



Faculté des Sciences et Techniques
Guéliz-Marrakech



Agence du Bassin Hydraulique de Tensift
Marrakech

Département des Sciences de la Terre
Master Eau et Environnement
2012-2013

Mémoire de fin d'études intitulé :

Le bassin versant de Rhéraya : Modélisation pluie-débit et prédiction du comportement hydrologique

Soutenu publiquement le 28-06-2013 devant le jury composé de :

- Mr. SAIDI Mohamed Elmehdi
- Mlle KHAMLI Nadia
- Mr. TOUIL Ahmed

Réalisé par : Mr. AHBARI Abdellatif

Encadré par : Mr. SAIDI Mohamed Elmehdi
Mr. LIMAM Nabil
Mr. RACHIDI Said

SOMMAIRE

Remerciements	6
Liste des tableaux	7
Liste des figures	7
Résumé	10
Abstract	10
Introduction générale	11
Chapitre 1 : Synthèse bibliographique des modèles de simulation hydrologique	13
A. Les modèles appliqués dans le bassin versant de Rhéraya	13
I. Le modèle SWAT	13
1. Étude de Chaponnière	13
2. Étude de Duclaux	14
II. Le modèle GR4J	14
III. Le modèle SRM	15
IV. Conclusion	16
B. Le modèle HEC-HMS sous WMS	16
I. La description du logiciel WMS	16
1. C'est quoi WMS ?	16
2. Que peut faire WMS ?	16
3. Les apports du WMS dans notre étude	17
II. La description du modèle HEC-HMS	18
1. Les caractéristiques générales du modèle	18
2. Le processus de fonctionnement	19
3. L'organisation du modèle	20
a. Le module structural du bassin	20
b. Le module météorologique	20
c. Le module de la fonction de production	21
d. Le module de la fonction de transfert	22
e. Le module du débit de base	22
f. Le module de routage	23
g. La fonction objective	23
h. La fonction d'optimisation automatique	24
III. La structure du modèle HEC-HMS choisie	24

1.	Le type de modélisation : événementielle-----	24
2.	Le module météorologique : les averses NRCS-----	25
3.	La fonction de production : la NRCS CN -----	26
3.1.	Le concept de base-----	26
3.2.	Les variables -----	27
3.3.	Les paramètres-----	28
4.	Les fonctions de transfert : l'hydrogramme unitaire de la NRCS et de Clark-----	28
4.1.	L'hydrogramme unitaire-----	28
4.2.	L'hydrogramme unitaire de la NRCS : -----	29
a.	Le concept de base-----	29
b.	Les paramètres-----	30
4.3.	L'hydrogramme Unitaire de Clark-----	30
a.	Le concept de base-----	30
b.	Les paramètres-----	30
5.	Le débit de base : la récession exponentielle -----	31
5.1.	Le concept de base-----	31
5.2.	La variable-----	32
5.3.	Les paramètres-----	32
IV.	Les avantages et les limites du modèle -----	32
1.	WMS : le logiciel de préparation des fichiers de simulation -----	33
1.1.	Les avantages-----	33
1.2.	Les limites -----	33
2.	HEC-HMS : le modèle de simulation hydrologique -----	33
1.3.	Les avantages-----	33
1.4.	Les limites -----	33
3.	La combinaison modulaire choisie-----	34
3.1.	Les avantages-----	34
3.2.	Les limites -----	34
V.	Justification du choix du modèle-----	34
Chapitre 2 : Étude hydro-géomorphologique du bassin versant de Rhéraya-----		36
I.	Le contexte général du bassin versant de Rhéraya -----	36
1.	La situation géographique et administrative -----	36
2.	Le cadre géologique-----	37
3.	Le cadre climatique -----	38

3.1.	Les précipitations	38
3.2.	Les températures	38
3.3.	Le vent	39
4.	L'occupation du sol et les types des sols	39
II.	La morphométrie du bassin versant de Rhéraya	40
1.	Les paramètres morphométriques générales	40
2.	Le réseau de drainage	41
3.	L'hypsométrie et les pentes	43
4.	L'indice de compacité de Gravelius	44
5.	Le rectangle équivalent	44
6.	Le temps de concentration	45
III.	Le régime pluviométrique et hydrométrique du bassin versant	46
1.	Le régime Pluviométrique	46
1.1.	Les précipitations mensuelles, saisonnières et annuelles	47
a.	Les précipitations mensuelles	47
b.	Les précipitations saisonnières	48
c.	Les précipitations annuelles	48
1.2.	La corrélation entre les précipitations	49
a.	Les précipitations journalières	49
b.	Les précipitations mensuelles	49
c.	Les précipitations saisonnières	50
d.	Les précipitations annuelles	50
1.3.	L'analyse statistique des précipitations journalières des deux stations	51
a.	La station d'aval : Tahnaout	51
b.	La station d'amont : Aremd	52
c.	Les averses quantiles	53
2.	Le régime hydrométrique	54
2.1.	Les débits mensuels, saisonniers et annuels à la station de Tahnaout	54
a.	Les débits mensuels	54
b.	Les débits saisonniers	54
c.	Les débits annuels	54
2.2.	L'analyse statistique des débits maximums journaliers à la station de Tahnaout	55
IV.	Conclusion	56
Chapitre 3 : Application du modèle HEC-HMS au bassin versant de Rhéraya et prédiction du comportement		57

A.	La modélisation du bassin du Rhéraya avec HEC-HMS-----	57
I.	Les données d'entrée du modèle-----	57
1.	Le modèle numérique du terrain -----	57
2.	La carte d'occupation du sol -----	57
3.	La carte des sols -----	60
4.	La donnée pluie -----	62
II.	L'élaboration du modèle-----	62
III.	La calibration du modèle -----	63
IV.	La validation du modèle-----	69
V.	Synthèse sur la modélisation -----	71
1.	Les entrées du modèle -----	71
2.	Les modules -----	71
3.	Les sorties-----	72
B.	La prédiction du comportement futur du Rhéraya-----	72
1.	Introduction-----	72
2.	Scénario 1 : Les averses quantiles -----	73
2.1.	Les données d'entrée-----	73
2.2.	Les résultats de la simulation-----	73
3.	Scénario 2 : changement dans l'occupation du sol dans un sens négatif-----	74
3.1.	Les données d'entrée-----	74
3.2.	Les résultats de la simulation-----	74
4.	Scénario 3 : changement dans l'occupation du sol dans un sens positif-----	75
4.1.	Les données d'entrée-----	75
4.2.	Les résultats de la simulation-----	75
5.	Conclusion-----	76
	Conclusion générale et perspectives -----	77
	Annexes-----	80
	Références bibliographiques -----	100

Remerciements

Au terme de ce travail, je tiens à remercier toutes les personnes et les organismes qui ont contribué grandement ou pas, sur le plan scientifique, technique ou administratif, à l'accomplissement de la mission de mon projet de fin d'étude durant toutes ses phases de préparation, de traitement, d'analyse, de rédaction et d'examen. Leurs aides, efforts, informations et coopérations m'ont été d'un énorme soutien pour aboutir à ce rapport. Ces personnes physiques et morales sont :

- Mon encadrant interne, Mr. Mohamed Elmehdi Saidi professeur d'hydrologie au département des sciences de la terre à la FSTG de Marrakech.
- Mes deux encadrants externes, Mr. Limam Nabil ingénieur, chef du service d'hydrologie à l'ABHT et Mr. Rachidi Said ingénieur au même service.
- Le Directeur et les employés de l'ABHT pour l'accord du stage et les données pluviométriques et hydrométriques fournies.
- Le Directeur de la DREF de Marrakech et les employés du service des études de la planification et SIG pour les informations et les cartes
- Le corps professoral de la formation Master Eau et Environnement pour la qualité des enseignements.
- Les professeurs membres de jury d'avoir accepté d'examiner mon travail.
- Les camarades de classe pour les moments de joie et de plaisir qu'on s'est partagés le long du parcours universitaire.
- Ma famille et en particulier mes parents pour la confiance, le soutien et l'amour.

Liste des tableaux

Tab. 1 : La relation pluie antérieure et type de CN pour la méthode NRCS CN (d'après [16])	27
Tab. 2 : Les capacités initiales i_0 et finales i_f d'infiltration en fonction des classes de sols	27
Tab. 3: Les valeurs usuelles de l'abstraction initiale la et du coefficient CN	28
Tab. 4 : Le tableau Récapitulatif de l'ensemble des paramètres morphométriques	41
Tab. 5 : Les valeurs du temps de concentration issues de l'utilisation des formules	46
Tab. 6 : la comparaison des lois ajustées aux précipitations journalières de la station de Tahnaout	51
Tab. 7 : Les valeurs estimées par la loi Log Pearson III (WRC) des précipitations	52
Tab. 8 : la comparaison des lois ajustées aux précipitations journalières de la station d'Aremd (1999-00 à 2009-10)	52
Tab. 9: Les valeurs estimées par la loi Log normal des précipitations journalières à la station d'Aremd	53
Tab. 10 : Les hauteurs de précipitations estimées à Tahnaout en Aremd et au Rhéraya pour différentes périodes de retour	53
Tab. 11 : La comparaison des lois ajustées aux débits maximums journaliers de Tahnaout (1998-2010)	55
Tab. 12 : Les valeurs débits estimées par la loi Log Pearson III (SAM) à la station de Tahnaout	56
Tab. 13 : Les caractéristiques du MNT utilisé dans la modélisation	57
Tab. 14 : les cartes utilisées pour l'élaboration de la carte d'occupation du sol NRCS du bassin du Rhéraya	58
Tab. 15 : Classes d'occupation du sol NRCS définies pour le bassin du Rhéraya	59
Tab. 16 : les types de sol de la carte pédologique simplifiée utilisés par Chaponnière	60
Tab. 17 : Les entrées à saisir pour chaque fichier de simulation	63
Tab. 18 : le jeu de paramètres optimisé utilisé pour la validation du modèle HEC-HMS sur le bassin du Rhéraya	68
Tab. 19 : les résultats de validation du jeu de paramètre optimal de la nouvelle calibration	69
Tab. 20 : La relation entre le débit de pointe et le pourcentage d'erreur commise sur le débit de base	69
Tab. 21 : : Les hauteurs de précipitations estimées au bassin du Rhéraya pour différentes périodes de retour	73
Tab. 22 : les valeurs prévues du débit de pointe et du volume à la station de Tahnaout pour des averses quantiles	73
Tab. 23 : La comparaison des lois ajustées aux débits de pointe prévus par le modèle HEC-HMS	74
Tab. 24 : les valeurs prévues du débit de pointe et du volume à la station de Tahnaout pour le scénario 2	74
Tab. 25 : la comparaison entre les résultats des scénarios 1 et 2	75
Tab. 26 : les valeurs prévues du débit de pointe et du volume à la station de Tahnaout pour le scénario 3	75

Liste des figures

Fig. 1: L'utilité du logiciel WMS dans l'étude de modélisation de Rhéraya	18
Fig. 2: L'enchaînement d'intervention des différentes composantes dans la structure événementielle du modèle HEC-HMS [10]	19
Fig. 3 : Les distributions temporelles 24h des quatre averses de projet de la NRCS	25
Fig. 4 : La notion d'hydrogramme unitaire et ses caractéristiques fondamentales (d'après [18])	29
Fig. 5 : L'illustration de la méthode de la récession exponentielle, d'après [31])	32
Fig. 6 : La carte de situation géographique du bassin versant de Rhéraya	36
Fig. 7 : La carte géologique du bassin versant de la Rhéraya (d'après le SCM complétée par Cheggour A.)	37
Fig. 8 : Les températures mensuelles interannuelles à la station de Takerkoust (période 1984-2012)	38
Fig. 9 : Les températures mensuelles interannuelles estimées à Tahnaout (période 1984-2012)	39
Fig. 10 : La carte du réseau hydrographique classifié du bassin versant de Rhéraya	42
Fig. 11: les profils en long des Oueds Imlil et Imenane depuis leurs points de départ jusqu'à l'exutoire	43

Fig. 12 : La carte hypsométrique du bassin de Rhéraya.....	44
Fig. 13 : La carte des pentes du bassin de Rhéraya.....	44
Fig. 14 : le rectangle équivalent du bassin versant de Rhéraya pourvu de son hypsométrie	45
Fig. 15 : Les précipitations mensuelles interannuelles dans les deux stations.....	47
Fig. 16 : Les précipitations saisonnières interannuelles dans les deux stations	48
Fig. 17 : Les précipitations annuelles dans les deux stations de Tahnaout et Aremd (1999-00 à 2008-09)	48
Fig. 18 : La régression linéaire simple entre les précipitations journalières de Tahnaout et d'Aremd (1999-00 à 2009-10) .	49
Fig. 19 : La régression linéaire simple entre les précipitations mensuelles de Tahnaout et d'Aremd (1999-00 à 2008-09) ..	50
Fig. 20 : La régression linéaire simple entre les précipitations saisonnières de Tahnaout et d'Aremd (1999-00 à 2008-09)	50
Fig. 21 : La régression linéaire simple entre les précipitations annuelles de Tahnaout et d'Aremd (1999-00 à 2008-09)	51
Fig. 22 : Le graphe d'ajustement de la loi Log Pearson III (WRC) aux précipitations.....	52
Fig. 23 : Le graphe d'ajustement de la loi Log normal aux précipitations.....	53
Fig. 24 : Les débits mensuels enregistrés à la station de Tahnaout (1962-63 à 2008-09)	54
Fig. 25 : Les débits saisonniers enregistrés à la station de Tahnaout (1962-63 à 2008-09)	54
Fig. 26 : Les débits annuels à la station de Tanhaout (1962-63 à 2008-09)	55
Fig. 27 : Le graphe d'ajustement de la loi Log Pearson (SAM) aux débits maximums journaliers de Tahnaout (1998-2010)	55
Fig. 28 : La carte d'occupation du sol type NRCS du bassin versant du Rhéraya.....	59
Fig. 29 : L'approximation utilisée pour transformer le sol squelettique en texture	60
Fig. 30 : la carte des sols type NRCS du bassin versant du Rhéraya.....	61
Fig. 31 : Nombre de fichiers de simulation préparés pour chaque événement	62
Fig. 32 : L'évolution des volumes et des débits de base pour les événements de simulation en utilisant le formalisme Clark	64
Fig. 33 : la différence de débits de pointe simulé et observé après validation par les cinq méthodes utilisées	65
Fig. 34 : La différence de volume simulé et observé après validation par les cinq méthodes utilisées	66
Fig. 35 : la différence du débit de base simulé et observé après validation par les cinq méthodes utilisées.....	66
Fig. 36 : La variation du volume simulé de l'événement 48 en fonction du pourcentage d'imperméable.....	68
Fig. 37 : la comparaison du pourcentage d'erreur sur le débit de pointe pour les deux essais de validation	70
Fig. 38 : la comparaison du pourcentage d'erreur sur le volume de crue pour les deux essais de validation.....	70
Fig. 39 : la comparaison du pourcentage d'erreur sur le débit de base pour les deux essais de validation.....	71

Liste des sigles

ABHT	Agence du Bassin Hydraulique du Tensift
CN	Curve Number
CEH	Centre des Études Hydrauliques
DPA	Direction Provinciale Agricole
DREF	Direction Régionale des Eaux et Forêts
DRPE	Direction de la Recherche et de la Planification de l'eau
ETP	Évapotranspiration
FSTG	Faculté des Sciences et Techniques-Guéliz
GIZ	Agence Allemande de Coopération Internationale
GR4J	modèle du Génie Rural à 4 paramètres Journaliers
GR3J	modèle du Génie Rural à 3 paramètres Journaliers
HEC	Hydrologic Engineering Center
HMS	Hydrologic Modeling System
HSG	Hydrologic Soil Group
LPEE	Laboratoire Public d'Essais et Études
MNT	Modèle Numérique de Terrain
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NRCS	Natural Resource Conservation Service
ORMVAH	Office Régional de Mise en Valeur Agricole du Haouz
PNABV	Plan National d'Aménagement des Bassins Versants
PNPI	Plan National de Protection contre les Inondations
RAS	River Analysis System
SIG	Système d'Information Géographique
SCS	Soil Conservation Service
SCM	Service de la Cartographie de Marrakech
SRM	Snowmelt Runoff Modeling
SWAT	Soil and Water Assessment Tool
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
TM	Thematic Mapper
USACE	United States Army Corps of Engineers
WMS	Watershed Modeling System

Résumé

Cette étude vise à faire une modélisation hydrologique type pluie-débit sur le bassin du Rhéraya, par le biais du modèle HEC-HMS configuré sous WMS. Après, ce modèle est utilisé pour prédire la réponse hydrologique du bassin à des scénarios de changement de climat et d'occupation du sol. La calibration du modèle a été faite sur deux phases, la première pour choisir les événements, le formalisme de la fonction de transfert et l'averse NRCS appropriés. La deuxième pour en déduire le jeu de paramètres optimisés qui est employé dans la validation.

Pendant la calibration, la fonction objective (erreur sur le débit de pointe) était nulle pour tous les événements. Pour la validation, elle l'était pour un seul événement. Toutefois, un problème de surestimation des volumes et du débit de base persiste malgré les corrections effectuées. Ce problème est lié essentiellement au manque de données de pluviographes.

En utilisant le jeu de paramètres optimisés, on a pu prédire l'impact des averses quantiles, des changements d'occupation du sol dû à l'urbanisation, la déforestation et le reboisement sur le débit de pointe et le volume du ruissellement. Vers la fin, on a reconfirmé que l'influence de l'occupation du sol diminue pour des orages extrêmes.

Mots clés : modélisation, Rhéraya, HEC-HMS, WMS, NRCS, changement d'occupation du sol, prédiction, orages extrêmes.

Abstract

This study aims to apply a hydrological modeling standard rainfall-runoff on the Rhéraya catchment, by the means of model HEC-HMS configured under WMS. Afterwards, this model is used to predict the hydrological response of the basin to scenarios simulating changes in climate and land use. The model calibration was made on two phases, the first to choose the events, the method of modeling direct runoff and the suitable NRCS rainfall distribution. The second to deduce from it the set of parameters optimized which is employed in the validation.

During the calibration, the objective function (Percent error in peak) was null for all events, for the validation stage, it was it only for one event. However, a problem of over-estimate of runoff volume and baseflow persist in spite of the corrections carried out, this problem is primarily related to the use of NRCS rainfall distribution.

By using the set of optimized parameters, we were able to estimate the impact of the storms quantiles, the changes in land use due to the urbanization, deforestation and the afforestation on the peak flow and the runoff volume. At the end, we reconfirmed that the influence of the land use in flow and runoff volume decreases for extremes storms.

Key words : modeling, Rheraya, HEC-HMS, WMS, NRCS, land use change, prediction, extremes storms.

Introduction générale

Au Maroc, et comme dans la plupart des pays où des problèmes de qualité et de quantité des ressources en eaux sont confrontés, la nécessité de remédier aux répercussions de nos actions anthropiques sur nos biens, n'est plus un choix mais une obligation, avant d'atteindre un point de non retour où ces problèmes deviendront irréversibles, incorrigibles voir même menaçant notre survie sur Terre. Saisissant l'ampleur de la catastrophe, on a proposé dans un premier temps des démarches pour la gestion et la préservation de ces ressources telles que la construction des barrages, la maîtrise de l'irrigation, l'instauration de lois réglementaires et pénalisantes. Après, et avec le développement industriel et l'arrivée des ordinateurs, on a fait appel à une approche plus rentable pas seulement en terme de compréhension du fonctionnement de ces ressources en eau mais aussi, dans la prédiction du comportement futur. Cette approche est la modélisation hydrologique.

En effet, parmi les différents types de modèles hydrologiques qui ont été conçu jusqu'à aujourd'hui, ceux de type pluie-débit qui reposent sur une description plus ou moins détaillée de l'état de surface du bassin versant à savoir l'occupation du sol (végétation, terrain nu, zone urbaine, ...), le type de sol (infiltration, rétention, ...) et la topographie, résident les plus réalistes si on veut vraiment refléter les conditions du bassin versant pour pouvoir l'étudier à fond. Entre autres, le modèle HEC-HMS prend en compte ces conditions du milieu, et permet, avec ses modules optionnels et ses formalismes diversifiés, de s'adapter aux exigences particulières de chaque contexte, y compris le contexte semi-aride marocain, où il a été largement utilisé dans le cadre du plan national de protection contre les inondations, ainsi que dans les études hydrologiques des ouvrages hydrauliques menées par les bureaux d'études nationaux.

A la lumière de ceci, et dans le cadre de mon projet de fin d'études, nous nous proposons d'appliquer ce modèle hydrologique sur le bassin versant de Rhéraya, afin de vérifier son applicabilité dans ce milieu montagneux connu par son hétérogénéité spatio-temporelle. En outre, nous allons essayer de prédire la réponse hydrologique future de ce bassin, suite à des scénarios de changement climatique par des averses quantiles, et d'autres suite à des changements dans l'occupation du sol et les types des sols, dans le but de sensibiliser les décideurs de l'impact des actions anthropiques, notamment le développement urbain et la déforestation excessive au niveau du Rhéraya sur le régime hydrologique.

Ainsi, le présent rapport s'articulera sur trois chapitres détaillant chacun une partie du travail réalisé :

- Chapitre 1 : il s'agit d'un aperçu bibliographique qui contient dans sa première partie un résumé des quatre études antérieures de modélisation hydrologique faites sur le bassin versant de Rhéraya, et une analyse de leurs points forts et faibles. La deuxième partie quant à elle évoque une description du logiciel WMS qui va nous servir comme plate-forme préliminaire à la modélisation, puis se concentre sur le modèle HEC-HMS de tous les cotés, allant depuis la définition de ses modules et les formalismes de calcul, jusqu'à détailler la structure HEC-HMS choisie : ses fonctions, ses variables, ses paramètres, ses avantages et ses limites et en achevant par une justification du choix à la fois du modèle et de sa structure préférée.
- Chapitre 2 : il traite l'étude hydro-géomorphologique du Rhéraya, et comporte : premièrement un aperçu général sur le bassin de point de vue géographique, géologique, hydrologique, climatologique et occupation du sol. Deuxièmement, nous passons à exposer les caractéristiques morphométriques du bassin que ce soit celles calculées automatiquement par le WMS, ou bien effectuées manuellement par un logiciel de SIG ou des formules. A la fin du chapitre, l'action sera mise sur l'étude du régime pluviométrique par le biais des deux

stations du bassin y compris la détermination des averses quantiles qui seront utilisés dans le chapitre 3, puis sur l'étude du régime hydrométrique par l'analyse des débits à la station de l'exutoire.

- Chapitre 3 : il traite dans une sa première partie les différentes étapes de la modélisation du bassin de Rhéraya par HEC-HMS, tout en commençant par la préparation des données d'entrée du modèle, l'élaboration du modèle pluie-débit, ensuite l'étape de calibration, puis la validation, sans oublier l'analyse des résultats obtenus lors de la calibration et la validation. Ensuite, il évoque dans sa deuxième partie un essai d'exploitation du modèle à des fins prévisionnelles. En fait, dans un premier temps nous allons voir comment le bassin versant étudié va se comporter hydrologiquement en réponse aux averses quantiles préalablement calculées dans le chapitre 2, ensuite, comme autres scénarios, nous estimerons l'impact des actions anthropiques matérialisées par des changements dans l'occupation du sol sur les hydrogrammes enregistrés à l'exutoire

Pour conclure, nous proposerons des recommandations et perspectives pour les futures études de modélisation sur le bassin de Rhéraya, que nous n'avons pas pu faire faute de moyens ou de temps.

Chapitre 1 : Synthèse bibliographique des modèles de simulation hydrologique

A. Les modèles appliqués dans le bassin versant de Rhéraya

La première étude officielle de modélisation du bassin versant de Rhéraya a été celle effectuée par A. Chaponnière en 2005, dans le cadre de sa thèse de doctorat où elle était amenée à étudier le fonctionnement hydrologique de ce bassin en utilisant le modèle SWAT. Ensuite et à la même année, A. DUCLAUX a réappliqué le SWAT sur cinq sous bassins versants de Tensift y compris le Rhéraya, tout en ajoutant plus de détails sur la caractérisation physique. Un an après, deux autres études ont été élaborées, la première réalisée par T. TROUILLET, où il a choisi de mettre en œuvre le modèle GR4J pour détourner quelques problèmes rencontrés par le SWAT dans la modélisation, la deuxième établie par J. Leroux en utilisant le modèle SRM, lors de son étude où il voulait démontrer l'apport de la télédétection de la dynamique du manteau neigeux dans la modélisation hydrologique.

Dans ce qui suit, on va exposer les caractéristiques de chaque modèle, ses apports, ses défaillances, ses résultats et ses problèmes confrontés.

I. Le modèle SWAT

1. Étude de Chaponnière

Le SWAT est un modèle semi-distribué, déterministe à base principalement physique, développé et amélioré plusieurs fois par différents auteurs [9]. Ce modèle a été choisi par Chaponnière vu les avantages qu'il offre tels que la prise en compte du gradient altitudinal et le module neige, ainsi que sa capacité de restitution basée sur l'intégration de l'apport nivale, de surface et profond, dans l'écoulement. Ces critères sont supposés, par l'auteur, pouvoir déjouer l'effet de la faible instrumentation du bassin de Rhéraya et de l'hétérogénéité spatio-temporelle de son climat.

La simulation était continue à pas de temps journalier et prend en considération la contribution du manteau neigeux, de l'écoulement de surface et du compartiment profond dans l'hydrogramme. Chaponnière n'a pas détaillé la caractérisation du bassin versant ni de point de vue occupation du sol, ni types des sols, et s'est limitée à trois classes chacun. Les données pluviométriques et hydrométriques utilisées sont celles de la station de l'exutoire pour les précipitations et les débits, et la station de Takerkoust pour les températures.

Après une étude de sensibilité des paramètres du modèle, l'auteur a isolé ceux ayant une influence considérable sur la restitution, afin de palier aux problèmes de sur-paramétrisation et d'équi-finalité défaut majeur du SWAT ([9], [12]).

En utilisant ces paramètres, et lors de la phase de calibration sur une année hydrologique incomplète [12], la forme générale de l'hydrogramme observé est reproduite par le modèle avec quelques imperfections expliquées par la non représentativité des données pluviométriques de l'exutoire et par les prélèvements au fil de l'eau [9], et l'efficacité était de 0.83 [12]. La phase de validation quant à elle, était loin d'être aussi efficace en matière des résultats que l'étape de calibration, et on voit une baisse très significative de l'efficacité du modèle causé par un jeu de paramètres non flexible aux changements interannuels dérivé d'un faux choix de l'année de calibration [12], ce qui conduit Chaponnière à réclamer l'impossibilité de parler d'une validation du modèle SWAT sur le Rhéraya.

Enfin, elle conclue que malgré l'apport indiscutable du modèle de forçage climatique dans l'estimation des données climatiques du Rhéraya, et ensuite dans l'amélioration des résultats, mais, la complexité du modèle, sa sur-paramétrisation, sans oublier l'hétérogénéité spatio-temporelle et la qualité et quantité des données font que les résultats obtenus ne sont pas à la hauteur des attentes.

2. Étude de Duclaux

Dans le but de valoriser et poursuivre les travaux réalisés par Chaponnière [12], Duclaux reprend la modélisation sur quatre autres sous bassins de Tensift en plus de la Rhéraya, mais en détaillant de plus l'occupation du sol

De ce fait, dans un premier temps il a refait la même calibration avec les mêmes fichiers d'entrée que Chaponnière, mais cette fois-ci sur une année complète, le résultat était moins performant que son précédent, avec une efficacité qui ne dépasse pas 0.73. L'analyse de l'hydrogramme résultant lui a permis d'en déduire quelques constats à savoir :

- Dans l'attente du remplissage du réservoir, condition prédéfini par le SWAT, les premiers événements de la période de calibration n'induisent aucune oscillation du débit simulé.
- Le modèle a pu reconnaître la période des précipitations solides du mois de mars de l'année en question.
- L'apport de la composante profonde au débit semble être sous-estimé dans la restitution.

Pour l'essai de validation, l'efficacité est toujours détériorée même s'il intègrait sa nouvelle caractérisation physique du bassin étudié, l'explication qu'il propose à ceci est que l'année choisie par Chaponnière pour tester la sensibilité et la calibration du modèle, rend à la fois les paramètres sensibles isolés par l'analyse de la sensibilité et leurs valeurs optimales attribuées lors de la calibration, non résistants aux changements interannuels [12]. Pour vérifier son raisonnement, Duclaux a refait l'analyse de sensibilité et la calibration à sa façon : mit en œuvre sa caractérisation physique plus détaillée et procède à une calibration interannuelle sur trois années hydrologiques, l'année de calibration de Chaponnière incluse. Les résultats qu'il obtient sont résumés comme suit [12]:

- Pour l'année choisie par Chaponnière : efficacité positive
- Pour les deux autres années : efficacité négative

Confronté à ces résultats, Duclaux remet en cause l'origine de la mauvaise efficacité du modèle au choix de l'année de calibration, il fait appel alors à une nouvelle calibration modérée où interviennent sa caractérisation physique du bassin versant et les gradients climatiques qu'il a eus, additionnés aux modules neige et compartiment profond de Chaponnière. Cependant, la faible efficacité qu'il en découvert l'ont poussé à soupçonner trois composantes du modèle à savoir : le compartiment profond qui est en désaccord complet avec l'étude géochimique que Chaponnière a effectuée lors de sa thèse [28], le module neige qu'elle juge satisfaisant à condition d'une calibration robuste [28] et l'ETP. Ainsi, et après l'analyse de quelques hydrogrammes simulés, Duclaux déclare que tous les modules de SWAT semblent poser des problèmes, et finit avec les mêmes conclusions que Chaponnière concernant les motifs des mauvais résultats qu'il obtient chaque fois.

II. Le modèle GR4J

Cette troisième tentative de modélisation réalisée par T. Trouillet avait une question maitresse à laquelle il fallait répondre : Est-ce que la mise en service d'un modèle conceptuel simple tel que GR4J pourra aboutir à des résultats mieux satisfaisants pour ce bassin mal renseigné de Rhéraya ?

Le GR4J est un modèle conceptuel, global à quatre paramètres. Depuis sa création en 1989 par Edijatno et Michel, il n'a pas cessé d'être amélioré pour répondre aux exigences des contextes climatiques variés [28]. Il nécessite comme données d'entrée les précipitations, l'ETP et le débit observé, et opère sur le principe de la fonction de production qui transforme la pluie brute en pluie nette en y retranchant l'ETP, et par la suite le volume sera transformé en débit par la fonction de routage.

En passant à la modélisation, et lors de l'étape de calibration, Trouillet obtenait des résultats médiocres en termes de la fonction critère de Nash qui vaut 44.4. Alors, il décida de greffer un module neige au GR4J pour simuler l'influence du couvert neigeux sur le régime hydrologique annuel du bassin versant de Rhéraya.

Toutefois, certes le critère de Nash a connu une légère amélioration (52.2) après ce renforcement, mais l'auteur révéla que le module ne parvient pas à simuler la fonte lente et progressive que l'on observe en réalité [28]. Pour ce qui est de l'étape de validation, Trouillet disait que c'est irréalisable faute de données qui ne sont disponibles que sur deux années.

En conclusion, l'auteur liste les mêmes causes aux résultats médiocres eus pendant la calibration que ceux proclamées par les deux études antérieures à part le point de la sur-paramétrisation.

III. Le modèle SRM

Cette dernière étude n'avait pas comme enjeu direct la modélisation du Rhéraya, mais plutôt de vérifier l'apport de la télédétection de la dynamique du manteau neigeux dans la modélisation hydrologique, et donc l'auteur a choisi le bassin versant de Rhéraya vu son caractère nivale très prononcé parmi les sous bassins de Tensift. En fait, cette étude essayait, sans doute, de résoudre le problème rencontré par les trois études précitées concernant le module neige qui n'était pas en mesure de reproduire de manière réaliste (cas de l'étude GR4J) et logique (cas de l'étude SWAT) la contribution du manteau neigeux dans l'écoulement au sein du Rhéraya, par conséquent l'étude propose premièrement une caractérisation accentuée du manteau neigeux, qui sera utilisé ensuite par un modèle conçu essentiellement pour des bassins où le compartiment neigeux est le majeur facteur du ruissellement [17].

En effet, après avoir extrait la couverture neigeuse par des méthodes de télédétection, J. LEROUX l'intégrerait dans le modèle nommé SRM et verra si les résultats vont s'améliorer par rapport aux études précédentes ou pas. Pour se faire, l'auteur utilisait le modèle conceptuel SRM, développé initialement par Martinec and Rango en 1975 pour des petits bassins européens [17], mais grâce à l'apport de la télédétection dans la quantification de la dynamique de la couverture neigeuse, le SRM a été appliqué aux bassins versants de grandes tailles [17].

Sur la période calibration, LEROUX remarque une très grande compensation entre les paramètres, mais en gros, le SRM montre une efficacité de $R^2=0.46$, et un coefficient de ruissellement qui varie entre 0 et 0.3 qui laisse penser soit aux pertes remarquables dans ce bassin, soit aux précipitations surestimées à cause de la variabilité spatio-temporelle [17]. En revanche, le modèle était loin d'être validé en considération de la chute significative de l'efficacité à $R^2 = -0.04$ [17].

Ensuite, pour augmenter l'efficacité, l'auteur ajoute deux modifications au code du modèle afin de l'ajuster au climat semi-aride du Rhéraya :

- La première sur la fonte de la neige pour qu'elle soit en fonction de la température de la neige et non pas de l'air et donc éviter la surestimation de la contribution de la neige dans le ruissellement.
- La deuxième pour relier le coefficient de ruissellement aux stocks souterrains emmagasinés durant la saison pluvieuse.

Comme résultats issus de cette modification, la valeur calibrée du coefficient du ruissellement devient acceptable pour un bassin semi-aride. Le modèle a pu éliminer la surestimation de l'apport neigeux dans l'écoulement et l'efficacité a augmenté pour les deux phases de calibration et validation [17].

Malgré toutes ces modifications, il y a peu de succès concernant l'estimation des débits accumulés même si la télédétection de la dynamique du manteau neigeux permet de baisser la surestimation des débits annuels [17].

En conclusion, LEROUX remet en question la qualité des données qu'il pense qu'ils ont détériorées les résultats de sa modélisation.

IV. Conclusion

Après ce bref aperçu sur les études de modélisation qui sont effectuées dans le bassin de Rhéraya, nous pouvons dire que les trois modèles n'ont pas pu être validés dans le contexte semi-aride hétérogène du Rhéraya. Cependant, chacun d'eux vient corriger un problème que l'autre a rencontré pour améliorer la qualité des résultats, sans jamais arriver à un modèle représentatif du milieu dont les résultats seront fidèles pour étudier le fonctionnement, prédire le comportement ou gérer les ressources en eaux du Rhéraya.

Néanmoins, nous constatons une chose commune entre toutes ces études, c'est la problématique de la donnée qui rend la convergence des modèles vers des résultats pertinents très difficile voir impossible. Certes, ce problème touche beaucoup plus les modèles à base physique comme SWAT qui nécessitent une bonne instrumentation du bassin sujet d'étude, mais, il s'est avéré, d'après ces études, que même les modèles conceptuels type GR4J et SRM sont aussi concernés, et ceci car dans le cas de Rhéraya ce sont les données de base (précipitations et débit) qui sont affectées soit sur le volet quantité en relation avec le modeste réseau de mesure, soit sur le plan qualité en rapport surtout avec la mesure de débit et l'élaboration des courbes de tarage mentionnés par plusieurs auteurs qui ont travaillé là-dessus ([9], [12], [21], [28], ...).

B. Le modèle HEC-HMS sous WMS

I. La description du logiciel WMS

1. C'est quoi WMS ?

Le WMS est une plate-forme performante de modélisation hydrologique et hydraulique, créée pour la première fois par l'USACE en collaboration avec le laboratoire de recherche en modélisation environnementale installé au sein de l'université de Brigham Young (États Unis). Aujourd'hui, c'est l'Aquaveo LLC qui détient ses droits de développement [11].

Son entrée officielle au Maroc était en 2011, par le DRPE avec le concours de la GIZ pour répondre au besoin primordial à des outils de prévention contre les dégâts des biens et des personnes générés par les crues et les inondations. A ce titre, la DRPE le propose à trois agences du bassin hydraulique pour leur constituer un outil commun afin de traiter les aspects liés à la prévision hydraulique et hydrologique.

2. Que peut faire WMS ?

Les tâches que ce logiciel peut aider à accomplir sont très diversifiées, mais ce qui l'a rendu sollicité par la DRPE c'est qu'il est apte à supporter la modélisation hydrologique et hydraulique des modèles largement utilisés par les établissements publics et privés marocains pour réaliser ou valider leurs études hydrologiques et hydrauliques, à savoir le HEC-1 et sa nouvelle forme HEC-HMS pour l'hydrologie et le HEC-RAS pour l'hydraulique.

En outre, son organisation sous forme de modules permet d'accomplir chaque phase de la préparation du modèle de façon distincte, alors que sa compatibilité avec ArcGIS permet à son utilisateur d'importer ou d'exporter les couches de données exigées par le modèle utilisé.

Par ailleurs, la panoplie d'outils que possède le logiciel WMS permet d'effectuer avec excellence les opérations suivantes :

- Automatiser le processus de caractérisation physique des bassins (délimitation, morphométrie,...) ;
- Calcul et extraction des données d'entrée pour les modèles hydrologiques et hydrauliques à partir des cartes et donnée SIG (MNT, occupation du sol, Sols, Images,...) ;
- Interface graphique simple à manipuler pour une gamme de modèles hydrologiques et hydrauliques diversifiée, afin de préparer leurs fichiers de simulations ;
- Exécution des simulations de la majorité des modèles hydrologiques et hydrauliques qu'il contient.

3. Les apports du WMS dans notre étude

Dans notre cas, le processus de modélisation est partagé en deux parties, la première a comme objectif la création des fichiers de simulation et sera complètement faite sur le logiciel WMS, la deuxième partie concerne l'exécution des simulations à partir des fichiers issus de la première partie, et ceci va être réalisé entièrement à l'intérieur du logiciel HEC-HMS. Donc, l'utilité de la plate-forme WMS dans cette étude est de préparer les fichiers de simulation, et ceci va se faire en cinq étapes (figure 1) :

- A partir du fichier MNT brute, nous allons procéder à un traitement pour le rendre exploitable, puis nous établissons le réseau hydrographique et la délimitation du bassin versant, et finalement nous calculons les paramètres de forme physiques (surface, pente,...) et hydrologiques (T_c , S_t , Lag ,...) indispensables pour la fonction de transfert du modèle ;
- A partir de la combinaison des deux cartes d'occupation du sol et des sols que nous avons préparées auparavant, et qui sont importées vers le WMS, nous allons pouvoir calculer un paramètre d'état du bassin nommé CN nécessaire à la fonction de production ;
- Saisir les informations concernant les précipitations : hauteur et type d'averse ;
- Saisir les informations concernant le module débit de base (Q_b , R_c et T_d) et compléter les entrées de la fonction de production (la et % d'imperméable) ;
- Introduire la configuration de la simulation : date et heure de début, date et heure de fin et le pas de temps.

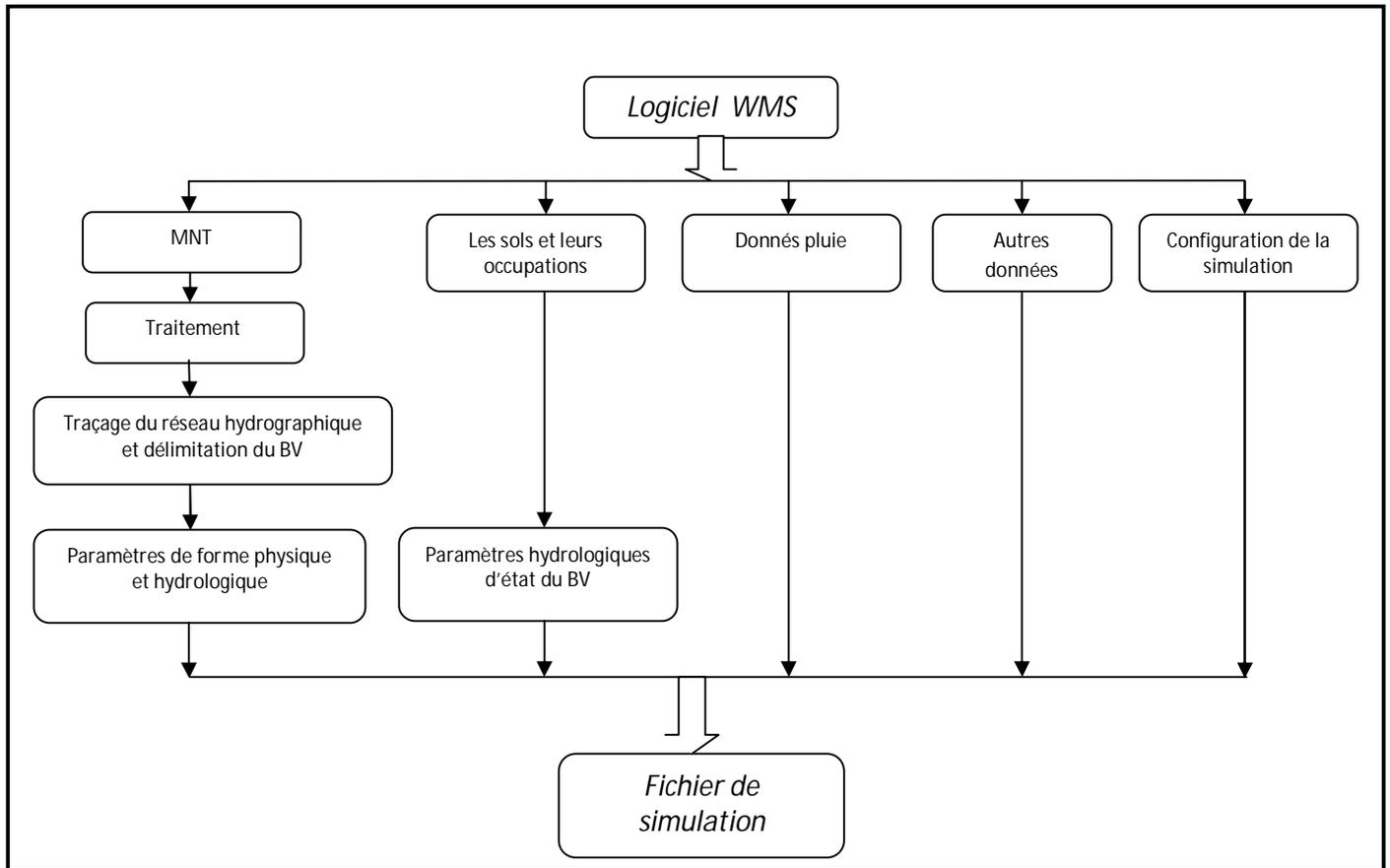


Fig. 1: L'utilité du logiciel WMS dans l'étude de modélisation de Rhéraya

II. La description du modèle HEC-HMS

Dans cette rubrique, l'accent sera mis sur le modèle HEC-HMS dont nous allons se servir pour la modélisation du Rhéraya, de point de vue générale, en traitant des points tels que : sa création, son mode de fonctionnement, ses capacités, ses modules, ses formalismes,etc.

Notez bien que cette description ne portera que sur l'aptitude de modélisation événementielle du HEC-HMS, vu que c'est elle qui nous intéresse dans notre étude.

1. Les caractéristiques générales du modèle

Le HEC-HMS est un système complet de modélisation hydrologique des bassins versants qui permet de simuler les processus pluie-débit, depuis les précipitations brutes jusqu'au débit total de ruissellement à un temps donné, à un point donné du bassin étudié. Sa conception a été lancée par l'USACE pour évoluer vers une nouvelle génération du logiciel qui va remplacer son antécédent le HEC-1, tous appartenant à la fameuse gamme HEC (HEC-RAS, HEC-GeoRAS, HEC-GeoHMS, ...).

En effet, afin de s'adapter aux différents contextes d'études, ce modèle opère selon le principe de tâches distinctes, c'est-à-dire qu'il simule le bassin à un système uniforme composé de plusieurs composantes assurant chacune de représenter un aspect particulier du processus pluie-débit et agissant successivement pour produire l'hydrogramme de l'écoulement. Pour y parvenir, chaque tâche est confiée à un formalisme d'un module choisi librement par l'utilisateur en fonction de ses besoins et ses données, ainsi, en mutant les formalismes d'un module, le HEC-HMS peut changer de type de modèle, par exemple passer d'un modèle événementiel à un modèle continu, de global au distribué, d'empirique au conceptuel et ainsi de suite.

Le HEC-HMS a été largement employé et validé dans plusieurs bassins versants à climats contrastés à travers le monde ([6], [3], [14], [19], [26], [27],...). Au Maroc, il a été utilisé lors du PNPI [22] pour la prévention contre les dégâts des inondations dans les zones potentielles à cet aléa, ainsi que par les bureaux d'études, sur les bassins de moyenne et grande taille, pour leurs études hydrologiques de détermination des quantiles de débit.

2. Le processus de fonctionnement

Comme nous venons de le mentionner ci-dessus, le HEC-HMS attribue à chaque module une étape de la transformation pluie-débit, et c'est la combinaison des résultats des modules les uns aux autres qui donne l'hydrogramme final. En général, dans le cas d'une modélisation événementielle, c'est l'enchaînement schématisé sur la figure suivante qui est suivi à la lettre pour aboutir au débit de l'exutoire :

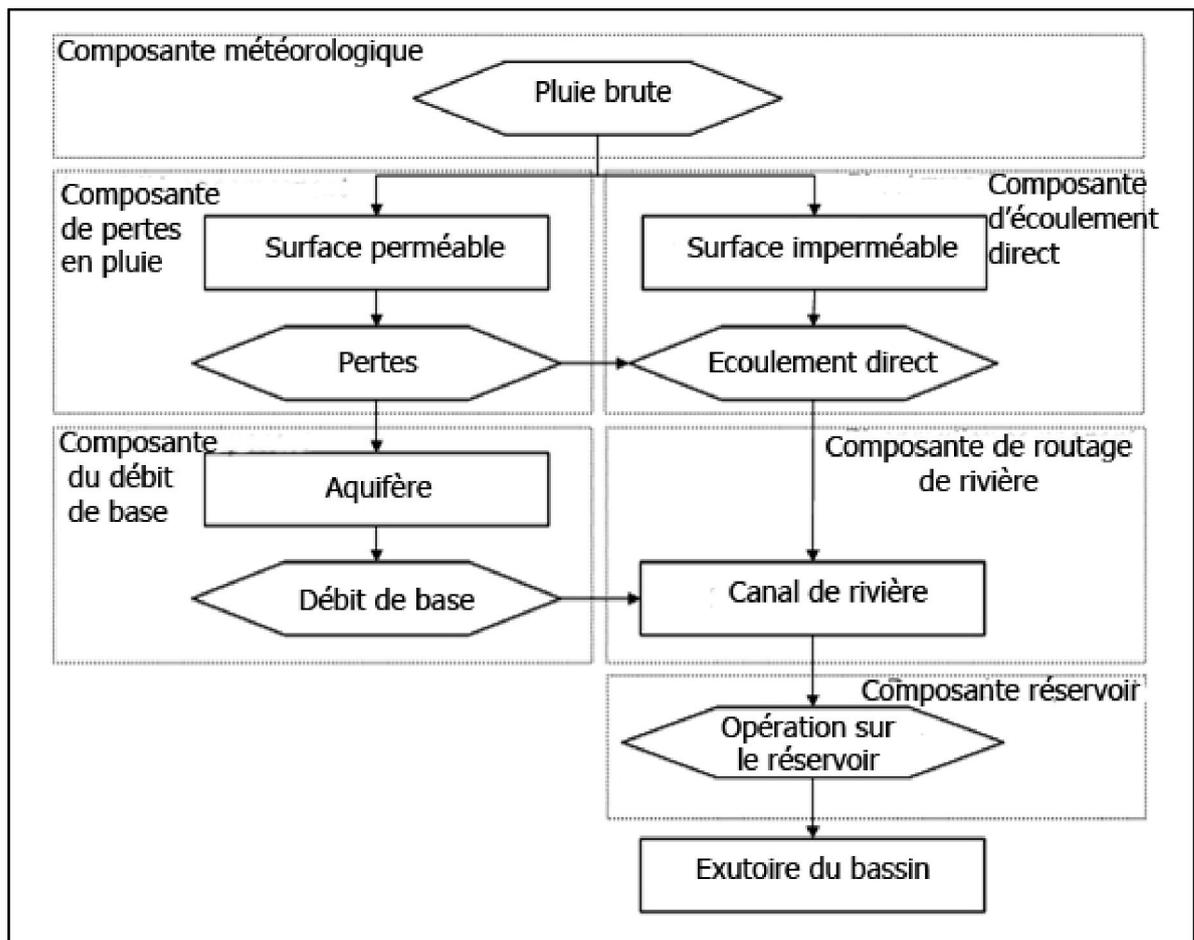


Fig. 2: L'enchaînement d'intervention des différentes composantes dans la structure événementielle du modèle HEC-HMS [10]

Le module météorologique est la première composante à agir, elle vise à répartir sur la surface du bassin, de manière uniforme dans le temps et l'espace, la hauteur des précipitations brutes saisie. Ensuite, le devenir de ces précipitations diffère selon la perméabilité de la surface :

- Pour les surfaces perméables, les précipitations brutes vont subir des pertes suite à des phénomènes d'interception, d'infiltration et d'évapotranspiration, ces pertes seront calculées par la composante de perte en pluie régie par la fonction de production, les précipitations nettes qui en résultent contribuent simultanément à l'écoulement direct et à l'écoulement souterrain dans l'aquifère.

- Pour les surfaces imperméables, les précipitations sont exonérées de toute perte et rejoignent immédiatement la composante d'écoulement direct où elles se transformeront en écoulement de surface.

Après, l'écoulement de surface et l'écoulement de sub-surface provenant de la composante du débit de base, intégreront tous les deux le canal de la rivière où se manifesteront les phénomènes d'atténuation et de translation contrôlés par la composante de routage. Finalement, l'effet des constructions hydrauliques naturelles ou artificielles (réservoir, retenue de barrage, dépression, lac, ...) est déterminé par la composante du réservoir.

3. L'organisation du modèle

Pour faciliter la construction d'un modèle complet qui répond aux circonstances spécifiques de chaque étude de cas, il est strictement nécessaire que le modèle se compose d'au moins quatre modules et deux fonctions essentiels à la modélisation par HEC-HMS, deux autres modules de plus si on veut affiner nos résultats et nos analyses. Ces constituants sont classés, ci-après, par ordre de priorité de conception.

a. Le module structural du bassin

Il consiste à schématiser le bassin versant étudié en éléments fondamentaux connectés entre eux sous forme d'un arbre ramifié. Le HEC-HMS offre l'opportunité de représenter toutes les entités naturelles ou artificielles installées dans un bassin et qui influencent le processus de transformation pluie-débit, allant depuis les sous bassins, les exutoires jusqu'aux canaux de rivières et les canaux de diversion d'eau, en passant par les réservoirs, les retenues de barrages,...etc. Dans ce qui suit, on cite ces éléments et leurs rôles dans la représentation de l'état du bassin versant :

- L'élément « Subbassin » : matérialise le bassin si la modélisation est globale, et les sous bassins si on opte pour une modélisation semi-distribuée. Parmi ses attributs de base : la surface, la fonction de production associée et la fonction de transfert associée.
- L'élément « Reach » : représente le plus souvent la rivière, et sert à faire la connexion entre les autres éléments. L'information de base attachée est la fonction de routage.
- L'élément « Reservoir » : décrit les réservoirs, les retenues de barrage,...etc. ses caractéristiques attribués permettent de définir les conditions stockage-déstockage.
- L'élément « Source » : permet d'ajouter des stations de mesure de débit ou de représenter les conditions aux limites.
- L'élément « Jonction » : utilisé pour combiner aux moins deux débits véhiculés par deux éléments, comme dans le cas d'une confluence entre deux rivières.
- L'élément « Diversion » : représente des endroits où se produit des prélèvements d'eau, c'est le cas par exemple des seguias et des canaux de diversion.
- L'élément « Sink » : simule l'exutoire des sous bassins versants.

Dans notre cas, cette étape sera totalement et automatiquement réalisée par le logiciel WMS lors de la phase de caractérisation physique.

b. Le module météorologique

Il a comme objectif de répartir les précipitations saisies sur toute la surface étudiée. Pour se faire, le HEC-HMS dispose de huit méthodes différentes, à choisir entre elles en fonction des objectifs et de la disponibilité des données, mais elles ont presque toutes la spécificité de distribuer la hauteur de pluie de manière homogène dans le temps et dans l'espace. Ces méthodes sont :

- « Specified Hyetograph » : hyétogramme spécifié, c'est l'utilisateur qui se charge de saisir son hyétogramme dont il dispose.
- « Frequency Storm » : averse de fréquence, utilisé pour développer un événement de précipitation où les hauteurs pour différentes durées dans l'averse ont une probabilité cohérente.
- « Gages weights » : stations pondérées, utilise un coefficient de pondération à chaque station de mesure de précipitations.
- « Inverse distance » : l'inverse de distance, calcule la moyenne de pluie par l'application de la méthode d'inverse carré des distances pour attribuer à chaque station un coefficient de pondération.
- « Gridded precipitations » : précipitations en maille, permet d'introduire les précipitations sous forme de grille de mesure.
- « Standard Project Storm » : averse de projet standard, répartie une hauteur de précipitations donnée sur un intervalle de temps spécifié.
- « SCS Storm » : averse SCS, applique à la hauteur de précipitations journalière une des distributions d'averse de projet définies par le SCS. Cette méthode sera exposée en détails dans le troisième chapitre.

Le choix de telle ou telle méthode est imposé par l'objectif de la modélisation (détermination du débit de projet, étude de fonctionnement hydrologique du bassin versant,...), la quantité (nombre de stations, période de mesure,...), la qualité (pluviomètres, pluviographes, lacune de mesure,...) des données de précipitations et le type de modélisation envisagé (distribuée, globale).

En addition à tout ceci, le modèle possède la capacité d'intégrer l'évapotranspiration et la contribution de la fonte de neige en cas de modélisation continue.

c. Le module de la fonction de production

La fonction de production assure la transformation de la pluie brute en pluie nette en y retranchant toutes les pertes éventuelles causées par l'interception (obstacles, végétation, cuvettes ...) l'infiltration et l'évapotranspiration (en cas de modélisation continue).

La fonction de production du modèle HEC-HMS distinguent entre une surface perméable et imperméable. La première est considérée comme le champ d'intervention de la fonction, afin de ne pas surestimer les pluies qui participent réellement dans le ruissellement appelées pluies nettes. La deuxième quant à elle, est supposée non affectée par les pertes en pluie surtout si elle est connectée au réseau hydrographique, elle est reconnue dans le modèle par le pourcentage d'imperméable du bassin. Il existe six formalismes pour représenter cette fonction à savoir :

- « Initial and Constant Loss » : pertes initiales, à taux constant. Ce formalisme considère un taux maximum de pertes constant, et une perte initiale à saturer avant que le ruissellement commence [7].
- « Deficit and Constant Loss » : à déficit et à taux de perte constant. Une variante du premier formalisme avec une possibilité de régénération des pertes initiales durant une période sans pluie au cours de l'événement modélisé [7].
- « Green and Ampt Loss » : formalisme qui s'intéresse plutôt aux pertes par infiltration, cette méthode repose sur l'équation de Darcy et la conservation de masse.
- « Soil Moisture Accounting Loss » : formalisme très poussé qui calcule les "pertes" par évapotranspiration, infiltration et percolation profonde selon le principe de couche de stockage.

- « SCS Curve Number Loss » : formalisme qui relie les pertes en pluie à l'occupation du sol et le type de sol et l'humidité antécédente. Cette méthode sera détaillée davantage dans la section de la combinaison modulaire choisie.
- « Gridded SCS Curve Number Loss » : format maillé du formalisme précédent.

La sélection de l'un de ces formalismes est une étape délicate qui va influencer sans doute les sorties du modèle. Une toute première contrainte est que le choix peut être dicté par les formalismes utilisés pour les autres modules (module météorologique, fonction de transfert, ...), la deuxième étant la nature de données disponibles (sous forme de maille, détaillées, plusieurs variables,...).

d. Le module de la fonction de transfert

Une fois la pluie participante au ruissellement calculée, c'est le rôle de la fonction de transfert qui débute. Elle permet de déterminer l'hydrogramme résultant de la pluie nette. Le modèle offre six formalismes pour y converger :

- « User-Specified Unit Hydrograph » : Hydrogramme unitaire spécifié par l'utilisateur. Ce formalisme consiste à déterminer l'hydrogramme unitaire à partir de données complètes d'un événement pluvieux [7].
- « Snyder Unit Hydrograph » : Hydrogramme unitaire de Snyder.
- « Kinematic Wave » : onde cinétique. Reconnait les versants du bassin comme des canaux à surface libre dont le débit entrant correspond à la pluie nette.
- « SCS Unit Hydrograph » : Hydrogramme unitaire de la SCS. Résultant de la combinaison des hydrogrammes de plusieurs bassins versants. Ce formalisme sera détaillé davantage dans la section de la combinaison modulaire choisie.
- « Clark Unit Hydrograph » : Hydrogramme unitaire de Clark. Prend en compte les deux phénomènes de translation et d'atténuation. Ce formalisme sera détaillé davantage dans la section de la combinaison modulaire choisie.
- « ModClark » : forme maillée du dernier formalisme.

L'USACE fournit quelques recommandations pour faciliter le choix du formalisme le mieux adapté [30] :

- Disponibilité de données pour la calibration des paramètres ou l'estimation de leurs valeurs : connaissant que la source optimale des paramètres de ces formalismes est la calibration, la possibilité d'exécuter cette opération s'avère fructueux pour les hydrogrammes unitaires. Cependant, si cette possibilité n'est valide, la méthode de l'onde cinétique semble être la plus appropriée mais à condition d'avoir les données mesurées et observées nécessaires.
- La validation des hypothèses du formalisme sélectionné : vérifier que les hypothèses fixées pour la méthode ne sont pas violées, sinon le risque d'aboutir à des résultats aberrantes est potentiellement présent.

e. Le module du débit de base

Celui-ci est l'un des deux modules complémentaires du modèle, à défaut duquel le HEC-HMS peut tourner, mais sa présence améliore la compréhension des mécanismes qui contrôlent le ruissellement dans le bassin sujet d'étude.

Le débit de base est la contribution du réservoir souterrain dans l'écoulement, sa connaissance est importante pour modéliser la récession de l'hydrogramme avant et après la pointe de débit et pour mieux estimer le volume de crue. 3 formalismes sont proposés par le modèle :

- « Constant Monthly » : Constante mensuelle. Il considère l'écoulement souterrain comme fixe pendant des durées d'un mois. Ce débit de base mensuel est donc ajouté au ruissellement direct issu des précipitations nettes. Cette méthode est très simple, mais non adaptée au contexte semi-aride où la variation des conditions de saturation des bassins versants se fait en moins d'un mois.
- « Linear Reservoir » : Réservoir linéaire. Il simule le stocke souterrain à un réservoir, ainsi il est toujours associé à la fonction de production type SMA.
- « Recession » : utilise une récession exponentielle du débit de base. Elle est utilisée pour les bassins où les volumes de crue sont influencés par les événements pluvieux [27]. Ce formalisme sera détaillé davantage dans la section de la combinaison modulaire choisie.

f. Le module de routage

C'est le deuxième des deux modules complémentaires, il permet de calculer un hydrogramme en aval du bassin versant, connaissant l'hydrogramme amont. Tous ces formalismes utilisent les équations de continuité et de quantité de mouvement pour la simulation [30].

- « Lag » ;
- « Muskingum » ;
- « Modified Puls » ;
- « Kinematic-wave » ;
- « Muskingum Cunge ».

g. La fonction objective

Elle mesure la qualité de l'ajustement de l'hydrogramme simulé à l'hydrogramme observé que ce soit en termes de débit, de volume ou du temps. Le HEC-HMS en compte 7 fonctions objectives à savoir :

- « Peak weighted RMS error » : modification de la fonction objective largement utilisée qui est l'erreur sur la racine moyenne des carrés de débit. Cette méthode donne plus de poids aux débits en dessus de la moyenne et moins de poids aux débits en dessous.
- « Sum of squared residuals » : la somme des résidus au carré, attribue plus de poids aux larges erreurs et moins aux petites erreurs.
- « Sum of Absolute Residuals » : la somme des résidus absolus, qui ne différencie pas entre les erreurs larges et celles restreintes.
- « Percent Error in Peak Flow » : le pourcentage d'erreur sur le débit de pointe, qui se focalise sur l'ajustement des débits de pointe.
- « Percent Error in Volume » : le pourcentage d'erreur sur le volume, qui se focalise sur l'ajustement des volumes de ruissellement.
- « RMS Log Error » : utilise l'erreur sur la moyenne de la racine carrée des log des débits pour mettre en phase les débits faibles et forts.
- « Time weighted » : donne du poids aux erreurs proches de la fin de l'événement et moins aux erreurs du début.

Le choix de telle ou telle fonction est dicté par la problématique étudiée et/ou les objectifs de la modélisation. Par exemple, si on est amené à faire une délimitation des zones inondables, la fonction objective sur le volume est appréciée, si par contre l'objectif étant de déterminer le débit de projet d'un ouvrage quelconque, la fonction objective conseillée est celle jouant sur le débit de pointe. De l'autre côté si on est en présence d'une modélisation continue pour comprendre le fonctionnement hydrologique d'un bassin, il sera préférable d'opter par exemple à la première fonction qui va s'intéresser plutôt aux grands pics de débits. Ainsi, on choisit la fonction qui nous aidera à résoudre notre problématique et atteindre nos objectifs.

h. La fonction d'optimisation automatique

Elle sert à rechercher, sans intervention de l'utilisateur, le jeu de paramètres optimal donnant à la fonction objective sa valeur la meilleure possible. Pour exécuter cette tâche, le HEC-HMS propose 2 méthodes :

- « Univariate Gradient » : le gradient uni-varié, ajuste un seul paramètre à la fois en gardant les autres constants.
- « Nelder et Mead » : utilise une approche qui consiste à optimiser tous les paramètres simultanément.

Chacune a les paramètres suivants :

- La tolérance : détermine la valeur de changement de la fonction objective en dessous de laquelle l'optimisation des paramètres s'arrête.
- Maximum d'itérations : détermine le nombre maximal de jeux de paramètres à essayer avant d'arrêter l'optimisation.

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.

En conclusion, on peut dire que la diversité des formalismes dont dispose HEC-HMS, le positionne en tête des modèles les plus robustes dans la simulation des ruissellements au sein du bassin, les plus complets dans l'intégration des différentes composantes d'écoulement et les moins exigeants de point de vue données d'entrée. En outre, sa diversité en matière de combinaisons modulaires possibles, laisse à son utilisateur la capacité de l'adapter à ses données, ses objectifs, ses besoins mais surtout à son expérience.

III. La structure du modèle HEC-HMS choisie

Dans cette section, nous allons évoquer précisément la combinaison modulaire choisie pour modéliser le Rhéraya, en expliquant ses concepts de base, en citant ses variables et ses paramètres et la façon dont nous allons les estimer et en listant ses avantages et ses limites, sans oublier la justification du choix à la fois du modèle et de la combinaison modulaire.

1. Le type de modélisation : événementielle

Malgré qu'on le considère comme étant le bassin le mieux instrumenté de Tensift, avec un réseau de mesure composé de : neuf pluviomètres, deux pluviographes, une station hydrométrique, deux stations météorologiques à Aremd et Oukaimeden, le bassin versant de Rhéraya reste encore mal renseigné, non pas parce que le réseau n'est pas aussi représentatif, mais parce que l'accès à l'ensemble de sa base de données n'était pas possible lors de cette étude vu le caractère privé de 80% de ces stations. Donc, heurté à cette réalité, où l'accès n'était ouvert

en plus de la station hydrométrique qu'à trois stations pluviométriques et sans aucune information sur les stations météorologiques, nous avons décidé de laisser à part l'idée de la modélisation continue avec tout l'apport qu'elle peut constituer dans la compréhension du fonctionnement hydrologique du Rhéraya, et de s'orienter – pour le moment - vers une modélisation événementielle qui elle aussi va être confrontée au problème d'absence des distributions temporelles des pluviographes. Mais ceci va être surmonté en essayant une nouvelle alternative nommée les averses type NRCS décrite dans la partie ci-dessous.

De ce qui précède, on voit que les points forts de HEC-HMS commencent déjà à se révéler, alors qu'on n'a pas encore touché à la modélisation proprement dite.

2. Le module météorologique : les averses NRCS

Le NRCS connu auparavant sous le SCS, est un service attaché au département d'agriculture des États Unis, chargé de conserver, planifier et porter de l'assistance dans les domaines de la gestion du sol, l'eau, l'air, la flore et la faune. Dans cette optique, il a développé en 1986 [18] une méthode pour la construction d'averses de projet nécessaire pour la prévision des débits de projets des ouvrages hydrauliques ou des constructions en contact éventuel avec les cours d'eau, et pour la protection contre les inondations. Cette approche s'est basée sur l'analyse d'un nombre considérable d'observations d'averses sur tout le pays [18]. Les averses de projet ainsi définies, attribuent une distribution temporelle à une hauteur de pluie donnée enregistrée pendant 24 heures. Ces observations, faites à travers tout le pays, ont été analysées et ont finalement donné lieu à quatre types d'averses de projet selon la position géographique et donc le climat dominant [29].

Pour assimiler la différence entre ces averses, la figure 3 présente la distribution d'une averse de 20 mm selon les quatre types :

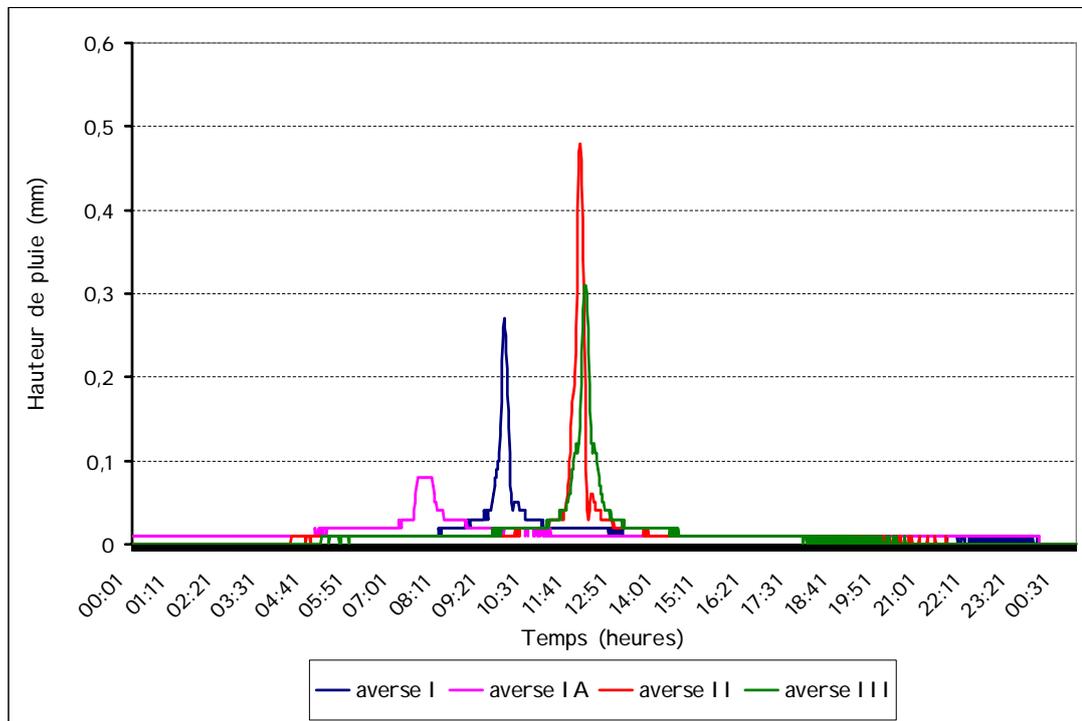


Fig. 3 : Les distributions temporelles 24h des quatre averses de projet de la NRCS

Dès un premier aperçu, on remarque que les quatre types se distinguent par leurs intensités, leurs heures de pointe et par leurs formes. Pour ce qui est de l'intensité maximale, l'ordre décroissant commence par le type II, puis le III, ensuite le type I et enfin le IA. Ces intensités différentes vont sans doute provoquer, lors des

simulations, des débits de pointe qui vont sous-estimer ou surestimer les débits observés en fonction de l'intensité maximale réelle qu'on aurait enregistrée si on avait un pluviographe. En ce qui concerne l'heure de pointe, on constate qu'elle est avant midi pour tous les types, débutant par le IA vers 8h, le type I vers 10h et vers 12h pour le II et le III. Cette propriété d'heure de pointe, va influencer à son tour l'heure du débit pointe simulé qui va se manifester soit tôt soit tard, en fonction de l'heure de pointe réelle de l'averse qu'on aurait enregistrée si on possédait un pluviographe. Pour la forme, on voit que l'averse type IA est la plus éparpillée sur les 24h suivie par le type III, le type I et enfin le II qui est la plus serrée. La forme de l'averse va conditionner la forme de l'hydrogramme, puisque on connaît que la forme de ce dernier découle de celle de l'averse, par conséquent cette forme va soit sous-estimer soit surestimer le volume de la crue, tout dépend de la forme réelle de la distribution journalière de l'averse qu'on aurait enregistrée facilement si on avait un pluviographe.

Lors de la modélisation, et puisque il n'y a pas de choix de préférence, nous allons utiliser les quatre types pour chaque événement, et essayer d'en déduire, en comparant les résultats de chaque type, l'averse la mieux appropriée à notre contexte.

3. La fonction de production : la NRCS CN

3.1. Le concept de base

De même que pour les averses, la mise en place de cette fonction a été réalisée par le NRCS en coopération, cette fois-ci, avec trois consultants privés à savoir : Horner, Horton et Sherman [18]. Cette fonction de production apparue en 1950 et surnommée autrefois la SCS CN est le fruit de plus de deux décennies d'analyses des relations pluies-débits sur des petits bassins. Elle relie la pluie nette participante au ruissellement à trois facteurs fondamentaux : l'occupation du sol, le type de sol et l'humidité antécédente, selon l'équation suivante [31] :

$$Pe = \frac{(P - Ia)^2}{P - Ia + S} \quad (1)$$

Avec : Pe : les précipitations nettes au temps t ;
P : les précipitations brutes au temps t ;
Ia : l'abstraction initiale ;
S : le potentiel maximum de rétention.

Après avoir effectué de nombreuses expériences, le NRCS a proposé une relation empirique supplémentaire liant l'abstraction initiale d'un bassin versant au potentiel maximum de rétention [31]:

$$Ia = 0,2 \times S \quad (2)$$

Ainsi, l'équation (1) devient :

$$Pe = \frac{(P - 0,2S)^2}{P + 0,8S} \quad (3)$$

Pour chaque pas de temps, la pluie nette est la différence de la valeur de Pe au début et à la fin du pas de temps.

L'influence des deux premiers facteurs susmentionnés est estimée par le paramètre CN qui est relié à S par l'équation [31] :

$$S = \frac{25400 - 254CN}{CN} \quad (4)$$

Alors que pour intégrer l'influence de l'humidité antécédente, on fait appel à la hauteur de pluie tombée pendant les cinq derniers jours précédant l'événement de crue (NRCS). Ensuite, on définit soit un CN normal, sec ou humide, tout en respectant le tableau ci-après :

Types de CN	Hauteur de pluie (mm) sur les 5 jours antérieurs		
	Base annuelle	Base saisonnière	
		Période de végétation	Période hivernale
CN(I) : conditions sèches	H<12.5	H<35	H<12.5
CN(II) : conditions normales	12.5<H<37.5	35<H<53	12.5<H<27.5
CN(III) : conditions humides	H>37.5	H>53	H>27.5

Tab. 1 : La relation pluie antérieure et type de CN pour la méthode NRCS CN (d'après [16])

Donc, selon les conditions d'humidité antérieure propres à chaque événement, on est amené à convertir la valeur de CN normal (lue sur les tables NRCS) au CN sec (I) ou humide (III) en appliquant les formules ci-dessous [8] :

$$CN(I) = \frac{4,2 \times CN(II)}{10 - 0,058 * CN(II)}$$

$$CN(III) = \frac{23 \times CN(II)}{10 + 0,13 * CN(II)}$$

3.2. Les variables

- La carte d'occupation du sol : cette donnée sert en combinaison avec la carte des sols à déterminer la valeur de CN normal pour chaque composé hydrologique de sol. Elle doit être conforme à la classification NRCS qui définit les classes d'occupation du sol en quatre grands groupes : les zones urbaines, les terres agricoles, les terres agricoles cultivées et les zones arides et semi-arides. Cette classification renferme la majorité des classes susceptibles d'être présentes sur le terrain avec une précision décisive.
- La carte de sols : elle aide à estimer la valeur de CN normal pour chaque composé hydrologique de sol. Comme la carte d'occupation du sol, la carte des sols doit être conforme à la classification NRCS des sols simplifiée dans le tableau ci-joint :

Type de sol	Groupe	i_0 [mm/h]	i_f [mm/h]
Sable, silt	A	250	12-8
Limon sableux	B	200	8-4
Limon argileux	C	130	4-1
Argiles, sols salins	D	75	1-0

Tab. 2 : Les capacités initiales i_0 et finales i_f d'infiltration en fonction des classes de sols définies par le NRCS (D'après Hillel, 1974 dans [18])

- Le pourcentage d'imperméable : il désigne la portion de la surface du bassin considérée comme étanche et directement connectée au réseau de drainage. Ce pourcentage est déduit lors de l'élaboration de la carte d'occupation du sol.

3.3. Les paramètres

- **CN** : sa valeur varie entre 100 (surface d'eau) et 30 pour des sols très perméables à haut potentiel d'infiltration [31]. Il est déterminé pour un composé hydrologique de sol à partir de tables NRCS (annexe 3) où on combine la nature de l'utilisation du sol, son traitement, les conditions hydrologiques avec le type de sol pour trouver la valeur de CN normal, qui va être utilisée directement dans les équations citées, ou après l'avoir convertie selon la hauteur de pluie tombée pendant les cinq jours avant l'événement.

Pour un bassin versant composé de plusieurs classes d'occupation du sol et de type de sols, un CN composite doit être calculé par la formule :

$$CN_{composite} = \frac{\sum A_i CN_i}{\sum A_i}$$

Où : $CN_{composite}$: le CN utilisé pour l'ensemble du bassin par la fonction de production ;

CN_i : le CN d'un composé hydrologique du sol (classe d'occupation du sol + classe de sol) ;

A_i : surface de drainage du composé hydrologique du sol.

- **la** : abstraction initiale mesurée en mm, elle correspond aux pertes initiales provenant durant la première phase de l'événement pluvieux, dû aux interceptions, au stockage naturel dans les dépressions,...etc. L'écoulement ne débute qu'une fois la pluie brute dépasse la valeur de la. On estime sa valeur le plus souvent par calibration, cependant il existe des tableaux qui donnent des ordres de grandeur de ce paramètre :

CN normal	la (mm)	Nature
75	9	Bois
80	8	Broussailles
85	5	Vergers
85	8	Labour ou nu
89	3	urbain

Tab. 3: Les valeurs usuelles de l'abstraction initiale la et du coefficient CN (D'après SAGE INGENIERIE in [5])

Il reste à signaler que les valeurs de ces deux paramètres peuvent être calibrées par le modèle HEC-HMS.

4. Les fonctions de transfert : l'hydrogramme unitaire de la NRCS et de Clark

Puisque nous avons s'en servit de deux fonctions de transfert lors de la modélisation pour évaluer la sensibilité du modèle aux formalismes utilisés, nous présenterons chacune des deux séparément. Mais avant d'y procéder, on va traiter la notion d'hydrogramme unitaire.

4.1. L'hydrogramme unitaire

Comme définit par Sherman en 1932, l'hydrogramme unitaire est l'hydrogramme de ruissellement direct résultant d'une pluie nette, uniforme et constante, d'une durée de référence (D), suffisamment longue pour générer un écoulement sur l'ensemble du bassin [18]. De cet hydrogramme unitaire on peut facilement ressortir l'hydrogramme provoquée par n'importe quelle hauteur de pluie nette, en se référant à sa règle fondamentale : la relation pluie nette et ruissellement est linéaire. La figure ci-dessous illustre la notion de l'hydrogramme unitaire est ses paramètres clés :

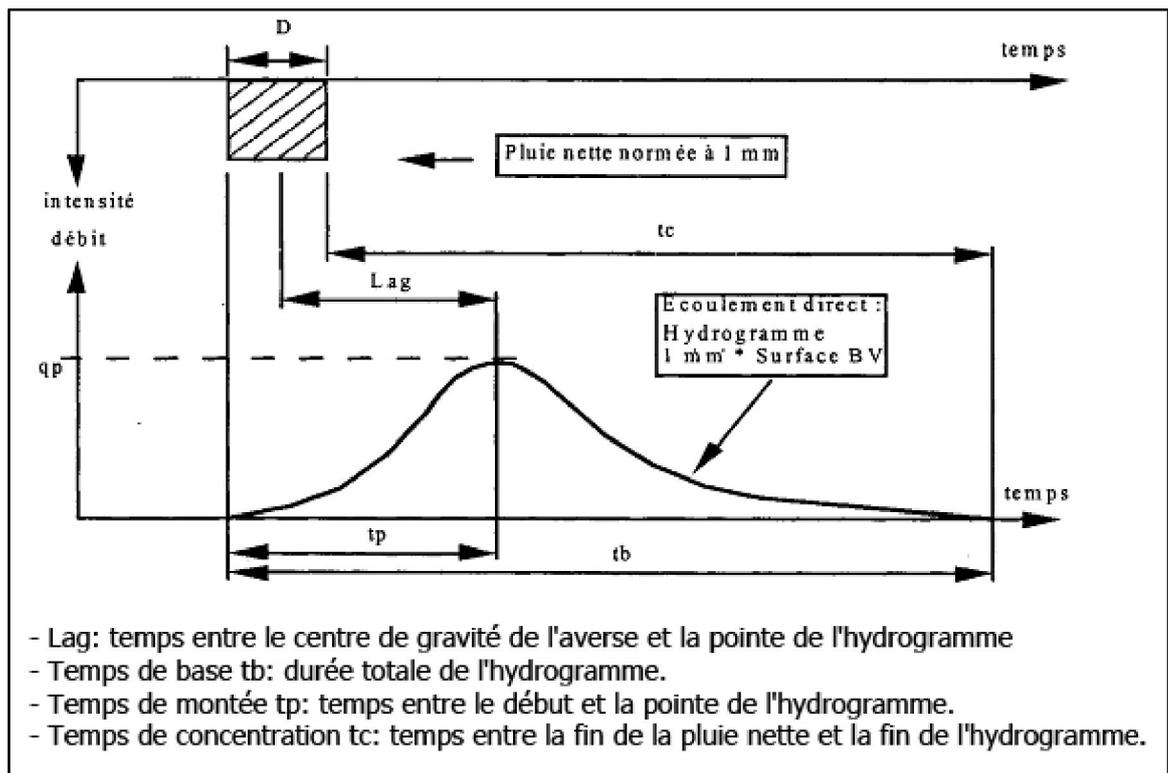


Fig. 4 : La notion d'hydrogramme unitaire et ses caractéristiques fondamentales (d'après [18])

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'hydrogramme unitaire 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 D , les ordonnées de l'hydrogramme unitaire sont proportionnelles au volume de la pluie nette ;
- L'hydrogramme unitaire reflète l'ensemble des caractéristiques physiques du bassin versant.

4.2. L'hydrogramme unitaire de la NRCS :

a. Le concept de base

Cet hydrogramme développé par le NRCS découle d'un grand nombre de petits bassins sur tous les États-Unis [31]. Il exprime le débit U_t comme proportionnel au débit de pointe U_p , pour chaque temps t , fraction du temps de pointe T_p .

$$U_p = C \frac{A}{T_p} \quad (5)$$

Avec, A : surface du bassin versant ;

C : constante de conversion (2.08 pour le système international).

Le temps de pointe T_p est relié à la durée de la pluie nette par la formule :

$$T_p = T_{lag} \frac{\Delta t}{2} \quad (6)$$

Où : Δt : la durée de la pluie nette (c'est le pas de temps de simulation) ;

T_{lag} : le Lag du bassin (différence entre le pic de la pluie nette et le pic de l'hydrogramme).

Une fois le T_{lag} calculé, le modèle résout l'équation (5), puis (6) pour trouver successivement le temps et le débit de pointe de l'hydrogramme, qui vont permettre de concevoir l'hydrogramme de simulation en reposant sur le principe de linéarité de la réponse.

b. Les paramètres

Le seul paramètre de cette méthode est le T_{lag} , il sera calculé directement par le WMS qui offre 17 formules pour le faire, parmi elles on a choisit la formule NRCS définie comme suit :

$$T_{lag} = L^{0,8} \times \left(\left(\left(\frac{1000}{CN} \right) - 10 \right) + 1 \right)^{0,7} / (1900 \times \sqrt{Y})$$

Avec, T_{lag} : le lag en heures ;

L : la longueur depuis l'exutoire jusqu'à l'amont du plus grand cours d'eau en pied ;

CN : le CN composite du bassin ;

Y : pente du bassin en %.

Notez bien que la valeur de ce paramètre peut être calibrée par le modèle HEC-HMS.

4.3. L'hydrogramme Unitaire de Clark

a. Le concept de base

L'hydrogramme unitaire de Clark interprète deux processus importants dans la transformation pluie nette-débit qui sont :

- L'atténuation : reflète le stockage temporaire de la pluie nette dans le bassin versant qui baisse l'ampleur du débit.
- La translation : représente le mouvement de la pluie nette le long du réseau de drainage depuis son origine jusqu'à l'exutoire.

L'hydrogramme en question est fréquemment utilisé pour les modélisations événementielles [27], cette méthode se montre très efficace pour reproduire des hydrogrammes complexes dans des bassins présentant une topographie et occupation du sol variés (Sabot 1988 in [27]).

b. Les paramètres

Cet hydrogramme possède deux paramètres qui renvoient chacun à l'un des processus pris en compte :

- Le temps de concentration T_c : résume le processus de translation de la pluie nette le long du réseau hydrographique.
- Le coefficient de stockage S_t : représente le phénomène de stockage provisoire de la pluie nette dans le bassin versant.

Ces deux paramètres sont calculés par le WMS doté de 11 formules pour l'estimation du T_C qui donnera par la suite le S_t . la formule choisie est la méthode de Kirpich définie comme suit:

$$Ct = 1 + ((80 - CN) \times 0,04)$$

$$T_C = m \times 0,00013 \times \left(\frac{L^{0,77}}{S^{0,385}} \right) \times Ct$$

$$S_T = R_{coef} \times T_C$$

Où, Ct : le coefficient du temps de concentration ;

CN : le CN composite du bassin ;

T_C : le temps de concentration ;

m : coefficient du type d'occupation du sol ;

L : la longueur depuis l'exutoire jusqu'à l'amont du plus grand cours d'eau en pied ;

S : pente moyenne du bassin en pied/pied ;

S_t : le coefficient de stockage en heures ;

R_{coef} : le coefficient de Clark, il vaut 1.6316.

Notez bien que les valeurs de ces deux paramètres peuvent être calibrées par le modèle HEC-HMS.

5. Le débit de base : la récession exponentielle

5.1. Le concept de base

Ce formalisme donne la possibilité de simuler la contribution du réservoir souterrain au débit avant et après le pic ou les pics de l'événement de crue, et ceci en établissant une relation exponentielle entre le débit à deux temps consécutifs, cette relation est formalisée par l'équation [31] :

$$Q_t = Q_0 \times k^t \quad (7)$$

Où, Q_t : le débit au temps t ;

Q_0 : le débit initial ;

K : la constante de décroissance exponentielle.

En effet, avant le pic de l'hydrogramme, et connaissant le débit initial, l'équation (7) s'active et commence à reproduire le débit total composé uniquement du débit de base de la rivière, jusqu'au point de début de la crue, depuis lequel ce module agira en parallèle avec le module de la fonction de transfert pour restituer le débit total composé à la fois d'un débit de base en décroissance et d'un débit de surface en forte action.

Ce constat demeure actif jusqu'à un certain point nommé seuil, où l'ampleur de participation dans le débit total se renverse. La figure ci-après illustre comment intervient ce module dans le ruissellement :

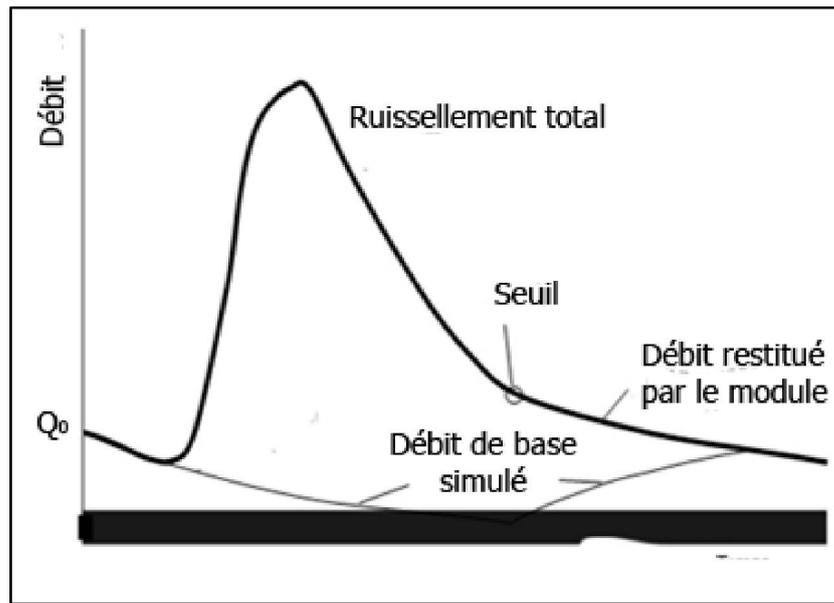


Fig. 5 : L'illustration de la méthode de la récession exponentielle, d'après [31])

5.2. La variable

La seule variable d'entrée est le débit initial pour chaque événement de crue, issu de la lecture son hydrogramme.

5.3. Les paramètres

Les deux paramètres du module sont :

- La constante de récession R_C : ce paramètre dépend des propriétés hydrogéologiques du réservoir souterrain. Elle varie entre 0 et 1. Si sa valeur vaut 1, la contribution du module sera constante avec $Q_t=Q_0$. Puisque, on n'a pas d'informations permettant d'attribuer une valeur initiale à ce paramètre, et que sa valeur peut être calibrée, on se contentera d'une valeur bibliographique en attendant sa calibration.
- Le seuil T_d : lui aussi varie entre 0 et 1. Il est lié au débit de pointe sous forme de rapport. Par exemple, une valeur de 0.1 et un débit de pointe de $10 \text{ m}^3/\text{s}$ signifie que le module reprendra son intervention une fois le débit atteint $1 \text{ m}^3/\text{s}$. De même que le R_C , nous se limiterons à une valeur bibliographique en attendant sa calibration.

IV. Les avantages et les limites du modèle

Malgré tous tout ce qu'on vient de dire concernant le modèle décrit ci-dessus, la combinaison modulaire choisie et la plate-forme de préparation des fichiers de simulation, le HEC-HMS sous WMS présente des limites liées essentiellement à la conception du modèle lui-même et aux conditions d'utilisation de la combinaison modulaire choisie. Dans ce qui va suivre, on listera les avantages et les limites dont les trois éléments précités sont pourvus dans la mesure de reconnaître les performances à améliorer et les imperfections à corriger pour une éventuelle future étude.

1. WMS : le logiciel de préparation des fichiers de simulation

1.1. Les avantages

Ils sont loin d'être dénombrés, alors on se contentera des plus décisifs :

- Calcul des valeurs initiales des paramètres (CN , T_C , S_t et T_{Lag}), qui aurait dû se faire soit manuellement avec tout le risque d'erreur très probable et de difficulté incontournable, soit estimer en se basant sur la bibliographie qui elle n'est pas toujours fructueuse, voir même leur attribuer des valeurs arbitraires en attendant la calibration qui n'est pas toujours réaliste vu les problèmes d'équi-finalité et de compensation entre les paramètres.
- Automatisation de la description physique du bassin versant, qui est normalement effectuée en partie restreinte par les logiciels de SIG, mais le WMS lui permet en plus de faire une liste considérable d'indices morphométriques qui peuvent aider en les analysant, à mieux comprendre l'influence de la morphologie du bassin étudié sur son régime hydrologique.
- Diversité dans le choix des formules de calcul des paramètres : il permet ainsi de choisir la formule la mieux adaptée au contexte, la plus utilisée dans un pays, celle dont on connaît les valeurs de ses facteurs. En outre, il offre l'aptitude d'étudier la sensibilité du modèle à telle ou telle formule.

1.2. Les limites

A part le point suivant, il ne semble pas que le WMS ait limité l'avancement droit de cette étude de modélisation.

- Impossibilité d'exécution des simulations : certes, celle-ci reste une contrainte, mais puisque le logiciel HEC-HMS assume cette mission, donc l'étude n'a pas été influencée par les effets de ce défaut.

2. HEC-HMS : le modèle de simulation hydrologique

1.3. Les avantages

Puisque, nous avons très bien détaillé la description du modèle, nous n'allons mentionner que les points forts résumés comme suit :

- Diversité dans les formalismes proposés : la variété remarquable de ces méthodes de calcul, offre à l'utilisateur l'opportunité du choix en fonction de ses moyens, ses finalités et de son expérience.
- Diversité dans les combinaisons modulaires possibles : ce critère est garanti par le principe de tâches séparées qui le distingue des autres modèles, et qui lui confie une caractéristique incroyable : « plusieurs modèles en un modèle ».
- Aptitude de calibration et nature des résultats issus : pour plusieurs modèles la calibration est effectuée par un autre programme, d'autres peuvent même la faire, mais avec un choix limité de fonctions objectives et d'optimisation. En plus, ces modèles ne peuvent afficher à la fin que les valeurs des paramètres calibrés, l'hydrogramme simulé et observé et la variation de la fonction objective. En revanche, le HEC-HMS avec ses deux fonctions d'optimisation, ses sept fonctions objectives sans oublier ses graphes explicatifs et analytiques, avec tout ceci, il accorde à la calibration une précision inédite, et à la modélisation une exploitation au bout des choses.

1.4. Les limites

- Tous les formalismes utilisent des valeurs constantes des paramètres c'est-à-dire qu'ils sont indépendants du temps, alors que pour de longues durées ces paramètres peuvent changer pour diverses motifs. Il y a une alternative que le développeur propose à ceci c'est de diviser une longue simulation en plusieurs et de changer manuellement les paramètres entre les simulations [31]. Cette

contrainte est loin de détériorer nos résultats, car nous avons opté pour une modélisation événementielle.

- Tous les modules ne sont pas accouplés, c'est-à-dire que chaque partie du modèle est calculée indépendamment de l'autre, mais l'erreur liée à ce problème est minimisée par l'utilisation de courts temps de calcul [31]. Cette limite touche en particulier les modèles continus de HEC-HMS qui intègrent des facteurs étroitement liés comme l'évapotranspiration, la fonte de neige et l'infiltration. Par conséquent les erreurs sont liées à cet inconvénient est à rejeter dans notre cas.
- La représentation de la structure du bassin : représentée dans le HEC-HMS, par un arbre ramifié qui rend son assimilation difficile. Un élément ne peut avoir qu'une seule sortie de débit, l'élément de diversion ne peut pas piquer le débit d'un endroit et le verser dans un autre [31]. Toutes ces limites de représentation sont gênantes, mais dans notre cas, leurs effets sont neutralisés, parce que notre bassin est très simplifié (un élément de « Subbassin », un élément « Reach » et un exutoire).

3. La combinaison modulaire choisie

3.1. Les avantages

- Le module météorologique adopté a permis de surmonter le problème d'absence des données de pluviographe.
- La méthode NRCS CN est simple, fidèle, ne nécessite pas d'énormes quantités de données, et dépend directement d'un seul paramètre qui renferme trois facteurs de base dans la modélisation pluie-débit (l'occupation du sol, les sols et l'humidité antécédente).
- La méthode NRCS CN va nous permettre entre autres de faire des prédictions concernant la réponse du bassin versant à des scénarios de changements susceptibles d'affecter son occupation du sol (urbanisation, déforestation, reboisement,...) et des sols (érosion des sols,...).
- Les deux fonctions de transferts sélectionnées n'exigent pas de données de plus, et montrent des résultats satisfaisants chaque fois qu'on les utilise.
- Le module de débit de base est le mieux adapté au contexte semi-aride, et va aider à mieux restituer les hydrogrammes de crues.
- La combinaison ne contient que peu de paramètres ce qui diminue les erreurs causées par les phénomènes de compensation entre les paramètres et d'équi-finalité.

3.2. Les limites

- Le recours à une modélisation événementielle, va restreindre les bénéfices de la modélisation en matière de compréhension du fonctionnement hydrologique du Rhéraya.
- L'utilisation des averses NRCS va certainement influencer les résultats des simulations en termes du débit, du volume et de la forme de l'hydrogramme simulé.
- La méthode NRCS CN peut produire des erreurs en cas d'utilisation directe des tables NRCS, puisque ces tables sont issues de l'analyse de petits bassins des États-Unis.
- L'utilisation d'hydrogramme unitaire peut influencer les résultats si ses hypothèses ne sont pas valides pour le Rhéraya.

V. Justification du choix du modèle

Le choix du modèle a été dicté par plusieurs contraintes de moyens et facteurs de privilège qui font de ce modèle un bon choix. Parmi ceux les plus importants :

- Les données exigées par le modèle sont plus ou moins simples, accessibles et disponibles. Donc, le modèle peut donc tourner sans soucis.

- Possibilité d'intégrer les majeurs facteurs affectant la transformation pluie-débit (morphométrie du bassin versant, occupation du sol, types de sols et humidité antérieure), et donc les résultats seront plus réalistes.
- la NRCS CN a été validée sur plusieurs bassins versants dans le monde, et ses résultats sont fiables et similaires aux modèles complexes [19]
- Le modèle HEC-HMS et en particulier la méthode NRCS CN est largement utilisée au Maroc, ce qui rend sa validation dans notre bassin très probable.
- Avoir une base commune pour la comparaison avec les deux premières études de modélisation menées sur le Rhéraya. Cette base c'est la description physique du bassin versant, plus précisément l'occupation du sol et le type de sol.
- La connaissance préalable du modèle lors d'une initiation à son utilisation et application pendant un stage antérieure.

Chapitre 2 : Étude hydro-géomorphologique du bassin versant de Rhéraya

I. Le contexte général du bassin versant de Rhéraya

1. La situation géographique et administrative

Le bassin de Rhéraya se situe à une quarantaine de kilomètres de la ville de Marrakech, sur la route de Tahnaout. Il est localisé à l'intérieur du rectangle formé par l'intersection des deux méridiens 8° et 7.48° Ouest et des deux parallèles 31.18° et 31.02° Nord (figure 6). Ce constituant de la rive Sud du bassin de Tensift est généralement décomposé en trois sous bassins versants distincts : l'Imenane dont le cours d'eau principal drainant est la branche Est de l'Oued Rhéraya, l'Imlili drainé par la branche Ouest, et finalement le sous bassin versant aval d'Asni commençant depuis la confluence des deux branches. Notre zone d'étude est en contact direct avec la plaine du Haouz au Nord, le bassin d'Assif-Tifnout du côté Sud, sa partie Est est limitée par le bassin d'Ourika et laissant sa frontière Ouest occupée par le N'fis.

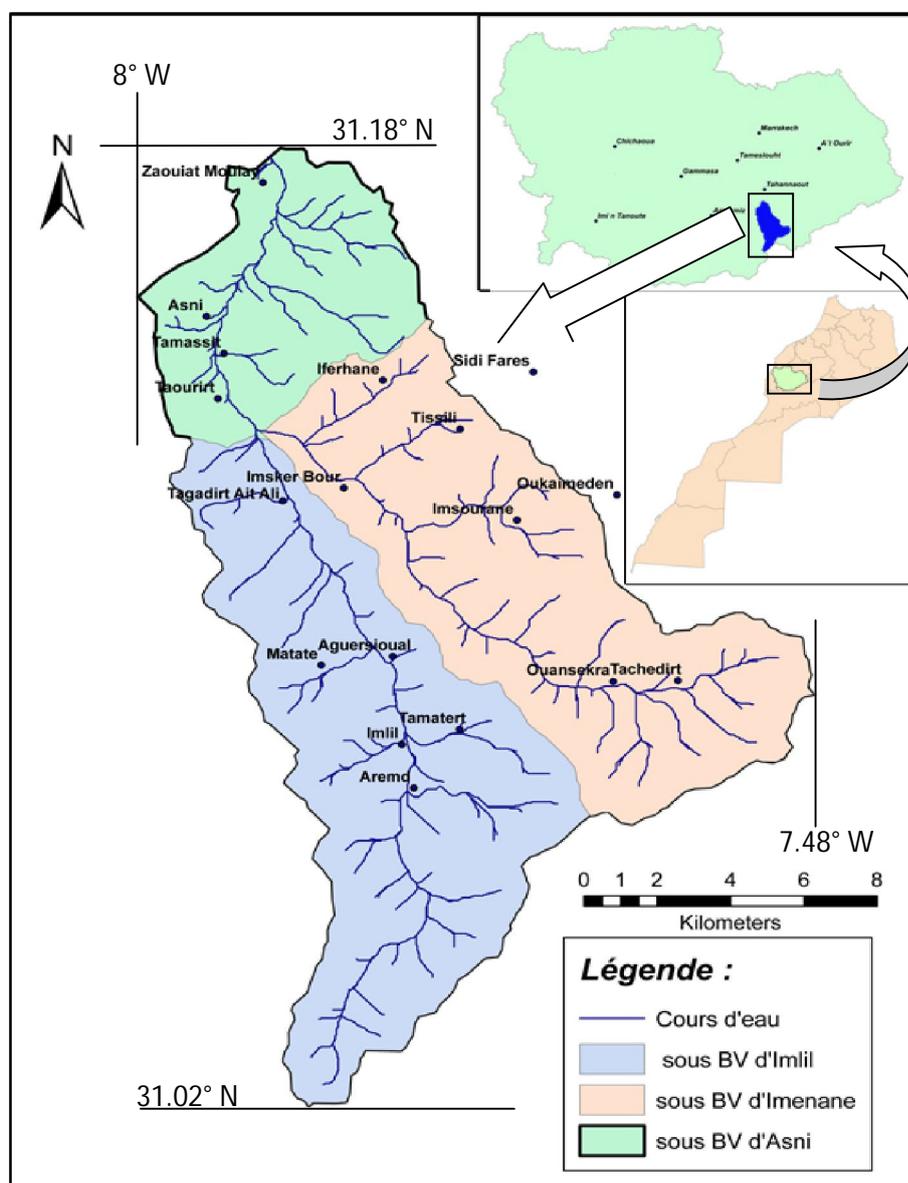


Fig. 6 : La carte de situation géographique du bassin versant de Rhéraya

Administrativement, le Rhéraya s'étend sur les territoires des huit communes rurales suivantes : Tahnaout, Moulay Brahim, Ouazguita, Ouirgane, Asni, Oukaimeden, Imgdal et Ijoukak.

2. Le cadre géologique

Le bassin de Rhéraya fait partie intégrante du Haut Atlas occidental, fondé sur un socle hercynien recouvert par des formations d'âges secondaire et tertiaire. La carte géologique ci-jointe identifie la nature lithologique des roches [21] qui « affleurent » à la surface du bassin, en l'occurrence :

- Le volcanique andésitique, rhyolitique, grenu et tufeux dominant le précambrien ;
- Les schistes d'âge primaire ;
- Les marnes pour le tertiaire ;
- Les calcaires et les grès représentant le jurassique ;
- Les basaltes matérialisant le lias inférieur ;
- Les argiles du trias ;
- Le quaternaire avec ses alluvions, ses limons alluvionnaires et rouges.

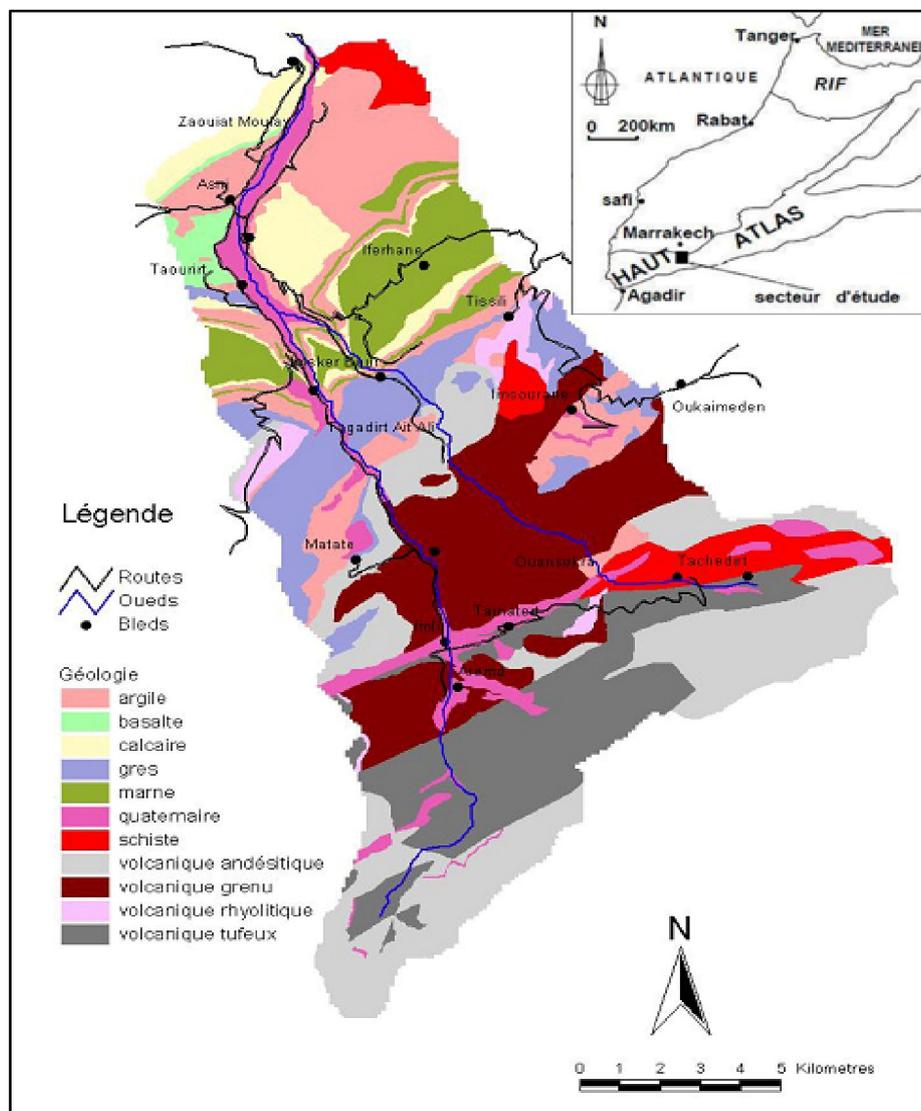


Fig. 7 : La carte géologique du bassin versant de la Rhéraya (d'après le SCM complétée par Cheggour A.)

D'après la carte géologique et les conclusions de la DRE [9], il apparaît que la majeure partie du Rhéraya est occupée par des formations imperméables (roches métamorphiques et éruptives) par rapport aux formations peu perméables (calcaire localisé dans le bassin moyen) ou perméables (roches grés-argileuses en bas du bassin), plus précisément avec des portions consécutives de 59%, 26% et 15%.

En réalité, certes ces pourcentages sont loin d'être représentatifs aussi de l'état de surface du Rhéraya, conditionnée par d'autres facteurs comme l'érosion, la végétation et le climat, mais on peut déjà faire le lien entre cette étanchéité apparente du bassin avec la génération des crues extrêmes et rapides reconnues dans le bassin.

Notez bien que cette différence d'imperméabilité, entre la géologie et l'état de surface du bassin, sera mise en évidence lors de l'élaboration de la carte d'occupation du sol, voir même remise en question lors de la calibration.

3. Le cadre climatique

3.1. Les précipitations

Sous ses deux états liquides et solides, les précipitations sur le Rhéraya sont distinguées des autres bassins de Tensift. D'une part, car parmi eux, le Rhéraya est classé deuxième concernant la hauteur de pluie brute rapportée à la surface (données de ABHT PDAIRE). D'autre part, parce que son enneigement relatif est le plus prononcé entre ses homologues de Tensift (Cruette 1975 et Haloui 1986 in [9], [17]).

Cependant, ce caractère privilégié est associé à une hétérogénéité spatio-temporelle dans la distribution des pluies, en fonction de l'altitude et l'exposition vis-à-vis des vents humides. Par conséquent, on ne trouve jamais une corrélation significative entre les stations pluviométriques même avec un réseau développé [9]. Pour la neige, on se contente par l'approche de télédétection pour quantifier les stocks annuels, car elle est rarement disponible sous forme de mesures sur place, mais elle apparaît fréquemment depuis décembre et persiste jusqu'au mois d'avril sur les hauts altitudes du bassin [21].

Ce volet de précipitations sera entièrement détaillé dans la troisième partie de ce chapitre.

3.2. Les températures

Faute d'accès aux données, nous allons se référer aux enregistrements de la station de Takerkoust (altitude 614m).

La figure suivante représente les températures mensuelles interannuelles à cette station :

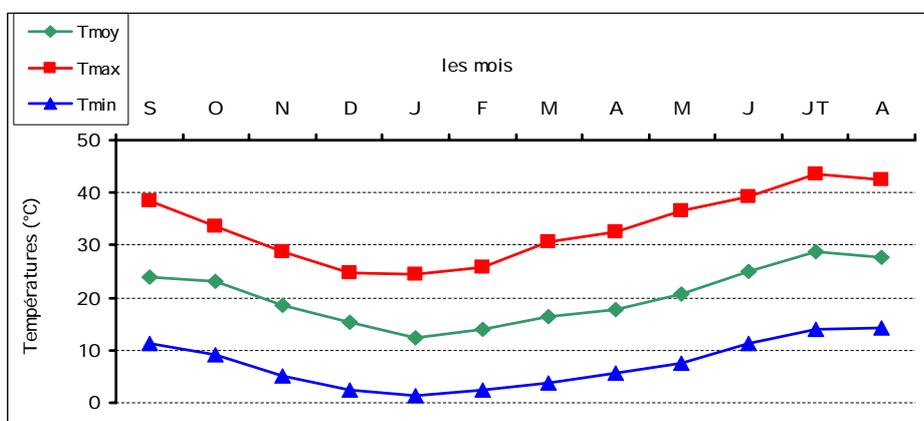


Fig. 8 : Les températures mensuelles interannuelles à la station de Takerkoust (période 1984-2012)

En moyenne, les mois de Juillet (28.7°C) et Août (27.7°C) sont les plus chauds, Janvier et Décembre les plus froids. La température moyenne annuelle est de 20.3°C.

En utilisant le gradient thermique établie par Chaponnière qui vaut : - 4.2°C/1000 m, pour estimer les températures à l'exutoire (925 m), nous trouvons que (figure 9) :

- la température moyenne annuelle est de 18.9°C.
- Les mois Juillet et Août sont les plus chauds avec des températures maximales de 27.4°C et 26.4°C respectivement.
- Les mois Janvier et Décembre sont les plus froids atteignant les -8.7°C et -7.7°C comme températures minimales.

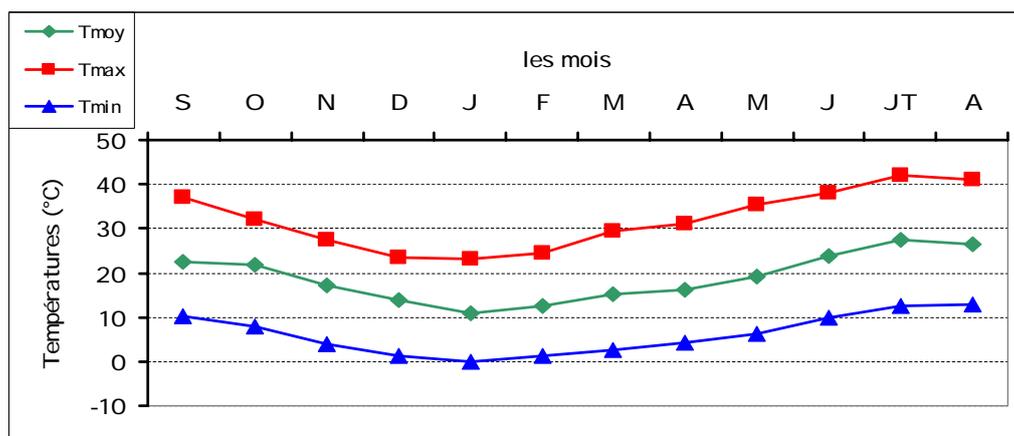


Fig. 9 : Les températures mensuelles interannuelles estimées à Tahnaout (période 1984-2012)

3.3. Le vent

Selon leurs directions, les vents soufflant sur le bassin versant de Rhéraya sont classés en trois types [21] :

- Direction WNW : provenant de l'océan atlantique, ces masses d'air en mouvement sont pourvus d'humidité considérable qu'elles vont perdre progressivement lors de l'ascendance orographique déclenchée par leur contact avec les hauts reliefs du Rhéraya. Localement, ils sont appelés « Gharbi ».
- Direction SSW : d'origine continentale, ces vents sont chauds et secs, mais leurs caractéristiques peuvent être adoucies avant de taper sur la zone d'étude, durant leurs remontées sur le versant Sud de haut-Atlas par ce qu'on appelle couramment le mécanisme de Föhn.
- Direction ENE : surnommés localement « Chergui », ils sont aussi chauds et secs.

En plus de ces directions majeures, la topographie accidentée du bassin contribue à l'apparition de courants locaux accentuant les problèmes d'hétérogénéité spatiale des précipitations.

4. L'occupation du sol et les types des sols

L'occupation du sol du Rhéraya se montre très contrastée, en termes d'effectif de classes, de leurs propriétés (densité, superficie, localisation,...), et de la variabilité temporelle (voir chapitre 3). Mais, en gros elle est formée principalement par :

- La végétation : elle est de plusieurs types allant depuis les formations arborées de chêne vert de genévriers qui occupent une portion respectée de la surface totale du Rhéraya mais qui sont en voie de

dégradation intense, jusqu'aux arbustes qui dominent le paysage, en passant par les périmètres de reboisement instaurés pour battre la détérioration de la forêt.

- Agriculture : cette activité est répandue le long des lits des Oueds en formes de terrasses aménagés, où poussent essentiellement des céréalicultures, des maraichères et des arbres fruitiers [13].
- Terrains nus : cette classe domine le tableau, elle représente les sols nus, les terrains dénudés de végétation et les terrains rocheux imperméables.

En ce qui concerne les sols, ils sont majoritairement peu évolués voir inexistant, à part les zones de terrasses aménagés et les périmètres forestiers. La couverture caillouteuse est abondante sur la plupart d'eux avec une moyenne de 30% de cailloux dans les sols du bassin étudié.

Cette situation endommagée des sols est en rapport direct avec l'érosion hydrique très poussée que connaît le Rhéraya déclarée par le PNABV et affirmé par plusieurs auteurs ([33], [13]). En fait, le faible indice de couvert [13], associé aux importantes précipitations et renforcé par l'imperméabilité des formations géologiques ne font qu'augmenter l'effet de l'érosion en nappe, qui entraîne à son passage tous les éléments fins, minéraux et organiques, laissant les sols dans le meilleur des cas, avec des textures sableuses.

À cet effet, des études de modélisation hydrologique de ce genre de bassins versants où l'occupation du sol et en changement continu, et les sols en dégradation sans cesse sont très sollicités, pour avant tout comprendre les mécanismes du fonctionnement, puis prédire la réponse aux scénarios probables et enfin pour mener les bonnes actions aux bons endroits.

Ce volet d'occupation du sol et de types des sols du Rhéraya sera dévoilé explicitement dans le chapitre 3.

II. La morphométrie du bassin versant de Rhéraya

1. Les paramètres morphométriques générales

Les paramètres morphométriques d'un bassin, appelés aussi les indices géométriques de forme ou encore les paramètres physiques, sont d'une grande importance d'une part, pour la compréhension de l'influence directe de la forme de bassin sur la génération des crues et des inondations, et d'autre part, pour le calcul des paramètres hydrologiques comme le temps de concentration et le Lag.

Pour se faire, nous avons utilisé le logiciel WMS qui remplit facilement cette tâche une fois la délimitation du bassin est effectuée. Le tableau ci-dessous renferme la liste des paramètres morphométriques de Rhéraya, calculés par l'intermédiaire de ce logiciel :

Paramètre morphométrique	Valeur	Unité
A	224.2301	km ²
BS	0.4562	m/m
AOFD	0.6102	km
NF	59	%
SF	41	%
L	27.86	km
P	109.21 ¹	km
Shape	3.46	-
Sin	1.14	-

¹ : Une erreur imprévisible est survenue pour la valeur du périmètre, qui est contradictoire avec la valeur de 85 km qu'on a eu par un logiciel de SIG. Pour les autres paramètres, le résultat est positif lors de la confrontation aux valeurs mentionnées dans la bibliographie.

AVEL	2172.4	m
MFD	33.0184	km
MFS	0.0908	m/m
MSL	31.8615	km
MSS	0.0761	m/m
CTOSTR	0.56	km
CSD	17.0662	km
CSS	0.0335	m/m

Tab. 4 : Le tableau Récapitulatif de l'ensemble des paramètres morphométriques du bassin du Rhéraya calculés par le logiciel WMS

- A : « Basin Area », c'est la surface du bassin.
- BS : « Basin Slope », c'est la pente moyenne du bassin calculée à partir de la moyenne des pentes de chaque maille du MNT.
- AOFD : « Average Overland Flow Distance », c'est la moyenne des distances entre le centre de gravité de chaque maille et le talweg le plus proche.
- NF : « North Facing », pourcentage de la surface du bassin orientée vers le Nord.
- SF : « South Facing », pourcentage de la surface du bassin orientée vers le Sud.
- L : « Basin Length », c'est la longueur du bassin, calculée à partir de la distance séparant l'exutoire du point le plus éloigné appartenant au périmètre.
- P : « Basin Perimeter », c'est le périmètre du bassin.
- Shape : « Shape Factor », c'est l'indice de forme, calculé en divisant la longueur du bassin sur sa largeur.
- AVEL : « Average Elevation », c'est l'altitude moyenne du bassin.
- MFD : « Maximum Flow Distance », c'est la longueur du plus long talweg commençant depuis l'exutoire jusqu'à un point du périmètre.
- MFS : « Maximum Flow Slope », c'est la pente du MFD.
- MSL : « Maximum Stream Length », c'est la longueur du plus long talweg.
- MSS : « Maximum Stream Slope », c'est la pente du MSL.
- CTOSTR : « Distance From Centroid to Stream », c'est la distance entre le centre de gravité du bassin et le talweg le plus proche.
- CSD : « Centroid Stream Distance », c'est la distance entre le point du talweg le plus proche du centre de gravité du bassin et l'exutoire.
- CSS : « Centroid Stream Slope », c'est la pente du CSD.
- Sin : « Sinuosity Factor », c'est l'indice de sinuosité, calculé en divisant le MSL par la longueur du bassin.

2. Le réseau de drainage

Le réseau hydrographique du Rhéraya est caractérisé par sa forme spécifique en « Y », il se compose essentiellement de deux grandes rivières prenant naissance dans le haut Atlas à savoir l'Oued d'Imenane en Est et l'Imlil à l'Ouest, qui vont se rejoindre en aval, après avoir parcouru les deux tiers du bassin en question, pour former l'Oued de Rhéraya (figure 10). A grande échelle, la ramification du réseau est plus prononcée en amont qu'en aval, vu les accidents géologiques très abondants dans les moyennes et hautes altitudes. À l'échelle des sous bassins, l'Imenane acquies la majeure partie des apports à partir de sa rive droite, l'Imlil lui, est plus ramifié sur sa rive gauche.

Dans le Rhéraya, la classification de Strahler compte cinq classes dont le cours d'eau identifié comme d'ordre 5 n'est apparent qu'en aval du bassin, plus précisément à partir de la confluence des deux Oueds d'Imenane et

d'Imlil. Ainsi les crues et les inondations seront plus dévastatrices en aval qu'en amont, à la fois suite au rassemblement des eaux de surface de tout le bassin versant et au relief plutôt aplati en aval.

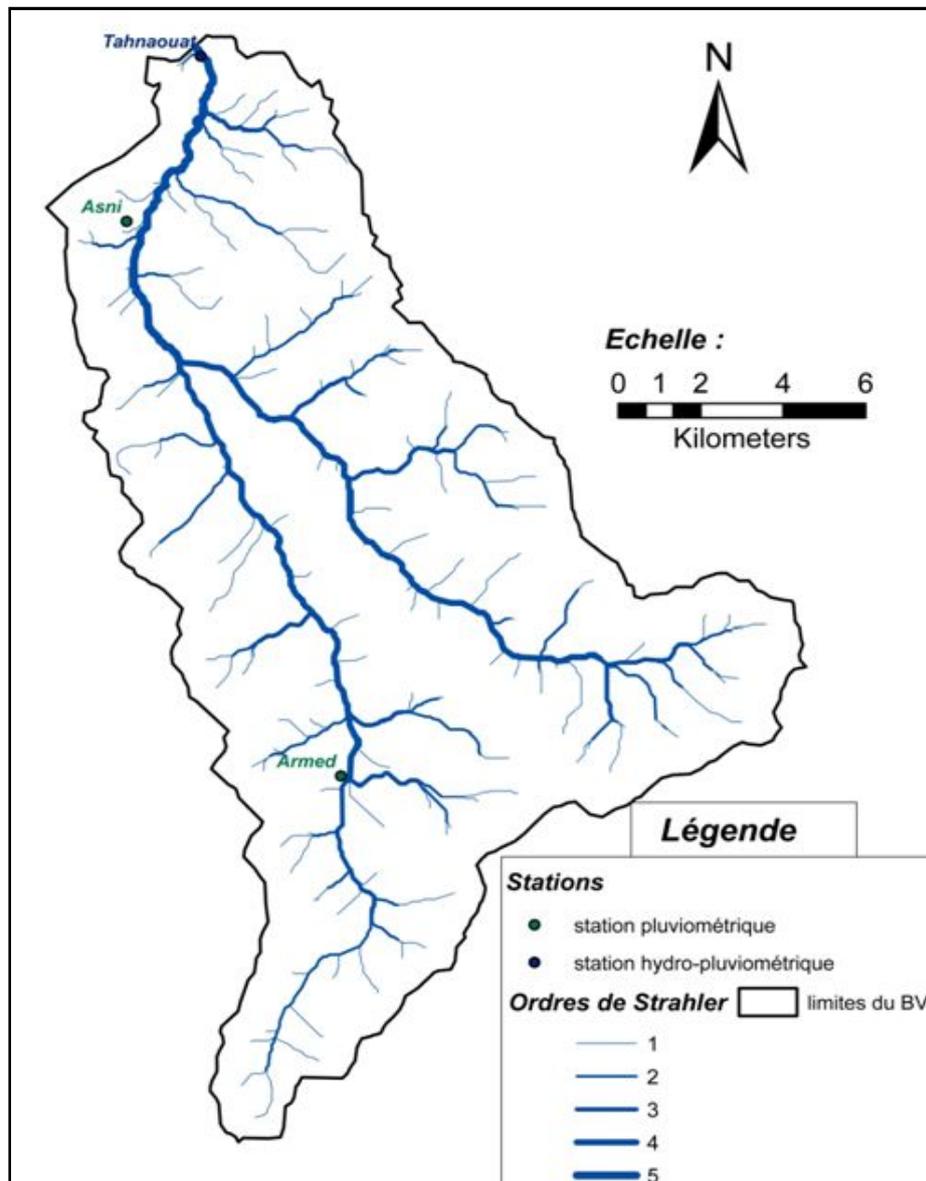


Fig. 10 : La carte du réseau hydrographique classifié du bassin versant de Rhéraya

En ce qui concerne la densité de drainage du Rhéraya, il vaut 0.79 km^{-1} , calculée à partir des données fournies par WMS, à savoir :

- La longueur totale du réseau dessiné en prenant la surface d'accumulation du flux égale à 0.5 km^2 , cette longueur vaut 177.46 km.
- La surface du bassin versant étant 224.23 km^2 .

Enfin, les profils en long sont différents entre les trois Oueds, la partie aval formée par l'Oued de Rhéraya s'étale sur une longueur de 9 km avec une différence de dénivelé de presque 250 m. Sa continuité Est surnommée Oued Imenane parcourt 20 km avec une pente qui s'accroît de plus en plus vers l'amont, quant à l'oued Imlil, il a une longueur de 23 km et prend naissance à une altitude plus haute qu'Imenane.

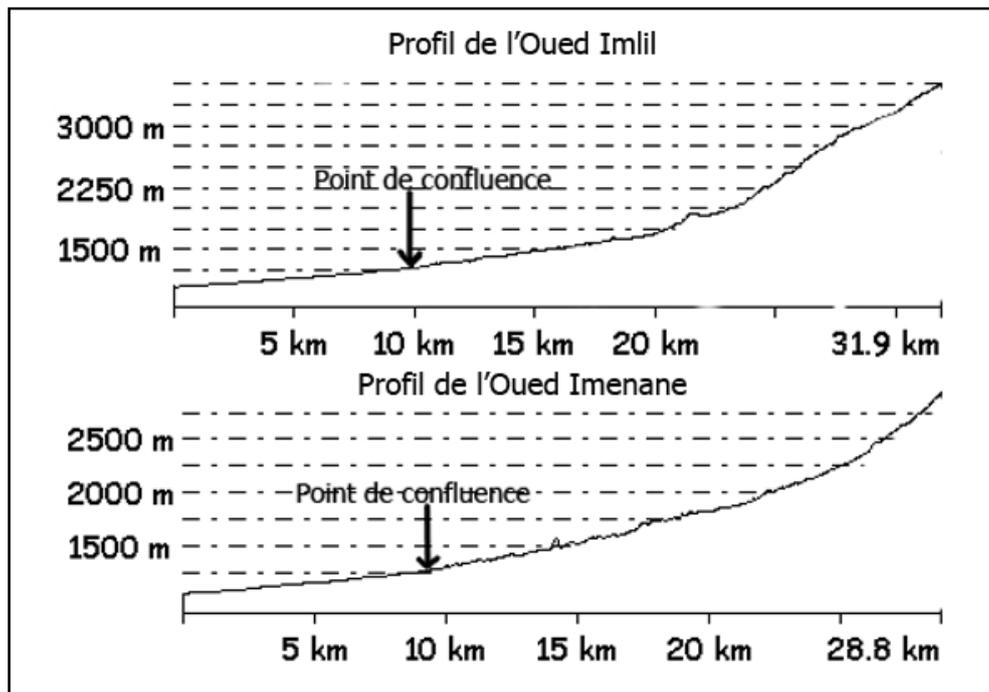


Fig. 11: les profils en long des Oueds Imlil et Imenane depuis leurs points de départ jusqu'à l'exutoire

3. L'hypsométrie et les pentes

Dans le bassin de Rhéraya la tranche d'altitude la plus représentée est celle comprise entre 1043 et 4111 m. Ces altitudes sont visiblement influencées par la forme en « Y » du réseau hydrographique (figure 12). Les altitudes les plus dominantes sont les moyennes et les faibles occupants ainsi environ 70 % de la surface.

Pour les pentes (figure 13), elles varient de 0° sur les terrasses aménagés sur les lits des Oueds en aval, jusqu'à 67° sur les versants en amont surtout ceux entourant l'Oued Imlil, parfois même en aval sous forme de falaise. La carte permet de reconnaître la zone aval, débutante après la confluence des deux branches, comme étant potentiellement à haut risque d'inondations.

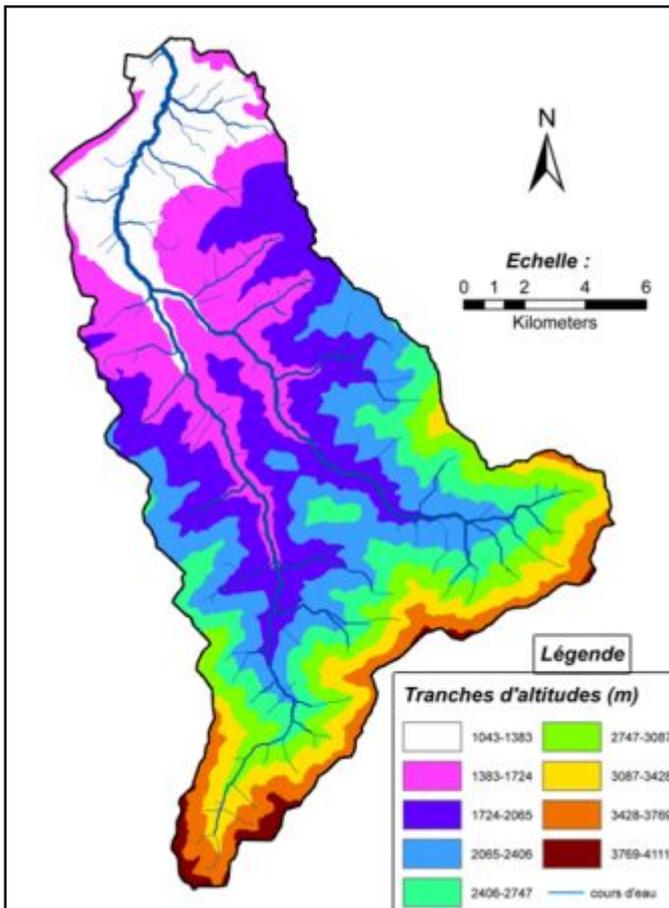


Fig. 12 : La carte hypsométrique du bassin de Rhéraya

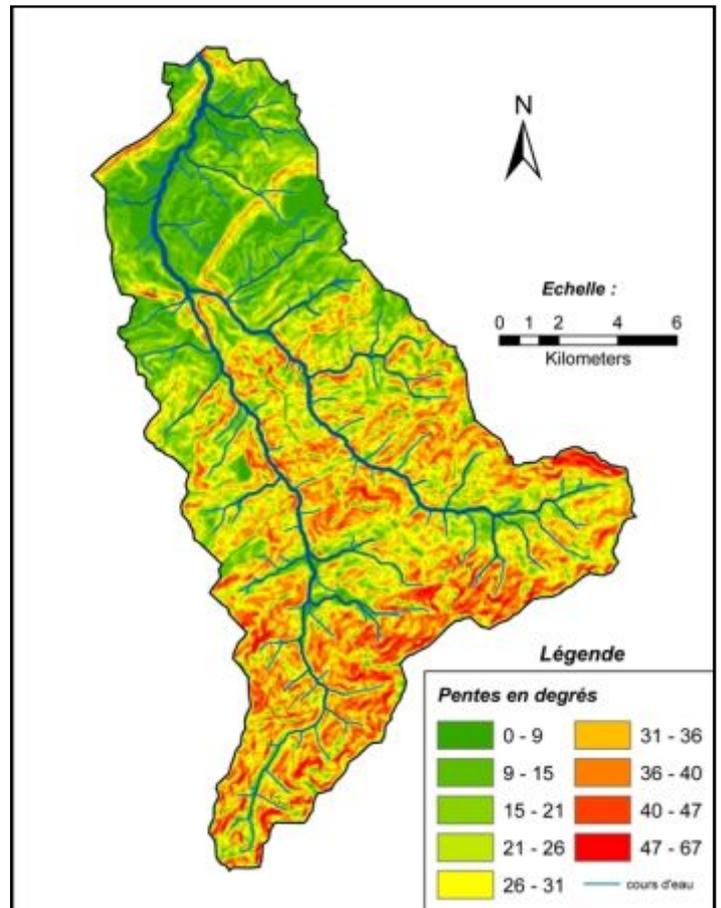


Fig. 13 : La carte des pentes du bassin de Rhéraya

4. L'indice de compacité de Gravelius

Il sert à qualifier la forme du bassin en le comparant à un cercle de même surface pour lequel $KG=1$. En plus de ceci, il donne une idée générale concernant l'influence de la forme d'un bassin donné sur la durée de déclenchement des crues, par exemple : plus le KG tend vers 1, plus sa forme est ramassée, et plus le temps nécessaire pour rassembler l'eau de tout le bassin versant est court. Sa formule est :

$$KG = \frac{P}{2 \times \sqrt{\pi A}}$$

Où, KG : l'indice de Gravelius sans dimensions ;

P : le périmètre du bassin versant en km ;

A : la surface du bassin versant en km^2 .

On admettant que si $KG=1,2$, cela signifie que le bassin est deux fois plus long que large [23], et connaissant que le KG calculé vaut : 1.6, on peut conclure que le Rhéraya est six fois plus long que large.

5. Le rectangle équivalent

Le rectangle équivalent est une représentation du bassin versant sous forme d'un rectangle de même surface. L'objectif de son utilisation est de pouvoir comparer les bassins entre eux. On lui associe couramment les tranches d'altitudes qui permettent un aperçu plus facile du relief. Sa longueur et sa largeur sont calculées par les deux formules suivantes :

$$L = \left(\frac{KG \times \sqrt{A}}{1,12} \right) \times \left(1 + \sqrt{\left(1 - \left(\frac{1,12}{KG} \right)^2 \right)} \right) \quad I = \left(\frac{KG \times \sqrt{A}}{1,12} \right) \times \left(1 - \sqrt{\left(1 - \left(\frac{1,12}{KG} \right)^2 \right)} \right)$$

Où, L : la longueur du rectangle en km ;
 I : la largeur du rectangle en km ;
 KG : l'indice de Gravelius sans dimensions ;
 A : la surface du bassin en km².

L'application sur le Rhéraya donne : L=36.67 km et I=6.11 km

La figure suivante illustre la représentation du rectangle équivalent du Rhéraya doté de son hypsométrie :

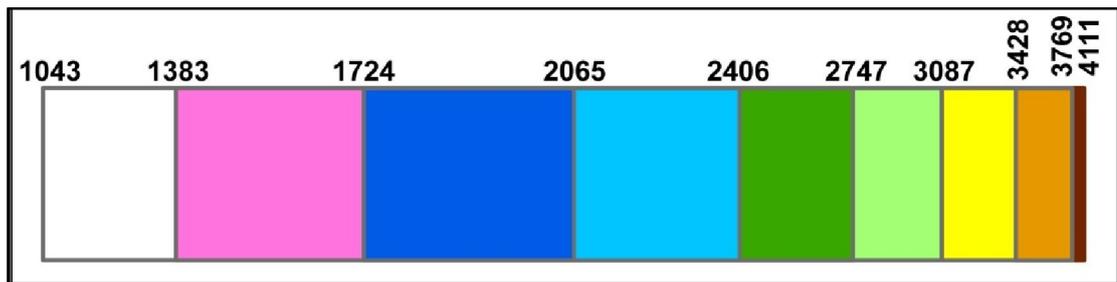


Fig. 14 : le rectangle équivalent du bassin versant de Rhéraya pourvu de son hypsométrie

En se référant à cette figure, nous remarquons un resserrement des courbes tout en se déplaçant vers l'amont, ce qui implique une abondance des pentes de plus en plus fortes vers les hautes altitudes, alors que depuis le milieu du bassin jusqu'à l'exutoire les terrains ont l'air d'être plus aplaties.

6. Le temps de concentration

Théoriquement, il désigne le temps écoulé avant qu'une particule d'eau qui tombe au point le plus éloigné du bassin arrive à l'exutoire. On l'assimile à la durée de temps entre la fin de la pluie et la fin du ruissellement. Ce facteur est en relation direct avec le paramètre « Lag », qui lui reflète le décalage entre la pointe de l'hétérogramme de pluie et la pointe de l'hydrogramme de débit, ainsi il s'avère très utile de le déterminer pour l'anticipation des crues.

Pour le calculer, il existe une variété de formules où interviennent le plus souvent les paramètres géométriques et/ou l'état de surface. La formule la plus souvent utilisée dans la bibliographie est celle de Giandoht ci-dessous :

$$T_C = (4 \times A^{0,5} + 1,5 \times L) / (0,8 \times (H_{\text{moy}} - H_{\text{min}})^{0,5})$$

Où, T_C : le temps de concentration en heures ;
 A : la surface du bassin en km² ;
 L : la longueur du rectangle équivalent en km ;
 H_{moy} : l'altitude moyenne du bassin en m ;
 H_{min} : l'altitude de l'exutoire en m.

Avec une surface de 224.23 km², un « L » de 36.67 km, une « H_{moy} » de 2172 m et une « H_{min} » de 1055.49 m, l'application de cette formule sur le Rhéraya donne la valeur de 4.3 heures. En revanche, cette formule est loin d'être réaliste, puisque elle ignore l'effet de l'occupation du sol sur l'augmentation ou la diminution du temps de concentration.

Pour prouver cette opinion, nous se proposons d'utiliser à nouveau les capacités du logiciel WMS qui offre 11 autres formules pour le calcul de ce paramètre. Six d'entre elles sont appropriées au calcul sur les bassins versants, distinguées en fonction des facteurs engagés et du contexte d'application (voir l'annexe 1 pour la description de chaque formule). Le tableau ci-après résume les résultats trouvés :

Méthode	Temps de concentration (heures)
Kirpich 1	2.4651
Kirpich 2	4.9302
Kirpich 3	0.9860
Kirpich 4	3.2298
Kirpich 5	6.4595
Kirpich 6	1.2919

Tab. 5 : Les valeurs du temps de concentration issues de l'utilisation des formules proposées par le logiciel WMS

En faisant le rapport entre le résultat de chaque formule et son domaine d'application évoqué dans l'annexe 1, nous pouvons dire que :

- Pour les formules appliquées aux zones non montagneuses (1,2 et 3) : le temps de concentration du Rhéraya acquis sa valeur la plus élevée lorsque on l'assimile à un bassin envahi par de la végétation (4.9302). Cette valeur se voit diminuée si on lui dérobe sa végétation en rendant sa surface nue (2.4651). Si on pousse les actions anthropiques plus par l'exemple d'une urbanisation excessive de la surface, on se retrouve avec une valeur très courte de ce paramètre (0.9860).
- Pour les formules appliquées aux zones montagneuses (4, 5 et 6) : c'est le même concept qui se manifeste avec une augmentation globale des valeurs expliquée par l'atténuation des effets par l'intégration du paramètre CN (estimé moyen, donc défavorisant l'écoulement) dans le calcul.

En effet, ces simples calculs démontrent l'effet des scénarios de changement d'occupation du sol, par la déforestation ou l'urbanisation, sur la réduction des délais entre le temps de pointe de la pluie et le temps où le débit atteindra son plafond, et donc augmenter le risque d'inondations sur les biens et les personnes.

Bref, pour le moment nous retenons la valeur de 3.2298 heures obtenue à l'issu de l'utilisation de la méthode Kirpich 4, puisque c'est elle qui décrit mieux notre environnement, en attendant une valeur confirmée lors de la calibration.

III. Le régime pluviométrique et hydrométrique du bassin versant

1. Le régime Pluviométrique

Pour l'étudier nous disposons de trois stations pluviométriques : Tahnaout (1971/72 – 2009/10), Asni (1937/38 – 1995/96) et Aremd (1999/00 – 2009/10). Mais, suite à l'hétérogénéité dans les périodes couvertes par les mesures dans ces trois postes, nous allons se limiter aux données pluviométriques recueillies sur les deux stations de Tahnaout et d'Aremd, c'est à dire sur la période 1999/00 – 2009/10, d'une part parce que ces deux stations se situent l'une en amont et l'autre en aval, et d'autre part, car c'est la période où nous allons extraire les événements de simulation (voir chapitre 3) et donc cette étude va nous servir pour évaluer la qualité des données mise en œuvre dans la modélisation.

Notez bien que les résultats obtenus sur cette courte période d'observations ne sont pas forcément représentatifs du régime pluviométrique global du Rhéraya.

1.1. Les précipitations mensuelles, saisonnières et annuelles

a. Les précipitations mensuelles

A partir de l'observation de la figure 14, nous pouvons remarquer que les mois les plus arrosés de la station de Tahnaout sont Avril et Octobre, pour Aremd ce sont Octobre et Février. Les mois les plus secs sont Juillet et Août pour Tahnaout, Juillet et Mai pour Aremd.

En comparant les précipitations dans ces deux localités, il s'est avéré que celles d'Aremd sont plus importantes qu'à Tahnaout pour six mois, durant les six autres mois c'est le contraire qui se manifeste.

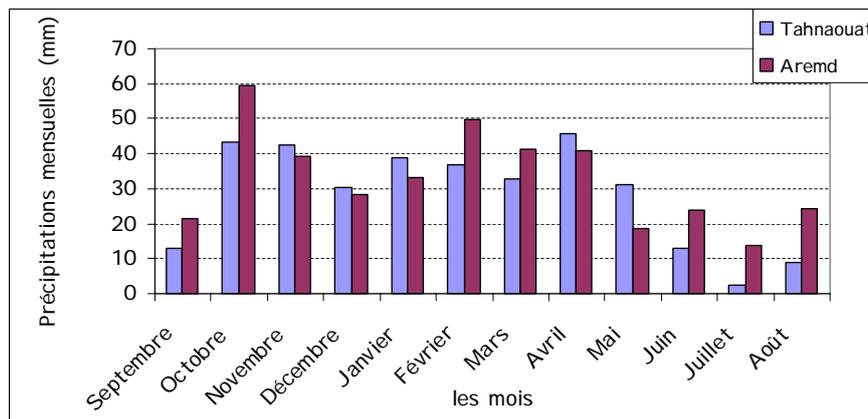


Fig. 15 : Les précipitations mensuelles interannuelles dans les deux stations de Tahnaout et Aremd (1999-00 à 2008-09)

En effet, ces remarques sont intrigantes, du fait que :

- Les analyses faites sur une série de données plus longue de la station de Tahnaout [15] révèlent que les mois les plus arrosés sont bien entendu Avril mais au lieu d'Octobre c'est Mars qui prend le relais. Ceci peut être dû à la période d'analyse (1998/09 - 2008/09) affectée par des orages d'automne survenant exceptionnellement lors de cette période, et que nous pouvons éviter si on allonge la période. Ou bien, que cette première décennie du troisième siècle est le début d'un changement total dans le régime pluviométrique de la zone en entier, mais ceci reste à prouver sur les autres bassins de Tensift.
- Les précipitations mesurées en Aremd doivent être naturellement plus importantes qu'à Tahnaout, vu l'effet du gradient altitudinal, mais puisque la supériorité en termes de pluie est à moitié partagée pendant l'année entre les deux stations, donc apparemment qu'il y a un second facteur qui intervient dans la distribution des précipitations dans le Rhéraya. En fait, en essayant de repérer les mois où Tahnaout est plus arrosée qu'Aremd, on trouve que ça commence de Novembre jusqu'au Mai (le Février exclu), et en pensant aux informations de l'enneigement connues sur le bassin versant qui disent que la neige commence en Décembre et s'achève en Mai [13], nous pouvons donc relier ces résultats à la phase d'enneigement qui débute en Novembre, baisse d'amplitude pendant le mois de Février, puis se réactive à nouveau jusqu'au mois Mai.

En profitant de ces résultats d'analyse des précipitations mensuelles sur le Rhéraya, nous pouvons déduire que le choix des événements de simulation doit se concentrer de préférence sur la période supposée non enneigée, afin d'éviter les erreurs de modélisation liées à la mauvaise estimation de la variable pluie.

b. Les précipitations saisonnières

En ce qui concerne les précipitations saisonnières du bassin d'étude, la figure ci-après montre que l'automne est le plus pluvieux sur la station d'Aremd ensuite les précipitations diminuent progressivement dans les saisons qui se succèdent. Pour la station de l'exutoire, les précipitations commencent faibles pendant l'été puis augmentent pour atteindre leur pic en printemps.

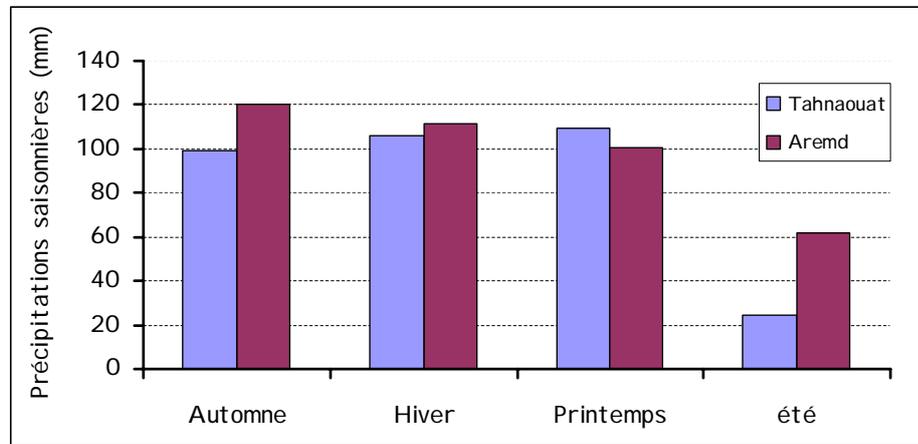


Fig. 16 : Les précipitations saisonnières interannuelles dans les deux stations de Tahnaout et Aremd (1999-00 à 2008-09)

L'explication la plus probable de ce phénomène est que pour Tahnaout, il confirme ce qu'on a trouvé dans l'analyse de la figure précédente des précipitations mensuelles, c'est-à-dire que le mois le plus sec est Juillet (été), puis la pluie s'accroît pour atteindre son pic en Avril (printemps). Aremd quant à elle, reconferme l'effet de l'enneigement sur les mesures enregistrées, cela veut dire que le décroissement aperçu dans la hauteur de précipitations saisonnières n'est pas engendré par une diminution dans les apports pluviométriques, mais plutôt lié à un changement de l'état des précipitations recueillis par le bassin: du liquide au solide.

c. Les précipitations annuelles

La figure 16 illustre les précipitations annuelles dans deux stations du Rhéraya. En général, celles d'Aremd sont plus importantes que celles de Tahnaout conséquence directe de l'effet d'altitude. En outre, la variation annuelle présentée semble être un phénomène cyclique en évolution vers le haut matérialisé par une montée puis une décente d'ampleur croissante (voir figure 16).

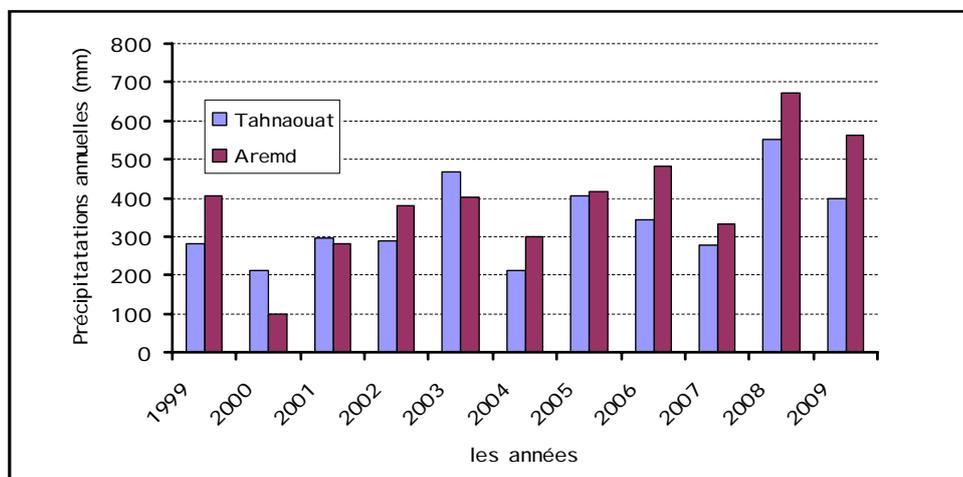


Fig. 17 : Les précipitations annuelles dans les deux stations de Tahnaout et Aremd (1999-00 à 2008-09)

Sachant que la hauteur des précipitations moyennes annuelles sur les deux stations est 339.1 mm pour Tahnaout et 394.15 mm pour Aremd, donc le module pluviométrique moyen annuel du bassin est de 362.66 mm.

1.2. La corrélation entre les précipitations

L'objectif de cette opération est de qualifier l'homogénéité des précipitations dans le Rhéraya premièrement à l'échelle spatiale en prenant l'exemple d'une station en aval (Tahnaout) et une autre en amont (Aremd), et deuxièmement, à l'échelle temporelle en analysant les précipitations journalières, mensuelles, saisonnières et annuelles. Les données qui seront utilisées sont recueillies par les deux stations Tahnaout et Aremd, et sont étalées sur la période 1999/00 – 2009/10 pour les précipitations journalières, mensuelles et annuelles.

a. Les précipitations journalières

Avec un coefficient de corrélation de 0.48, la corrélation linéaire entre la pluie journalière de Tahnaout et celle d'Aremd est faible (figure 17). De plus, la pente positive de la droite de régression signifie que généralement la pluie en Aremd est plus importante qu'à Tahnaout.

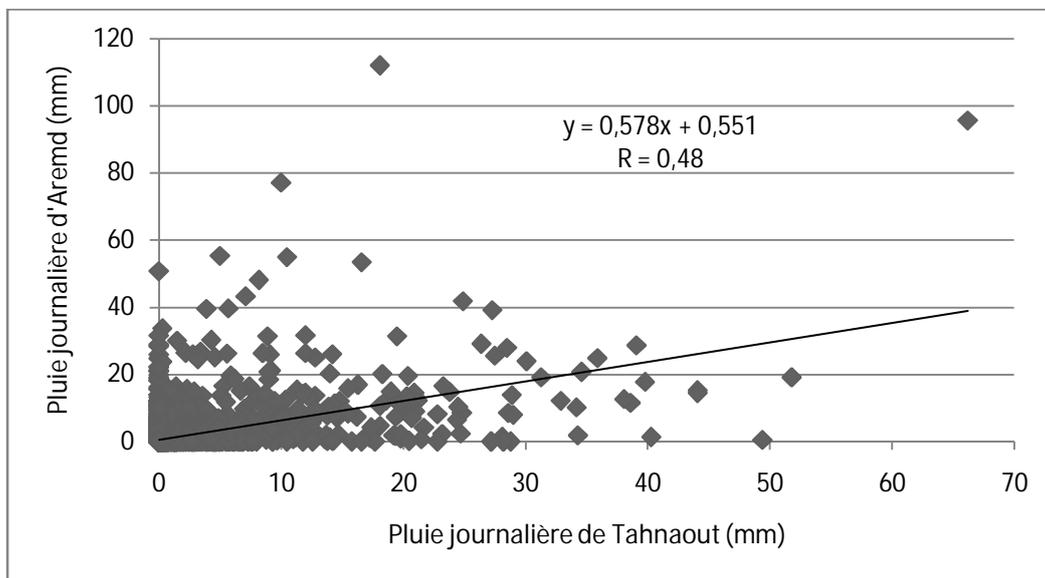


Fig. 18 : La régression linéaire simple entre les précipitations journalières de Tahnaout et d'Aremd (1999-00 à 2009-10)

Ces résultats reflètent le problème d'hétérogénéité spatiale des précipitations dans le Rhéraya à l'échelle journalière. Ceci risque de sous ou surestimer la pluie moyenne sur le bassin de Rhéraya, qui va être par la suite utilisée dans notre modèle, par conséquent, nous pouvons prévoir d'ici même des volumes de crue simulés supérieurs ou inférieurs aux volumes réels.

b. Les précipitations mensuelles

En remontant à une échelle de temps plus grande (mensuelle), nous constatons que le coefficient s'élève à 0.69 (figure 18), soit disant une amélioration de 30% dans la relation linéaire entre la pluie d'Aremd et de Tahnaout. La droite de régression garde toujours la même pente, mais ses coefficients « a » et « b » augmentent ce qui montre l'accroissement des différences entre la pluie d'Aremd et de Tahnaout si on les compare aux différences à l'échelle journalière.

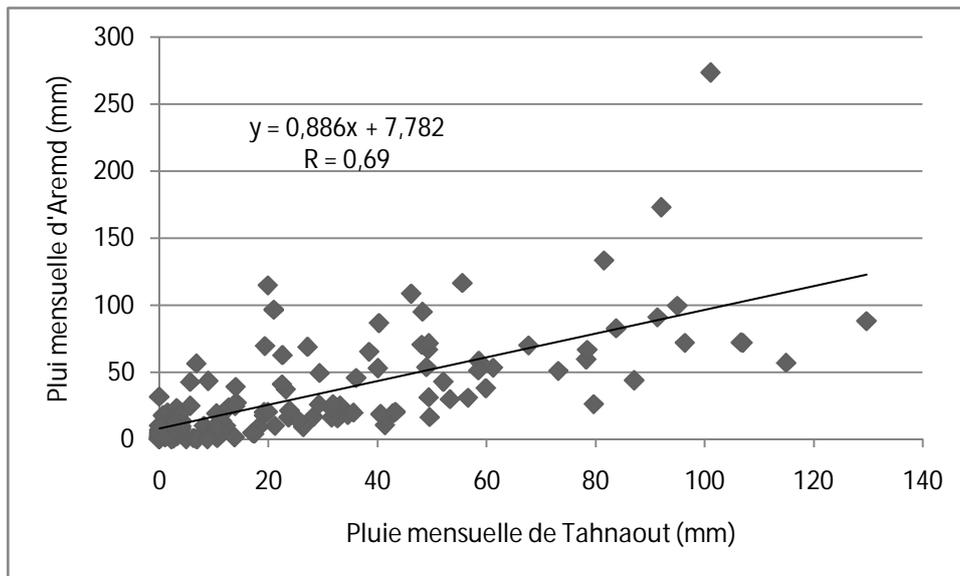


Fig. 19 : La régression linéaire simple entre les précipitations mensuelles de Tahnaout et d'Aremd (1999-00 à 2008-09)

Le changement de l'échelle d'analyse de la relation pluie amont-pluie aval, a eu son effet sur la compensation des hauteurs de précipitations enregistrées dans les deux stations qui sont provoquées par tous les événements pluvieux du mois en considération, c'est-à-dire que la différence de hauteur de pluie de Tahnaout et Aremd durant un événement, sera compensée par la différence liée à un autre.

c. Les précipitations saisonnières

Dans ce cas, nous remarquons que le coefficient de corrélation est quasiment fixe par rapport au cas précédent (figure 19), tandis que les coefficients de la droite de corrélation augmentent davantage les différences de pluie entre Aremd et Tahnaout. La compensation entre les événements pluvieux sur l'échelle saisonnière reste presque pareille à celle mensuelle.

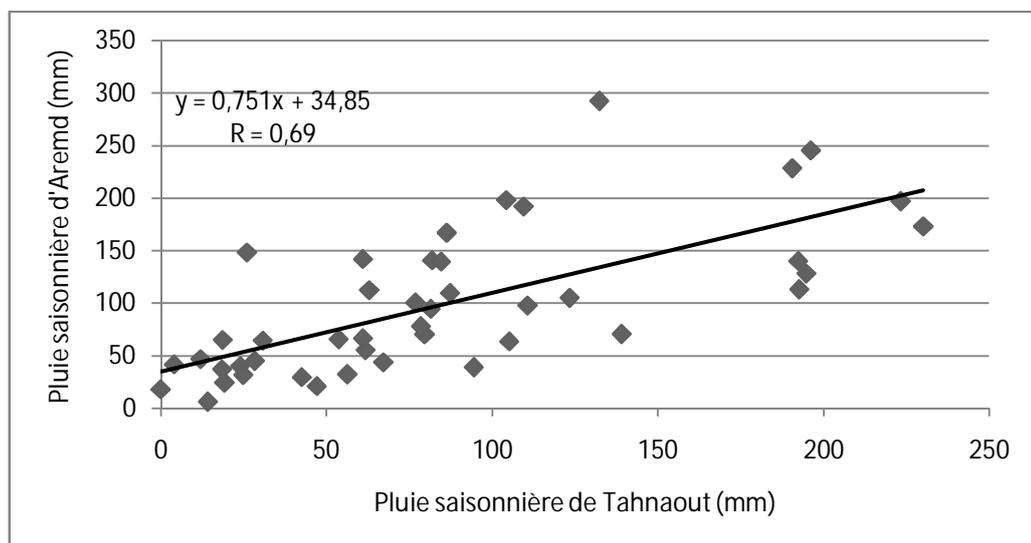


Fig. 20 : La régression linéaire simple entre les précipitations saisonnières de Tahnaout et d'Aremd (1999-00 à 2008-09)

d. Les précipitations annuelles

À cette échelle, la corrélation entre la pluie à Aremd et Tahnaout affiche une bonne valeur de 0.8 pour son coefficient. Cette valeur indique l'existence d'une relation linéaire entre les précipitations en amont et en aval du Rhéraya dû à la restriction de l'action des facteurs impliqués dans le phénomène d'hétérogénéité spatiale.

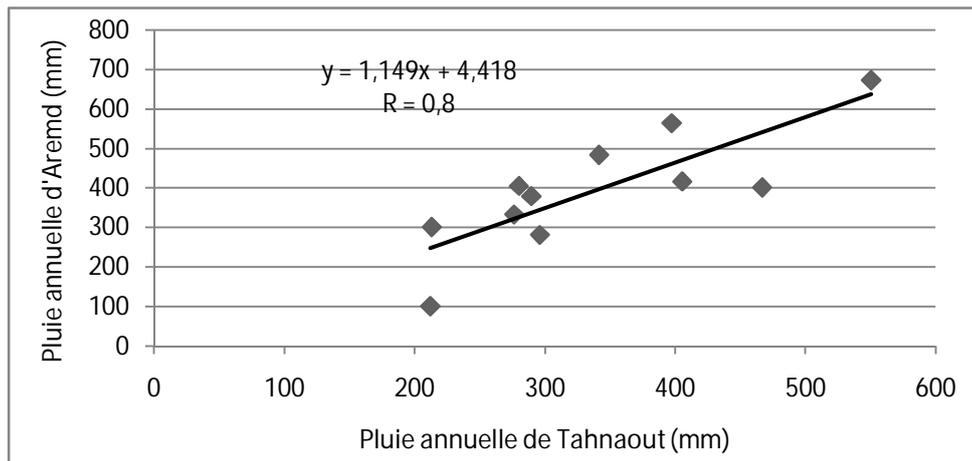


Fig. 21 : La régression linéaire simple entre les précipitations annuelles de Tahnaout et d'Aremd (1999-00 à 2008-09)

En effet, en augmentant l'échelle temporelle d'analyse, le problème d'hétérogénéité spatiale des précipitations se réduit, mais ce constat ne peut pas être généralisé sur tout le bassin de Rhéraya qu'une fois on a poussé l'analyse sur le reste de stations du réseau de pluviomètres, afin d'étudier l'hétérogénéité dans les trois dimensions de l'espace (en amont et en aval, en cuvette et en tête de montagne,...).

D'après toutes ces remarques, nous pouvons conclure qu'en addition aux contraintes d'accès aux données des pluviographes et du nombre de stations pluviométriques disponibles, les mauvaises corrélations qu'on vient d'avoir, en particulier celles des précipitations journalières, vont sans doute influencer les résultats pas seulement du modèle en question, mais de toute modélisation globale faite sur le Rhéraya.

1.3. L'analyse statistique des précipitations journalières des deux stations

L'utilité de cette sous partie est de chercher les averses quantiles dont nous aurons besoin dans le troisième chapitre pour modéliser l'effet de ces derniers sur les débits à l'exutoire du bassin. La méthode employée est l'ajustement des précipitations journalières de Tahnaout et d'Aremd aux lois de probabilité statistiques proposées par un logiciel d'analyse statistique probabiliste.

a. La station d'aval : Tahnaout

Après l'ajustement des précipitations journalières de cette station aux différentes lois statistiques, nous avons essayé de comparer les résultats issus de chacune par deux critères appelés BIC (Bayesian Information Criterion) et AIC (Akaike Information Criterion), dont les valeurs sont faibles pour la loi la mieux adaptée. Le tableau suivant récapitule ce qu nous avons eu :

Loi	BIC	AIC
Exponentielle (Maximum de vraisemblance)	12066.391	12055.151
GEV (Maximum de vraisemblance)	12277.292	12260.431
Gumbel (Maximum de vraisemblance)	13345.325	13334.085
Weibull (Méthode des moments)	12017.967	12006.727
Normal (Maximum de vraisemblance)	14597.984	14586.744
Log normal (Maximum de vraisemblance)	12056.454	12045.213
log normal à 3-paramètres (Maximum de vraisemblance)	12062.033	12045.173
Gamma (Maximum de vraisemblance)	12043.13	12031.89
Inverse Gamma (Maximum de vraisemblance)	12767.457	12756.217
Log-Pearson type III (SAM)	11999.406	11982.546
Log-Pearson type III (WRC)	11987.208	11970.347
Log-Pearson type III (BOB)	11995.664	11978.803

Tab. 6 : la comparaison des lois ajustées aux précipitations journalières de la station de Tahnaout

En comparant les critères BIC et AIC des 12 lois, il s'est avéré que la loi Log Pearson III (WRC) est la mieux ajustée à la station de Tahnaout. La figure et le tableau associés représentent respectivement le graphe d'ajustement de cette loi et les hauteurs de pluie estimées pour différentes périodes de retour :

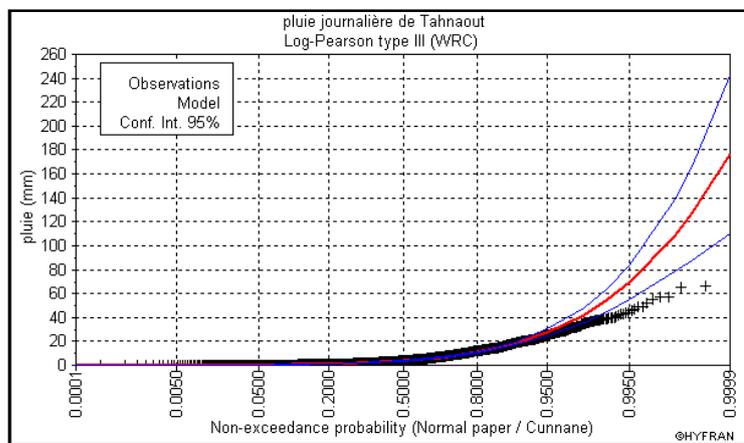


Fig. 22 : Le graphe d'ajustement de la loi Log Pearson III (WRC) aux précipitations journalières de Tahnaout (1999-00 à 2009-10)

Période de retour (ans)	Valeur de pluie estimée (mm)	Intervalle de confiance
2000	127	87.8 - 167
1000	108	78.0 - 138
200	69.3	55.0 - 83.6
100	54.9	45.3 - 64.5
50	42.0	36.0 - 48.1
20	27.5	24.6 - 30.3
10	18.3	16.9 - 19.8
5	10.9	10.3 - 11.6
3	6.57	6.18 - 6.95
2	3.70	3.46 - 3.94

Tab. 7 : Les valeurs estimées par la loi Log Pearson III (WRC) des précipitations journalières à la station de Tahnaout

b. La station d'amont : Aremd

De la même façon, les précipitations journalières d'Aremd ont été ajustées aux lois statistiques pour ressortir la mieux adaptée. Le tableau suivant résume ce que nous avons eu :

Loi	BIC	AIC
Exponentielle (Maximum de vraisemblance)	4456.137	4446.778
GEV (Maximum de vraisemblance)	4360.252	4346.213
Gumbel (Maximum de vraisemblance)	5084.431	5075.072
Weibull (Méthode des moments)	4391.949	4382.59
Normal (Maximum de vraisemblance)	5886.022	5876.663
Log normal (maximum de vraisemblance)	4284.558	4275.199
log normal à 3-paramètres (Maximum de vraisemblance)	4784.015	4769.976
Gamma (Maximum de vraisemblance)	4397.881	4388.521
Inverse Gamma (Maximum de vraisemblance)	4431.075	4421.715
Log-Pearson type III (SAM)	4293.927	4279.889
Log-Pearson type III (BOB)	4303.951	4289.912
Log-Pearson type III (WRC)	4290.525	4276.486

Tab. 8 : la comparaison des lois ajustées aux précipitations journalières de la station d'Aremd (1999-00 à 2009-10)

Pour cette station, la loi la plus adaptée est le log normal, ses résultats de précipitations estimées et son graphe d'ajustement sont représentés ci-dessous :

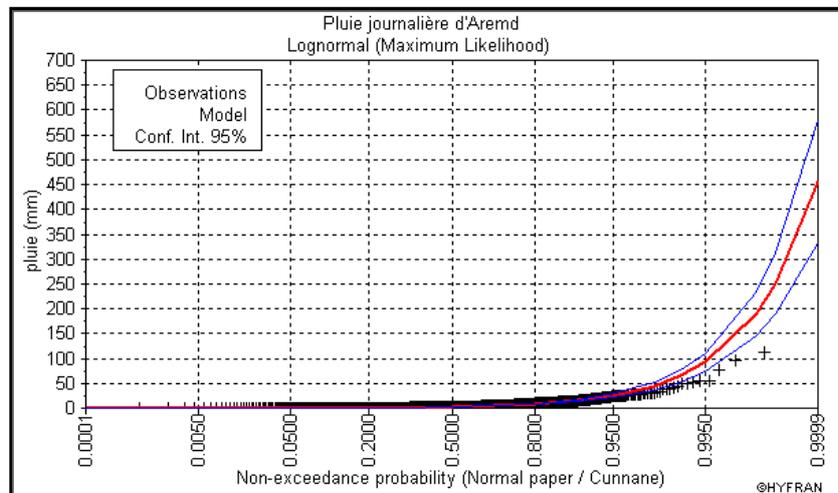


Fig. 23 : Le graphe d'ajustement de la loi Log normal aux précipitations journalières d'Aremd (1999-00 à 2009-10)

Période de retour (ans)	Valeur de pluie estimée (mm)	Intervalle de confiance
2000	251	189 - 312
1000	189	145 - 234
200	92.4	73.8 - 111
100	65.3	53.1 - 77.5
50	44.6	37.0 - 52.2
20	25.2	21.5 - 29.0
10	15.2	13.2 - 17.2
5	8.21	7.29 - 9.14
3	4.63	4.16 - 5.10
2	2.54	2.29 - 2.78

Tab. 9: Les valeurs estimées par la loi Log normal des précipitations journalières à la station d'Aremd

c. Les averses quantiles

Les hauteurs de précipitations attribuées à ces averses sont les moyennes des valeurs estimées pour les deux stations de Tahnaout et Aremd, ainsi nous obtenons le tableau suivant :

Période de retour (ans)	Valeur estimée pour Aremd (mm)	Valeur estimée pour Tahnaout (mm)	Valeur estimée pour le Rhéraya (mm)
2000	251	127	189
1000	189	108	148.5
200	92.4	69.3	80.85
100	65.3	54.9	60.1
50	44.6	42	43.3
20	25.2	27.5	26.35
10	15.2	18.3	16.75
5	8.21	10.9	9.555
3	4.63	6.57	5.6
2	2.54	3.7	3.12

Tab. 10 : Les hauteurs de précipitations estimées à Tahnaout en Aremd et au Rhéraya pour différentes périodes de retour

2. Le régime hydrométrique

2.1. Les débits mensuels, saisonniers et annuels à la station de Tahnaout

a. Les débits mensuels

La figure 24 présente la variation des débits moyens mensuels interannuels à l'exutoire du Rhéraya, elle démontre le caractère pluvio-nival du régime hydrologique de l'Oued Rhéraya, manifesté par deux bosses de débit : une légère augmentation pendant les mois d'automne suite aux premières précipitations, suivie d'une autre plus marquée en printemps résultante en grande partie de la fonte du stocke neigeux.

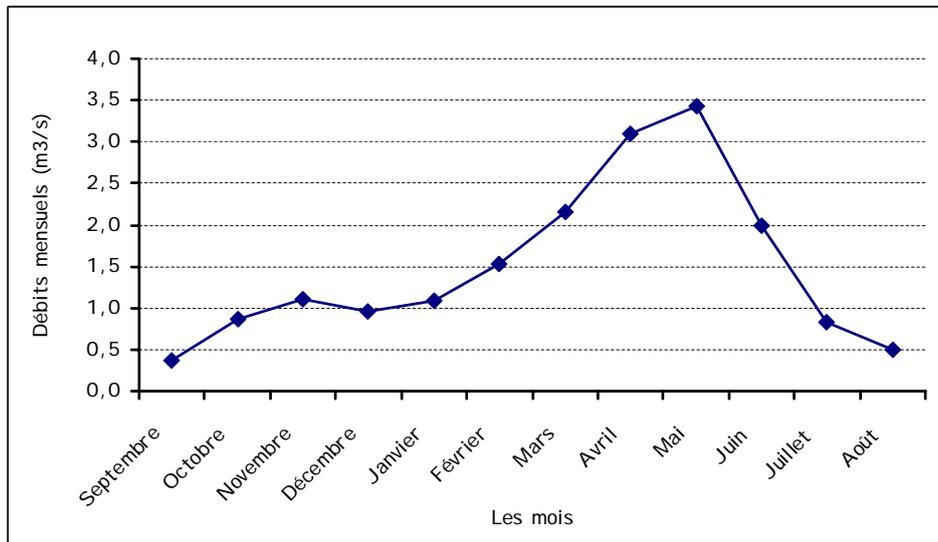


Fig. 24 : Les débits mensuels enregistrés à la station de Tahnaout (1962-63 à 2008-09)

b. Les débits saisonniers

De même que la figure précédente, sur la figure 25 nous constatons une augmentation lente de l'automne à l'hiver, puis le débit remonte à son pic en printemps avant de régresser à des valeurs plus bas en été. Ces observations consolident ce qui a été dit sur le régime hydrologique du Rhéraya.

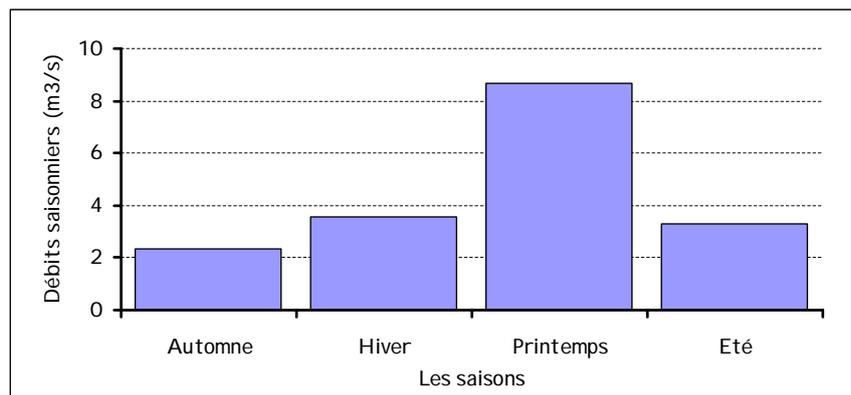


Fig. 25 : Les débits saisonniers enregistrés à la station de Tahnaout (1962-63 à 2008-09)

c. Les débits annuels

Pour ce qui est des débits annuels, nous voyons qu'ils sont très variables d'une année à l'autre, mais en gros ils s'affichent comme une fonction cyclique de montée et descente. Le Débit moyen interannuel du bassin est de $1.49 \text{ m}^3/\text{s}$.

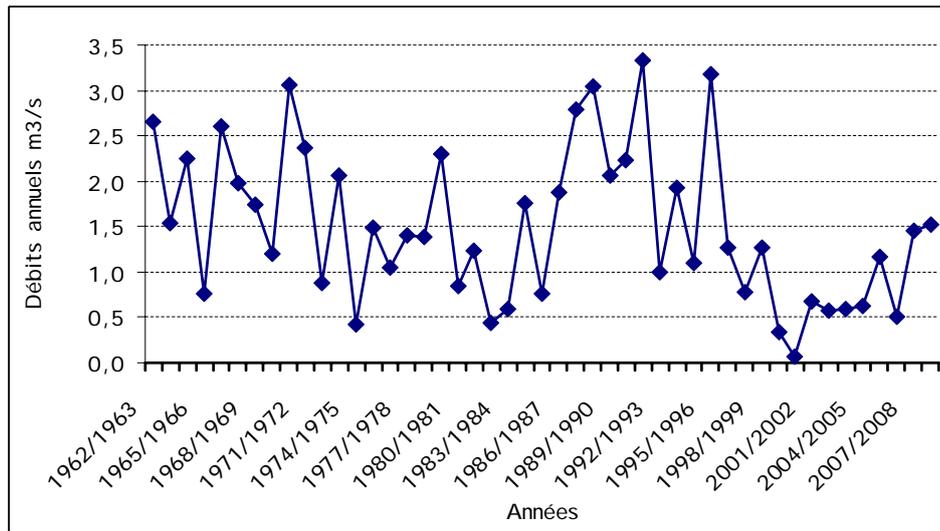


Fig. 26 : Les débits annuels à la station de Tanhaout (1962-63 à 2008-09)

2.2. L'analyse statistique des débits maximums journaliers à la station de Tahnaout

L'essai d'ajustement des lois statistiques aux débits maximums journaliers mesurés à l'exutoire du bassin a donné les résultats étalés sur le tableau suivant :

Loi	BIC	AIC
Exponentielle (Maximum de vraisemblance)	9515.19	9502.31
GEV (Maximum de vraisemblance)	7773.02	7753.71
Gumbel (Maximum de vraisemblance)	13250.35	13237.47
Weibull (Méthode des moments)	8463.95	8444.63
Helphen type A (Maximum de vraisemblance)	30582.42	30569.54
Normal (Maximum de vraisemblance)	7763.47	7750.59
Log normal (maximum de vraisemblance)	18982.26	18962.94
log normal à 3-paramètres (Maximum de vraisemblance)	8814.51	8801.63
Gamma (Maximum de vraisemblance)	10732.16	10719.28
Inverse Gamma (Maximum de vraisemblance)	7773.02	7753.71
Log-Pearson type III (SAM)	7654.90	7635.59
Log-Pearson type III (BOB)	12263.88	12244.56

Tab. 11 : La comparaison des lois ajustées aux débits maximums journaliers de Tahnaout (1998-2010)

En comparant les BIC et les AIC des lois précitées, on en déduit que la loi considérée comme la mieux ajustée aux débits de Tahnaout est la loi Log Pearson III (SAM). Son graphe illustrant cet ajustement et ses valeurs présumées pour des périodes de retour prédéfinies sont présentés ci-dessous :

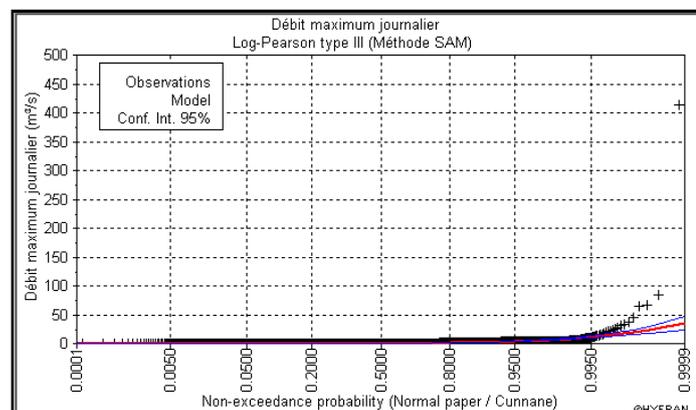


Fig. 27 : Le graphe d'ajustement de la loi Log Pearson (SAM) aux débits maximums journaliers de Tahnaout (1998-2010)

Période de retour (ans)	Débit estimé (m ³ /s)	Intervalle de confiance
2000	23.8	17.9 - 29.6
1000	19.6	15.4 - 23.7
200	11.5	10.00 - 13.1
100	8.8	7.89 - 9.72
50	6.46	5.95 - 6.97
20	3.97	3.74 - 4.21
10	2.52	2.37 - 2.67
5	1.41	1.32 - 1.50
3	0.806	0.756 - 0.855
2	0.43	0.405 - 0.454

Tab. 12 : Les valeurs débits estimées par la loi Log Pearson III (SAM) à la station de Tahnaout

Les résultats issus de cette analyse statistique à savoir la loi adaptée et les débits estimés, sont largement sous-estimés car la période d'étude est courte, et devront alors être sujet d'une critique approfondie.

IV. Conclusion

L'étude hydro-géomorphologique du bassin de Rhéraya a permis de caractériser ses composantes les plus importantes, et de révéler un tas d'informations qui vont aider à expliquer et à justifier les résultats obtenus dans le chapitre suivant. En effet, il s'est avéré que toutes les conditions notamment l'imperméabilité des formations géologiques, les apports pluviométriques, l'occupation du sol en dégradation continue, les sols peu évolués, le temps de concentration court, les pentes rudes, toutes ces conditions se réunissent pour classer le Rhéraya à la tête des bassins exigeant un intérêt prioritaire dans les études attachées au PNPI. En outre, nous avons pu identifier quelques facteurs qui peuvent détériorer la qualité des résultats de la modélisation en l'occurrence les problèmes d'hétérogénéité spatio-temporelle des précipitations, et des critères sur le choix des événements de simulation.

Chapitre 3 : Application du modèle HEC-HMS au bassin versant de Rhéraya et prédiction du comportement

A. La modélisation du bassin du Rhéraya avec HEC-HMS

I. Les données d'entrée du modèle

1. Le modèle numérique du terrain

Avant de procéder à n'importe quelle opération de préparation d'un fichier de simulation HMS, il est primordial d'avoir à sa possession le MNT de la zone d'étude, dont le rôle est fondamental dans la caractérisation physique du bassin et le calcul des paramètres.

Ce type de MNT dont les propriétés sont définies dans le tableau 13, va subir des traitements sur le logiciel WMS pour le rendre prêt à l'utilisation, à savoir :

- Convertir la projection initiale à une projection planimétrique afin de déverrouiller le processus de caractérisation du bassin.
- Découper la zone d'étude afin de minimiser le temps de calcul et augmenter sa précision.
- Ajuster le MNT à la topographie locale en se référant à une carte topographique par exemple.
- Remplir les dépressions éventuelles dues opérations précédentes.

Caractéristiques	Descriptions
Capteur satellite	Aster Global SRTM
Couverture du capteur	Nord 83 degrés au Sud 83 degrés, 22702 scènes
Dimensions de la scène	1 degré par 1 degré
Résolution	1 arc-second (90 m)
Projection	Géographique latitude et longitude
Géοide de référence	WGS84/EGM96
Numéro de la scène utilisée	ASTGDEM2_0N35006
Ses coordonnées	35.5 N et 5.5 W
Date d'acquisition des données	17 octobre 2011

Tab. 13 : Les caractéristiques du MNT utilisé dans la modélisation

2. La carte d'occupation du sol

Vu les exigences particulières de la combinaison modulaire choisie, plus précisément la méthode NRCS CN comme fonction de production, l'établissement d'une carte d'occupation du sol sur l'ensemble de la zone d'étude était une voie incontournable. Toutefois, l'information supposée contenue dans cette carte devrait être authentique à la classification reconnue par le NRCS, par conséquent nous étions mené à faire des correspondances entre les classes de la NRCS et les informations recueillies de toutes les données bibliographiques répertoriées qui traitent ce volet. Ces données sont :

Numéro	Carte	Source	Année représentée
1	La carte d'occupation du sol du sous bassin d'Imenane de 2002	[13]	2002
2	La carte d'occupation du sous bassin d'Imlil	[24]	2002
3	La carte types de peuplements de la foret de Rhéraya 1/25000	DREF	2001

4	La carte de l'indice NDVI	image TM	2002
5	Les images satellitaires (bande visible)	Google Earth	2003
6	Carte n°3 la carte des unités physiques du bassin versant de la Rhéraya	[33]	2004
7	Carte n°7 le taux de couverture des sols par la végétale arborée dans le bassin versant de la Rhéraya	[33]	2004
8	Carte n°8 : le Taux de couverture des sols par les plantes annuelles et pérennes dans le bassin versant de la Rhéraya	[33]	2004
9	Carte n°9 : le Taux de couverture des sols par la litière dans le bassin versant de la Rhéraya	[33]	2004
10	Carte n°10 : le Taux de couverture des sols par les rochers dans le bassin versant de la Rhéraya	[33]	2004

Tab. 14 : les cartes utilisées pour l'élaboration de la carte d'occupation du sol NRCS du bassin du Rhéraya

Après cette première phase de collecte de données, vient l'étape d'attribuer une date à la future carte d'occupation du sol, autrement dit toutes ces cartes devraient être reportées à la même année, afin de converger vers un état initial du bassin bien définie à la base de laquelle se feront nos simulations à la fois de modélisation et de prédiction du comportement. En fait, l'année référentielle choisie devrait homogénéiser les informations décrites par toutes ces cartes, surtout celles utilisées comme support fondamental de la carte d'occupation du sol, dans notre cas les cinq premières cartes, par conséquent c'est l'année 2002 qui semble rassembler toutes ces données. En revanche, cette date de référence est considérée ne pas être figée à une année, mais elle oscille dans un intervalle plus ou moins court en fonction du taux du changement de l'occupation du sol à l'intérieur du bassin étudié.

Ensuite, nous déterminons les classes de notre carte en faisant des correspondances entre les classes associées aux cartes fondamentales et secondaires et la table de classification de NRCS, ainsi nous aboutissons aux résultats détaillés dans l'annexe 2, tout en connaissant que la contribution des classes des cartes employées peut être soit directe en identifiant une classe d'occupation du sol, ou bien indirecte en déterminant la condition hydrologique d'une des classes.

Après, en superposant les informations extraites de ces cartes nous arrivons à définir les classes de notre carte d'occupation du sol NRCS présentées dans le tableau suivant :

Code attribué	Classification NRCS			Nom attribué
	Type de la couverture	Traitement	Condition hydrologique ²	
11	Newely graded area	-	-	Zone urbanisée
200	Fallow	Bare soil	-	Sol nu
210	Row Crops	Straight row	mauvaise	Arboricultures
225	Small grain	Contoured terraced + Crop residue Cover	mauvaise	Céréalicultures
323	Brush	-	mauvaise	Matorral
343	Woods	-	mauvaise	Forêt claire
342	Woods	-	moyenne	Forêt moyenne
423	Oak-Aspen	-	mauvaise	Chêne claire

² : La condition hydrologique d'une classe NRCS est la combinaison des facteurs influençant l'infiltration et le ruissellement incluant la densité de la végétation, la quantité d'herbe, pourcentage des résidus de couverture, ...etc.

422	Oak-Aspen	-	moyenne	Chêne moyenne
421	Oak-Aspen	-	Bonne	Chêne dense
433	Pinyon-Juniper	-	mauvaise	Genévrier clair
432	Pinyon-Juniper	-	moyenne	Genévrier moyen
431	Pinyon-Juniper	-	bonne	Genévrier dense
Imperméable	-	-	-	% d'imperméable

Tab. 15 : Classes d'occupation du sol NRCS définies pour le bassin du Rhéraya

Une fois les classes ont été identifiées, nous avons passé à les digitaliser sur un logiciel de SIG et à leurs attribuer les codes de la table NRCS décrite dans l'annexe 3. En effet, cette table permet de déterminer la valeur du paramètre CN pour chaque combinaison occupation du sol-type de sol possible. La carte d'occupation du sol finale élaborée pour le bassin du Rhéraya est la suivante :

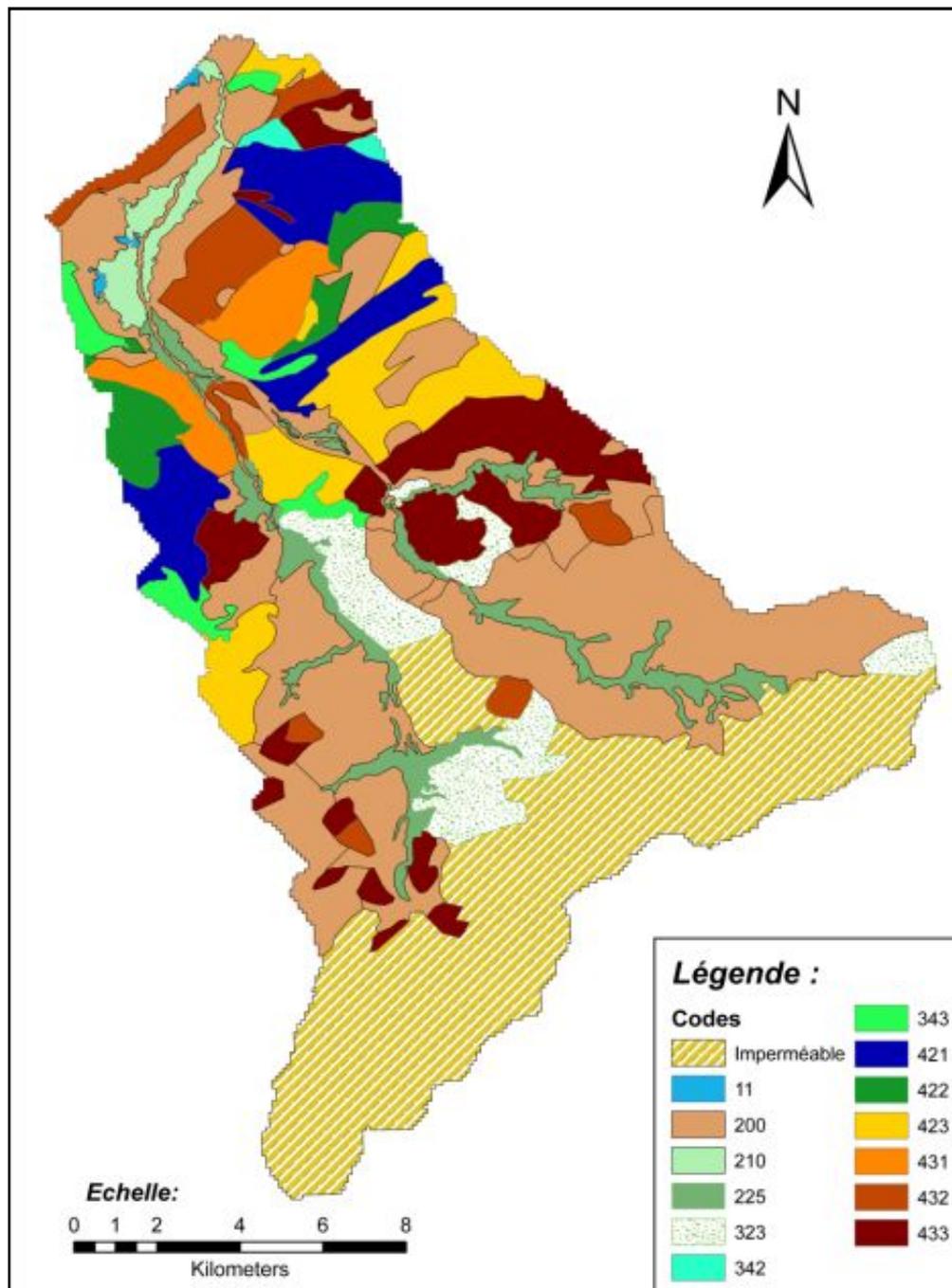


Fig. 28 : La carte d'occupation du sol type NRCS du bassin versant du Rhéraya

3. La carte des sols

Comme c'est le cas pour la carte d'occupation du sol, l'élaboration d'une carte des sols type NRCS était indispensable pour la détermination du paramètre CN de la fonction de production. Or, sur notre zone d'étude, il n'existe aucune carte qui renseigne sur la texture des sols, donc nous étions obligés de faire des approximations et des correspondances à partir des données bibliographiques accessibles. Ces données utilisées sont :

- La carte pédologique simplifiée de Chaponnière [9].
- La carte pédologique du Tensift (Sud Med).
- La carte d'occupation du sol NRCS élaborée.
- La carte du taux de couverture des sols par les cailloux et les rocs dans le bassin versant de la Rhéraya [33].
- Les tableaux récapitulatifs des relevés de terrain [33].

À partir de ces données nous avons procédé comme suit pour établir notre carte de sols type NRCS :
Premièrement : nous avons redéfini une partie imperméable où supposons l'absence totale de sol en se référant à la carte d'occupation du sol NRCS.

Pour la carte des sols de Chaponnière qui contient trois classes distinguées entre autres par leurs textures (tableau 16), nous avons retenu deux types et rejeté le troisième :

- « Vallée » : car théoriquement il peut renvoyer au même type de sol de point de vue texture, puisque nous l'affectons à une zone complètement occupée par de l'activité agricole.
- « Squelettique » : car d'après la bibliographie, il est le plus répandu dans notre bassin.
- « Versant » : négligé car il ne reflète pas une entité homogène de sol, qui peut être variable d'un versant à l'autre sous l'effet de la végétation et l'érosion (surtout de point de vue texture).

	Types de sol		
	Vallée	Versant	Squelettique
Texture (Argile/limon/éléments fins et grossiers)	40/10/50	20/30/50	10/25/65

Tab. 16 : les types de sol de la carte pédologique simplifiée utilisés par Chaponnière

Toutefois, la texture attachée à ces deux types de sol intègre en plus des portions d'argile, de limon et de sable, la portion d'éléments grossiers qui ne rentre pas dans la détermination de la texture d'un sol, donc pour la retrancher nous avons utilisé la troisième carte citée tout en respectant l'approximation suivante :

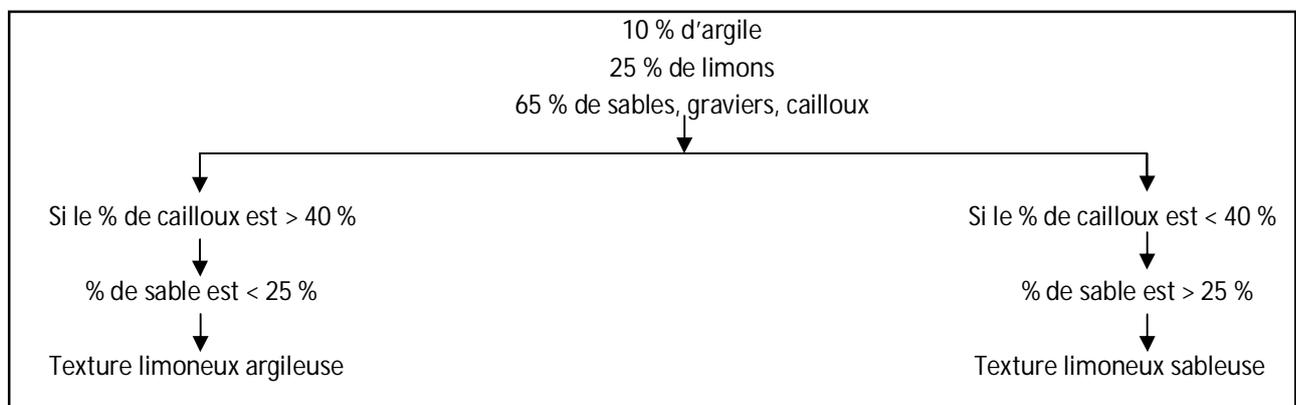


Fig. 29 : L'approximation utilisée pour transformer le sol squelettique en texture

Pour le type de sol « Vallée », nous avons considéré que le pourcentage de 50 % d'éléments fins et grossiers que Chaponnière lui associe représente en très grande partie l'élément sable, puisque il s'agit d'un sol agricole où l'absence d'éléments grossiers comme les cailloux est plus probable que leur présence. Ainsi pour ce type de sol nous lui avons attribué le type A (sol sableux).

Troisièmement pour la carte pédologique de Tensift, qui caractérise notre bassin par huit types de sol, mais ce n'est que leur moitié que nous avons pu relier directement aux classes NRCS (l'autre moitié est négligée), à savoir :

- Les sols squelettiques d'altitudes auxquels nous avons appliqué une transformation identique à celle expliquée dans la figure 29.
- Les sols sableux argileux peu profonds estimés comme de type B vu qu'ils sont peu profonds [31].
- Les sols sableux superficiels représentant le type A
- Les sols bruns zonaux sur schistes que nous avons considéré aussi de type A en reposant sur les relevés de terrain qui déclarent qu'il s'agit d'un sol très sableux [33].

Finalement, en combinant les résultats issus de chaque étape nous arrivons à reconnaître trois types de sol sur le bassin, que nous avons digitalisé par la suite dans un logiciel de SIG, sans oublier de leur attribuer leurs codes A, B et C. La figure 30 représente la carte de sol NRCS du Rhéraya.

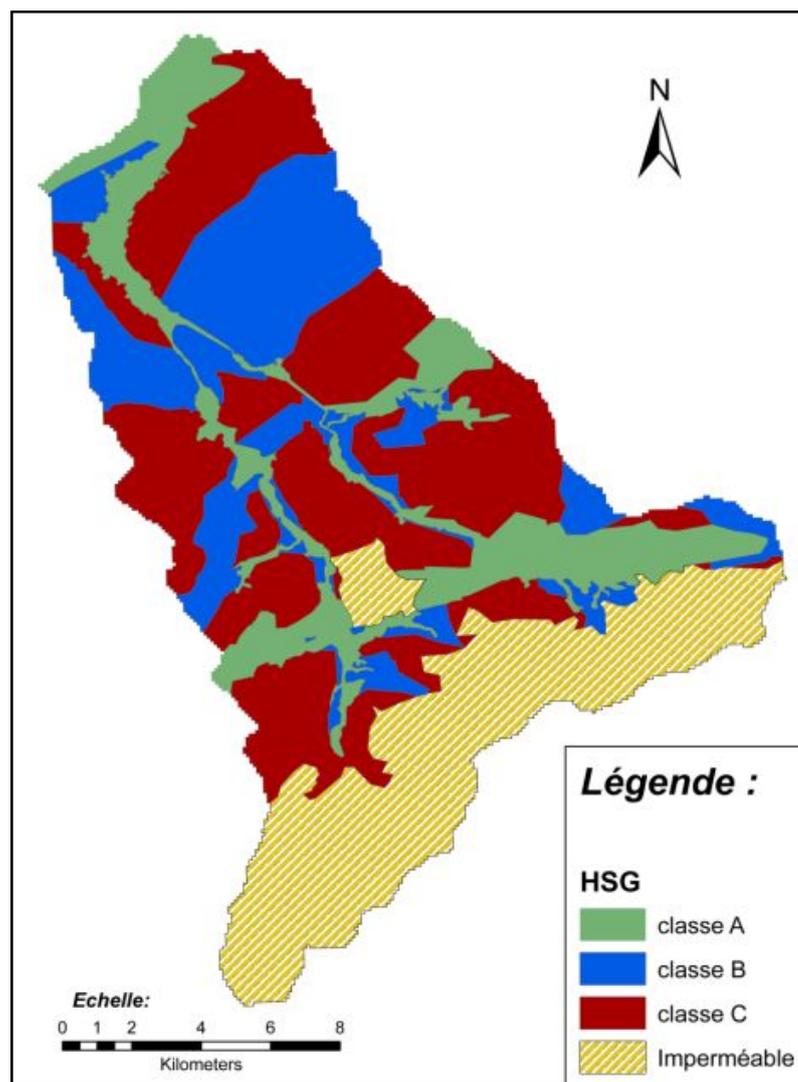


Fig. 30 : la carte des sols type NRCS du bassin versant du Rhéraya

4. La donnée pluie

Pour chaque événement, la pluie devrait être saisie sous forme de la hauteur de pluie tombée sur le bassin pendant le jour où cet événement est survenu, au quelle nous associons chaque fois une des quatre distributions NRCS. Dans notre cas, nous nous étions limités à la période 1999/00 – 2009/10 pour être à la base de laquelle se fera le choix des événements de simulation pour quatre raisons :

- Raison 1 : la période de choix devrait être la plus longue possible, afin de subvenir aux besoins de robustesse des simulations événementielles, c'est-à-dire d'avoir au moins une dizaine d'événements de crue avec des débits de pointe considérables.
- Raison 2 : Vu l'immense l'hétérogénéité spatio-temporelle des précipitations évoquée dans le chapitre précédent, la mise en œuvre des données pluviométriques d'une seule station et la définir comme représentative d'une pluie homogène sur toute la surface du bassin est loin d'être assimilable, donc le recours à une moyenne arithmétique ou pondérale est une nécessité afin de réduire l'erreur du modèle à cause de cette variable.
- Raison 3 : nous avons dû utiliser deux stations pluviométriques qui se localisent en amont et en aval du bassin pour diminuer l'effet du gradient altitudinal des précipitations et donc en faisant leur moyenne, nous avons plus de chances de tomber sur les précipitations réelles eues sur le bassin en totalité, et par la suite la précision sur le volume ruisselé sera mieux estimée. De ce fait les deux stations de Tahnaout en exutoire et Aremd en amont sont les mieux répondants à ce critère.
- Raison 4 : étant un modèle directement affecté par les changements d'état de surface du bassin en l'occurrence l'occupation du sol et les types de sol, le modèle HEC-HMS requiert un certain degré de stabilité de ces deux propriétés entre les événements de calibration et validation. En effet, la carte d'occupation du sol élaborée reflète celle du bassin vers les années 2002-2003, et donc la fourchette d'années de choix ne doit pas s'éloigner de celles-ci, et plus on en fait, pire seront les résultats du modèle.

Alors, et en se référant aux raisons préalablement cités, nous avons choisi d'extraire les événements de la période 1999/00 – 2009/10, auxquels nous appliquerons la moyenne arithmétique des deux stations d'Aremd et de Tahnaout, que nous avons utilisée après, comme variable d'entrée au modèle HEC-HMS.

Après le balayage des débits de la période précisée, le nombre d'événements que nous avons pu trouver est de 46, dont 9 affichent des débits de pointe supérieurs à $12 \text{ m}^3/\text{s}$.

II. L'élaboration du modèle

Avant de débiter la calibration, nous avons préparé tous les fichiers de simulations des neuf événements préalablement présélectionnés, en prenant en compte les quatre types d'averses NRCS et les deux formalismes de la fonction de transfert pour analyser la sensibilité du modèle successivement aux types d'averse et aux formalismes. Ainsi, nous avons 72 fichiers de simulation comme le montre la figure 31.

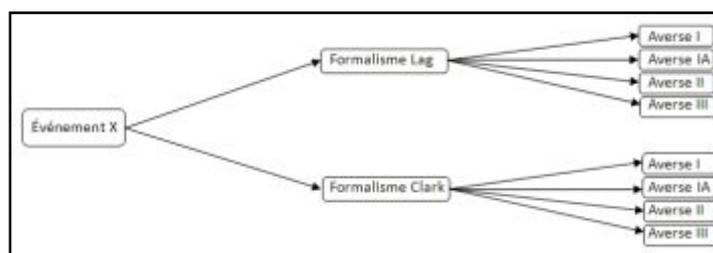


Fig. 31 : Nombre de fichiers de simulation préparés pour chaque événement

Pour chacun des 72 fichiers de simulation, on aura les données suivantes :

Module du modèle		Entrée	valeur	Unité
Le bassin		La surface	224.23	km ²
Module météorologique		Pluie moyenne	Fonction de l'événement	mm
		Le type d'averse ³	-	-
Module de la fonction de production	NRCS CN	Abstraction initiale « Ia »	8	mm
		Curve Number « CN »	72.24	-
		Le pourcentage d'imperméable	24.42 %	-
Module de la fonction de transfert ⁴	NRCS	Temps Lag « T _{Lag} »	150.354	min
	Clark	Temps de concentration « T _C »	3.2298	heures
		Coefficient de stockage « S _T »	5.2697	heures
Module du débit de base	Récession exponentielle	Débit initial « Q ₀ »	Fonction de l'événement	m ³ /s
		Constante de récession « R _C »	0.8	-
		Seuil « T _d »	0.3	-

Tab. 17 : Les entrées à saisir pour chaque fichier de simulation

III. La calibration du modèle

Afin d'aboutir aux valeurs optimisées des paramètres du modèle, la calibration a été effectuée pour les 72 fichiers de simulation en utilisant la fonction de recherche nommée « gradient uni-varié » et la fonction objective sur le débit de pointe.

À partir des résultats de la calibration détaillés dans les parties 1 et 2 de l'annexe 4, nous pouvons constater d'une manière générale que la valeur de la fonction objective, les valeurs optimisées des paramètres, les débits de pointe et de base et le volume simulés varient tous en fonction de l'événement, du type de l'averse sélectionné et du formalisme choisi pour la fonction de transfert.

En effet, en fouillant les résultats minutieusement nous pouvons clairement remarquer que :

- Dans le cas du choix du formalisme Lag : la fonction objective n'est jamais nulle pour les quatre types d'averses d'un événement sauf dans deux cas (7 et 26). Pour les autres événements la fonction objective prend sa valeur minimale si on utilise les averses types I et IA. Ce constat est valide pour les débits de pointe, où ils sont mieux restitués lors de l'utilisation des averses I et IA. Pour les volumes simulés, ils sont toujours surestimés quelque soit l'événement et quelque soit le type d'averse, mais en comparant les averses entre elles, nous apercevons que les types I et IA surestiment moins. Les débits de base quant à eux, ils semblent être mal simulés par la méthode choisie, ainsi nous les trouvons parfois surestimés (7, 30, 41 et 48) et des fois sous-estimés (4, 10 et 11). En ce qui concerne les valeurs optimisées des paramètres, nous remarquons que le « T_d » est toujours fixe, les autres paramètres changent en passant d'un événement à l'autre, et sont moins variables au sein du même événement. Ces jeux de paramètres ne peuvent en aucun cas servir pour valider le modèle puisque ils sont totalement différents entre les événements, cette variation est liée au fait que les paramètres prennent des valeurs non acceptables pour minimiser la fonction objective et diminuer la surestimation des volumes de crue et des débits de base.

³ : Il faut sélectionner pour chaque fichier un seul type des averses NRCS (I, IA, II ou III).

⁴ : Il faut sélectionner pour chaque fichier un seul formalisme de la fonction de transfert (NRCS ou Clark).

- Dans le cas du choix du formalisme Clark : à part les deux événements 10 et 30 qui sont éliminés à cause de leurs mauvais résultats eus, nous remarquons que la restitution des hydrogrammes a été nettement améliorée pour tous les événements lorsqu'on substitue le Lag par Clark. Au fait, la fonction objective devient nulle quelque soit l'événement et peu importe le type d'averse, sauf dans deux cas où elle n'est nulle que pour les averses I et IA, cette bonne efficacité de la fonction objective est résultante de la restitution parfaite du modèle de 85 % des débits de pointe. Pour les volumes de crue, nous constatons que le problème de surestimation excessive persiste toujours, chose qui est bien comprise car la fonction de transfert n'a pas d'effet sur le volume de la crue, mais c'est plutôt sur le mouvement de ce volume qu'elle intervienne. De même, les débits de base n'ont pas beaucoup changé et nous remarquons qu'ils suivent dans leurs évolutions la variation des volumes (figure 32), ainsi plus les volumes sont surestimés, pire sera la reproduction des débits de base.

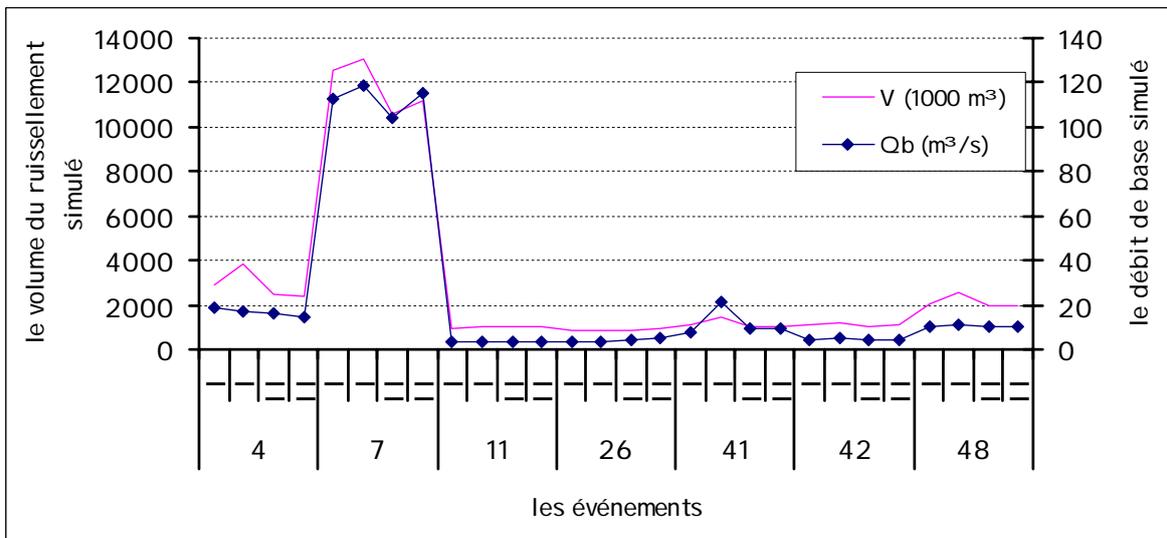


Fig. 32 : L'évolution des volumes et des débits de base pour les événements de simulation en utilisant le formalisme Clark

D'après cette première calibration, nous avons pu ressortir quelques conclusions, qui vont nous permettre de restreindre le nombre de simulations à partir desquelles nous en déduirons le jeu de paramètres optimale, ces conclusions sont :

- Le formalisme de l'hydrogramme unitaire de Clark s'avère plus adapté à notre contexte d'étude que celui du NRCS, donc la recherche des valeurs des paramètres optimales va être concentré dans ses résultats détaillés dans la partie 2 de l'annexe 4.
- Les deux événements 10 et 30 n'ont pas montré une amélioration de l'efficacité comme celle aperçue chez les autres événements lors du changement du formalisme de la fonction de transfert, par conséquent ils ont été négligés de l'analyse qui va venir.
- Les averses types I et IA ont été les mieux classés dans la restitution des caractéristiques de l'hydrogramme (débit de pointe, de base et volume), ainsi nous allons nous limiter aux calibrations qui les ont employées comme distribution de la pluie moyenne tombée.
- La fonction objective sur le débit de pointe a permis sans doute de reproduire les pics des hydrogrammes avec excellence, mais la calibration ne parvient pas à la restitution des volumes et des débits de base, les causes suspectées de ce dysfonctionnement sont soit la mauvaise estimation des variables d'entrée de la fonction de production (pluie moyenne, distribution journalière de cette pluie) ou de ses paramètres (CN, Ia et le %

d'imperméable), ou bien du choix de la fonction objective elle-même. Ces soupçons seront vérifiés par la suite.

- Pour tous les événements, l'hydrogramme simulé était comme prévu, loin d'épouser la forme de celui observé, donc leur comparaison va reposer plus sur ces trois caractéristiques : débit de pointe, de base et volume simulés.

En utilisant les résultats simplifiés présentés dans la partie 3 de l'annexe 4, nous avons procédé à plusieurs approches pour aboutir au jeu de paramètres optimal, en l'occurrence :

- Méthode 1 : Utilisation de la moyenne des valeurs les plus fréquentes des paramètres des 7 événements ;
- Méthode 2 : Utilisation des maximums des valeurs les plus fréquentes des paramètres des 7 événements ;
- Méthode 3 : Utilisation des maximums des valeurs des paramètres des 7 événements ;
- Méthode 4 : Utilisation de la moyenne des valeurs des paramètres pour chaque année (en pensant à l'effet du changement dans l'occupation du sol) ;
- Méthode 5 : Utilisation des valeurs les plus probables des paramètres pour chaque année (en comparant les pourcentages de différences entre les années).

Ces approches ont été exécutées sur les deux types d'averse I et IA afin de déceler celle qui permet, avec son jeu de paramètres, de converger vers une validation du modèle. Les résultats d'essai de validation des cinq méthodes sont reportés dans les parties 1 et 2 de l'annexe 5 et montrent que :

- L'averse type I : les pourcentages de différence entre le débit de pointe observé et simulé varie de 0.1 (méthode 1, événement 41) jusqu'à 40.1 (méthode 3, événement 48), mais en gros les événements les mieux reproduits sont 41 et 42 quelque soit la méthode utilisée, ceux qui sont mal reconstruits sont 7 et 48 (figure 33). Donc peu importe la méthode utilisée l'efficacité du modèle sur le débit de pointe diminue.

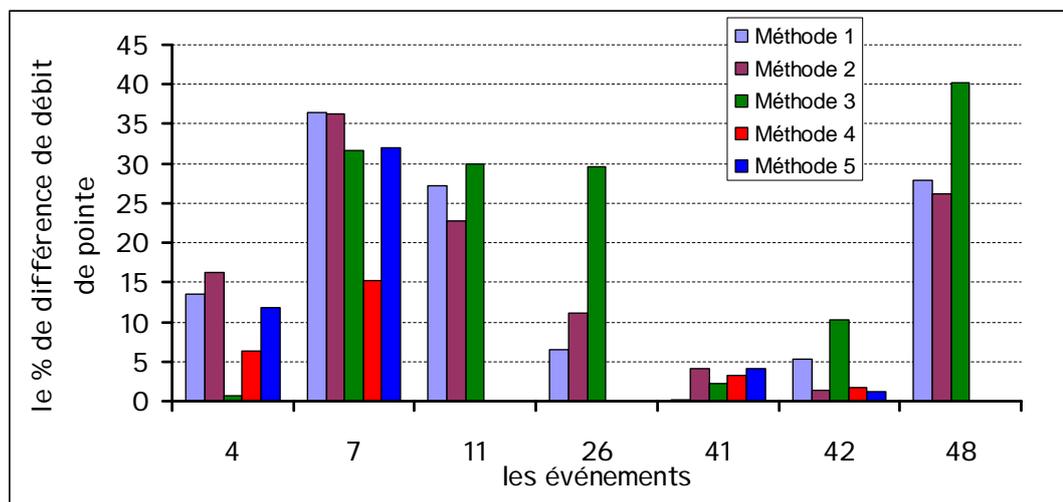


Fig. 33 : la différence de débits de pointe simulé et observé après validation par les cinq méthodes utilisées

Pour l'efficacité sur volume (figure 34), il apparaît qu'elle a un comportement différent en fonction de la méthode et de l'événement, par exemple elle a chuté pour l'événement 48, 42 et 11 quelque soit la méthode, elle a augmenté pour l'événement 7 et 26. En général, le problème de surestimation des volumes persiste encore, ce qui nous oblige à vérifier les hypothèses posées auparavant.

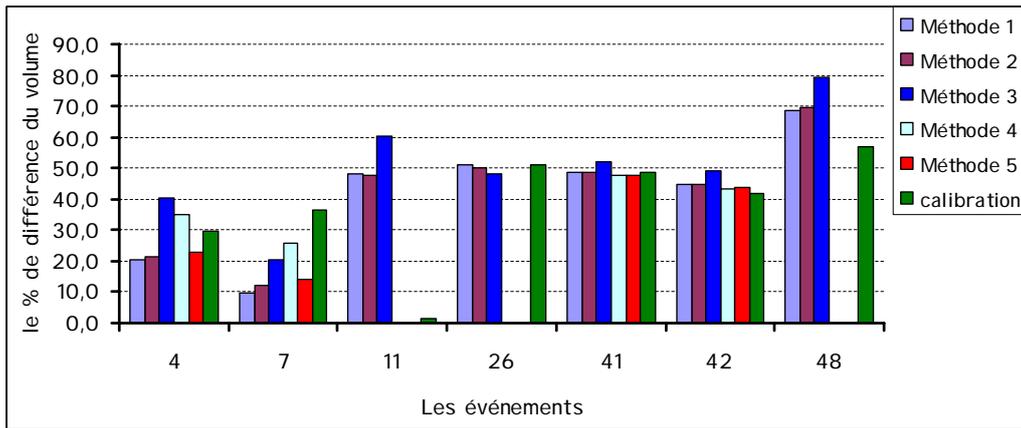


Fig. 34 : La différence de volume simulé et observé après validation par les cinq méthodes utilisées

En ce qui concerne le débit de base, il est presque surestimé par les cinq méthodes et pour tous les événements, la surestimation est beaucoup plus grande que celle eue dans le cas dans la calibration. Ce problème est lié en grande partie à la valeur fixe du paramètre T_d que nous n'avons pas pu expliquer.

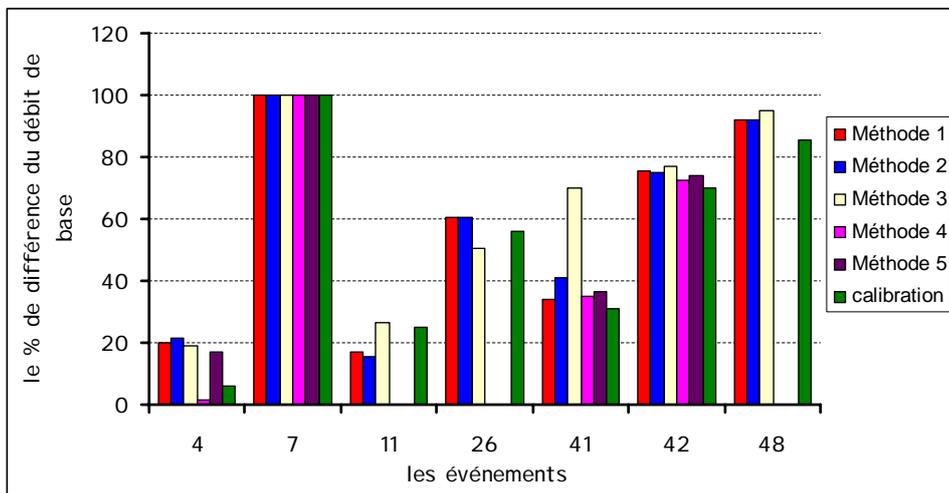


Fig. 35 : la différence du débit de base simulé et observé après validation par les cinq méthodes utilisées

- L'averse type IA : les résultats de validation pour les différentes méthodes sont quasiment pareils à ceux de l'averse I, avec un gain d'efficacité davantage en cas d'utilisation du type IA.

Ce premier essai de validation a permis de qualifier la méthode de la moyenne des valeurs pour chaque année comme étant celle qui donne les meilleurs résultats, ceci est justifiable en partie du fait que le modèle est étroitement lié à l'état du surface du bassin, c'est-à-dire que si considère que l'occupation du sol du Rhéraya varie intensément sur des périodes de temps courtes, donc les jeux de paramètres optimaux des événements ne seront jamais stables puisque chacun d'eux a survécu pendant un état de surface différent. Néanmoins, nous ne pouvons pas parler d'une validation du modèle en reposant sur ce premier essai, d'une part parce que nous n'avons pas assez d'événements dans chaque année, et d'autre part, car la mauvaise efficacité eue pendant la validation ne peut pas être liée seulement au changement dans l'occupation du sol, mais il faut aussi vérifier les hypothèses susmentionnées au début de cette partie, notamment :

- Le choix de la fonction objective.
- L'estimation du pourcentage d'imperméable.
- La distribution journalière de la pluie.

➤ Sensibilité du modèle à la fonction objective utilisée :

Nous avons pensé à cette cause pour expliquer l'instabilité des valeurs de paramètres, en partant du principe de fonctionnement de la fonction objective sur le débit de pointe qui donne plus d'importance à la restitution du pic de l'hydrogramme en faveur du volume et du débit de base, ainsi pour y arriver, la fonction de recherche du modèle donnera aux paramètres des valeurs qui peuvent être irréalistes comme celles observées dans la calibration. À cet effet, nous avons décidé d'employer cette fois-ci la fonction objective sur le volume et voir comment se comportera le modèle.

Cependant, malgré cette modification rien n'a changé en termes de restitution des volumes de crue, pire encore cette modification a provoqué une chute significative d'efficience à la fois sur le volume et sur le débit de pointe. Par conséquent, ce résultat nous a poussé à suspecter la fonction de production d'être à l'origine de cette défaillance.

➤ Sensibilité du modèle à la fonction de production

Après avoir éliminé la fonction objective des causes probables de ce problème, nous avons passé à vérifier la fonction de production chargée d'estimer le volume total de ruissellement dû à une hauteur de pluie donnée. En effet, une donnée clé dans cette transformation est le pourcentage d'imperméable du bassin, cette variable que nous avons estimée à partir de la carte d'occupation du sol à 24.42 % désigne qu'un volume de pluie sous forme d'un parallélepède dont la base est égale à 24.42 % de la surface du bassin et la hauteur égale la hauteur de pluie, ce volume est considéré véhiculé directement et sans pertes dans le réseau de drainage. Alors, si le volume de la crue simulé est surestimé, il est fort probable que ça provient d'une surestimation de ce pourcentage.

Dans le but d'évaluer cette estimation, nous avons utilisé l'événement 48 auquel nous diminuons ce pourcentage plusieurs fois pour voir comment ça se répercute sur son volume de crue simulé, cette opération s'arrêtera si la fonction objective n'est plus nulle, ou bien si le volume simulé s'arrête de diminuer.

Le choix de l'événement 48 averse IA, est dicté par les raisons suivantes :

- C'est le seul qui garde après sa calibration un jeu de paramètres à valeurs réalistes et proches des valeurs initiales.
- C'est le seul qui montre un graphe où se superpose le pic simulé à l'observé, donc les valeurs affichées des paramètres de la fonction de transfert sont optimales, et par suite nous sommes certain que la mauvaise restitution est en rapport avec la fonction de production.

La figure 36 représente la variation du volume simulé en fonction du pourcentage d'imperméable du bassin, les résultats complets de cette recalibration sont détaillés dans l'annexe 6. Elle montre que le volume simulé et le pourcentage d'imperméable sont proportionnelle jusqu'à ce qu'on attribue au pourcentage d'imperméable des valeurs inférieures à 20 %, à ce temps là les deux variables deviennent inversement proportionnelles, chose qui est en désaccord total avec la vraie relation pourcentage d'imperméable-volume de crue.

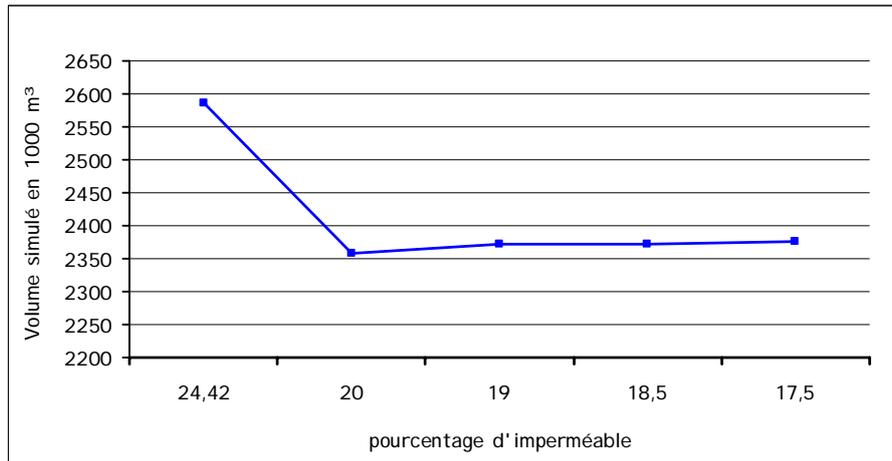


Fig. 36 : La variation du volume simulé de l'événement 48 en fonction du pourcentage d'imperméable

Nous pouvons expliquer cette contradiction par le fait que : dans la première partie où la droite est décroissante on est dans une phase où le volume du ruissellement est affecté en plus du pourcentage d'imperméable par un autre facteur inconnu pour le moment. Ainsi plus on diminue la valeur attribuée à ce pourcentage, plus on diminue sa part d'influence sur le volume de la crue, et simultanément on augmente la part d'influence de l'autre facteur. Au-delà de la valeur de 20 %, le pourcentage d'imperméable perd tout son effet sur le volume (matérialisée par la droite horizontale), et cède le relais d'influence entièrement à l'autre facteur.

En outre, notez bien que dès que la valeur du pourcentage se situe en dessous de 20 %, le pic de l'hydrogramme simulé commence à se décaler du pic observé, ce qui confirme que le modèle change les valeurs des paramètres de la fonction de transfert (supposées optimales) pour garder la fonction objective nulle (annexe 6, partie 2). Cette remarque nous affirme que le facteur inconnu n'est pas un des paramètres de la fonction de production, mais plutôt une de ses variables, car si ce n'est pas le cas, la fonction de recherche se penchera sur l'optimisation des paramètres CN et la au lieu de toucher aux valeurs déjà optimisées de T_c et S_t .

Cette opération nous a permis de rectifier la valeur du pourcentage d'imperméable qui vaut maintenant 20 %, de se débarrasser de son effet dans la surestimation des volumes de crue et d'identifier la source de la mauvaise efficacité du modèle qui ne peut être que la distribution temporelle de la hauteur de pluie journalière.

Faute d'absence des données de pluviographes qui vont substituer les averse type NRCS origine de l'imperfection du modèle, nous allons nous contenter de cette dernière calibration effectuée sur l'événement 48 pour essayer de valider le modèle, en rectifiant la valeur du pourcentage d'imperméable à 20 %, et en utilisant l'averse type IA la meilleure parmi les quatre. Le jeu de paramètre optimal utilisé est :

Paramètre	La fonction de production		La fonction de transfert		Le débit de base		% d'imperméable	Type d'averse
	la	CN	T_c	S_t	R_c	T_d		
Valeur optimisée	8.0797	69.379	4.8514	3.5305	0.54938	0.3	20	IA

Tab. 18 : le jeu de paramètres optimisé utilisé pour la validation du modèle HEC-HMS sur le bassin du Rhéraya

Ce jeu de paramètre optimisé est composé de valeurs de paramètres acceptées et réalistes comme c'est le cas du temps de concentration égale à ce qu'on a calculé par la méthode de Giandoht et Kirpich 2, et la valeur de CN très proche de celle estimée par la carte d'occupation du sol et de type de sol.

IV. La validation du modèle

Après le premier essai de validation fait par les cinq méthodes et qui n'a pas donné des résultats satisfaisants en matière de la restitution des débits de pointe, de volumes et des débits de base, cette nouvelle calibration effectuée sur l'événement 48 est censé améliorer l'efficacité du modèle.

En appliquant le jeu de paramètre défini dans le tableau 18 aux événements nous arrivons aux résultats suivants (les graphes sont présentés dans l'annexe 7):

Événement	Qp obs. (m ³ /s)	Qp sim. (m ³ /s)	% Diff.	V obs. (1000 m ³)	V sim. (1000 m ³)	% Diff.	Qb obs. (m ³ /s)	Qb sim. (m ³ /s)	% Diff.
4	67	29.72	38.5	1581.55	1897	9.1	21.5	8.54	43.1
7	413	112.31	57.2	5823.29	5726.22	0.8	0.08	68.51	99.8
11	15	15.45	1.5	459.87	999.7	37.0	4.83	3.86	11.2
26	18.52	9.83	30.7	276.66	637.7	39.5	0.97	2.18	38.4
41	24.877	15.39	23.6	378.89	882.1	39.9	3.93	7.68	32.3
42	18.762	13.27	17.1	457.07	943.94	34.8	0.75	3.19	61.9
48	38.015	38.02	0	568.5	2357.14	61.1	0.8	10.31	86.1

Tab. 19 : les résultats de validation du jeu de paramètre optimal de la nouvelle calibration

Ce tableau montre qu'avec le nouveau jeu de paramètres optimisés, le modèle a pu reproduire le débit de pointe de manière exacte pour l'événement 11, pour le reste nous apercevons une sous-estimation du débit qui fluctue entre 17.1 % et 57 %. Les volumes simulés quant à eux, ils varient entre 0.8 % pour l'événement 7 et 39 % pour 41 et 26. Enfin pour les débits de base, nous remarquons que la meilleure reconstruction est aperçue chez l'événement 11, les autres sont moins simulés par le modèle avec des pourcentages d'erreur qui voisine les 100 %.

Ces résultats sont en relation directe avec :

- La valeur du paramètre Td qui reste figée pendant la calibration, handicape l'aptitude de la méthode de la récession exponentielle dans la restitution du débit total après le pic de l'hydrogramme même si nous considérons que la valeur de R_c est optimisée. En effet, cette valeur qui vaut 0.3 signifie que l'aquifère souterrain reprendra sa contribution à la forme de l'hydrogramme une fois le débit régresse à 30 % du pic. Or, le tableau 20 montre que plus le débit de base observé après le pic s'éloigne de 30 % du débit de pointe, plus le pourcentage d'erreur sur le débit de base augmente. Cette observation prouve que la mauvaise restitution du débit de base pour la plupart des événements est conséquente d'une relation nappe-rivière très variable dans le Rhéraya (comparer l'événement 11 aux autres événements) ou dû à la mauvaise qualité de la donnée débit mesurée.

Événement	Qp _{obs.} (m ³ /s)	Qb _{obs.} (m ³ /s)	0.3*Qp _{obs.}	(0.3*Qp - Qb) _{obs.}	Le % d'erreur sur le Qb
4	67	21.5	20.10	-1.40	43.1
7	413	0.08	123.90	123.82	99.8
11	15	4.83	4.50	-0.33	11.2
26	18.52	0.97	5.56	4.59	38.4
41	24.877	3.93	7.46	3.53	32.3
42	18.762	5.63	5.63	4.88	61.9
48	38.015	11.40	11.40	10.60	86.1

Tab. 20 : La relation entre le débit de pointe et le pourcentage d'erreur commise sur le débit de base

- Les volumes surestimés sont provoqués essentiellement par l'utilisation des averses de projet NRCS au lieu des distributions temporelles acquises à partir des pluviographes comme nous l'avons démontré dans la partie calibration. En outre, la distinction des événements quant à leurs humidités antérieures pendant les cinq jours qui précèdent la crue, pourra aussi expliquer le fait que quelque soit le jeu de paramètres (en particulier la valeur du CN) que le modèle utilise, il y aura toujours une erreur plus ou moins grande dans la restitution des volumes.

Cependant, si nous comparons ces résultats avec ceux du premier essai de validation fait par la méthode de la moyenne des paramètres pour chaque année, nous trouvons que ce nouveau jeu de paramètres est plus performant que le premier surtout pour les volumes, ainsi pour les débits de pointe par exemple (figure 37) nous remarquons que la méthode de la moyenne des paramètres le simule mieux, sauf pour l'événement 11 où c'est le second jeu de paramètre qui reproduit fidèlement le débit de pointe.

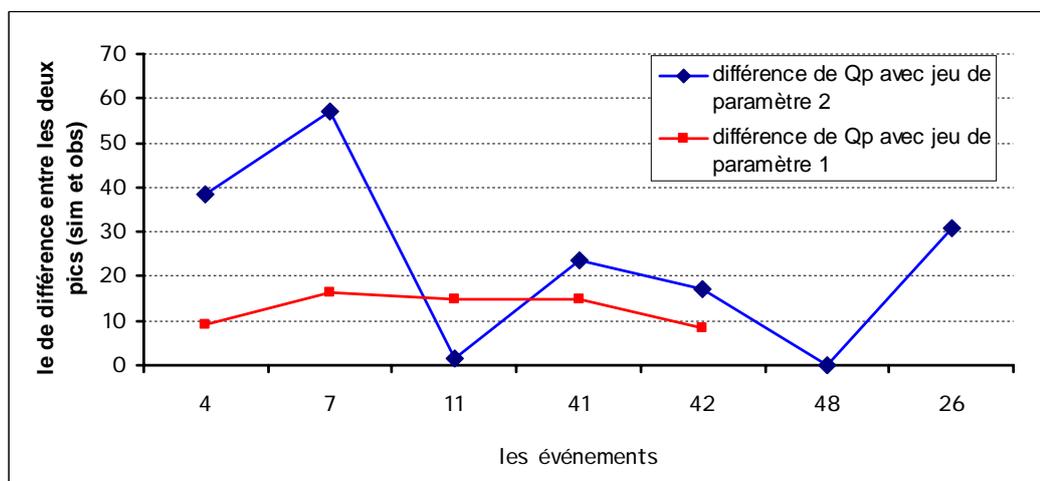


Fig. 37 : la comparaison du pourcentage d'erreur sur le débit de pointe pour les deux essais de validation

En ce qui concerne l'erreur commise sur l'estimation du volume (figure 38), on peut facilement voir l'effet de la nouvelle calibration faite à l'événement 48 sur la diminution de la surestimation, par conséquent nous voyons que ce nouveau jeu de paramètres simule mieux les volumes de ruissellement pour tous les événements, parfois même parfaitement comme c'est le cas de l'événement 7.

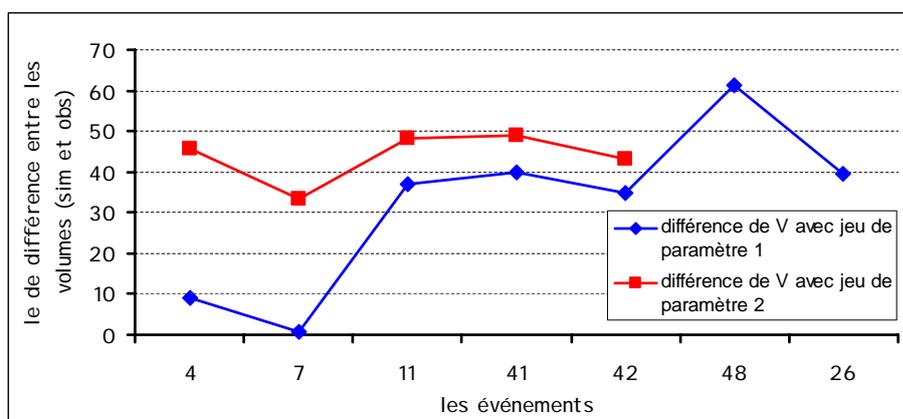


Fig. 38 : la comparaison du pourcentage d'erreur sur le volume de crue pour les deux essais de validation

En revanche, la restitution des débits de base n'a pas été améliorée (figure 39) par ce changement de jeu de paramètres et le problème de la mauvaise maîtrise de cette composante persiste.

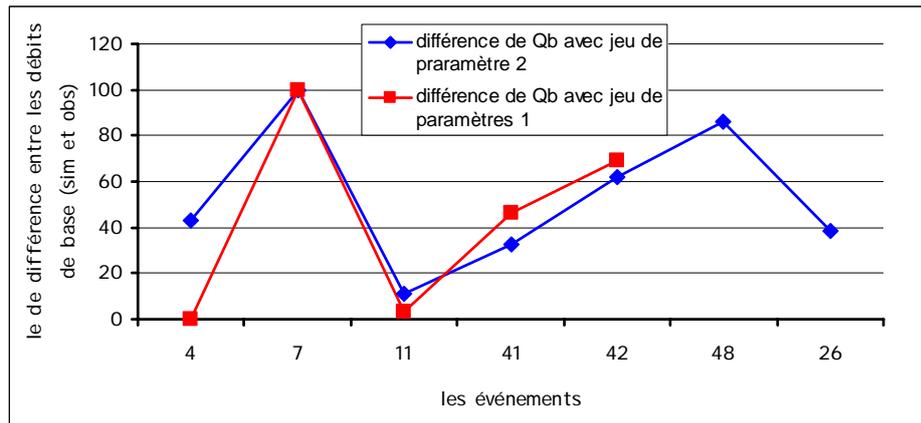


Fig. 39 : la comparaison du pourcentage d'erreur sur le débit de base pour les deux essais de validation

Malgré tous les problèmes confrontés, le modèle a pu être validé sur l'événement 11 (débit de pointe et de base) que nous allons utiliser dans le troisième chapitre pour étudier le comportement futur du bassin suite à des changements d'ordre climatique et physique.

V. Synthèse sur la modélisation

1. Les entrées du modèle

Quelque soit le modèle mise en œuvre, son rendement en matière de la simulation correcte du fonctionnement d'un bassin versant découle directement des données d'entrée que l'en lui introduit, donc avant de penser à valider tel ou tel modèle, il faut d'abord évaluer notre capacité à lui fournir une donnée qualitativement et quantitativement respectée.

Dans notre étude, la combinaison modulaire utilisée était la plus simple et la moins exigeante parmi celles offertes par le modèle HEC-HMS. En réalité, et vu le caractère global du modèle qui ne nécessite pas une grande précision dans la description du bassin, les données physiques (MNT, carte d'occupation du sol et carte des sols) n'ont pas limité la performance du modèle, sauf au niveau de l'estimation de la variable pourcentage d'imperméable qui a été surestimée dans un premier temps, puis rectifiée par la suite. Par contre, la qualité et la quantité des données pluviométriques et hydrométriques avaient un impact négatif sur l'efficacité du modèle, à titre d'exemple :

- La substitution des distributions temporelles des précipitations journalières par les averses projet NRCS a engendré une surestimation des volumes de crue pendant la calibration et la validation.
- Les deux stations de Tahnout et Aremd utilisées pour calculer la moyenne sur la totalité du bassin, ne sont pas suffisantes pour diluer l'effet de l'hétérogénéité spatio-temporelle des précipitations.
- La qualité médiocre des mesures du débit à l'exutoire est probablement la source des erreurs commises dans la restitution des débits de base.

2. Les modules

- Le module météorologique : alors qu'elles ne sont pas conçu pour notre contexte de travail, l'utilisation d'averses NRCS destinées essentiellement à la détermination des débits de projet a permis en plus de la restitution des débits de pointe de simuler parfois correctement les volumes de crue.

- Le module de la fonction de production : la méthode de la NRCS CN est connue par son dépendance étroite du paramètre CN et de la répartition spatio-temporelle de la pluie [14], par conséquent on peut juger ses résultats obtenus comme acceptables.
- Le module de la fonction de transfert : en le comparant avec l'hydrogramme unitaire de la NRCS, celui de Clark est plus fidèle dans la reproduction des événements, ainsi il démontre à nouveau son aptitude à simuler le débit dans des contextes où l'occupation du sol et la topographie sont complexes.
- Le module du débit de base : malgré le problème rencontré dans la calibration du paramètre T_d , la méthode de la récession exponentielle a pu restituer le débit de base pour au moins un événement à tolérance de 11 %.

3. Les sorties

Certes, les résultats issus du modèle HEC-HMS lors des phases de calibration et de validation ne permettent pas de le déclarer valide sur le bassin du Rhéraya, mais le verdict final ne peut pas se prononcer qu'une fois toutes ses exigences sont dûment remplies, en l'occurrence les distributions temporelles des précipitations. En attendant, voici en bref ce que nous avons obtenu :

- Le jeu de paramètre optimisé : deux des paramètres sont jugés optimaux pour tous le Rhéraya (T_c et CN), trois sont à vérifier ultérieurement (I_a , S_t et R_c) et un à revoir l'origine de son dysfonctionnement (T_d).
- Les débits de pointe : ils sont parfaitement reproduits pendant la calibration pour tous les événements, pour la validation un seul pic de crue a été fidèlement simulé, les six autres sont tous sous-estimés.
- Les volumes de crue : la diminution du pourcentage d'imperméable a permis de diminuer la surestimation des volumes pendant la validation, voir une restitution complète pour l'un des événements.
- Les débits de base : ils sont les moins maîtrisés par le modèle, leur pourcentage d'erreur varie entre 11 et 99 %.

B. La prédiction du comportement futur du Rhéraya

1. Introduction

Nul ne peut nier l'effet des changements climatiques et d'occupation du sol sur les processus hydrologiques et la perturbation de l'équilibre naturel des écoulements. Par conséquent, les planificateurs et les décideurs sont censés connaître quelles seront les répercussions en aval de leurs actions anthropiques entreprises en amont du bassin versant de telle que le développement urbain, la déforestation, les reboisements,...

À la lumière de ceci, la présente partie essaie de réutiliser le modèle HEC-HMS ajusté au bassin versant du Rhéraya pour prédire sa réponse à des scénarios positifs et négatifs prenant en considération des modifications au niveau climatique par l'exploitation des averses quantiles prédéterminées, et d'autres touchant l'occupation du sol.

Tous ces scénarios vont être exécutés sur l'événement 11 auquel le modèle a pu restituer le débit de pointe. Pour le volume de crue, il sera comparé à celui simulé par le modèle et ensuite à celui réellement observé à la station de l'exutoire.

2. Scénario 1 : Les averses quantiles

Ce premier scénario simule l'effet d'averses de périodes de retour différentes sur l'hydrogramme du débit à la station de Tahnaout. Ainsi, nous avons remplacé la hauteur de pluie moyenne de l'événement par les hauteurs estimées par des lois statistiques.

2.1. Les données d'entrée

Le tableau suivant résume les valeurs estimées de la pluie pour des périodes de retour qui seront utilisées dans les simulations.

Période de retour (ans)	Valeur estimée (mm)
2000	189
1000	148.5
200	80.85
100	60.1
50	43.3
20	26.35

Tab. 21 : Les hauteurs de précipitations estimées au bassin du Rhéraya pour différentes périodes de retour

Chaque hauteur de pluie sera additionnée au jeu de paramètres optimisés définis dans le tableau 18 pour configurer un fichier de simulation distinct. Par conséquent, nous aurons à comparer six fichiers de simulation, en plus des résultats simulés et observés pour l'événement 11.

2.2. Les résultats de la simulation

Les résultats résumés dans le tableau 22 (les graphes à voir en annexe 8) présentent les valeurs prévues par le modèle HEC-HMS au bassin du Rhéraya en termes du pic de l'hydrogramme et du volume du ruissellement. Ils montrent entre autres une corrélation linéaire de $R = 0.99$ pour les deux variables avec la pluie.

	observé	simulé	T=20	T=50	T=100	T=200	T=1000	T=2000
Qp (m ³ /s)	15	15.45	27.65	57.78	95.84	151.2	372.32	522.61
V (1000 m ³)	459.87	999.7	1825.28	3737.44	6074.33	9394.52	22205.48	30709.16

Tab. 22 : les valeurs prévues du débit de pointe et du volume à la station de Tahnaout pour des averses quantiles

Si nous essayons d'ajuster les valeurs du débit de pointe aux différentes lois de probabilité, nous trouvons que la loi la mieux adaptée est l'Inverse Gamma (tableau 23). Cette nouvelle loi peut s'avérer plus efficace que d'ajuster les débits maximums à une loi de probabilité.

Loi	BIC	AIC
Inverse Gamma (Maximum de vraisemblance)	99.888	99.729
Log-normal (Maximum de vraisemblance)	100.001	99.842
Weibull (Méthode des moments)	100.697	100.538
Gamma (Maximum de vraisemblance)	100.819	100.660
Halphen of type A (Maximum de vraisemblance)	101.052	100.814
Exponentielle (Maximum de vraisemblance)	101.615	101.456
Halphen type B inverse (Maximum de vraisemblance)	101.857	101.619
Log-Pearson type III (Méthode SAM)	102.053	101.815
Gumbel (Maximum de vraisemblance)	106.594	106.436
Pearson type III (Méthode des moments)	108.490	108.252
Log-normal à 3 paramètres (Méthode des moments)	108.905	108.666

Normal (Maximum de vraisemblance)	109.747	109.588
Log-Pearson type III (BOB)	103.919	103.681
Log-Pearson type III (WRC)	102.015	101.777

Tab. 23 : La comparaison des lois ajustées aux débits de pointe prévus par le modèle HEC-HMS

Cette technique d'ajuster les débits de pointe prévus par le modèle HEC-HMS ressemble dans son principe à la méthode du Gradex, qui considère que la loi de probabilité des pluies conditionne celle des débits. En ce qui concerne les volumes, nous ne pouvons rien anticiper à leur sujet car le modèle les surestime. Mais, ils augmentent de plus en plus provoquant une extension de la zone inondable.

Ces résultats imposent aux responsables de renforcer la protection de l'équipement de mesure du débit à l'exutoire pour qu'il ne soit pas entraîné par les crues prévues, et de mettre en œuvre des mesures structurelles qui peuvent encaisser les énormes volumes simulés.

3. Scénario 2 : changement dans l'occupation du sol dans un sens négatif

3.1. Les données d'entrée

Dans ce scénario, nous essayons de simuler l'effet de la déforestation et de l'urbanisation sur les débits et les volumes de crue à la station de Tahnaout. En effet, nous avons voulu réaliser une carte d'occupation du sol qui prend en considération les projections futures du Rhéraya en s'appuyant bien évidemment sur des informations acquises auprès des autorités concernées (DREF, DPA, ORMVAH,...). Mais pour des raisons liées essentiellement à l'absence d'informations et au caractère global du modèle, nous avons opté pour des modifications d'ordre général sur la carte d'occupation du sol que nous avons élaborée pour la qualité de description qu'elle a prouvée lors de la modélisation. Ces changements apportés à la carte touchent essentiellement :

- L'augmentation de la surface de la zone urbanisée suite au développement du centre de Moulay Brahim et des autres communes rurales du bassin ;
- La disparition de la couverture forestière dont la densité est faible (genévrier clair, chêne clair et forêt claire).
- La croissance de pourcentage des terrains dénudés en faveur des terrains déboisés ;
- L'augmentation du pourcentage d'imperméable suite à l'urbanisation.

Le tableau inscrit dans la partie 1 de l'annexe 9 détaille les combinaisons occupation du sol-type de sol avant et après la modification. À partir de ces modifications, nous avons recalculé le nouveau CN composite du bassin qui passe de 69.38 à 75.31. Le pourcentage d'imperméable est évalué à 25 %.

Pareil, ces valeurs de CN et du pourcentage d'imperméable remplaceront les anciennes dans le jeu de paramètres optimisés, puis on lance la simulation.

3.2. Les résultats de la simulation

Le tableau ci-joint montre les valeurs du débit de pointe et du volume obtenues pour le scénario étudié, puis les résultats en lui associant les averses quantiles.

	observé	simulé	scénario	Cas T=20	Cas T=50	Cas T=100	Cas T=200	Cas T=1000	Cas T=2000
Qp (m ³ /s)	15	15.45	19.10	34.29	71.03	116.28	180.51	426.38	587.92
V (1000 m ³)	459.87	999.7	1225.32	2239.52	4527.05	7243.75	11007.77	24980.78	33998.46

Tab. 24 : les valeurs prévues du débit de pointe et du volume à la station de Tahnaout pour le scénario 2

On voit très bien que le débit de pointe a augmenté d'environ 20 %, sachant que nous avons utilisé une hauteur de pluie identique à celle enregistrée pendant l'événement. Si nous comparons les débits de pointe pendant les six périodes de retour avec leurs homologues du premier scénario (tableau 25), nous remarquons que plus la période de retour est grande plus ce pourcentage de 20 % diminue, autrement dit pour les averses extrêmes l'influence de l'occupation du sol sur les débits diminue, ce constat a été démontré dans d'autres contextes [14].

Les volumes eux aussi se comportent d'une façon identique (tableau 25), c'est à dire que plus la fréquence d'une averse est petite moins sera l'effet de l'état de surface sur le volume ruisselé.

Période de retour (ans)	T=20	T=50	T=100	T=200	T=1000	T=2000
Qp scénario 1 (m ³ /s)	27.65	57.78	95.84	151.2	372.32	522.61
Qp scénario 2 (m ³ /s)	34.29	71.03	116.28	180.51	426.38	587.92
Différence (%)	19.36	18.65	17.58	16.24	12.68	11.11
V scénario 1 (10 ³ m ³)	1825.28	3737.44	6074.33	9394.52	22205.48	30709.16
V scénario 2 (10 ³ m ³)	2239.52	4527.05	7243.75	11007.77	24980.78	33998.46
Différence (%)	18.50	17.44	16.14	14.66	11.11	9.67

Tab. 25 : la comparaison entre les résultats des scénarios 1 et 2

4. Scénario 3 : changement dans l'occupation du sol dans un sens positif

4.1. Les données d'entrée

Pour ce troisième scénario, l'action est mise sur l'évaluation de l'impact d'une urbanisation du bassin de même envergure que celle du scénario 2, mais en parallèle on entreprend des actions de reboisements des sols nus et de renforcement de la couverture forestière à densité faible, ainsi :

- Les sols nus deviendront une forêt claire ;
- La densité claire deviendra moyenne pour toutes les classes ;
- La zone urbanisée est identique à celle du scénario 2 ;
- Le pourcentage d'imperméable est de 25 %.

En se référant à l'annexe 9 partie 2 qui synthétise la surface attribuée par chaque classe d'occupation du sol, nous calculons le CN composite du nouveau état du bassin et nous trouvons que le CN est égale à 62.7. Cette valeur va remplacer celle du jeu de paramètres optimisés, ensuite on lance les simulations.

4.2. Les résultats de la simulation

Dans ce qui suit sont représentés les résultats obtenus pour ce scénario, à savoir le débit de pointe et le volume issus de la simulation du scénario et ceux résultant en substituant la pluie de l'événement 11 par des pluies à périodes de retour distinctes.

	observé	simulé	scénario	Cas T=20	Cas T=50	Cas T=100	Cas T=200	Cas T=1000	Cas T=2000
Qp (m ³ /s)	15	15.45	18.96	32.10	61.51	97.13	148.17	352.03	492.27
V (1000 m ³)	459.87	999.7	1174.57	2021.96	3865.09	6057.92	9151.07	21159.72	29229.84

Tab. 26 : les valeurs prévues du débit de pointe et du volume à la station de Tahnaout pour le scénario 3

Nous nous apercevons que l'ajout de 5 % de surface imperméable par rapport à l'état initiale a engendré une croissance de 18 % pour le débit et 14 % en termes de volume, ceci malgré que le CN a baissé de 69.38 à 62.7. Nous pouvons donc comprendre l'effet négatif de l'imperméabilisation des surfaces des bassins versant, par le biais de l'urbanisation par exemple, sur son régime hydrologique. En outre, nous remarquons que les deux variables débit et volume montrent des valeurs moins fortes que dans le cas du scénario 2, ceci prouve que les reboisements bien que modestes amortissent les effets de l'urbanisation prévue. Enfin, la diminution de l'influence de l'occupation du sol sur les débits et les volumes pour les averses extrêmes est aussi valide pour ce scénario.

5. Conclusion

D'après ce qui précède, nous arrivons à reconnaître l'effet positif et négatif de quelques situations susceptibles de se manifester sur le terrain dans les prochaines décennies, et que les responsables sont censés prendre en considération dans leurs plan d'aménagement du bassin du Rhéraya. En outre, nous avons pu reconfirmer que la relation cause à effet entre le changement de l'occupation du sol d'une part et les débits et les volumes de l'autre, est de moins en moins étroite que les averses sont extrêmes.

Néanmoins, nous croyons que l'utilisation des données officielles de projections futures permettra de simuler des situations plus réalistes et plus précises que celles proposées. Mieux encore seront les bénéfices tirés de cette étude de prédiction du comportement, si nous utilisons la forme semi-distribuée (découpage en sous bassins versants) ou carrément distribuée (maillée) du modèle HEC-HMS.

Conclusion générale et perspectives

La mise en service de la modélisation comme outil pour la compréhension du fonctionnement hydrologique des bassins versants, et d'aide à la décision est l'une des meilleures méthodes reconnues à la fois simple et fructueuse. Dans cette optique, la présente étude s'intéressait premièrement à appliquer une combinaison modulaire appropriée du modèle HEC-HMS à l'un des sous bassins de Tensift : le Rhéraya. Ensuite, après avoir été validé sur au moins l'un des événements présélectionnés, l'étude se penchait sur l'utilisation de ce modèle pour prédire le comportement hydrologique futur du bassin vis-à-vis des scénarios de changement climatique et de modification d'occupation du sol.

En revanche, avant de procéder à la réalisation de ces deux objectifs, il nous a été d'une grande utilité de passer en revue l'historique de modélisation du bassin en question et la description du modèle HEC-HMS et de sa combinaison modulaire choisie, puis l'étude hydro-géomorphologique. Pour la première partie, elle expose les différentes phases de modélisation pour les quatre études sans oublier les problèmes que leurs auteurs ont confrontés, en l'occurrence la mauvaise qualité et quantité des données, la sur-paramétration et l'hétérogénéité spatio-temporelle des pluies, ensuite cette partie décrit le modèle HEC-HMS configuré sous WMS. La deuxième quant à elle, visait à déceler les propriétés spéciales du Rhéraya, telles que : l'imperméabilité d'une grande partie de ses formations géologiques, un caractère privilégié en termes de précipitations, une morphologie ramassée, des pentes rudes concentrées en amont, un réseau hydrographie d'ordre 5 en aval du bassin, les problèmes d'hétérogénéité spatio-temporelle des précipitations,...etc. Les conclusions tirées de cette étude étaient décisives dans la compréhension et l'anticipation des résultats de la modélisation.

L'étape de la modélisation a été précédée par l'élaboration des cartes d'occupation du sol et type de sol conformes aux prescriptions du NRCS, et la présélection de 9 événements de simulation. Une fois fini, on a commencé nos premières calibrations par 72 fichiers de simulation pour étudier la sensibilité de notre contexte aux formalismes de la fonction de transfert et aux types d'averses de projet. Les résultats obtenus de point de vue fonction objective ont permis de classer l'averse NRCS type IA et le formalisme de Clark comme les mieux appropriés au Rhéraya, et d'éliminer deux événements faute de leurs valeurs de fonctions objectives. Sur la base des 7 événements restants, on a essayé d'en déduire le jeu de paramètres optimisés par différentes méthodes mais en vain. Pour la plupart des jeux de paramètres, les volumes et les débits de base sont toujours surestimés lors de la validation.

Heurté à ce problème, nous avons pensé à analyser la sensibilité du modèle premièrement au choix de la fonction objective, donc nous avons substitué celle qui opère sur le débit de pointe par une qui joue sur l'erreur commise sur le volume. Sans résultat positif, nous avons passé à évaluer la contribution de la fonction de production dans cette surestimation, en particulier sa variable d'entrée : le pourcentage d'imperméable. Ceci a permis de retrancher l'erreur causée par cette variable, et ne laisser que celle en rapport avec l'emploi des averses de projet NRCS au lieu des distributions temporelles des précipitations journalières. Après une nouvelle calibration faite sur l'événement 48, on a défini un jeu de paramètres optimisés en partie, qu'on a utilisé dans le deuxième essai de validation. Ainsi les résultats étaient plus pertinents qu'avant, avec une restitution parfaite du débit de pointe de l'événement 11 et une reproduction fidèle du volume de crue de l'événement 7.

Enfin, en utilisant l'événement 11, on a essayé de prédire le comportement hydrologique du bassin du Rhéraya à la station de Tahnout en matière du débit de point et du volume. Pour y faire, nous avons proposé trois scénarios : un simulant la réponse du bassin à des hauteurs de pluie de période de retour différentes, le deuxième imite l'impact

d'actions anthropiques comme l'urbanisation et la déforestation sur l'accentuation des risques de crue et d'inondation, et le dernier met en évidence l'apport des méthodes de reboisement dans l'encaissement des effets d'orages exceptionnels. En outre, nous avons pu reconfirmer la baisse de l'influence de la nature d'occupation du sol dans les débits et les volumes de ruissellement pour des averses extrêmes.

Par ailleurs, la réalisation de cette étude a été contrariée par des obstacles qui menaçaient la bonne continuité. Quelques uns ont pu être surpassés avec un minimum de dégâts comme c'est le cas des données de pluviographes qui ont été substituées exceptionnellement par les averses de projet de NRCS, d'autres non comme c'est le cas d'absence de données climatiques (Température, précipitations, radiation solaire,...) et hydrométriques (une seule station hydrométrique pour tout le bassin) qui nous ont obligé de choisir une modélisation événementielle globale du Rhéraya.

En effet, si on arrive à écarter ces obstacles ou bien à les réduire, on peut s'attendre à des résultats beaucoup plus fructueux que ceux obtenus, ainsi pour parler d'une validation complète du modèle HEC-HMS, et améliorer par la suite la qualité de ce travail on recommande de :

- Résoudre le problème survenu lors de la calibration du paramètre T_d qui affiche une valeur fixe quelque soit l'événement simulé, et qui cause en grande partie la mauvaise restitution des débits de base après le pic de l'hydrogramme. Une fois résolu, on refait les simulations pour trouver sa valeur optimisée et celle du paramètre R_c .
- Refaire les simulations des événements en utilisant cette fois-ci les données de pluviographes au lieu des averses NRCS afin d'éviter la surestimation des volumes de ruissellement.
- Faire une étude de télédétection sur le bassin du Rhéraya, pour évaluer le taux de changement de l'occupation du sol qui va nous servir soit à élargir ou à restreindre l'intervalle de présélection des événements. Ceci nous aidera à nous débarrasser des erreurs de calibration de paramètres liées au changement d'occupation du sol.
- Sur la base du nouvel intervalle délimité, on choisit les événements en tenant compte des précipitations pendant les cinq jours précédant la crue, dans le but de réduire les erreurs liées à la variation de l'humidité antérieure des événements.
- Étudier la sensibilité du modèle aux différents formalismes de la fonction de transfert proposés par le HEC-HMS.
- Réaliser des cartes d'occupation du sol en s'informant des projections futures du bassin du Rhéraya de point de vue des autorités concernées, ensuite, essayer de prédire la réponse hydrologique du bassin sujet d'étude.
- Faire des simulations de prédiction qui simulent l'impact de l'érosion des sols intense que connaît ce bassin sur son régime hydrologique.
- Utiliser les résultats prévus des scénarios dans des modèles de simulation hydraulique pour la délimitation des zones inondables du bassin et éditer des cartes de risque pour la protection contre cet aléa dévastateur.

A long terme, on envisage pour les études postérieures de soulever des défis beaucoup plus enthousiastes comme par exemple :

- Après avoir validé complètement le modèle HEC-HMS sur le bassin versant du Rhéraya, on peut l'utiliser pour la protection contre les inondations, en utilisant ce qu'on appelle la modélisation à temps réel qui repose sur le principe de reconstitution du débit à l'exutoire pour chaque pas de temps pour lequel la donnée pluie est mesurée, par conséquent on peut reconstituer l'hydrogramme d'une crue au fur et à mesure de l'enregistrement de la hauteur de pluie. Ce système d'alarme s'avère plus efficace que celui qui se base sur la mesure de la hauteur d'eau dans la rivière en amont du bassin versant.

- Un autre volet à examiner est la modélisation événementielle distribuée du modèle HEC-HMS en utilisant la forme maillée de la NRCS CN et le modClark comme fonction de transfert. Pour les précipitations on peut faire appel aux données satellitaires du TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission), bien entendu après avoir évalué leur qualité, par une étude à part.
- Enfin, et en cas de disponibilité des données nécessaires, on recommande de faire une modélisation continue du HEC-HMS pour étudier le fonctionnement du bassin du Rhéraya sur de longues périodes, et comparer les résultats obtenus à ceux issus des modèles SWAT, GR4J et SRM.

Annexes

Annexe 1 : Formules proposées par le WMS pour le calcul du temps de concentration des bassins versants

Formule 1, 2 et 3 : méthodes de Kirpich pour un bassin non montagneux

$$T_C = m * 0,00013 * \frac{L^{0,77}}{S^{0,385}}$$

Où, T_C : le temps de concentration en heures ;

m : le coefficient du type de couverture : - $m=1$ pour un bassin à sol nu (formule 1)
- $m=2$ pour un bassin à herbe (formule 2)
- $m=0,4$ pour un bassin asphalté (formule 3)

L : la longueur du bassin (pied) ;

S : la pente moyenne du bassin (pied/pied).

Formule 4, 5 et 6 : méthodes de Kirpich pour un bassin montagneux

$$C_t = 1 + ((80 - CN) * 0,04) \qquad T_C = m * 0,00013 * \frac{L^{0,77}}{S^{0,385}} * C_t$$

Où, C_t : le coefficient du temps de concentration ;

CN : le Coefficient d'indexation composite du bassin ;

T_C : le temps de concentration en heures ;

m : le coefficient du type de couverture : - $m=1$ pour un bassin à sol nu (formule 4)
- $m=2$ pour un bassin à herbe (formule 5)
- $m=0.4$ pour un bassin asphalté (formule 6)

L : la longueur du bassin (pied) ;

S : la pente moyenne du bassin (pied/pied).

Annexe 2 : Tableau de correspondances entre les classes des cartes de la bibliographie et les classes NRCS

Numéro de la carte	Classes associées	Classification NRCS	
		Classe	Condition hydrologique
1	Forêt dense	-	Bonne
	Forêt moyennement dense	-	Moyenne
	Forêt claire	-	Mauvaise
	Terrains de cultures	Sol nu	-
	Terrasses aménagées	Arboricultures et/ou céréalicultures	-
	Terrains dénudés	Sol nu	-
	Matorral clair	Matorral	Mauvaise
	Matorral moyennement dense		
	Périmètre de reboisement	Chêne ou Genévrier	-
Terrains rocheux	Pourcentage d'imperméable		
2	Forêt dense	-	Bonne
	Forêt moyennement dense	-	Moyenne
	Forêt claire	-	Mauvaise
	Forêt très claire		
	Cultures en bours	Sol nu	-
	Cultures irriguées	Arboricultures et/ou céréalicultures	-
	Terrains dénudés	Sol nu	-
	Matorral clair	Matorral	Mauvaise
	Reboisements	Chêne ou Genévrier	-
Affleurements rocheux	Pourcentage d'imperméable		
3	Genévrier thurifère	Genévrier	-
	Genévrier oxycèdre		
	Genévrier rouge		
	Thya	forêt	-
	<i>Cupressus Atlantica</i>		
	Chêne vert	Chêne	-
	Reboisement de feuillus		
	Reboisement résineux	Genévrier	-
	Cultures	Arboricultures et/ou céréalicultures	-
	Dense >50%	-	Bonne
	Normal 25-50%	-	Moyenne
	Clair 5-25 %	-	Mauvaise
Épars <5%			
4	Couleur rouge	Arboricultures et/ou céréalicultures	-
	Couleur bleu	Pourcentage d'imperméable	
5	Forêt	-	-
	Zone urbanisée	Zone urbanisée	-
	Terrains rocheux	Pourcentage d'imperméable	
	Terrains nus	Sol nu	-
	Arboricultures	Ligne de collecte	Ligne droites
	Céréalicultures	Petits grains	En terrasse, selon les courbes de niveau avec résidus de couverture

6	Cultures irriguées	Arboricultures et/ou céréales	
	Cultures en sec	Sol nu	
	Rochers r_0_0 et r_0_1	Pourcentage d'imperméable	
	Végétation forte s_1_0 et s_1_1	-	-
	Végétation faible s_0_0 et s_0_1	-	-
7	Cultures irriguées	Arboricultures et/ou céréales	-
	Cultures en sec	Sol nu	-
	Couverture arborée 0-6%	-	mauvaise
	Couverture arborée 7-23%	-	moyenne
	Couverture arborée 24-38%	-	moyenne
8	Cultures irriguées	Arboricultures et/ou céréales	-
	Cultures en sec	Sol nu	-
	Plantes annuelles 1-7%	-	mauvaise
	Plantes annuelles 8-21%		
	Plantes annuelles 22-29%		
9	Cultures irriguées	Arboricultures et/ou céréales	-
	Cultures en sec	Sol nu	-
	Litière 0-9%	-	mauvaise
	Litière 10-38%	-	moyenne
10	Cultures irriguées	Arboricultures et/ou céréales	-
	Cultures en sec	Sol nu	-
	Rochers 0-20%	-	-
	Rochers 21-40%	-	-
	Rochers 41-90%	Pourcentage d'imperméable	

Annexe 3 : Table NRCS des classes d'occupation du sol identifiées sur le bassin versant du Rhéraya

Code	Description de l'occupation du sol			CN pour HSG ¹			
	Type d'occupation	Traitement	Condition hydrologique	A	B	C	D
11	Zone urbanisée	-	-	77	86	91	94
200	Jachère	Sol nu	-	77	86	91	94
210	Arboricultures	Lignes droites	Mauvaise ²	72	81	88	91
225	céréales	C+T+CR	Mauvaise ²	60	71	78	81
323	Matorral	-	Mauvaise ³	48	67	77	83
343	Forêt claire	-	Mauvaise ⁴	45	66	77	83
342	Forêt moyenne	-	Moyenne ⁴	36	60	73	79
341	Forêt dense	-	Bonne ⁴	30	55	70	77
423	Chêne clair	-	Mauvaise ⁵	45	66	74	79
422	Chêne moyen	-	Moyenne ⁵	30	48	57	63
421	Chêne dense	-	Bonne ⁵	30	30	41	48
433	Genévrier clair	-	Mauvaise ⁵	55	75	85	89
432	Genévrier moyen	-	Moyenne ⁵	36	58	73	80
431	Genévrier dense	-	Bonne ⁵	30	41	61	71

C : selon les courbes de niveau ;

T : en terrasses ;

CR : couverture de résidus de collecte.

(1) : Ruissellement en condition normal, et $I_a = 0.2S$.

(2) : Combinaison des facteurs qui affecte l'infiltration et le ruissellement, comme : la densité de la végétation, pourcentage de résidus de collecte,...etc.

Mauvaise : facteurs encourageant l'infiltration et tend à diminuer le ruissellement.

(3) : Mauvaise : < 50 % de couverture.

(4) : Mauvaise : litière de forêt, petits arbres, les arbustes sont détériorés régulièrement par le pâturage et l'incinération.

Moyenne: Bois coupé mais pas brûlé, et quelques plantes couvrent le sol.

Bonne : Bois protégé contre le pâturage, et la litière et les plantes recouvrent le sol.

(5) : Mauvaise: < 30 % de couverture.

Moyenne: 30 to 70 % de couverture.

Bonne: > 70 % de couverture.

Annexe 4 : Résultats détaillés de la calibration des 9 événements présélectionnés

Partie 1 : Résultats de calibration en utilisant le formalisme Lag comme fonction de transfert

Événement	Averse	Paramètres calibrés					Résultats de calibration						Fct obj %
		NRCS CN		Lag	Récession		Qp (m ³ /s)		V (1000 m ³)		Qb (m ³ /s)		
		Ia	CN	T _c	S _t	R _c	obs.	Sim.	obs.	Sim.	obs.	Sim.	
4	I	8.2	79.65	155.52	0.22	0.3	67	67	1581.55	2495.27	21.5	11.88	0
	IA	5.3	80.27	100.24	0.71	0.3		67		2968.67		18.43	0
	II	8.2	35.44	177.36	0.06	0.3		66.98		1843.01		5.19	0
	III	8.2	35.44	168.24	0.06	0.3		67		1861.71		5.12	12.8
7	I	18.0	98.49	151.81	0.55	0.3	413	413	5823.29	11088.09	0.08	105	0
	IA	7.7	99.00	121.79	0.82	0.3		413		12998.74		107.93	0
	II	8.0	80.27	151.08	0.54	0.3		413		9361.69		104.66	0
	III	7.7	80.27	144.40	0.75	0.3		413		9657.6		114.92	0
10	I	3.4	46.32	153.28	0.06	0.3	12	22.28	640.13	816.73	2.43	0.54	85.7
	IA	3.4	40.21	153.31	0.06	0.3		16.32		806.23		0.63	36
	II	3.4	48.23	153.28	0.07	0.3		31		895.65		0.68	158.4
	III	3.4	48.23	153.28	0.06	0.3		29.66		886.82		0.62	147.1
11	I	8.2	66.63	153.29	0.16	0.3	15	33.01	459.87	1173.06	4.83	2.79	120.1
	IA	8.1	66.63	153.30	0.11	0.3		24.24		1159.25		2.63	61.6
	II	8.2	66.63	153.28	0.16	0.3		46.25		1314.83		3.58	208.4
	III	2.3	56.69	153.28	0.16	0.3		49.18		1427.18		3.93	227.9
26	I	8.0	72.24	180.64	0.06	0.3	18.52	18.52	276.66	672.3	0.97	0.6	0
	IA	8.0	72.24	180.64	0.15	0.3		18.52		732.53		1.16	0
	II	8.1	66.63	262.83	0.15	0.3		18.52		722.23		1.42	0
	III	8.1	66.63	259.71	0.11	0.3		18.52		708.86		1.1	0
30	I	1.0	37.85	153.30	0.16	0.3	24.32	222.95	794.86	7089.06	0.37	27.69	816.8
	IA	1.0	38.62	153.30	0.16	0.3		161.5		7118.96		31.2	564.1
	II	1.0	37.09	153.27	0.16	0.3		312.61		7887.47		35.47	1185.4
	III	1.0	37.09	153.27	0.16	0.3		299.62		7876.91		35.35	1132
41	I	8.1	66.63	206.41	0.06	0.3	24.88	24.877	378.89	850.02	3.93	7.03	0
	IA	7.2	85.89	147.35	0.79	0.3		24.877		1251.3		9.35	0
	II	8.2	66.63	153.28	0.06	0.3		40.78		1010.24		5.09	63.9
	III	8.2	66.63	153.28	0.06	0.3		38.97		1012.66		5.13	56.6
42	I	8.1	66.63	232.26	0.06	0.3	18.76	18.762	457.07	818.9	0.75	1.06	0
	IA	8.0	72.24	150.97	0.11	0.3		18.762		923.25		1.55	0
	II	8.1	66.63	153.28	0.06	0.3		32.34		922.3		1	72.4
	III	8.1	66.63	153.28	0.06	0.3		30.92		924.29		1.01	64.8
48	I	8.2	49.21	153.29	0.16	0.3	38.02	72.52	568.5	2410.05	0.77	7.71	90.8
	IA	8.2	42.72	153.30	0.16	0.3		51.2		2321.79		8.24	34.7
	II	8.2	50.22	153.28	0.16	0.3		103.1		2724.97		10.04	171.2
	III	8.2	49.21	153.28	0.16	0.3		98.21		2705.77		9.94	158.3

Qp : le débit de pointe (m³/s)

Ia : l'abstraction initiale (mm)

Fct obj : la fonction objective

V : le volume en 1000 (m³)

CN : le coefficient d'indexation

Qb : le débit de base (m³/s)

Lag : temps lag (min)

Sim. : Simulé
Obs. : observé

R_c : la constante de récession
T_d : seuil de récession

Partie 2 : Résultats de calibration en utilisant le formalisme Clark comme fonction de transfert

Événement	Averse	Paramètres calibrés						Résultats de calibration						Fct obj %
		NRCS CN		Clark		Récession		Qp (m ³ /s)		V (1000 m ³)		Qb (m ³ /s)		
		la	CN	T _c	S _t	R _c	T _d	obs.	Sim	obs.	Sim	obs.	Sim	
4	I	4.75	80.27	4.65	2.30	0.80	0.3	67	67	1581.55	2902.06	21.5	19.08	0
	IA	4.82	95.06	4.67	3.54	0.23	0.3		67		3840.7		17.32	0
	II	7.21	72.24	3.17	3.49	0.54	0.3		67		2436.89		16.38	0
	III	5.37	70.80	3.18	3.53	0.36	0.3		67		2429.24		14.35	0
7	I	8.84	99.00	2.44	2.80	0.54	0.3	413	413	5823.29	12520.3	0.08	112.82	0
	IA	8.52	98.87	2.08	1.41	0.82	0.3		413.2		13064		118.33	0
	II	17.83	98.42	2.17	3.55	0.30	0.3		413		10551.2		103.91	0
	III	11.76	97.49	3.16	3.53	0.52	0.3		413		11176.3		115.51	0
11	I	8.15	53.35	8.48	7.00	0.06	0.3	15	14.99	459.87	930.4	4.83	3.15	0.1
	IA	8.11	67.99	7.30	5.37	0.32	0.3		15		1054.74		3.71	0
	II	8.16	59.03	8.44	5.37	0.07	0.3		20.2		993.48		3.03	34.7
	III	8.16	59.03	8.44	5.37	0.07	0.3		20.27		994.52		3.02	35.1
26	I	8.00	72.24	3.17	2.35	0.54	0.3	18.5	18.5	276.66	858.52	0.97	3.43	0
	IA	8.00	72.24	2.08	1.15	0.56	0.3		18.5		864.08		3.37	0
	II	7.18	80.27	4.84	3.50	0.72	0.3		18.5		890.62		4.5	0
	III	7.20	78.66	4.75	3.44	0.81	0.3		18.5		907.87		4.83	0
41	I	8.04	69.38	3.50	3.50	0.72	0.3	24.9	24.9	378.89	1089.97	3.93	7.44	0
	IA	8.04	99.00	4.73	5.22	0.53	0.3		24.9		1471.43		21.68	0
	II	8.00	70.80	3.71	5.30	0.80	0.3		24.9		1037.74		9.44	0
	III	8.01	72.24	3.18	5.30	0.80	0.3		24.9		1049.07		9.17	0
42	I	7.79	79.26	4.75	3.44	0.54	0.3	18.8	18.8	457.07	1120.7	0.75	4.28	0
	IA	8.00	72.24	3.66	2.31	0.81	0.3		18.8		1211.5		5.12	0
	II	8.03	69.38	4.87	5.35	0.52	0.3		18.8		1062.8		4.33	0
	III	8.08	79.26	4.87	5.32	0.53	0.3		18.8		1076.6		4.36	0
48	I	8.16	50.89	8.44	5.37	0.16	0.3	38.0	38.0	568.5	2078.92	0.77	9.98	0
	IA	8.01	71.96	4.84	5.30	0.80	0.3		38.0		2586.95		11.21	0
	II	8.16	35.44	8.44	5.37	0.16	0.3		42.3		1938.27		9.83	11.3
	III	8.16	35.44	8.44	5.37	0.16	0.3		42.5		1940.81		9.83	11.7

Qp : le débit de pointe (m³/s)
V : le volume en 1000 (m³)
Ob : le débit de base (m³/s)
Sim. : Simulé
Obs. : observé

la : l'abstraction initiale (mm)
CN : le coefficient d'indexation
Lag : temps lag (min)
R_c : la constante de récession
T_d : seuil de récession

Fct obj : la fonction objective

Partie 3 : Résultats simplifiés issus de l'utilisation du formalisme de Clark

Averse	Événement	la	CN	T _c	S _t	R _c	Qp obs.	Qp sim.	% diff.	V obs.	V sim.	% diff.	Qb obs.	Qb sim.	% diff.
I	4	4.75	80.27	4.65	2.30	0.80	67		0.0	1581.55	2902.06	29.5	21.5	19.08	-6.0
	7	8.84	99.00	2.44	2.80	0.54	413		0.0	5823.29	12520.3	36.5	0.08	112.82	99.9
	9	0.13	70.69	3.71	3.51	0.80	6.3		0.0	470.65	457.82	-1.4	2.86	1.71	-25.2
	26	8.00	72.24	3.17	2.35	0.54	18.52		0.0	276.66	858.52	51.3	0.97	3.43	55.9
	41	8.04	69.38	3.50	3.50	0.72	24.877		0.0	378.89	1089.97	48.4	3.93	7.44	30.9
	42	7.79	79.26	4.75	3.44	0.54	18.762		0.0	457.07	1120.7	42.1	0.75	4.28	70.2
	48	8.16	50.89	8.44	5.37	0.16	38.015		0.0	568.5	2078.92	57.1	0.77	9.98	85.7
IA	4	4.82	95.06	4.67	3.54	0.23	67		0.0	1581.55	3840.7	41.7	21.5	17.32	-10.8
	7	8.52	98.87	2.08	1.41	0.82	413		0.0	5823.29	13064	38.3	0.08	118.33	99.9
	9	0.13	80.27	3.23	2.34	0.81	6.3		0.0	470.65	477.65	0.7	2.86	1.7	-25.4
	26	8.00	72.24	2.08	1.15	0.56	18.52		0.0	276.66	864.08	51.5	0.97	3.37	55.3
	41	8.04	99.00	4.73	5.22	0.53	24.877		0.0	378.89	1471.43	59.0	3.93	21.68	69.3
	42	8.00	72.24	3.66	2.31	0.81	18.762		0.0	457.07	1211.5	45.2	0.75	5.12	74.4
	48	8.01	71.96	4.84	5.30	0.80	38.015		0.0	568.5	2586.95	64.0	0.77	11.21	87.1

Qp : le débit de pointe (m³/s)

la : l'abstraction initiale (mm)

V : le volume (1000 m³)

CN : le coefficient d'indexation

Qb : le débit de base (m³/s)

T_c : le temps de concentration (heures)

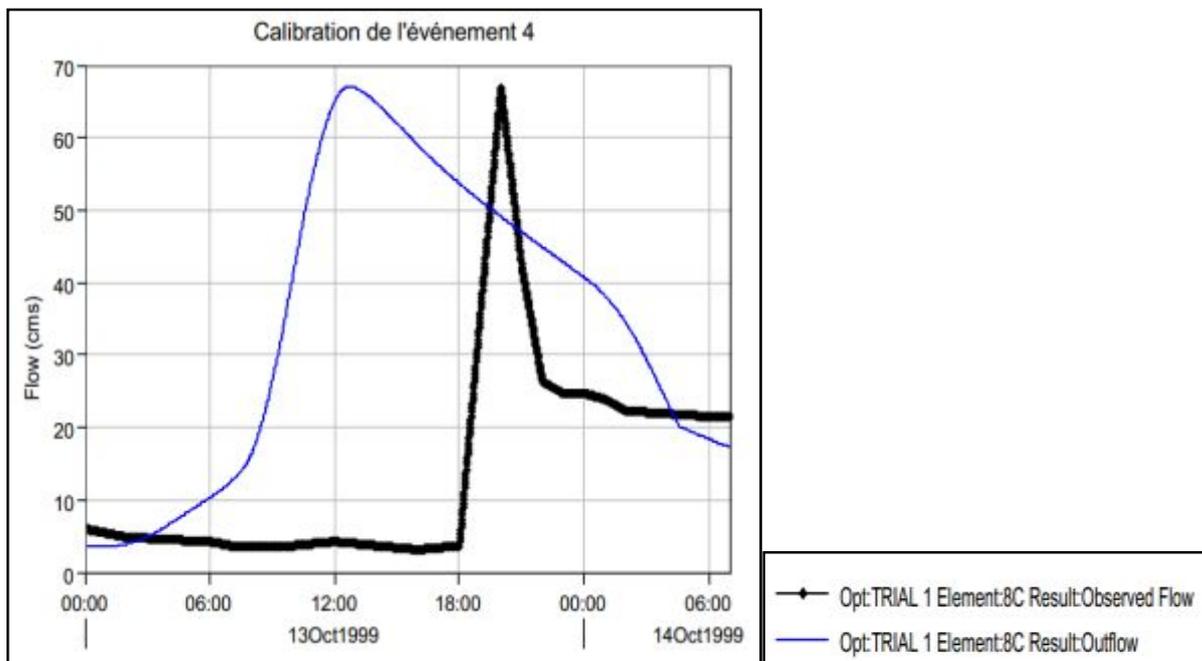
Sim. : Simulé

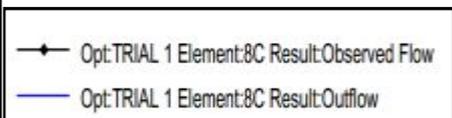
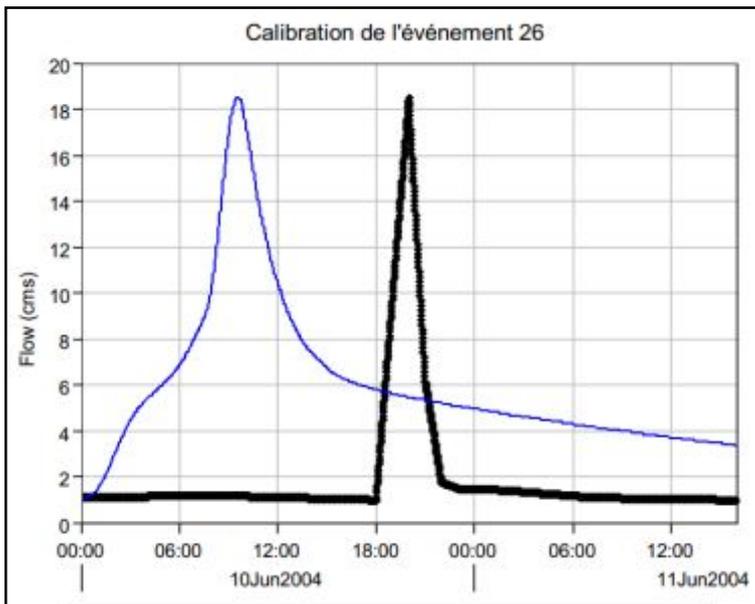
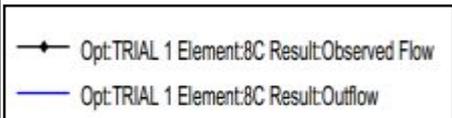
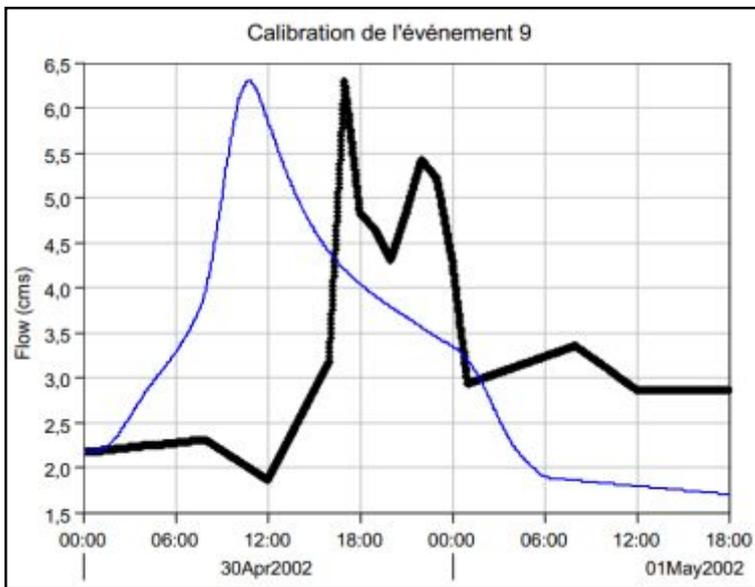
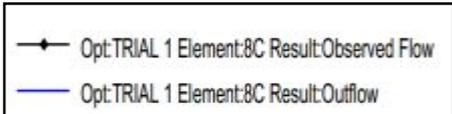
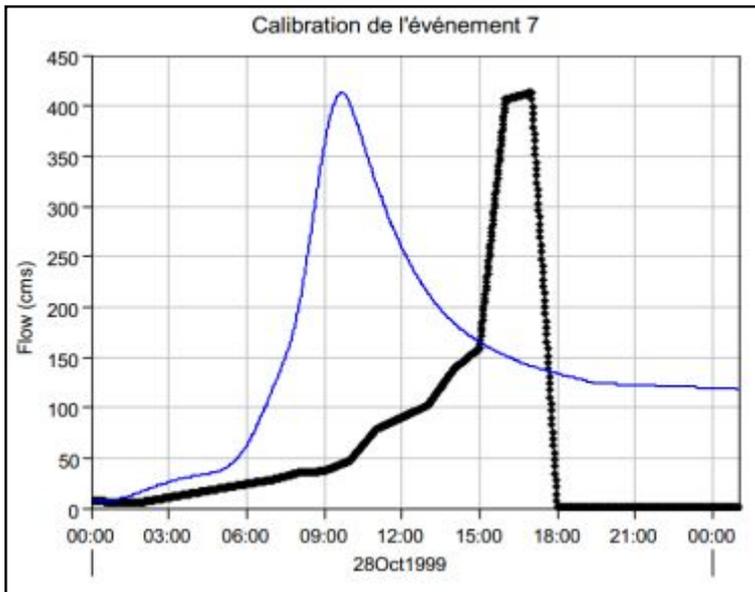
R_c : la constante de récession

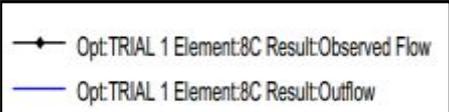
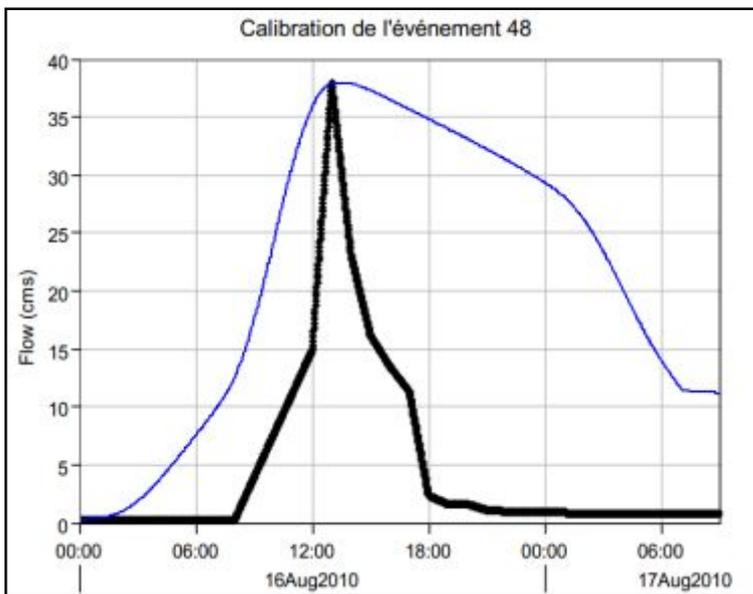
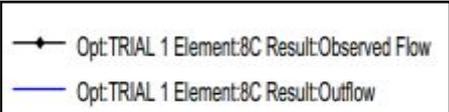
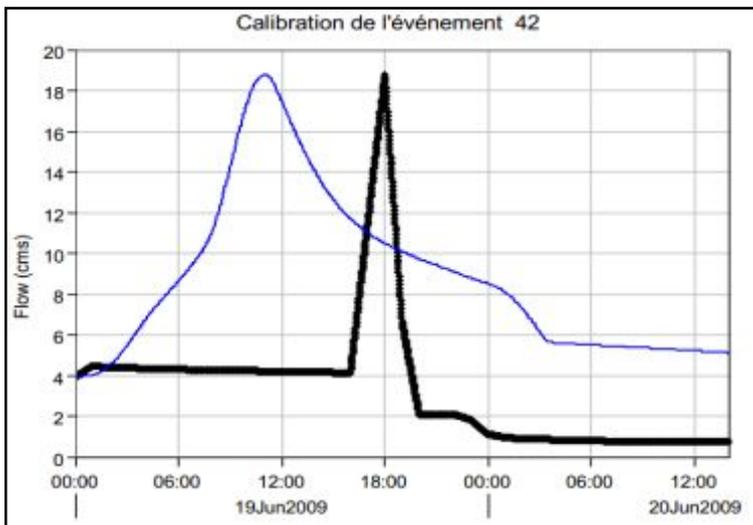
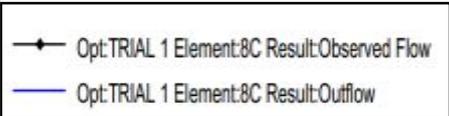
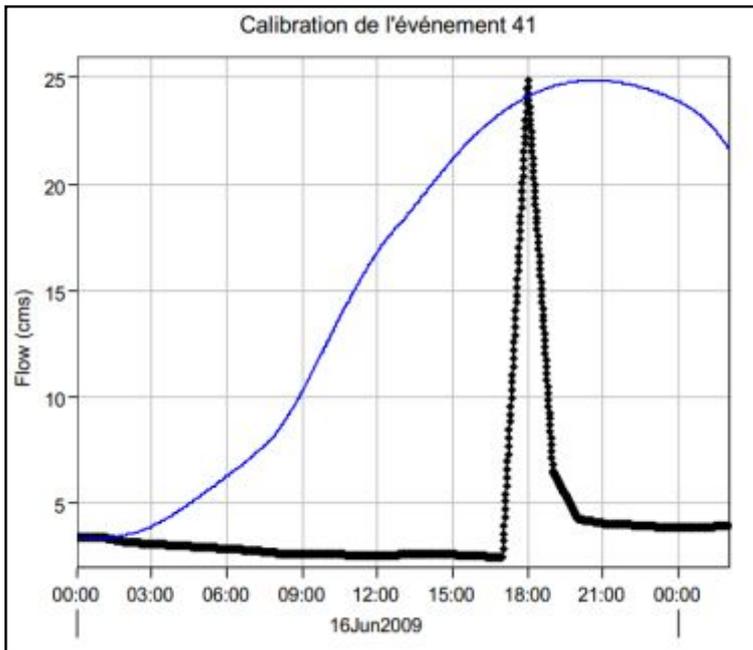
Obs. : observé

S_t : coefficient de stockage (heures)

Partie 4 : Graphes de calibration des 7 événements en utilisant le formalisme Clark et l'averse IA







Annexe 5 : Résultats détaillés du premier essai de validation

Partie 1 : Averse I

Cas 1 : Utilisation de la moyenne des valeurs les plus fréquentes

Événement	la	CN	T _c	S _t	R _c	Qp obs.	Qp sim.	% diff.	V obs.	V sim.	% diff.	Qb obs.	Qb sim.	% diff.
4	8.16	74.37	3.96	2.98	0.72	67	50.96	13.6	1581.55	2388.88	20.3	21.5	14.33	20
7						413	192.67	36.4	5823.29	7082.63	9.8	0.08	65.55	99.8
11						15	26.25	27.3	459.87	1313.06	48.1	4.83	6.82	17.1
26						18.52	16.28	6.4	276.66	854.49	51.1	0.97	3.93	60.4
41						24.88	24.95	0.1	378.89	1096.26	48.6	3.93	7.94	33.8
42						18.76	20.85	5.3	457.07	1199.33	44.8	0.75	5.33	75.3
48						38.02	67.38	27.9	568.5	3047.64	68.6	0.77	18.3	91.9

Cas 2 : Utilisation des maximums des valeurs les plus fréquentes

Événement	la	CN	T _c	S _t	R _c	Qp obs.	Qp sim.	% diff.	V obs.	V sim.	% diff.	Qb obs.	Qb sim.	% diff.
4	8.84	80.27	4.75	3.51	0.8	67	48.21	16.3	1581.55	2431.89	21.2	21.5	13.84	21.7
7						413	192.96	36.3	5823.29	7463.36	12.3	0.08	79.35	99.8
11						15	23.87	22.8	459.87	1291.15	47.5	4.83	6.62	15.6
26						18.52	14.81	11.1	276.66	831.94	50.1	0.97	3.92	60.3
41						24.88	22.90	4.1	378.89	1091.81	48.5	3.93	9.35	40.8
42						18.76	19.30	1.4	457.07	1196.63	44.7	0.75	5.31	75.2
48						38.02	65.04	26.2	568.5	3150.31	69.4	0.77	18.53	92.0

Cas 3 : Utilisation des maximums des valeurs

Événement	la	CN	T _c	S _t	R _c	Qp obs.	Qp sim.	% diff.	V obs.	V sim.	% diff.	Qb obs.	Qb sim.	% diff.
4	8.84	99	8.48	7	0.8	67	66.05	0.7	1581.55	3707.28	40.2	21.5	31.68	19.1
7						413	214.68	31.6	5823.29	8778.47	20.2	0.08	150.44	99.9
11						15	27.81	29.9	459.87	1845.05	60.1	4.83	8.34	26.7
26						18.52	10.05	29.6	276.66	786.59	48.0	0.97	2.94	50.4
41						24.88	23.83	2.1	378.89	1204.09	52.1	3.93	22.1	69.8
42						18.76	15.26	10.3	457.07	1337.78	49.1	0.75	5.75	76.9
48						38.02	88.97	40.1	568.5	4883.15	79.1	0.77	29	94.8

Cas 4 : Utilisation de la moyenne des valeurs pour chaque année

Événement	la	CN	T _c	S _t	R _c	Qp obs.	Qp sim.	% diff.	V obs.	V sim.	% diff.	Qb obs.	Qb sim.	% diff.
4	6.794	89.63	3.55	2.55	0.6703	67	76.07	6.3	1581.55	3285.55	35.0	21.5	20.85	-1.5
7						413	304.21	15.2	5823.29	9856.89	25.7	0.08	88.97	99.8

Événement	la	CN	T _c	S _t	R _c	Qp obs.	Qp sim.	% diff.	V obs.	V sim.	% diff.	Qb obs.	Qb sim.	% diff.
41	7.911	74.32	4.13	3.47	0.6289	24.877	23.320	3.2	378.89	1067.74	47.6	3.93	8.2	35.2
42						18.762	19.400	1.7	457.07	1150.6	43.1	0.75	4.72	72.6

Cas 5 : Utilisation des valeurs probables pour chaque année

Événement	la	CN	T _c	S _t	R _c	Qp obs.	Qp sim.	% diff.	V obs.	V sim.	% diff.	Qb obs.	Qb sim.	% diff.
4	8.836	80.27	4.65	2.8	0.7957	67	52.84	11.8	1581.55	2519.79	22.9	21.5	15.25	-17.0
7						413	212.81	32.0	5823.29	7719.11	14.0	0.08	73.29	99.8

Événement	la	CN	T _c	S _t	R _c	Qp obs.	Qp sim.	% diff.	V obs.	V sim.	% diff.	Qb obs.	Qb sim.	% diff.
41	8.036	69.38	4.75	3.44	0.7211	24.877	22.940	4.1	378.89	1063.58	47.5	3.93	8.44	36.5
42						18.762	19.230	1.2	457.07	1169.57	43.8	0.75	5.02	74.0

Partie 2 : Averse IA

Cas 1 : Utilisation des maximums des valeurs les plus fréquentes

Événement	la	CN	T _c	S _t	R _c	Qp obs.	Qp sim.	% diff.	V obs.	V sim.	% diff.	Qb obs.	Qb sim.	% diff.
4	8.52	72.24	4.84	5.37	0.82	67	30.14	37.9	1581.55	2135.39	14.9	21.5	11	32.3
7						413	106.9	58.9	5823.29	5897.94	0.6	0.08	80.14	99.8
11						15	15.9	2.9	459.87	1137.21	42.4	4.83	4.58	2.7
26						18.52	10.24	28.8	276.66	743.91	45.8	0.97	2.83	48.9
41						24.88	16.230	21.0	378.89	1003.22	45.2	3.93	10.34	44.9
42						18.76	14.170	13.9	457.07	1131.6	42.5	0.75	4.12	69.2
48						38.02	37.29	1.0	568.5	2558.83	63.6	0.77	11.02	86.9

Cas 2 : Utilisation des maximums des valeurs

Événement	la	CN	T _c	S _t	R _c	Qp obs.	Qp sim.	% diff.	V obs.	V sim.	% diff.	Qb obs.	Qb sim.	% diff.
4	8.52	99.00	7.30	5.37	0.82	67	62.81	0.4	1581.55	4030.74	43.6	21.5	26.89	11.1
7						413	207.9	4.8	5823.29	9981.88	26.3	0.08	134.52	99.9
11						15	27.72	31.2	459.87	1989.31	62.4	4.83	8.19	25.8
26						18.52	9.82	38.1	276.66	844.97	50.7	0.97	2.84	49.1
41						24.88	24.340	26.1	378.89	1353.11	56.2	3.93	23.15	71.0
42						18.76	16.200	47.8	457.07	1421	51.3	0.75	4.86	73.3
48						38.02	84.71	47.5	568.5	5254.7	80.5	0.77	25.22	94.1

Cas 3 : Utilisation de la moyenne des valeurs pour chaque année

Événement	la	CN	T _c	S _t	R _c	Qp obs.	Qp sim.	% diff.	V obs.	V sim.	% diff.	Qb obs.	Qb sim.	% diff.
4	6.674	96.96	3.38	2.47	0.5218	67	80.56	9.2	1581.55	4249.6	45.8	21.5	21.59	0.2
7						413	296.6	16.4	5823.29	11693.42	33.5	0.08	95.06	99.8

Événement	la	CN	T _c	S _t	R _c	Qp obs.	Qp sim.	% diff.	V obs.	V sim.	% diff.	Qb obs.	Qb sim.	% diff.
41	8.02	85.62	4.19	3.76	0.6687	24.877	18.490	14.7	378.89	1104.39	48.9	3.93	10.74	46.4
42						18.762	15.830	8.5	457.07	1147.96	43.0	0.75	4.14	69.3

Cas 4 : Utilisation des valeurs probables pour chaque année

Événement	la	CN	T _c	S _t	R _c	Qp obs.	Qp sim.	% diff.	V obs.	V sim.	% diff.	Qb obs.	Qb sim.	% diff.
4	8.524	98.87	2.08	1.41	0.2277	67	106.56	22.8	1581.55	4641.58	49.2	21.5	22.01	1.2
7						413	410.7	0.3	5823.29	12554.05	36.6	0.08	87.15	99.8

Événement	la	CN	T _c	S _t	R _c	Qp obs.	Qp sim.	% diff.	V obs.	V sim.	% diff.	Qb obs.	Qb sim.	% diff.
41	8	72.24	3.66	2.31	0.5318	24.877	21.380	7.6	378.89	1065.61	47.5	3.93	7.5	31.2
42						18.762	18.150	1.7	457.07	1117.98	42.0	0.75	4.04	68.7

Qp : le débit de pointe (m³/s)

V : le volume (1000 m³)

Qb : le débit de base (m³/s)

Sim. : Simulé

Obs. : observé

% diff. : Le pourcentage de différence

la : l'abstraction initiale (mm)

CN : le coefficient d'indexation

T_c : le temps de concentration (heures)

S_t : coefficient de stockage (heures)

Annexe 6 : Résultats détaillés de la recalibration de l'événement 48

Partie 1 : Résultats de calibration pour les différentes valeurs de pourcentage d'imperméable

% d'imperméable	la	CN	T _c	S _t	R _c	Qp obs.	Qp sim.	% diff.	V obs.	V sim.	% diff.	Qb obs.	Qb sim.	% diff.
24.42	8.0119	71.956	4.845	5.2955	0.8	38.015	38.015	0	568.5	2586.95	63.97	0.8	11.21	87.15
20	8.0797	69.379	4.851	3.5305	0.5	38.015	38.015	0	568.5	2357.14	61.14	0.8	10.31	86.10
19	7.9211	71.495	3.19	3.5131	0.5	38.015	38.015	0	568.5	2372.7	61.34	0.77	9.87	85.53
18.5	7.9211	71.495	3.19	3.5131	0.5	38.015	38.015	0	568.5	2372.7	61.34	0.77	9.87	85.53
17.5	7.2108	71.949	3.179	3.5303	0.5	38.015	38.015	0	568.5	2375.27	61.38	0.77	10.05	85.77

Qp : le débit de pointe (m³/s)

la : l'abstraction initiale (mm)

V : le volume (1000 m³)

CN : le coefficient d'indexation

Qb : le débit de base (m³/s)

T_c : le temps de concentration (heures)

Sim. : Simulé

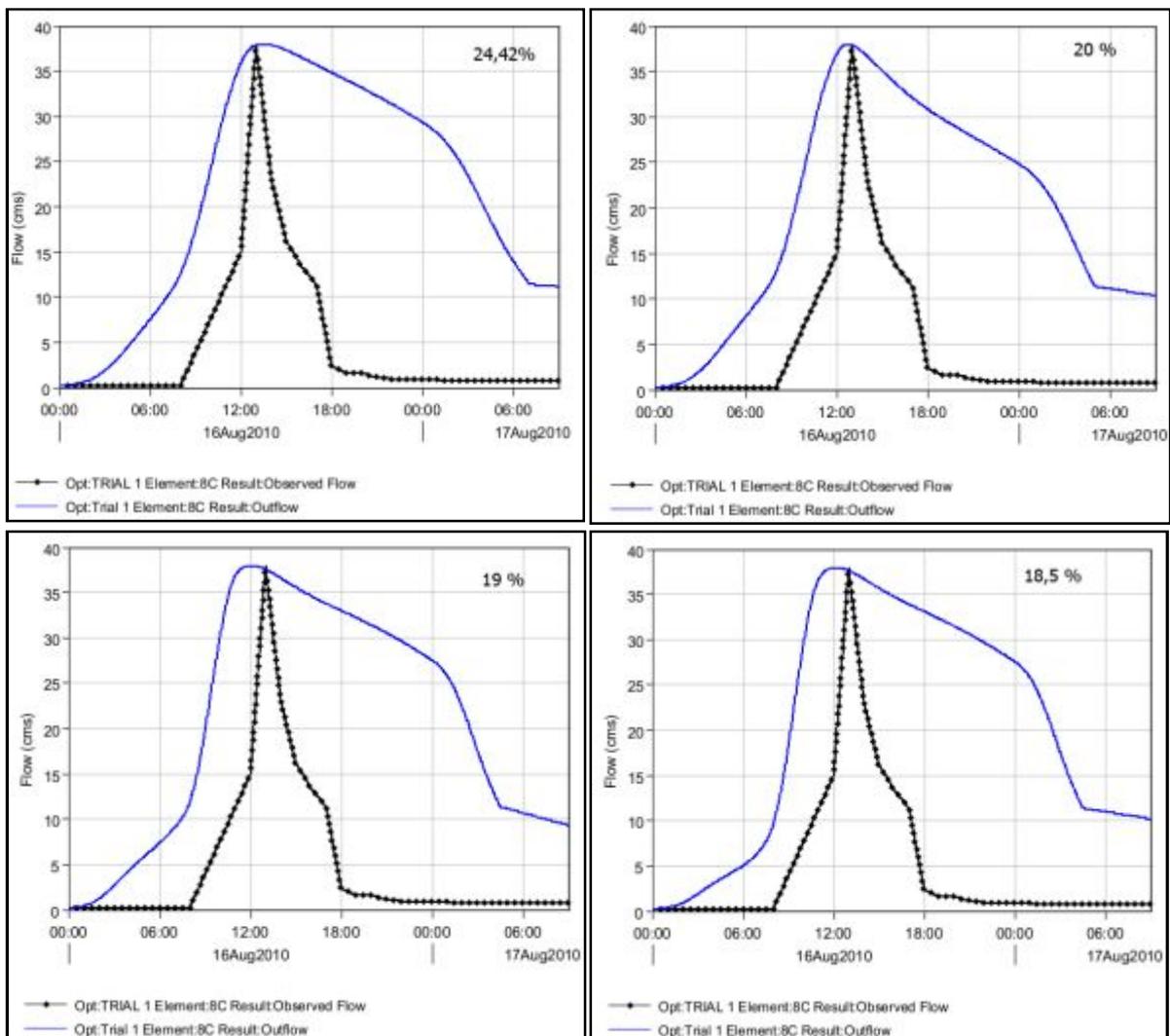
S_t : coefficient de stockage (heures)

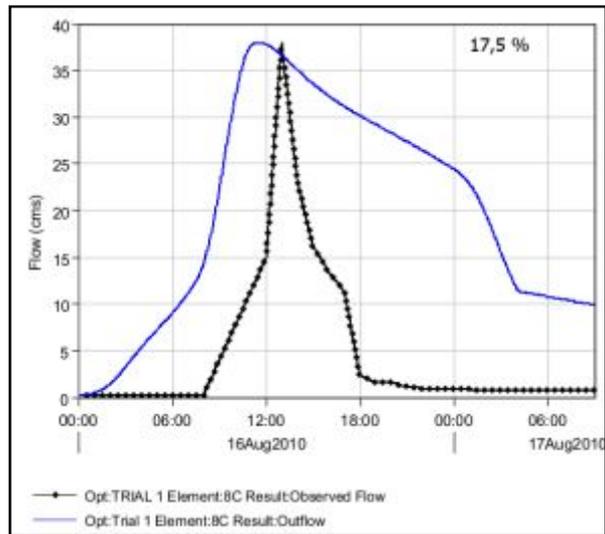
Obs. : observé

R_c : constante de récession

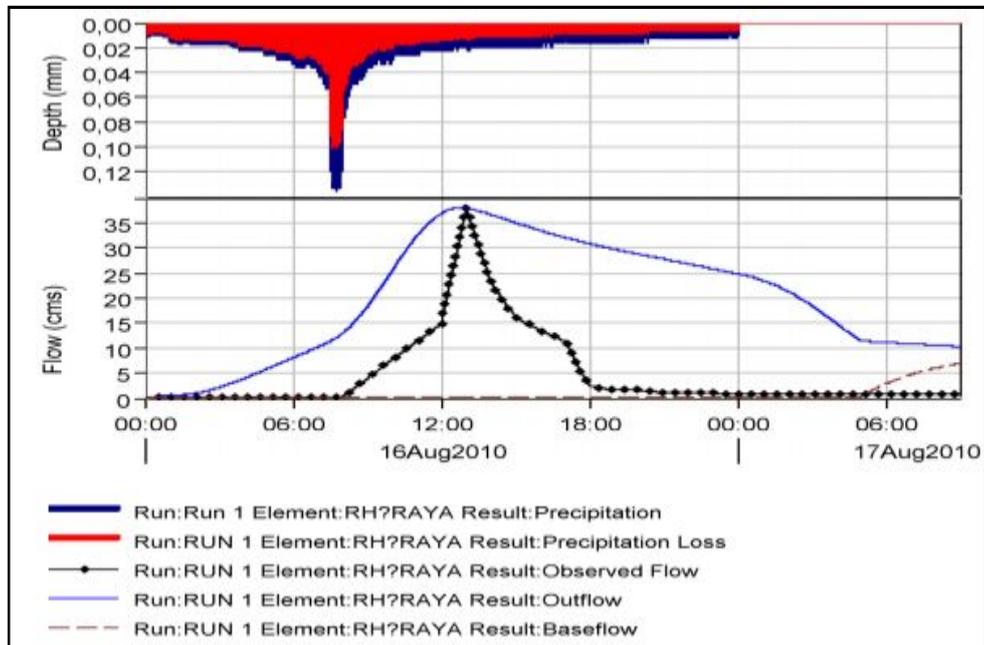
% diff. : Le pourcentage de différence

Partie 2 : les graphes de calibration de l'événement 48 pour différentes valeurs de pourcentage d'imperméable.

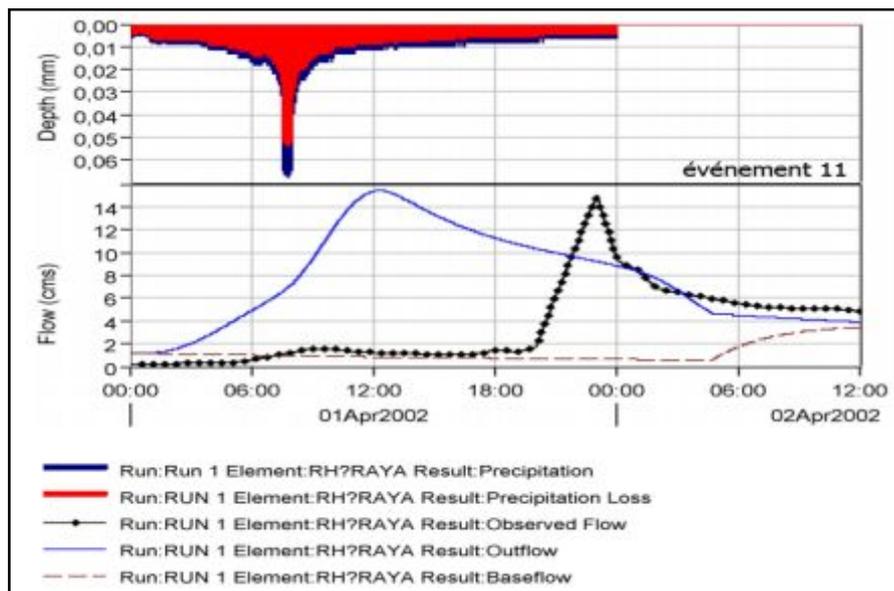
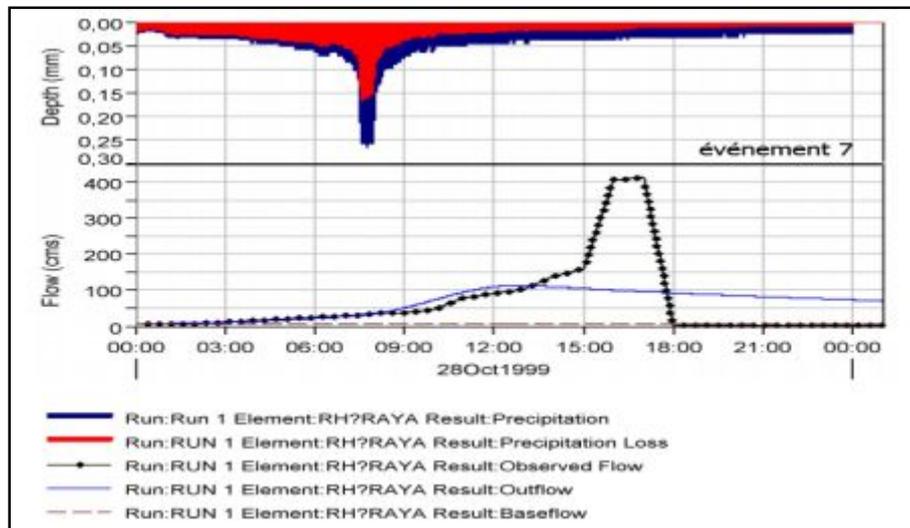
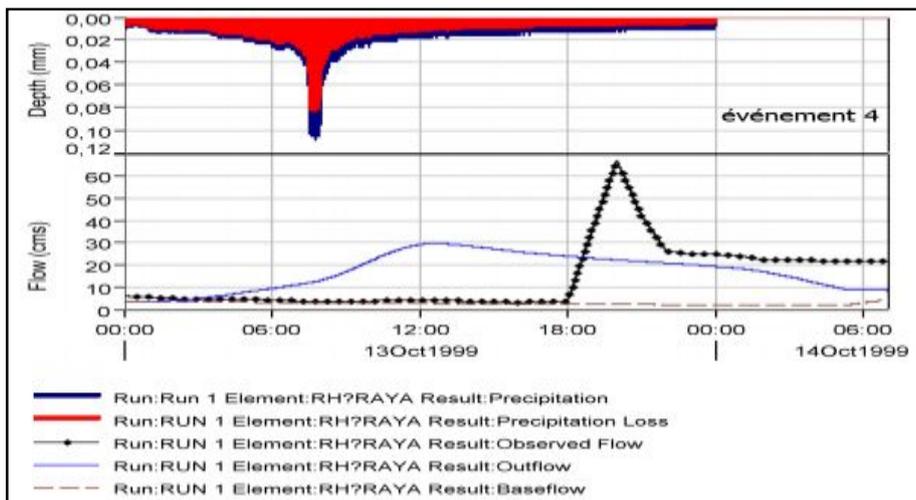


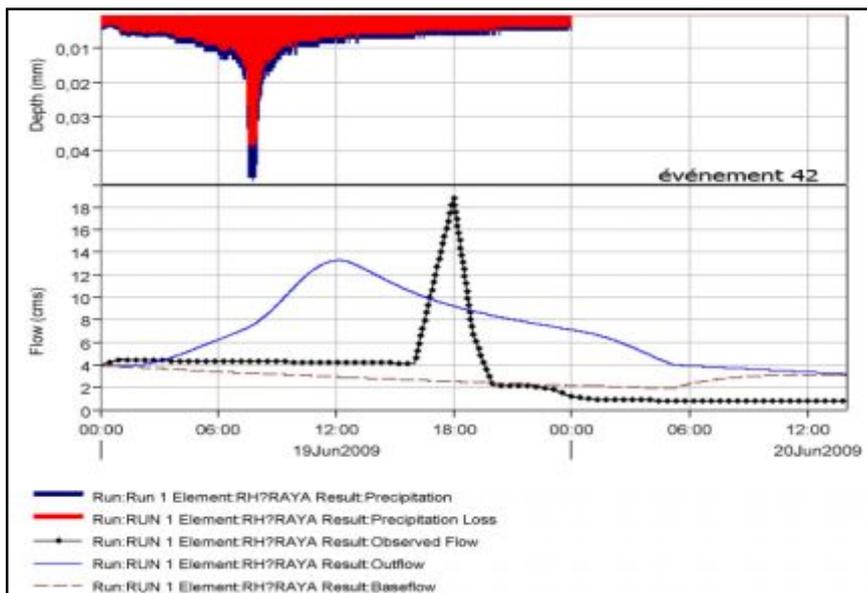
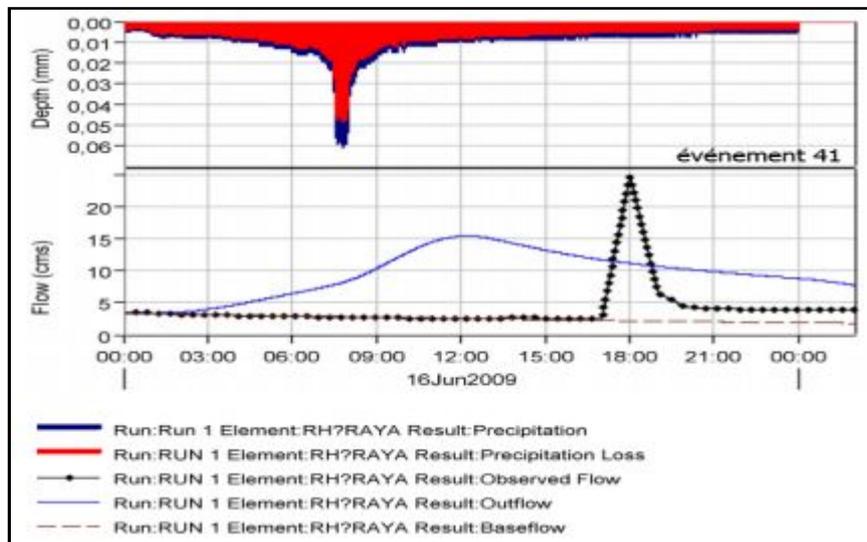
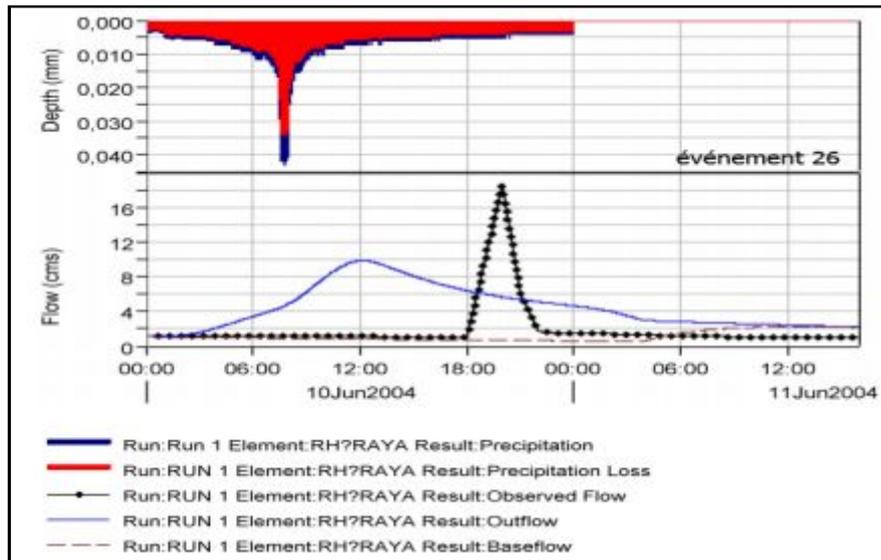


Partie 3 : Graphe final de l'événement 48 après recalibration avec le jeu de paramètres optimal

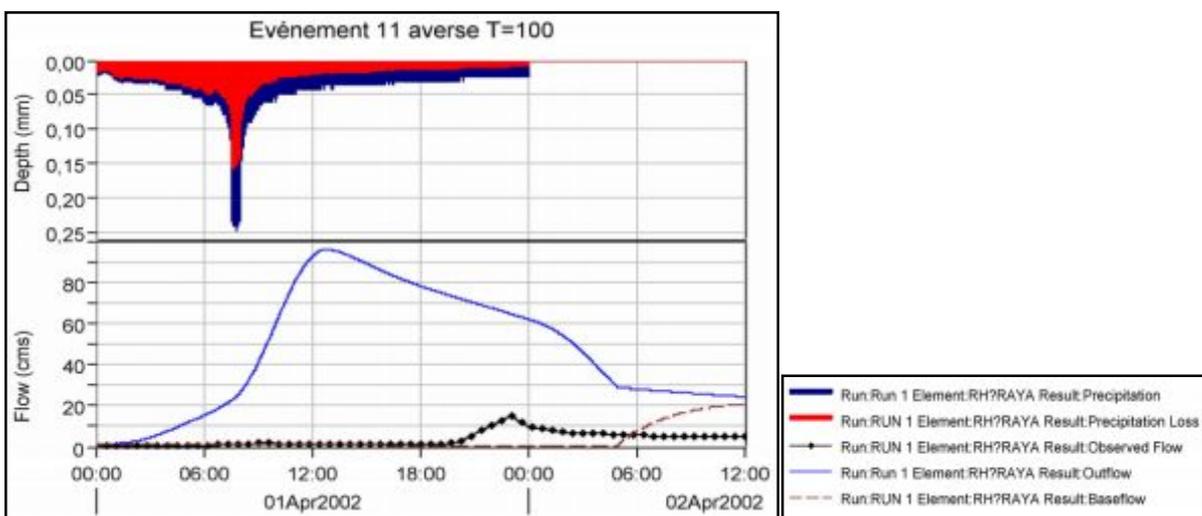
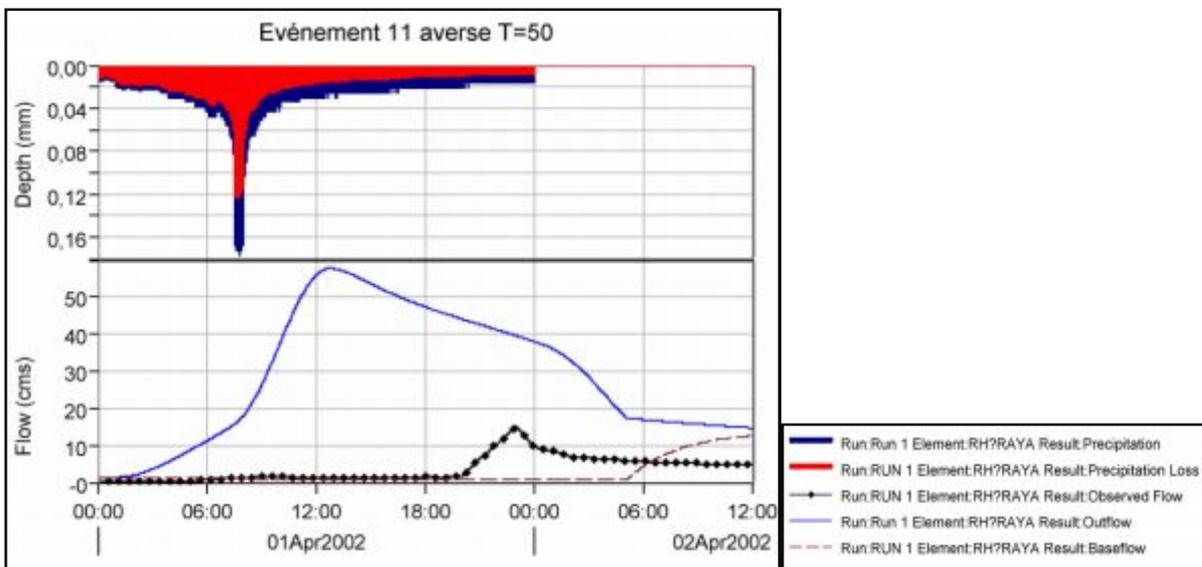
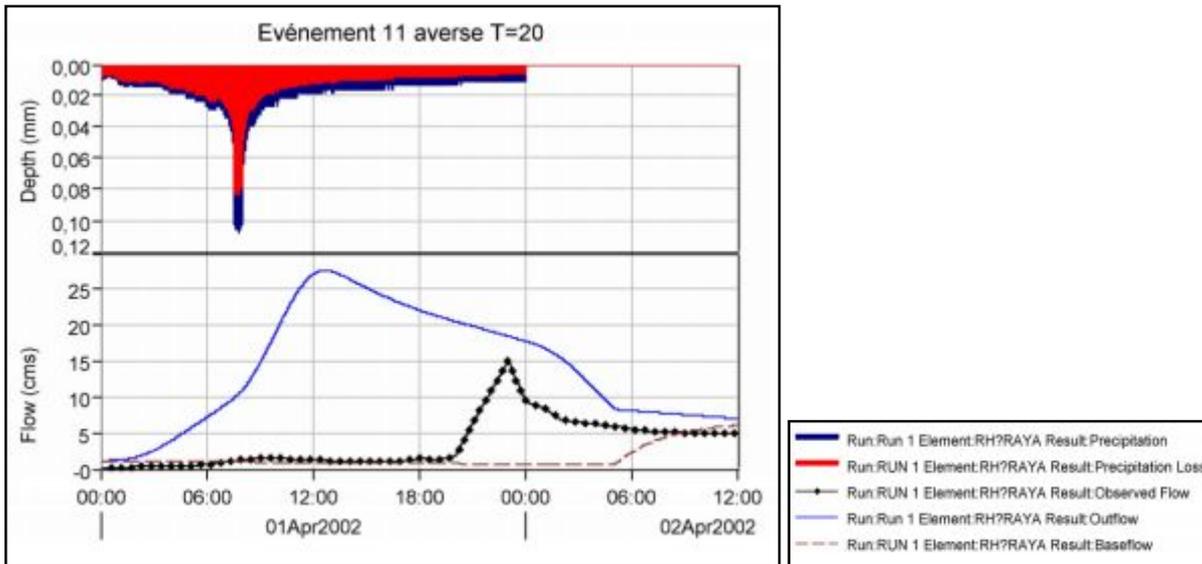


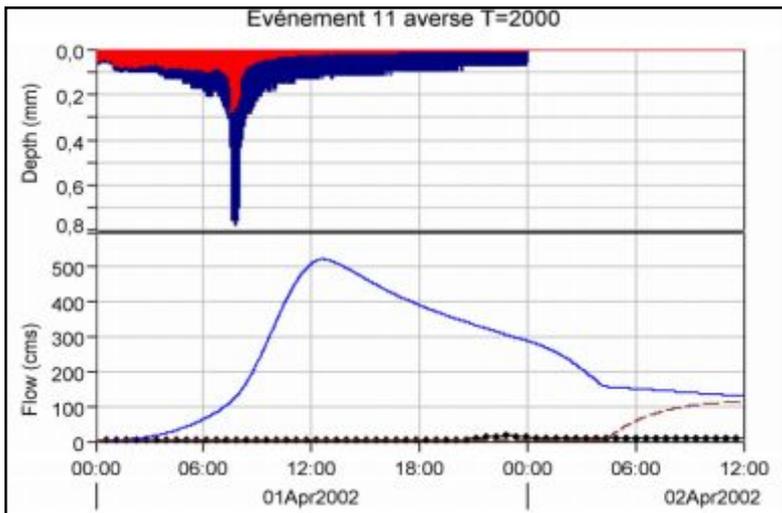
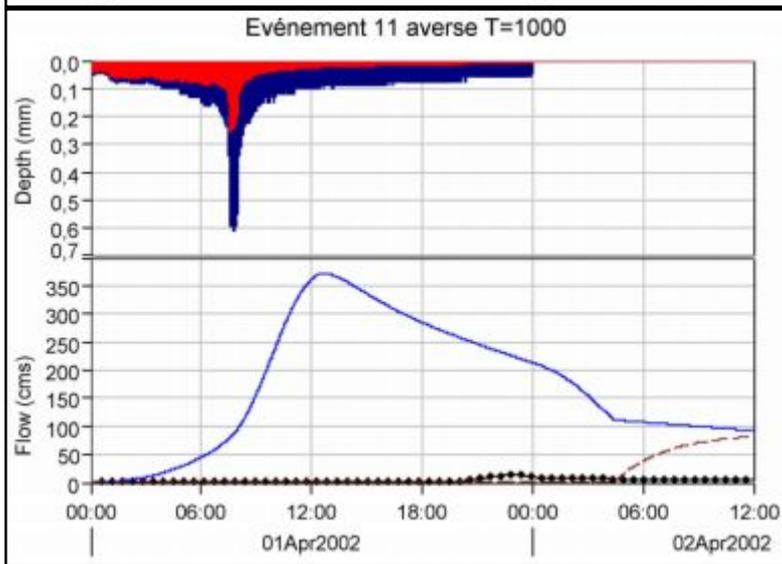
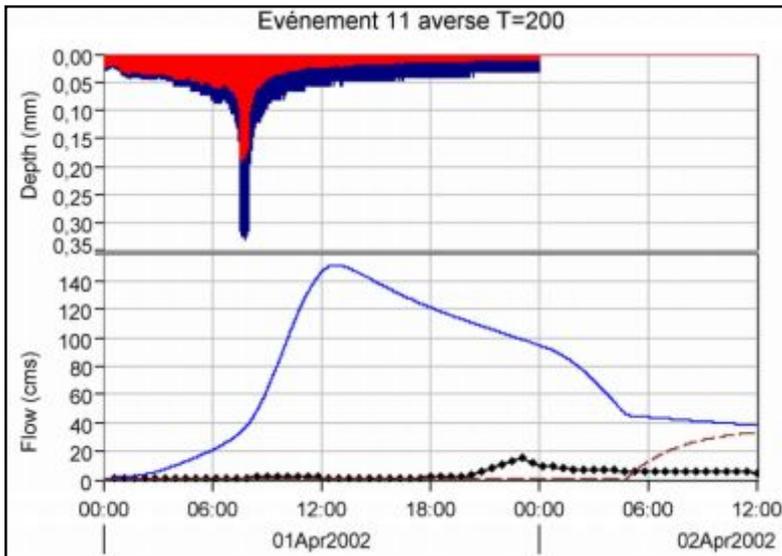
Annexe 7 : Graphes des événements issus du deuxième essai de validation





Annexe 8 : Graphes de prédiction du comportement du bassin du Rhéraya suite aux averses quantiles





Annexe 9 : Combinaison occupation du sol-type de sol avant et après modification pour les différents scénarios

Partie 1 : modifications apportées à l'occupation du sol pour le scénario 2

Type de sol	Combinaison		Surface occupée (km ²)	CN
	Occupation du sol avant	Occupation du sol après		
B	Genévrier Dense	Genévrier Dense	7.452	41
C	Genévrier Dense	Genévrier Dense	1.235	61
A	Genévrier Moyen	Genévrier Moyen	3.307	36
B	Genévrier Moyen	Genévrier Moyen	1.411	58
C	Genévrier Moyen	Genévrier Moyen	7.232	73
B	Genévrier Clair	Sol Nu	2.646	86
C	Genévrier Clair	Zone Urbanisée	17.109	91
A	Genévrier Clair	Sol Nu	3.704	77
B	Chêne Dense	Chêne Dense	8.026	30
C	Chêne Dense	Chêne Dense	9.657	41
B	Chêne Moyenne	Chêne Moyenne	6.923	48
C	Chêne Moyenne	Chêne Moyenne	0.309	57
C	Chêne Claire	Zone Urbanisée	10.054	91
B	Chêne Claire	Sol Nu	7.937	86
A	Chêne Claire	Sol Nu	0.882	77
C	Forêt Moyenne	Forêt Moyenne	1.147	73
C	Forêt Claire	Zone Urbanisée	2.866	91
B	Forêt Claire	Sol Nu	2.558	86
A	Forêt Claire	Sol Nu	0.573	77
B	Sol Nu	Sol Nu	19.667	86
C	Sol Nu	Sol Nu	50.931	91
A	Sol Nu	Sol Nu	20.946	77
A	Céréales	Céréales	16.051	60
C	Céréales	Céréales	0.088	78
B	Céréales	Céréales	0.132	71
A	Arboricultures	Arboricultures	4.851	72
C	Matorral	Matorral	8.952	77
B	Matorral	Matorral	5.556	67
A	Matorral	Matorral	1.455	48
C	Zone Urbanisée	Zone Urbanisée	0.176	91
A	Zone Urbanisée	Zone Urbanisée	0.397	77

Partie 2 : modifications apportées à l'occupation du sol pour le scénario 3

Type de sol	Combinaison		Surface occupée (km ²)	CN
	Occupation du sol avant	Occupation du sol après		
B	Genévrier Dense	Genévrier Dense	7.452	41
C	Genévrier Dense	Genévrier Dense	1.235	61
A	Genévrier Moyen	Genévrier Moyen	3.307	36
B	Genévrier Moyen	Genévrier Moyen	1.411	58
C	Genévrier Moyen	Genévrier Moyen	7.232	73
B	Genévrier Clair	Genévrier Moyen	2.646	58
C	Genévrier Clair	Zone Urbanisée	17.109	91
A	Genévrier Clair	Genévrier Moyen	3.704	36
B	Chêne Dense	Chêne Dense	8.026	30
C	Chêne Dense	Chêne Dense	9.657	41
B	Chêne Moyenne	Chêne Moyenne	6.923	48
C	Chêne Moyenne	Chêne Moyenne	0.309	57
C	Chêne Claire	Zone Urbanisée	10.054	91
B	Chêne Claire	Chêne Moyenne	7.937	48
A	Chêne Claire	Chêne Moyenne	0.882	30
C	Forêt Moyenne	Forêt Moyenne	1.147	73
C	Forêt Claire	Zone Urbanisée	2.866	91
B	Forêt Claire	Forêt Moyenne	2.558	60
A	Forêt Claire	Forêt Moyenne	0.573	36
B	Sol Nu	Forêt Claire	19.667	66
C	Sol Nu	Forêt Claire	50.931	73
A	Sol Nu	Forêt Claire	20.946	36
A	Céréales	Céréales	16.051	60
C	Céréales	Céréales	0.088	78
B	Céréales	Céréales	0.132	71
A	Arboricultures	Arboricultures	4.851	72
C	Matorral	Matorral	8.952	77
B	Matorral	Matorral	5.556	67
A	Matorral	Matorral	1.455	48
C	Zone Urbanisée	Zone Urbanisée	0.176	91
A	Zone Urbanisée	Zone Urbanisée	0.397	77

Références bibliographiques

- [1] ABHT (non daté) : Atlas des zones inondables. Rapport interne. 162p.
- [2] ABHT (2007) : Actualisation du Plan Directeur d'Aménagement Intégré du Bassin du Tensift : Évaluation du potentiel en eau et de la demande (Mission I : évaluation des ressources en eau). Version provisoire. Document interne. 86p.
- [3] ABOOD M., THAMER A., GHAZALI A., RODZI M. et LARIYAH M. (2012) : Impact of Infiltration Methods on the Accuracy of Rainfall-Runoff Simulation. Research Journal of Applied Sciences Engineering and Technology 4(12): 1708-1713, ISSN: 2040-7467.
- [4] AHBARI A., LAASSILIA O. et LAHMADI L. (2012): Rapport de mini-projet de télédétection. Master Eau et Environnement, FSTG-Marrakech. 25p.
- [5] AHBARI A. et ADALLAL R. (2012) : Modélisation hydrologique par WMS : Cas du bassin versant d'Ech Chejra (Tétouan). Rapport de stage au bureau d'études SAGE INGENIERIE-RABAT. 43p.
- [6] ARCELUS A. (non daté) : Coupling two hydrological models to compute runoff in ungauged basins. Uruguay.
- [7] BOUZIANE A. (2009) : Cours de modélisation hydrologique. École MOHMMADIA d'ingénieurs, Université Mohammed V, Rabat. 120p.
- [8] Chang C.W. (2009) : Application of SCS CN Method in HEC-HMS in ShihMen Watershed - Simulation of Rainfall-Runoff Hydrologic Model. Electronic Theses, Treatises and Dissertations, Paper 3900. 96p.
- [9] CHAPONNIERE A. (2005) : Fonctionnement hydrologique d'un bassin versant montagneux semi-aride (Cas du bassin versant du Rhéraya (Haut Atlas marocain)), thèse de Doctorat, Institut National Agronomique Paris-Grignon (France). 233p.
- [9'] Cruette (1975) in [9]
- [10] Cunderlik J. M. et Simonovic S. P. (2004) : Calibration, verification, and sensitivity analysis of the HEC-HMS hydrologic model. Project Report IV. CFCAS project. 113p.
- [11] DRPE (2011) : Guide simplifié d'utilisation du logiciel "Watershed Modeling System" –WMS-. 35p.
- [12] DUCLAUX A. (2005) : Modélisation hydrologique de 5 Bassins Versants du Haut-Atlas Marocain avec SWAT (Soil and Water Assessment Tool) " mémoire d'ingénieur de l'Institut National Agronomique Paris-Grignon (France). 53p.
- [12'] Haloui (1986) in [9]
- [13] IBNKIDA H. (2002) : Étude de quelques facteurs d'érosion dans le bassin versant de Rhéraya, mémoire de DESA, faculté des sciences Semlalia Université Cadi Ayyad Marrakech, p.29.
- [14] Jeníček, M. (2007): Effects of land cover on runoff process using SCS CN method in the upper Chomutovka catchment. In Proceedings of the 1st Scientific Conference on Integrated catchment management for hazard mitigation 24-26 September [CD-ROM]. Remote Sensing Department, University of Trier, Trier. s. 42-46.
- [15] JUILLERAT M. (2004) : Étude hydrologique comparative de cinq bassins versants du Haut-Atlas marocain", mémoire de maitrise, Université de Franche-Comté (France), 69p.

- [16] LABORDE J.P. (2007) : Éléments d'hydrologie de surface. Éditions de l'École polytechnique de l'université de Nice - Sophia Antipolis. 207p.
- [17] LEROUX J. (2006) : Optical remote sensing of snow cover dynamics (in the high atlas mountains of Morocco) Application to the hydrologic modeling of the Rheraya sub-catchement, mémoire double diplomation master de l'université de technologie de Chalmers Göteborg-Suède et ingénieur d'ENSEEIH Toulouse-France. 92p.
- [18] Musy A. et Higy C. (1998) : Hydrologie appliquée, Edition *H*G*A*, Bucarest,. ISBN: 973-98530-8-0. 369p.
- [19] Motevalli S., Hosseinzadeh M., Esmaili R., Derafshi K. et Gharehchahi S. (2012) : Assessing the Effects of Land use Change on Hydrologic Balance of Kan Watershed using SCS and HEC-HMS Hydrological Models – Tehran, IRAN. Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 6(8): 510-519, 2012. ISSN 1991-8178.
- [20] NRCS (1997) : National Engineering Handbook: Part 630 Hydrology. United States, Department of Agriculture, 762p.
- [21] Rmich A. et Hafoud N. (2004) : Relation entre les précipitations et les débits au niveau du bassin versant de Rhéraya de 1962-2003, mémoire de maitrise d'hydrogéologie, FSTG, université Cadi Ayyad Marrakech. 50p.
- [21'] Sabol (1988) in [27].
- [22] SAGE INGENIERIE et LPEE (CEH) (2008) : Élaboration des standards d'ADM en assainissement, Mission 1 : Préparation et recueil des données, Analyse critique & Méthodologies. Document interne. 80p.
- [23] SAIDI M.E. (2010) : Cours d'hydrologie et Climatologie. FSTG-Marrakech.
- [24] SAMIR A. (2003) : Cartographie des zones sensibles à l'érosion dans le bassin versant de Rhéraya, mémoire de DESA, faculté des sciences Semlalia, Université Cadi Ayyad Marrakech, p.27.
- [25] STRAUB, T.D (2000) : Equations for estimating Clark Unit Hydrograph. 30p.
- [26] TAHA A. et MUALLA W. (2003) : La prédiction du comportement hydrologique du bassin Awage en utilisant le modèle WMS (Watershed Modelling System). Publi. N° 278, 2003.
- [27] TRAMBLAY Y. (2012) : Modélisation des crues dans le bassin du barrage Makhazine. Rapport interne de l'ABH de Loukous. Maroc. 34p.
- [28] TROUILLET T. (2006) : Modélisation hydrologique du bassin versant de la Rehraya (Maroc). Mémoire de master, Université Montpellier II. 43p.
- [29] United States, Department of Agriculture (1986) : Urban hydrology for small watersheds, Technical Release 55 (TR-55). (Second Edition). Natural Resources Conservation Service, Conservation Engineering Division. 160p.
- [30] USACE (1994) : Flood-Runoff Analysis Engineering Manuel. N° 110-2-1417, Washington. 214p.
- [31] USACE (2000) : Hydrologic Modeling System HEC-HMS. Technical Reference Manual version 3.5. Hydrologic Engineering Center. 138 p.
- [32] USACE (2010) : Hydrologic Modeling System HEC-HMS. User's Manual, Version 3.5. Hydrologic Engineering Center. 316 p.
- [33] YARO Y. (2004) : "Cartographie de l'occupation du sol pour l'étude de l'érosion dans le bassin versant de Rhéraya". Mémoire de DESA, faculté des sciences Semlalia, Université Cadi Ayyad-Marrakech. p.53.