 Octobre 2000	02 décès et d'importants dégâts matériels
Alger (Bab el Oued)	09-11/11/2001	Plus de 700 décès, 115 disparus, des milliers de blessés, dégâts (30 milliards de DA)
Tindouf	09-11/02/2006	50 à 60% d'infrastructures détruites aux camps des réfugiés sahraouis (12200 familles sans abri)
Ghardaïa	01 Octobre 2008	Plus de 34 décès et 50 blessés, maisons effondrées sur leurs habitants, des dizaines de véhicules emportés par les eaux, arbres arrachés, poteaux électriques ensevelis, dégâts aux surfaces agricoles et au cheptel ovin, plus de 1000 maisons inondées dont 600 sont endommagées.
Jijel	21/12/2020	Effondrement d'un pont, 18 véhicules de tourisme et utilitaires ont emportés par les eaux, 25 bus stationnées dans la gare de voyageurs ont été inondés.
Médéa	03/05/2021	4 décès, des dégâts matériels importants 125 véhicules endommagés, effondrement d'une étable et la perte de nombreuses têtes d'ovin.

La figure I.8 montre les dégâts causés par les inondations dans quelques wilayas en Algérie



(a)



(b)



(c)



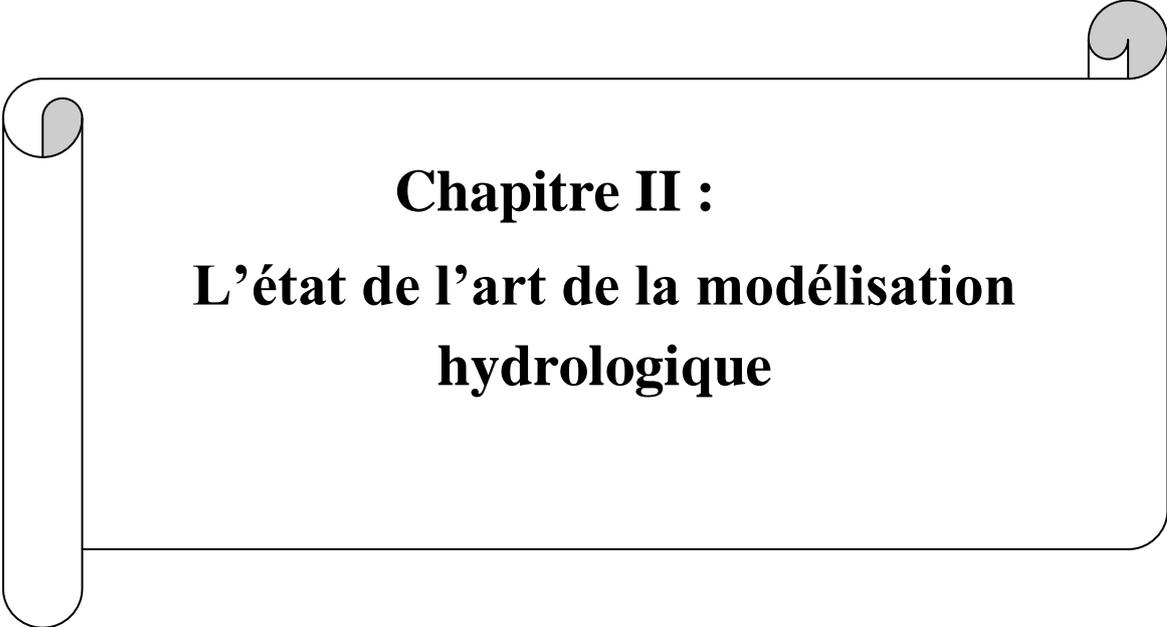
(d)

Figure I.8 les dégâts causés par les inondations dans quelques wilayas en Algérie : a) Inondations de Ghardaïa (2008); b) Inondations de Jijel (2020) ; c) inondations de bab el oued (2001) ; d) inondations de Médéa(2021).

I.7. Conclusion :

Les crues éclair se développent à des échelles spatiales et temporelles que les systèmes d'observation conventionnels ne sont pas en mesure de surveiller pour les précipitations et le débit des rivières. La documentation et les antécédents de ce phénomène sont limités, La capacité de prédire les crues éclair est également limitée et difficile en raison de l'interaction complexe entre les variables météorologiques et hydrologiques. Cependant, la prévision des crues éclair a été étudiée et vérifiée à l'aide de modèles hydrologiques.

Cependant, la plus grande source d'incertitude des prévisions de crues éclair reste les précipitations futures inconnues. Un nombre accru de modèles hydrologiques basés sur la physique ont été développés et utilisés pour la prévision des crues éclair, que nous allons bien détaillés dans le prochain chapitre.



Chapitre II :
L'état de l'art de la modélisation
hydrologique

II.1. Introduction

D'après le Dictionnaire de l'Environnement, le modèle est "une représentation simplifiée, relativement abstraite, d'un processus, d'un système, en vue de le décrire, de l'expliquer ou de la prévoir".

La simulation de la transformation de la pluie en débit à l'échelle du bassin versant par des modèles mathématiques a connu un fort essor depuis le début des années 60 grâce notamment à l'accroissement des capacités de calcul. Il existe aujourd'hui un grand nombre de modèles, représentent le lien entre la pluie et le débit. La modélisation hydrologique est donc une représentation, partielle ou totale, du cycle de l'eau. Dans ce travail, on se limite à une description générale sur les modèles pluie-débit, qui représentent la transformation de la pluie en écoulement sur les surfaces continentales. Les applications de ces modèles sont multiples, elles permettent la gestion des ressources en eau, à l'aménagement du territoire, ou à l'une des différentes facettes du risque hydrologique (inondation, sécheresse), de gérer les alertes de crue sur les bassins versants ou encore de reconstituer des chroniques de débits sur des bassins sur lesquels on ne dispose que de chroniques de pluies.

II.2. Modélisation hydrologique

La modélisation du comportement hydrologique des bassins versants est incontournable dès lors que l'on s'intéresse à des problématiques relatives à la gestion des ressources en eau, à l'aménagement du territoire, ou à l'une des différentes facettes du risque hydrologique. Elle doit pouvoir décrire les différentes étapes de la transformation pluie-débit et en particulier les processus liés à la formation des crues et à l'apparition des étiages. Elle est censée aussi fournir des informations exploitables pour le dimensionnement d'ouvrages hydrauliques, de protection contre les crues ou pour la gestion hydrologique et écologique du bassin versant étudié.

Un modèle hydrologique n'est qu'une simplification d'un système complexe (Payraudeau, 2002) A chaque stade de la modélisation, des approximations sont réalisées : perception du phénomène, formulation en un cadre conceptuel, traduction dans un langage de programmation (Ambroise, 1999) (Gnouma, 2006)

II.3. Historique de la modélisation

La modélisation hydrologique a une histoire longue. Son commencement peut être attribué au développement de la science du génie civil dans 19^{ème} Siècle pour siècle pour la conception de routes, canaux, égouts urbains, les systèmes de drainage, les barrages, les ponts et les systèmes d'approvisionnement en eau. Jusqu'au milieu des années 1960, la modélisation hydrologique a principalement impliqué le développement de concepts, de théories et de modèles décomposant individuels du cycle hydrologique, comme par des modules

d'infiltration, d'évaporation, d'interception d'écoulement souterrain, ainsi que le module de ruissellement contient ces deux catégories, par saturation et le ruissellement Hortonien.

L'origine de la modélisation mathématique remonte au développement de la méthode rationnelle par Mulvany (1850). Cette méthode a été largement acceptée pour le calcul du débit de pointe lors de la conception des systèmes d'assainissement et demeure utilisées de nos jours.

Pour simuler le processus d'infiltration à l'échelle du bassin versant, la majorité des applications hydrologiques se basent sur des modèles simplifiés. Horton (1933) a développé une théorie de l'infiltration pour estimer les excès de pluie et améliorer les techniques de séparation hydrographe. L'une des premières tentatives de développement de cette théorie était de Green et Ampt (1911) avec l'utilisation des principes simplifiés de la physique, Les équations empiriques de Kostikov (1932) et Horton (1933, 1935, 1939, 1940) sont également utilisés par certains modèles actuels de bassins versants.

Dans ces contributions, l'évaporation et d'autres abstractions ont été traités à l'aide de coefficients ou d'indices. Les premiers travaux décrivant l'évaporation ont été réalisés par Richardson (1931) et Cummings (1935) tandis que Thornthwaite (1948) et Penman (1948) apporté des contributions importantes aux modèles d'évapotranspiration, Horton (1919) a dérivé une série de formules empiriques pour estimer l'interception pendant une tempête pour divers types de couvert végétal.

Le Service de conservation des sols (SCS) 1956, Maintenant appelé le Naturel Ressources Conservation Service of the U.S. (Département de l'agriculture), a développé la méthode de SCS pour calculer la quantité de ruissellement des tempêtes, en prenant les abstractions en compte. Bien qu'il ait été initialement prévu de modéliser le ruissellement, il a été utilisé pour modéliser l'infiltration. Une vague d'activités de modélisation a commencé autour de milieu des années 50, a conduit à la théorie de l'hydrogramme unitaire par le critère de Nash (1957), ce critère traduit un certain rendement du modèle comparable au coefficient de détermination d'une régression. On considère généralement qu'un modèle hydrologique donne des résultats acceptables si la valeur du critère de Nash est supérieure à 0.8. (Gaume, 2000)

La phase souterraine du cycle hydrologique a été étudiée par Fair et Hatch (1933) qui ont dérivé une formule pour calculer la perméabilité du sol. L'étude des eaux souterraines et des infiltrations a conduit au développement de techniques de séparation du débit de base et des flux entrants dans un hydrographe (Puls 1928, du corps des ingénieurs de l'armée américaine). Ce dernier, a mis au point une méthode d'acheminement des flux, Cette méthode à été plus tard modifiée par le Bureau américain de réclamation en 1949, est maintenant appelée méthode Puls modifiée. Cette méthode est toujours utilisée pour les inondations dans plusieurs modèles de bassins versants.

II.4. But de la modélisation hydrologique

La modélisation de la transformation pluie-débit intègre dans son contexte les différents éléments du cycle hydrologique. Certains types de modèles nécessitent le passage par la modélisation de chaque élément avant de construire le modèle finale pluie-débit. L'unité de l'étude est généralement le bassin versant limité topographiquement, sauf dans le cas où des formations géologiques drainent des surfaces situées hors limites topographiques du bassin. La modélisation pluie-débit peut donner la réponse aux nombreuses questions, relatives à l'eau, axée sur la gestion des ressources et de risque. Parmi ces questions, on note :

- La reconstitution des séries de débit par le comblement de lacunes dans les séries historiques afin de permettre les traitements statistiques utilisés notamment dans les études de faisabilité des ouvrages et de détermination des valeurs de projet;
- Préviation des fréquences avec lesquelles les débits extrêmes (crue et étiage) peuvent se produire ;
- Prédétermination de la réponse hydrologique d'un bassin versant avec un pas de temps, afin de permettre l'élaboration d'un système de prévention et d'alarme ;
- L'étude de l'impacte des différents aménagements sur la réponse hydrologique.(Gherissi, 2012)

II.5.Processus de transformation Pluit-Débit

L'hydrogramme de crue représente la variation du débit d'un cours d'eau pendant une crue. Il représente la réaction connue ou calculée (pour une crue de projet) d'un bassin versant à un événement "pluie" ou "fonte des neiges"(Estupina, 2004; Marchandise, 2007)

Dans la description des processus dits "Hortonniens", la transformation de la pluie en hydrogramme de crue se traduit par l'application successive de deux fonctions (figure I.1), nommées respectivement fonction de production ou fonction d'infiltration et fonction de transfert. La fonction de production permet de déterminer l'hyétogramme de pluie nette à partir de la pluie brute. Par contre, la fonction de transfert permet quant à elle de déterminer l'hydrogramme de crue résultant de la pluie nette (la pluie nette est la fraction de pluie brute participant totalement à l'écoulement).

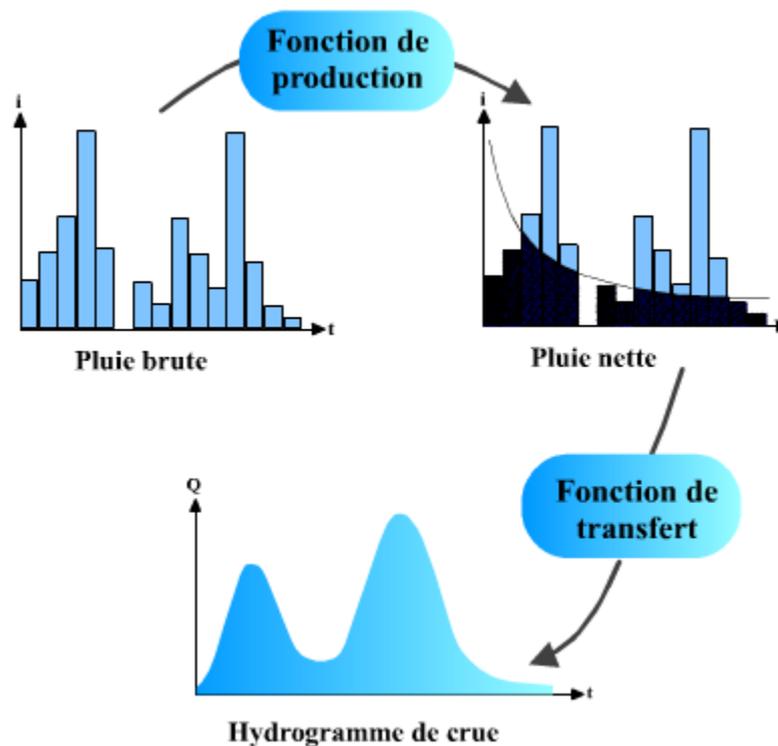


Figure II.1 : Processus de transformation Pluie-Débit. (http://gr-ea.weebly.com/uploads/2/2/4/0/22402368/ruisselement_et_infiltration)

Le passage du hétérogramme de pluie à l'hydrogramme de crue fait intervenir toutes les caractéristiques météorologiques, physiques et hydrologiques du bassin versant considéré. Toutefois, l'analyse de séries de couples pluies débits permet d'obtenir des informations pertinentes sur la fonction de transfert du bassin versant. (Le Clerc & van Dam, 2004)

II.6. Qu'est ce qu'un modèle ?

Un modèle hydrologique est une représentation mathématique simplifiée de tout ou partie des processus du cycle hydrologique (Marchandise, 2007). autrement dit, c'est un ensemble de concepts hydrologiques sont exprimés en langage mathématique pour représenter le comportement correspondant observé dans la nature. Pour l'utilisateur, l'intérêt d'un modèle réside dans sa capacité à apporter une réponse "satisfaisante" aux questions qu'il se pose à propos de l'objet modélisé. (Gherissi, 2012)

Un modèle hydrologique est généralement défini par :

- **Variables d'entrée** (variables indépendantes) : il s'agit des entrées du modèle, qui sont essentiellement les chroniques de pluie, d'ETP ou de température ;
- **Variables de sortie** (variables dépendantes) : il s'agit des sorties du modèle, qui sont généralement les débits simulés à l'exutoire du bassin versant, mais qui peuvent parfois être aussi l'ETR, des niveaux piézométriques, ...etc.

- **Variables d'état** : il s'agit des variables internes au système, qui évolue en fonction du temps et rendent compte de l'état du système à un moment donné. Typiquement, ces variables sont les niveaux de remplissage des différents réservoirs (neige / production / routage) ;
- **Paramètres** : les paramètres des modèles hydrologiques, qu'ils aient une pseudo-signification physique ou qu'ils soient calés, servent à adapter la paramétrisation des lois régissant le fonctionnement du modèle, au bassin versant étudié ;
- **Performances** : il s'agit d'estimer l'amplitude des erreurs de modélisation, calculées généralement sur la base d'une mesure de l'écart entre les valeurs simulées et les valeurs mesurées.(ABDI, 2013)

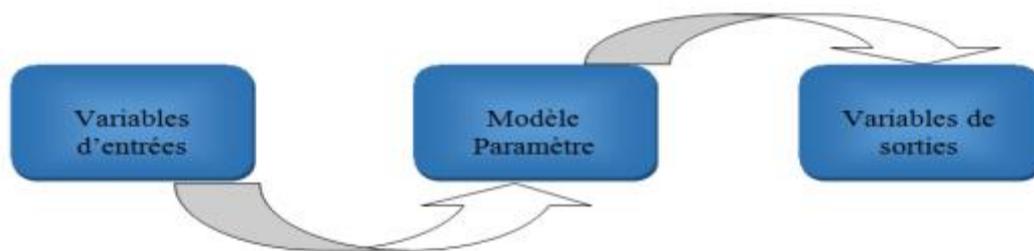


Figure II.2: schéma du modèles pluie-débit.

II.6.1. Etapes d'élaboration d'un modèle

L'élaboration d'un modèle hydrologique comporte certaines étapes essentielles

- **Définir** le modèle et ses objectifs en termes de précision (Ambroise, 1998). Cette définition permettra de déterminer les choix à faire par la suite et donc de préciser les chemins à suivre dans l'élaboration des étapes suivantes.
- **Identifier** le modèle, pour pouvoir définir et caractériser le système, ses frontières et sa structure ; définir l'événement, les variables et les paramètres ; et émettre les hypothèses et le choix des échelles de temps et d'espace caractéristiques des processus de base.
- **Elaborer** l'algorithme à incorporer dans un outil informatique capable de procéder aux instructions. Cet algorithme doit être suivi de la vérification du logiciel lui-même.(Ambroise, 1998)
- **Caler** le modèle, par estimation des paramètres du modèle, non mesurables, selon des critères déductifs ou des observations des entrées et des sorties. Il existe deux façons d'estimer les paramètres à partir d'un échantillon : la méthode passive (on prend tous les couples entrées-sorties disponibles, et par des méthodes statistiques, on évalue les coefficients des équations) et la méthode active (en donnant un poids spécifique plus

grand à certaines observations ou groupe d'observations). Le calage peut être manuel ou automatique.

- **Evaluer** le modèle, en comparant la réponse simulée par le modèle à une sollicitation expérimentale et la réponse réelle, à partir de données différentes de celle utilisées pour le calage.
- **Définir** le domaine de validité du modèle élaboré (Ambroise, 1998), La formulation mathématique du modèle est basée sur des équations simplifiées, selon certaines hypothèses concernant les conditions initiales et aux limites.

II.6.2. Critères de qualité d'un modèle hydrologique

Lors de l'élaboration d'un modèle, l'ambition de l'hydrologue est d'obtenir un outil le plus performant possible. Il est de coutume d'apprécier la qualité d'un modèle et ses aptitudes selon certains enterrés tels que :

- **Précision** : Il se doit de reconstituer au mieux les débits observés ;
- **Robustesse**: Il doit pouvoir garder une bonne précision même dans des conditions extrêmes ;
- **Généralité** : Il doit pouvoir simuler aussi bien les crues que les étiages ;
- **Universalité** : Il doit pouvoir être utilisé pour des bassins versants très différents.
- **Richesse**; Il doit pouvoir intégrer un grand nombre de caractéristiques permettant de différencier le comportement d'un bassin à un autre.
- **Adaptabilité**: Il doit pouvoir être corrigé pour tenir compte de nouvelles données sur le bassin modélisé.

En réalité, il est pratiquement impossible de satisfaire tous ces enterrés simultanément. L'objectif de l'utilisateur du modèle définira donc ceux qu'il faudra privilégier par rapport aux autres. (Chkir, 1994)

II.6.3. Les domaines d'application des modèles Pluit-Débit

Le souci de la modélisation pluie-débit est de mettre à la disposition des aménageurs ou bien des ingénieurs un outil «simple» permettant l'estimation ou la prévision des débits pour une étude d'aménagement désirée (barrages, lacs, ponts, etc....).

La modélisation pluie-débit a de nombreuses applications (Perrin, 2002), parmi lesquelles on peut citer :

- Estimation des débits de rivières pour des sites non jaugés ;
- Dimensionnement des ouvrages d'art (barrages, ponts, déversoirs de sécurité...);
- Délimitation des zones inondables ;
- Simulation des débits pour des reconstitutions historiques ;
- Prévision des crues ;
- Détection de l'influence des changements d'occupation du sol ;
- Simulation de l'impact du changement climatique ;

- Pré détermination des débits de crue ou d'étiage (fréquence et durée) ;
- Prévion des étiages.

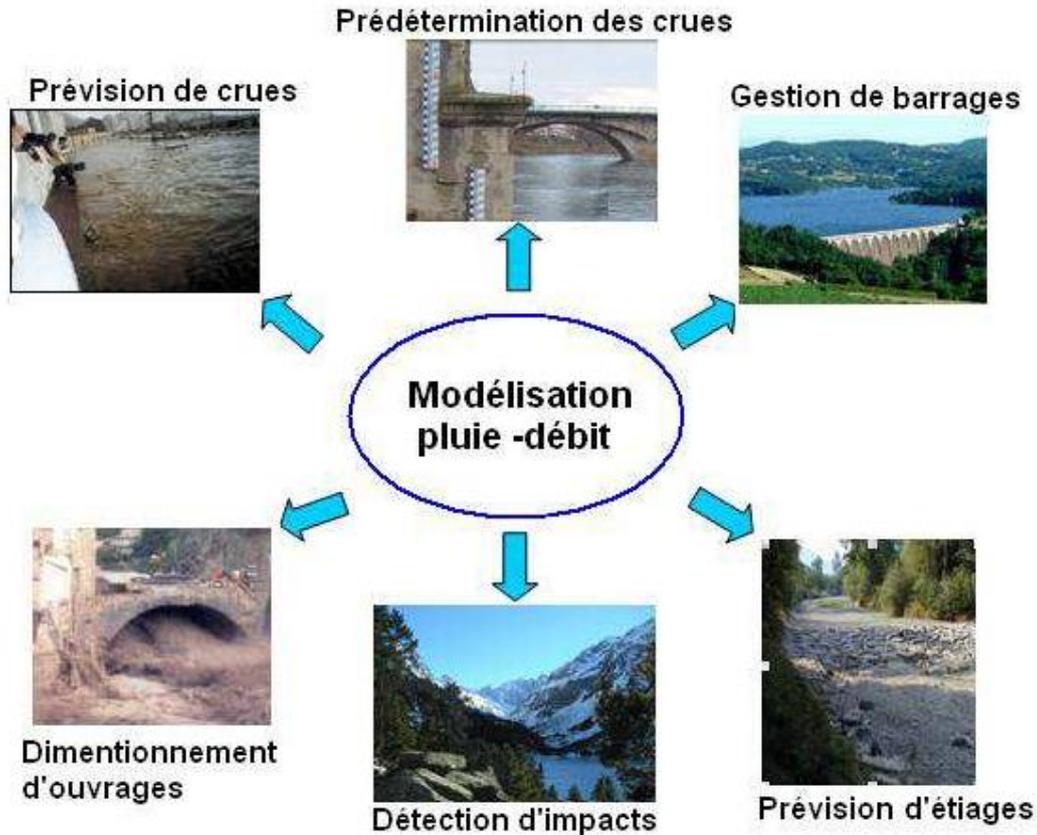


Figure II.3 : les domaines d'application des modèles Pluit-Débit.

II.7. Classification des modèles pluie-débit

Beaucoup de classifications des modèles ont été proposées et il y a presque autant de classifications que d'hydrologue, La difficulté de trouver une classification unifiée provient du fait que la grande diversité des approches entraîne une non moins grande diversité des caractéristiques des modèles. Il est alors presque impossible de distinguer des catégories de modèles nettement distinctes, et ce d'autant plus que la terminologie employée est encore fluctuant. (Clarke, 1973)et (Ambroise, 1998)ont proposé quelques clés de différenciation des modèles:

- déterministes ou stochastiques, suivant la nature des variables, des paramètres et/ou des relations entre eux,
- globaux, semi-distribués ou spatialisés, suivant que le bassin versant est considéré dans l'espace comme une entité homogène, qu'il est divisé en sous-unités supposées homogènes (éventuellement des sous-bassins) ou qu'il est finement discrétisé en mailles,

- cinématiques (descriptifs) ou dynamiques (explicatifs), suivant que l'évolution temporelle du système est simplement décrite ou mise en relation avec les forces qui en sont la cause,
- empiriques, conceptuels ou théoriques (fondés sur la physique), suivant les relations utilisées pour modéliser la transformation de la pluie en débit et suivant la représentation du système modélisé.

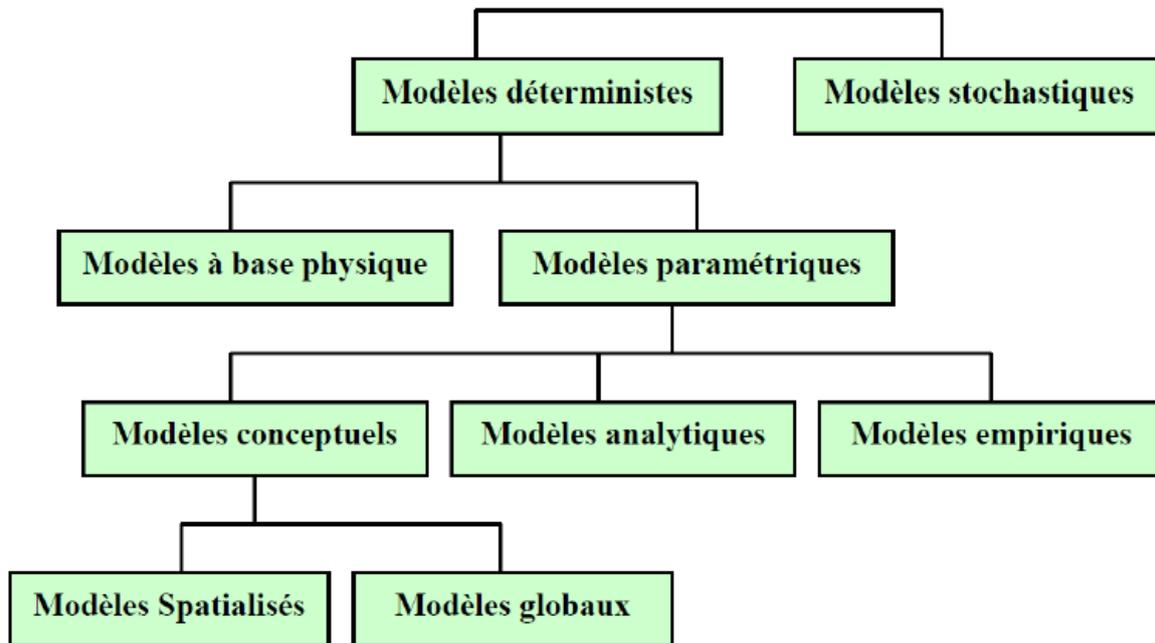


Figure II.4: Les différentes classifications des modèles.(Gaume, 2000)

II.7.1. Modèles stochastiques

La modélisation stochastique peut être envisagée toutes les fois qu'il y a des incertitudes sur les données ou parfois même sur les processus mis en jeu. On considère que l'approche stochastique est un moyen rationnel de traiter la caractérisation spatiale de la variabilité, et d'établir un lien entre les incertitudes des paramètres et celles des prédictions. Toutefois cette approche, bien qu'elle soit le meilleur moyen de caractériser la variabilité des grandeurs, nécessite la connaissance des lois de probabilité les plus courantes pour la variabilité considérée ou au moins de leurs premiers moments. (Makhlouf, 1994)

II.7.2. Modèles déterministes

Un modèle est dit déterministe si aucune de ses grandeurs n'est considérée comme aléatoire. La plupart des modèles hydrologiques sont déterministes. Ces modèles associés à chaque jeu de variables de forçage (variables indépendantes d'entrée du modèle, peuvent être essentiellement des mesures de pluie), de variables d'état (variable permettant de caractériser

l'état du système modélisé, par exemple : le niveau de remplissage des différents réservoirs d'eau du bassin versant, taux de saturation des sols, profondeur des sols...etc.), une valeur de réalisation unique des variables de sortie (il s'agit essentiellement des débits simulés à l'exutoire d'un bassin versant).

II.7.2. a. Modèles à base physique

Le modèle à base physique est basé uniquement sur des équations de la physique, et ne comportant idéalement aucun paramètre. Il n'existe pas de modèle à base physique au sens strict en hydrologie. Certains modèles comme le SHE (système hydrologique européen) tendent à s'en rapprocher. L'importance de l'hétérogénéité spatiale dans la réponse hydrologique des bassins versants rend cependant difficile voire impossible l'utilisation de tels modèles.

II.7.2. b. Modèles paramétriques

Les modèles paramétriques sont les modèles incluant des paramètres dont la valeur doit être estimée par calage.

- **b.1. Modèles empiriques**

Le type de fonction reliant les variables est fixé à priori (fonction polynomiales, fonction sigmoïdes). Le niveau de complexité (nombre de fonctions à utiliser, ordre du polynôme) étant fixé, le calage consiste alors à déterminer la combinaison de fonctions s'ajustant le mieux aux données mesurées.

- **b.2 Modèles analytiques**

Ce sont des modèles pour lesquels les relations entre les variables d'entrée ont été établies par analyse de séries de données mesurées. L'exemple type est celui des modèles linéaires : les paramètres de ces modèles sont liés aux coefficients de corrélation entre les variables.

- **b.3 .Modèles conceptuels**

Ce type de modèle repose sur l'analogie remarquée entre le fonctionnement d'un bassin versant et un ensemble de réservoirs interconnectés. Plus précisément, quand la structure du système et des lois le régissant sont inconnues ou lorsque la pauvreté des informations et la complexité des phénomènes en jeu prévalent, le comportement du système en question est simplifié. Ainsi, les modèles conceptuels intègrent des facteurs complexes en essayant de décrire le concept physique du comportement du système par une représentation plus simple.

Au travers de ce type de modélisation, sont construites des structures empiriques censées reproduire les sorties du système étudié (débit, concentration,...) à partir des variables d'entrée (pluie, évapotranspiration, fertilisation, pratiques agricoles).

➤ Modèles globaux

Les modèles globaux offrent à l'utilisateur un choix très attractif, car il présente une structure très simplifiée, il ne demande pas trop de données, faciles à utiliser et à calibrer. La représentation du processus hydrologique est très simplifiée. Il peut souvent mener à des résultats satisfaisants, et spécialement si l'objectif majeur est la prévision d'une crue.

➤ Modèles Spatialisés

Actuellement plusieurs modèles spatialisés correspondant à différentes écoles hydrologiques sont en phase avancée de développement. En principe, les modèles spatialisés sont des modèles qui utilisent des entrées et des sorties où les caractéristiques des bassins versants sont distribués dans l'espace. La spatialisation peut être arbitraire ou basée sur des divisions morphologiques naturelles (découpage en sous bassins) ou hydrologiques (aires contributives), Les modèles spatialisés peuvent être classés en trois grands types :

- Modèles conceptuels spatialisés ou semi-spatialisés ;
- Modèles physiques spatialisés ;
- Modèles physiques conceptuels semi-spatialisés.

II.8. Présentation de quelques modèles hydrologiques

II.8.1. Présentation du modèle Génie Rural (GR)

II.8.1.1.Introduction

Les modèles globaux offrent à l'utilisateur un choix très attractif, car il présente une structure très simplifiée, il ne demande pas trop de données, faciles à utiliser et à calibrer. La représentation du processus hydrologique est très simplifiée. Il peut souvent mener à des résultats satisfaisants. Un exemple de ce type de modèle est le modèle GR (Génie Rural).

Le modèle GR est un modèle pluie débit (un modèle à réservoir) qui a été testé dans les régions arides et semi-arides, avec un intérêt particulier sur la gestion et l'exploitation rationnelle des ressources en eau. Il fonctionne pour différents pas de temps annuel GR1A, mensuel GR2M et journalier GR4J, GR5J et GR6J.

Les objectifs de ce modèle sont nombreux citons à titre d'exemple :

- le modèle GR est un modèle complet et simple, donc adapté théoriquement à n'importe quel type de climat et notamment à celui des zones arides, en plus il a la capacité de simuler aussi les pertes, l'écoulement de surface et l'écoulement souterrain;
- la fiabilité des résultats obtenus lors de son application à des sous bassins versants méditerranéens.

II.8.1.2. Historique

L'idée de la modélisation 'GR' a été lancée par C. Michel en 1983 après l'analyse d'un modèle conceptuel CREC (Centre de Recherche et d'Etude de Chatou) à neuf paramètres sur le bassin expérimental de l'Orgeval. Il a été constaté que ce modèle présentait des difficultés au niveau de la mise en œuvre et du calage.

L'idée s'est développée alors, en partant du modèle le plus élémentaire possible (un unique paramètre lié à un unique réservoir). Cette démarche a débouché sur un modèle simple à deux paramètres GR2J (Michel, 1983). De façon plus générale, ce premier modèle était un modèle à deux paramètres, GR2, avec un paramètre pour chaque capacité de réservoir.

La version GR3J (Edijatno & Michel, 1989) a servi, principalement, comme modèle de base pour l'élaboration des autres versions au pas de temps journalier ainsi qu'au pas de temps mensuel.

Les versions qui semblent les plus performantes et la plus robuste est (GR4J) proposée par (Perrin, 2000), GR5J (Le Moine, 2008) et GR6J. (Pushpalatha, 2013)

II.8.1.3. Mode de développement

Bien que ces modèles soient parfois apparentés à des modèles conceptuels du fait de leur structure à réservoirs, ce sont en fait des modèles empiriques: leur construction s'est faite sur la base de grands jeux de données et en découvrant progressivement la structure permettant de reproduire au mieux le comportement hydrologique du bassin versant (c'est-à-dire sa réponse aux pluies). Les idées suivantes se sont progressivement imposées au cours du développement de ces modèles pour permettre d'obtenir des modèles fiables et robustes (Mathevet, 2005):

- représentation globale du bassin versant,
- approche empirique de développement sans recours a priori à la physique des écoulements,
- augmentation progressive de la complexité de la structure du modèle en partant de structures simples,
- justification de la complexité de la structure d'un modèle par ses performances,
- recherche de structures de modèle générales (applicables à des bassins variés),
- utilisation de larges échantillons de bassins versants pour tester les performances des modèles. (Andréassian et al., 2007)
- évaluation d'un modèle par comparaison à d'autres structures de modèle.

II.8.1.4. Objectifs de développement

La simulation du débit à l'exutoire d'un bassin versant est nécessaire voire indispensable pour de nombreuses applications d'ingénierie et de gestion de la ressource en eau, telles que le dimensionnement et la gestion d'ouvrages, la prévision des crues ou des étiages, la détection d'impact, etc. C'est pour répondre à ces questions que le Cemagref a commencé à développer au début des années 1980 des modèles hydrologiques (du Génie Rural – GR) permettant de faire le lien entre la lame d'eau précipitée sur un bassin versant et son débit à l'exutoire (Michel, 1983). Au-delà de leur aspect pratique, ces modèles ont soulevé des questions essentielles sur la façon de représenter la transformation de la pluie en débit à l'échelle du bassin versant. (Andréassian et al., 2007)

II.8.1.5. Principales caractéristiques

Comme tout modèle hydrologique, les modèles GR opèrent une triple globalisation (triple considération de moyenne) du système bassin versant :

- au niveau des processus : les modèles GR proposent des relations comportementales simples à l'échelle du bassin, mises au point empiriquement et sans liens directs avec la physique des processus à petite échelle et pouvant représenter une moyenne de plusieurs processus;
- au niveau de l'espace : les modèles GR sont globaux, c'est-à-dire que, tout en reconnaissant l'extraordinaire hétérogénéité de tout bassin versant, ils considèrent le bassin versant comme un tout. Les tentatives de distribution progressive n'ont, jusqu'à présent, pas abouti à des résultats intéressants. C'est le comportement de la moyenne spatiale qui est étudié en priorité ;
- au niveau du temps : les modèles GR ont été développés pour des pas de temps de fonctionnement spécifiques : annuel (GR1A), mensuel (GR2M) et journalier (GR4J). Les différents modèles travaillent donc sur des moyennes temporelles.

II.8.2. Description du modèle pluie débit annuel GR1A

Le modèle GR1A (modèle du Génie Rural à 1 paramètre Annuel) est un modèle pluie débit global à un seul paramètre. Son développement a été initié au Cemagref à la fin des années 1990, avec pour objectif de mettre au point un modèle de simulation pluie débit robuste et fiable en vue d'utilisations pour des applications d'évaluation et de gestion de la ressource en eau. La principale version, que nous présentons ici, est celle proposée par (Mouelhi, 2003) et (Mouelhi et al., 2013)

La structure du modèle est très simple puisqu'elle se résume à une simple équation, le débit Q_k de l'année k étant proportionnelle à la pluie P_k de la même année, avec un coefficient d'écoulement dépendant de P_k , de la pluie P_{k-1} de l'année $k-1$ et de l'évapotranspiration potentielle annuelle moyenne E .

Le modèle s'écrit :

$$Q_k = P_k \left\{ 1 - \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{0.7P_k + 0.3P_{k-1}}{X.E} \right)^2 \right]^2} \right\}^{0.5} \quad (\text{II.1})$$

Où X est l'unique paramètre du modèle.

Le paramètre X traduit l'influence d'une ouverture du bassin sur l'extérieur non atmosphérique (par exemple échange avec de nappes profondes ou avec des bassins adjacents dans le cas d'une non-superposition des limites topographiques et géologiques) : si X est supérieur à 1, le système perd de l'eau et si X est plus petit que 1, le système en gagne, le tout exprimé en fraction de l'ETP.

Le modèle ne comporte qu'un paramètre optimisable, le paramètre X adimensionnel, qui apparaît comme un coefficient modulateur de l'évapotranspiration potentielle. Sur un large échantillon de bassins versants, la médiane de X vaut 0.7 et un intervalle de confiance à 90% est donné par [0.13 ; 3.5]. (Andréassian et al., 2007)

II.8.3. Description du Modèle Pluie-Débit Mensuel GR2M

C'est un modèle issu des travaux de, il a été conçu après une comparaison de plusieurs modèles mensuels, et une adaptation du modèle conceptuel journalier GR4J (Perrin, 2000) à l'échelle mensuelle. Le modèle GR2M comporte deux réservoirs et deux paramètres X1 et X2, il est caractérisé par deux fonctions :

- Une fonction de production assurée par le réservoir sol S qui est limité par une capacité maximale X2 (paramètre à caler) ;
- Une fonction de transfert représentée par le réservoir R, dont le niveau est modifié par l'échange souterrain en fonction du paramètre X1. En premier lieu, le niveau du réservoir sol S devient S1 sous l'action de la pluie

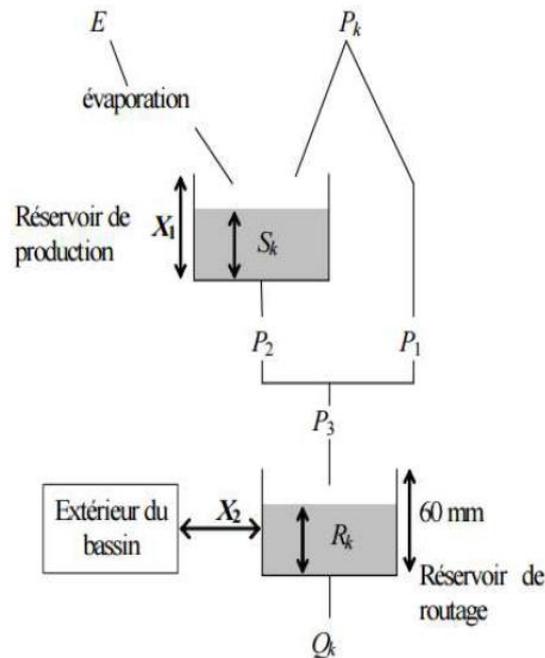


Figure II.5: Schéma de la structure du modèle GR2M.(Gherissi, 2012)

Où

X1 : capacité du réservoir de production (mm)

X2 : Coefficient d'échanges souterrains (-)

II.8.4.Description du Modèle Pluie-Débit journalier GR4J

Le modèle GR4J (modèle du Génie Rural à 4 paramètres Journalier) est un modèle pluie-débit global à quatre paramètres optimisables :

X1, capacité du réservoir de production (mm) ;

X2 : coefficient d'échanges souterrains (mm),

X3 : capacité à un jour du réservoir de routage (mm),

X4 : temps de base de l'hydrogramme unitaire HU1 (j).

Le modèle utilise en entrée la hauteur de pluie moyenne sur le bassin versant P (mm) et l'évapotranspiration potentielle E (mm). Son développement a été initié au Cemagref au début des années 1980, avec pour objectif de mettre au point un modèle de simulation pluie-débit robuste et fiable en vue d'utilisations pour des applications de gestion de la ressource en eau et d'ingénierie (dimensionnement d'ouvrage, prévision des crues et des étiages, gestion de réservoirs, détection d'impact...).

Chapitre II L'état de l'art de modélisation hydrologique

Ce modèle a connu plusieurs versions, proposées successivement qui ont permis d'améliorer progressivement les performances du modèle. C'est la version de qui est présentée ici.

Bien que GR4J soit un modèle empirique, sa structure l'apparente à des modèles conceptuels à réservoirs, avec une procédure de suivi de l'état d'humidité du bassin qui permet de tenir compte des conditions antérieures et d'en assurer un fonctionnement en continu. Sa structure associe un réservoir de production et un réservoir de routage, des hydro grammes unitaires ainsi qu'une fonction d'ouverture sur l'extérieur non atmosphérique permettant de simuler le gros du comportement hydrologique du bassin

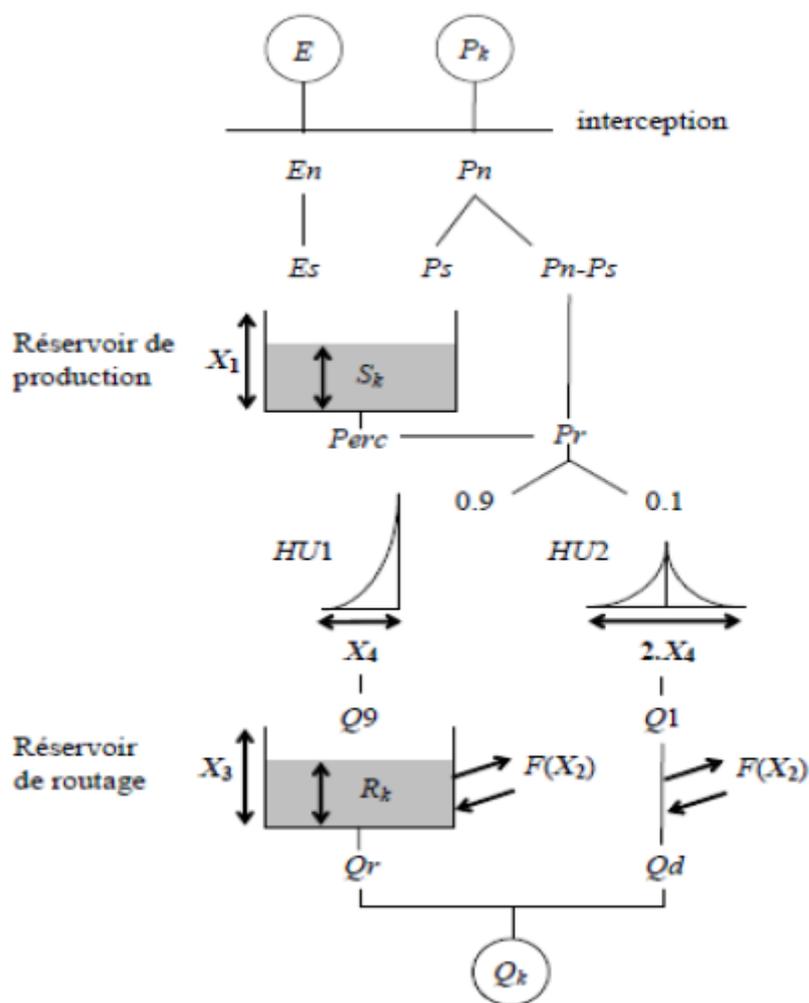


Figure II.6: Schéma de la structure du modèle GR4J.(Makhlouf, 1994)

II.8.5. Le modèle HBV

Le modèle HBV (du suédois. Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning c'est-à-dire Bureau Hydrologie Section Ressources en eau) a initialement été développé par Bergström (1973). C'est le modèle de prévision hydrologique standard dans les pays Scandinaves.

HBV est un modèle pluie-débit distribué où la discrétisation du bassin est basée sur l'altitude et les caractéristiques du couvert végétal. La version HBV-96 est une version semi-spatialisée permettant de plus le découpage en sous-bassins. La description de certains processus (cf. accumulation et fonte de neige, évapotranspiration) y a été modifiée.

II.8.5.1. Description du modèle de base HBV

C'est un modèle à 5 réservoirs et 7 à 9 paramètres à estimer. Il est composé des modules suivant :

- Module neige: réservoir avec accumulation; fonte de type degré jour (3 paramètres).
- Interception: réservoir de stockage sur les surfaces boisées (sans paramètre).
- Production: trois réservoirs en série (6 paramètres : réservoir sol. intermédiaire, souterrain ; réservoirs linéaire et non linéaire, avec ou sans capacité de stockage, avec ou sans seuil de débordement).
- Transfert: basé sur le concept de l'hydrogramme unitaire (1 paramètre).

Ce modèle est utilisé pour des pas de temps journalier, mais il peut être également adapté à des pas de temps plus courts (peu consommateur de temps).

Il a des besoins modérés en donnée tels que, les séries de pluie, ETP, de débit et de température de l'air (pour le module neige), pour les prévisions de la température, de l'air et des précipitations. Il est applicable sur des différents bassins versants partout dans le monde, mais il est adapté notamment aux bassins versants alpins et nordiques avec forte influence neigeuse.

L'équation du bilan dans ce modèle est décrite par :

$$P - E - Q = \frac{d}{dt} [SP + SM + UZ + LZ + lakes] \quad (II.2)$$

Ou :

P = précipitation

E = évapotranspiration

Q = ruissèlement

SP = manteau neigeux

SM = humidité du sol

UZ = zone supérieure des eaux souterraines

LZ = zone inférieure des eaux souterraines

$lakes$ = volume du lac

Le modèle HBV a été appliquée dans de nombreuses études, par exemple, pour calculer les prévisions hydrologiques, pour le calcul des crues de projet ou pour l'étude des changements climatiques. Ce modèle a aussi été utilisé en Norvège et en Finlande en 1991 pour vérifier l'effet des changements climatiques sur les ressources en eau. Selon Irvine et al.(2005), HBV est probablement l'un des modèles distribués les plus performants.

De nombreux travaux avec HBV ont été recensés en Afrique du nord, comme les travaux réalisés par (Bargaoui et al., 2008) sur leur application pour l'estimation des débits moyens journaliers du bassin versant de l'oued Tessa (Tunisie), au niveau d'une station hydrométrique contrôlant une superficie de 1950 km².

II.9. Mise en œuvre d'un modèle hydrologique

II.9.1. Choix d'un modèle

Le choix d'un modèle hydrologique se fait en fonction des éléments suivants :

- objectif de l'étude hydrologique : Les objectifs de l'étude hydrologique sont multiples selon lesquels on peut négliger ou simplifier certains paramètres dans la modélisation ;
- disponibilité de données : En dépit des incertitudes que présentent des modèles par rapport à d'autres, le manque de données nous contraint à les utiliser ;
- nature de modèle, la robustesse et la simplicité de modèle influencent le choix en particulier dans le cas où le temps ou le coût présentent une contrainte

Le choix de tel ou tel modèle reste toujours une étape délicate dans la mesure où nous n'avons pas d'idée au préalable des processus hydrologiques qui peuvent intervenir dans le bassin. De façon générale, pour savoir quels sont les processus importants dans un bassin, nous devons faire un essai de modélisation.

II.9.2. Calage du Modèle Hydrologique

Les étapes qui doivent être suivies dans toute modélisation hydrologique sont :

- La conceptualisation de la problématique.
- Choix du modèle correspondant.
- Introduction des données analysées et critiquées.
- Le calage de modèle avec des données observées.
- Validation avec d'autres données.
- Utilisation du modèle pour la prévision et la simulation hydrologique.
- Vérification des prévisions faites par le modèle.

Le calage est donc une des étapes fondamentales dans la démarche de modélisation hydrologique. Elle consiste à rechercher les valeurs optimales des paramètres des différentes équations (régissant l'écoulement) utilisées dans le modèle hydrologique. (Gherissi, 2012)

Le calage a pour but :

- De compenser les erreurs de mesures de données fournies aux modèles.
- Forcer les paramètres vers des valeurs dont l'interprétation ne correspond pas à la physique du modèle.
- Trouver une valeur moyenne pour un paramètre descripteur d'un bassin versant dont la variabilité spatiale n'est pas appréhendée par le modèle. (Marchandise, 2007)

Pour caler un modèle, il faut choisir une série de référence (pluies-débits) et fixer un critère d'évaluation pour l'ajustement des simulations des modèles aux données de calage pour un jeu de paramètres donnés. (Gherissi, 2012)

II.9.2.1. Méthodes de Calage des Modèles Pluies-Débits

On peut procéder au calage de modèle par trois méthodes :

- **Calage manuel**

Cette méthode consiste à donner des valeurs aux paramètres du modèle et évaluer manuellement l'erreur entre les valeurs de sortie et les valeurs observées et l'échantillon de référence pour faciliter cette opération on a une représentation graphique.

- **Calage automatique**

Ce calage optimise automatiquement les paramètres de modèle par l'utilisation d'un algorithme numérique pour trouver un extremum d'un critère numérique donné afin de déterminer l'ensemble des paramètres qui satisferont un critère donné de précision à travers différentes combinaisons possibles. (Kingumbi, 2006)(Gherissi, 2012)

- **Calage mixte**

Le calage mixte consiste à combiner les deux méthodes précédentes. On détermine manuellement l'intervalle de variation des paramètres, puis on utilise la méthode automatique pour trouver les valeurs de paramètres optimales.

II.9.3. Validation :

Une fois le modèle hydrologique distribué implémenté sur un bassin versant donné, se pose ensuite la question de savoir quelle est la capacité du modèle à simuler le présent ou le future, C'est étape de validation qui doit répondre à cette question.

Cette étape consiste à vérifier la reproductivité des résultats par le modèle et la représentativité des paramètres calés. Son principe est de tester le modèle sur une série de données non utilisées dans la phase du calage. Ainsi l'existence de cette phase dépend de la disponibilité en données. Plusieurs schémas de calage et de validation ont été ainsi proposés par la communauté scientifique telle que le schéma de Klêmes (1983). Une explication plus détaillée sur ce schéma peut être trouvée dans la thèse d'Indarto (2002).

Deux approches sont très utilisées par les hydrologues :

- Une approche classique de validation qui consiste à choisir aléatoirement une partie des données pour le calage des paramètres du modèle. C'est l'étape de **validation interne** qui a pour objectif d'analyser la sensibilité du modèle aux valeurs des paramètres qui le constituent.
- Une approche basée sur la validation multicritères et multi-échelles appliquée à l'ensemble du bassin. C'est l'étape de **validation externe**. Elle consiste à confronter les

résultats du modèle à une réalité, c'est-à-dire concrètement des données (hydrogramme mesurés sur des stations intermédiaires, niveaux piézométrique, etc.) qui n'ont pas été utilisées pour le construire. Il importe de bien veiller à ce que la validation externe d'un modèle ne soit pas conduite sur des données qui ont servi à l'établir.

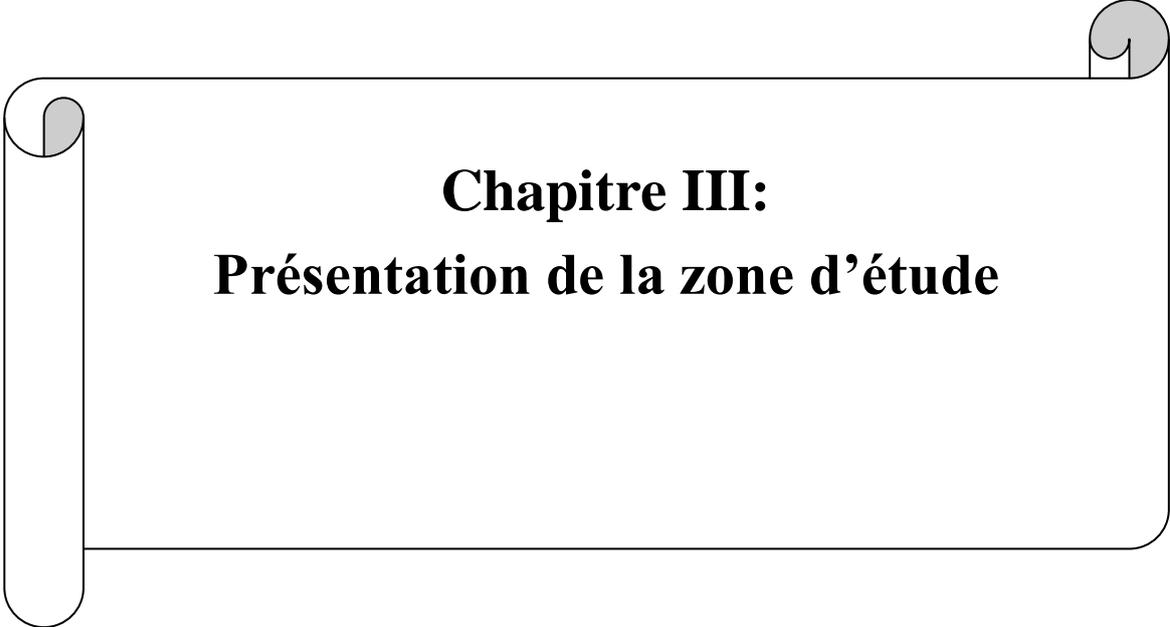
II.9.4. Incertitudes

Depuis les années 90, le calage des modèles hydrologiques a été associé, le plus souvent, aux calculs d'incertitudes. Ainsi Melching(1995) puis Refsgaard et Storm(1996) ont identifié quatre types d'incertitudes dans l'application des modèles hydrologiques :

- **Incertitude liée à la nature** : c'est une conséquence de la variabilité spatio-temporelle du processus dans la nature (exemple : précipitations, température) qui introduit une fonction aléatoire dans le processus physique de genèse de ruissellement.
- **Incertitude liée aux données** : la plupart des auteurs s'accordent sur le constat qu'il est impossible d'identifier la variabilité et la complexité locale des données à travers quelques points de mesure. Donc la variabilité présentée dans les données d'entrée du modèle est une limite pour représenter la variabilité naturelle introduisant ainsi l'incertitude dans les données. Refsgaard et Storm (1996) soulignent l'existence d'incertitudes aléatoires ou systématiques au niveau des techniques d'acquisition des données et des méthodes d'interpolation utilisées. Le développement de la technique de télédétection a contribué à réduire l'incertitude liée aux données. (Les erreurs d'enregistrement ou de représentativité).
- **Incertitude liée aux paramètres du modèle** : ce type d'incertitude est influencé par l'incertitude liée aux données à cause des caractéristiques d'optimisation du modèle pendant le processus de calage.
- **Incertitude liée à la structure du modèle** : l'incapacité du modèle de représenter les processus physiques réels de ruissellement est à l'origine de ce type d'incertitude.

II.10. Conclusion

Les modèles pluie débit sont essentiels dans la gestion des ressources en eaux, l'analyse du risque hydrologique, la prévision des crues, l'étude d'impact des changements climatiques sur les cycles etc. Toutefois l'application de ces modèles dépend de la qualité de l'estimation de leurs paramètres. Bien que certains de ces paramètres puissent être estimés par des mesures in situ, ou à partir des caractéristiques du bassin versant (morphologie, pédologie, occupation du sol, etc.). Il s'avère que la description des processus qui entrent en jeu dans la réponse hydrologique d'un bassin versant n'est pas une tâche aussi facile, cette description demande la connaissance et la maîtrise d'une variété de facteurs et de paramètres. Des renseignements suffisants sur ces données ne sont pas toujours disponibles pour tous les bassins versants.



Chapitre III:
Présentation de la zone d'étude

III.1. Introduction

La zone d'étude de ce travail comprend 3 bassins versants :

- Le bassin versant de El Kebir qui située au grand bassin de El Kebir-Rhumel (la wilaya de Mila) ;
- Le bassin versant de Timgad qui située au à la wilaya de Batna ;
- Le bassin versant de Zerdasas qui située au grand bassin de Saf Saf (la wilaya de Skikda).

La présentation de la zone d'étude est nécessaire pour connue la nature de la zone sur tous les domaines : Climatique, Géologique, Hydrographique.

III.2.Présentation de la zone d'étude

III.2.1.Zone d'étude N° 1 « bassin versant El Kebir »

III.2.1.1.Présentation de la Wilaya de Mila

III.2.1.1.1.Situation géographique :

La wilaya de Mila se situe au Nord-Est de l'Algérie, et occupe une superficie totale de 3480, 45 Km² soit 0,14 % de la superficie du pays. Elle est limitée au nord par la wilaya de Jijel, au sud par la wilaya de Batna, au l'ouest par la wilaya de Sétif, au sud – Est par la wilaya d'Oum El Bouaghie, a l'est par la wilaya de Constantine, au nord-est par la wilaya de Skikda.

La wilaya de Mila renferme beaucoup de potentialités en matière de développement locale et régional .Elle dispose d'un équipement de grande hydraulique qui devrait la développer, c'est le Barrage de Beni Haroun.

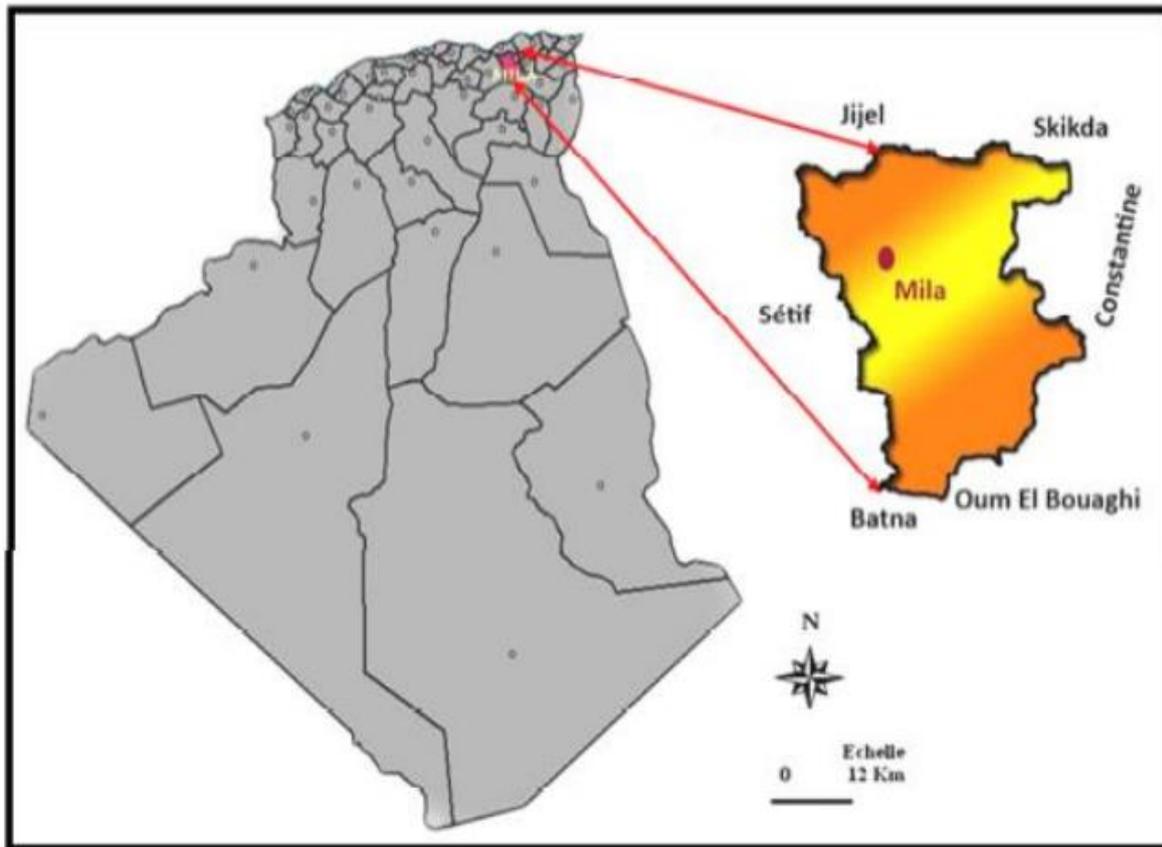


Figure III.1 : La situation géographique de la wilaya de Mila

III.2.1.1.2. Barrage de Beni Haroun

Le barrage de Beni Haroun est le grand complexe hydraulique en Algérie et le seconde du continent Africain (après le barrage d'Al Sad El Alli en Egypte). Situé sur l'oued El-Kebir dans la wilaya de Mila au Nord-Est de l'Algérie à des coordonnées géographiques ($36^{\circ}33'19''$ N ; $6^{\circ}16'11''$ E). Il est construit à la confluence du oued Rhumel et oued Enndja au Nord – Ouest de la région de Grarem. Il est distant de quarantaine de Kilomètres au nord du Constantine et à une même distance à l'embouchure de l'oued Kebir (Mer Méditerranée) ; sa mise en exploitation était en Aout 2003. Le barrage de Beni Haroun est de type poids en Béton compacté rouleau ; avec une capacité de 960 millions m^3 et d'une hauteur de 118 m au-dessus des fondations, le barrage mobilise les eaux d'oued Rhumel, oued Enndja et oued Smendou. En février 2012, le barrage reçoit un volume d'eau de 1 milliard de m^3 (Khanchoul et al., 2012). Il couvre une superficie de 5320 km^2 , représentant plus 60% de la superficie totale du bassin versant de Kebir Rhumel.

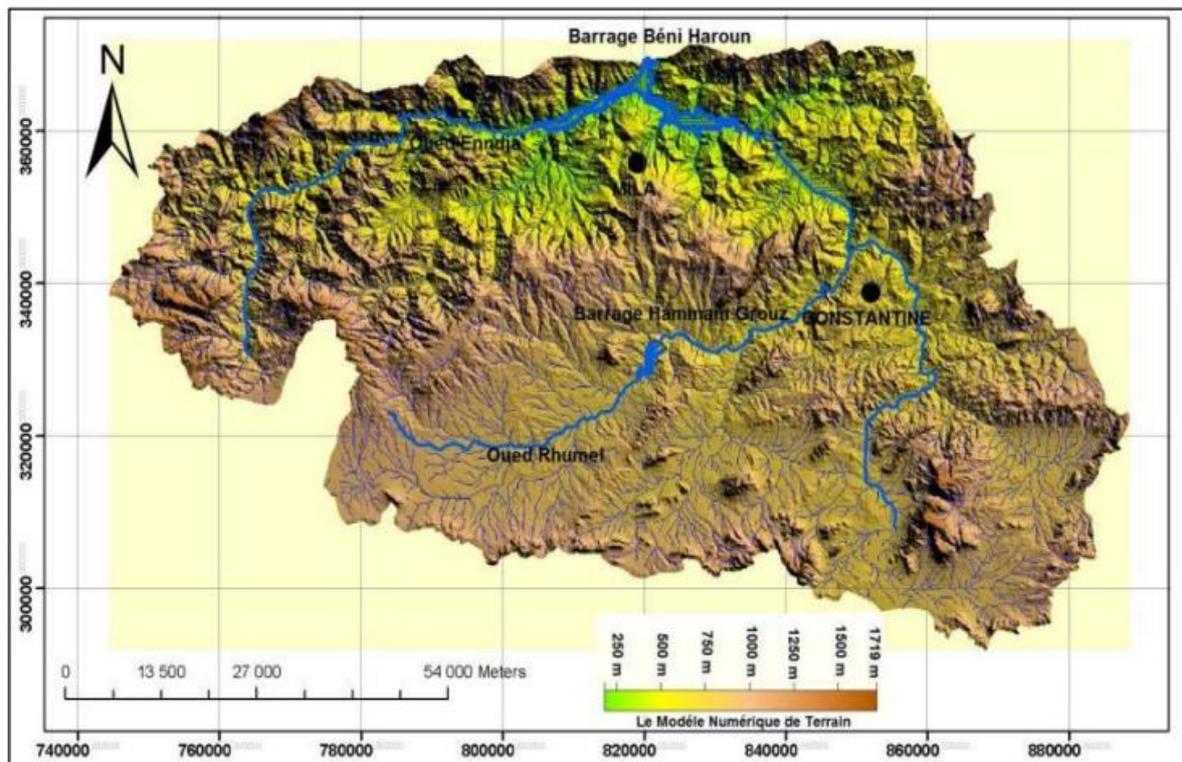


Figure III.2 : Bassin versant du Barrage Beni Haroun

III.2.1.1.3. Le climat

La Wilaya de Mila est caractérisée par un climat de type méditerranéen, son régime climatique dépend de deux paramètres principaux : la précipitation météorologique et la température (Soufane, 2011). Elle est globalement caractérisée par :

- Une saison (hiver) humide et pluvieuse s'étendant de novembre à avril.
- Et une période estivale longue chaude et sèche allant de mai à octobre. (Zouaidia, 2006)

➤ La pluviométrie

La pluviométrie à Mila est inégalement répartie à travers les mois de l'année et les précipitations sont, naturellement, cantonnées dans le semestre frais qui débute en Novembre et se termine en Mars. Le manque ou l'abondance des précipitations agissent sensiblement sur les réserves en eau; quantités mobilisées et quantités exploitées. (Godard & Hubert, 2002)

La pluviométrie varie entre 700mm/an dans la zone montagneuse, 350mm/an au sud et 400 à 600mm/an dans la partie centrale.

➤ La température

La région de Mila est caractérisée par une température méditerranéenne modérée durant les mois de l'Automne, l'Hiver et le Printemps. Pendant l'été la température augmente rapidement surtout, à l'intérieur de la wilaya. La région de Mila reflète par sa situation des températures différentes au cours de l'année.

III.2.1.1.4. Réseau hydrographique :

Le bassin de Mila dans son ensemble est un bassin élevé avec une altitude moyenne de 500 m, il est drainé d'Est en Ouest par l'Oued Rhumel qui descend de 256 m à 135 m pour former avec l'Oued Endja, l'Oued El Kebir au Centre-Ouest de la commune de Grarem. Le petit bassin d'Ibn Ziad est drainé par l'Oued El Bagrats et le Nord de la commune de Mila par l'Oued El Kotone. Le réseau hydrographique est extrêmement dense et hiérarchisé. La forme de la région en bassin avec un couloir Est-Ouest fait ressortir une orientation générale du réseau hydrographique Sud-Nord ou Nord-Sud selon les cas. (CHETTAH, 2009)

III.2.1.1.5. Le relief

La wilaya de Mila est entièrement entourée de chaînes montagneuses appartenant à différents domaines paléogéographiques :

- Au nord, un ensemble de hautes montagnes, caractérisé par les altitudes très élevées et des pentes excessivement marquées, telles que : M'Cid Aicha et Sidi Driss.
- Au sud, un ensemble de hautes plaines (plaines et collines), telles que : Djebel Osman et Grouz.
- Djebel Akhal, Chettaba et Kheneg de l'Est, et Djebel Boucherf et Oukissene par l'Ouest. (Merghadi et al., 2018)

III.2.1.2. Généralités sur le bassin versant El Kebir

III.2.1.2.1. Situation du bassin versant :

Notre zone d'étude fait partie du bassin versant Rhumel-Kebir, situé dans le Nord de l'Algérie, où il est considéré comme l'un des bassins les plus importants et les plus vastes d'Algérie et occupe une superficie de 12,78% de la superficie totale.

Le bassin versant de l'oued Kebir draine une superficie de 1022 km² à la station de mesure de Tassadane. Le réseau hydrographique de ce bassin est caractérisé par une forte densité avec une longueur totale de cours d'eau de 1650 km. La rivière principale coule du sud-ouest au nord-est sur 45 km avec un important débit annuel moyen de 4,26 m³/s (période 1973 à 2006).

III.2.1.2.2. L'Hydro-climatologie du Bassin versant

Le climat de la zone d'étude est méditerranéen avec des étés secs et des précipitations concentrées en hiver. Le bassin est divisé en deux régimes climatiques, la partie nord à partir de Ben Aziz est subhumide et la partie sud (à Dahamcha et Djemila) est semi-aride. La région correspondante est caractérisée par des températures modérées et des intensités de pluie élevées en automne, et une saison d'été très chaude et sèche. (Tourki et al., 2017)

Les précipitations et la température moyennes annuelles sont respectivement de 610 mm et de 15°C. De plus, la plupart des précipitations tombent en décembre, avec une moyenne de 89 mm, tandis que le mois d'août est le mois le plus sec de l'année avec une valeur moyenne de précipitations égale à 7,65 mm. Les températures élevées qui peuvent atteindre 35°C se produisent pendant la période de juillet et août. Ces températures élevées provoquent un taux d'évapotranspiration annuel important, (Mebarki, 2005) estimant ce taux à 1400 mm/an.

III.2.1.2.3. La géologie et le relief

Outre les conditions climatiques, les conditions lithologiques et topographiques contribuent à l'intensification du processus d'érosion (García-Ruiz et al., 2013). Dans le bassin versant de l'oued Kebir amont, les formations lithologiques les plus dominantes correspondent à des roches érodables. Mebarki et Thomas (Mebarki & Thomas, 1988), ont montré que la zone d'étude est principalement constituée de marnes, de calcaires et de roches érodables formée de marnes, de calcaires et de calcaires marneux d'âge Crétacé - Eocène. Ce type de roches représente 71% de la superficie totale. On note également la présence d'argile, de marne, de calcaire et de grès qui occupent une plus petite surface (16%). Le reste du bassin versant est constitué de roches résistantes comme le grès de l'Oligocène.

La surface topographique est dérivée d'un modèle numérique d'élévation (MNE) à 90m de résolution. La carte des pentes réalisée à partir du MNE montre que dans la zone d'étude, il existe des variations topographiques significatives importantes, avec des pentes plus raides concentrées principalement dans la partie nord du bassin versant de l'oued Kebir amont.

La pente moyenne du bassin est égale à 19% et les pentes allant de 10 à 25% occupent 60% du bassin versant. La plupart des versants se distinguent par des reliefs de grès à ravines avec des élévations allant de 750 à 1200 m. Les pentes très raides (dépassant 25 %) sont présentes dans la partie nord-ouest du bassin versant de la zone d'étude et occupent 24% de la superficie totale du bassin. Ces pentes présentent peu de pics prononcés, de 1200 à 1600 m, et sont généralement associées à des sols peu profonds qui sont susceptibles d'être par les nappes phréatiques et les ravines. (Tourki et al., 2017)

III.2.1.2.4. Le couvert végétal et l'occupation du sol

Les pratiques agricoles dans le bassin versant de l'oued Kebir sont généralement axées sur des cultures intensives telles que le blé, l'orge et les céréales et les cultures fourragères. (Roy et al., 2006)

Compte tenu du relief accentué qui caractérise la zone d'étude, les pratiques agricoles ne couvrent que 32% de la surface totale. Les conditions topographiques imposent aux agriculteurs de choisir des zones généralement moins pentues pour cultiver leurs terres et d'avoir un accès facile à leurs pratiques d'utilisation des terres. La plupart des terres du bassin versant de l'oued Kebir sont couvertes de matorrals, de forêts et d'arbustes épars. (Roy et al., 2006)

III.2.2. Zone d'étude N°2 « bassin versant de Timgad »

III.2.2.1. Présentation de la Wilaya de Batna

III.2.2.1.1. Situation géographique

La wilaya de Batna est située dans la partie Est de l'Algérie, (voir la Figure III.3) à la jonction de l'Atlas tellien et de l'Atlas saharien. Les wilayas limitrophes sont : Oum El Bouaghi, Mila et Sétif au Nord, Khenchela à l'Est, Msila à l'Ouest et Biskra au Sud, Elle compte 1 122 384 habitants sur une superficie de 12 337 km². Batna, Barika et AïnTouta sont les plus grandes villes de la Wilaya de Batna parmi les 61 villes qui la compose. La ville est alimentée par plusieurs sources d'eau, ainsi que par les eaux du Barrage de Timgad.



Figure III.3: Situation de la ville de Batna

III.2.2.1.2. Le Climat

Le climat de Batna est à hivers sec et rigoureux et à été doux à légèrement chaud, c'est un climat de type semi-aride.

La saison hivernale se fait sentir du mois de novembre au mois de mars avec les mois de décembre, janvier et février particulièrement rigoureux. La saison estivale est agréable avec des températures moyennes avoisinant les 30°C.

➤ L'humidité

La période s'étalant du mois d'octobre au mois de mars, est celle où l'humidité est supérieure à 50%, avec un pic aux mois de décembre et janvier (70% et plus). Juillet et Aout sont les mois les plus secs avec un taux d'humidité de l'ordre de 33%. La moyenne journalière d'une année est de l'ordre de 53%.

➤ Les précipitations

L'hiver et le printemps sont les saisons les plus arrosées avec les mois de janvier et mars qui reçoivent respectivement 40 et 43 mm de pluie en moyenne. Le mois de juillet est le plus sec et ne reçoit qu'une moyenne de 7 mm.

III.2.2.2. Présentation du Bassin de Timgad :

Le bassin de Timgad se trouve au Nord-Est algérien à une trentaine de kilomètres à l'est de la ville de Batna, et à 400 km au sud-est d'Alger, il appartient à l'Atlas saharien nord-oriental, à la terminaison septentrionale du massif des Aurès. Il a la forme d'une gouttière de direction Est-Ouest, limitée au nord par les massifs Bou Arif, Amrane et Tagratine, et au sud par les massifs Chelia, Rdam et Nerd Bouhmar.

III.2.2.2.1. Le réseau hydrographique

Le bassin de Timgad est drainé par un réseau hydrographique constitué de deux branches séparées par Djebel Amrane : (l'Oued Chemora et l'Oued Boulfreis), qui prennent naissance dans le massif des Aurès. Les écoulements de surface ne sont vraiment perceptibles que lors des averses en raison d'une aridification du climat.

A l'ouest de Sidi Maancer, les eaux de surface se dirigent vers la dépression de Batna. La partie ouest du réseau, rejoint au nord-est l'Oued Chemora, lui-même tributaire vers le nord des chotts des hautes plaines constantinoises. A l'est du bassin toutes les eaux de surface de dirigent vers le nord-est (Garaat et Tarf).

III.2.2.2.2. Le climat

Le climat dominant est continental, sub-aride avec des écarts considérables de température. Le vent dominant est le sirocco, vent chaud et sec venant du sud. Il imprime aux arbres isolés des zones basses une inclinaison très caractéristique.

Le climat de la région est rude, contrasté et caractérisé par des hivers froids et des étés chauds. Le total des précipitations se manifeste par une faible pluviométrie ne dépassant pas 400 mm/an.

III.2.2.2.3. Le relief

La jonction des deux Atlas (tellien et saharien) constitue la particularité de bassin et organise en même temps la répartition des différents milieux physiques définis comme suit:

Les hautes plaines, qui, à travers l'Algérie, s'intercalent entre les deux Atlas, ne constituent pas un ensemble uniforme, mais sont souvent coupées par des chaînons qui les compartimentent. Ainsi au nord du massif de l'Aurès qui culmine à 2328 m (dj. Chelia) émerge en quelque sorte une longue arête montagneuse dont l'élément principal, le dj. Bou Arif atteint 1.746 m au Ras Fourar. Entre les deux s'allonge le bassin de Timgad, il s'agit d'une plaine étroite qui vers l'est ne dépasse guère une vingtaine de kilomètres de large et qui, à l'ouest, de Timgad à Batna, n'est le plus souvent qu'un assez étroit couloir. Cette plaine est à une altitude moyenne d'un millier de mètres.

III.2.2.2.4. Le couvert végétal

Le couvert végétal, est constitué principalement de forêts en bordure de la plaine (cèdre, chêne vert, pin d'alpe et maquis), les vergers et jardins, cultures céréalière, cultures maraîchère de montagne intermittentes.

Ce couvert végétal vient ajouter son influence à celle de la géologie et la topographie pour accentuer la rapidité du ruissellement des eaux, l'évapotranspiration et la capacité de rétention du bassin. Le reste, présente des affleurements rocheux, un sol très érodé, une maigre végétation ou sol nu. Les parcours sont constitués d'étendus d'Alfa et de prairies et de terres argilo-marneuses improductives.

III.2.3. Zone d'étude N° 3 « bassin versant Zerdasas »

III.2.3.1. Présentation de la wilaya de Skikda :

III.2.3.1.1. Situation géographique :

La wilaya de Skikda se situe dans la partie Nord-est de l'Algérie dans l'espace géographique compris entre l'Atlas Tellien et le littoral méditerranéen. Entre les altitudes 36°5N et 36°15N et les longitudes 7°15E et 7°30 E. Couvrant une superficie totale de 4137,68 km et, représentant ainsi 12% du littoral algérien avec 140 km de côtes qui s'étalent de la Marsa à l'est jusqu'à Oued Z'hour aux fins fonds du massif de Collo à l'ouest (Hallaci & Mahboubi, 2019). Elle est limitée par :

- La mer Méditerranée au nord ;
- La wilaya d'Annaba à l'est ;
- La wilaya de Jijel à l'ouest ;

- Constantine et Guelma au sud ;
- Mila au Sud-ouest.



Figure III.4 : Situation géographique de la wilaya de Skikda.

III.2.3.1.2. Géologie et géomorphologie

Le relief de la région de Skikda est assez accidenté, et plus particulièrement dans la partie littorale et le massif de Collo. Ce relief est caractérisé par des plaines qui représentent la surface totale de la wilaya, et sont concentrées au niveau des régions de Skikda, Collo, Ain Charchar et Ben Azouz. Ces plaines résultent des débouchés de oued Guebli, oued Saf-Saf et oued El Kebir.

III.2.3.1.3. Le climat

La région est caractérisée par le climat méditerranéen, semi-aride où on rencontre deux saisons, un hiver doux et pluvieux, un été chaud et sec. Les pluies sont concentrées durant la saison froide et les saisons intermédiaires. L'altitude et les massifs forestiers situés à l'est et à l'ouest de Skikda favorisent une fraîcheur et une pluviosité plus importantes par rapport au centre. La région de Skikda reste l'une des régions les plus arrosées d'Algérie et les précipitations sont surtout hivernales entre novembre et février. Mais c'est la partie ouest de la Wilaya qui reçoit une quantité relativement plus forte par rapport au centre et à l'est.

III.2.3.2. Présentation du Bassin de Zerdasas :

Le bassin versant de Zerdasas (la wilaya de Skikda) est situé au grand bassin versant des Côtiers Constantinois, codé : 03-09 par l'ANRH, Le bassin de l'Oued Saf-Saf, auquel

appartient le sous-bassin de Zerdasas, résulte de la conjonction de deux cours d'eau : l'Oued Bouhadjeb et l'Oued Khemkhem, et fait partie du côtier Constantinois. Il est limité par la Méditerranée au Nord, le bassin de Rhumel Kebir à l'Est et au Sud-Est, et le bassin de la Soumam à l'Ouest.(Ghezali, 2019)

Le bassin versant de Zerdasas fait partie de la chaîne des Maghrébine. Plus exactement il appartient au tel oriental Algérien, limité au Sud par des formations purement sédimentaires qui appartiennent au môle Néritique Constantinois et constitués généralement par des formations carbonatées d'âge Crétacé ; quant aux formations cristallophylliennes elles sont d'âge Paléozoïque, elle le limitent à l'Ouest par Collo et au Nord Est par le Dj Fifila et Dj Alia ; les formations alluvionnaires côtoient dans toute sa trajectoire.

III.2.3.2.1. Barrage de Zerdasas

Le barrage des Zerdasas est conçu selon le type "en enrochement", comprenant : un mur de pied à l'amont avec parafouille un massif d'enrochement formant le corps du barrage et reposant sur une couche de fondation en béton, un mur de pied à l'aval, un masque soutenu à sa base par un socle, ancré latéralement dans les berges et placé sur le d'enrochement, enfin un dispositif de drainage général de toutes les eaux d'infiltration à travers les fondations, les encastremements et le corps du barrage.(Ghezali, 2019)

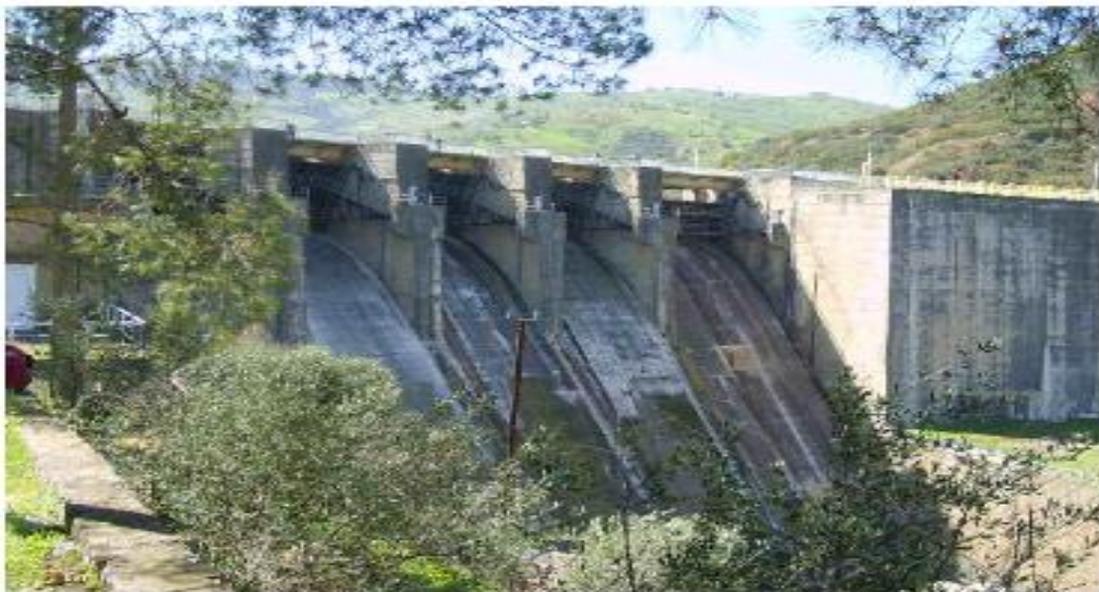


Figure III.5 : Vue du Barrage de Zerdasas depuis le versant rive droite

III.2.3.2.2. Géologie et géomorphologie du bassin

Notre zone d'étude fait partie de la petite Kabylie, qui fait partie de l'ensemble géologique de l'Atlas Tellien. Cette zone est caractérisée par sa complexité lithologique, et structurale, et qui fait partie de la zone septentrionale de l'orogène littorale Nord Africain.

Le bassin des Zerdasas est caractérisé par des pentes relativement fortes; plus de 70% de la superficie soit 235 Km² se composent de pentes comprises entre 10% et 35 %. Alors que les terrains dont les pentes sont supérieures à 35 % représentent 51 Km², soit 16 % de la superficie. La pente moyenne du bassin est de l'ordre de 38 m/km.

III.2.3.2.3. Le climat du bassin

Le climat est de type méditerranéen, froid et relativement humide en Hiver, et chaud en été. Le bassin présente une forte densité de drainage (3.8 km/km²), son relief est caractérisé par des terrains accidentés. En effet, les massifs montagneux couvrent plus de 50% du bassin, en particulier dans la partie Sud du bassin Zerdasas dispose d'une station hydrométrique contrôlée par l'ANBT (l'Agence Nationale des Barrages et transfert). (Ghezali, 2019)

III.2.3.2.4. Le réseau hydrographique

La topographie contrastée, l'agressivité du climat, la lithologie tendre des terrains (marnes et argiles) et les pentes ont permis l'installation d'un réseau hydrographique dense.

Le bassin versant de Zerdasas est drainé par les trois principaux affluents :

- L'oued Khemkhem qui drain la partie Est.
- L'oued Khorfane qui draine la partie sud.
- L'oued Bou Adjeb qui draine la partie Ouest étant de plus grande surface.

Le bassin versant alimentant le barrage des Zerdasas est assez bien équipé , sa superficie de 321 km² est contrôlée par trois stations pluviométriques et une station hydrométrique à savoir:

- Les deux stations pluviométriques à l'intérieur du bassin versant, dans sa partie Est, Ain El Kèlb (03-09-04) et Ouled Habeba (03-09-05).
- La station pluviométrique des Zerdasas (03-09-03), Implantée quasiment au droit du barrage sur le versant rive droite de l'Oued Saf-Saf.
- La station hydrométrique "Khemakhem" (03-09-01), implantée juste après la confluence des Oueds Bou Adjeb et Khemakhem. (Khelfaoui, 2008)

III.3. Délimitation de la zone d'étude

Les limites des bassins versants étudiés (Figure III.6) ont été faites avec un logiciel SIG utilisant des données de carte d'élévation numérique avec une Résolution de 30 m obtenue à l'aide d'un radiomètre spatial à émission et réflexion thermiques (ASTER) modèle numérique global d'élévation (NASA / METI / AIST / Japan Spacesystems et US / Japon ASTER Science Équipe, 2009). La connaissance de l'utilisation des terres est essentielle en raison de son impact sur la genèse des crues.

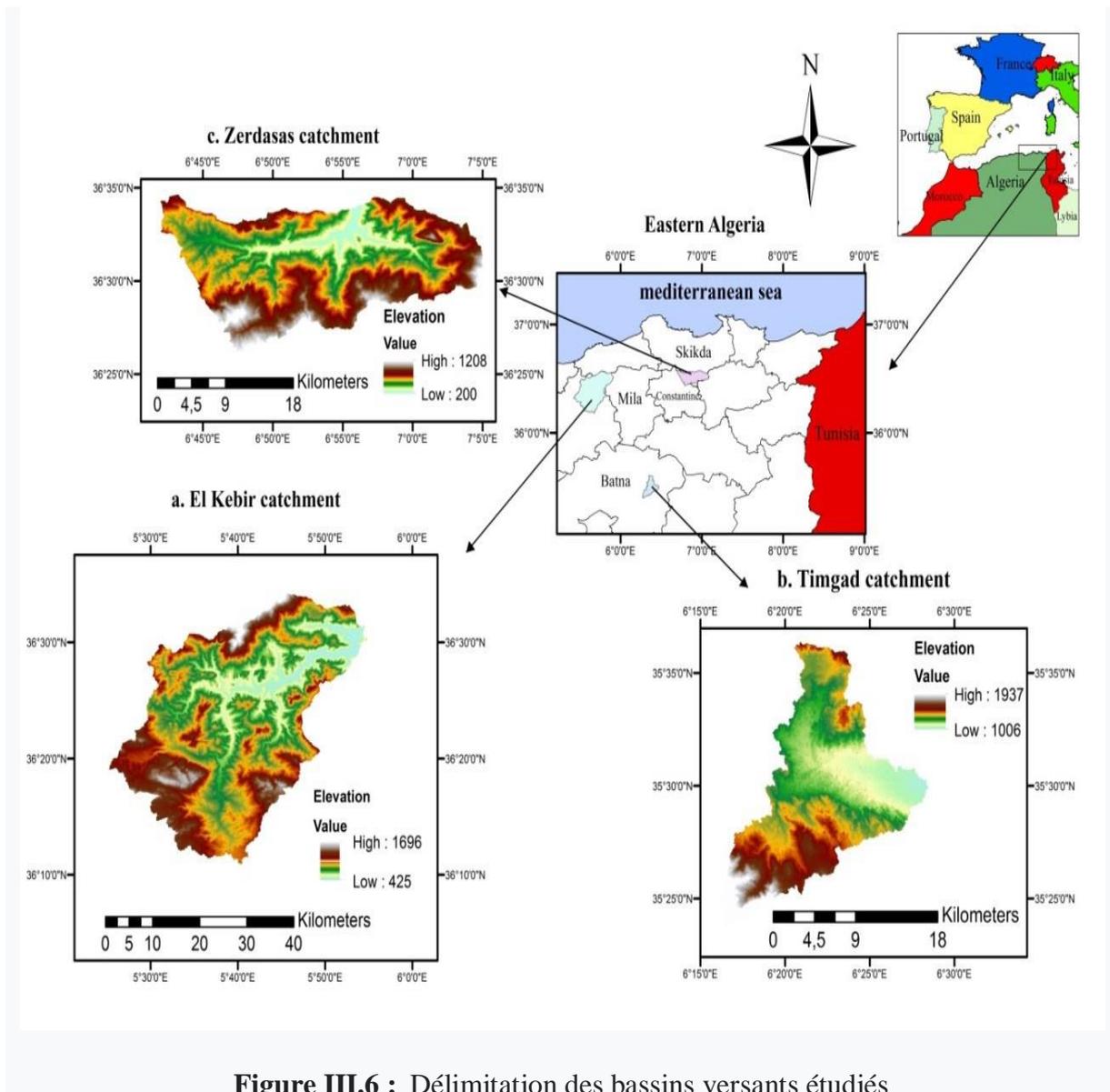


Figure III.6 : Délimitation des bassins versants étudiés

III.4. La couverture végétale des bassins versants étudiés

La carte d'occupation du sol (Figure III.7) utilisée dans cette étude a été extraite de l'Agence Spatiale Européenne Climate Change Initiative (CCI) les données ont été extraites à l'aide d'un logiciel SIG.

En conséquence, les trois bassins versants ont profils naturels et couverture du sol. Pour le bassin versant EL Kebir une grande superficie est dominée par les terres cultivées, qui couvre 67% du bassin, 24% sont des prairies, et le la superficie restante (un petit pourcentage) est couverte d'arbres et une végétation clairsemée. Pour le bassin versant de Timgad, 56 et 24,7% du bassin est couvert, respectivement, de prairies et des terres cultivées. Pour le bassin versant de Zerdassas, 67 % des le bassin est une terre cultivée, environ 20% est couverte d'arbres et 11% est la prairie.

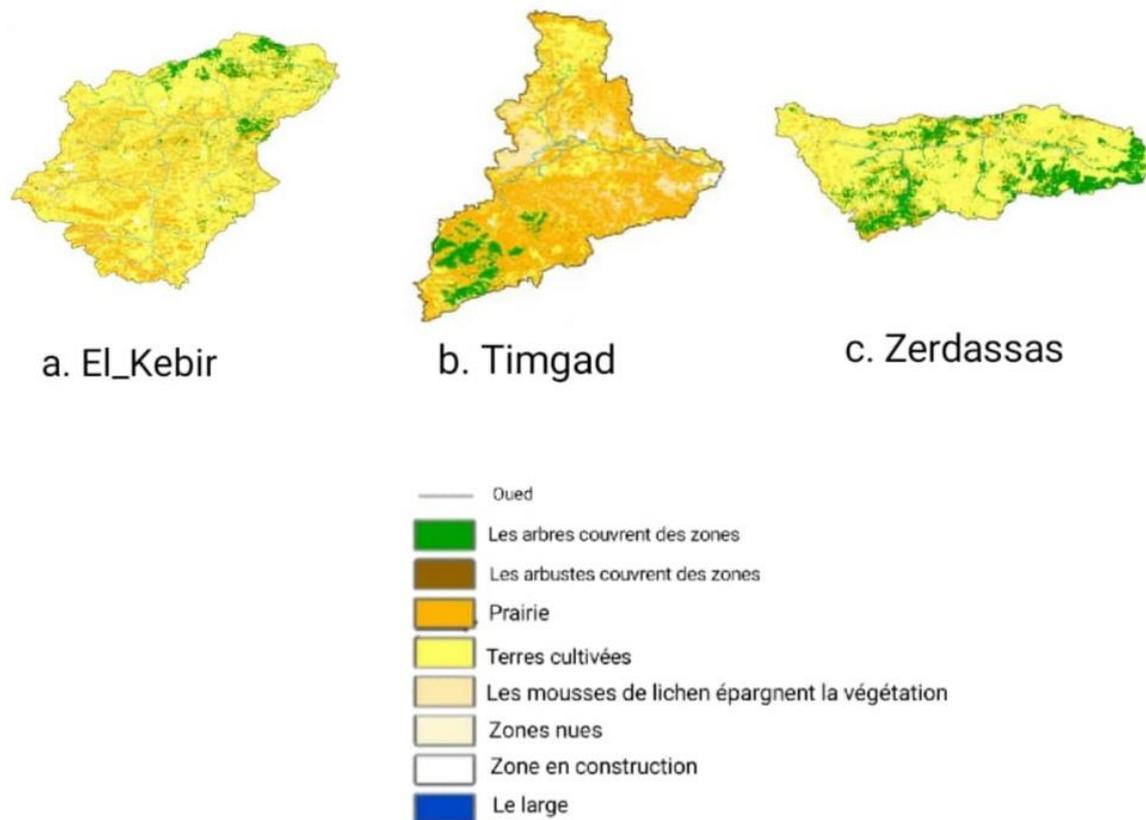


Figure III.7 : la couverture végétale des bassins versants étudiés.

III.5. Analyse morpho-métrique du Bassin versant

L'écoulement naturel des eaux dans un bassin versant est commandé à la fois par les conditions climatiques et par les caractéristiques physiques du bassin. Les caractéristiques physiques les plus importantes qui jouent un rôle essentiel et qui font l'objet de l'analyse morpho-métrique sont : la forme, l'ordre des cours d'eau, le relief.

Il existe un certain nombre de caractéristiques qui pourront compléter l'analyse morpho-métrique en particulier.

III.5.1. Caractéristique de forme

III.5.1.1. Indice de compacité de Gravelius (Kc)

L'indice de compacité traduit la forme du bassin versant ainsi qu'une influence sur l'écoulement, Le coefficient de compacité de Gravelius est le rapport entre le périmètre (P) du bassin et la circonférence du cercle ayant la même superficie que le bassin (S).

Il indique qu'un bassin est allongé ou de forme ramassée, la valeur de l'indice de compacité indique un allongement ou le ramassage du bassin versant s'il proche de "1" le bassin aura une

forme ramassée ce qui implique un temps de concentration court et plus il est loin de "1" le bassin aura une forme allongée. Il est donné par la relation suivante :

$$Kc = 0.28 \frac{P}{\sqrt{S}} \quad (\text{III.1})$$

Où :

Kc : Coefficient de compacité de Gravelius ;

P : Périmètre du bassin versant ;

S : Surface du bassin versant;

III.5.1.2. Le rectangle équivalent

Le rectangle équivalent de M. Roche est définie comme étant le rectangle de longueur (L) et de largeur (l) qui à la même surface (S), même périmètre (P) , même indice de compacité (Kc).

Ce paramètre facilite la comparaison entre les bassins versants du point de vue de leur influence sur l'écoulement.

Longueur (L) :

$$L = \frac{Kc\sqrt{S}}{1.12} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{Kc} \right)^2} \right] \quad (\text{III.2})$$

Largeur (l) :

$$l = \frac{Kc\sqrt{S}}{1.12} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{Kc} \right)^2} \right] \quad (\text{III.3})$$

Avec :

L : la longueur du rectangle (Km).

l : la largeur du rectangle (Km).

III.5.2. Caractéristiques hydrographiques

La disposition du réseau hydrographique est liée en grande partie à l'évolution des phénomènes structuraux qui ont affecté la région au cours des temps géologiques. Le chevelu hydrographique suit pratiquement les accidents importants qui ont affecté les formations carbonatées du Jurassique et se modifie avec l'évolution de la tectonique.

Les paramètres importants qui régissent le régime hydrologique d'un cours d'eau sont : la densité de drainage (Dd), le rapport de confluence (Rc) et le rapport des longueurs (Rl).

III.5.2.1. Rapport de confluence

Il est défini par :

$$R_c = N_i / N_{i+1} \quad (\text{III.4})$$

Le **R_c**, c'est le quotient de nombre de talwegs d'ordre i par celui des talwegs d'ordre supérieur (i+1)

R_c : rapport de confluence ;

N_n : nombre de cours d'eau d'ordre n ;

N_{n+1} : nombre de cours d'eau d'ordre n+1.

III.5.2.2. Rapport des longueurs

$$R_L = L_{n+1} / L_n \quad (\text{III.5})$$

L_n : longueur de cours d'eau d'ordre n ;

L_{N+1} : longueur de cours d'eau d'ordre n+1.

III.5.2.3. Densité de drainage

La densité de drainage permet l'identification du chevelu hydrographique d'un bassin versant. Elle est définie comme étant la somme des longueurs des talwegs drainant sur la surface du bassin versant

$$D_d = \sum L / S \quad (\text{III.6})$$

Où,

D_d : densité de drainage en km/km².

L : longueur cumulée de tous les talwegs du bassin en km.

S : surface du bassin en km².

III.5.2.4. Densité hydrographique

La densité hydrographique représente le nombre de canaux d'écoulement par unité de surface

$$F = \sum N / S \quad (\text{III.7})$$

F : densité hydrographique [km^{-2}] ;
 Ni : nombre de cours d'eau ;
 S : superficie du bassin [km^{-2}].

III.6. Les résultats

Les résultats obtenus après calcul des caractéristiques de forme et hydrographique sont tabulés dans les tableaux suivants

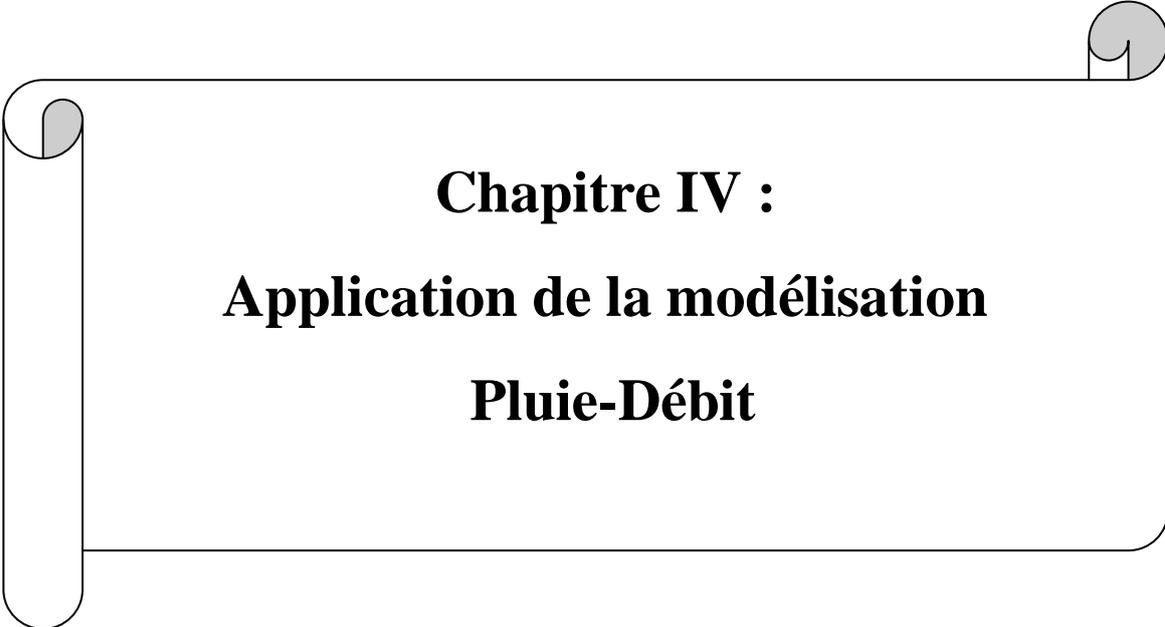
Tableau III.1 : Principaux caractéristiques du bassin versant El Kebir, Timgad et Zerdassas.

Caractéristiques morphologiques	Symbole	unité	Valeurs de chaque bassin		
			El Kebir	Timgad	Zerdassas
Surface	S	Km^2	1022	183	321
Périmètre	P	Km	184.2537	94.042	104.8472
Indice de compacité de Gravelius	Kc	/	1.61379662	1.94649971	1.63856001
Rectangle équivalent	Longueur	L	79.2272475	42.7392184	45.3444543
	Largeur	l	12.8996025	4.28178163	7.07914573
La longueur principale du cours d'eau	Lce	Km	1648.8009	227.0995	447.0621
Densité de drainage	Dd	Km/Km^2	1.61330812	1.24098087	1.39271682
Rapport de confluence	R _N	/	1.625	/	1.5
	R _L		2.9870039	/	1.47893393
Densité hydrographique	F	Km^{-2}	0.01663405	/	0.01557632

D'après les trois tableaux précédents, et sur le plan morphologique, la valeur élevée de l'indice de compacité ($\mathbf{Kc} > \mathbf{1}$) traduit la forme allongée des trois bassins versants étudiés.

III.7. Conclusion

Dans cette partie, nous avons défini les données nécessaires concernant nos zones d'études du point de vue climatique, géologie, ainsi que la situation hydrographique. Ces données nous serviront pour entamer notre étude de modélisation de pluie-débit dans le chapitre suivant.



Chapitre IV :
Application de la modélisation
Pluie-Débit

IV.1. Introduction

La simulation hydrologique du bassin versant, est décrite comme la transformation de la pluie en débit, qui passe par l'utilisation des modèles hydrologiques. Cependant, en ce qui concerne le processus physique pluie-débit, il est divisé en deux parties, l'une statique appelée "production", elle donne la pluie nette, et l'autre dynamique appelée "transfert" qui répartit temporellement la pluie nette en débits.

Ce processus demande une séparation des écoulements de base, qui peut facilement être automatisée, il est recommandé pour fournir des résultats reproductibles par Le filtrage numérique récursif des hydrogrammes. L'eau est routée par un hydrogramme unitaire, celui-ci se trouve être la réponse produite par une lame d'eau unitaire qui est uniformément répartie dans l'espace-temps du bassin versant.

IV.2. La séparation des écoulements

Les dynamiques qui régissent la transformation des pluies en ruissellement couvrent souvent un large spectre d'échelles de temps de réponse. D'une part, il existe des composants de ruissellement rapide qui répond en quelques minutes ou quelques heures, et d'autre part, il existe des composants de débit de base qui prennent des jours ou des semaines pour répondre. L'approche adoptée pour résoudre ce problème consistait à séparer le débit du cours d'eau en composantes à réponse rapide et lente, qui ont ensuite été modélisées séparément (Lyne & Hollick, 1979). Le but de la séparation était de permettre l'utilisation de données agrégées afin que la dynamique de réponse à débit lent puisse être mieux identifiée.

De nombreuses méthodes analytiques ont été développées pour séparer le débit de base du débit total (McCuen, 1989). Bien que la plupart des procédures soient basées sur un raisonnement physique, des éléments de toutes les techniques de séparation sont subjectifs.(Arnold & Allen, 1999)

IV.2.1. La méthode du filtre digital

Lyne et Hollick (1979) ont proposé un filtre numérique récursif, qui est une méthode rapide et objective de séparation continue du flux de base. Le filtre à un paramètre doit être appliqué de manière récursive algorithmique, qui équilibre le nombre de passages par le filtre avec la valeur du paramètre de filtre.

Cette procédure a connu une certaine popularité en Australie, et il n'a été noté que récemment, que l'algorithme ne satisfait pas à la condition limite à la cessation du ruissellement direct .(Nathan & McMahan, 1990)

L'équation du filtre est écrite comme suit :

$$q_t = a_f \times q_{t-1} + \frac{1+a_f}{2} (Q_t - Q_{t-1}) \quad (\text{IV.1})$$

Sous réserve de la condition

$$qb = Q_t - q_t \quad (\text{IV.2})$$

Où : a_f est le paramètre de filtre, qui est soumis à un étalonnage afin pour fournir un filtrage hydrographique fiable, il qui dépend des conditions géologiques du bassin versant.

Le filtre peut être passé sur les données du débit trois fois (avant, arrière et avant) en fonction des estimations de débit de base sélectionnées par l'utilisateur à partir des études sur les données de débit. En général, chaque passe entraînera un débit de base inférieur en pourcentage de débit total

Un certain nombre d'auteurs ont utilisé ce filtre avec différentes procédures opératoires, Arnold et al. [1995] et Nathan et Mc-Mahon [1990] ont utilisé trois passes du filtre et des paramètres de filtre de 0,925 et 0,90-0,95, respectivement. Mau et Winter [1997] ont obtenu leurs meilleurs résultats avec plusieurs passes et un paramètre de filtre de 0,85. Chapman [1987] a défini le paramètre de filtre à la plage supérieure de la constante de récession variant dans le temps pour un bassin et a utilisé deux passes de filtre. Tous ces auteurs ont en commun la pratique d'inverser l'ordre temporel des séries temporelles d'écoulement pour chaque passage successif du filtre afin de lutter contre le déphasage créé par le filtre. (Spongberg, 2000)

Dans le travail présent, nous avons pris la valeur du filtre digital variable, qui varie entre 0.99 et 0.997.

IV.3. La fonction de production:

La fonction de production est essentiellement basée sur le bilan hydrique appliqué à une représentation schématisée du sol, c'est à dire, des différents niveaux de stockage. Pour celle-ci, on a généralement recours à une analogie avec une succession de un ou plusieurs réservoirs qui permettent de gérer l'espace souterrain. (Chkir, 1994) On voit donc que le concept de la fonction de production est une représentation très grossière de la réalité. Mais il s'agit d'une simplification qui permet de mieux appréhender les processus hydrologiques, et donc de mieux les modéliser. Sur une parcelle, toute l'eau qui s'infiltré est considérée comme perdue pour le ruissellement et toute l'eau qui ruisselle est supposée contribuer à la formation des crues.

La fonction de production est limitée à une unité d'espace (bassin, sous-bassin ou carré de maillage). Elle ne fait pas intervenir le temps qui sépare la pluie de l'apparition de la crue. La fonction de transfert permet de remédier à cet inconvénient. (Chkir, 1994)

IV.3.1. Modélisation de l'infiltration à l'échelle du bassin versant

Pour simuler le processus d'infiltration à l'échelle d'un bassin versant, la majorité des applications hydrologiques se basent sur des modèles simplifiés. Ces modèles sont principalement des modèles conceptuels à réservoirs, globaux ou distribués. (Musy 1998)

IV.3.1.1. Modèle SCS-CN:

La méthode SCS-CN (Soil Conservation Service Curve Number) a été élaborée en 1954 et est documentée à la section 4 du National Engineering Handbook (NEH-4) publié par le Service de conservation des sols (maintenant appelé Service de conservation des ressources naturelles), U.S. Département de l'Agriculture, 1956.

La méthode SCS-CN est le résultat d'enquêtes exhaustives menées sur le terrain à la fin des années 1930 et au début des années 1940 et des travaux de plusieurs premiers enquêteurs, dont Mockus (1949), Sherman (1949), Andrews (1954) et Ogrosky (1956).

C'est l'une des méthodes les plus populaires pour calculer le volume du ruissellement de surface pour un événement pluviométrique donné à partir de petits bassins hydrographiques agricoles, forestiers et urbains. La principale raison de sa grande applicabilité et de son acceptabilité réside dans le fait qu'elle tient compte de la plupart des caractéristiques du bassin hydrographique produisant du ruissellement : type de sol, utilisation/traitement des terres, état de surface et état de l'humidité.

L'hypothèse du SCS consiste à admettre que la somme des courbes représentant les précipitations cumulées et celle représentant l'infiltration cumulative est constante. Les deux courbes sont donc symétriques par rapport à un axe parallèle à l'axe des abscisses passant par le point d'intersection sur la partie de droite de la figure ci-dessus:

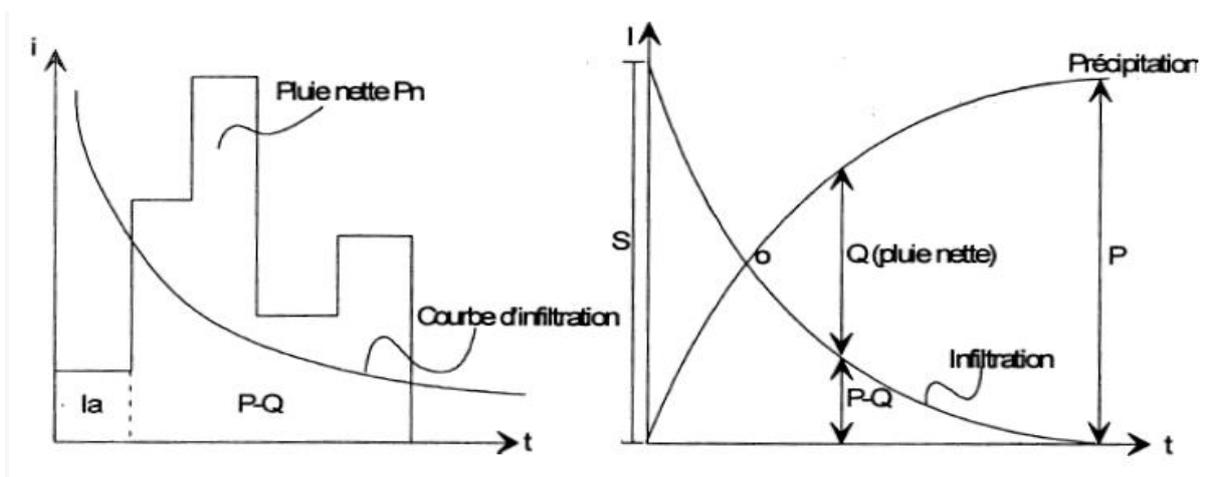


Figure IV.1: Méthode du SCS. (Musy, 1998)

La méthode SCS-CN est basée sur l'équation du bilan hydrique et deux hypothèses fondamentales qui peuvent être exprimées, respectivement, comme suit :

$$P = Ia + F + R \quad (IV.3)$$

$$\frac{R}{P - Ia} = \frac{F}{S} \quad (IV.4)$$

$$Ia = \lambda S \quad (IV.5)$$

Où :

P : est la précipitation totale ;

Ia : le prélèvement initial dépend du CN et λ ;

F : l'infiltration cumulative ;

R : le ruissellement direct ;

S : la rétention maximale potentielle ;

λ : le coefficient de prélèvement initial, de nombreuses études ont supposé que est constant et égale à 0.2, ce qui réduit effectivement le nombre de paramètre à un, simplifiant ainsi l'étalonnage (Ponce & Hawkins, 1996). cependant, λ pourrait être interprété comme un paramètre régional qui peut varier de 0 à 1, pour améliorer la réactivité de la méthode à une diversité de contextes géologiques et climatiques. (Mishra et al., 2003)(Ponce & Hawkins, 1996)

La combinaison des équations (IV.3) et (IV.4) conduit à la forme populaire de la méthode SCS-CN existante.

$$R = \frac{(P - Ia)^2}{P + S - Ia} \quad (IV.6)$$

Le paramètre S (mm) de l'équation (précédente) est exprimé comme suit :

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (IV.7)$$

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

IV.3.1.1.1. Le Curve Number

Le Soil conservation service a établi des relations entre les valeurs du Curve Number. Le CN dépend de type de sol et de l'occupation du sol, Les sols sont divisé en quatre groupes hydrologiques (GHS) A, B, C et D pour les différents modes d'occupation de sol (urbain, agricole...etc.). Le tableau (IV.1) donne quelques exemples pour des conditions normales d'humidité (CN2) et pour des pertes initiales $Ia=0.2*S$

Tableau IV.1: CN pour des conditions normales d'humidité du sol.(Chow et al., 1988)

Occupation du sol	classes de sols			
	A	B	C	D
Sols cultivés bien entretenus	72	81	88	91
Sols cultivés mal entretenus	62	71	78	81
Pâturage dans de bonnes conditions	68	79	86	89
Pâturage dans de mauvaises conditions	39	61	74	80
Prés	30	58	71	78
Forets à faible taux de couverture	30	58	71	78
Forets à taux de couverture élevé	25	55	70	77
Place de jeux, parcs, golf, cimetières ; -plus 75% de la surface est enherbée	39	61	74	80
-50-75% de la surface est enherbée	49	69	79	84
Zones commerciales (85% de surface imperméables)	89	92	94	95
Zones industrielles (72% de surface imperméables)	81	88	91	92
Zones résidentielles :				
Taux de surface imperméables :	77	85	90	91
65%	61	75	83	87
38%	57	72	81	86
30%	54	70	80	85
25%	51	68	79	84
20%				
Parkings, toits etc...	98	98	98	98
Routes et chemins : Revêtement bitumineux	98	98	98	98
Revêtement gravelé	76	85	89	91
Revêtement en mauvais état	71	82	87	89

Le SCS-CN a tabulé les valeurs du CN pour différentes configurations des conditions antécédentes d'humidité dont les conditions sèches, normales et humides.

Les Condition d'humidité antérieure (AMC) est habituellement considère comme le facteur le plus important dans le calcul du ruissèlement, et ces facteurs sont classés en trois niveaux ; AMC I (conditions sèches), AMC II (conditions normales ou moyennes) et AMC III (conditions humides) et dépendant de cinq jours de précipitations antérieurs (SCS, 1972). Une valeur médiane de CN (CN₂) est attribuée à AMC II; pour tout changement d'AMC, CN₂ est converti en CN₁ pour AMC I ou en CN₃ pour AMC III; des formules analytiques ont été élaborées pour exprimer la conversion de CN. (Chow et al., 1988)

$$CN_1 = \frac{CN_2}{2.2754 - 0.012754CN_2} \tag{IV.8}$$

$$CN_3 = \frac{CN_2}{0.430 + 0.0057CN_2} \tag{IV.9}$$

Tableau IV.2 : Classification des classes d'humidité antécédentes (AMC) pour la méthode SCS des prélèvements pluviométriques

Précipitations antérieure totales sur 5 jours (P5 en mm)		
Niveau AMC	Saison dormante	Saison de croissance
I	P5 < 12.7	P5 < 35.6
II	12.7 ≤ P5 ≤ 27.9	35.6 ≤ P5 ≤ 53.3
III	P5 > 27.9	P5 > 53.3

IV.2.1.1.2. Avantages et limites de la méthode SCS-CN

La méthode SCS-CN présente plusieurs avantages par rapport à d'autres méthodes.

Mockus (1964) a noté plusieurs problèmes liés à la méthode SCS-CN, Par exemple ; elle ne contient pas une expression pour le temps et ne tient pas compte de l'impact de l'intensité des précipitations et de sa répartition temporelle. Comme l'indiqué Cowan (1957), le temps n'a pas été incorporé dans la méthode parce que :

- l'indisponibilité des données suffisamment fiables pour décrire les taux d'infiltration pour une large gamme de complexes Sol végétations occupation des sols (SVL : Soil végétation land use)
- il n'existe pas une méthode fiable pour déterminer la distribution temporelle des précipitations.

Rallison et Miller (1982) décrivent plusieurs limitations, par exemple, la disponibilité de données fiables de la variation des conditions géographiques et environnementales. Ponce et Hawkins (1996) considèrent que la méthode SCS-CN n'a pas encore été établie pour sa crédibilité et l'acceptation comme une méthodologie développée par une agence, la SCS-CN a été écartée par les revues rigoureuses. Les informations fournies dans NEH-4 (National Engineering Handbook-4) sont insuffisantes (Rallison & Cronshey, 1979). Puisque la méthode a été initialement développée pour les sites agricoles, elle est plus performante sur ces bassins versants, équitablement sur les sites d'agriculture, mais son application pour des sites forestiers est médiocre. (Hawkins, 1993)

IV.3.1.2. Modèle MISHRA-SINGH (MMS)

Mishra et Singh (2002b) ont modifié le SCS-CN original équation en incorporant l'humidité antérieure paramètre de la quantité plutôt que l'AMC. En effet, les trois niveaux AMC produisent une relation discrète entre l'eau du CN et du sol, ce qui entraîne sauts dans le ruissellement calculé. Le ruissellement est calculé utilisant l'équation (suivante). Mishra, Sahu, Eldho, et Jain (2006) a aussi modifié la relation « Ia-S » en soulignant la forte dépendance de l'abstraction initiale Ia sur l'humidité antérieure du sol M comme indiqué dans l'équation :

$$R = \frac{(P - Ia)(P - Ia + M)}{P + S - Ia + M} \quad (IV.10)$$

$$Ia = \frac{\lambda S^2}{S + M} \quad (IV.11)$$

Où

M : est l'humidité antérieure, dans les modèles modifiés de Mishra-Singh (MMS), divers sous-modèles établissant un lien entre l'humidité antérieure (M) et les précipitations antérieures peuvent être utilisés.

Selon certaines études (Benkhaled et al., 2004); Mishra et Singh (2003); Zhang, Wang, Jiang et Zhu (2017), l'effet des précipitations antérieures peut varier par rapport aux 5 à 30 jours précédents. Cependant, la durée la plus couramment utilisée est de 5 jours.

En effet, (Mishra et al., 2006) ont utilisé les précipitations antérieures de 5 jours (P5) pour l'estimation de l'humidité antérieure. De plus, ces auteurs ont proposé trois modèles M1, M2

et M3 pour exprimer l'humidité antérieure. Ainsi que, Abdi et Meddi (2021) ont proposé une équation empirique modifiée (M4) afin d'améliorer l'optimisation de la relation S-M.(Abdi & Meddi, 2021)

IV.3.2. Modélisation de l'infiltration à l'échelle du la parcelle :

A l'échelle d'une parcelle et lorsque l'infiltration peut être considérée comme essentiellement verticale, le flux d'infiltration en sol non saturé peut être décrit et modélisé, avec diverses hypothèses simplificatrices, par l'équation unidimensionnelle aux dérivées partielles proposée par Richards. Ce modèle est rarement utilisé pour des applications hydrologiques typiques.

Les hydrologues utilisent majoritairement des modèles d'infiltration simplifiés. Ce sont des modèles conceptuels à réservoir ou des modèles se basent sur des fonctions décroissantes de la capacité d'infiltration.(Musy et al., 2009b)

IV.3.2.1.Modèle de Horton

L'une des premières équations d'infiltration a été développée par Horton (1933, 1939),le modèle de Horton est un modèle empirique à 3 paramètres. Horton,(1993) a observé que l'infiltration commence à un certain taux(f_0) et diminue de façon exponentielle jusqu'à ce qu'il atteigne un taux(f_c) constant(Chow et al., 1988),comme illustre la figure (IV.2).Avec une capacité d'infiltration du sol $f(t)$ qui est l'intensité maximale de pluie qu'il peut absorber,

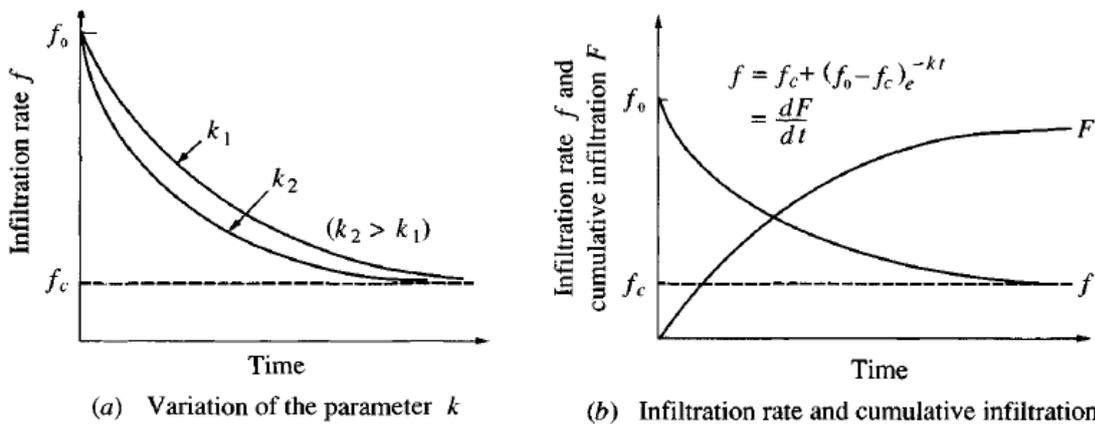


Figure IV.2 : Infiltration par l'équation de Horton.(Musy et al., 2009)

Horton a montré que la capacité d'infiltration normale d'un sol pouvait être représentée par une équation de la forme :

$$f(t) = f_c + (f_0 - f_c).e^{-ct} \tag{IV.12}$$

Avec ;

$F(t)$: Capacité d'infiltration au temps t [mm/h];

f_0, f_c : Capacité d'infiltration respectivement initiale et finale, dépendant surtout du type de sol [mm/h];

t : Temps écoulé depuis le début de l'averse [h];

c : Constante empirique, fonction de la nature du sol [min^{-1}].

Lorsque l'intensité de la pluie est inférieure à la capacité normale d'infiltration, le sol absorbe toute l'eau apportée par la pluie et le taux effectif d'infiltration est inférieur à la capacité normale d'infiltration.

Les valeurs de la capacité d'infiltration du sol varient beaucoup d'un sol à l'autre en fonction :

- De la porosité du sol
- De sa teneur initiale en eau
- De l'intensité et de la taille des gouttes de pluie
- De la végétation
- De la saison (température, travail des micros organismes)

Le tableau suivant précise quelques valeurs des paramètres des formules de Horton pour différents types de sol. (Musy et al., 2009b)

Tableau IV.3: Valeurs indicatives des paramètres de l'équation de Horton pour différents types de sol (D'après Horton, 1940 cité dans ASCE, 1996). (Musy et al., 2009b)

Type de sol	f_0 [mm/h]	f_c [mm/h]	C [min^{-1}]
Standard nu	280	6-220	1.6
Agricole avec tourbe	900	20-290	0.8
Tourbe	325	2-20	1.8
Sable fin nu	210	2-25	2.0
Argile avec tourbe	670	10-30	1.4

Ceci fait pressentir les difficultés que l'on rencontre pour estimer le taux d'infiltration moyen sur un bassin versant complexe.

L'équation de Horton (1993), peut présenter le grand défaut de contenir des paramètres dont les valeurs usuelles sont très grandes devant les intensités de pluie. De fait, la capacité d'infiltration est une fonction du temps, qui va décroître même si les intensités de pluies sont très faibles. Ceci a pour conséquence de sous estimer les capacités d'infiltration du sol.

IV.3.2.2. Le modèle de Philip :

En 1957, Philip a obtenu une solution analytique de l'équation de Richards en supposant un delta changement de fonction de la diffusivité du sol à travers le front de mouillage.

Son infiltration largement utilisée l'équation a la forme :

$$f(t) = \frac{1}{2} S \times t^{-0.5} + A \quad (\text{IV.13})$$

Où :

S : est appelé la « sorptivité » du sol est calculé à partir de la connaissance du sol, caractéristique d'humidité du sol. La sorptivité dépend des conditions initiales et des conditions aux limites du système. (Musy et al., 2009b) (Roche et al., 2012)

Les effets du terme de sorptivité diminué progressivement avec le temps, laissant finalement la capacité d'infiltration finale comme une fonction de la conductivité hydraulique saturée effective du sol.

A : est une capacité d'infiltration finale équivalente à la f_c de l'équation de Horton ou K_s de l'équation de Green-Ampt. (Beven, 2011)

Les valeurs indicatives de ces paramètres pour différents types de classes texturale sont présenté dans le tableau (IV.4).

Tableau IV.4 : Les valeurs indicatives de ces paramètres pour différents types de classes texturale (d'après Hillel, 1982). (Musy et al., 2009b)

Classe texturales	Sorptivité 'S' [cm.s ^{-1/2}]	A [cm.s ⁻¹]
Sable grossier	1.7 10 ⁻¹	1.3 10 ⁻³
Sable fin	7.3 10 ⁻²	3.5 10 ⁻⁴
Limon sableux	6.5 10 ⁻²	2.1 10 ⁻⁴
Silt sableux	4.9 10 ⁻²	6.2 10 ⁻⁵
Limon	4.0 10 ⁻²	4.6 10 ⁻⁵
Limon sablo-argileux	6.5 10 ⁻²	1.9 10 ⁻⁴
Limon silto-argileux	2.1 10 ⁻²	1.4 10 ⁻⁵
Limon argileux	1.6 10 ⁻²	8.8 10 ⁻⁶
Argile légère	3.6 10 ⁻²	3.4 10 ⁻⁵
Argile limoneuse	1.4 10 ⁻²	9.8 10 ⁻⁶
Argile lourde	6.5 10 ⁻³	1.7 10 ⁻⁶
Tourbe	2.5 10 ⁻²	2.2 10 ⁻⁶

IV.4. Fonction du Transfert :

La transformation des écoulements souterrains, subsuperficiels et de surface produits par les différentes parties du bassin versant, en un hydrogramme à l'exutoire du bassin fait appel à ce qui est couramment dénommé la fonction du transfert. Cette fonction a pendant longtemps fait référence à la seule transformation de la pluie nette en un hydrogramme de ruissellement direct. Avec la nécessité de simuler le comportement hydrologique d'un bassin versant en continu pendant les périodes de crue et d'étiage. La notion de cette fonction s'est étendue à l'ensemble des composantes du débit observé en une station donnée du réseau hydrographique.

Pour cela, la fonction de transfert pour ces différentes composantes nécessite l'utilisation de modèles appropriés pour chaque composante d'écoulement ou au moins les composantes principales.

IV.4.1. L'Hydrogramme Unitaire :

Comme était défini par Sherman en 1932, l'hydrogramme unitaire d'un bassin versant est l'hydrogramme de ruissellement direct résultant d'une pluie nette, uniforme et constante, d'une durée de référence, suffisamment longue pour générer un écoulement sur l'ensemble du bassin (Mokhtari, 2016). En d'autres termes, l'HU d'un bassin versant pour une durée de référence (τ) est la réponse unitaire $u_{\tau}(t)$ du bassin versant vis-vis de la transformation pluie nette-débits. (Musy et al., 2009b)

La figure ci-dessous illustre la notion de l'hydrogramme unitaire et ses caractéristiques.

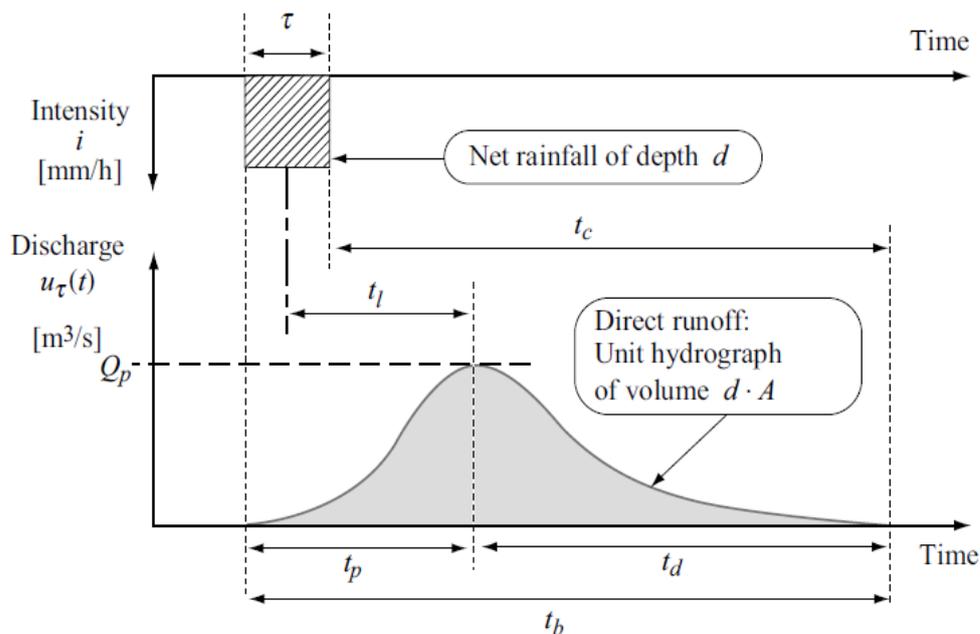


Figure IV.3 : Les différentes caractéristiques de l'Hydrogramme Unitaire. (Musy et al., 2009b) (Les temps caractéristiques sont définis de la même façon que les temps caractéristiques définis dans le chapitre I).

Lors de l'utilisation de l'Hydrogramme Unitaire comme fonction de transfert, il faut valider ses hypothèses qui lui sont associées sur le bassin versant d'étude, ou au moins de les prendre en considération lors de l'analyse des résultats. Ces hypothèses sont :

- La pluie nette est uniforme sur le bassin et constante dans le temps ;
- Les caractéristiques de l'HU sont invariantes dans le temps: la durée de l'hydrogramme de ruissellement direct (temps de base t_b) est constante et indépendante de l'intensité de la pluie ;
- La réponse du bassin aux pluies est linéaire: pour une même durée de référence, les ordonnées de l'HU sont proportionnelles au volume de la pluie nette;
- L'HU reflète l'ensemble des caractéristiques physiques du bassin versant.(Musy et al., 2009b)

IV.4.2. Le Modèle de NASH :

En 1957, Nash a proposé un modèle conceptuel basé sur L'hypothèse que le bassin versant est une succession de N réservoirs linéaires identiques connectés en série. L'Hydrogramme unitaire instantané du modèle de Nash est obtenu en résolvant successivement le réservoir linéaire l'équation pour chacun des réservoirs :

$$u(t) = \frac{1}{K\Gamma(N)} \left(\frac{t}{K}\right)^{(N-1)} \exp\left[-\left(\frac{t}{K}\right)\right] \quad (\text{IV.14})$$

Où $u(t)$ est l'hydrogramme unitaire instantané du bassin versant simulé, N est le nombre de réservoirs en série, K le coefficient de stockage, t est le temps et Γ est la fonction gamma.

Le modèle Nash a que deux paramètres, N et K , mais peut s'adapter à une grande variété de formes d'hydrogramme. (Musy et al., 2009b)

IV.4.3.Le Modèle du Weibull :

Le modèle de tendance temporelle dans les données hydrologiques distribuées par Weibull soit la motivation des études , la même approche peut être appliquée dans l'analyse de séquences de données qui peuvent être considérées comme stationnaires dans le temps, pour lesquelles l'objectif est d'explorer les relations entre une Variante de Weibull et autres variables qui expliquent son comportement.

Une analyse régionale de la fréquence des crues basée sur une hypothèse de crue d'indice et une distribution de Weibull à deux paramètres a été étudiée et des expériences de simulation ont été réalisées.

La formule de weibull est la suivante :

$$u(t) = \frac{Bt^{b-1}}{W^B} \exp \left[- \left(\frac{t}{W} \right)^B \right] \quad (IV.15)$$

Où B et W sont des paramètres de distribution de Weibull qui, peut-être calibré.

IV.5. Les critères de performances

Les objectifs principaux de la procédure de calage des modèles vont être de:

- Reconstituer correctement la forme générale de l'hydrogramme observé ;
- Arriver à un bon accord entre les débits de pointe calculés et observés ;
- Obtenir un bilan convenable sur les volumes.

Afin de quantifier le degré d'accomplissement de ces différents objectifs, des critères de performance sont utilisés.(Mokhtari, 2016)

➤ **MAE** (The mean absolute error)

L'écart moyen absolu est la moyenne des écarts en valeur absolue entre les données des deux séries prises deux à deux. Les valeurs MAE représentent des erreurs et leurs valeurs plus petites indiquent des erreurs plus faibles dans la modélisation.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \|Q_{iobs} - Q_{ical}\| \quad (IV.16)$$

➤ **MARE** (The mean absolute relative error)

Le MARE calcule l'erreur en pourcentage de la valeur mesurée. La valeur optimale de MARE est 0, avec des valeurs de faible amplitude indiquant de meilleures performances du modèle.

Le MARE donne non seulement l'indice de performance moyen en termes de prédiction des débits mais aussi la répartition des erreurs de prédiction.

$$MARE = \frac{1}{N_{ev}} \sum_{i=1}^{N_{ev}} \left(\frac{|R_{obs} - R_{sim}|}{R_{obs}} \right)_i \quad (IV.17)$$

➤ **PBIAS** (Pourcentage Bias)

Le pourcentage de biais (PBIAS) est un paramètre de calage et des indicateurs de performance. La formulation du Pbias est comme suite :

$$PBIAS = 100 \times \left(\frac{R_{obs} - R_{sim}}{R_{obs}} \right) \quad (IV.18)$$

➤ **NSE** (Nash et Sutcliffe efficiency)

Il indique le pourcentage de la variance observée qui est expliquée par les données prédites. Il met davantage l'accent sur les événements extrêmes que sur les débits moyens. Le NSE varie entre $-\infty$ et 1, 1 étant la valeur optimale. Les valeurs comprises entre 0 et 1 sont prises en compte acceptable, alors que moins de 0 est une performance inacceptable

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{iobs} - Q_{ical})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{iobs} - \overline{Q_{obs}})^2} \quad (IV.19)$$

➤ **PPEAK** (The mean relative peak flow error')

L'erreur relative moyenne de débit de pointe (PPEAK) est utilisée pour exprimer la différence entre le débit de pointe observé et le débit de pointe simulé à l'échelle de l'événement sa formule est :

$$PPEAK = 100 \times \left(\frac{Q_{obs}^{peak} - Q_{obs}^{peak}}{Q_{obs}^{peak}} \right) \quad (IV.20)$$

Dans ce travail, on a utilisés MAE, MARE et PBIAS pour les modèles de production et la moyenne PPEAK et 1-NSE pour les modèles de transfert.

IV.6. L'optimisation automatique

L'optimisation sert à rechercher sans intervention de l'utilisateur le jeu de paramètres optimal donnant à la fonction objective sa valeur la meilleure possible. La fonction d'optimisation s'arrête une fois l'une de ces conditions est remplie :

- La valeur de la fonction objective est nulle ;
- Le nombre d'itérations est atteint et ceci quelque soit la valeur de la fonction objective ;
- La valeur de variation de la fonction objective est en inférieure à la tolérance.

IV.6.1. Les algorithmes génétiques

Les Algorithmes génétiques est un programme d'optimisation développé et ensuite appliqué à la résolution d'une série de problèmes d'optimisation pour lesquels les variables de design peuvent appartenir soit à un domaine discret soit à un domaine continu.

Le principe du mécanisme d'optimisation utilisant les AG repose sur les concepts suivants :

- Premièrement, une population initiale est créée en sélectionnant au hasard un certain nombre d'individus (chromosomes) dans l'intervalle de recherche ;
- deuxièmement, la valeur de la fonction objective pour chaque solution réalisable, ou individu, est défini comme la fitness du chromosome avec une meilleure fonction de remise en forme sont sélectionnés et un l'opérateur de croisement est appliqué suivi de l'application d'un opérateur de mutation ;
- enfin, une nouvelle population est générée, qui est plus efficace que la population initiale. Ces opérations sont répétées jusqu'à ce que la solution optimale soit obtenue.

Les méthodes d'optimisation évolutionnaires multi objectif sont considérées comme des outils appropriés pour la résolution des problèmes difficiles. La méthode d'optimisation détaille en outre l'implémentation d'un " Algorithme Génétique Multi Objectif " (AGMO) associé à des analyses de sensibilité pour l'optimisation de dispositifs. Le but est de fournir à l'ingénieur non seulement une ample variété de solutions, mais aussi la possibilité de mieux analyser son propre problème.

IV.6.2. Le front de Pareto

Le front de Pareto est un ensemble de solutions non dominées a été généré dans MATLAB à l'aide d'un algorithme hybride qui commence par un algorithme génétique multi-objectif (MOGA) et passe à une méthode d'atteinte totale de l'objectif une fois que la solution est proche du front optimal.

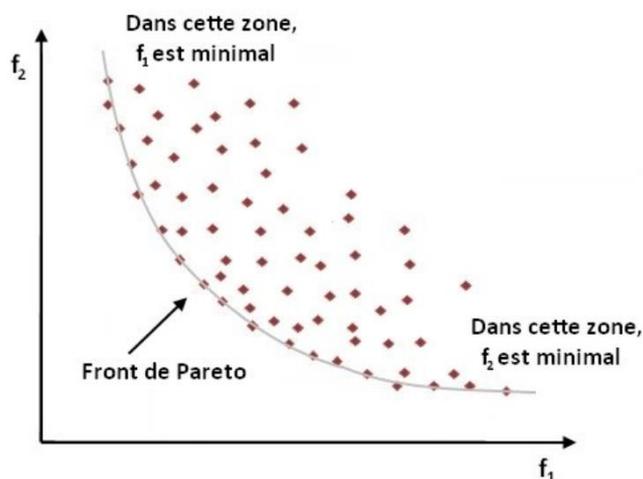


Figure IV.4 : Le front de Pareto. (<https://www.researchgate.net/Front-de-Pareto-dune-fonction-bi-objectifs>)

IV.7. Analyse et traitement des données

Les méthodes de calculs des débits se basent souvent sur les données disponibles dans les zones où l'on souhaite effectuer l'étude. Le passage par la collecte de données est le chemin le plus difficile pour chaque début d'études. Nous avons travaillé sur les séries des

Pluies et des débits chronologiques observés dans les trois bassins versant ; bassin versant El-Kebir (Mila), bassin versants de Zerdassas (Skikda) et le bassin versant de Timgad (Batna) pendant 31 ans (période de fonctionnement de 1969 à 2004). Tous les ensembles de données correspondants ont été dés agrégés à un pas de temps horaire. Au total, 46 événements ont été disponibles : 17 pour le bassin versant El Kebir, 12 pour le Timgad bassin versant et 17 pour le bassin versant de Zerdassas, ces données de base de cette étude sont recueillies d'après ANRH.

IV.7.1. Modélisation de la relation pluie-débit

Dans cette étude, Pour la phase de calage, nous avons utilisé des données d'entrée correspondant à 60 % de la série alors que pour la validation nous avons pris 40% de la série de données. Les donnés à l'entrée de chaque bassin sont :

- Les valeurs de pluies cumulées (mm) ;
- l'intensité maximale (mm) ;
- volume total en (mm³) ;
- la pluie antécédente de 5 jours (P5) en (mm) ;
- le débit cumulé en (mm/h).

La figure IV.5 représente la répartition des événements selon le calage et la validation de chaque bassin, (a, b, c) revient au bassin El-Kebir, (d, e, f) revient au bassin du Timgad et (i, j, k) de bassin Zerdassas.

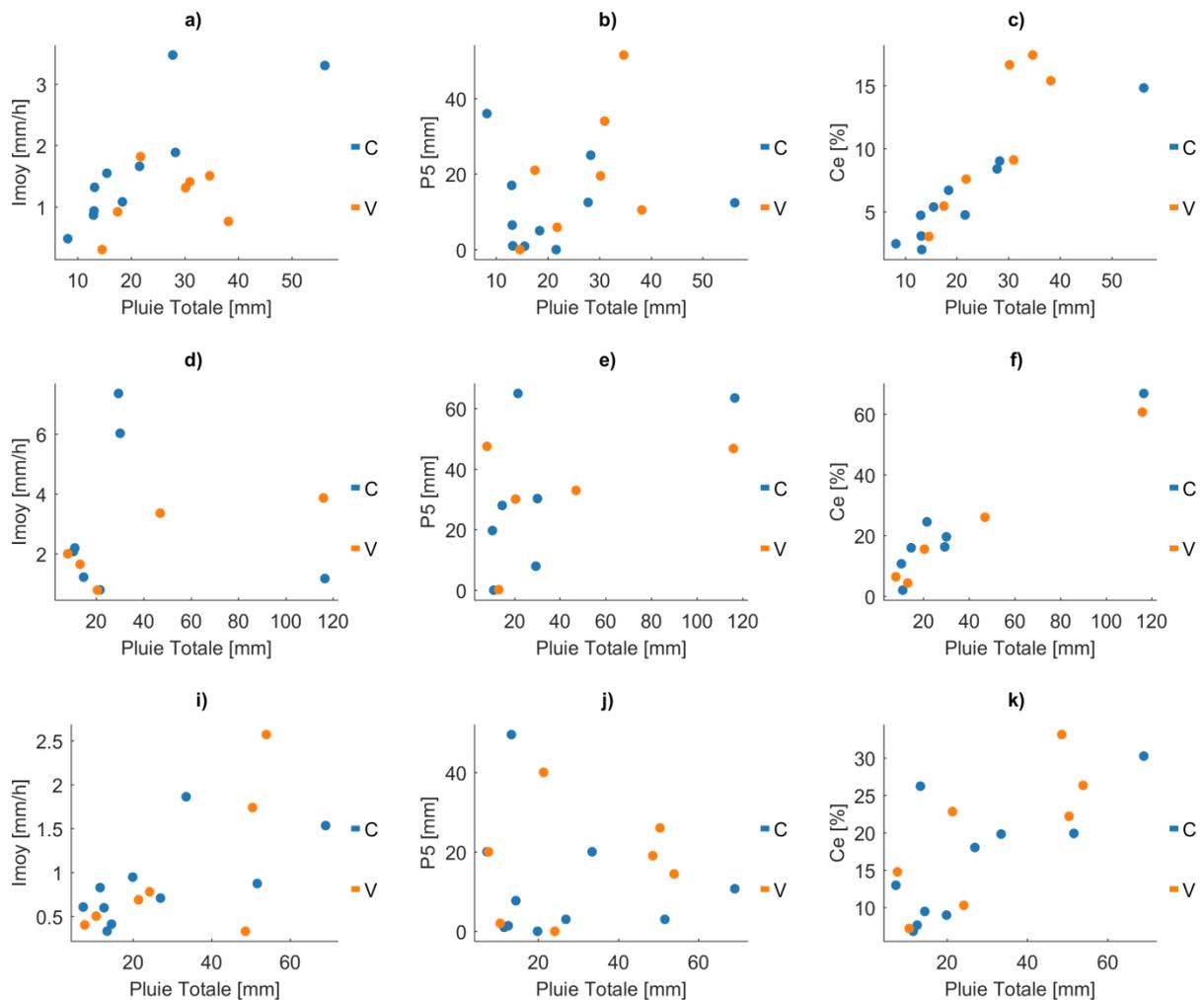


Figure IV.5: la répartition des événements selon le calage et la validation

IV.7.2. Application des modèles

IV.7.2.1. Fonction de production

Pour la fonction de production, on va appliquer le Modèle de SCS-CN, MMS et Horton et celle de Philip pour l'estimation du ruissellement observé et simulé, Les expressions analytiques de ces formules sont représentées au début du chapitre. Les paramètres optimaux des modèles utilisé sont été estimés par optimisation selon l'algorithme génétique multi-objectif (AGMO), ce qui a donné différents résultats pour les trois bassins versants, Cette procédure a abouti à des résultats, que l'on peut estimer satisfaisants.

IV.7.2.1.1. Les résultats

Les valeurs trouvées par les modèles d'infiltration utilisés, du ruissellement simulés ainsi que l'observés sont comparées est montré sur les figures suivantes.

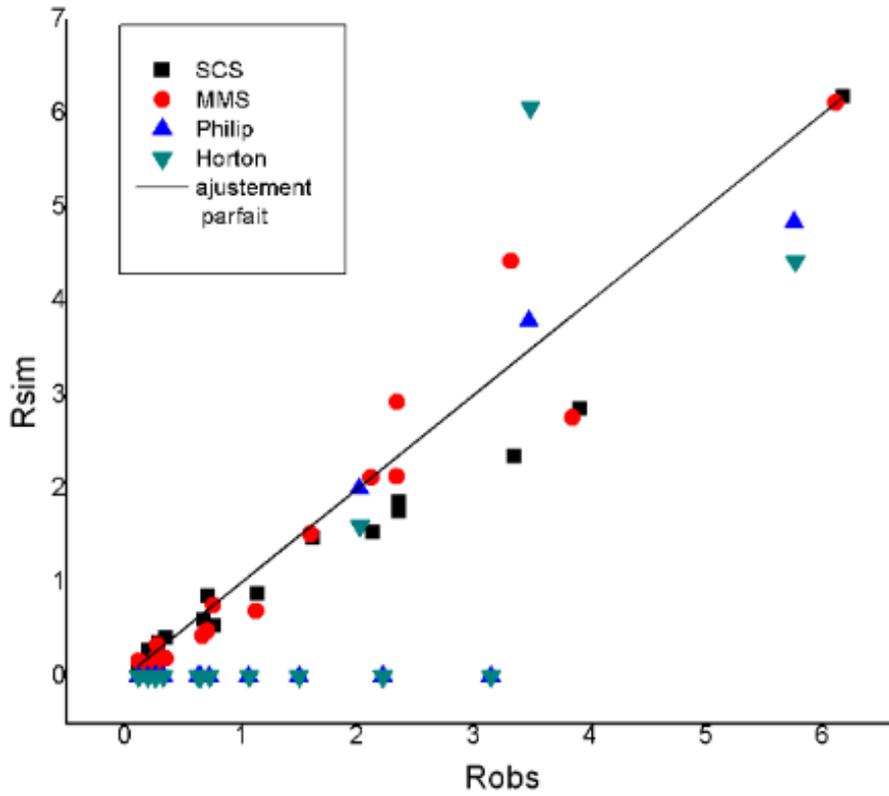


Figure IV.6 : la répartition des débits observés et les débits simulés pour les trois bassins

Selon les modèles de la fonction de production du Bassin El Kebir

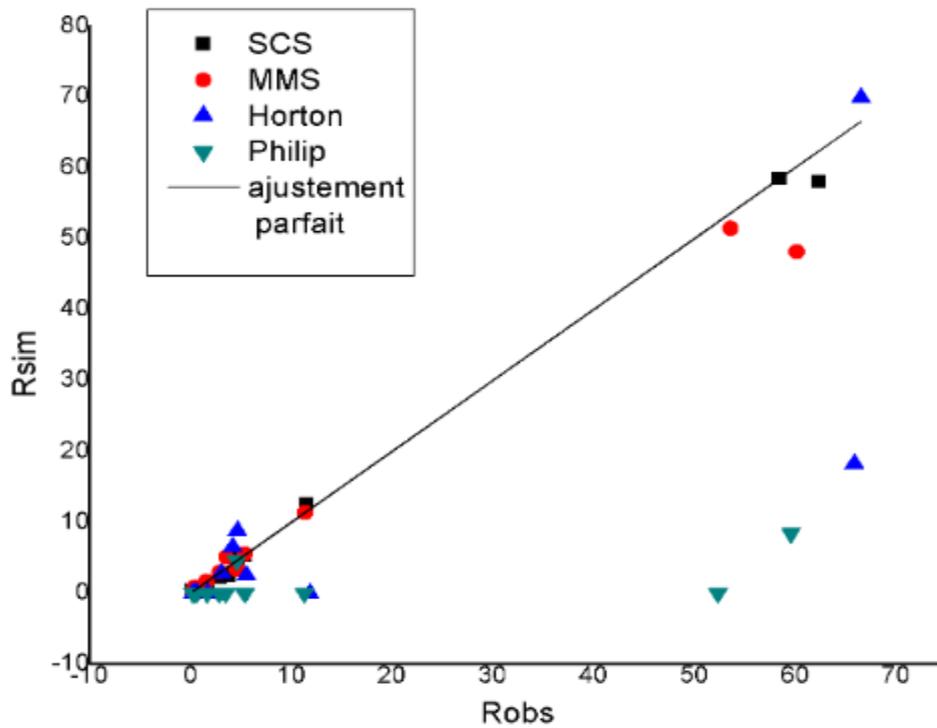


Figure IV.7 : la répartition des débits observés et les débits simulés pour les trois bassins

Selon les modèles de la fonction de production du Bassin de Timgad

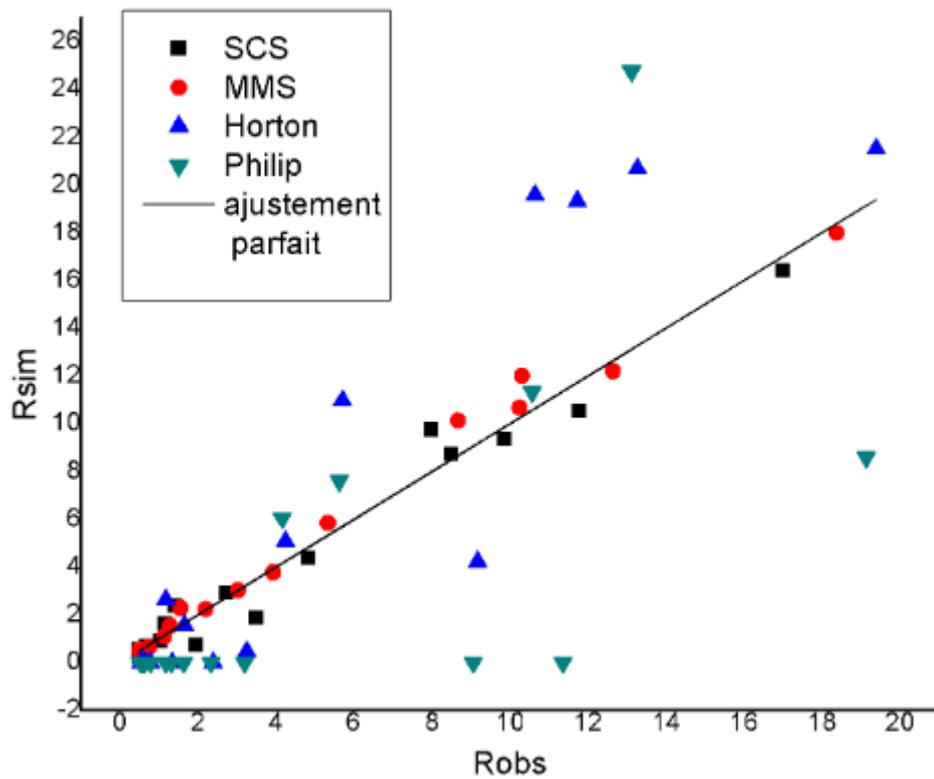


Figure IV.8 : la répartition des débits observés et les débits simulés pour les trois bassins
Selon les modèles de la fonction de production du Bassin de Zerdasas

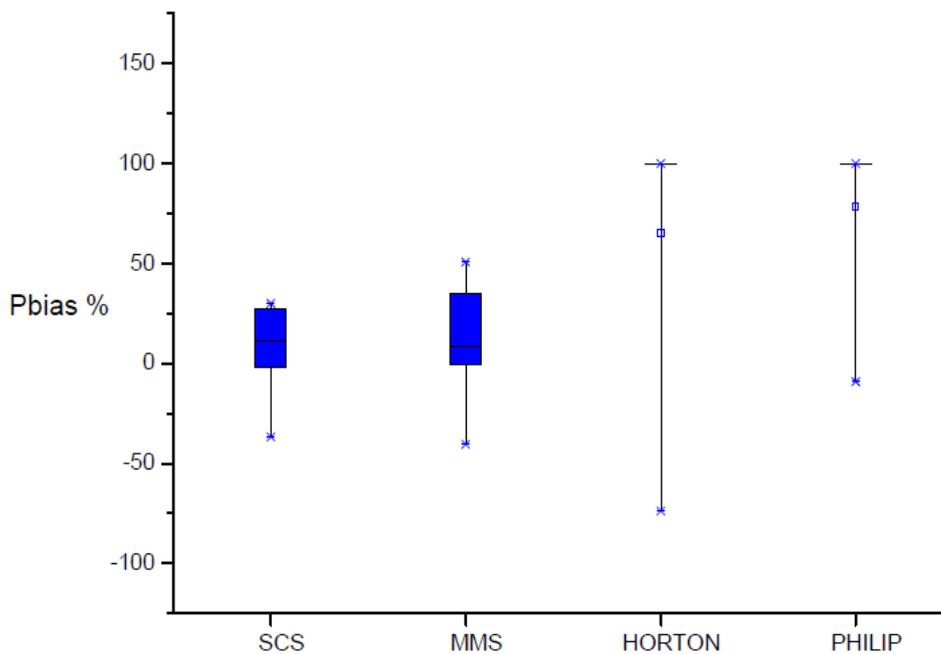


Figure IV.9 : les statistiques et la comparaison des modèles d'infiltration basées sur le pourcentage de biais (PBIAS) du Bassin El Kebir

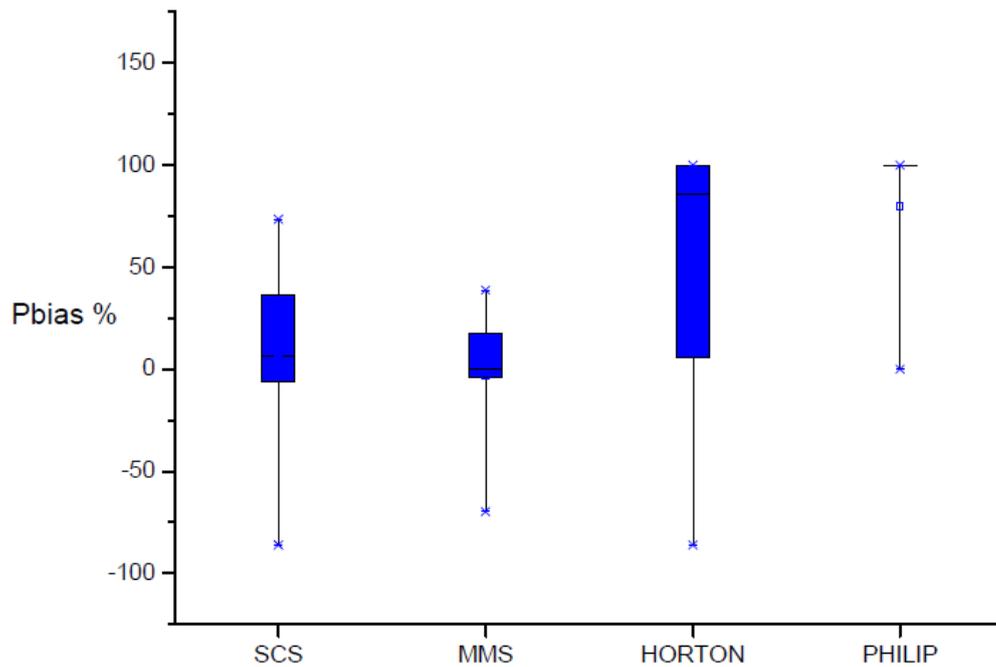


Figure IV.10 : les statistiques et la comparaison des modèles d'infiltration basées sur le pourcentage de biais (PBIAS) du Bassin de Timgad

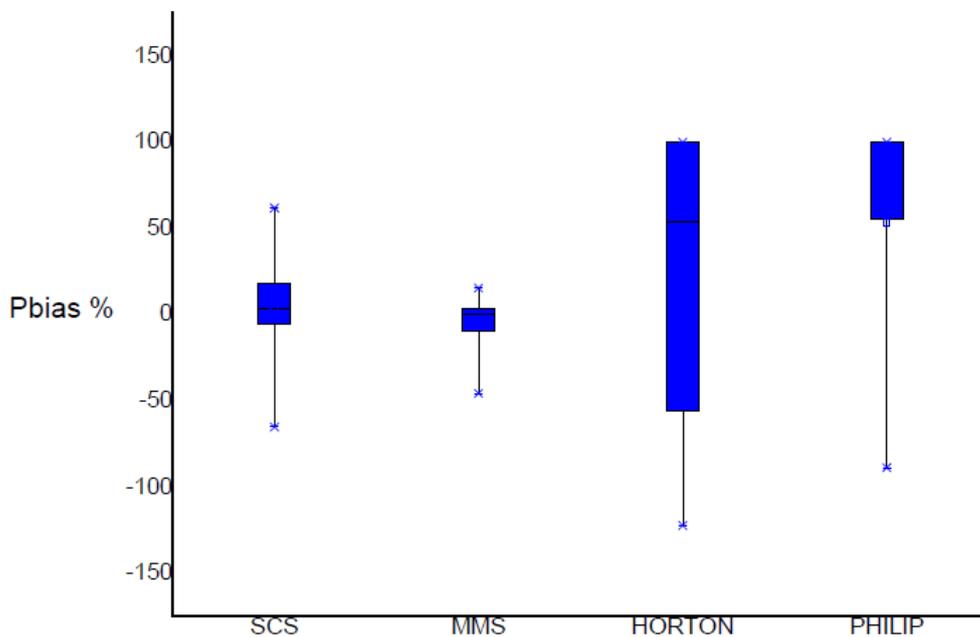


Figure IV.11 : les statistiques et la comparaison des modèles d'infiltration basées sur le pourcentage de biais (PBIAS) du Bassin de Zerdassas

Les valeurs moyennes obtenues pour les modèles de production utilisés par les critères de performance sont tabulés comme suit :

Tableau IV.5 : Valeurs moyennes des critères de performance pour les modèles d'infiltration.

Bassin	C/V	SCS		HORTON		PHILIP		MMS	
		MARE	MAE	MARE	MAE	MARE	MAE	MARE	MAE
El Kebir	C	15.367	0.113	84.405	0.571	81.672	0.487	25.303	0.098
	V	25.694	0.534	96.26	1.748	87.004	1.423	26.356	0.509
Timgad	C	31.581	0.446	71.387	2.180	85.72	9.10	14.510	0.732
	V	28.321	1.320	76.236	12.177	97.170	13.290	26.195	2.537
Zerdassas	C	23.372	0.518	86.577	2.219	89.043	3.148	30.046	0.971
	V	26.964	0.700	61.556	3.721	77.262	4.059	43.937	1.535

IV.7.2.1.2. Interprétation et discussion des résultats

Après avoir fait l’optimisation des paramètres des modèles pluie-débit utilisés, pour le but de trouver le jeu des paramètres qui rapproche le plus possible le comportement du modèle de celui du bassin modélisé, la similitude des comportements étant quantifiée par un critère (fonction objectif) servant à l’optimisation des paramètres.

Pour cela nous avons utilisés les critères de : MARE, MAE et Pbias, pour l’évaluation des quatre modèles dans les bassins versants étudiée; El Kebir, Zerdassas et bassin du Timgad.

Sur la base des statistiques MAE, MARE et PBIAS, on a fait une classification de ces modèles, l'ordre des modèle est du pire au meilleur était PHILIP < HORTON < SCS-CN < MMS.

Le modèle PHILIP est moins bien comporté que les autres modèles. Pour ce modèle, les valeurs MAE et MARE ont été supérieurs à ceux des autres modèles. Nous avons également remarqué que les valeurs PBIAS de certains événements se situaient dans une plage inacceptable; cependant, le modèle a effectué bien pour le bassin versant El Kebir pour lequel Les valeurs MAE et MARE étaient de, 0.487 et 0.816 respectivement dans le calage et 1.423 et 0.87 respectivement dans la validation. D’un autre coté il y a des valeurs de MAE qui ne sont pas satisfait pour le bassin Timgad pour lequel étaient 9.10 pour le calage et 13.290 pour la validation.

Il a été suivi par le modèle HORTON, qui avait des bons résultats dans la statistique du MARE, mais n'a pas été efficace pour le MAE, notamment pour le bassin Timgad validation. Cependant, des résultats mieux ont été obtenus pour les bassins versants d'El Kebir et de Zerdassas, tandis

que les valeurs PBIAS pour le bassin El Kebir de la plupart des événements étaient en dehors de la plage acceptable.

Selon le tableau IV.5, Le modèle SCS-CN a donné de bons résultats pour tous les bassins versants, avec les critères MAE, MARE, ainsi que les valeurs du Pbias sont dans la plage acceptable d'après les boîtes à moustaches des trois bassins.

Le modèle MMS était plus efficace que les modèles SCS-CN, HORTON et PHILIP, les meilleurs résultats ont été observés dans le Bassin El Kebir, pour lequel le MAE et le MARE dans la validation étaient respectivement de 0.509 et 0.263. De plus selon la boîte à moustache de ce bassin, ont vu qu'il y a une grande diversité des valeurs du Pbias entre le modèle SCS-CN, MMS et les modèles HORTON et PHILIP. ce qui signifie que les valeurs du PBIAS de certains événements se situaient dans une plage inacceptable.

La modélisation pluie-débit par approche corrélative entre ruissellement simulé et le ruissellement observé, et d'après les résultats obtenus dans les trois graphes du Rsim, Robs, On vu que l'application des modèles MMS et SCS-CN aux données du bassin versant El Kebir donne des résultats performants du ruissellement simulé ainsi que le ruissellement observé, et ceci pour les deux autres bassins étudiés. En revanche, on remarque une baisse de performance pour les modèles du HORTON et PHILIP.

En fin, on remarque que les modèles pluie-débit qui nous avons donnés des résultats acceptables et plus crédible pour les trois bassins étudiés sont le modèle SCS-CN et beaucoup plus le modèle MMS, ce dernier a montré de meilleurs résultats, il s'avère que lorsque la pluie antécédente (P5) est prise en compte, elle améliore les résultats de la prévision du ruissellement.

IV.7.2.2. Fonction du transfert

La transformation de la pluie nette en un hydrogramme unitaire d'un bassin versant demande une fonction de transfert, dans ce sens nous avons utilisés deux modèles de transfert Nash et Weibull (qui sont présentés précédemment) et les couplés au meilleur modèle de production qui est le MMS pour reproduire l'hydrogramme, avec l'application des critères de performance NSE et PPEAK.

IV.7.2.2.1. les résultats

La comparaison des débits simulés aux débits observés suivant les modèles utilisés pour les trois bassins est montrée à les Figures IV.12, IV.13, IV.14.

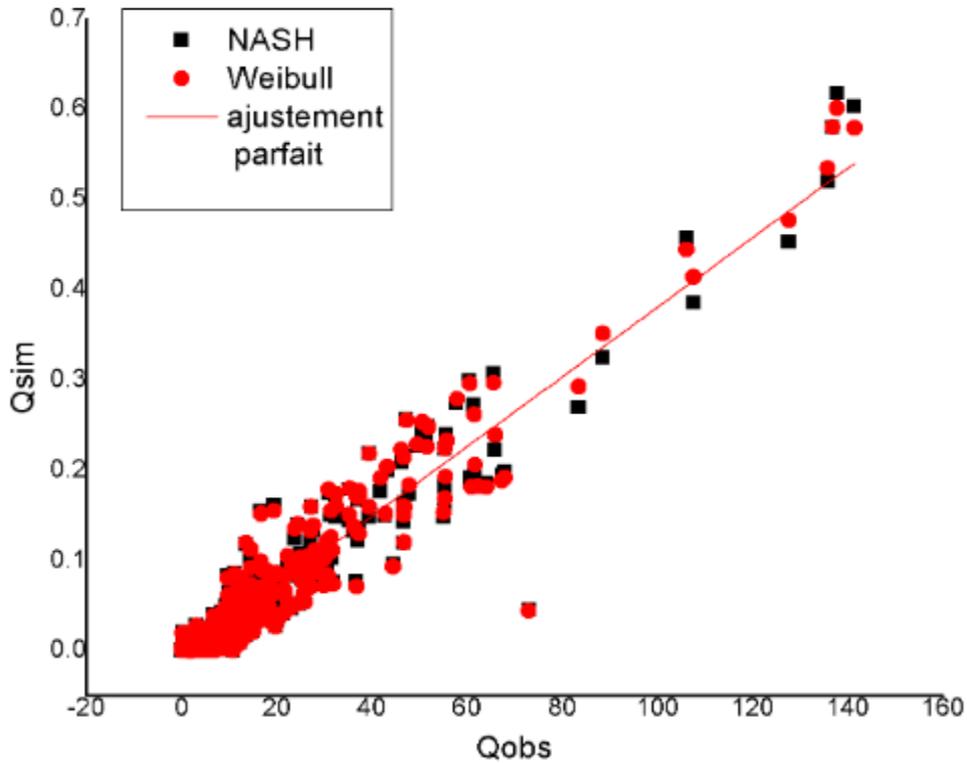


Figure IV.12: la répartition des débits observés et simulés selon les deux fonction de transfert pour le bassin El Kebir

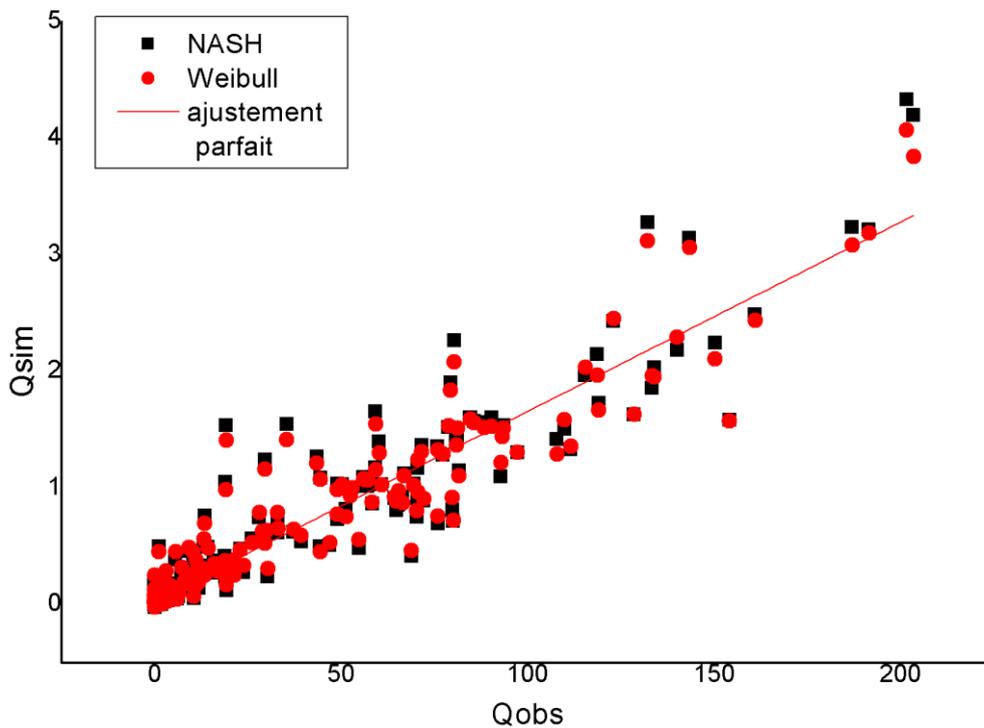


Figure IV.13: : la répartition des débits observés et simulés selon les deux fonction de transfert pour le bassin de Timgad

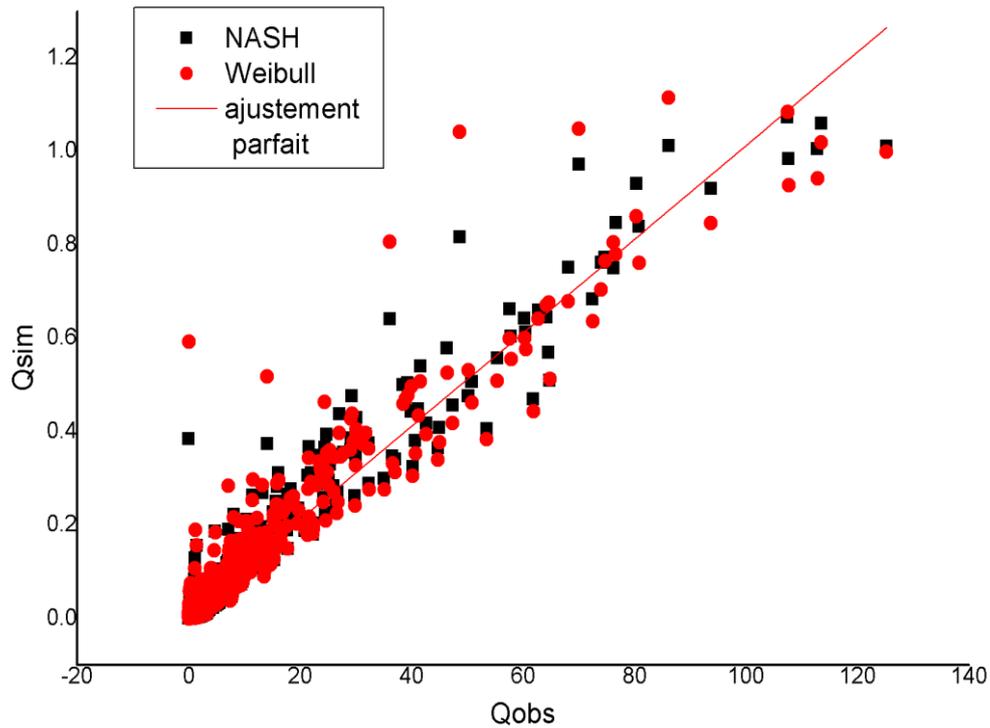


Figure IV.14: : la répartition des débits observés et simulés selon les deux fonction de transfert pour le bassin Zerdasas.

Selon les figures (IV.12, IV.13, IV.14), on constate que la répartition des débits simulés en fonction des débits observés pour les bassins étudiés par les deux modèles de transfert est montrant une bonne superposition. Les boîtes à moustaches démontrent les statistiques des critères de performances NSE et PPEAK(%) respectivement, pour chacun des deux modèles de transfert utilisés pour cette étude.

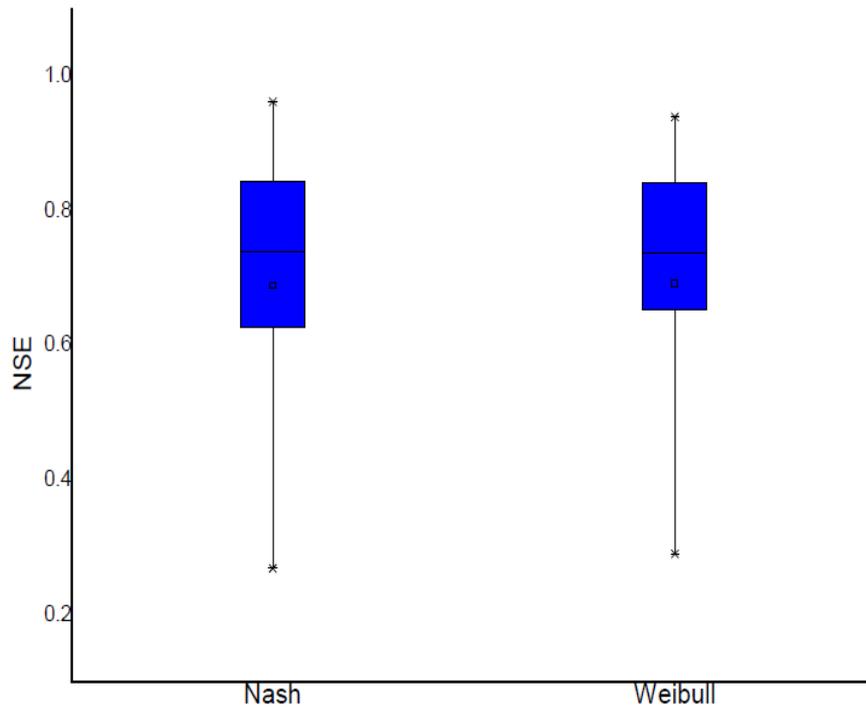


Figure IV.15: les boîtes à moustaches des deux fonctions de transfert selon Nash pour le bassin El Kebir

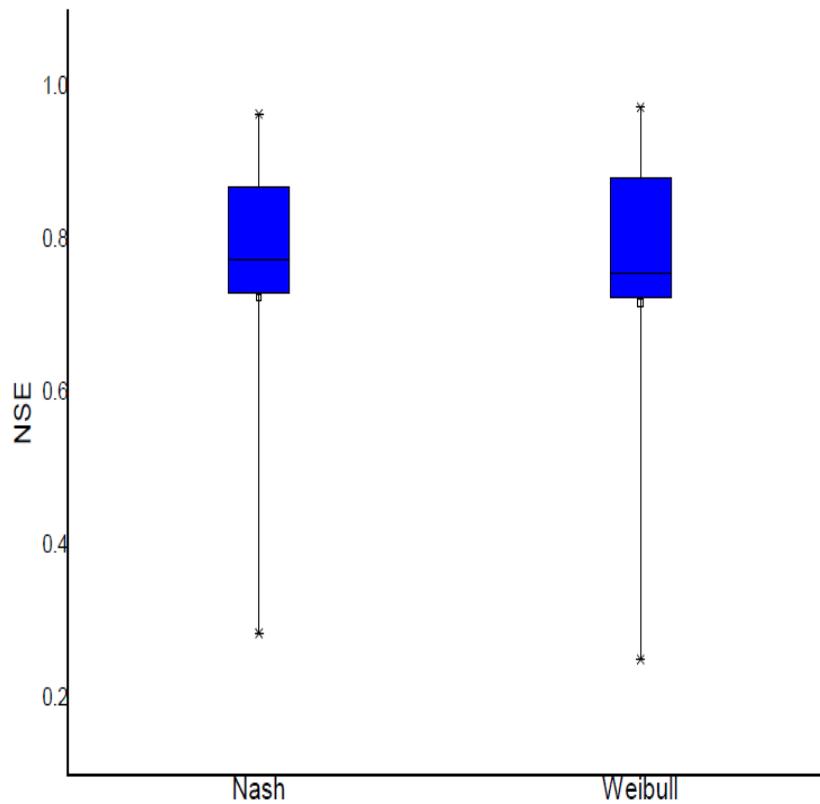


Figure IV.16: les boîtes à moustaches des deux fonctions de transfert selon Nash pour le bassin de Timgad

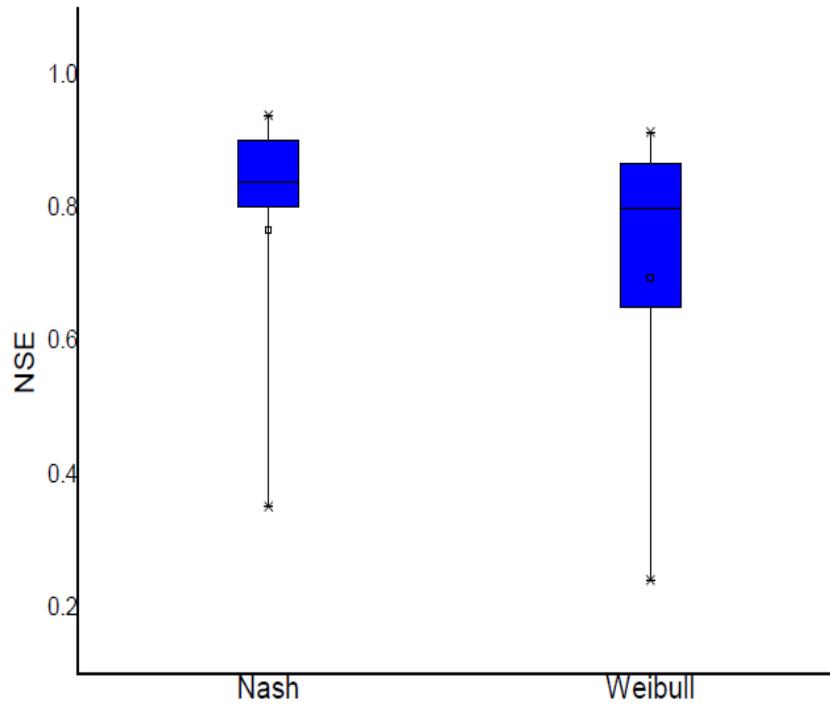


Figure IV.17: les boîtes à moustaches des deux fonctions de transfert selon Nash pour le bassin de Zerdasas

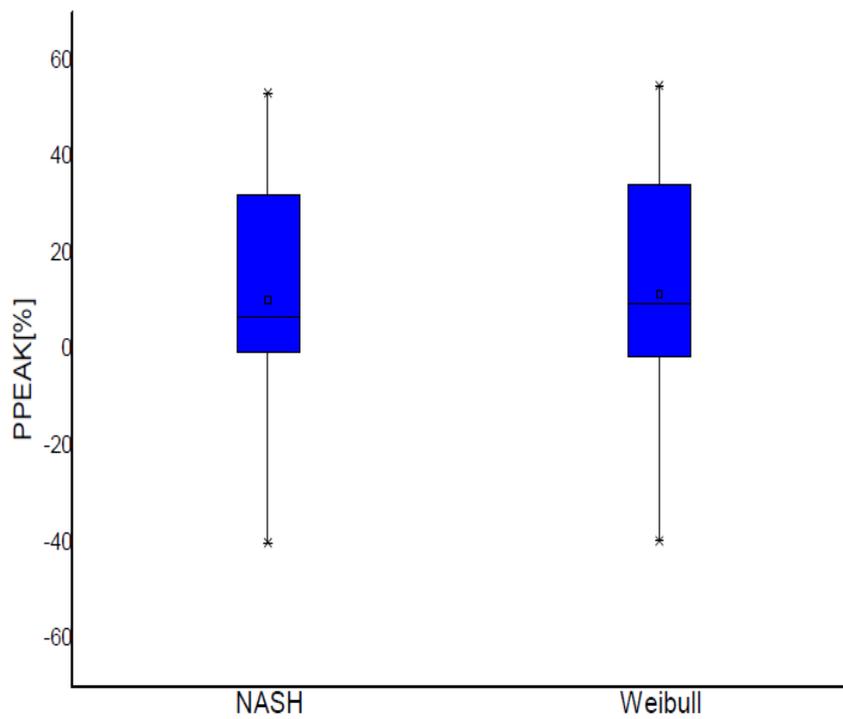


Figure IV.18: les boîtes à moustaches des deux fonctions de transfert selon PPEAK pour le bassin El Kebir

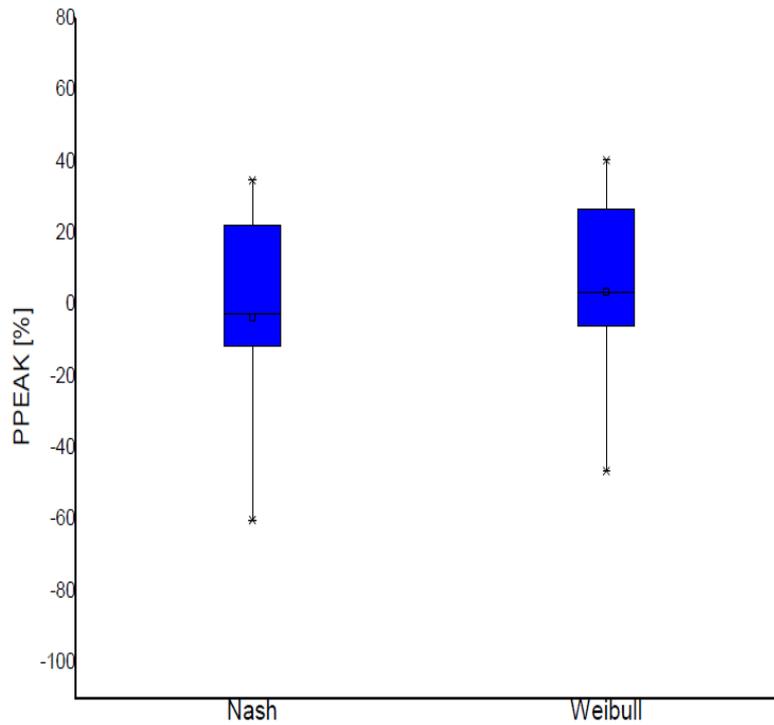


Figure IV.19: les boîtes à moustaches des deux fonctions de transfert selon PPEAK pour le bassin de Timgad

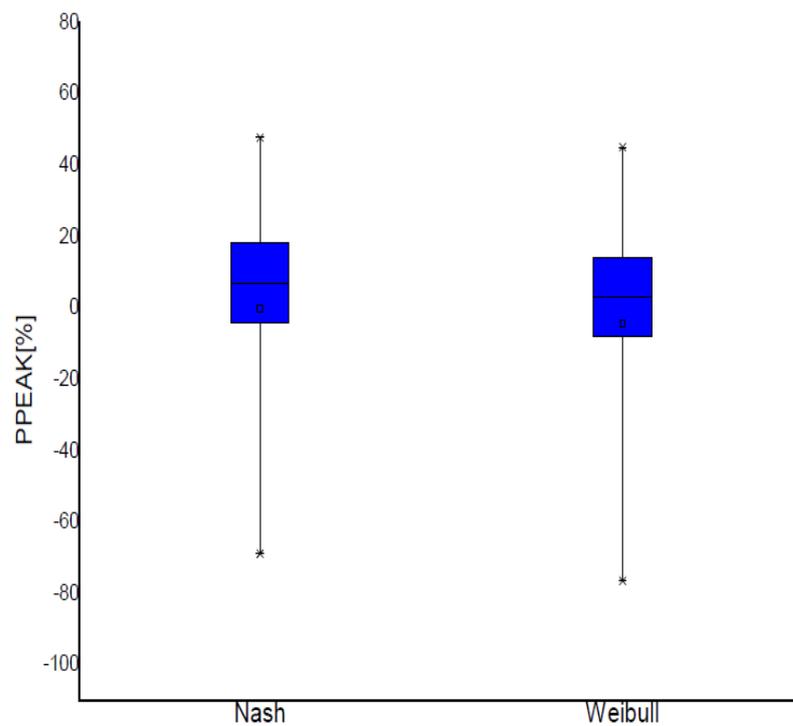


Figure IV.20: les boîtes à moustaches des deux fonctions de transfert selon PPEAK pour le bassin de Zerdasas

Les résultats statistiques obtenus pour les modèles utilisés par les critères de performance NSE et PPEAK, sont tabulés comme suit :

Tableau IV.6 : Statistiques sur les critères de performance NSE et PPEAK pour les 2 modèles de transfert sur les 3 bassins versants étudiés

Bassin	C/V	NASH		Weibull	
		NSE	PPEAK	NSE	PPEAK
B.V El-Kebir	C	0.728	22.961	0.724	23.831
	V	0.656	24.848	0.6479	25.467
B.V Timgad	C	0.761	27.627	0.761	27.499
	V	0.734	12.161	0.737	10.127
B.V Zerdassas	C	0.845	17.893	0.797	16.814
	V	0.761	18.257	0.6622	17.566

IV.7.2.2.2. Intepretation des resultats :

La performance des modèles de transfert utilisés a également été évaluée visuellement et statistiquement à l'aide de critère NSE et PPEAK, d'après les figures précédentes, Il est possible de s'apercevoir que ces deux modèles réagissent, globalement, de façon similaire.

Le Tableau (IV.6), qui présente les résultats de l'évaluation des modèles de transfert NASH et Weibull, selon les critères de performance utilisés, Il apparaît nettement que le critère de NSE a donné des très bons résultats pour les trois bassins mais beaucoup plus pour le bassin de Zerdassas, qui étaient 0.845 et 0.797 respectivement pour Nash et Weibull dans la phase du calage.

D'un autre part, les valeurs moyennes de PPEAK étaient satisfaites pour le Modèle Weibull pour les bassins versants de Timgad et de Zerdassas, et des résultats moins performants pour le bassin d'El-Kebir, par contre on remarque que le modèle de NASH donne des bons résultats du critère PPEAK pour le bassin d'El Kebir, qui était 22.96% et 24.85% respectivement pour le calage et la validation.

IV.7.2.3. Hydrogramme de crue

Les figures suivantes, représente les résultats issus du modèle MMS couplé avec les modèles de NASH et Weibull pour le plus pluvieux évènement. On a obtient les crues des plus grandes pluies. On a présenté tous les résultats des trois bassins dans des hydrogrammes de crue, Selon les hydrogrammes de crue, les deux modèles sont réagissent globalement de manière similaires.

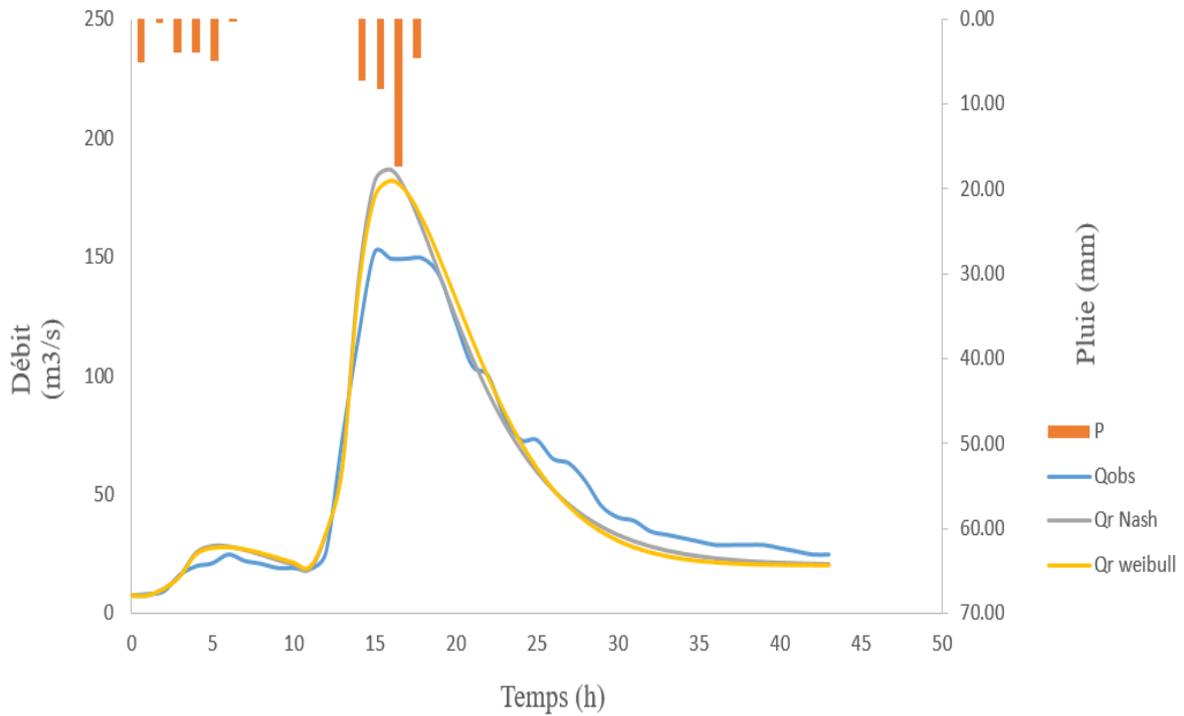


Figure (IV.21) : L'hydrogramme de crue pour le plus pluvieux évènement

Bassin d'El Kebir

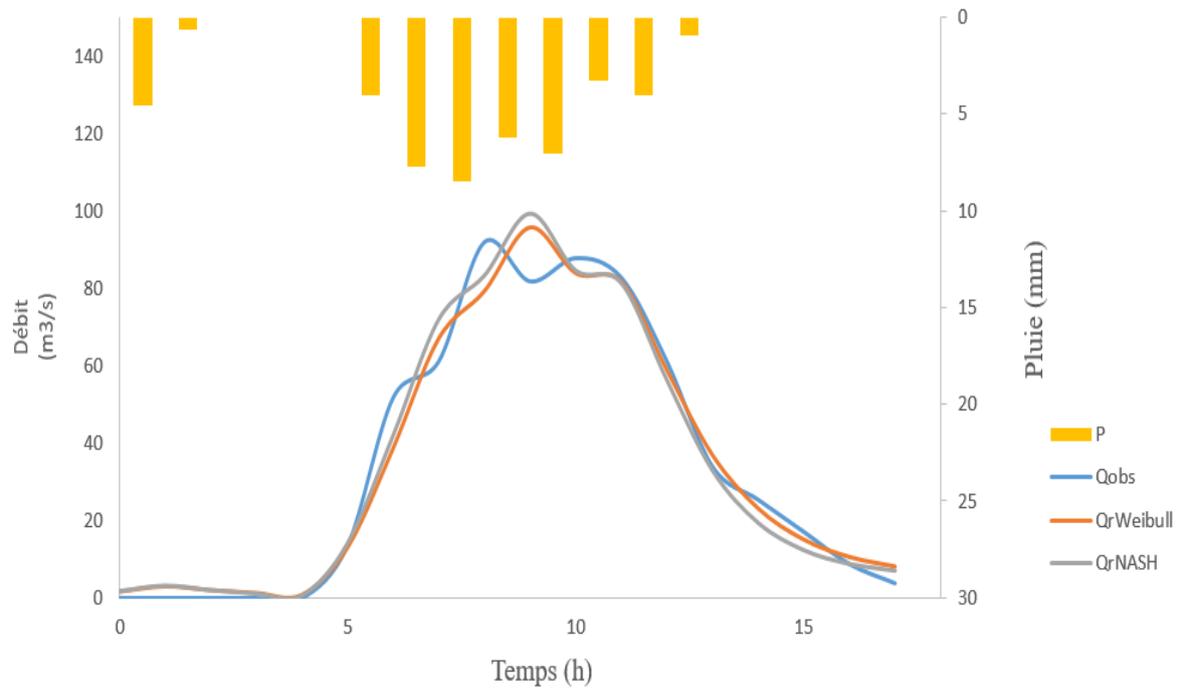


Figure (IV.22) : L'hydrogramme de crue pour le plus pluvieux évènement

Bassin de Timgad

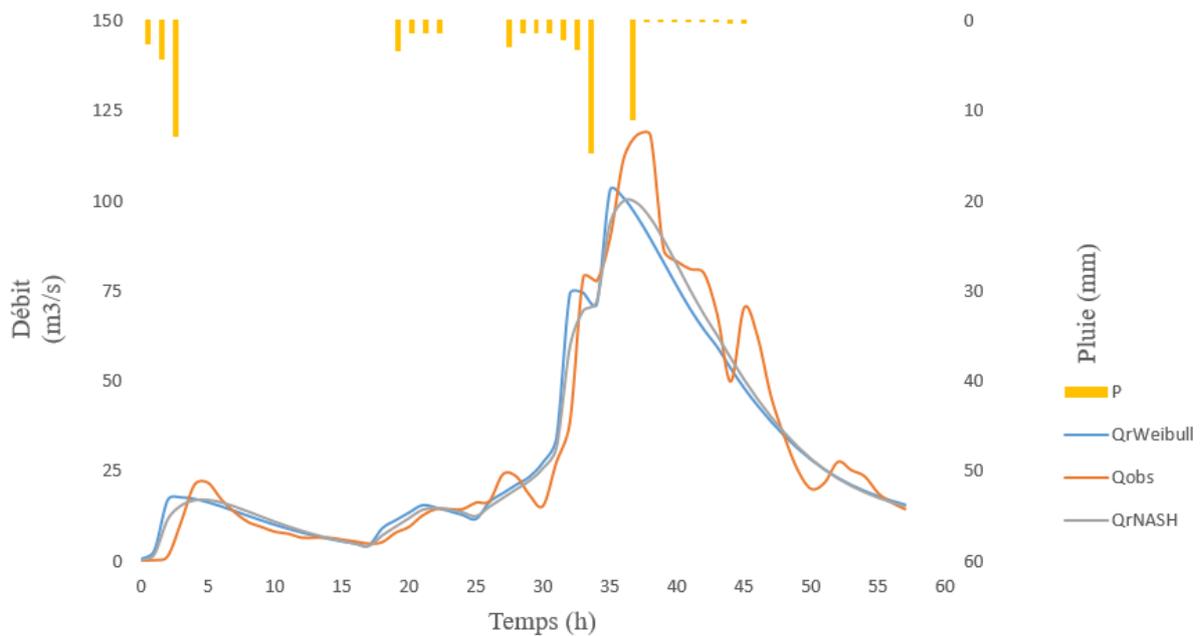


Figure (IV.23) : L'hydrogramme de crue pour le plus pluvieux évènement

Bassin de Zerdasas

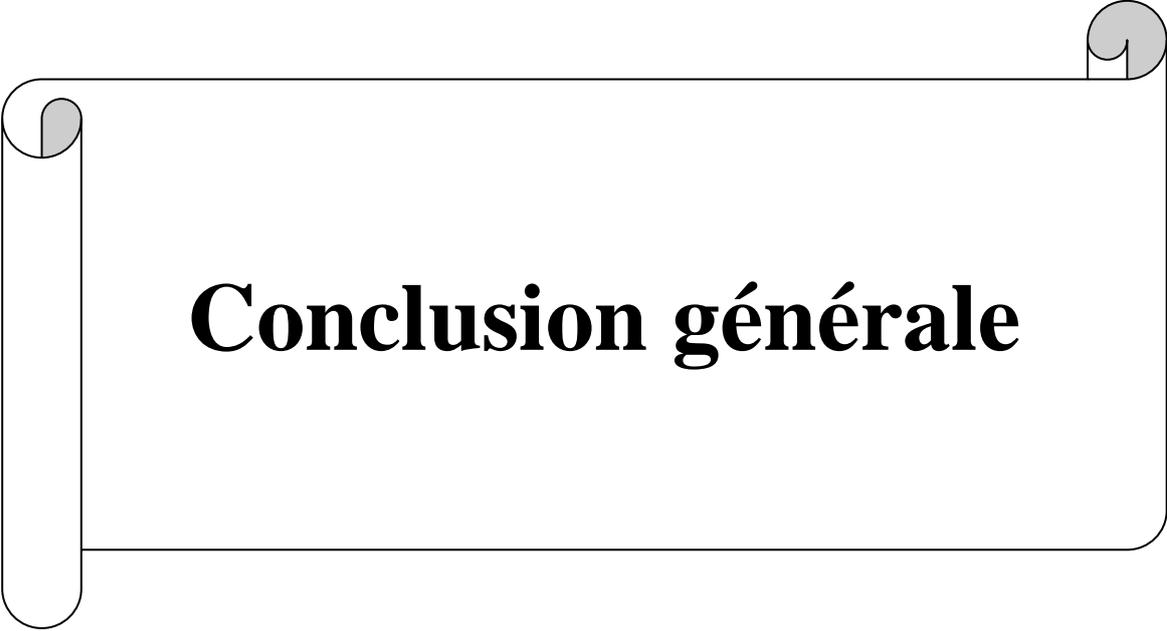
IV.8. Conclusion

Dans cette étude, une étude comparative a été menée en utilisant plusieurs approches pour développer un modèle basé sur les événements capables de reproduire des formes d'hydrogramme dans trois bassins versants dans l'est de l'Algérie, couvrant des zones de différentes dimensions et climats.

Pour la fonction de production, le modèle MMS proposé a été le modèle le plus performant. En effet, ce modèle a été couplé avec deux modèles de transfert à servi Nash et Weibull.

Sur la base des critères de performance, les modèles de transfert utilisés a également été évaluée visuellement et statistiquement à l'aide des critères de Nash et PPEAK, ces deux modèles réagissent, globalement, de façon similaire.

L'intérêt du travail réside dans la proposition d'un outil capable d'aider les gestionnaires des ressources en eau dans la zone semi-aride région de l'est de l'Algérie, où la plupart des oueds sont intermittents et nécessitent des modèles efficaces. L'utilisation de ce modèle serait utile dans la conception et la gestion des barrages et des ouvrages hydrauliques dans les bassins étudiés. Il peut également être utilisé dans le calcul d'ouvrages de protection contre les inondations. Néanmoins, nous voyons certains les limites de cette étude ; la principale faiblesse réside dans la manque de données horaires sur les débits et les précipitations. Ce manque peut avoir un impact considérable sur le calage et validation du modèle. Bien que trois bassins versants avec différentes caractéristiques et conditions climatiques aient été étudiés, davantage de bassins versants devraient également être étudiés pour valider la pertinence du modèle dans d'autres régions du pays.



Conclusion générale

Conclusion générale

En hydrologie, la relation pluie-débit représente un axe de recherche important, Elle permet de comprendre les mécanismes de génération de débits et d'anticiper les phénomènes hydrologiques extrêmes tels que les sécheresses et les inondations.

De ce fait, la simulation de comportement hydrologique d'un bassin versant est un enjeu majeur de l'hydrologie moderne, auquel tente de répondre la modélisation pluie-débit. Il s'agit, à partir de la connaissance de la pluie tombée sur le bassin, de reproduire la réponse en débit du bassin, à l'aide d'un modèle.

Ce travail de mémoire représente la recherche d'un modèle pluie débit, capables de représenter la réponse hydrologique dans nos bassins versants étudiés avec une simplicité et efficacité d'application pour la gestion des ressources en eau et la prévision des débits au niveau de l'exutoire de ces bassins.

En premier lieu, quatre fonctions de production ont été testées, Avec l'utilisation des précipitations et des débits observés. Pour les Modèles SCS-CN et MMS les résultats obtenus par leur application ont démontré des résultats très performants de ces deux modèles. En comparant les résultats obtenus par ces deux modèles, nous avons trouvé qu'avec les résultats du modèle MMS sont nettement meilleurs que ceux obtenus par le modèle SCS-CN, il s'avère que lorsque la pluie antécédente (P5) est prise en compte, elle améliore les résultats de la prévision du ruissellement.

En deuxième lieu, nous avons couplé le modèle MMS avec deux fonctions du transfert celle du Nash et du Weibull, qui a donné des résultats généralement très bons que ce soit en calage ou en validation, nous pouvons conclure que le modèle MMS donne de bonnes performances, ce qui justifie la capacité prédictive du modèle.

Le modèle MMS, peut être un outil opérationnel pour les décideurs et pour la gestion des crues dans les bassins versants étudiés, permettent de simuler l'impact d'aménagements anthropiques sur l'hydrologie d'un bassin versant, connaître le débit du point pour la construction d'un barrage. Ce modèle pourra être régionalisé pour tout l'Est de l'Algérie.

La liste des références

- ABDI, I. (2013). Préviation des événements extrêmes dans deux bassins versant de l'Est de l'Algérie, mémoire de magister soutenu à l'école nationale supérieure de l'hydraulique (ENSH) Blida, 102p.
- Abdi, I., & Meddi, M. (2021). Comparison of conceptual rainfall–runoff models in semi-arid watersheds of eastern Algeria. *Journal of Flood Risk Management*, 14(1), e12672.
- Albergel, J., Moussa, R., & Chahinian, N. (2003). Les processus hortonien et leur importance dans la genèse et le développement des crues en zones semi-arides. *Houille Blanche*, 6, 65-73.
- Ambroise. (1998). Genèse des débits dans les petits bassins versants ruraux en milieu tempéré : 1-processus et facteurs. *Revue des sciences de l'eau/Journal of Water Science*, 11(4), 471-496.
- Ambroise. (1999a). Genèse des débits dans les petits bassins versants ruraux en milieu tempéré : 2-modélisation systémique et dynamique. *Revue des sciences de l'eau/Journal of Water Science*, 12(1), 125-153.
- Ambroise. (1999b). La dynamique du cycle de l'eau dans un bassin versant. Editions HGA Bucharest, Romania.
- Ambroise, B. (1999c). La dynamique du cycle de l'eau dans un bassin versant : Processus, facteurs, modèles. Éd. HGA.
- Andréassian, V., Perrin, C., & Michel, C. (2007). Modèles hydrologiques du génie rural (GR). Cemagref, UR Hydrosystèmes et Bioprocédés.
- Arnold, J. G., & Allen, P. M. (1999). Automated methods for estimating baseflow and ground water recharge from streamflow records 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 35(2), 411-424.
- Bargaoui, Z., Dakhlaoui, H., & Houcine, A. (2008). Modélisation pluie-débit et classification hydroclimatique. *Revue des sciences de l'eau/Journal of Water Science*, 21(2), 233-245.
- Bar-Hillel, M. (1980). The base-rate fallacy in probability judgments. *Acta Psychologica*, 44(3), 211-233.
- Benkhaled, A., Remini, B., Mhaiguene, M., Webb, B., Arnell, N., Onof, C., & Kirby, C. (2004). Influence of antecedent precipitation index on the hydrograph shape. *Hydrology: Science and practice for the 21st century*, 1, 81-87.
- Beven, K. J. (2011). *Rainfall-runoff modelling : The primer*. John Wiley & Sons.
- Borga, M., Gaume, E., Creutin, J. D., & Marchi, L. (2008). Surveying flash floods : Gauging the ungauged extremes. *Hydrological processes*, 22(18), 3883.

CHETTAH, W. (2009). Investigation des propriétés minéralogiques et géomécaniques des terrains en mouvement dans la ville de Mila «Nord-Est d'Algérie.

Chkir, N. (1994). Mise au point d'un modèle hydrologique conceptuel intégrant l'état hydrique du sol dans la modélisation pluie-débit.

Chow, V. T., Maidment, D. R., & Larry, W. (1988). Mays. Applied Hydrology. International edition, MacGraw-Hill, Inc, 149.

Clarke, D. (1973). Archaeology : The loss of innocence. *Antiquity*, 47(185), 6.

COSANDEY, C. (1996). Les traceurs pour l'étude hydrologique des régions arides. 105(592), 653-655.

Desbordes, M. (1997). La gestion urbaine du risque d'inondation : Problématique et enjeux. *La Houille Blanche*, 7, 20-24.

Edijatno, N., & Michel, C. (1989). Un modèle pluie-débit journalier à trois paramètres. *La Houille Blanche*, 2, 113-121.

Estupina, V. (2004). Vers une modélisation hydrologique adaptée à la prévision opérationnelle des crues éclair. Application à de petits bassins versants du Sud de la France.

García-Ruiz, J. M., Nadal-Romero, E., Lana-Renault, N., & Beguería, S. (2013). Erosion in Mediterranean landscapes : Changes and future challenges. *Geomorphology*, 198, 20-36.

Gaume. (2000). Analyse hydro-pluviométrique des crues du Gard et du Vidourle des 8 et 9 septembre 2002. *La Houille Blanche*, 90(6), 99-106.

Gherissi, R. (2012). Hydrologie et modelisation pluie-debit : Cas du bassin versant de l'oued lakhdar (ex : Chouly) tafna-nw algerien.

Ghezali, S. (2019). Modélisation De La Réalisation Pluie-Débit Par Les Modèles Conceptuels et Neuroflous (Application au bassin versant Zerdezas).

Gilard. (1995). Connaître les inondations : L'exemple de la Bourbre (Isère). *Ingénieries, spécial Risques naturels: inondation, du constat à la décision*, 7-16.

Gilard, & Gendreau. (1998). Inondabilité : Une méthode de prévention raisonnable du risque d'inondation pour une gestion mieux intégrée des bassins versants. *Revue des sciences de l'eau/Journal of Water Science*, 11(3), 429-444.

Gnouma, R. (2006). Aide à la calibration d'un modèle hydrologique distribué au moyen d'une analyse des processus hydrologiques : Application au bassin versant de l'Yzeron.

Godard, O., & Hubert, B. (2002). Le développement durable et la recherche scientifique à l'INRA. Rapport intermédiaire de mission. Paris (France): Inra éditions.

Green, W. H., & Ampt, G. (1911). Studies on Soil Physics. *The Journal of Agricultural Science*, 4(1), 1-24.

Gruntfest, E., Ruin, I., Creutin, J.-D., Anquetin, S., & Lutoff, C. (2009). Human vulnerability to flash floods : Addressing physical exposure and behavioural questions. *Flood risk management: Research and practice*, 1005-1012.

Hallaci & Mahboubi. (2019). Influence des rejets liquides du complexe GL1/K sur la qualité physicochimique et bactériologique des eaux de l'Oued Saf-Saf-SKIKDA.

Haverkamp, R., Ross, P., Smettem, K., & Parlange, J. (1994). Three-dimensional analysis of infiltration from the disc infiltrometer : 2. Physically based infiltration equation. *Water Resources Research*, 30(11), 2931-2935.

Hawkins, R. H. (1993). Asymptotic determination of runoff curve numbers from data. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 119(2), 334-345.

Horton. (1933). The role of infiltration in the hydrologic cycle. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 14(1), 446-460.

Khanchoul, K., Boukhrissa, Z. E. A., Acidi, A., & Altschul, R. (2012). Estimation of suspended sediment transport in the Kebir drainage basin, Algeria. *Quaternary International*, 262, 25-31.

Khelfaoui, F. (2008). Ressources en eau et gestion integree dans le bassin versant du saf-saf (nord-est algerien).

Kingumbi, A. (2006). Modélisation hydrologique d'un bassin affecté par des changements d'occupation : Cas du Merguellil en Tunisie centrale.

Laborde, C. (2009). Républicanisme critique vs républicanisme conservateur : Repenser les «accommodements raisonnables». *Critique internationale*, 3, 19-33.

LAHLAH. (2000). TRAITEMENT STATISTIQUE DES DONNEES GEOCHIMIQUES DU SECTEUR DE SIDI BETTIOUR (Ténès, Algérie).

Le Clerc, & van Dam, D. B. (2004). Experimental study of the impact of an ink-jet printed droplet on a solid substrate. *Physics of Fluids*, 16(9), 3403-3414.

Le Moine, N. (2008). Le bassin versant de surface vu par le souterrain : Une voie d'amélioration des performances et du réalisme des modèles pluie-débit?

Lyne, V., & Hollick, M. (1979). Stochastic time-variable rainfall-runoff modelling. 79(10), 89-93.

Makhlouf, Z. (1994). Compléments sur le modèle pluie-débit GR4J et essai d'estimation de ses paramètres.

Marchandise, A. (2007). Modélisation hydrologique distribuée sur le Gardon d'Anduze; étude comparative de différents modèles pluie-débit, extrapolation de la normale à l'extrême et tests d'hypothèses sur les processus hydrologiques. Université de Montpellier II, Montpellier.

- Mathevet, T. (2005). Quels modèles pluie-débit globaux au pas de temps horaire ? Développements empiriques et comparaison de modèles sur un large échantillon de bassins versants.
- Mebarki, A. (2005). Hydrologie des bassins de l'Est algérien : Ressources en eau, aménagement et environnement. Université Mentouri de Constantine, Thèse d'Etat.
- Mebarki, A., & Thomas, C. (1988). Analyse des relations entre écoulements superficiels et souterrains à partir des hydrogrammes des cours d'eau. Application au bassin du Kébir-Rhumel dans le Constantinois (Algérie). *Revue Hydrologie continentale, ORSTOM, Paris*, 3(2), 89-103.
- Merghadi, A., Abderrahmane, B., & Tien Bui, D. (2018). Landslide susceptibility assessment at Mila Basin (Algeria) : A comparative assessment of prediction capability of advanced machine learning methods. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 7(7), 268.
- Michel, C. (1983). Que peut-on faire en hydrologie avec modèle conceptuel à un seul paramètre? *La Houille Blanche*, 1, 39-44.
- Mishra, S., Singh, V. P., Sansalone, J., & Aravamuthan, V. (2003). A modified SCS-CN method : Characterization and testing. *Water Resources Management*, 17(1), 37-68.
- Mokhtari. (2016). MODELISATION PLUIE-DEBIT PAR LE LOGICIEL " HEC-HMS" DE SOUS-BASSIN VERSANT L'OUED SAHEL.
- Mouelhi, S. (2003). Vers une chaîne cohérente de modèles pluie-débit conceptuels globaux aux pas de temps pluriannuel, annuel, mensuel et journalier.
- Mouelhi, S., Madani, K., & Lebdi, F. (2013). A structural overview through GR (s) models characteristics for better yearly runoff simulation. *Open Journal of Modern Hydrology*, 2013.
- Musy, A., Hingray, B., & Picouet, C. (2009a). *Hydrologie : Une science pour l'ingénieur* (Vol. 21). PPUR presses polytechniques.
- Musy, A., Hingray, B., & Picouet, C. (2009b). *Hydrologie : Une science pour l'ingénieur* (Vol. 21). PPUR presses polytechniques.
- Nathan, R. J., & McMahon, T. A. (1990). Evaluation of automated techniques for base flow and recession analyses. *Water resources research*, 26(7), 1465-1473.
- National Research Council. (2006). *Completing the forecast : Characterizing and communicating uncertainty for better decisions using weather and climate forecasts*. National Academies Press.
- Payraudeau, S. (2002). Modélisation distribuée des flux d'azote sur des petits bassins versants méditerranéens.
- Perrin, C. (2000). Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit.

- Perrin, C. (2002). Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative. *La Houille Blanche-Revue internationale de l'eau*, 6-7, 84-91.
- Philip, J. (1957). The theory of infiltration : 1. The infiltration equation and its solution. *Soil science*, 83(5), 345-358.
- Ponce, V. M., & Hawkins, R. H. (1996). Runoff curve number : Has it reached maturity? *Journal of hydrologic engineering*, 1(1), 11-19.
- Pushpalatha, R. (2013). Simulation et prévision des étiages sur des bassins versants français : Approche fondée sur la modélisation hydrologique.
- Rallison, R. E., & Cronshey, R. C. (1979). Discussion of "Runoff Curve Number with Varying Site Moisture". *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, 105(4), 439-441.
- Roche, P.-A., Miquel, J., & Gaume, E. (2012). *Hydrologie quantitative : Processus, modèles et aide à la décision*. Springer Science & Business Media.
- Roy, P., Tichoux, H., Fauchè, R., Langlois, J., Parent, G., & Trudent, F. (2006). Etude de la protection du bassin versant du barrage Beni-Haroun. Rapport technique du bureau d'étude Tecsul International Limitee, Chapitre, 8.
- Salomon. (1997). *Distributed cognitions : Psychological and educational considerations*. Cambridge University Press.
- Soufane. (2011). Evaluation du risque de contamination par les métaux lourds dans l'eau, les sédiments et les poissons du barrage de beni haroun de la wilaya de mila.
- Spongberg, M. E. (2000). *Baseflow separation with digital filters*. Texas A&M University.
- Touaïbia, B. (2000). *Érosion-Transport solide-Envasement des barrages. Cas du bassin versant de Mina*.
- Tourki, M., Khanchoul, K., Le Bissonnais, Y., & Belala, F. (2017). Sediment yield assessment in the Upper Wadi Kebir catchment, Kébir Rhumel River, Northeast of Algeria (1973-2006). *Synthèse: Revue des Sciences et de la Technologie*, 34, 122-133.
- WMO, Davanzati family, Groupe d'experts OMM/Unesco sur la terminologie, UNESCO (Paris), & Organisation météorologique mondiale. (1974). *Glosario hidrológico internacional (Numéros 385-388)*. Geneva: Secretariat of the World Meteorological Organization.
- Yahiaoui, A. (2012). *Inondations torrentielles. Cartographie des zones vulnérables en Algérie du Nord (cas de l'oued Mekerra, Wilaya de Sidi Bel Abbès)*.
- Zouaidia, H. (2006). *Bilan des incendies de forêt dans l'Est algérien, cas de Mila, Constantine, Guelma et Souk Ahras. Mémoire de Magister, Université de Constantine, Algérie*.