

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR - ANNABA
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار – عنابة

Faculté : Sciences de l'ingénierie

Département : Hydraulique

Domaine : Sciences et technologie

Filière : Hydraulique

Spécialité : Hydraulique urbaine

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème:

**Impact du changement climatique et l'occupation de sol sur
la réponse du bassin versant de Medjerda**

Présenté par : *DJELLIT Leila*

Encadrant : *LAOUACHERIA Fares* MCA *Université Badji-Mokhtar Annaba*

Jury de Soutenance :

KECHIDA Said	MCB	Université Badji Mokhtar Annaba	Président
LAOUACHERIA Fares	MCA	Université Badji Mokhtar Annaba	Encadrant
CHABI Moncef	MCB	Université Badji Mokhtar Annaba	Examineur

Année Universitaire : 2019/2020

Remerciements :

Je souhaite remercier le Dr. Fares LAOUACHERIA pour avoir accepté de m'encadrer dans cette étude.

Je le remercie pour son implication, son soutien et ses encouragements tout au long de ce travail. Je souhaite également remercier Mr. LAOUACHERIA pour avoir su me faire confiance et m'avoir conseillée tout au long de cette année.

Merci au Dr. Saïd KECHIDA d'avoir accepté d'évaluer mon travail au sein du jury de soutenance. Je le remercie pour ses précieux conseils méthodologiques.

Merci au Dr. Moncef CHABI d'avoir accepté d'évaluer mon travail au sein du jury de soutenance. Je le remercie pour ses précieux conseils méthodologiques.

Mes vifs remerciements s'adressent à Mme. Dounia MRAD pour le partage d'informations qui m'ont aidée à la réalisation de ce mémoire.

Je remercie ma famille pour son soutien.

Résumé :

Cette étude consiste à utiliser la modélisation hydrologique pour le suivi du ruissellement généré par le bassin versant Mellegue. Pour ce faire, nous avons pris en considération les changements climatiques, l'occupation de sol et leurs effets.

A partir des données disponibles obtenues de l'ANRH, le ruissellement de surface a été simulé à l'aide du système de modélisation hydrologique (HEC-HMS). Les méthodes du nombre de courbes du service de conservation du sol (SCS-CN) et l'hydrogramme unitaire de SCS ont été utilisées.

Mots clés: Modalisation hydrologique, Occupation du sol, Mellegue, Changement climatique, HEC-HMS, RMSE, Nash-Sutcliff, Coefficient de détermination.

Summary:

This study consists of using hydrological modeling to monitor the runoff generated by the Mellegue watershed. To do this, we took into account climate change, land use and their effects. From the available data obtained from the ANRH, surface runoff was simulated using the hydrological modeling system (HEC-HMS). The methods of the number of curves of the soil conservation service (SCS-CN) and the unit hydrograph of SCS were used.

Keywords: Hydrological modeling, Land use, Mellegue, Climate change, HEC-HMS, RMSE, Nash-Sutcliff, Coefficient of determination.

ملخص:

تم في هذه الدراسة استخدام النمذجة الهيدرولوجية لرصد الجريان السطحي الناتج عن مستجمع مياه ميلاق. للقيام بذلك ، أخذنا في الاعتبار تغير المناخ واستخدام الأراضي وآثارها. من البيانات المتاحة التي تم الحصول عليها من ANRH ، تمت محاكاة الجريان السطحي باستخدام نظام النمذجة الهيدرولوجية (HEC-HMS). تم استخدام طرق عدد منحنيات في خدمة الحفاظ على التربة (SCS-CN) ووحدة الهيدروغرافيا لـ SCS.

الكلمات الرئيسية: النمذجة الهيدرولوجية ، استخدام الأراضي ، Mellegue ، تغير المناخ ، HEC-HMS ، RMSE ، Nash-Sutcliff ، معامل التحديد.

Table des Matières :

Remerciements	
Résumé	
Summary	
ملخص	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Annexe	
Liste des abréviations	
Introduction générale:.....	1
Chapitre I : Le changement climatique et son impact sur le milieu hydrique.	3
I.1- Le changement climatique dans le monde	6
I.2- Le changement climatique en Algérie	8
I.4- Le changement climatique et l'évaluation environnementale	11
I.4.1- Évaluation environnementale stratégique (ÉES):	11
I.5- L'importance de l'évaluation climatique	12
I.6- Conclusion	13
Chapitre II : Les modélisations hydrologiques.....	14
II.1- Introduction	14
II.2- La modélisation hydrologique	15
II.3- Choix d'un modèle	16
II.4- Type de modèle	17
II.4.1- Modèles pluie-débit	17
II.4.2- Modèles débit-débit	21
II.5- Le calage et validation d'un modèle.....	22
II.5.1- Calage du modèle hydrologique	22
II.5.2- Validation	28
II.6- Conclusion.....	28
Chapitre III : Méthodologie et matériel.....	30
III.1- Zone d'étude	30
III.1.1- Superficie et forme du bassin.....	31
III.1.2- La climatologie.....	31
III.1.3- Réseau hydrographique.....	37
III.1.4- Couvert Végétale.....	37
III.1.5- Relief et Analyse de la carte hypsométrique.....	38
III.1.6- Etude géologique.....	39
III.2- Méthodologie et Logiciels d'études	41

III.2.1 Logiciel ArcGIS 10.2	41
III.2.2- Simulation hydrologique par le modèle HEC-HMS	45
III.3- L'Indice Standardisé des Précipitations.....	59
Chapitre IV : Résultats et Discussion.....	60
IV.1-Introduction.....	60
IV.2- Modélisation hydrologique du bassin versant par HEC-HMS.....	60
IV.2.1- Modèle des pertes par infiltration (SCS-CN).....	60
IV.2.2- Hyétogrammes et Hydrogrammes obtenus après simulation.....	61
IV.2.2.1- Sous-bassin W120 :	61
IV.2.2.2- Sous-bassin W130 :	62
IV.2.2.3- Sous-bassin W140 :	63
IV.2.2.4- Sous-bassin W150 :	64
IV.2.2.5- Sous-bassin W160 :	65
IV.2.2.6- Sous-bassin W170 :	66
IV.2.2.7- Sous-bassin W180 :	67
IV.2.2.8- Sous-bassin W190 :	68
IV.2.2.9- Sous-bassin W200 :	69
IV.2.2.10- Sous-bassin W210 :	70
IV.2.2.11- Sous-bassin W220 :	71
IV.2.2.11- Exutoire:.....	72
IV.2.3- Discussion des résultats obtenus	73
IV.3- Étude de performance du sous bassin W180	73
IV.3.1- Calage du sous bassin W120.....	73
IV.3.2- Analyse de sensibilité du sous bassin W180.....	75
IV.3.3- Discussion des résultats obtenus	99
IV.4- Analyse de l'index de précipitation standardisé	99
Conclusion.....	104
Annexe	
Référence	

Liste des figures:

Figure	Titre de la figure	Page
CHAPITRE I		
Fig. I.1	a) Émissions annuelles de GES anthropiques dans le monde (1970-2004).	4
	b) Parts respectives des différents GES anthropiques dans les émissions totales de 2004 en équivalent-CO ₂ .	
	c) Contribution des différents secteurs aux émissions totales de GES en 2004, en équivalent-CO ₂ .	
Fig. I.2	Représentation de la rétention de chaleur causée par les GAS.	4
Fig. I.3	Variation de la température et du niveau de la mer à l'échelle du globe et de la couverture neigeuse dans l'hémisphère nord (GIEC, 2007a).	6
Fig. I.4	Tendances mondiales de températures (a) et de précipitation (b) de 1986 à l'horizon 2100, pour les scénarios RCP2.6 et RCP8.5.	7
Fig. I.5	Principaux scénario du GIEC (SRES, GIEC, 2000).	8
Fig. I.6	Emissions de CO ₂ en Algérie (http://www.data.un.org).	9
Fig. I.7	Changement de température et précipitation projetés pour le Maghreb par le modèle HadCM2 à 2050).	10
CHAPITRE II		
Fig. II.1	Représentation du cycle de l'eau dans un réseau hydrographique (USGS).	14
Fig. II.2	Représentation schématique du ruissellement hortonien.	15
Fig. II.3	Schématisme d'un modèle global (Koffi, 2007).	16
Fig. II.4	Différentes formes de modélisation.	17
Fig. II.5	Structure d'un réseau de neurones artificiels.	18
Fig. II.6	Structure du modèle Sacramento.	19
Fig. II.7	Schéma du modèle à réservoir (GARDÉNIA, BRGM).	20
Fig. II.8	Schématisme du model HBV (L. Phil Graham).	21
CHAPITRE III		
Fig. III.1	Présentation de la situation géographique du Bassin Mellegue (Google Earth, ArcGIS).	30
Fig. III.2	Variation des précipitations de la station de Hammamet pour la période (1970/1971-2003/2004).	31
Fig. III.3	Variation des précipitations de la station de Ain Dhalaa pour la période (1970/1971-2003/2004).	32
Fig. III.4	Variation des précipitations de la station de Meskiana pour la période (1970/1971-2003/2004).	32
Fig. III.5	Variation des précipitations de la station d'El Ouenza pour la période (1970/1971-2003/2004).	33
Fig. III.6	Répartition spatiale des pluies moyennes annuelles pendant la période 1970-1979 de la zone du bassin versant de Mellegue.	33
Fig. III.7	Répartition spatiale des pluies moyennes annuelles pendant la période 1980-1989 de la zone du bassin versant de Mellegue.	34
Fig. III.8	Répartition spatiale des pluies moyennes annuelles pendant la période 1990-2004 de la zone du bassin versant de Mellegue.	34
Fig. III.9	Evolution de la température moyenne annuelle de la station Meskiana pour le période (1972/1973-2004/2005).	35
Fig. III.10	Représentation du couvert végétal sur le bassin Mellegue en 2004	38

	(ArcGIS, Google Earth).	
Fig. III.11	Représentation du relief du bassin Mellegue (ArcGIS).	39
Fig. III.12	Pédologie du bassin Mellegue (ArcGIS, Carte pédologique de Tébessa).	40
Fig. III.13	Logiciel ArcGIS 10.2.	41
Fig. III.14	Composante ArcGIS 10.2.	42
Fig. III.15	Interface ArcMap.	42
Fig. III.16	Barre d'outils ArcMap.	43
Fig. III.17	Interface ArcCatalog.	43
Fig. III.18	Les outils d'ArcToolbox.	44
Fig. III.19	Projection de la Zone (S) 32 hémisphère nord.	45
Fig. III.20	Utilité du logiciel ArcGIS et étape de modélisation.	45
Fig. III.21	Réseau hydrographique simulé par HEC-GeoHMS.	46
Fig. III.22	L'enchaînement d'intervention des différentes composantes dans la structure événementielle du modèle HEC-HMS.	48
Fig. III.23	Occupation de sol de la zone d'étude : Année 1979.	54
Fig. III.24	Curve Number de la zone d'étude : Année 1979.	55
Fig. III.25	Occupation de sol de la zone d'étude : Année 1989.	56
Fig. III.26	Curve Number de la zone d'étude : Année 1989.	56
Fig. III.27	Occupation de sol de la zone d'étude : Année 2004.	57
Fig. III.28	Curve Number de la zone d'étude : Année 2004.	58
CHAPITRE IV		
Fig. IV.1	Le bassin Mellegue sous HEC-HMS.	60
Fig. IV.2	Hyétogrammes du sous bassin W120.	61
Fig. IV.3	Hydrogrammes du sous bassin W120.	62
Fig. IV.4	Hyétogrammes du sous bassin W130.	62
Fig. IV.5	Hydrogrammes du sous bassin W130.	63
Fig. IV.6	Hyétogrammes du sous bassin W140.	63
Fig. IV.7	Hydrogrammes du sous bassin W140.	64
Fig. IV.8	Hyétogrammes du sous bassin W150.	64
Fig. IV.9	Hydrogrammes du sous bassin W150.	65
Fig. IV.10	Hyétogrammes du sous bassin W160.	65
Fig. IV.11	Hydrogrammes du sous bassin W160.	66
Fig. IV.12	Hyétogrammes du sous bassin W170.	66
Fig. IV.13	Hydrogrammes du sous bassin W170.	67
Fig. IV.14	Hyétogrammes du sous bassin W180.	67
Fig. IV.15	Hydrogrammes du sous bassin W180.	68
Fig. IV.16	Hyétogrammes du sous bassin W190.	68
Fig. IV.17	Hydrogrammes du sous bassin W190.	69
Fig. IV.18	Hyétogrammes du sous bassin W200.	69
Fig. IV.19	Hydrogrammes du sous bassin W200.	70
Fig. IV.20	Hyétogrammes du sous bassin W210.	70
Fig. IV.21	Hydrogrammes du sous bassin W210.	71
Fig. IV.22	Hyétogrammes du sous bassin W220.	71
Fig. IV.23	Hydrogrammes du sous bassin W220.	72

Fig. IV.24	Hydrogrammes de crue à l'exutoire.	72
Fig. IV.25	Hyétogrammes et hydrogramme de crue simulé et observé (1979).	74
Fig. IV.26	Hyétogrammes et hydrogramme de crue simulé et observé (1989).	74
Fig. IV.27	Hyétogrammes et hydrogramme de crue simulé et observé (2004).	75
Fig. IV.28	Optimisation des résultats des débits simulés et observés par la méthode RMSE (1979).	76
Fig. IV.29	Optimisation des résultats des débits simulés et observés par la méthode RMSE (1989).	77
Fig. IV.30	Optimisation des résultats des débits simulés et observés par la méthode RMSE (2004).	78
Fig. IV.31	Corrélation entre le débit observé vs débit simulé par RMSE (1979).	80
Fig. IV.32	Corrélation entre le débit observé vs débit simulé par RMSE (1989).	80
Fig. IV.33	Corrélation entre le débit observé vs débit simulé par RMSE (2004).	81
Fig. IV.34	Optimisation du CN par RMSE (1979).	81
Fig. IV.35	Optimisation du Lag Time par RMSE (1979).	82
Fig. IV.36	Optimisation du CN par RMSE (1989).	82
Fig. IV.37	Optimisation du Lag Time par RMSE (1989).	83
Fig. IV.38	Optimisation du CN par RMSE (2004).	83
Fig. IV.39	Optimisation du Lag Time par RMSE (2004).	84
Fig. IV.40	Optimisation des résultats des débits simulés et observés par la méthode Nash-Sutcliff (1979).	85
Fig. IV.41	Optimisation des résultats des débits simulés et observés par la méthode Nash-Sutcliff (1989).	86
Fig. IV.42	Optimisation des résultats des débits simulés et observés par la méthode Nash-Sutcliff (2004).	87
Fig. IV.43	Optimisation du CN par Nash-Sutcliff (1979).	88
Fig. IV.44	Optimisation du Lag Time par Nash-Sutcliff (1979).	89
Fig. IV.45	Optimisation du CN par Nash-Sutcliff (1989).	89
Fig. IV.46	Optimisation du Lag Time par Nash-Sutcliff (1989).	90
Fig. IV.47	Optimisation du CN par Nash-Sutcliff (2004).	90
Fig. IV.48	Optimisation du Lag Time par Nash-Sutcliff (2004).	91
Fig. IV.49	Optimisation des résultats des débits simulés et observés par la méthode Coefficient de détermination (1979).	92
Fig. IV.50	Optimisation des résultats des débits simulés et observés par la méthode Coefficient de détermination (1989).	93
Fig. IV.51	Optimisation des résultats des débits simulés et observés par la méthode Coefficient de détermination (2004).	94
Fig. IV.52	Optimisation du CN par le Coefficient de détermination (1979).	96
Fig. IV.53	Optimisation du Lag Time par le Coefficient de détermination (1979).	96
Fig. IV.54	Optimisation du CN par le Coefficient de détermination (1989).	97
Fig. IV.55	Optimisation du Lag Time par le Coefficient de détermination (1989).	97
Fig. IV.56	Optimisation du CN par le Coefficient de détermination (2004).	98
Fig. IV.57	Optimisation du Lag Time par le Coefficient de détermination (2004).	98
Fig. IV.58	Valeurs annuelles de l'Indice Standardisé des Précipitations de la station pluviométriques El Ouenza sur la période 1970-2004.	99
Fig. IV.59	Valeurs annuelles de l'Indice Standardisé des Précipitations de la station pluviométriques M'Daourouch sur la période 1970-2004.	100

Fig. IV.60	Valeurs annuelles de l'Indice Standardisé des Précipitations de la station pluviométriques Messloulou sur la période 1970-2004.	100
Fig. IV.61	Valeurs annuelles de l'Indice Standardisé des Précipitations de la station pluviométriques El Aouinet sur la période 1970-2004.	101
Fig. IV.62	Valeurs annuelles de l'Indice Standardisé des Précipitations de la station pluviométriques Meskiana sur la période 1970-2004.	101
Fig. IV.63	Valeurs annuelles de l'Indice Standardisé des Précipitations de la station pluviométriques Morsott sur la période 1970-2004.	102
Fig. IV.64	Valeurs annuelles de l'Indice Standardisé des Précipitations de la station pluviométriques Ain Kissa sur la période 1970-2004.	102
Fig. IV.65	Valeurs annuelles de l'Indice Standardisé des Précipitations de la station pluviométriques Tébessa sur la période 1970-2004.	103
Fig. IV.66	Valeurs annuelles de l'Indice Standardisé des Précipitations de la station pluviométriques Ain Dhalaa sur la période 1970-2004.	103

Liste des tableaux :

Tableau	Titre du Tableau	Page
CHAPITRE III		
Tab. III.1	Inventaire des stations pluviométrique du bassin.	32
Tab. III.2	Variation des températures moyennes mensuelles (1983/1984-2003/2004).	35
Tab. III.3	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).	53
Tab. III.4	Détermination du CN selon différentes utilisation du sol (USDA-NRCS, 2004).	53
Tab. III.5	La relation pluie antérieure et type de CN pour la méthode NRCS CN (USDA-NRCS, 2004).	54
Tab. III.6	Occupation de sol de la zone d'étude : Année 1979.	55
Tab. III.7	Occupation de sol de la zone d'étude : Année 1989.	57
Tab. III.8	Occupation de sol de la zone d'étude : Année 2004.	58
Tab. III.9	Valeurs et signification du SPI.	59
CHAPITRE IV		
Tab. IV.1	Caractéristiques des sous bassin selon les scenarios (climatique et occupation de sol).	61
Tab. IV.2	Apports hydrologiques du SB W120.	62
Tab. IV.3	Apports hydrologiques du SB W130.	63
Tab. IV.4	Apports hydrologiques du SB W140.	64
Tab. IV.5	Apports hydrologiques du SB W150.	65
Tab. IV.6	Apports hydrologiques du SB W160.	66
Tab. IV.7	Apports hydrologiques du SB W170.	67
Tab. IV.8	Apports hydrologiques du SB W180.	68
Tab. IV.9	Apports hydrologiques du SB W190.	69
Tab. IV.10	Apports hydrologiques du SB W200.	70
Tab. IV.11	Apports hydrologiques du SB W210.	71
Tab. IV.12	Apports hydrologiques du SB W220.	72
Tab. IV.13	Apports hydrologiques à l'exutoire.	73
Tab. IV.14	Comparaison des apports hydrologiques simulés et observés sur le sous bassin W180.	73
Tab. IV.15	Optimisation de la réponse du sous bassin « W180 » par RMSE (1979).	76
Tab. IV.16	Optimisation de la réponse du sous bassin « W180 » par RMSE (1989).	77
Tab. IV.17	Optimisation de la réponse du sous bassin « W180 » par RMSE (2004).	78
Tab. IV.18	Optimisation des paramètres CN et Lag par RMSE (1979, 1989, 2004).	79
Tab. IV.19	Optimisation de la réponse du sous bassin « W180 » par Nash-Sutcliff (1979).	85
Tab. IV.20	Optimisation de la réponse du sous bassin « W180 » par Nash-Sutcliff (1989).	86
Tab. IV.21	Optimisation de la réponse du sous bassin « W180 » par Nash-Sutcliff (2004).	87
Tab. IV.22	Optimisation des paramètres CN et Lag par Nash-Sutcliff (1979, 1989, 2004).	88
Tab. IV.23	Optimisation de la réponse du sous bassin « W180 » par le Coefficient de détermination (1979).	92

Tab. IV.24	Optimisation de la réponse du sous bassin « W180 » par le Coefficient de détermination (1989).	93
Tab. IV.25	Optimisation de la réponse du sous bassin « W180 » par le Coefficient de détermination (2004).	94
Tab. IV.26	Optimisation des paramètres CN et Lag par le Coefficient de détermination (1979, 1989, 2004).	95

Annexe :

Tableau	Titre du Tableau
ANNEXE	
Tab. 1	les données de pluies interannuelles relatives à la station d'El Ouenza.
Tab. 2	les données de pluies interannuelles relatives à la station Meskiana.
Tab. 3	les données de pluies interannuelles relatives à la station d'Ain Dhalaa.
Tab. 4	les données de pluies interannuelles relatives à la station Hammamet
Tab. 5	Précipitations journalières maximum de 1970 à 2004.
Tab. 6	Détermination du CN selon différentes utilisation du sol (USDA-NRCS, 2004).
Tab. 7	Courbes Intensité – Durée – Fréquence (IDF), station El Ouenza.
Tab. 8	Courbes Intensité – Durée – Fréquence (IDF), station M'Daourouch.
Tab. 9	Courbes Intensité – Durée – Fréquence (IDF), station Messloula.
Tab. 10	Courbes Intensité – Durée – Fréquence (IDF), station El Aouinet.
Tab. 11	Courbes Intensité – Durée – Fréquence (IDF), station Meskiana.
Tab. 12	Courbes Intensité – Durée – Fréquence (IDF), station Morsott.
Tab. 13	Courbes Intensité – Durée – Fréquence (IDF), station Ain Kissa.
Tab. 14	Courbes Intensité – Durée – Fréquence (IDF), station Tebessa.
Tab. 15	Courbes Intensité – Durée – Fréquence (IDF), station Ain Dhalaa.

Liste des abréviations:

GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat.
OMM	Organisation météorologique mondiale.
PNUE	Programme des Nations Unies pour l'environnement.
CCNUCC	Convention-cadre des Nations Unies sur les changements Climatiques.
GES	Gaz à Effet de Serre.
PENU	Programme des Nations unies pour l'Environnement.
SRES	Special Report on Emissions Scenarios.
ONM	Office National de Météorologie.
PNUD	Programme des Nations-Unies pour le Développement.
ÉES	Évaluation Environnementale Stratégique.
RMSE	Root Mean Square Error (Erreur quadratique moyenne).
NSE	Coefficient de Nash-Sutcliff.
UTM	Universal Transverse Mercator.
WGS	World Geodesic system.
HEC	Hydrological Engineering Center.
CN	Curve Number (Nombre de Courbe).
NRCS	Natural Resources Conservation Service (service de conservation des ressources naturelles).
USDA	United States Department of Agriculture (département de l'agriculture des états unis).
SPI	Standardized Precipitation Index (indices standardisé des précipitations).
SB	Sous Bassin.

Introduction générale

Introduction générale :

Les ressources en eau, plus que toute autre forme de ressource, constituent un élément fondamental et nécessaire au maintien et au développement de toute activité humaine économique et sociale. Les changements climatiques et la sécheresse qui sévissent depuis plusieurs décennies dans différentes régions du monde, ont touché particulièrement les pays d'Afrique du Nord, et ont eu un impact négatif sur les ressources en eau de ces pays. Cette sécheresse, qui risque de s'accroître durant le siècle à venir, pourrait entraîner dans ces pays une véritable crise de l'eau.

La situation actuelle en Algérie, se caractérise par un déséquilibre entre les besoins et les ressources disponibles. La croissance démographique et le développement économique et social du pays ont induit durant les deux dernières décennies écoulées, un accroissement considérable des besoins en eau potable, industrielle et agricole. L'intensification en matière d'infrastructure hydraulique a permis d'observer que le développement durable du pays devait passer incontestablement par une prise en charge de la question de l'eau sous ses multiples facettes.

Autrement dit, ceci entraîne une nécessité vis-à-vis de l'étude et la compréhension du régime hydrologique sous différents scénarios climatiques. En effet, une connaissance adéquate des processus pluie-débit est essentielle pour estimer le volume de ruissellement produit dans un bassin versant. Connaître le volume de ruissellement dans un bassin versant est important pour la planification et la gestion durable de projets liés aux ressources en eau.

Dans cette étude, les modèles hydrologiques pour la simulation et la prévision des crues ont été utilisés à l'aide du système de modélisation hydrologique du centre d'ingénierie hydrologique (HEC-HMS). Le modèle HEC-HMS dont le type d'approche de modélisation dépend de l'objet, de la disponibilité des données et de la facilité d'utilisation, a été mis au point pour simuler le processus pluie-débit.

Les modèles hydrologiques permettent de définir les hydrogrammes de crue aidant à comprendre le comportement du bassin versant sous l'effet de plusieurs facteurs, tels que l'accroissement de l'urbanisation, l'utilisation des espaces et le changement climatique. Ces modèles nécessitent une définition fine de l'ensemble des caractéristiques des hydrogrammes (débits de pointe, volumes écoulés, temps de montée, ...) et une connaissance approfondie de leur genèse pour différentes périodes de retour. Bien que les modèles physiques utilisent des procédures physiques associées à la modélisation pluie-débit, leur utilisation fructueuse est limitée, principalement en raison de la difficulté d'évaluer les paramètres en jeu ainsi que de la complexité de l'équation de base. Les incertitudes associées aux résultats de ces modèles et les identités de leurs paramètres doivent être examinées.

Ce mémoire a pour objectif principal d'examiner l'influence et l'impact des changements liés au climat et à l'occupation du sol (Urbanisme, végétation et agriculture) sur le ruissellement généré par le bassin versant Mellegue. Le travail consiste à créer un modèle hydrologique réaliste afin de pouvoir étudier la réponse de ce bassin selon ces changements. Une évaluation et une optimisation du modèle, à partir de trois fonctions objectives à savoir : RMSE, Nash-Sutcliffe et le Coefficient de détermination, seront effectuées afin de connaître les paramètres qui ont une grande sensibilité sur la sortie du modèle. Pour arriver à notre but, nous avons utilisé le modèle hydrologique HEC-HMS qui nous a permis de modéliser les pluies.

Notre mémoire s'organise en quatre (04) chapitres comme suit :

- Le premier chapitre résume les changements climatiques et leur impact dans/sur le domaine hydrologique.
- Le deuxième chapitre décrit la modélisation et les modèles hydrologiques existant dans la littérature et utilisées par plusieurs chercheurs.
- Le troisième chapitre décrit la méthodologie suivie dans cette étude ; commençant par la description de la région du bassin versant Mellegue et l'application de modèles hydrologiques
- Le quatrième chapitre interprète les résultats de la simulation et leur analyse.

Ce travail est achevé par une conclusion.

Chapitre I :
**Le changement
climatique et son impact
sur le milieu hydrique.**

Chapitre I : Le changement climatique et son impact sur le milieu hydrique.

Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), créé en 1988 par l'Organisation météorologique mondiale (OMM) et le Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE), affirme dans son dernier rapport de synthèse que « le réchauffement du système climatique est sans équivoque » (GIEC, 2007a). Selon le GIEC, le changement climatique s'entend d'une Variation de l'état du climat que l'on peut déceler (par exemple au moyen de tests statistiques) par des modifications de la moyenne et/ou de la variabilité de ses propriétés et qui persiste pendant une longue période, généralement pendant des décennies ou plus.

Cette définition diffère de celle figurant dans la Convention-cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC), selon laquelle les changements Climatiques sont attribués directement ou indirectement à une activité humaine altérant la composition de l'atmosphère mondiale et qui viennent s'ajouter à la variabilité naturelle du climat observée au cours de périodes comparables.

La variabilité climatique désigne des variations de l'état moyen et d'autres statistiques (écarts standards, phénomènes extrêmes, etc.) du climat à toutes les échelles temporelles et spatiales au-delà des phénomènes climatiques individuels. La variabilité peut être due à des processus internes naturels au sein du système climatique (variabilité interne), ou à des variations des forçages externes anthropiques ou naturels (variabilité externe) (ONERC, 2007).

Selon le CCNUCC, un des facteurs naturels et anthropiques de l'évolution du climat, est notamment l'émissions et la concentration de gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère.

Les émissions mondiales de GES imputables aux activités humaines ont augmenté depuis l'époque préindustrielle ; la hausse a été de 70 % entre 1970 et 2004 (Fig. I.1). Entre 1970 et 2004, les rejets annuels de dioxyde de carbone (CO₂), le principal gaz à effet de serre anthropique, sont passés de 21 à 38 gigatonnes (Gt), soit une progression d'environ 80 %, et représentaient 77 % des émissions totales de GES anthropiques en 2004 (Fig. I.1).

Le taux d'augmentation des émissions d'équivalent-CO₂ (équiv.-CO₂) a été bien plus élevé entre 1995 et 2004 (0,92 Gt équiv.- 2/an) qu'entre 1970 et 1994 (0,43 Gt équiv.-CO₂/an).

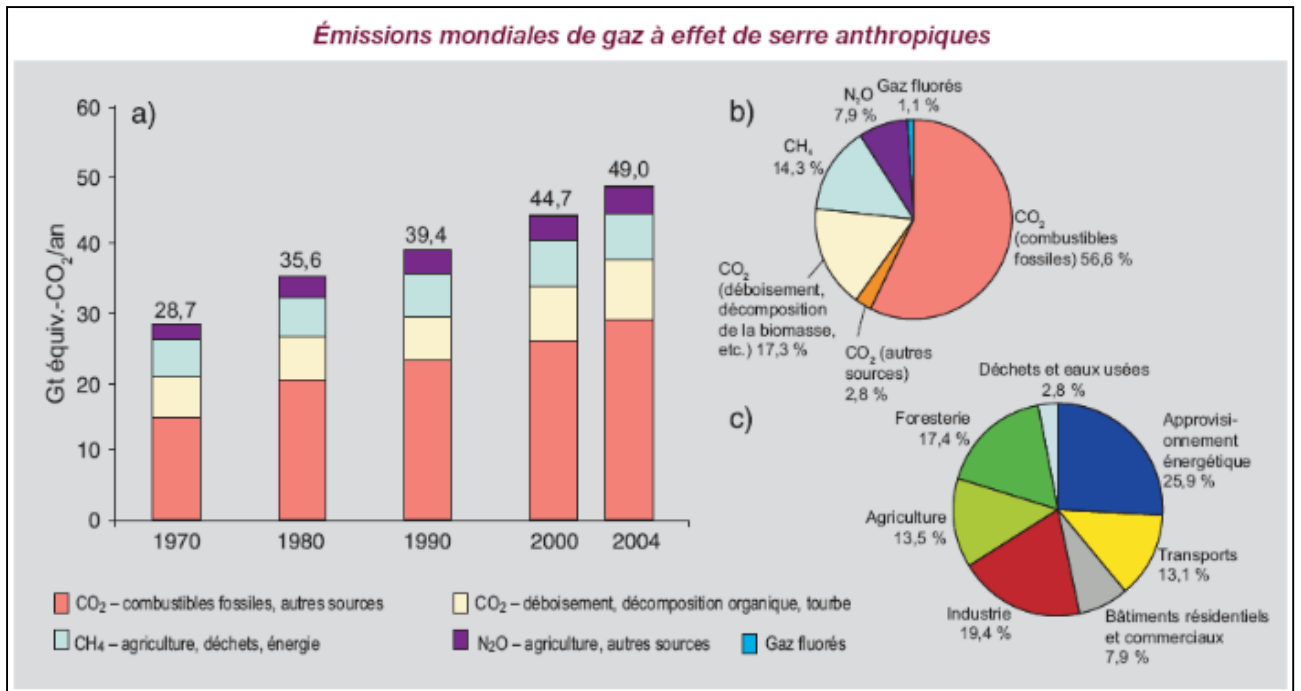


Fig. I.1 : a) Émissions annuelles de GES anthropiques dans le monde (1970-2004). b) Parts respectives des différents GES anthropiques dans les émissions totales de 2004 en équivalent-CO₂. c) Contribution des différents secteurs aux émissions totales de GES en 2004, en équivalent-CO₂.

Les gaz à effet de serre absorbent efficacement le rayonnement infrarouge thermique émis par la surface de la Terre et par l’atmosphère elle-même ce qui a pour effet de retenir la chaleur dans le système surface-troposphère: c’est ce qu’on appelle « l’effet de serre ».

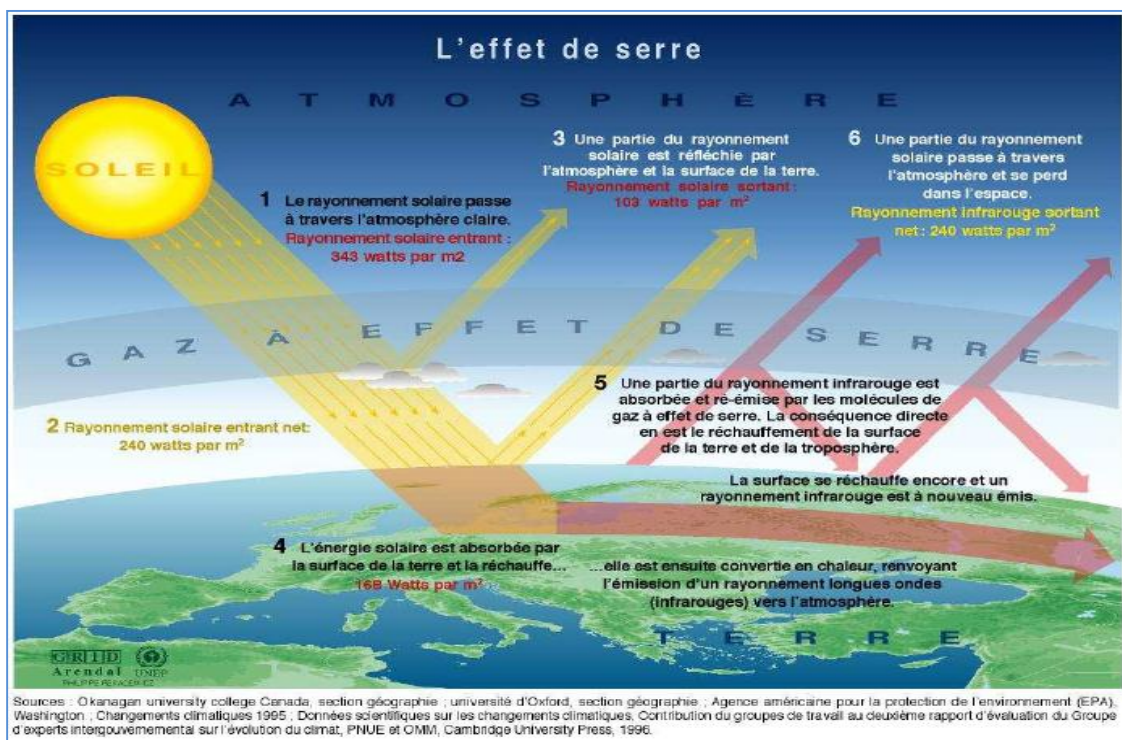


Fig. I.2 : Représentation de la rétention de chaleur causée par les GAS.

Les indicateurs importants de l'évolution climatique

* L'augmentation de la température de surface sur la Terre :

Elle est de $0,8 \pm 0,2$ °C depuis 1870. Elle reste notablement différente pour les deux hémisphères : plus forte au Nord et plus forte en hautes latitudes. Une variabilité entre continents est également observée (Puget, 2010).

* La température des océans

La mesure est faite depuis les années 50 par les bateaux de commerce ou les navires océanographiques et plus récemment par le système de bouées pour des profondeurs allant jusqu'à 700m, il est constaté une augmentation moyenne globale ainsi que le contenu d'énergie thermique de l'océan, surtout depuis le début des années 1980. Ce réchauffement n'est pas uniforme. Il présente une importante variabilité régionale avec d'importantes oscillations pluriannuelles, voire décennales (Martin Claussen, 2003).

*La réduction de la surface des glaces océaniques arctiques :

Un autre indicateur fort de l'accélération de l'évolution du climat est la fonte des banquises: de 8,5 millions de km² stable dans la période 1950-1975, la surface des glaces de mer a connu une décroissance très rapide jusqu'à 5,5 millions de km² en 2010 (Martin Claussen, 2003) .

*Le niveau moyen des océans :

Depuis 1992, les mesures du niveau moyen des océans sont effectuées par satellites : la hausse du niveau moyen global de la mer est de l'ordre de 3,4 mm/an. À cette élévation moyenne se superposent des oscillations pluriannuelles, liées à la variabilité naturelle du système climatique. Depuis le début des années 1990, les contributions climatiques à cette élévation sont approximativement dues, au réchauffement et donc à la fonte des calottes polaires du Groenland et de l'Antarctique d'une part, et fonte des glaciers continentaux d'autre part (CNRS).

L'étude concernant les changements climatiques est d'autant plus importante étant donné que le premier domaine à en subir les impacts est celui de l'eau. D'après Le Programme des Nations unies pour l'environnement (PENU) l'évolution climatique joue un rôle important dans la modification des précipitations. Par conséquent une altération du volet offre. La température semblerait plus influencer la demande.

Dans un contexte de paramètres climatiques incertain il apparaît nécessaire de connaître le profil climatique et de réviser les modes de gestion de l'eau, tant au niveau des quantités disponibles (offre) que des besoins (demande). Jusqu'à présent le changement climatique n'a pas été pris en compte dans le dimensionnement des infrastructures hydrauliques. Dans un contexte de modification des précipitations, il est indispensable de reconcevoir et d'améliorer ces infrastructures.

I.1- Le changement climatique dans le monde

Depuis 1990, la GIEC, tend à estimer les futures variations de température. Les projections évaluées font apparaître une hausse de la température moyenne à la surface du globe de 0,15 à 0,3 °C par décennie entre 1990 et 2005. Ces valeurs comparées à celles qui ont été observées, soit environ 0,2°C par décennie permettent de renforcer la confiance dans les projections à court terme.

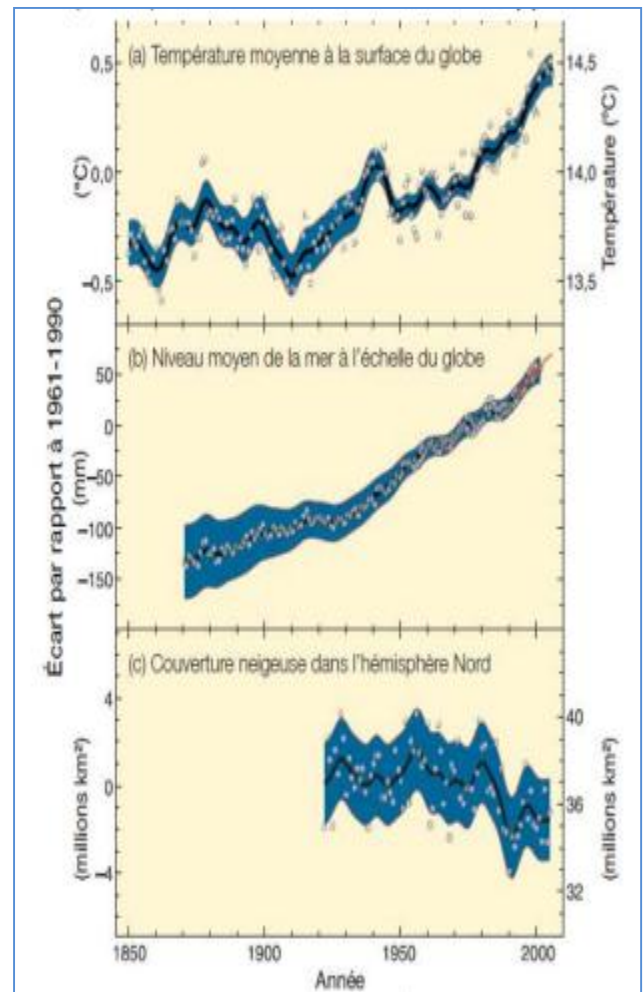
Ce changement déjà en cours, se manifeste à l'échelle de la planète à travers trois principaux indicateurs représentés sur la Fig. I.3 :

L'augmentation de la température moyenne ($0,8 \pm 0,2$ °C depuis 1870) et du niveau moyen de la mer ainsi que la baisse de la couverture neigeuse dans l'hémisphère Nord.

Les débats ont surtout ciblé les interrogations autour de la cause de ce réchauffement climatique. Il est aujourd'hui admis, comme l'a souligné l'académie des sciences (Puget, 2010), que ce phénomène puisse être imputé à l'augmentation de la teneur atmosphérique de gaz à effet de serre (GES) comme le dioxyde de carbone (CO_2), elle-même « incontestablement » due à l'activité humaine.

En effet, la concentration de CO_2 n'a cessé d'augmenter depuis le début de l'ère industrielle, passant d'une moyenne de 280 ppm (partie par million) avant 1750 à 388 ppm en 2009 (Puget, 2010)

Fig. I.3 : Variation de la température et du niveau de la mer à l'échelle du globe et de la couverture neigeuse dans l'hémisphère nord (GIEC, 2007a).



Ce qui au départ de l'apparition de cette problématique était connu en tant que « réchauffement climatique », est très vite devenu un problème plus compliqué d'où le terme de « changements climatiques ». En effet, si l'augmentation globale de la température planétaire a été le signal le plus évident d'un changement du climat, le phénomène est plus inquiétant qu'il n'y paraît (GIEC, 2007b) : « Le réchauffement est hétérogène dans l'espace (plus important sur les continents que sur les océans par exemple) et dans le temps (plus marqué l'été que l'hiver en Europe) ;

Il y a également une modification hétérogène du régime des pluies selon les régions du globe (augmentation en Europe du Nord mais baisse en Méditerranée) et au cours de l'année ;

Enfin les modifications du régime de température, de pluie et de vent induisent des changements régionaux de fréquence et d'amplitude d'évènements extrêmes.

Si certaines tendances sont confirmées (augmentation de la fréquence des vagues de chaleur et des fortes précipitations par exemple), d'autres restent très difficiles à analyser (tempêtes, cyclones...) ».

Ainsi il n'y a pas un mais des changements climatiques, s'exprimant différemment dans l'espace et dans le temps.

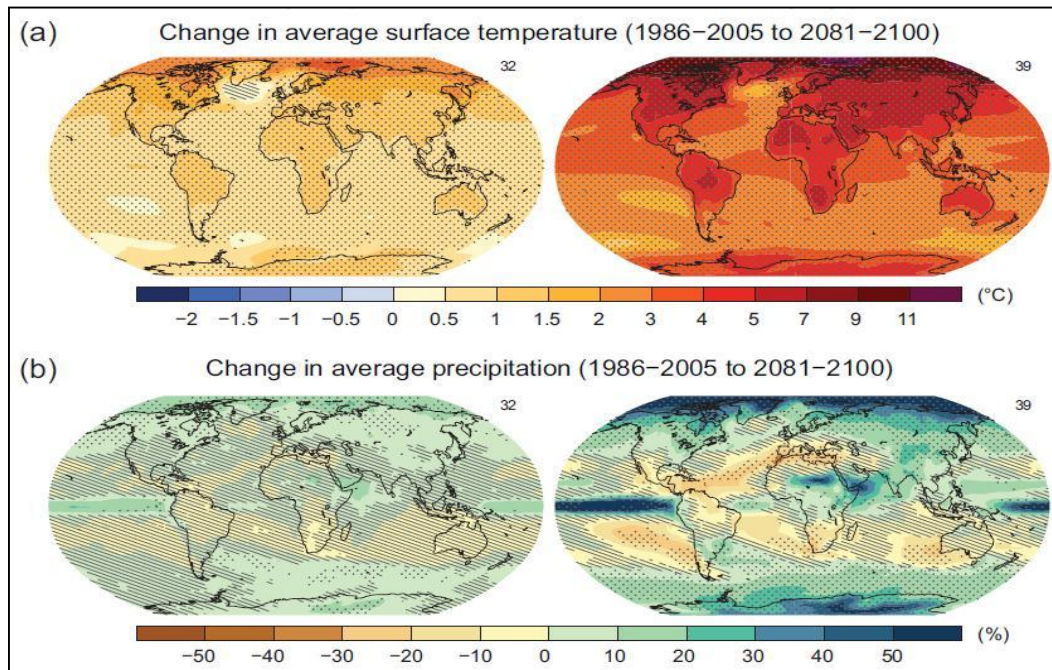


Fig. I.4 : Tendances mondiales de températures (a) et de précipitation (b) de 1986 à l'horizon 2100, pour les scénarios RCP2.6 et RCP8.5. Ces cartes correspondent à des moyennes multi modèles estimées à la surface et dans la troposphère (GIEC, 5ème Rapport) ;*les zones grise indiquent les secteurs dont les données sont incomplètes.

Les modèles utilisés par le GIEC donnent un aperçu de ce que pourrait être le climat, à l'échelle planétaire, d'ici à 2100. Ils établissent différents scénarios d'émission de GES selon l'évolution démographique, la croissance économique, le degré de mondialisation, les progrès technologiques...

On peut classer ces scénarios selon deux axes de développement (Fig. I.5) : tourné vers l'économie (A) ou l'environnement (B), mondialisé (1) ou régionalisé (2). Cela forme alors quatre « canevas » décrits dans le Special Report on Emissions Scenarios (SRES) (GIEC, 2000).

Quel que soit le scénario choisi, une accentuation des phénomènes déjà observés au cours du XXe siècle est à prévoir (GIEC, 2007a) : accélération du réchauffement avec des variations jamais observées au cours du dernier millénaire et augmentation des précipitations aux latitudes élevées.

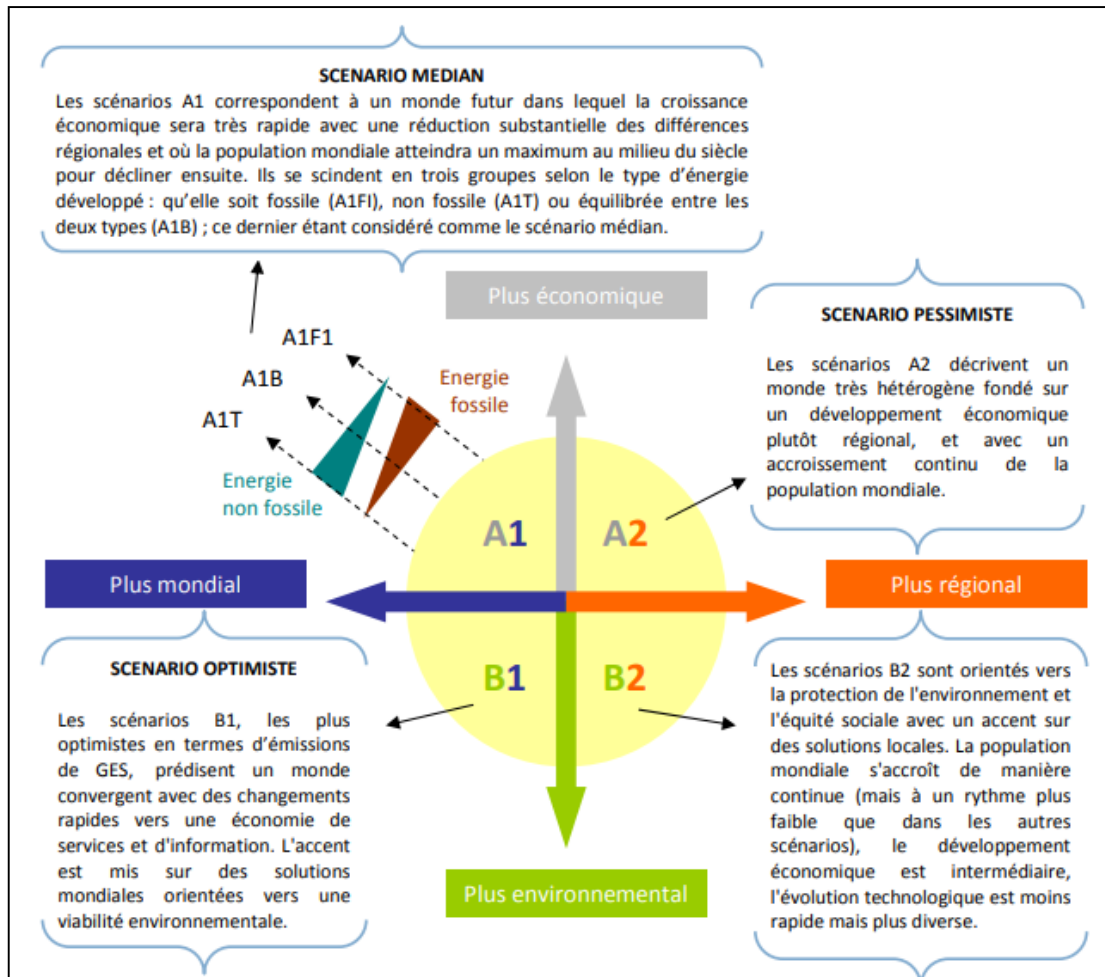


Fig. I.5 : Principaux scénarios du GIEC (SRES, GIEC, 2000).

Le cycle hydrologique se trouve affecté dans tous ses aspects par le changement climatique : modification des régimes de précipitations, du ruissellement, augmentation du niveau de la mer, processus de désertification, etc.

De manière générale, les disparités de répartition des ressources en eau vont s'amplifier : les épisodes de sécheresse devraient être plus fréquents dans les régions déjà arides, tandis que la disponibilité en eau devrait augmenter dans les latitudes Nord de la planète. Ces changements dans le cycle de l'eau ne sont pas sans conséquences pour les sociétés et les écosystèmes. Les ressources en eau seront menacées et affectées dans de nombreuses régions, avec des impacts sur tous les domaines du développement (accès à l'eau, sécurité alimentaire, santé, etc.), tandis que les risques de catastrophes liées à l'eau augmenteront. Ceux qui ressentent le plus les impacts de ces changements seront d'abord les plus vulnérables (Coalition-Eau, 2014).

I.2- Le changement climatique en Algérie

L'Algérie, comme bien des pays d'Afrique, n'est pas épargnée par les conséquences d'un temps extrême. Connue pour son climat aride et semi-aride, la région est extrêmement sujette aux changements climatiques. Ces 50 dernières années, un accroissement d'événements dus à des phénomènes extrêmes a été observé.

Parmi les phénomènes enregistrés dans des études climatologiques de la Météorologie nationale qui témoignent de ce changement, on compte un accroissement de la fréquence des pluies torrentielles, surtout sur les hauts plateaux, qui ont entraîné des inondations pour la première fois.

Les experts de l'Institut hydrométéorologique de Formation et de Recherche prévoient un raccourcissement de la saison des pluies et une hausse des températures d'environ 1° à 1,5° en 2020 (Nichane M., 2002). D'après des études réalisées par l'ONM sur l'évolution des températures, elles ont révélé que celles-ci sont en hausse depuis 1990, date correspondant à l'augmentation des émissions à effet de serre. Ces dernières sont estimées à 75 870 Gg de (CO₂), de 914 Gg de (CH₄) et à 31 Gg de (N₂O). La séquestration de CO₂ par les forêts est estimée à 4 331 Gg (Farah, 2014). Les principaux secteurs affectant ces valeurs sont :

- Le secteur l'énergie responsable (66,92%) des émissions. Pourcentage provoqué essentiellement par le potentiel du pays en hydrocarbure.
- Le changement d'affectation des terres et la foresterie est le second secteur important du point de vue des émissions (12,44%)
- L'agriculture est le troisième secteur émetteur de gaz à effet de serre avec plus de 11,49% du total.
- Le secteur des déchets intervient pour 4,59% et celui des procédés industriels pour 4,52%. Le gaz carbonique (CO₂) est le gaz le plus émis avec 72,40%, suivi du méthane (CH₄) avec 18,31% et de l'oxyde nitreux (N₂O) avec 9,29%

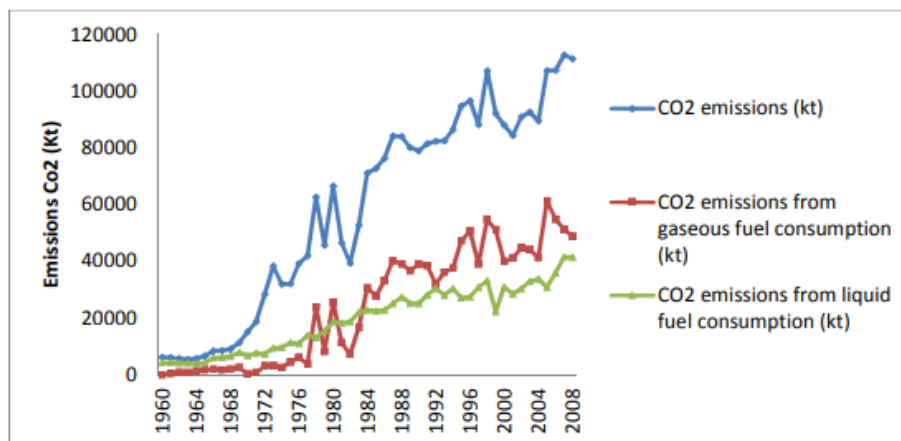


Fig. I.6 : Emissions de CO₂ en Algérie (<http://www.data.un.org>).

L'étude sur la pluviométrie en Algérie, montre une régression de 12% pour la période 1990-2005. Les scientifiques ont estimé que les chutes de pluie vont diminuer d'environ 10 % à 20% dans les années à venir (MATE., 2003). Ils estiment également un réchauffement probable de la région de l'ordre de 2° à 4° durant le 21ème siècle à cause du réchauffement mondial (Nichane M., 2002).

Les projections à l'horizon 2020 et 2050 indiquent que les saisons seront dérégulées et les températures continueront de croître. Les périodes pluvieuses seront concentrées sur de

courtes durées entraînant des risques d'inondations. De même, il y aura un accroissement fréquentielles des sécheresses. L'élévation du niveau de la mer sera comprise entre 5 cm et 10 cm. La quantité des eaux mobilisables au niveau des barrages et des nappes souterraines diminuera en raison de L'intensification de l'évaporation due à l'augmentation de la température ainsi que la régression des précipitations (Elmeddahi, 2016).

L'évolution climatique en l'Algérie a été analysée sur la base des MCG UKHI et ECHAM3TR et le scénario IS92a du GIEC d'émission de GES. Selon l' « International Center for Tropical Agriculture » (CIAT, 2010), l'Afrique du Nord subira les impacts les plus négatifs liés au changement climatique, ainsi selon la même source 80 % des cultures montreront des pertes de productivités en 2050.

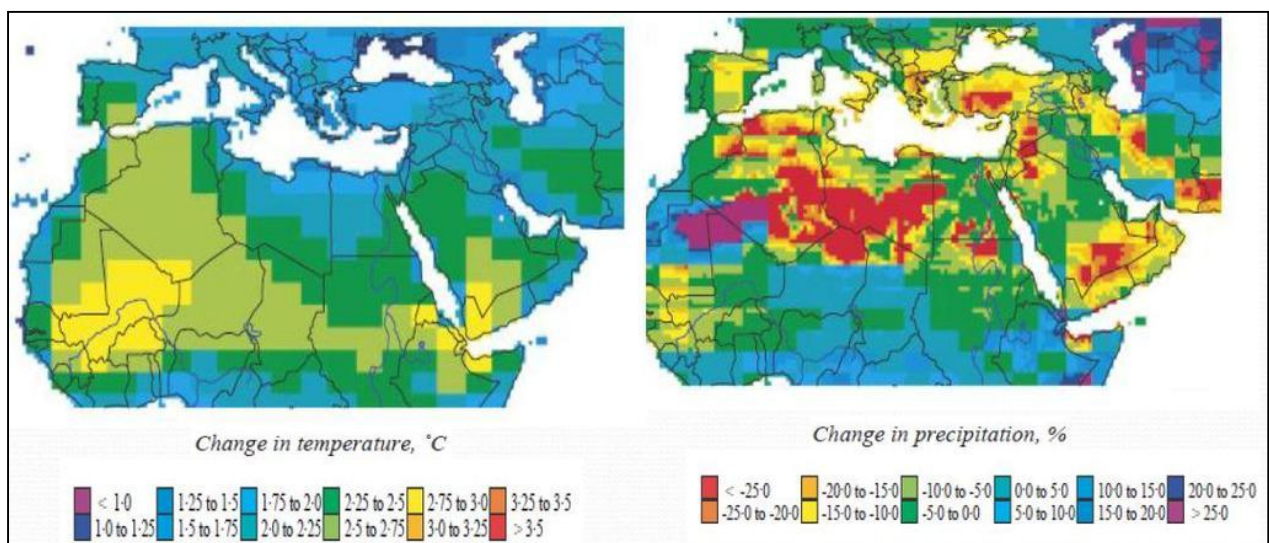


Fig. I.7 : Changement de température et précipitation projetés pour le Maghreb par le modèle HadCM2 à 2050) (R. Ragab, 2002).

L'Algérie est donc soumise à des conditions physiques et hydro climatiques défavorables, accentuées par des périodes de sécheresses chroniques. Il en résultera des impacts significatifs, liés entre autres à l'augmentation des températures et des précipitations, à la raréfaction des ressources en eau et à la hausse de la fréquence des tempêtes. D'autres impacts sont étudiés : la perte de biodiversité et la dégradation d'écosystèmes, la hausse du risque de famines, les mouvements de populations, ainsi que les incidences sur la santé, (Bolin, 1980).

"L'Algérie se trouve dans une région très vulnérable aux effets des changements climatiques. Ces risques émergents sont devenus aujourd'hui une réalité vécue", a averti M. Grimes lors de la 2e conférence internationale sur l'énergie et l'environnement. Les ressources hydriques sont vulnérables aux variations du climat. Selon le rapport du GIEC (2008), 75 à 250 millions de personnes sont confrontés au stress hydrique sous l'effet des changements climatiques. Indépendamment du changement climatique la gestion des ressources en eau est d'ores et déjà un problème en soit.

I.4- Le changement climatique et l'évaluation environnementale

L'évaluation environnementale s'est développée au fil des années comme un outil privilégié d'aide à la décision lorsqu'il s'agit d'autoriser ou non des projets, en fonction de leurs impacts environnementaux et des normes en vigueur.

Les changements climatiques constituent depuis plusieurs années une menace croissante aux progrès accomplis vers l'amélioration du niveau de vie de la population et la lutte contre l'insécurité alimentaire en Afrique (Organisation des Nations-Unies pour l'alimentation et l'agriculture [ONUAA], 2011). Ils doivent être considérés dans la planification comme dans les processus d'évaluation environnementale, pour les raisons énumérées ci-dessous, tirées du document intitulé "Screening tools and guidelines to support the main streaming of climate change adaptation into development assistance", publié en 2011 par les Nations-Unies dans le cadre du Programme des Nations-Unies pour le Développement (PNUD) :

- l'existence de preuves scientifiques sur la variabilité et les changements climatiques;
- les impacts observés et projetés des aléas climatiques sur les systèmes naturels et socioéconomiques (PNUE, CCNUCC, 2002);
- les innombrables études menées concernant l'amplitude des impacts sur les programmes d'aide au développement et le risque que les Objectifs de développement du millénaire ne soient pas atteints;
- le risque d'intensification de l'exposition et de la vulnérabilité des systèmes naturels et humains aux aléas climatiques liées aux programmes d'aide au développement.

I.4.1- Évaluation environnementale stratégique (ÉES):

L'évaluation environnementale appliquée aux plans, programmes ou politiques plutôt qu'aux projets porte le qualificatif de "stratégique" et devient alors un outil de planification plutôt que de gestion. En effet, par comparaison aux projets, les initiatives de soutien aux programmes sont plus influencées par des facteurs d'ordre politique que par des paramètres techniques. Une Évaluation Environnementale Stratégique (ÉES) prend en considération les enjeux environnementaux et socioéconomiques des processus décisionnels et se situe en amont des procédures de type "études d'impacts sur l'environnement" qui évaluent les conséquences des projets spécifiques Organisation de Coopération et de Développement Économiques (OCDE, 2006). Les ÉES sont définies comme "des approches analytiques et participatives de la prise de décision stratégique qui visent à intégrer les considérations d'environnement dans les politiques, les plans et les programmes et à évaluer leurs interactions avec les considérations d'ordre économique et social" (OCDE, 2006).

Les changements climatiques doivent expressément être pris en compte dans toutes les phases de l'ÉES. Les autres enjeux globaux régulièrement considérés sont la conservation de la diversité biologique et enfin, la conservation des sols et la lutte contre la désertification.

D'autres outils d'aide à la décision ont été développés, indépendamment des ÉES. ORCHID ET CRiSTAL :

ORCHID (“Opportunities and Risk for Climate Change and Disaster”) a été développé par la coopération britannique “Department for International Development” (DFID) et “Institute of Development Studies” (IDS)

Tandis que CRiSTAL (“Community-based Risk Screening Tool – Adaptation & Livelihoods”) a été mis en œuvre par un institut paragouvernemental international indépendant, logé au Canada, “International Institute for Sustainable Development” (IISD) Bien que présentant quelques similarités, les deux approches, ORCHID et CRiSTAL ne sont pas identiques dans le détail et l'application.

I.5- L'importance de l'évaluation climatique

Le changement climatique influence sur le bilan hydrique d'un bassin versant, et donc sur le ruissellement dans les cours d'eau et le remplissage des réservoirs. Une variation au niveau des précipitations pendant une saison influence sur le volume d'eau récolté. Une augmentation de température provoque une fonte des neiges vraisemblablement considérables mais aussi une évaporation conséquente des eaux en surface.

Ces variabilités spatio-temporelles du climat créent le concept d'incertitude. L'incertitude provenant des différentes sources d'erreurs de la chaîne de modélisation ont des impacts sur les projections hydrologiques.

Il est démontré que l'hydrologie statistique, la branche de l'hydrologie qui s'occupe de l'incertitude, n'est pas, dans son état actuel, consistante avec le caractère variable du climat. La variabilité climatique, qu'elle soit d'origine anthropique ou naturelle, augmente l'incertitude liée aux processus hydrologiques (El-Moctar, 2009). Ce qui accroît l'erreur dans le dimensionnement des infrastructures hydrauliques.

En général le dimensionnement et la construction se font selon l'hypothèse d'un climat stationnaire. Or, une modification de la fréquence et de l'intensité des moyennes et extrêmes hydro-climatiques dû aux changements climatiques pourrait altérer certains facteurs nécessaires pour la détermination du volume d'apport.

Tout édifice hydraulique en projet doit se baser sur des études et une évaluation climatique antérieure. L'évaluation comprend des scénarios de changement climatique qui indiquent la modification des paramètres climatiques ainsi que des sorties d'un modèle hydrologique qui pourrait comptabiliser les différentes quantités d'eaux disponibles, afin d'obtenir des apports et des besoins redéfinis. Une étude à long terme prenant en compte l'incertitude du changement climatique futur est indispensable pour évaluer les coûts et bénéfices impliqués.

I.6- Conclusion

Les interactions de l'homme (Industrie et propagation de GES) sur le cycle de l'eau se cumulent avec les effets du changement climatique. Le réchauffement planétaire impacte sur le cycle hydrologique, c'est une certitude admise par l'ensemble de la communauté internationale scientifique. Cependant les conséquences, leur ampleur et leur durée sont difficiles à mesurer avec précision.

L'augmentation de la sécheresse dans de nombreuses régions du globe, en durée et sur des territoires de plus en plus vastes, est une conséquence majeure du réchauffement climatique observé sur le cycle de l'eau.

L'impact de la sécheresse sur les zones désertiques aura des conséquences sur les zones limitrophes. Le Programme des Nations Unies pour le Développement (PNUE) prévoit des diminutions des précipitations de 5% à 25 % dans la majorité des zones désertiques du globe. La raréfaction des précipitations prévue est un facteur aggravant sur le développement de ces régions ainsi que des pertes coûteuses par rapport à la construction d'infrastructure hydrique.

Chapitre II :
Les modélisations
hydrologiques.

Chapitre II : Les modélisations hydrologiques.

II.1- Introduction

Comprendre les processus dominants dans la genèse des débits des rivières est encore aujourd'hui une question clé de l'hydrologie. En effet, le fonctionnement hydrologique des bassins versants et des versants reste encore mal connu (Weill, 2007).

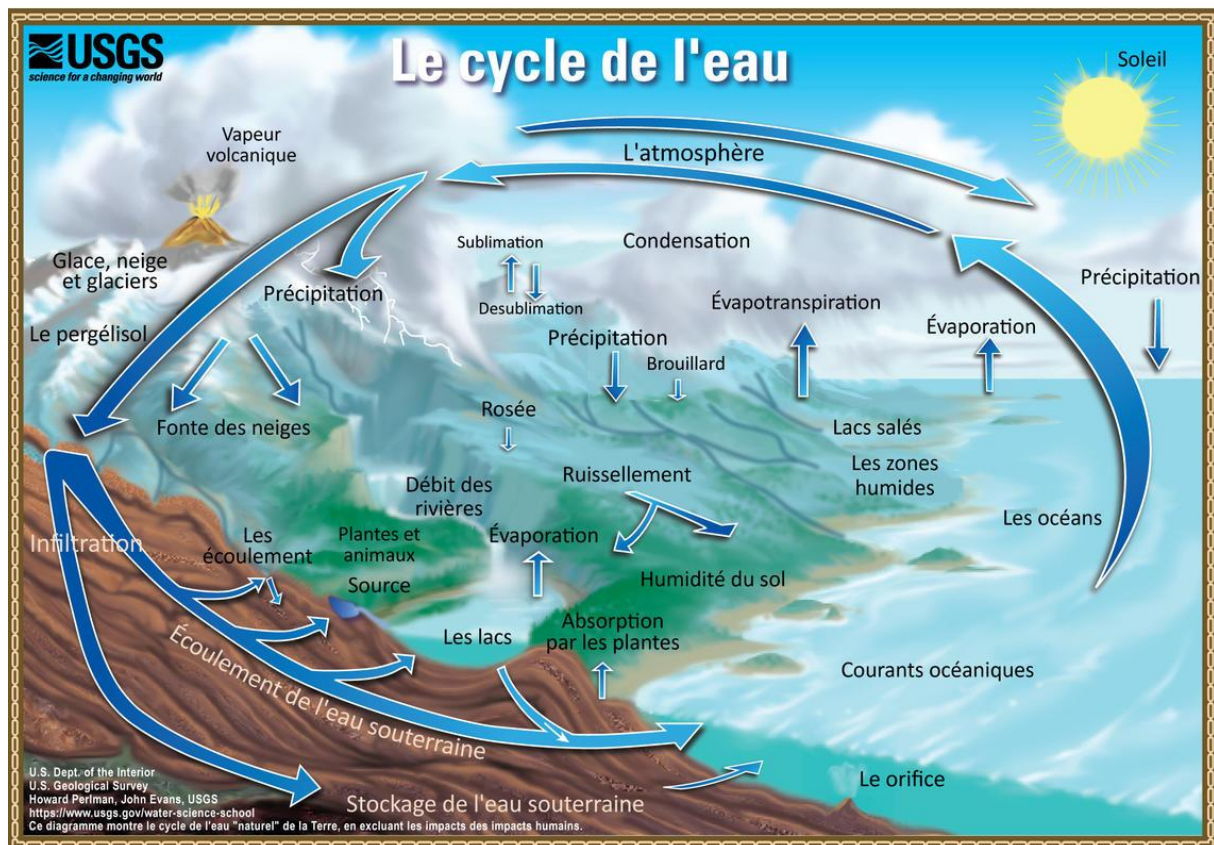


Fig. II.1 : Représentation du cycle de l'eau dans un réseau hydrographique (USGS).

Dans un bassin versant, la lame d'un cours d'eau est soumise à des pertes par transmission et au processus d'évaporation (Weill, 2007). Les pertes par transmission représentent les percolations (infiltrations) plus ou moins importantes dans le lit du cours d'eau et dans les berges d'un volume d'eau. Ce phénomène contribue à alimenter des aquifères ou des zones non saturées adjacentes. D'après Weill, l'évaporation le long du réseau hydrographique dépend de la demande évaporatoire, de la longueur et de la largeur du cours d'eau (Weill, 2007).

D'autres phénomènes peuvent être ajoutés à ces écoulements et modifier ainsi les conditions de production du ruissellement. Globalement, on peut dire que la genèse des crues résulte d'une combinaison des processus beaucoup plus complexes qui restent mal connus malgré tous les efforts effectués (Ziadi, 2010)

La théorie d'Horton de 1933 stipule que l'écoulement apparaît lorsque l'intensité de la pluie dépasse la capacité maximale du sol à absorber l'eau. Cette capacité, caractérisée par la non-filtrabilité du sol, est supposée décroître dans le temps jusqu'à une valeur constante.

L'écoulement de surface se produit donc lorsque la capacité d'infiltration devient inférieure à l'intensité des précipitations. Toute l'eau qui ne peut pas être infiltrée dans le sol participe au ruissellement. Ce qui explique la réponse rapide des bassins versants aux événements pluvieux (Estupina-Borrell, 2004).

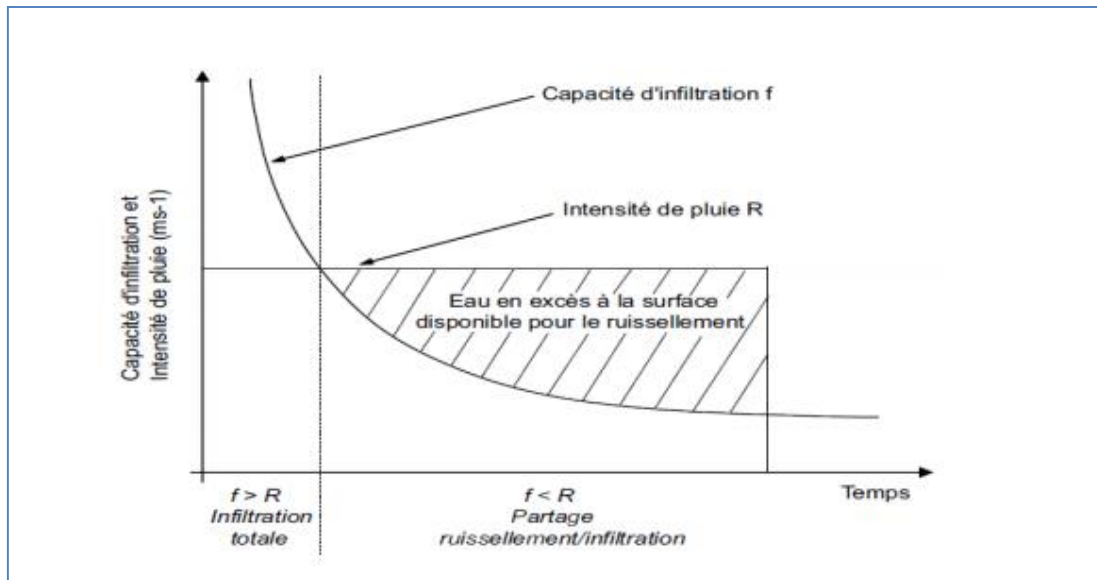


Fig. II.2 : Représentation schématique du ruissellement hortonien (Weill, 2007).

II.2- La modélisation hydrologique

La modélisation consiste à mettre un processus en équation. La modélisation hydrologique revient à traduire mathématiquement le cycle de l'eau : ses réservoirs et processus doivent être conceptualisés et simplifiés sous forme d'équations. Les objectifs de la modélisation hydrologique sont multiples : prévisions (crues, sécheresses, gestion de l'irrigation d'ouvrages hydroélectriques, recharge d'aquifères) ou simulations de scénario (changement climatique aménagement de bassins d'un point de vue qualité ou quantité d'eau) (A. Musy, 1999)

On distingue quatre types de variables qui peuvent compter en totalité ou en partie dans chaque modèle (Berrezoug, 2016) (Fig. II.3) :

- Variables d'entrée : le modèle fait appel à ces variables qui dépendent du temps et/ou de l'espace (Pluie, ETP, ...).
- Variables de sortie : le modèle répond par un ensemble de variables (débit, flux ou concentration en polluants).
- Variable d'état : elle permet de caractériser l'état du système modélisé et peuvent évoluer en fonction du temps (niveau de remplissage des réservoirs d'eau d'un bassin versant, taux de saturation des sols, ...).
- Paramètres de calage : en plus des variables, la modélisation fait intervenir des variables dont la valeur doit être déterminée par calage (conductivité hydraulique à saturation...) (Boudrahaa, 2007).

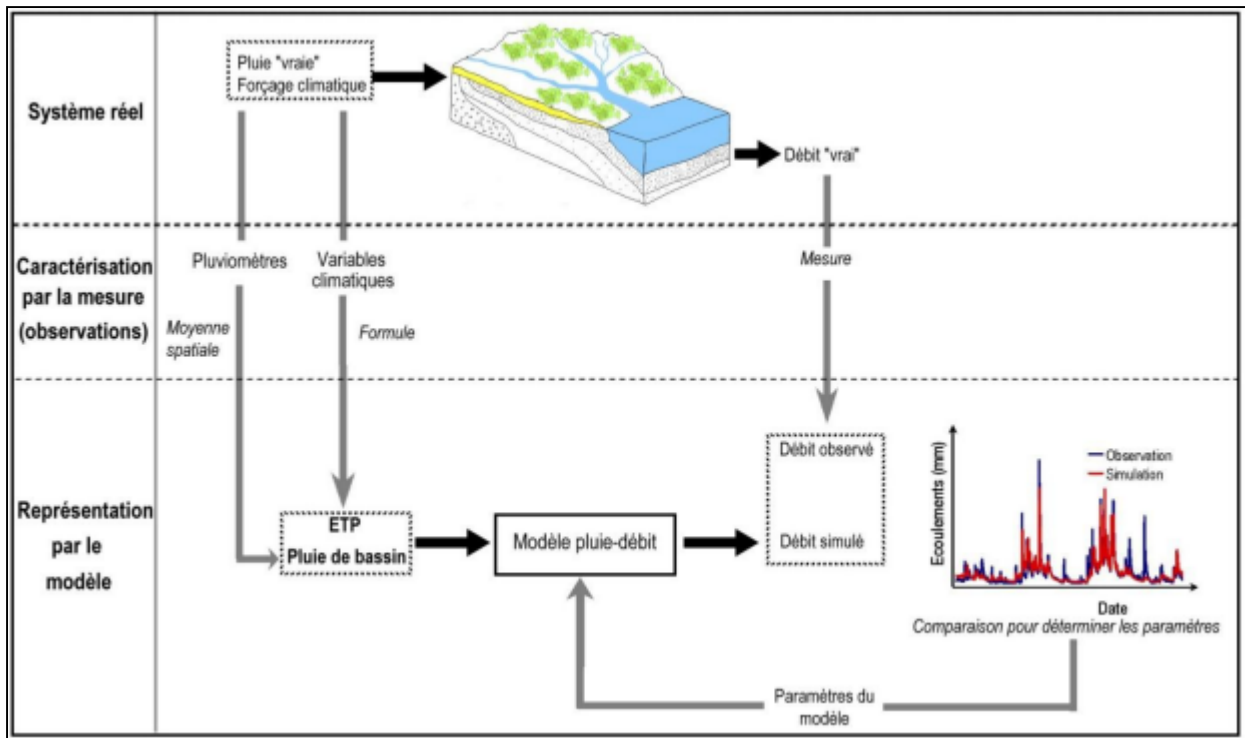


Fig. II.3 : Schématisation d'un modèle global (Koffi, 2007).

Deux fonction décrivent la modélisation hydrologique et font intervenir ces variables :

- La fonction de production dont le but est la répartition des précipitations entre l'infiltration, le ruissellement, l'évapotranspiration et le stockage dans le sol.
- La fonction de transfert (routage) qui permet de transférer la quantité d'eau déterminée par la fonction de production, vers le cours d'eau. Elle permet la transformation de la pluie nette et de lui donner une forme à la crue en simulant un Hydrogramme de crue à l'exutoire du bassin versant.

II.3- Choix d'un modèle

Le choix d'un modèle hydrologique se fait en fonction des éléments suivants (Berrezoug, 2016).

- Objectif de l'étude hydrologique : Les objectifs de l'étude hydrologique sont multiples selon lesquels, on peut négliger ou simplifier certains paramètres dans la modélisation ;
- Disponibilité des données : En dépit des insuffisances de certains modèles par rapport à d'autres, le manque de données peut nous contraindre à les utiliser ;
- Nature du modèle : les données nécessaires à la création du modèle et sa fiabilité influencent le choix en particulier dans le cas où le temps et le coût présentent une contrainte.

II.4- Type de modèle

II.4.1- Modèles pluie-débit

La modélisation pluie-débit peut réussir à répondre à de nombreuses questions centrées sur l'eau, la gestion des risques et la ressource notamment. Les modèles pluie-débit décrivent les différentes étapes et voies que suivra l'eau atmosphérique entre le moment où elle atteint le sol et celui où elle rejoint la rivière. Un grand nombre de modèles pluie-débit existe, dont le rôle est de simuler un débit à l'exutoire d'un bassin versant, parmi les données d'entrées on utilise la précipitation et l'évapotranspiration potentielle (ETP).

Ces modèles diffèrent les uns des autres par leurs segmentations spatiales, le pas de temps de calcul, les variables d'entrée et les paramètres de calage (Fig. II.4).

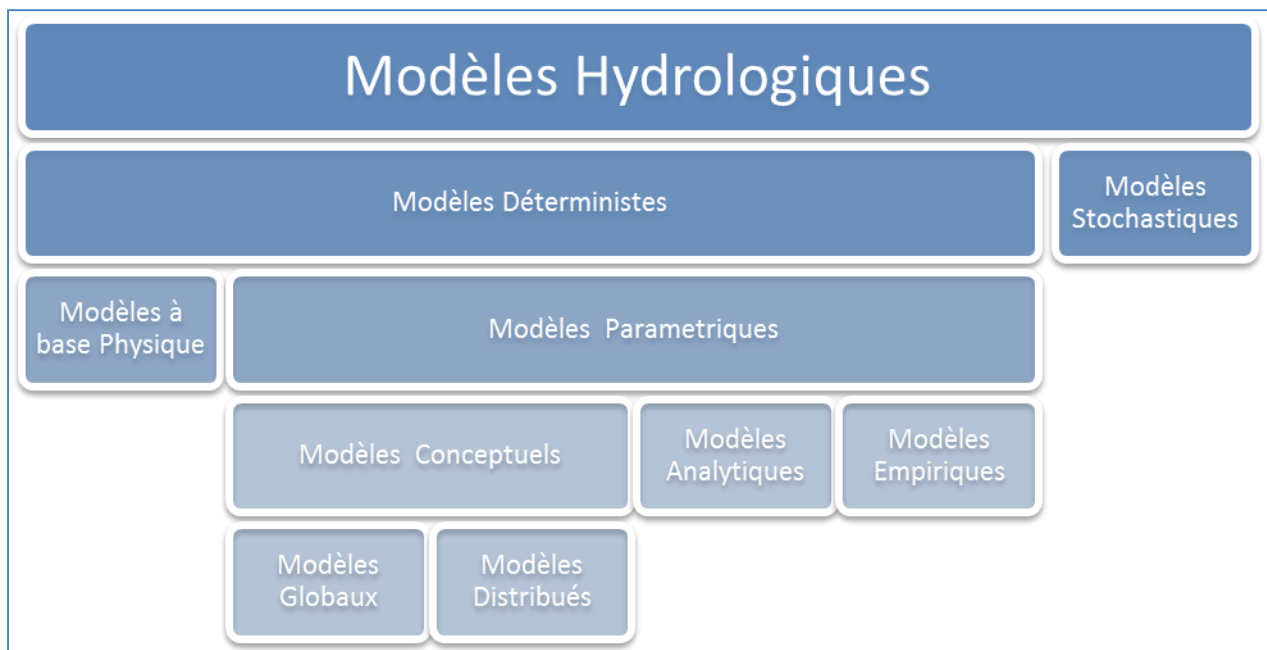


Fig. II.4 : Différentes formes de modélisation.

II.4.1.1- Modèles déterministes : S'appuient, sur la description du bassin versant et prend en compte une ou plusieurs de ses caractéristiques physiques (pente, superficie, type de sol, occupation du sol, ...). La relation entre variables ne considère pas le caractère aléatoire de ces dernières, la même entrée produit toujours la même sortie.

II.4.1.2- Modèles probabilistes : Servent à établir des critères de conception d'ouvrages ou à vérifier les performances d'ouvrages existants. Par exemple, le calcul de la crue et de la cote de projet permet le dimensionnement des évacuateurs de crue des barrages. Le dessein du modèle probabiliste est de fournir des grandeurs statistiques de variables hydrologiques : débits maximum de pointe, crue d'une occurrence donnée, précipitations minimales d'une durée donnée et d'une période de retour donnée.

II.4.1.2.1. Modèle statistique et stochastique : Le terme stochastique est lié à la statistique et traduit le caractère aléatoire du modèle. Il permet de générer, aléatoirement, des données par des lois de distributions particulières.

II.4.1.3- Modèles physique : Dont les équations ont été déduites à partir des principes de base de la physique (conservation de masse, quantité de mouvement, quantité d'énergie, ...), et dont la forme finale simplifiée contient des paramètres qui ont un sens physique. Ils représentent le système à une échelle réduite.

II.4.1.4- Modèles mathématiques : décrivent le processus hydrologique à l'aide des équations mathématiques qui relient les variables d'entrée et de sortie.

II.4.1.4.1. Modèles «boîtes noires» : ces modèles ne cherchent pas à identifier ou à comprendre les mécanismes. Ils ne font qu'ajuster des fonctions de transfert entre variables d'entrée et variable de sortie.

Par exemple, pour pouvoir prédire à partir d'une succession d'épisodes de précipitations et de fonte nivale l'Hydrogramme en sortie d'un bassin, il est supposé que la variabilité des autres entrées naturelles, comme l'évapotranspiration, est faible ou négligeable ou encore s'exprime comme une fonction connue du temps (Guide, 2009).

II.4.1.4.2. Réseaux de neurones artificiels : Les réseaux de neurones artificiels composent une catégorie particulière de modèles mathématiques qui sont de plus en plus employés pour résoudre divers problèmes hydrologiques. Cet outil de modélisation représente un ensemble d'unités de traitement du signal interconnectées, que l'on appelle neurones artificiels. Les réseaux de neurones artificiels peuvent reproduire des relations entrée-sortie complexes. Ils acquièrent un savoir par apprentissage et stockent les connaissances acquises au sein des poids de connexions inter neuronales, ou poids synaptiques. Les connexions d'un regroupement de neurones individuels connectés entre eux déterminent si un élément est en mesure d'influer sur un autre élément (Fig. II.5). Certains neurones des couches d'entrée et de sortie sont en contact avec l'extérieur. Une fonction d'entrée-sortie, ou fonction de transfert, devra être spécifiée pour les unités du réseau (Guide, 2009).

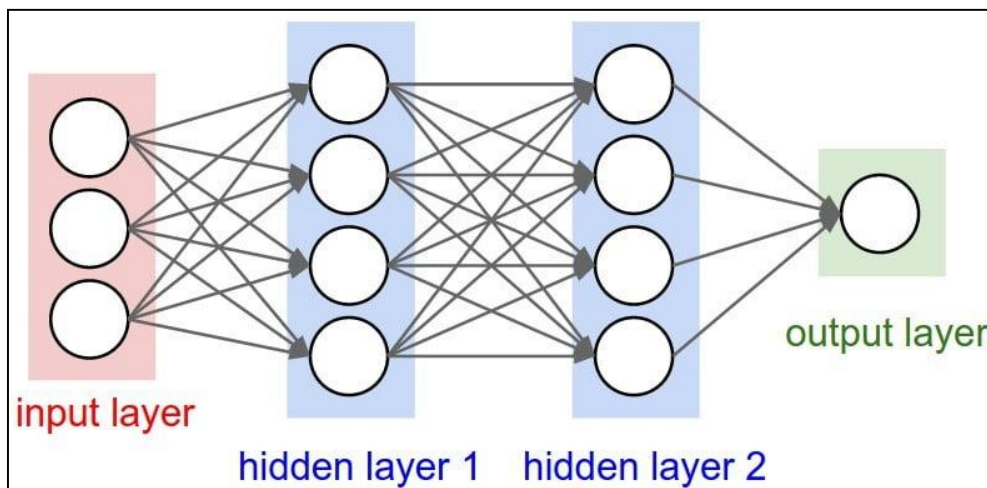


Fig. II.5 : Structure d'un réseau de neurones artificiels.

II.4.1.5- Modèles globaux : Ce modèle décrit une approche par bilan, il s'applique globalement sur l'ensemble d'un bassin versant qui est considéré comme entité homogène. On utilise dans ce type de modèles des valeurs représentatives moyennes. Un exemple de ce type

de modèle est le modèle à réservoirs génie rural (GR) par (Cemagref). Il fonctionne pour différents pas de temps annuel GR1A, mensuel GR2M et journalier GR4J.

II.4.1.6- Modèles spatialisés (distribués) : Ils tiennent compte de la variabilité spatiale de processus et de variables d'entrée. Dans le cas où les composants du système ne sont pas complètement spatialisés, on parle de modèles semi spatialisés. Les modèles conceptuels représentent un grand progrès sur les modèles globaux quand il s'agit d'analyser le fonctionnement interne d'un bassin. Le bassin versant est discrétisé en unités spatiales (mailles ou sous bassins) considérées comme homogènes, qui se vident les unes dans les autres de l'amont en aval. Ainsi, Il est possible de tenir compte de la répartition spatiale des facteurs et de suivre la genèse et la propagation des débits à l'intérieur du bassin. C'est le cas du modèle CEQUEAU et du modèle HEC-HMS (F. Laouacheria).

II.4.1.7- Modèles conceptuels : D'après (Ambroise, 1991), dans le modèle conceptuel le bassin versant symbolise un assemblage de réservoirs d'humidité, interconnectés et représentant plusieurs niveaux de stockage, suivant une dimension verticale. Ce modèle est basé sur la connaissance des phénomènes physiques qui agissent sur les entrées pour obtenir les sorties.

II.4.1.7.1. Modèle de Sacramento : Ce modèle a été mis au point par l'équipe du Centre des prévisions fluviales du Service météorologique national des États-Unis d'Amérique à Sacramento, Californie. Il met en jeu un algorithme complexe de calcul de l'humidité pour établir les volumes de plusieurs composantes de l'écoulement, alors qu'une méthode plutôt simple et largement empirique est utilisée pour convertir ces entrées en hydrogramme à l'exutoire du bassin versant. Le sol est traité en deux parties, une zone supérieure et une zone inférieure, chacune ayant une capacité de stockage de l'eau capillaire, fortement liée aux particules du sol et ne pouvant pas être extraite que par évapotranspiration, et de l'eau libre. Une partie de toute précipitation rejoint immédiatement le réseau hydrographique en tant que ruissellement direct.

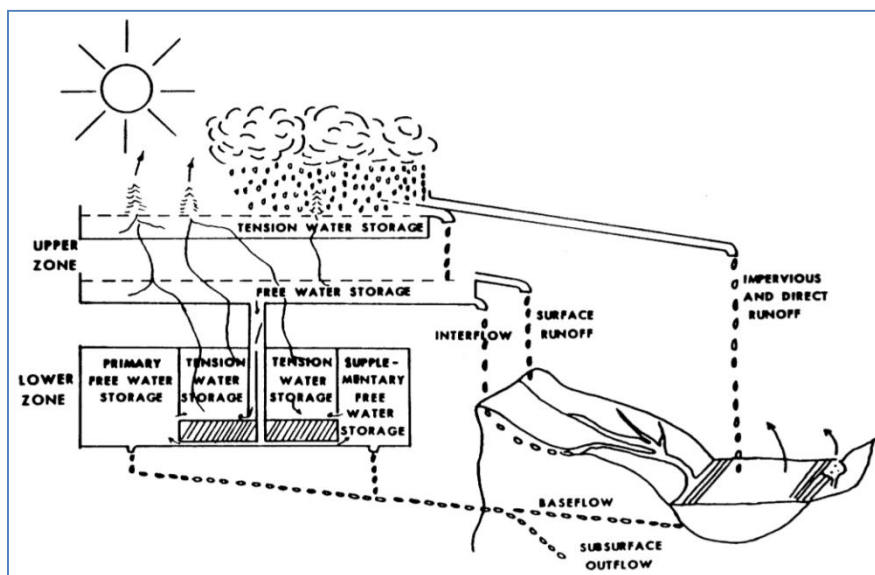


Figure II.6 : Structure du modèle Sacramento.

II.4.1.7.2. Modèle à réservoirs : Ce modèle a été mis au point à l'Institut national de recherche sur les sciences de la Terre et la prévention des catastrophes de Tokyo au Japon. Comme son nom l'indique, les couches du sol sont représentées par un ensemble de réservoirs empilés les uns sur les autres. On suppose que toute l'eau de pluie et de fonte nivale entre dans le réservoir supérieur; chaque réservoir possède un orifice dans sa partie inférieure et un ou deux sur le côté à une certaine distance au-dessus du fond. L'eau qui quitte un réservoir quelconque par son orifice du fond passe dans le réservoir inférieur suivant, sauf dans le cas du réservoir le plus bas dont toutes les sorties par le bas sont perdues pour le système. L'eau qui quitte un réservoir quelconque par un orifice latéral (écoulement latéral) se retrouve comme entrée dans le réseau hydrographique. Le nombre de réservoirs et la taille et la position des orifices de sortie sont les paramètres du modèle. Ce modèle représente bien le processus pluie-débit dans les régions humides, mais pour les zones arides et semi-arides, des dispositions plus complexes sont nécessaires (Guide, 2009).

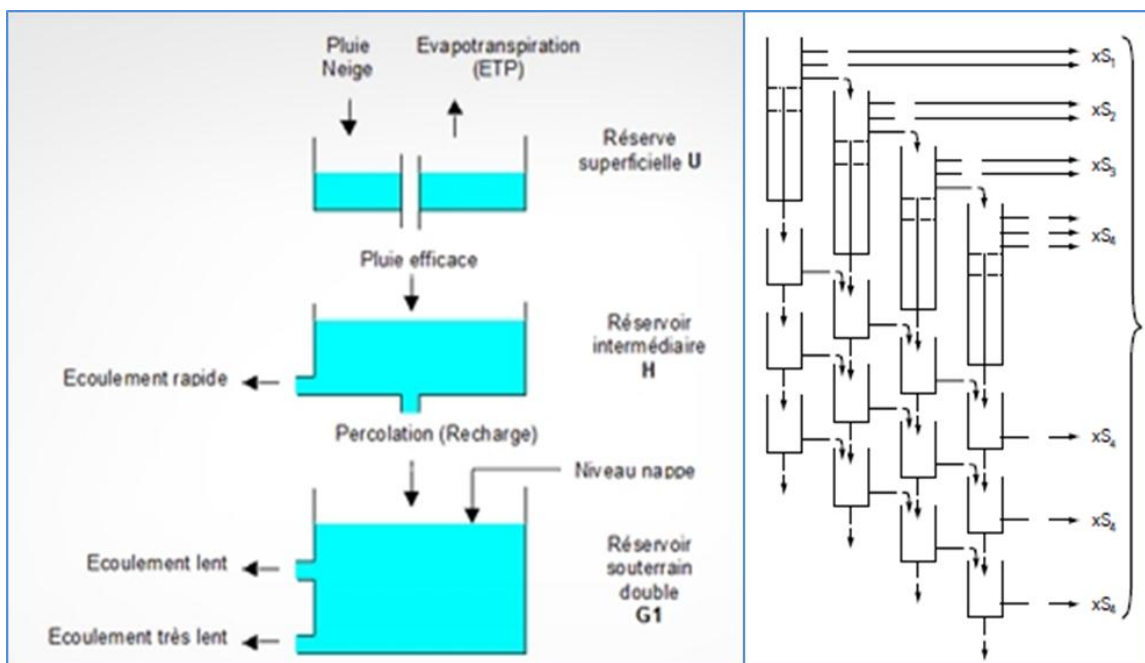


Fig. II.7 : Schéma du modèle à réservoir (GARDÉNIA, BRGM).

II.4.1.7.3. Modèle HBV : Le modèle HBV a été élaboré par Bergström (1992, 1995) à l'Institut suédois de météorologie et d'hydrologie. Ce modèle conceptuel de bassin versant convertit les données sur les précipitations, la température de l'air et l'évapotranspiration potentielle en valeurs de la fonte et en valeurs de l'écoulement fluvial et/ou du débit entrant dans les réservoirs. Ayant été modifié à maintes reprises, il en existe des variantes dans un certain nombre de pays (Guide, 2009).

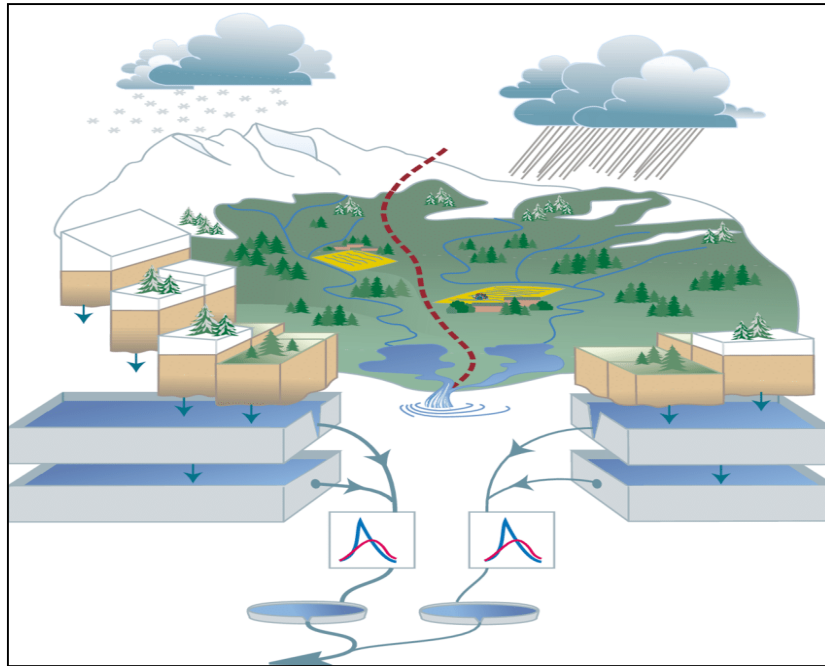


Fig. II.8 : Schématisation du modèle HBV (L. Phil Graham).

II.4.1.8- Modèles empiriques : Ils reproduisent le comportement global du système sans décrire les processus élémentaires. Ils sont généralement de type boîte noire, et traitent les entrées et sorties avec la relation débit = f (pluie) où f est déterminée par une régression effectuée sur les chroniques pluie-débit (Ambroise, 1991).

II.4.2- Modèles débit-débit

L'objectif de ces modèles est de simuler un débit sortant à un point aval en fonction d'un débit entrant à un point amont, généralement ces modèles négligent la modélisation des apports latéraux. Selon (Moussu, 2007), on peut classer ces modèles en :

- **Modèles globaux :** Ils réalisent le transfert de l'écoulement d'un point amont à un point aval et ne permettent l'estimation du débit qu'au point aval.
- **Modèles distribués :** ils prennent explicitement en compte la variabilité spatiale des variables d'entrée, des processus, des conditions aux limites et des caractéristiques du bassin versant. Ils permettent donc l'estimation du débit (et de la hauteur d'eau) en tout point du réseau hydrographique.

Ces modèles débit-débit négligent en général la modélisation des apports latéraux, en le traitant principalement sous deux formes : ponctuelles ou uniformément réparties.

II.5- Le calage et validation d'un modèle

Le calage consiste à sélectionner le jeu de paramètres d'un modèle de façon à ce que celui-ci simule le comportement hydrologique du bassin versant de la meilleure façon possible.

La validation porte sur l'application des modèles sur des données qui n'ont pas été utilisées lors de calage des modèles.

II.5.1- Calage du modèle hydrologique

Le calage d'un modèle hydrogéologique permet l'identification des données non-mesurées et recherche de l'ensemble des solutions possibles et compatibles avec toute l'information existante, en ajustant les paramètres calculées aux paramètres mesurées. L'ajustement s'effectue en général à l'aide d'algorithme de minimisation (Calage automatique). Cette méthode permet de proposer plusieurs jeux de données cohérentes avec l'ensemble des informations quantitatives et qualitatives disponibles (Kessara, 2016).

Le calage d'un modèle ce fait par l'utilisation d'un jeu de données de terrain, des valeurs mesurées In-situ, ou par le billet des résultats obtenus par un autre modèle appliqué sur les même mesures.

Les étapes qui doivent être suivies dans toute modélisation hydrologique sont (Ziadi, 2010):

- Conceptualisation de la problématique ;
- Choix du modèle correspondant ;
- Introduction des données analysées et critiquées ;
- Calage du modèle avec des données observées ;
- Validation avec d'autres données ;
- Utilisation du modèle pour la prévision et la simulation hydrologique ;
- Vérification des prévisions faites par le modèle (post-audit).

Le calage, étape fondamentales dans la démarche de modélisation hydrologique, a pour but de:

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

Pour caler un modèle, il faut choisir une série de référence (pluie-débit) et fixer un critère d'évaluation pour l'ajustement des simulations des modèles. Dans cette étude, le calage du modèle a été effectué avec des séries de mesure hydrométriques allant 1970 à 2004, sur un sous bassin (W180) jaugé par la station Morsott.

II.5.1.1- Optimisation et Analyse de sensibilité

L'optimisation des paramètres consiste à déterminer les valeurs qui minimisent une fonction critère préalablement choisie. Cette fonction recherche sans intervention de l'utilisateur, le jeu de paramètres optimal donnant à la fonction objective la meilleure valeur possible.

La fonction d'optimisation s'arrête une fois l'une de ces conditions est remplie :

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

L'analyse de sensibilité, quant à elle, est l'étude de la façon dont l'incertitude de la valeur de sortie d'un modèle peut être attribuée à l'incertitude dans ses entrées. Il s'agit d'estimer des indices de sensibilité qui quantifient l'influence d'une entrée ou d'un groupe d'entrée sur la sortie.

L'enveloppe d'incertitude en modélisation pose un problème pour l'aboutissement d'un modèle hydrologique parfait, autrement dit, la reproduction du comportement réel d'un bassin versant. Les incertitudes sont souvent déterminées en évaluant la variance des différentes composantes de la chaîne (Giuntoli, 2015). Les incertitudes sont caractérisées par leurs types et leurs sources.

Les type d'incertitudes se distinguent par :

- l'incertitude réductible qui résulte d'un manque d'information ;
- l'incertitude irréductible (ou structurelle, inhérente, stochastique), qui provient d'une variabilité naturelle.

Les sources d'incertitude plus fréquemment évoquées sont les incertitudes sur les données, les incertitudes sur les paramètres, et les incertitudes du modèle.

II.5.1.1.a- Incertitude sur les données

Les incertitudes sur les données issues de l'observation, qui comprennent à la fois les données de forçage (entrées) comme les précipitations et l'évapotranspiration potentielle, et les données de réponse (sorties) comme le débit, résultent à la fois des erreurs sur les mesures mais également du traitement de ces données. Les précipitations sont notamment incertaines du fait qu'un nombre limité de pluviomètres est utilisé pour estimer une lame d'eau moyenne sur un bassin versant. Quant aux débits, ils sont estimés en utilisant des hauteurs d'eau mesurées.

II.5.1.1.b- Incertitude liée à l'estimation des paramètres

Les modèles hydrologiques conceptuels utilisent des paramètres qui permettent d'ajuster la réponse du modèle à celle de la transformation pluie-débit d'un bassin versant. Il existe cependant une difficulté pour spécifier les valeurs des paramètres à partir d'autres informations, généralement, les paramètres sont ajustés de manière à reproduire au mieux les débits observés à l'exutoire du bassin versant lorsque des mesures de débits sont disponibles.

Ce processus d'estimation crée l'incertitude sur les paramètres. Souvent, il en résulte un ensemble de différents jeux de paramètres.

II.5.1.1.c- Incertitude liée au modèle

L'incertitude liée au modèle se traduit par l'incapacité d'un modèle à représenter la dynamique complexe du système à modélisé, en raison de sa structure simplifiée, de sa résolution, ou de son implémentation numérique, même en l'absence d'erreurs dans les données.

II.5.1.2- Les méthodes d'analyse des incertitudes en hydrologie

Afin d'évaluer l'impact qu'auraient les incertitudes de prévision du climat futur, une analyse de sensibilité du niveau du bassin doit être réalisée. En général, elle se fait par maximisation ou minimisation de l'un des paramètres (pluie, débit) par un pourcentage, et la comparaison des scénarios entre ceux dépendant des paramètres simples et ceux dépendant des paramètres augmentés.

II.5.1.2.1. Méthode GLUE

La méthode GLUE (Generalised Likelihood Uncertainty Estimation) a été introduite par Beven & Binley, en 1992, comme une méthode générale de calage et d'analyse des incertitudes. La méthode s'inspire de l'analyse de sensibilité de Hornberger & Spear, 1981.

Le comportement d'un système complexe est représenté par différents jeux de paramètres dont la performance est évaluée selon un ou plusieurs critères choisis, afin de refléter le degré de crédibilité accordé à chacun d'eux. Une valeur seuil doit être choisie pour distinguer l'admissibilité des jeux de paramètres au regard du critère d'efficacité choisis. Et les débits simulés à partir des différents jeux de paramètres retenus sont utilisés pour calculer les intervalles prédictifs.

II. 5.1.2.2. Méthode Bayésienne

Cette méthode considère le calage d'un modèle hydrologique comme un problème de régression non linéaire. Elle utilise des techniques statistiques bien connues pour l'estimation des paramètres et la quantification des incertitudes. Selon le paradigme bayésien, toutes les inconnues d'un problème sont décrites par des densités de probabilité qui s'obtiennent par la formule de Bayes. L'approche de Bayes permet une mise à jour d'un état de connaissance, formalisé par des distributions de données observées. L'estimation des paramètres est conditionnelle aux observations et aux hypothèses faites sur le mécanisme générateur des données.

Les densités de probabilités d'autres variables d'intérêt, notamment la densité prédictive des débits, s'obtiennent par propagation des différentes sources d'incertitude considérées. L'inférence bayésienne a été introduite en modélisation hydrologique comme une alternative aux stratégies de calage traditionnelles.

Les travaux les plus récents se sont principalement concentrés sur deux aspects du problème d'inférence :

- La recherche d'un modèle d'erreur global adapté à la modélisation hydrologique ;

- La définition de modèles statistiques d'erreurs pour chacune des sources d'incertitude, de manière à mieux identifier leurs contributions à l'incertitude totale.

Dans cette approche, la fonction de vraisemblance utilisée lors du processus d'inférence s'exprime par un modèle probabiliste plus complexe obtenu par l'utilisation de probabilités conditionnelles. Et non par un modèle probabiliste de l'écart entre les valeurs simulées par le modèle hydrologique et les valeurs issues de l'observation (Bourgin, 2015) .

II. 5.1.2.3. Méthode Monte-Carlo

La méthode Monte-Carlo compte parmi les méthodes d'analyse d'incertitudes les plus utilisées en hydrologie. Elle est considérée généralement comme référence pour la validation des autres méthodes d'analyse. L'inconvénient de cette méthode par rapport au modèle hydrologique utilisé est son coût élevé de calcul (Singh P.V., 1996). Pour éviter cette problématique, des simulations Monte-Carlo sont faites en se basant sur le méta modèle.

Le principe de la méthode consiste à échantillonner aléatoirement les différents paramètres. Une chaîne de Markov se définit classiquement comme étant une suite de variables pour laquelle la meilleure prédiction que l'on puisse faire à l'étape N+1 est la même lorsque l'on se limite à la connaissance de la valeur à l'étape N que si l'on connaissait toutes les valeurs aux étapes précédentes.

Les méthodes de Monté Carlo (chaîne de Markov) permettent d'obtenir des réalisations de valeurs absolues de loi spécifiées par l'utilisateur.

Elles sont en particulier utilisées comme méthodes numériques stochastiques pour l'approximation d'intégrale, ou dans notre cas comme méthode d'extrapolation d'une loi (recherche des maximums, des médianes, des zones de plus hautes densités...)

Il existe deux grandes familles pour regrouper les méthodes de Monte Carlo :

- 1) Acceptation – Rejet : se donner une loi instrumentale.
 - Tirer des valeurs absolues indépendantes et identiquement distribuées.
 - Faire intervenir des critères d'acceptation de tirage.
 - Approcher la loi spécifiée par l'utilisateur.
- 2) Pondération : se donner une loi instrumentale.
 - Tirer des valeurs absolues indépendantes et identiquement distribuées.
 - Approcher la loi spécifiée par l'utilisateur en fonction de la loi instrumental.

II. 5.1.2.4. Méthode Simplex

La méthode de Nelder-Mead est un algorithme d'optimisation non-linéaire qui a été publiée par John Nelder et Roger Mead en 1965. C'est une méthode numérique qui cherche à minimiser une fonction continue dans un espace à plusieurs dimensions.

Appelée également **down Hill simplex method**, l'algorithme exploite le concept de simplexe qui est un polytope (une frontière convexe) de N+1 sommets dans un espace à N dimensions. Le subit des transformations simples au cours des itérations. Il se déforme, se déplace et se

réduit progressivement jusqu'à ce que ses sommets se rapprochent d'un point où la fonction est localement minimale.

L'algorithme du simplexe est utilisé pour résoudre un programme linéaire, ce programme linéaire doit être converti en un programme équivalent où toutes les contraintes technologiques sont des équations et toutes les variables sont non négatives (HEC Montréal).

II. 5.1.2.5. Méthode Univariate

L'algorithme du gradient désigne un algorithme d'optimisation différentiable. L'algorithme est itératif et procède donc par améliorations successives. Au point courant, un déplacement est effectué dans la direction opposée au gradient, de manière à faire décroître la fonction. Le déplacement le long de cette direction est déterminé par la technique numérique connue sous le nom de recherche linéaire. Cette description montre que l'algorithme fait partie de la famille des algorithmes à directions de descente. Son but est principalement de minimiser une fonction.

Deux points faibles de l'algorithme du gradient sont :

- L'algorithme peut nécessiter de nombreuses itérations pour converger vers un minimum local, notamment si la courbure est très différente dans des directions différentes ;
- La recherche du pas optimal, généralement effectuée par une recherche linéaire, peut se révéler très longue. Inversement, utiliser un pas fixe peut conduire à de mauvais résultats.

L'amélioration successive à l'étape N+1 se fait par une correction des paramètres choisis à l'étape N. Le but de la recherche est de sélectionner une correction pour que l'estimation tende vers le paramètre qui donne le minimum de la fonction objectif. La méthode du gradient continue est basée sur la méthode de Newton (HEC- HMS).

II.5.1.3- Critères d'évaluation de la modélisation

Le critère d'évaluation choisit mesure les performances d'un modèle. Un même modèle peut être évalué de plusieurs façons. Pour satisfaire les différents objectifs de jugement, plusieurs critères d'évaluation ont été développés :

II.5.1.3.a Erreur moyenne absolue

L'erreur moyenne absolue, notée ε , se définit par la moyenne des écarts entre les débits observés et les débits calculés (Berrezoug, 2016):

$$\varepsilon = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Q_{obs,i} - Q_{calc,i}|$$

Avec :

n : Nombre d'observations

$Q_{calc,i}$: Débit calculé au cours de l'année i,

$Q_{obs,i}$: Débit observé au cours de l'année i.

L'estimation des débits est considérée acceptable quand ε tend vers zéro.

II.5.1.3.b Erreur quadratique moyenne

Cette erreur se calcule comme étant la racine carrée de la moyenne des carrés des écarts entre les débits observés et les débits calculés (Boudrahaa, 2007):

$$RMSE = \sqrt{\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{calc,i})\right)^2}$$

Avec :

n : Nombre d'observations

$Q_{calc,i}$: Débit calculé au cours de l'année i,

$Q_{obs,i}$: Débit observé au cours de l'année i.

II.5.1.3.c Coefficient de Nash- Sutcliff

Le critère le plus connu et le plus utilisé pour les modèles conceptuels est le critère de (Nash-Sutcliff, 1970) qui s'exprime par l'équation ci-dessous :

$$NSE = \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{calc,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})^2} \right] * 100$$

Avec :

n : Nombre d'observations

$Q_{calc,i}$: Débit calculé au cours de l'année i,

$Q_{obs,i}$: Débit observé au cours de l'année i.

\bar{Q}_{obs} : Moyenne des débits observés sur la période considérée.

Ce critère a été calculé en utilisant la racine carrée des débits a été utilisé pour atténuer l'importance des débits de pointe. Ceci afin de tenir compte de certaines valeurs particulières des débits.

En pratique, on estime que la simulation est acceptable lorsqu'il est supérieur à 70%, parfaite lorsqu'il est égal à 100% (Oudin, 2004).

II.5.1.4.d Critère C2M

Le critère C2M transforme le critère de Nash-Sutcliff en critère borné afin d'éviter l'absence de limite inférieure (le critère de Nash peut varier entre $-\infty$ et 100%) liée à différentes insuffisances du modèle ou de données. le critère C2M évolue entre -1 et 1. Le score égal à 1 traduit une reproduction parfaite des débits observés, tandis que le score 0 signifie des performances équivalentes à un modèle naïf de simulation (Explore-2070, 2012)

$$C2M = \frac{NSE}{(2 - N)}$$

NSE : Coefficient de Nash-Sutcliff.

II.5.2- Validation

La validation des modèles est la simulation d'un modèle existant dans des situations nouvelles. Le transfert des modèles a une situation nouvelle. Elle se fait soit, dans le temps (la plus fréquemment utilisée en modélisation), soit dans l'espace.

Dans le temps, le contrôle des performances du modèle ce fait à partir des entrées et des sorties mesurées, pour une période temporelle différente de la première, calé sur un site et une période donnés. Elle n'est cependant pas suffisante pour tester la validité de la formulation du modèle conceptuel car la tendance de la série temporelle utilisée dans la validation n'est pas forcément inconnue.

En effet, la série temporelle utilisée pour la validation peut contenir à peu près la même information que celle de la phase de calage. Cela équivaut à dire que le modèle conceptuel ne fait pas extrapolation dans une nouvelle situation, mais une interpolation dans un cadre connu (Kessara, 2016).

II.6- Conclusion

Le modèle hydrologique est un outil incontournable dans la compréhension de la dynamique d'un bassin versant. Il constitue le meilleur moyen de comparer les mesures de débit observées sur un bassin avec les mesures de débit simulées à partir des précipitations et évaporations enregistrées par des stations pluviométriques. Il peut aussi mettre en évidence d'éventuelles anomalies. Les modèles conceptuels globaux nous apparaissent comme étant les plus en adéquation avec le niveau actuel de compréhension du fonctionnement hydrologique du bassin.

Le calage du modèle, choisi sur un historique observé suffisamment long (les débits aux exutoires, les pluies et l'Evaporation potentielles pondérées et réparties spatialement et temporellement), permet essentiellement de certifier la précision de la simulation théorique.

L'incertitude sur les données d'entrée des modèles pluie-débit est responsable d'une incertitude de prévision. Son influence commence dès le calage du modèle, se poursuit au niveau de la modélisation de l'état initial du bassin et des scénarios de précipitation future.

En résumé le modèle hydrologique choisi, pluie-débit, peut répondre aux problématiques liées aux comportements hydrologiques des bassins versants à travers :

- La prédétermination des débits de crues et d'étéage.
- La prévision des crues et des étiages.
- L'influence des changements climatiques sur l'hydrologie.
- Simulation de débits pour combler des lacunes dans les données et reconstituer des séries de débits historiques, ou pour permettre des traitements statistiques.

Chapitre III :
Méthodologie et
matériel.

Chapitre III : Méthodologie et matériel.

Ce chapitre porte sur l'application du modèle hydrologique sur le Bassin versant Mellegue via le logiciel ArcGIS et HEC-HMS.

III.1- Zone d'étude

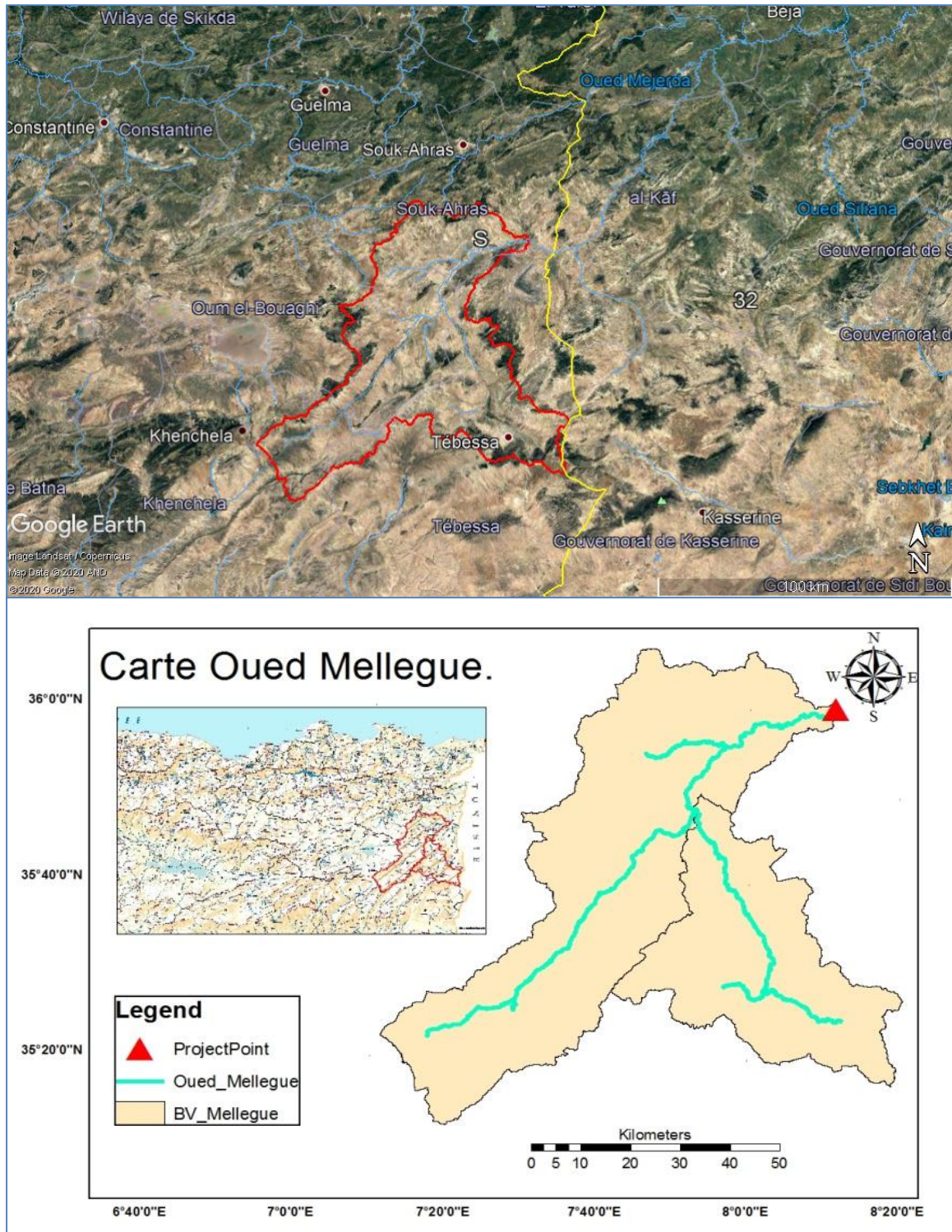


Fig. III.1 : Présentation de la situation géographique du Bassin Mellegue (Google Earth, ArcGIS)

Le bassin versant Mellegue est situé dans la Zone (S) 32 hémisphère nord, entre (35°12'17.72"N à 36° 6'23.85"N latitude) et (7°11'15.77"E à 8°20'34.12"E longitude). Il constitue une partie (un sous-bassin) du bassin Madjerda partagée entre l'Algérie et la Tunisie.

Il est limité à l'Ouest et Sud- Ouest par Djebel Hammimat et Djebel Chélia, à l'Est par Djebel Boukhadra et Djebel Rherab, au Sud par Djebel Mestiri et Djebel Bekkaria et au Nord par la wilaya de Souk Ahras, drainant une surface de 4598.46 km².

III.1.1- Superficie et forme du bassin

Le bassin a une superficie planimètre de 4598.46 km². Cette superficie est délimitée par une ligne de partage des eaux de 710.96 km qui est le périmètre du bassin.

La forme du bassin peut être traduite par l'Indice de compacité de Gravelius (K_C) ayant une influence certaine sur l'écoulement. Celle-ci détermine l'allure de l'Hydrogramme de crue. Un bassin allongé ne réagira pas de la même manière qu'un bassin de forme ramassée.

$$K_C = 0.28 * \frac{P}{\sqrt{A}}$$

P : Périmètre [km].

A : Superficie [km²].

Pour le bassin Mellegue, l'indice K_C a été estimé à 2,94 ; traduisant une compacité faible (bassin allongé) donc, l'hydrogramme de crue est de forme amortie.

III.1.2- La climatologie

Le climat représente un ensemble de variables permettant d'expliquer quantitativement les variations du régime hydrologique. La connaissance des conditions climatiques de notre zone d'étude et de ses caractéristiques permet de mieux comprendre l'évolution et le comportement hydrologique des cours d'eaux. Les paramètres les plus intéressants dans l'identification du régime d'écoulement sont les précipitations (P) et la température (T). Ces paramètres conditionnent soit la sécheresse, soit l'humidification du milieu. Elles sont utilisées d'une part, pour estimer les différents paramètres du bilan hydrique et d'autre part, pour la connaissance des conditions d'alimentation des réserves en eaux souterraines. D'une manière générale, le climat de la région est de type continental, semi-aride au Sud et subhumide au Nord avec un hiver pluvieux et froid et un été sec et chaud.

III.1.2.1- Étude des précipitations

Selon les données relatives aux stations de El Ouenza, Meskiana, Ain Dhalaa et Hammamet (Tab. 1-4, Annexe) pour une durée d'observation de 34 ans (1970/1971-2003/2004), nous avons pu établir les graphiques (Figures. III.2-III.5) des variations interannuelles des pluies maximales. Il a été constaté que les cycles pluviométriques les plus arrosés correspondent aux années 70-76, 88-92 et 02-04. Avec des valeurs dépassant 500mm enregistrées dans trois stations en 1972, et des valeurs allons jusqu'à 400 mm et plus enregistrées dans les quatre stations pendant l'année 2003. Notons que les précipitations moyennes interannuelles s'évaluent à 288 mm.

Tab.III.1 : Inventaire des stations pluviométriques du bassin.

Identifiant	Stations	Coordonnées Lambert		Altitude	Année de mise en service
		X	Y		
120201	Meskiana	940.85	250.4	980	1904
120202	Ain Dhalaa	949.7	271	845	1970
120306	Hammamet	976.500	251.750	875	1970
120401	El Ouenza	989	313	520	1969

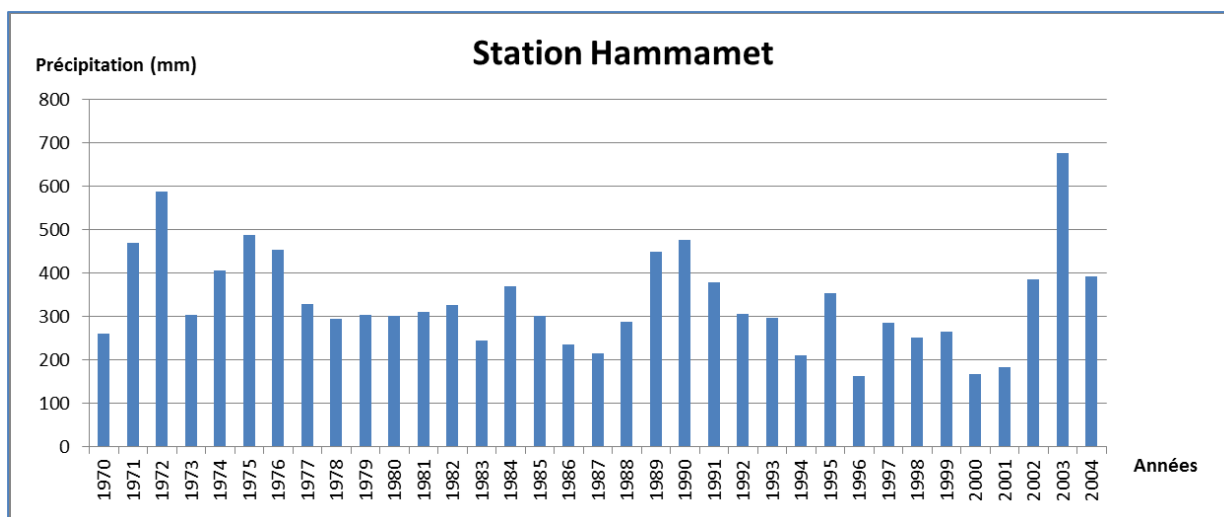


Fig. III.2 : Variation des précipitations de la station de Hammamet pour la période (1970/1971-2003/2004).

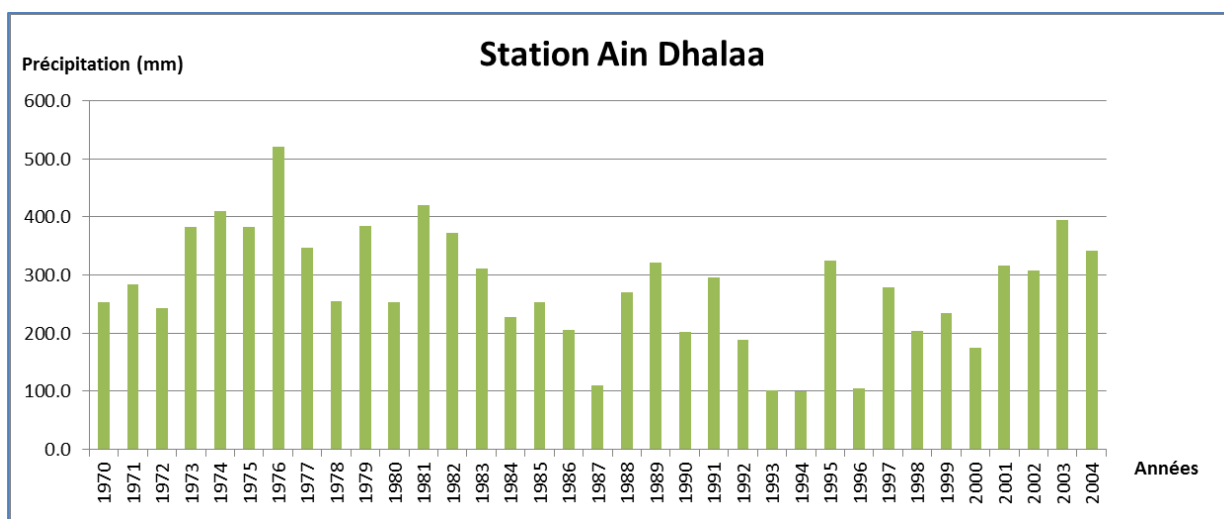


Fig. III.3 : Variation des précipitations de la station d'Ain Dhalaa pour la période (1970/1971-2003/2004).

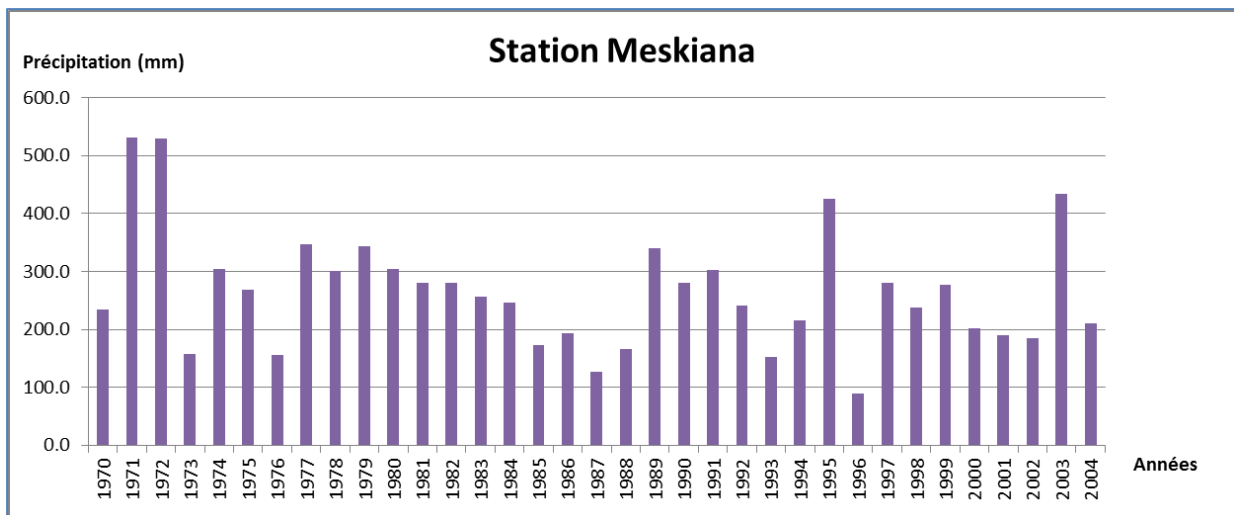


Fig. III.4 : Variation des précipitations de la station de Meskiana pour la période (1970/1971-2003/2004).

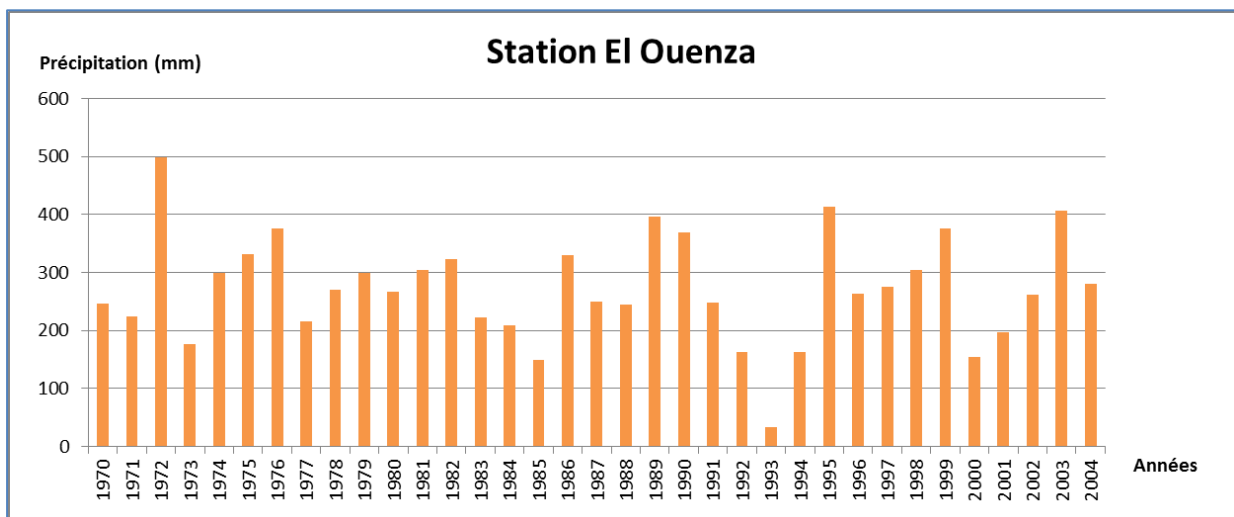


Fig. III.5 : Variation des précipitations de la station d'El Ouenza pour la période (1970/1971-2003/2004).

D'après les données relatives aux 14 stations dispersées sur le bassin (Tab. 5, Annexe) trois scénarios climatiques ont été établis. Ces scénarios nous permettent d'évaluer les répartitions spatiales des pluies moyennes annuelles pour des périodes de dix ou quinze ans.

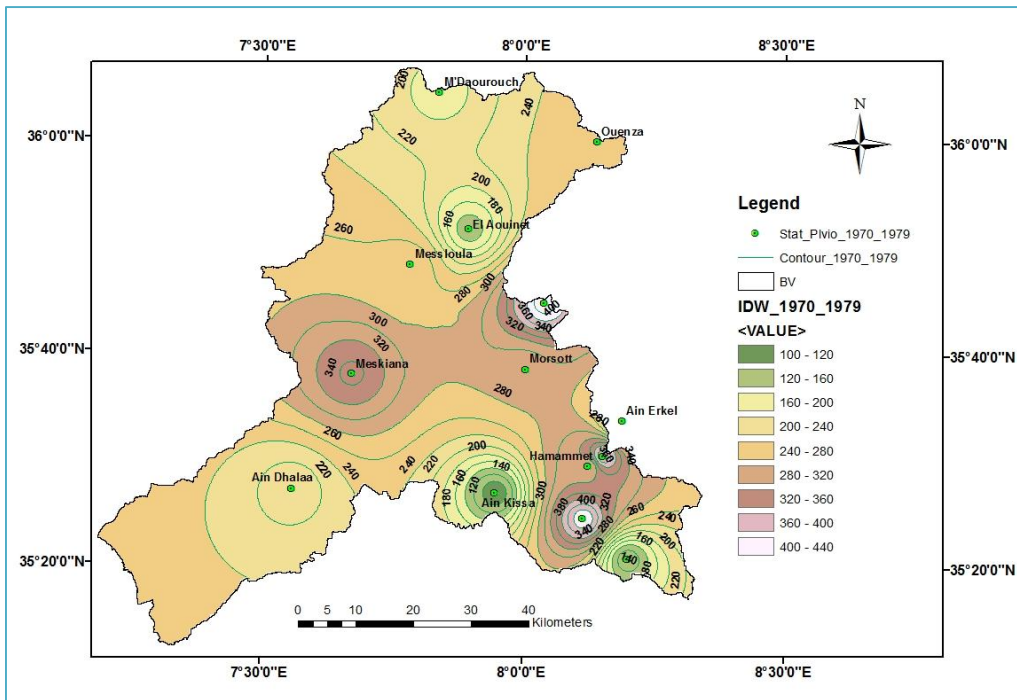


Fig. III.6 : Répartition spatiale des pluies moyennes annuelles pendant la période 1970-1979 de la zone du bassin versant de Mellegue.

Le premier scénario (70-79) montre une répartition pluviale forte au centre du bassin entre Meskiana et Morsott, et au sud-est aux alentours de Tébessa. La répartition montre une pluviométrie assez faible au nord et sud, sud-ouest.

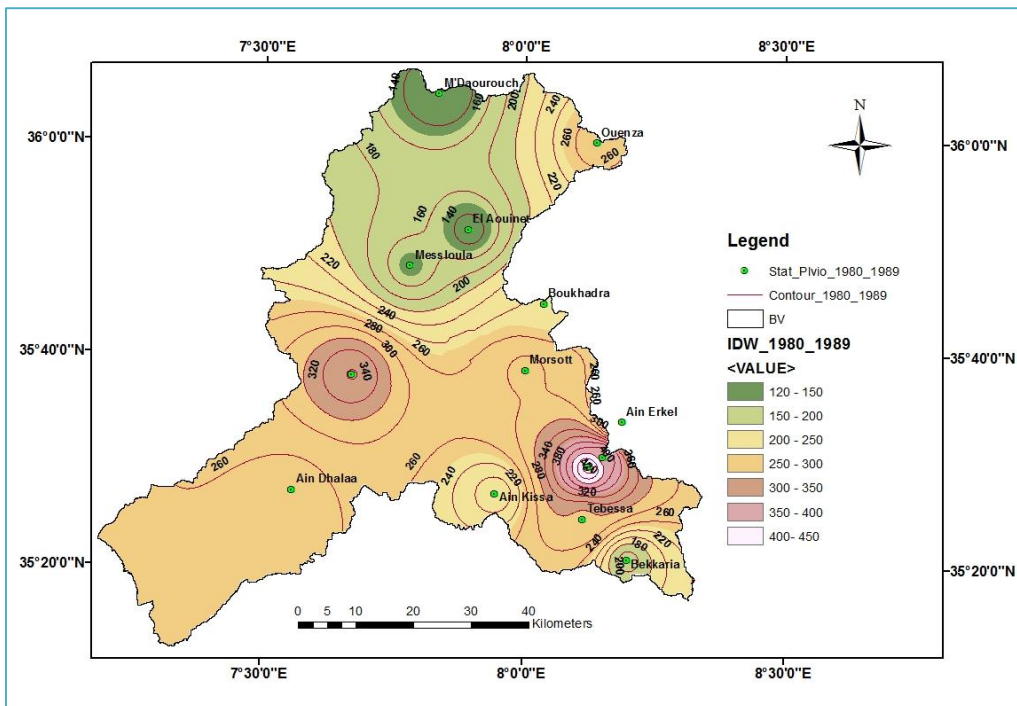


Fig. III.7 : Répartition spatiale des pluies moyennes annuelles pendant la période 1980-1989 de la zone du bassin versant de Mellegue.

Il a été observé dans le second scénario (80-89) une pluviométrie faible dans la majeure partie du Bassin, sauf aux alentours de Morsott et Hammamet ou les précipitations sont conséquentes.

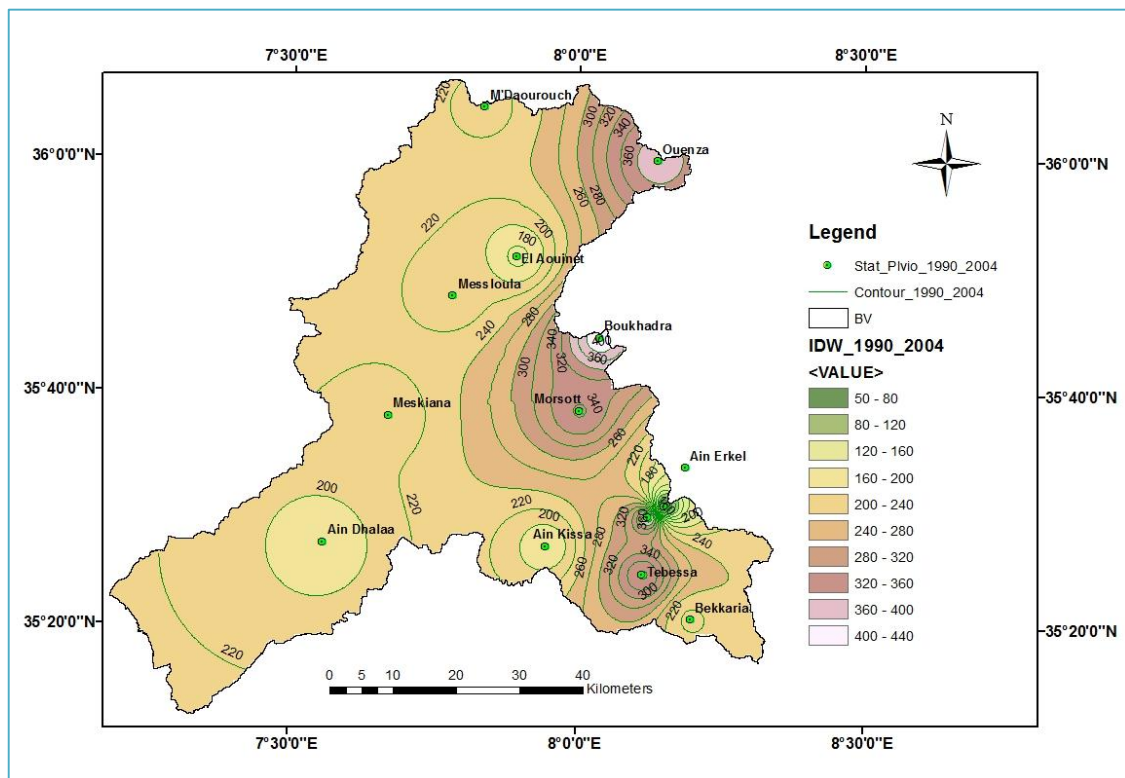


Fig. III.8 : Répartition spatiale des pluies moyennes annuelles pendant la période 1990-2004 de la zone du bassin versant de Mellegue.

Le dernier scénario (90-04) révèle une pluviométrie faible à l'ouest du bassin. Contrairement à l'est où la pluviométrie se concentre dans les régions El Ouenza, Boukhadra et Tebessa.

III.1.2.2- Étude de la Température

La température est un facteur très important, régissant le phénomène d'évapotranspiration et le déficit d'écoulement annuel et saisonnier. Les données sur la température dont on dispose sont des valeurs moyennes mensuelles et annuelles mesurées à la station Météorologique de Tebessa.

Températures moyennes mensuelles : D'après le tableau des températures et l'histogramme, Il a été constaté que le mois de janvier est le mois le plus froid de l'année tandis que les mois les plus chauds sont juillet et août.

Tab.III.2 : Variation des températures moyennes mensuelles (1983/1984-2003/2004).

Mois	Sept	Oct	Nov	Dec	Janv	Fev	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août
T (°C)	22.77	16.64	11.85	7.66	7.08	7.63	10.09	13.26	18.42	23.26	26.62	26.93

Les histogrammes représentant la variation annuelle de la température, sur une période de 33 ans (1972/1973-2004/2005), montre que l'année la plus chaude est l'année 2000/2001 avec une moyenne de 17,08°C, et l'année la plus froide est l'année 1974/75, avec une moyenne de 13,97°C. Signalons que la température moyenne interannuelle est de l'ordre de 15,58 °C (Seghir, 2008).

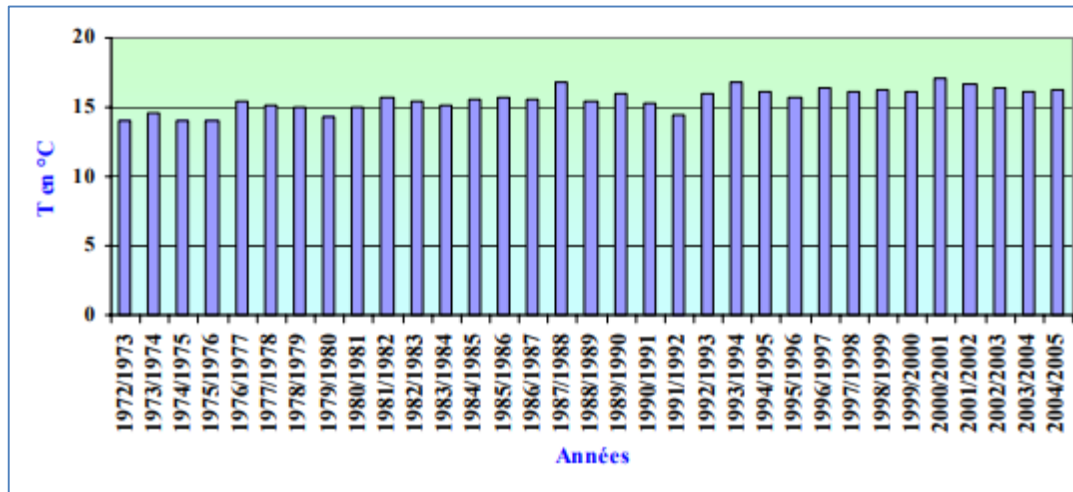


Fig. III.9 : Evolution de la température moyenne annuelle de la station Meskiana pour le période (1972/1973-2004/2005).

Les valeurs les plus élevées sont observées pendant l'été (Juin- Septembre) avec des températures allant de 23.16 à 26,45°C. Les valeurs les plus basses, qui varient de 6 à 10.06°C, sont observées durant la période hivernale (Décembre – Mars) (Gouadia, 2008).

III.1.2.3- L'humidité

L'humidité relative représente la proportion d'eau présente dans l'air. En considérant que les conditions climatiques sont semblable dans l'ensemble de la région, il a été observé que pendant la période de mesure (83/84- 03/04), le mois de Mai est le plus humide avec une humidité relative égale à 70.1% et le mois le plus sec est celui de juillet avec une humidité relative de 39%.

III.1.2.4- Le Vent

Les vents sont caractérisés par leur vitesse et leur intensité. En hiver, les vents du Nord-ouest sont prédominants et souvent secs et froids ; en été les vents du sud sont fréquents et peuvent être chauds et secs, ces derniers causent l'augmentation de l'évaporation et une sécheresse, ce qui crée un déficit d'écoulement.

III.1.2.5- L'insolation

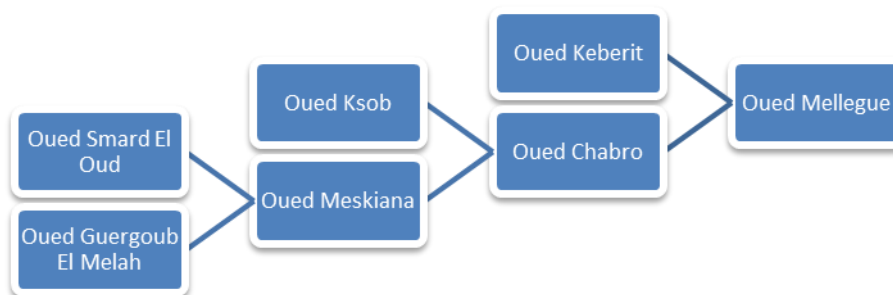
L'insolation représente la quantité de rayonnement solaire retenu et absorbé par la terre. Le mois le plus ensoleillé est juillet avec 11.1 heures/jour et le mois le moins ensoleillé est janvier avec une valeur de 5.3 heures/jour.

III.1.2.6- L'évaporation

Le mois de juillet est le mois où l'évaporation est la plus intense avec une moyenne mensuelle de 12.0 mm. Par contre le mois de janvier est le mois où l'évaporation est minimale avec une moyenne mensuelle de 3.1 mm.

III.1.3- Réseau hydrographique

L'écoulement du bassin Mellegue dans la partie Algérienne est endoréique assuré par une multitude de cours d'eau dont les plus importants sont:



La disposition du réseau hydrographique est liée en grande partie à l'évolution phénomènes structuraux qui ont affecté la région au cours des temps géologiques. Le chevelu hydrographique suit pratiquement les accidents importants qui ont affecté les formations carbonatées du Jurassique. Le réseau hydrographique est dense et bien développé, il est alimenté par des Oueds moyennement profonds et subparallèles tels que l'Oued Djaou Djellel, l'Oued Serdies, et l'Oued Guetarra. Le principal cours d'eau traversant la région est l'Oued Mellegue, qui prend source dans les contreforts septentrionaux de la chaîne Numidique.

III.1.4- Couvert Végétale

La composition végétale de la zone d'étude est constituée de forêts, de maquis et de reboisement, la couverture végétale de la région régit par des conditions climatiques rudes est jugée limitée et peu couvrante. Le reste de terrain nu se répartit entre des terres agricoles et des terres improductives. Le développement de l'agriculture est fortement compromis par les caractéristiques du sol, des écoulements, et de l'intensité de l'action humaine. Les forêts sont essentiellement peuplées de pin d'Alep, le genévrier phénicien et dans certains lieux le chêne kermès, des essences qui s'adaptent le mieux aux conditions climatiques de la région, et n'exige pas beaucoup d'eau (200 mm/an) mais nécessite un sol à base de calcaire. Les alluvions ne permettent que des récoltes irrégulières de céréales.

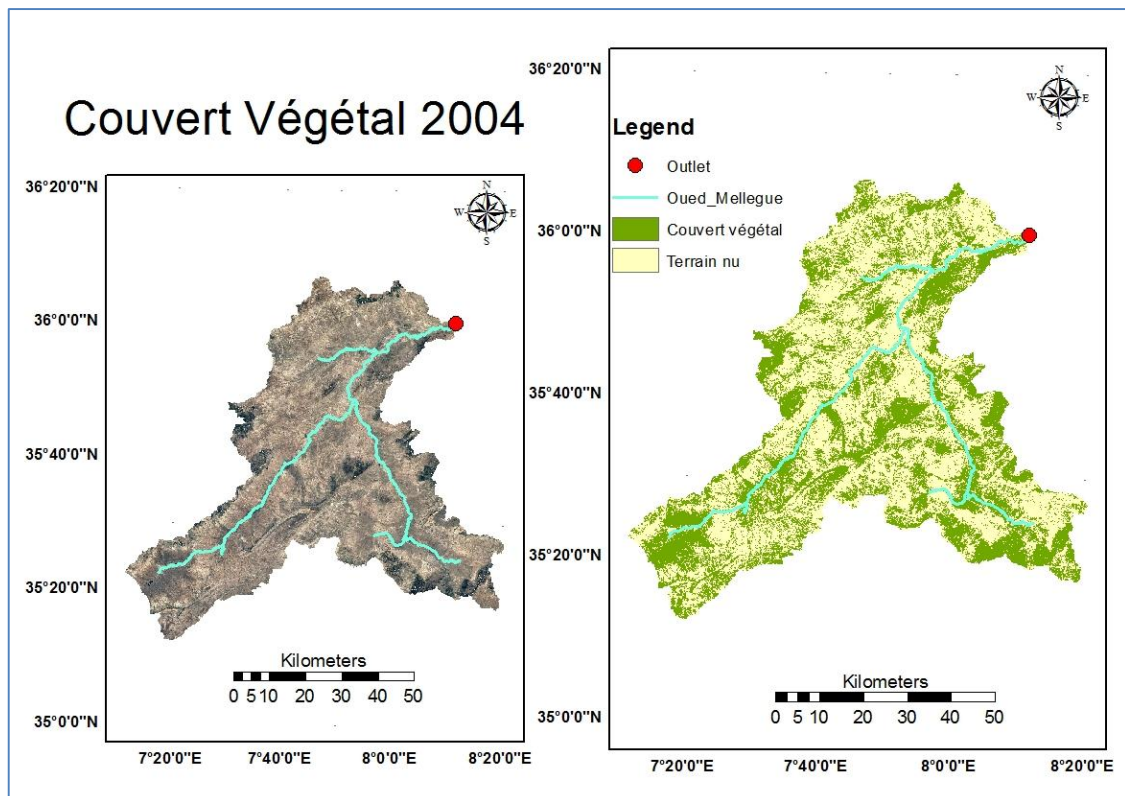


Fig. III.10 : Représentation du couvert végétal sur le bassin Mellegue en 2004 (ArcGIS, Google Earth).

III.1.5- Relief et Analyse de la carte hypsométrique

La carte hypsométrique (Fig. III.11) montre un relief hiérarchisé par classes d'altitudes de 100m. Elle apporte une multitude d'informations sur les particularités de l'orographie de la zone.

Différents types de reliefs constituent la région d'étude. Ils se subdivisent en trois groupes:

- les montagnes.
- les collines.
- les plaines.

Le relief ou la topographie est un élément essentiel pour son influence sur les facteurs météorologiques (précipitations, températures, vents etc..). Plus que la forme, il peut avoir un rôle déterminant dans le conditionnement du comportement hydrologique du bassin.

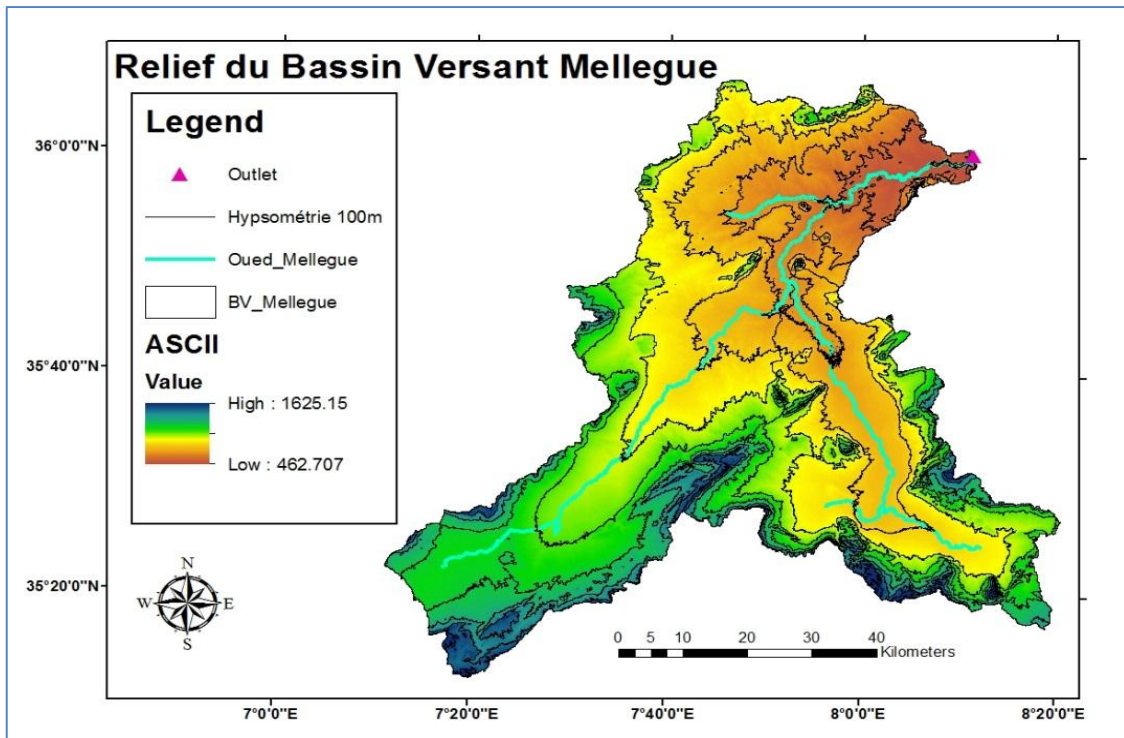


Fig. III.11 : Représentation du relief du bassin Mellegue (ArcGIS).

III.1.6- Etude géologique

L'importance des études géologique, lithologique, stratigraphique et pédologique découle du fait que l'eau a la faculté de dissoudre les minéraux qui composent la roche en contact. L'eau acquière sa minéralisation suite aux interactions successives entre l'écoulement et les différentes formations géologiques. A la surface de la zone d'étude, les affleurements montrent des formations calcaires d'âge Crétacé plus ou moins proéminentes aux bordures des plaines et plateau, et des formations d'âge Miocène et Quaternaire, qui occupent toutes les superficies du bassin étudié.

III.1.6.1- La lithologie

Pour décrire la lithologie des formations deux grands ensembles représentent la litho stratigraphie du bassin (Gouadia, 2008):

- Le premier est constitué essentiellement par les formations crétaées et tertiaires qui affleurent dans les bordures.
- Le second est formé, en général, par un recouvrement Mio-Plio-Quaternaire qui se dépose dans la plaine. Ces deux ensembles constituent une série stratigraphique complète.

Le bassin dispose d'une la lithologie tendre :

- Calcaire et croûte calcaire.
- Marna-calcaire et terre arable
- Argiles versicolores, gypses et marnes.

III.1.6.2- Situation pédologique

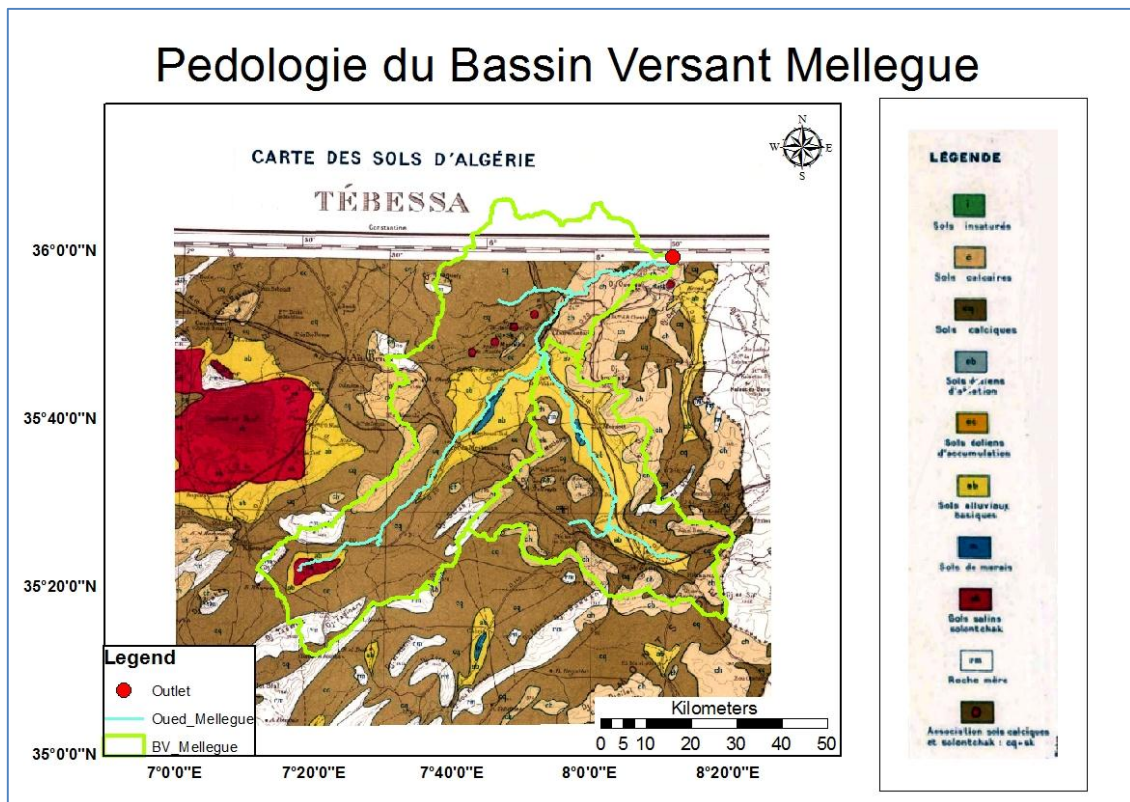


Fig. III.12 : Pédologie du bassin Mellegue (ArcGIS, Carte pédologique de Tébessa).

Les sols de cette région (subhumide, semi-aride) se caractérisent généralement par :

A) Les sols Calci-magnésiques :

- Sol brun calcaire occupé par de la jachère et de la céréaliculture.
- Sol brun rouge " tâche rubéfaction " occupé par de la jachère et de la céréaliculture.
- Sol brun très chargé occupé par de la jachère et de la céréaliculture à faible rendement.

B) Les sols Calcaires humiques (iso humiques) :

- Texture argileuse.
- Structure prismatique.
- Teneur appréciable en matière organique.
- Occupé par la céréaliculture.

Ces sols suffisamment épais et assez riches en matière organique, constituent les meilleurs sols de la région pour la culture. Ils peuvent porter, dans les périodes à pluviométrie suffisante avec des rendements appréciables.

C) Les sols Alluvio-basiques : ils présentent une stratification granulométrique due à la sédimentation. Ce sont des sols fertiles qui contiennent de la matière organique avec un taux important bien aéré. Ce sont des bonnes terres de mise en valeur sauf qu'il y a risque d'inondation en période pluvieuse.

D) Les sols d'apport colluvial (roche mer) : au piémont des montagnes.

D'après L'O.E.B (Conservation des forêts 2017/2018), les sols des régions à climat semi-aride sont caractérisés par :

- La présence d'accumulation calcaire réduisant la profondeur de sol utile.
- La faible teneur en matière organique et en éléments biogènes.
- Une forte sensibilité à l'érosion. Parmi les sols les plus rencontrés on y trouve : Le sol squelettique, sol argileux calcaire, sol brun forestier.

III.2- Méthodologie et Logiciels d'études

III.2.1 Logiciel ArcGIS 10.2



Fig. III.13 : Logiciel ArcGIS 10.2.

Le logiciel ArcGIS 10.2 est l'un des Systèmes d'Informations Géographiques (SIG) les plus utilisés. Ce logiciel offre de nombreuses potentialités pour la manipulation, la gestion, l'analyse et l'édition des données spatiales.

Différentes couches d'informations spatiales peuvent être manipulées offrant la possibilité d'analyser une ou plusieurs couches sous le contrôle des autres. Le seul lien entre ces différentes couches est le lien spatial, c'est-à-dire, l'appartenance au même espace géographique et ayant le même système de coordonnées.

Les différentes couches d'informations sont descriptives d'un espace géographique terrestre déterminé. Elles peuvent correspondre à des documents cartographiques représentant des objets thématiques géographiquement identifiés (carte de type IGN, photographies aériennes, images satellitaires, etc.) ou issus des analyses et des procédures de spatialisation (carte de la teneur en eau du sol, carte topographique, carte de la hauteur des arbres dans un peuplement forestier, etc.).

III.2.1.1- Composantes de l'environnement ArcGIS

ArcGIS 10.2 comprend trois applications principales : ArcMap, ArcCatalog et ArcToolbox :

A l'aide de ces trois applications, on peut effectuer toutes les tâches SIG, de la plus simple à la plus avancée, y compris la cartographie, la gestion des données, l'analyse géographique, la mise à jour des données et le géo-traitement ...etc.

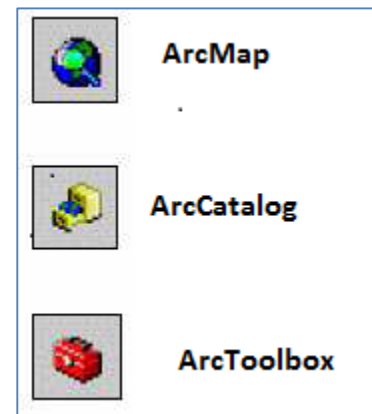


Fig. III.14 : Composante ArcGIS 10.2.

III.2.1.1.1. ArcMap

Il est utilisé pour toutes les tâches de cartographie et de mise à jour ainsi que pour les analyses associées aux cartes. ArcMap montre, questionne, édite, crée ou analyse des données, sous forme de Tables ou de cartes. ArcMap facilite la disposition des cartes lors de la mise en page pour l'impression, l'intégration dans d'autres documents et l'édition de documents électroniques. L'interface du logiciel est présentée ci-dessous :

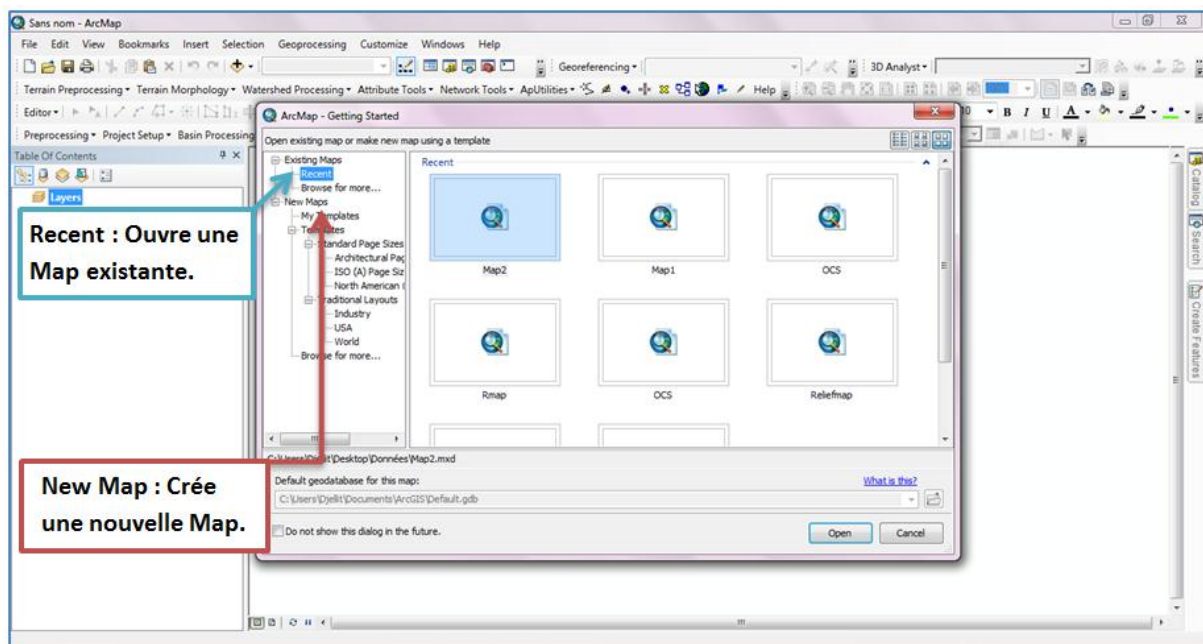


Fig. III.15 : Interface ArcMap.

Sur ArcMap la barre générale d'outils permet d'effectuer certaines opérations tout en restant dans ArcCatalog. Par ordre, de gauche à droite ces options les plus importantes sont:

- Zoomer (+) et de zoomer (-),
- Se déplacer sur une couche pour afficher une portion,
- Revenir à l'affichage initial de la carte (tout à l'écran),
- Identifier les données tabulaires rattachées d'un polygone quelconque,
- Créer un icône d'une couche.



Fig. III.16 : Barre d'outils ArcMap.

III.2.1.1.2. ArcCatalog

ArcCatalog est un explorateur de données tabulaires et cartographiques offrant des outils de gestion et d'organisation analogues à ceux offerts par les systèmes d'exploitation comme WINDOWS ou DOS (copier, renommer, effacer, créer des icônes, etc.). Il est vivement conseillé d'utiliser ArcCatalog pour effacer les fichiers car ces fichiers sont accompagnés d'autres fichiers que l'explorateur de Windows, s'il est utilisé, ne permet pas de les effacer automatiquement. ArcCatalog permet aussi de visualiser les données tabulaires et des couches géographiques ainsi qu'une exploration des différents thèmes qui les constituent. Permet de gérer les fichiers de données et l'organisation des bases de données ainsi que d'enregistrer et de visualiser les métadonnées. ArcCatalog permet de passer en revue, organiser, distribuer et modifier les éléments de propriétés des données géographiques. L'interface permet d'employer des méthodes graphiques ou textuelles pour passer en revue, contrôler ou modifier l'ensemble des données.

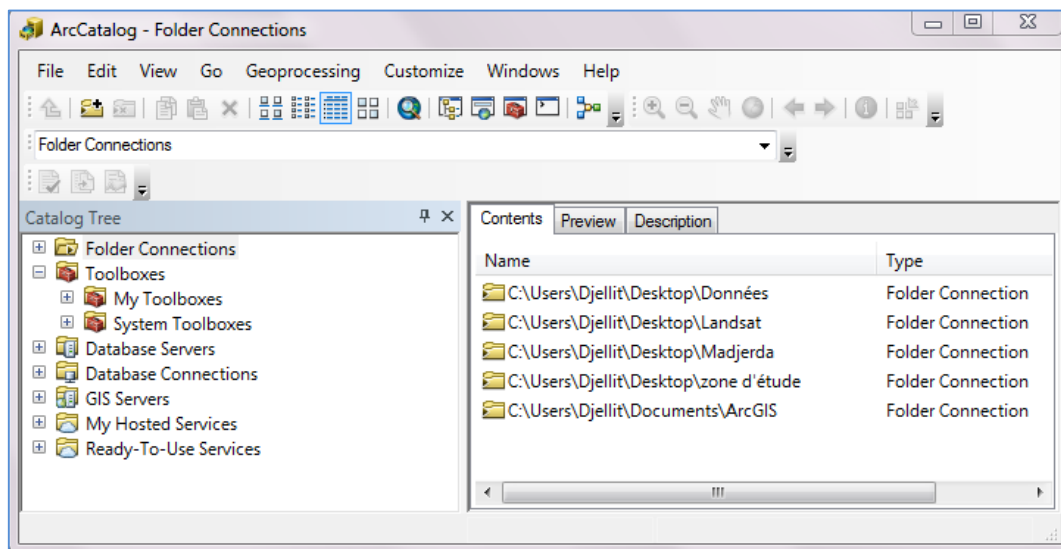


Fig. III.17: Interface ArcCatalog.

III.2.1.1.3. ArcToolbox

ArcToolbox est une boîte à outils permettant d'effectuer des conversions et de transferts de format et aussi de projection. ArcToolbox est le module dans ArcGIS 10.2 qui permet à toutes les fonctionnalités puissantes de traitement et d'analyse. La boîte à outils fournit un ensemble très riche de fonctions de géo traitement. Il converti aussi les formats de données pour l'importation ou l'exportation de fichiers, ainsi que les changements de projection.

Les extensions les plus connues d'ArcGIS sont les suivantes :

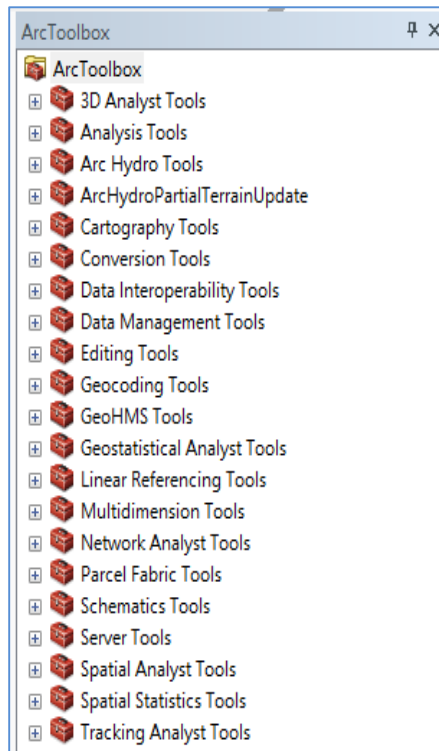


Fig. III.18 : Les outils d'ArcToolbox.

- **Spatial Analyst:** Modélisation spatiale avancée.
- **3D Analyst :** Modélisation 3D.
- **Conversion Tools :** conversion de couche et data.
- **Data Management :** développement, de gestion et tri des classes d'entités, des jeux de données, des couches et des structures de données raster.

III.2.1.1.4. Géo-référencement

Le géo-référencement est un processus permettant d'établir une relation entre les entités affichées dans le système d'information géographique (SIG) et leur position dans le monde réel. La terre est sphérique, et les cartes étant plates, la conversion de positions géographiques sur une surface de la terre en une surface plate nécessitant une formule mathématique appelée projection cartographique. Les données dans notre projet seront exploitées sous un système de projection de coordonnées Universal Transverse Mercator (UTM) avec un système géodésique mondial (WGS 84). La zone 32 hémisphère nord.

Le géo-référencement peut correspondre à trois types d'opérations différentes :

- La transformation des données spatiales en données géographiques par la déclaration d'un système de coordonnées.
- La transformation d'un système de coordonnées géographiques à un autre.
- La transformation des données spatiales en coordonnées géographiques par transformation algébrique.



Fig. III.19 : Projection de la Zone (S) 32 hémisphère nord.

III.2.2- Simulation hydrologique par le modèle HEC-HMS

L'utilisation des systèmes d'information géographique dans la modélisation hydrologique est devenue un outil incontournable. Dans cette étude, le modèle hydrologique HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center, Hydrologic Modeling System) est utilisé en combinaison avec l'extension de modélisation hydrologique géo spatiale, HEC-GeoHMS, pour modéliser la relation pluie-débit.

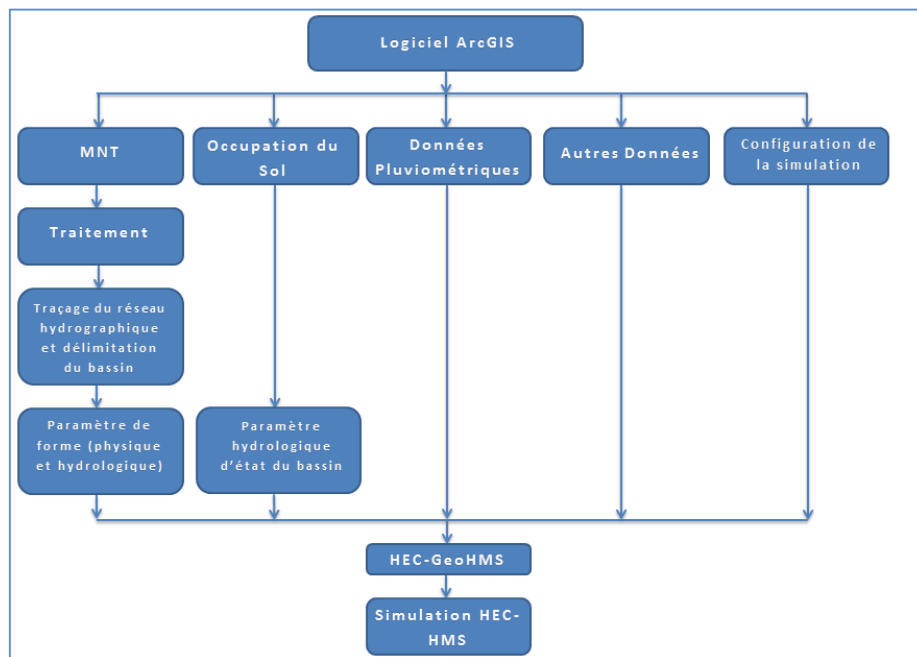


Fig. III.20 : Utilité du logiciel ArcGIS et étapes de modélisation.

III.2.2.1- HEC-GeoHMS

Le rôle principal de HEC-GeoHMS est de formuler une structure de données de bassin hydrographique sous la plateforme de SIG qui peut être importée directement dans HEC-HMS. Avec les informations topographiques fournies par HEC-GeoHMS, HEC-HMS fonctionne plus facilement et plus précisément. HEC-GeoHMS utilise ArcView et l'analyse spatiale pour développer un certain nombre d'entrées de modélisation hydrologique.

En analysant l'information de terrain numérique, HEC-GeoHMS transforme les parcours de drainage et les limites des bassins hydrographiques en une structure de données hydrologiques qui représente la réponse du bassin hydrographique aux précipitations. En plus de la structure de données hydrologiques, ces capacités comprennent le développement de données de grille pour la transformation linéaire quasi-distribuée, le modèle de bassin HEC-HMS, les caractéristiques physiques du bassin hydrographique et le fond de la carte.

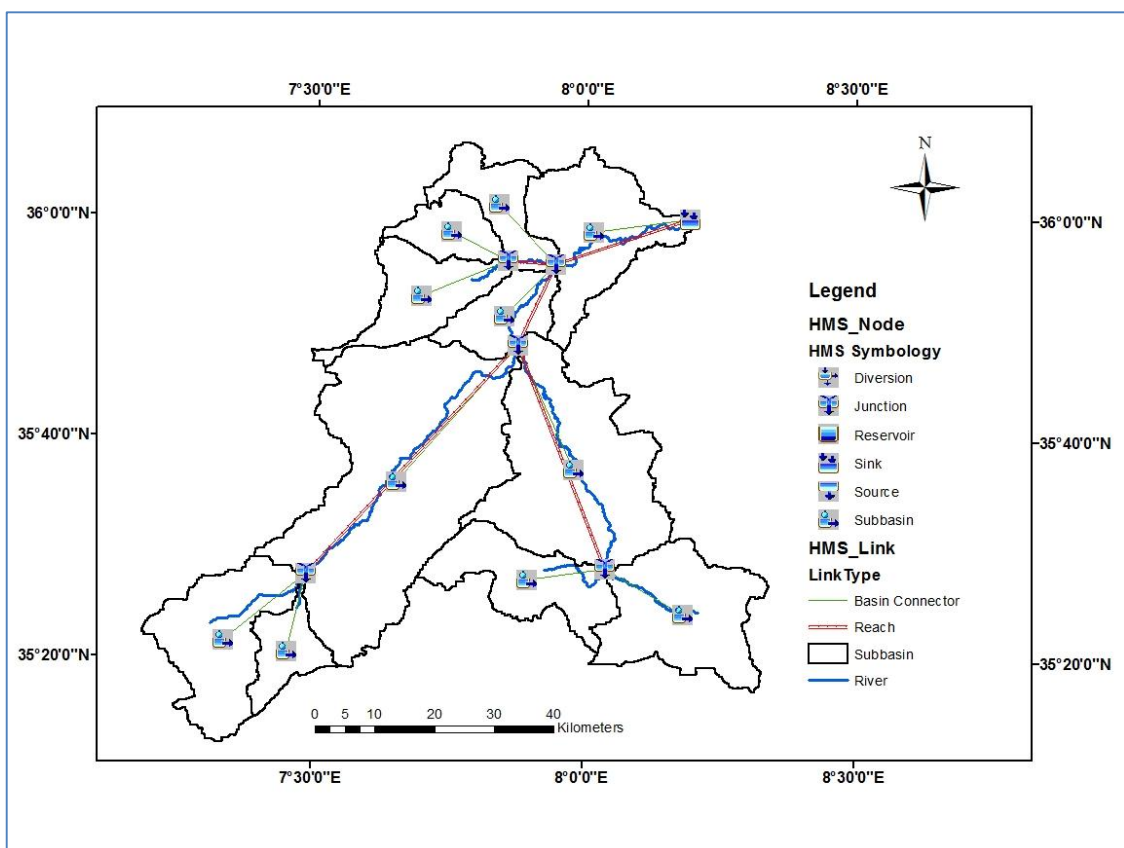


Fig. III.21 : Réseau hydrographique simulé par HEC-GeoHMS.

III.2.2.2- HEC-HMS

Le HEC-HMS est un logiciel qui simule le comportement hydrologique d'un bassin versant suite à des événements pluvieux prédéterminés, développé par Hydrologic Engineering Center (HEC) du corps de l'armée américaine des ingénieurs en 1995.

Il comprend une interface graphique, des capacités pour la manipulation, la gestion et le stockage de données, ainsi que des possibilités d'affichage et d'impression de résultats.

Ce logiciel permet de calculer des hydrogrammes des crues et leurs impacts, la conception de réservoirs et la réduction des effets des inondations. Il s'adapte 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 Logiciel permet de traiter ou de simuler à la fois différents paramètres qui seront ensuite modélisés mathématiquement par un ensemble de modèles intégrés dans le HEC-HMS. Ceci afin d'obtenir la réponse hydrologique global du bassin versant. Les paramètres sont :

- Les précipitations : Ces données peuvent correspondre à des relevés pluviométriques réels mais aussi à des événements théoriques basés sur une étude statistique.
- Les pertes (Infiltration, Retenue ou Evapotranspiration) qui permettent d'évaluer le ruissellement à partir des précipitations et des caractéristiques du bassin versant.
- Les ruissellements directs qui prennent en compte les écoulements de surface, les stockages et les pertes de charge.
- L'hydrologie fluviale, concernée par l'écoulement de l'eau dans le lit de la rivière.

Le système de modélisation hydrologique HEC-HMS est conçu pour simuler le processus précipitation ruissellement des systèmes hydrographiques denses. Il est conçu pour être appliqué aux grandes surfaces géographiques pour résoudre si possible un plus grand nombre de problèmes. Ceci inclut l'alimentation des grands bassins versants par les précipitations et l'hydrologie des crues, les petits bassins urbains ou ruissellement des cours d'eau naturels.

Les hydrogrammes produits par le code de calcul sont utilisés directement ou conjointement avec d'autres logiciels pour des études de disponibilité des ressources hydriques, drainage urbain, prévisions d'écoulement, conception d'évacuateur de crue de réservoirs, réduction des dommages d'inondation, régulation des plaines inondables, et exploitation des systèmes.

III.2.2.3- Le processus de fonctionnement

Le HEC-HMS attribue à chaque module une étape de la transformation pluie-débit. La combinaison des résultats des modules entre eux 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 :

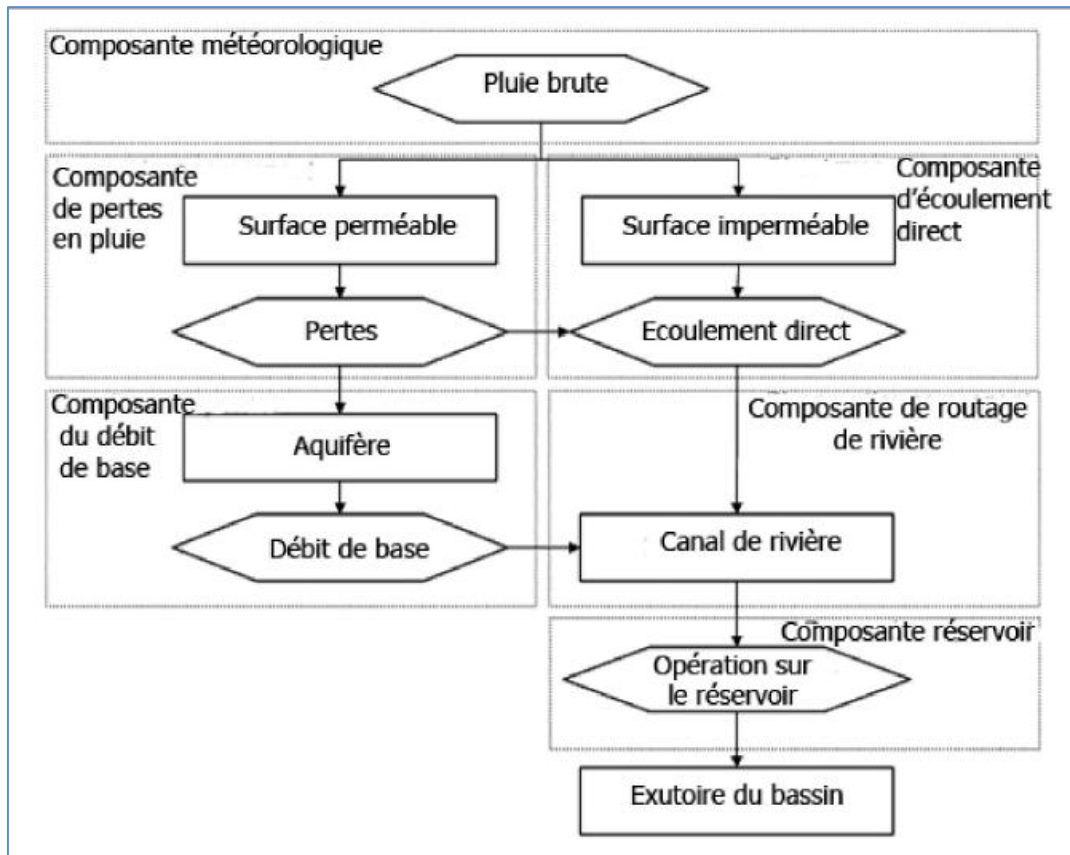


Fig. III.22 : L'enchaînement d'intervention des différentes composantes dans la structure événementielle du modèle HEC-HMS.

La première composante à agir est la hauteur des précipitations brutes saisie. Elle doit être répartie sur la surface du bassin, de manière uniforme dans le temps et l'espace. 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.

Par la suite, 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.

III.2.2.4- 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 distingue entre une surface perméable et imperméable. Il existe six formalismes pour représenter cette fonction, la sélection de l'un de ces formalismes est une étape délicate qui va influencer sans doute les sorties du modèle.

Dans cette étude le formalisme choisi est le « SCS Curve Number Loss » qui relie les pertes en pluie à l'occupation du sol et le type de sol et l'humidité antécédente.

III.2.2.5- 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. Le formalisme choisi est le « SCS Unit Hydrograph » ou Hydrogramme unitaire de la SCS. Résultant de la combinaison des hydrogrammes de plusieurs bassins versants. L'hydrogramme normalisé (qui est la moyenne de nombreux hydrogrammes unitaires calculés pour différents BVs) représente le débit d'écoulement, U_t , comme une fraction du débit maximal U_p , et T_p , l'instant du pic.

Nous avons par ailleurs les relations empiriques suivantes:

$$\begin{cases} U_p = 2.08 \frac{A}{T_p} \\ T_p = \frac{\Delta t}{2} + 0.6T_c \end{cases}$$

Où :

Δt est la durée de l'excès de précipitation et T_c est le temps de concentration du bassin. Ainsi, il suffit de connaître le temps de concentration pour remonter à T_p et U_p et d'obtenir ainsi l'hydrogramme unitaire désiré par simple multiplication de l'hydrographe unitaire normalisé.

III.2.2.6- Le module de routage

Ce module complémentaire 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.

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

La méthode de Muskingum a été développée par McCarthy (1938) ; c'est la fonction de routage la plus populaire, cette relation spécifie que le stock est proportionnel à une combinaison linéaire du débit entrant et sortant.

$$S_j = k [xQ_{am}(j)_t + (1 - x)Q_{av}(j)_t]$$

Avec :

- x : Paramètre de pondération.
- k : Paramètre du modèle (temps de stockage).
- S_j : Correspond au stockage absolu du corridor au temps t .
- $Q_{am}(j)$ et $Q_{av}(j)$: Correspondent au débit entrant et sortant.

On résout donc cette équation en la combinant avec l'équation de continuité :

$$Q_{am}(j)_t - Q_{av}(j)_t = \frac{dS(j)}{dt}$$

La solution numérique qui résulte de ces deux équations est :

$$Q_{av}(j) = C_0 Q_{am}(j) + C_1 Q_{am}(j-1) + C_2 Q_{av}(j-1)$$

Avec :

$$C_0 + C_1 + C_2 = 1$$

III.2.2.7- 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 :

- « Root Mean Square Error » ou « RMSE » : modification de la fonction objective largement utilisée qui est l'erreur sur la racine moyenne des carrés des débits.
- « 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 petits erreurs.
- « Sum of Absolute Residuals » : la somme des résidus absolus, qui ne différencie pas entre les erreurs larges et celles restreintes.
- « 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.

III.2.2.8- La fonction d'optimisation automatique

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 l'approche du simplexe qui consiste à optimiser tous les paramètres simultanément.

- « Monte Carlo » : utilisent des marches aléatoires sur les chaînes de Markov qui ont pour lois stationnaires les distributions à échantillonner.

Le choix de telle ou telle fonction est dicté par la problématique étudiée et/ou les objectifs de la modélisation. Ainsi pour notre modélisation les modules complémentaires choisis sont « Muskingum » pour le module de routage, l'« Univariate Gradient » pour la fonction d'optimisation ; le « RMSE » pour la fonction objective de minimisation et le « coefficient of determination » et le « Nash-Sutcliff » pour la fonction objective de maximisation.

III.2.2.9- Méthode SCS - CN

La méthode SCS Runoff Curve Number (Méthode SCS-CN) a été introduite en 1954 aux États-Unis par le Natural Resources Conservation Service (NRCS), autrefois appelé SCS (Soil Conservation Service). Cette méthode permet d'estimer les volumes de ruissellement associés à un événement de pluie pour un bassin-versant donné à partir de la hauteur de pluie et de certaines caractéristiques physiographiques (USDA-NRCS, 1986). L'estimation de la hauteur de ruissellement à partir de la Méthode SCS 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 :

$$P_{eff} = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S}$$

Avec :

P_{eff} : Précipitations nettes au temps (t) ;

P : Précipitations brutes au temps (t) ;

I_a : Pertes Initiales ;

S : Pertes par rétention.

Soulignons que tous ces paramètres sont exprimés en unités identiques (en millimètres pour le système SI ou en pouces pour le système impérial). Cette équation contient une quantité connue (P) et deux inconnues (I_a et S). Après avoir effectué de nombreuses expériences, le NRCS a proposé une relation empirique supplémentaire liant l'abstraction initiale (I_a) d'un bassin versant au potentiel maximum de rétention (S) :

$$I_a = 0.2 * S$$

Ceci donne donc :

$$P_{eff} = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S}$$

Pour chaque pas de temps, la pluie nette est la différence de la valeur de P_{eff} au début et à la fin du pas de temps.

Cette relation est l'équation de base permettant de calculer le ruissellement Q à partir de la précipitation P. Pour pouvoir évaluer la seule inconnue, S, le concept d'un indice de ruissellement CN a été développé. L'indice CN est relié au stockage S par la relation suivante:

$$S = \frac{25400 - 254 * CN}{CN}$$

Ou bien :

$$CN = \frac{25400}{S + 254}$$

Le CN est donc simplement une transformation non-linéaire de S qui est un paramètre de stockage; il est déterminé en considérant essentiellement les types de sol en présence dans le bassin et le couvert végétal.

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 :

$$CN_{composite} = \frac{\sum(A_i * CN_i)}{\sum A_i}$$

III.2.2.10- Les facteurs de la méthode SCS-CN

III.2.2.10.1. L'humidité antécédente

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). La hauteur de la pluie effective est étroitement liée au CN_{II} en condition normale comme le montre l'équation suivante :

$$h_{eff} = \frac{\left(h - \frac{1270}{CN_{II}} + 12.7\right)^2}{h + \frac{24130}{CN_{II}} - 241.3}$$

Il est important de noter toutefois que la méthode du NRCS a été développée à l'origine comme un indice de ruissellement pour des précipitations de 24 h et qu'elle doit être utilisée avec précaution pour analyser les quantités de ruissellement pour des durées autres que 24 h. Elle est par ailleurs moins appropriée pour l'analyse de petites précipitations et il est reconnu qu'elle devient moins précise pour des quantités de pluie inférieures à 10 mm.

Selon les conditions propres d'humidité antérieure à chaque événement, on est amené à convertir la valeur de CN normal (Tab.III.3) au CN_I sec ou humide CN_{III} en appliquant les formules ci-dessous :

$$CN_I = \frac{4.2 * CN_{II}}{10 - 0.058 * CN_{II}} \quad CN_{III} = \frac{23 * CN_{II}}{10 + 0.13 * CN_{II}}$$

On définit soit un CN normal, sec ou humide, en respectant le tableau ci-après :

Tab.III.3 : La relation pluie antérieure et type de CN pour la méthode NRCS CN (USDA-NRCS, 2004).

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(II) : Conditions humides	$H > 37.5$	$H > 53$	$H > 27.5$

III.2.2.10.2. Le type de sol

La carte de sols 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 :

Tab.III.4 : 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).

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
Argile, sols salins	D	75	1-0

En général, la perte initiale (I_a) tient compte de l'interception, du stockage dans les dépressions et de l'infiltration pendant la première partie de l'averse, avant que le ruissellement ne commence. En pratique, il n'y a pas d'écoulement superficiel jusqu'à ce que la pluie cumulée P , dépasse la perte initiale (I_a). Après le commencement du ruissellement l'infiltration réduit la rétention potentielle de la quantité d'eau infiltrée pendant l'événement.

Si l'infiltration cumulée tend vers S , l'infiltration tend vers zéro, et l'intensité de la pluie et le taux de la pluie excédentaire sont à peu près égaux.

III.2.2.10.3. L'occupation du sol

La carte d'occupation du sol sert en combinaison avec la carte des sols à déterminer la valeur de CN normal (Tab. 6, Annexe) 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. Lors de son élaboration le pourcentage d'imperméabilité en est déduit.

D'après des images satellitaires de la zone, trois scénarios d'occupation ont été élaborés. Dans cette étude, nous avons pris en compte quatre types d'occupation (Tab. III.5).

Tab.III.5 : Type d'occupation du sol et son CN associé (Simplifié) (USDA-NRCS, 2004).

Occupation de sol	Classes des sols			
	A	B	C	D
Bâties	77	85	90	91
Plan d'eau	100	100	100	100
Terres agricoles	67	78	85	89
Forêt	36	60	73	79

Les scénarios (Figures III.23, III.25, III.27) indiquent des changements de surface minimale, néanmoins visible, entre les types d'occupation. Ces scénarios ont permis le calcul des CN associés (Figures III.24, III.26, III.28).

1^{er} Scénario : Occupation du sol année 1979.

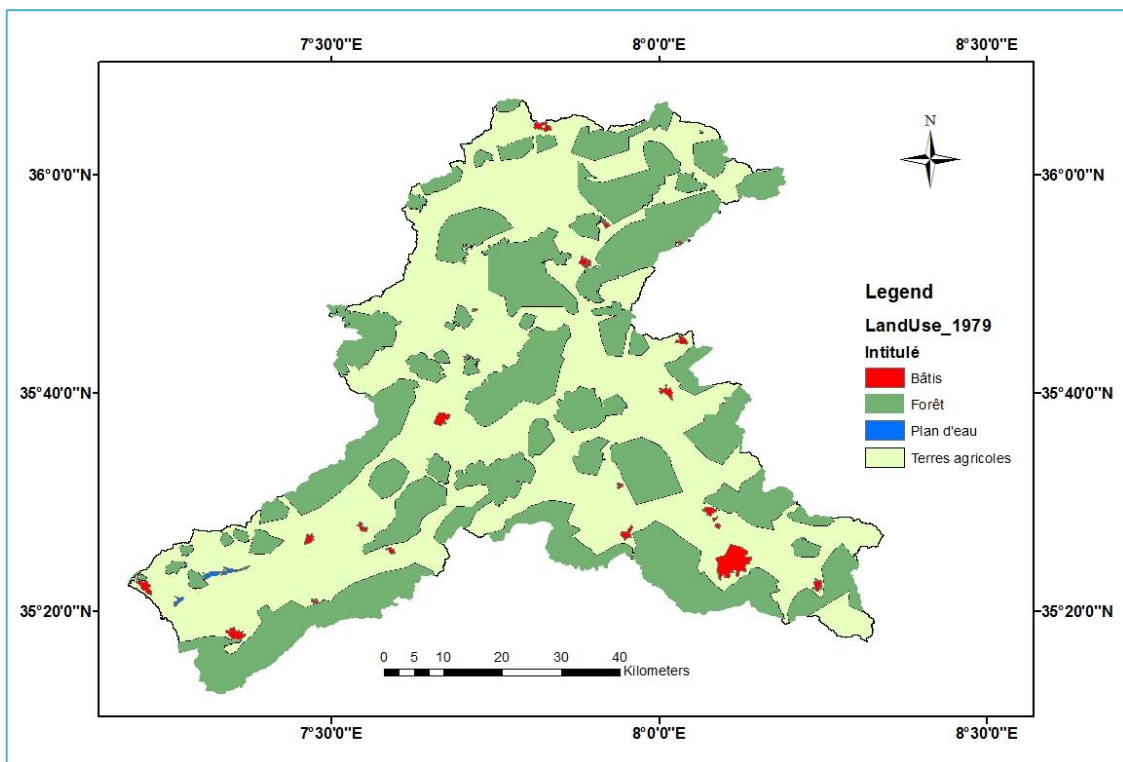


Fig. III.23 : Occupation du sol de la zone d'étude : Année 1979.

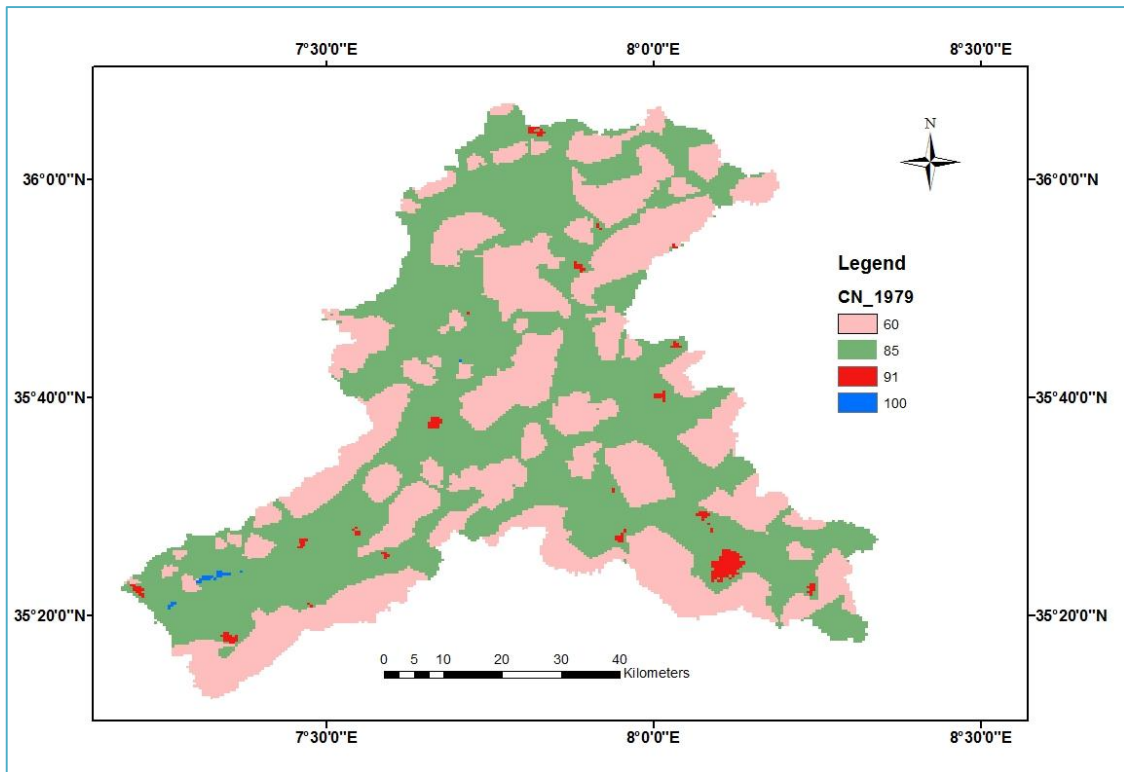


Fig. III.24 : Curve Number de la zone d'étude : Année 1979.

Tab.III.6 : Occupation du sol de la zone d'étude : Année 1979.

Classes de sol	Occupation de sol 1979		CN	Groupe de Sol
	Km ²	%		
Bâtis	43,95	0,96	91	D
Plan d'eau	4,16	0,09	100	C
Terres agricoles	2604,69	56,64	85	C
Forêt	1945,68	42,31	60	B
Total	4598,48	100	-	-

Le 1^{er} scénario (relatif à l'année 1979) montre que le pourcentage d'occupation le plus élevé est celui des terres agricoles, suivi par celui des forêts. Les pourcentages de surface occupé par les bâtis et les plans d'eau est inférieur à 1%.

2^{eme} Scénario : Occupation du sol année 1989.

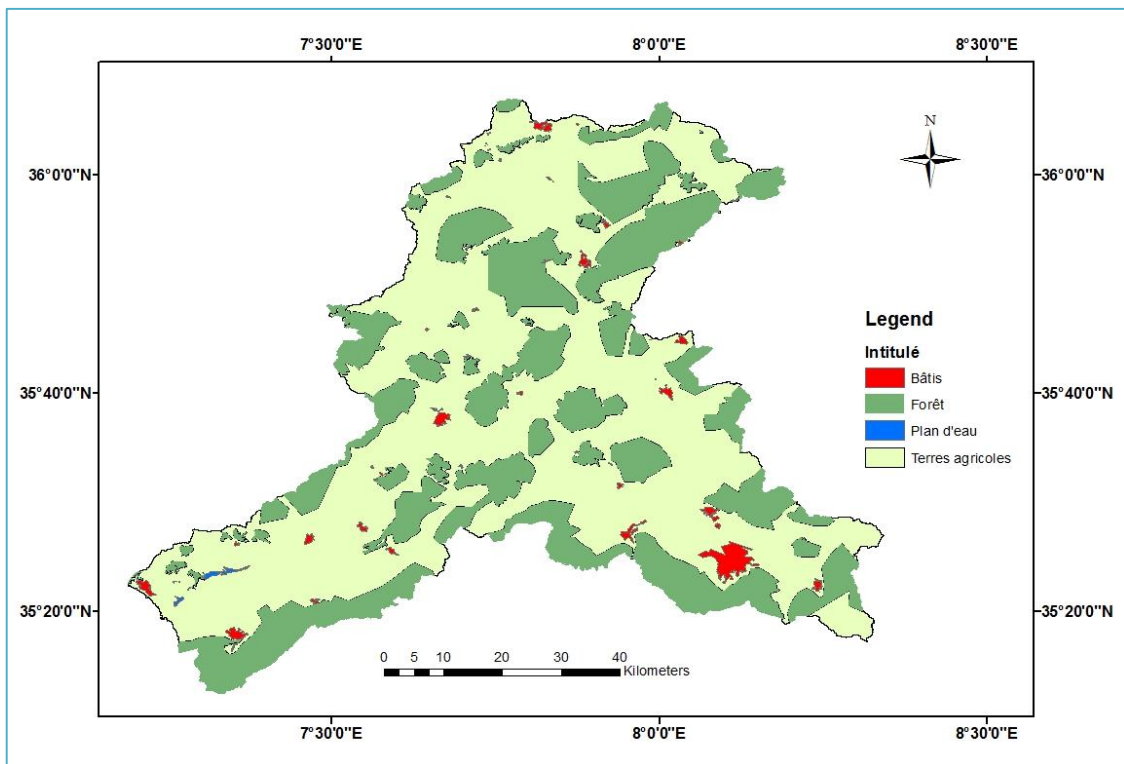


Fig. III.25 : Occupation du sol de la zone d'étude : Année 1989.

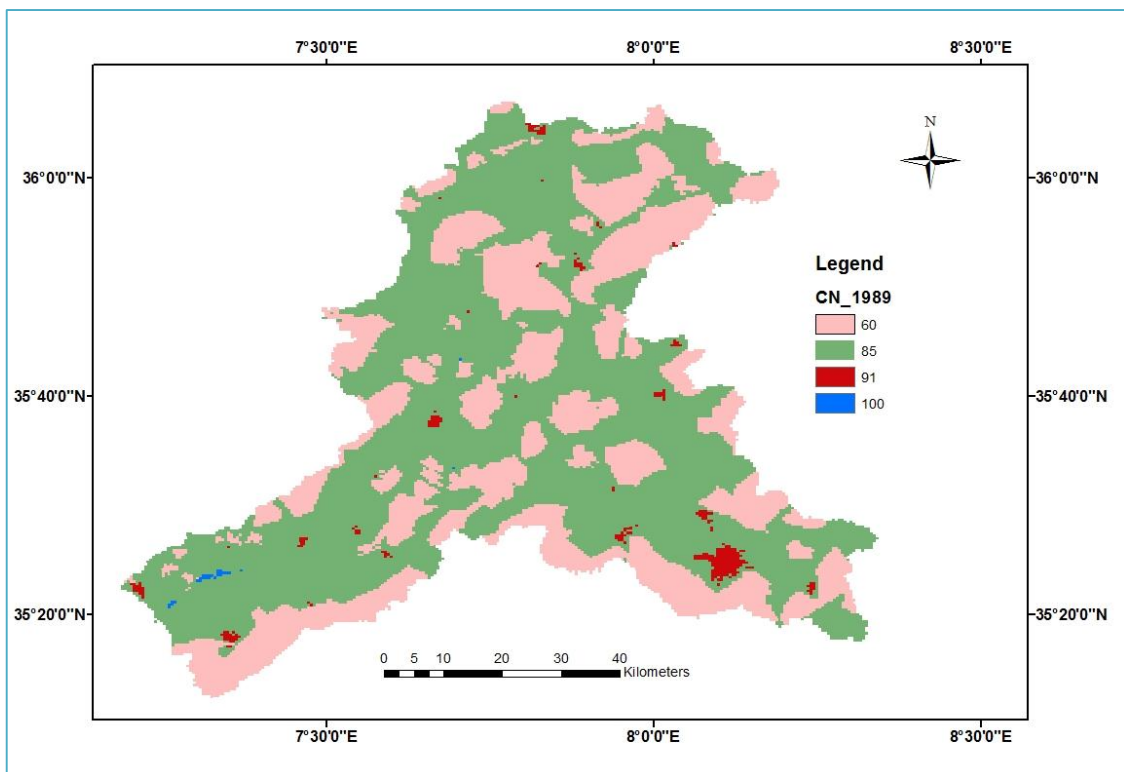


Fig. III.26 : Curve Number de la zone d'étude : Année 1989.

Tab.III.7 : Occupation du sol de la zone d'étude : Année 1989.

Classes de sol	Occupation de sol 1989		CN	Groupe de Sol
	Km ²	%		
Bâtis	56,94	1,24	91	D
Plan d'eau	4,38	0,10	100	C
Terres agricoles	2892,55	62,90	85	C
Forêt	1644,61	35,76	60	B
Total	4598,48	100	-	-

Identiquement au 1^{er} scénario, le 2nd scénario (relatif à l'année 1989) indique que le pourcentage d'occupation par les terres agricoles est majoritaire. Il est cependant observé une augmentation des surfaces occupées par les terres agricoles (+6.26%), les bâtis (+0.28%) et les plans d'eau (+0.01%) aux dépens des forêts (-6.55%).

3^{ème} Scénario : Occupation du sol année 2004.

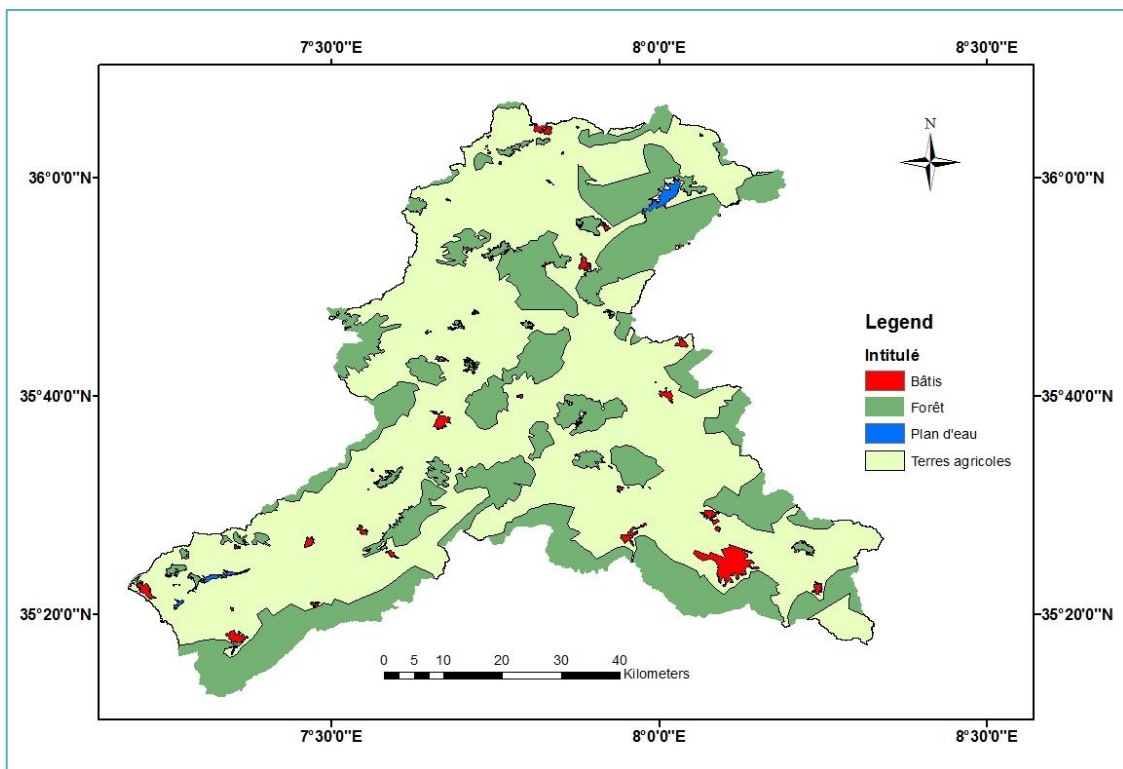


Fig. III.27 : Occupation du sol de la zone d'étude : Année 2004.

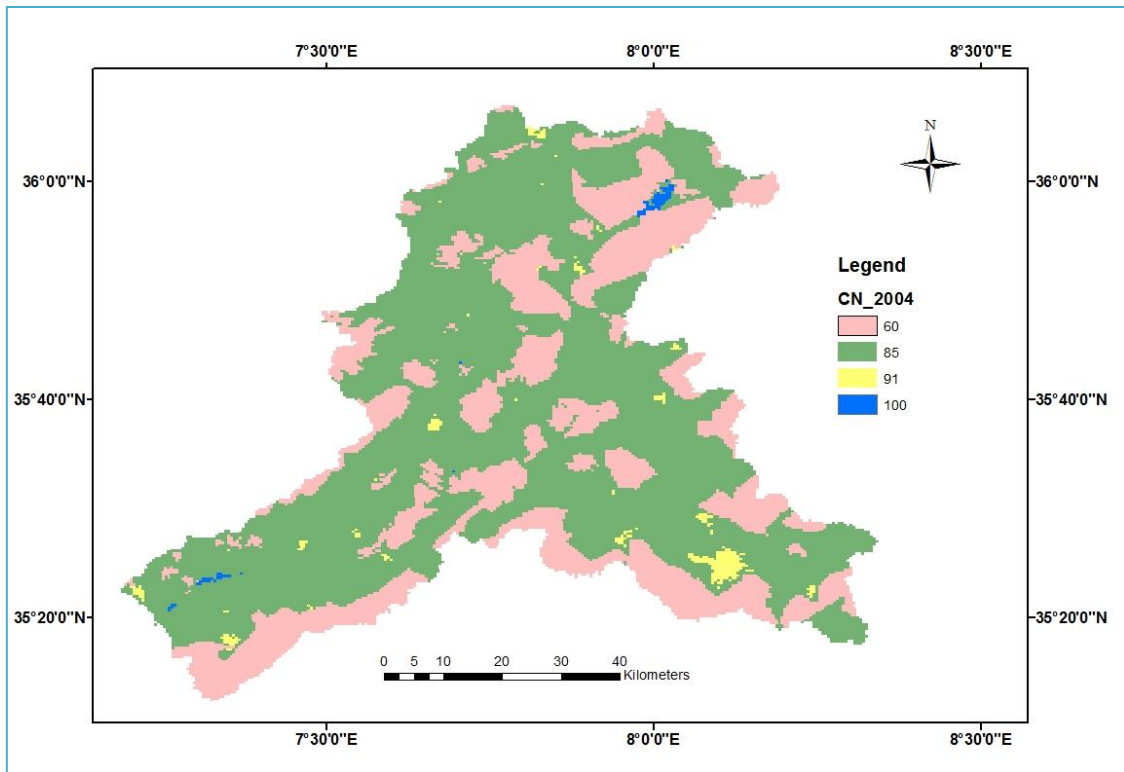


Fig. III.28 : Curve Number de la zone d'étude : Année 2004.

Tab.III.8 : Occupation du sol de la zone d'étude : Année 2004.

Classes de sol	Occupation de sol 2004		CN	Groupe de Sol
	Km ²	%		
Bâtis	58,38	1,27	91	D
Plan d'eau	13,78	0,30	100	C
Terres agricoles	3083,81	67,06	85	C
Forêt	1442,50	31,37	60	B
Total	4598,48	100	-	-

Dans le 3^{ème} scenario (2004) le pourcentage d'occupation par les terres agricoles reste dominant. L'augmentation des surfaces occupées par les terres agricoles (+10.42%, par rapport à 1979) et (+4.16%, par rapport à 1989), les bâtis et les plans d'eau aux dépens des forêts est continu.

III.2.2.10.4. Le temps de réponse (Lag time)

Le temps de réponse est le décalage temporel observé sur des crues simples, entre le pic d'intensité des pluies et la pointe de crue. Il est défini par la formule:

$$t_L = \frac{L^{0.8} \left(\left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) + 1 \right)^{0.7}}{1900 * I^{0.5}}$$

t_L : Temps de réponse (Lag time) [hr].

L : Plus grande longueur hydraulique [m].

CN : Nombre de courbe (Curve Number).

I : Pente [%].

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.3- L'Indice Standardisé des Précipitations

L'Indice Standardisé des Précipitations SPI est un indice permettant de mesurer la sécheresse météorologique. Il s'agit d'un indice de probabilité qui repose seulement sur les précipitations. Les probabilités sont standardisées de sorte qu'un SPI de 0 indique une quantité de précipitation médiane. L'indice est négatif pour les sécheresses, et positif pour les conditions humides (T.B. McKee, 1993).

Le SPI répond à la formule Suivante :

$$SPI = (X_i - X_m) / S_i$$

Où X_i est le cumul de la pluie pour une année i ; X_m et S_i , sont respectivement la moyenne et l'écart type des pluies annuelles observées pour une série donnée.

Les principaux avantages du SPI sont les suivants :

- Il peut être comparé pour des régions aux climats différents ;
- La normalisation de l'indice permet de déterminer la rareté d'une sécheresse.

L'utilisation de cet indice est en outre recommandée par l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM).

Tab.III.9 : Valeurs et signification du SPI.

Classes du SPI	Degré de précipitation	Degré de sècheresse
$SPI \geq 2.0$	plus de précipitations que la normale	Extrêmement humide
$1 < SPI < 2$		Humidité forte
$0 < SPI < 1$	précipitations proches de la normale	Humidité modérée
$-1 < SPI < 0$		Sècheresse modérée
$-2 < SPI < -1$	moins de précipitations que la normale	Sècheresse forte
$SPI \leq -2$		Extrêmement sec

Chapitre IV :
Résultats et Discussion.

Chapitre IV : Résultats et Discussion.

IV.1-Introduction

Dans ce chapitre, il s'agit de présenter les résultats issus de la modélisation hydrologique effectuée par l'application du modèle de pertes par infiltration SCS-CN du HEC-HMS. En outre une étude de performance du modèle sera illustrée, ainsi qu'une analyse des Indices Standardisés des Précipitations (SPI) sera détaillée.

IV.2- Modélisation hydrologique du bassin versant par HEC-HMS

La modélisation hydrologique par HEC-HMS du bassin versant Mellegue a été effectuée en introduisant différentes données, telles que la surface du bassin versant, sa topographie, occupation de sol et son réseau hydrographique. La délimitation du bassin versant, calcul de ses surfaces et l'extraction du réseau hydrographique ont été effectués par le HEC-GeoHMS (Fig. IV.1).

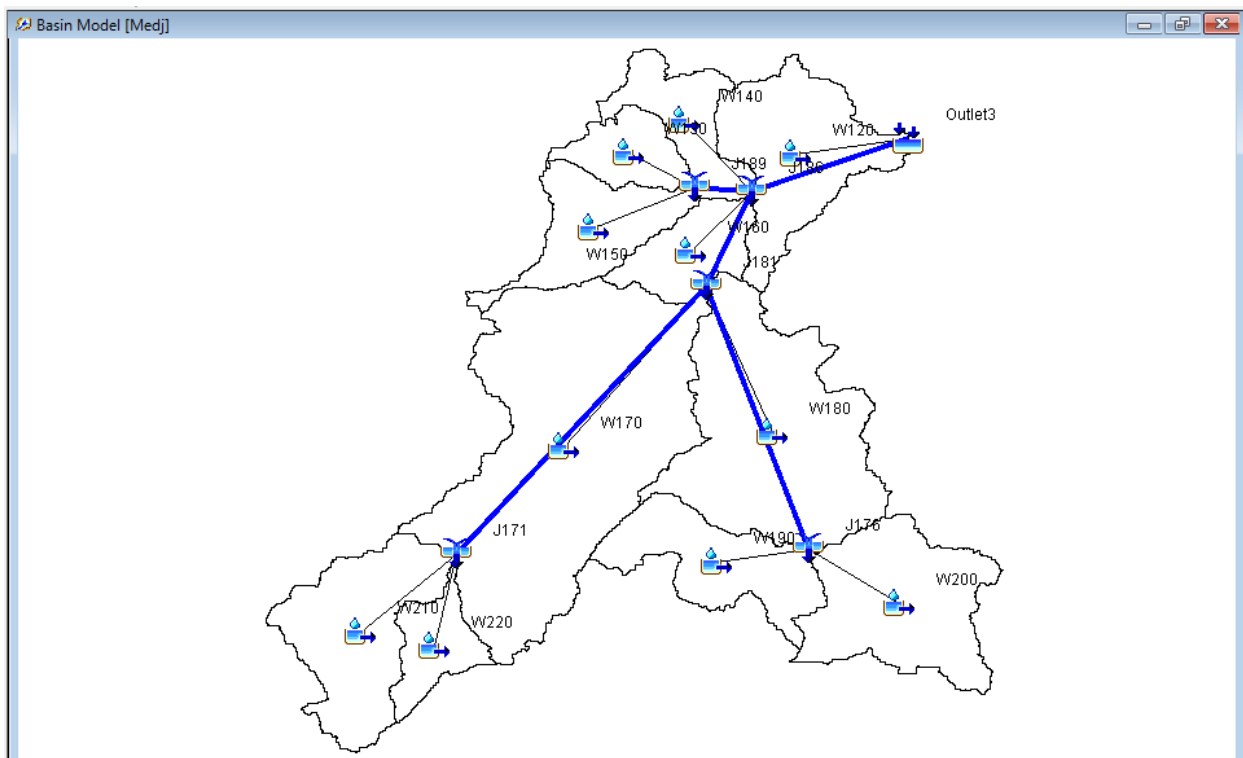


Fig. IV.1 : Le bassin Mellegue sous HEC-HMS.

IV.2.1- Modèle des pertes par infiltration (SCS-CN)

Le modèle de perte par infiltration SCS-CN nécessite des données locales du bassin versant pour faciliter son application (Tab.IV.1). Le bassin est divisé en (11) onze sous bassins (Fig. IV.1). Les 11 sous bassins sont soumis à trois scénarios de précipitations et d'occupation du sol.

Tab.IV.1 : Caractéristiques des sous bassin selon les scenarios (climatique et occupation de sol).

Sous-Bassin	Surface (km2)	Surface (%)	Land use 1979			Land use 1989			Land use 2004		
			CN	% Impervious	Lag time (min)	CN	% Impervious	Lag time (min)	CN	% Impervious	Lag time (min)
W120	422.2	9.16	69.63	0.000734788	571.61	71.6	0.000949101	541.77	72.085	0.0079755	534.58
W130	145.28	3.15	80.959	0	315.82	81.523	0.0013824	310.16	83.641	0.0014158	289.21
W140	196.1	4.26	77.887	0.0142222	425.16	79.599	0.0234733	403.52	79.954	0.0250864	399.09
W150	260.28	5.65	76.254	0	562.92	76.254	0	562.92	79.938	0	503.66
W160	186.82	4.05	69.521	0.008283	436.01	70.297	0.0149784	426.97	72.109	0.0153408	406.31
W170	1279.6	27.77	74.203	0.0038877	962.89	76.782	0.005658	893.65	78.075	0.0058448	859.84
W180	778.02	16.88	75.725	0.0059863	715.67	77.9	0.0082478	671.16	79.303	0.0084473	643.1
W190	314.53	6.82	71.808	0.0054772	398.71	74.073	0.0115768	374.26	74.089	0.0151504	374.09
W200	464.64	10.08	74.754	0.0402094	393.3	74.842	0.0701152	392.31	75.823	0.0726981	381.35
W210	415.32	9.01	78.247	0.0171394	612.68	79.344	0.0264524	592.5	79.73	0.0301768	585.45
W220	145.77	3.16	71.807	0.0021262	415.79	72.056	0.0027464	412.94	72.056	0.0028128	412.94

*Land use : Occupation du sol.

**Impervious : Imperméabilité.

IV.2.2- Hyétogrammes et Hydrogrammes obtenus après simulation

Les résultats obtenus par le modèle de transfert choisi pour cette étude, le modèle de l'hydrogramme unitaire de SCS, sont illustrés ci-dessous :

IV.2.2.1- Sous-bassin W120 :

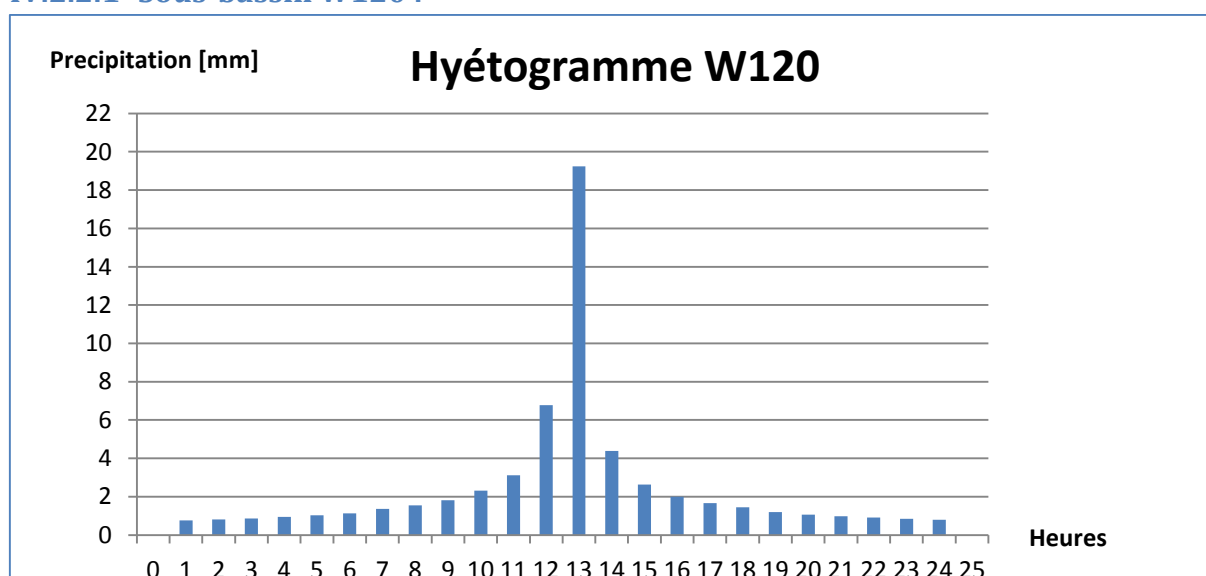


Fig. IV.2 : Hyétogramme du sous bassin W120.

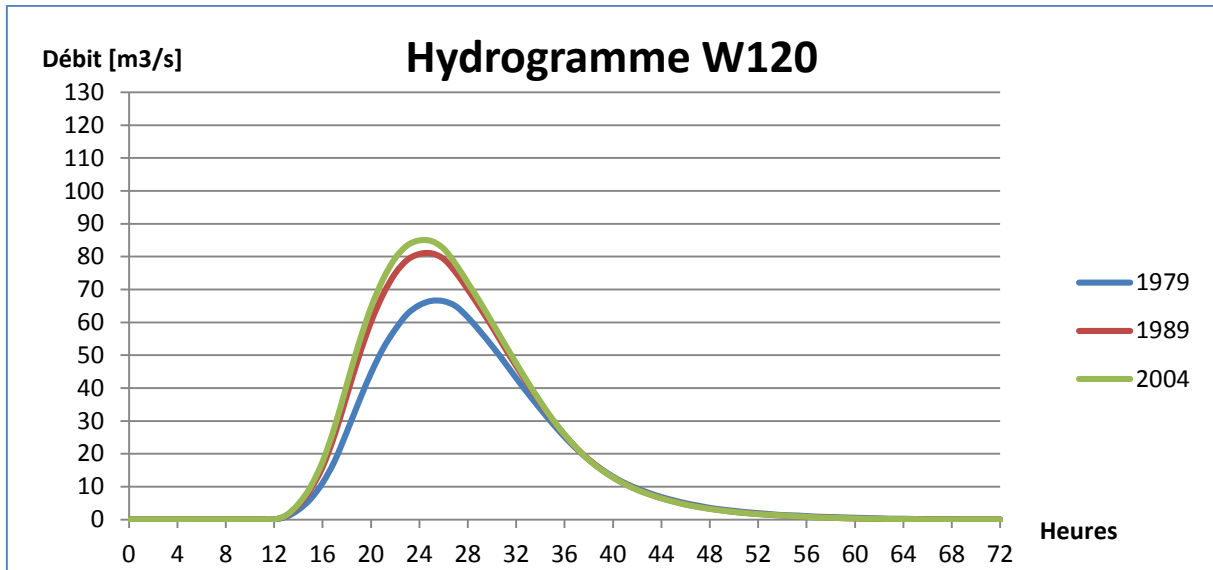


Fig. IV.3 : Hydrogramme du sous bassin W120.

Tab.IV.2 : Apports hydrologiques du SB W120.

W120			
Années	1979	1989	2004
Débit de pointe [m ³ /s]	66.5	81	84.9
Volume de précipitation [mm]	59.62		
Volume de perte [mm]	50.15	48.51	48.08
Volume de ruissellement direct [mm]	9.47	11.11	11.54
Temps de pic [h]	25:00	25:00	24:00

IV.2.2.2- Sous-bassin W130 :

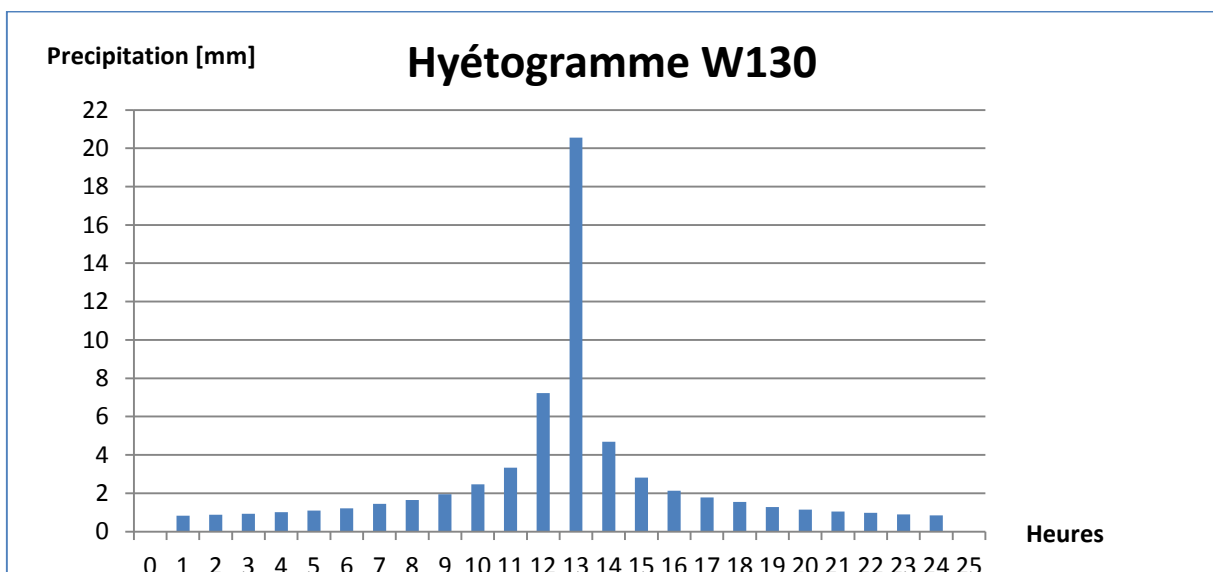


Fig. IV.4 : Hyétogramme du sous bassin W130.

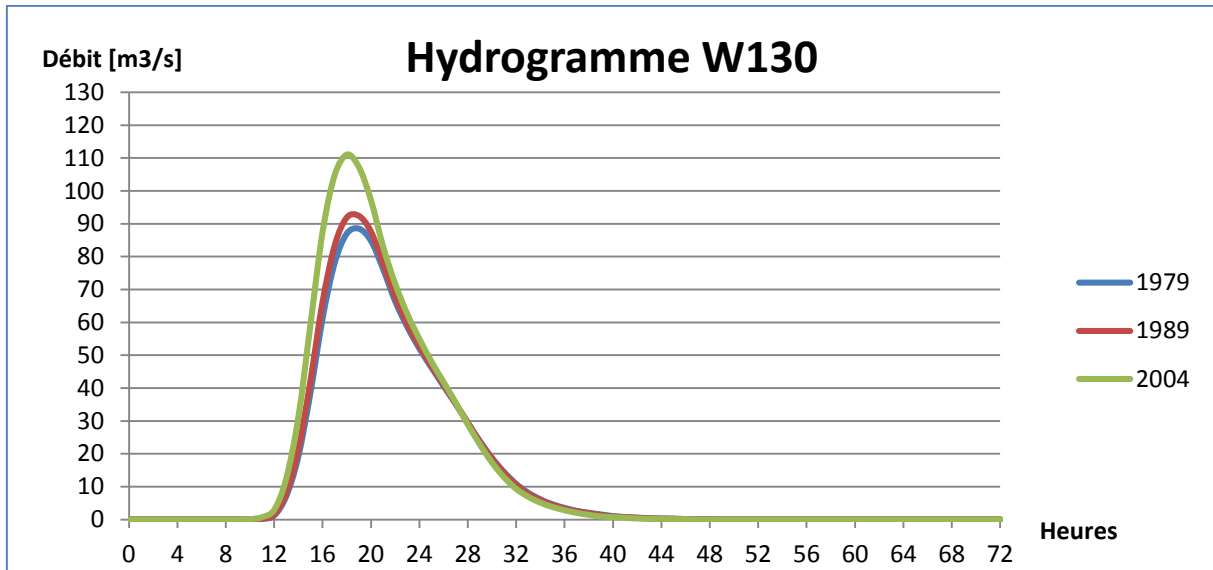


Fig. IV.5 : Hydrogramme du sous bassin W130.

Tab.IV.3 : Apports hydrologiques du SB W130.

W130			
Années	1979	1989	2004
Débit de pointe [m³/s]	88.5	92.4	111
Volume de précipitation [mm]	63.71		
Volume de perte [mm]	39.68	38.89	35.76
Volume de ruissellement direct [mm]	24.03	24.82	27.95
Temps de pic [h]	19:00	19:00	18:00

IV.2.2.3- Sous-bassin W140 :

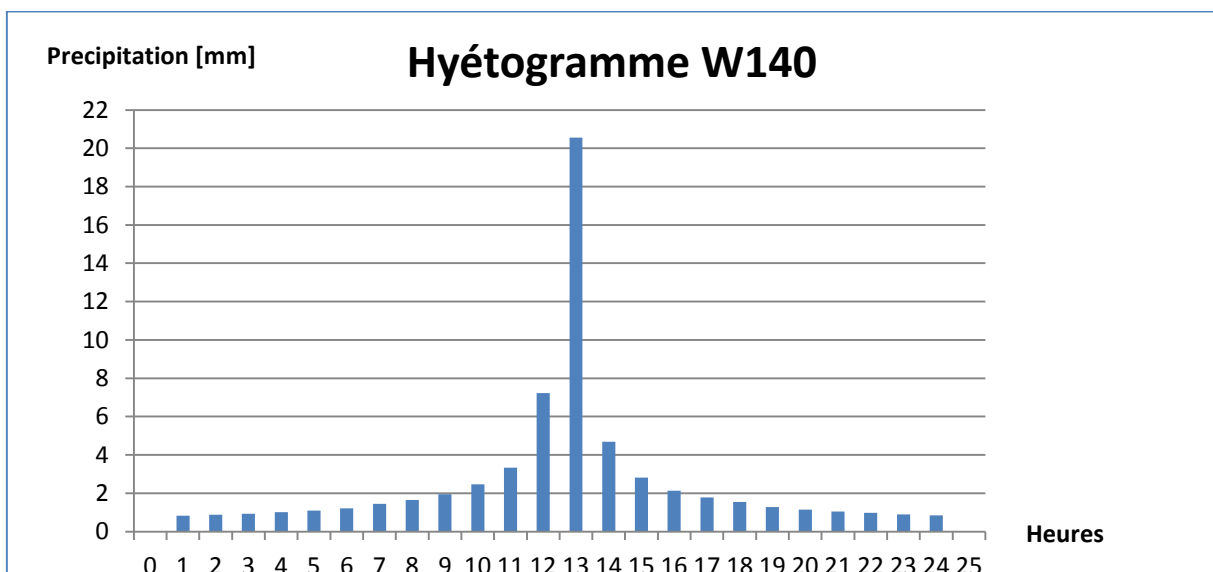


Fig. IV.6 : Hyétogramme du sous bassin W140.

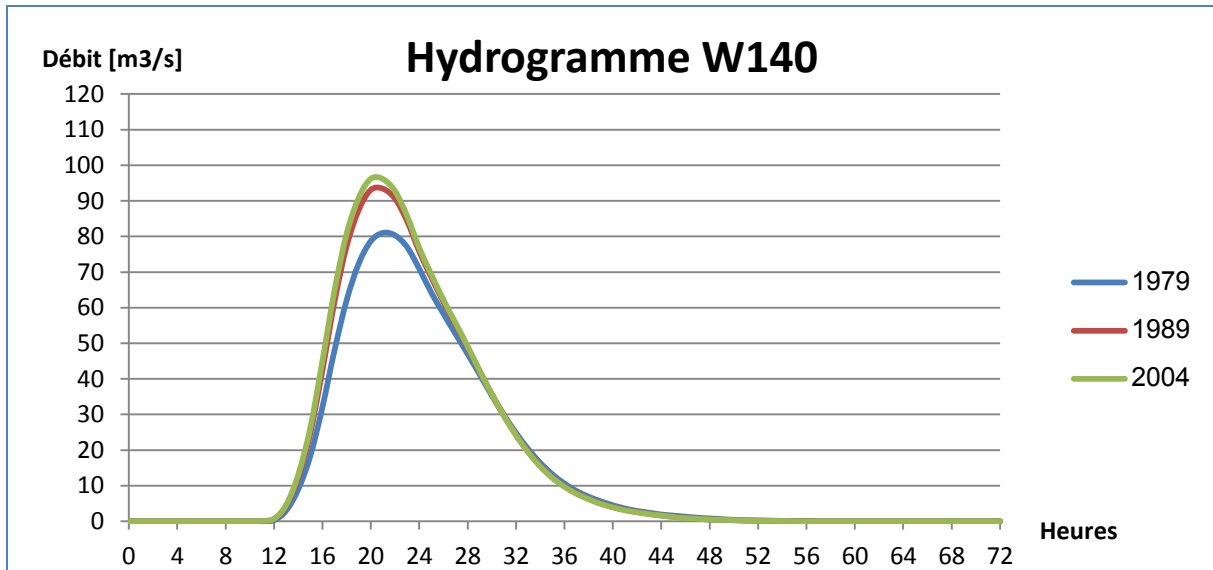


Fig. IV.7 : Hydrogramme du sous bassin W140.

Tab.IV.4 : Apports hydrologiques du SB W140.

W140			
Années	1979	1989	2004
Débit de pointe [m3/s]	81	93.4	96.2
Volume de précipitation [mm]	63.71		
Volume de perte [mm]	43.69	41.51	41.04
Volume de ruissellement direct [mm]	20.2	22.2	22.67
Temps de pic [h]	21:00	21:00	20:00

IV.2.2.4- Sous-bassin W150 :

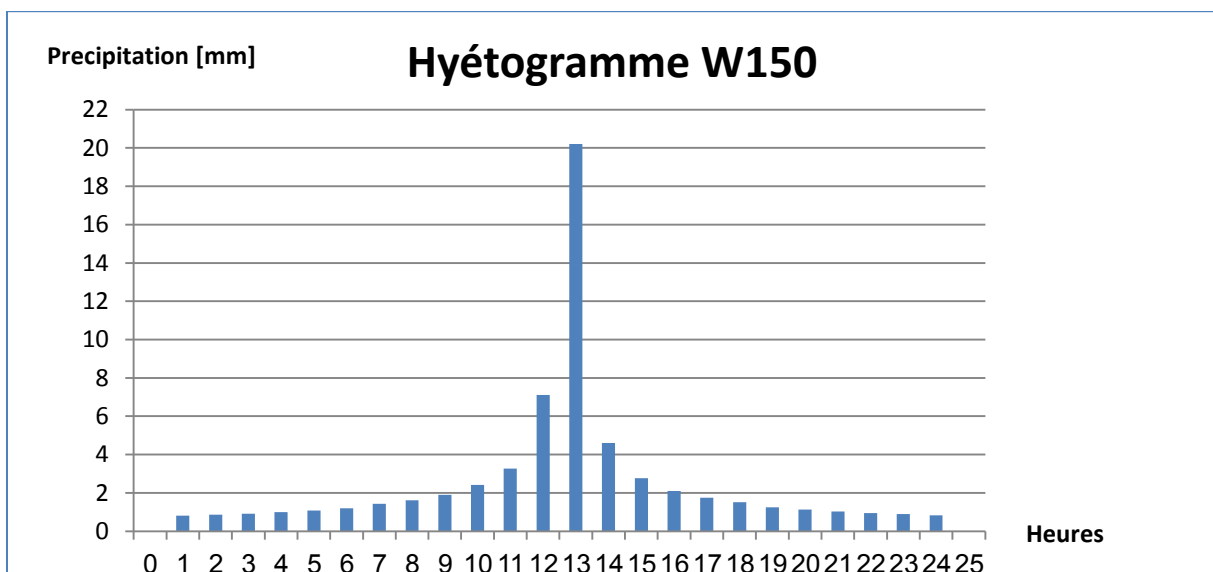


Fig. IV.8 : Hyétogramme du sous bassin W150.

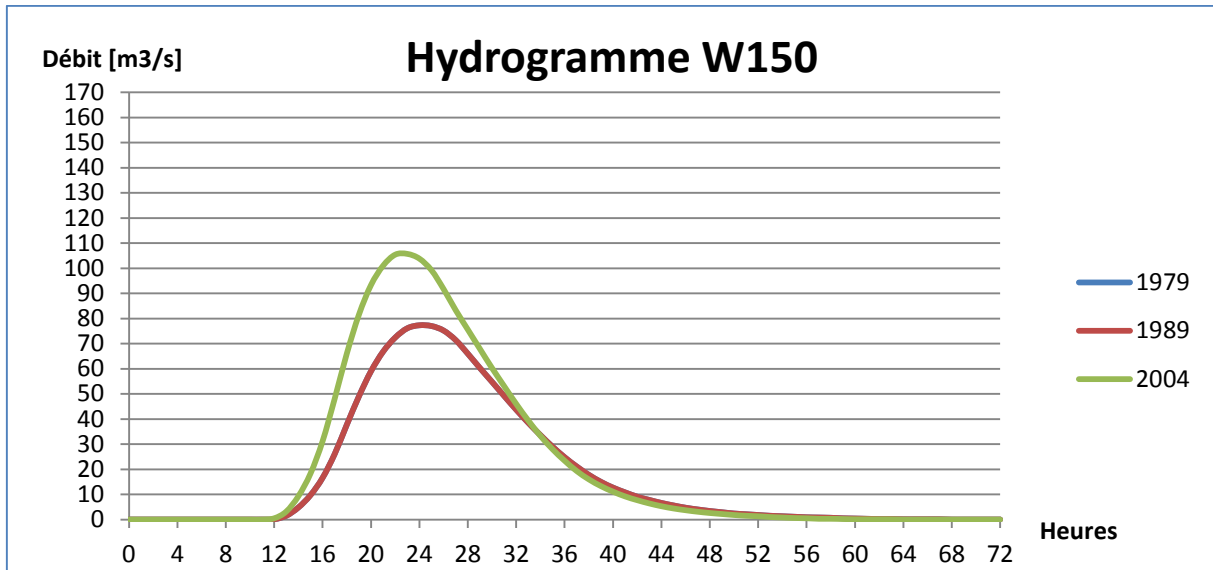


Fig. IV.9 : Hydrogramme du sous bassin W150.

Tab.IV.5 : Apports hydrologiques du SB W150.

W150			
Années	1979	1989	2004
Débit de pointe [m3/s]	77.3	77.3	105.7
Volume de précipitation [mm]	62.6		
Volume de perte [mm]	45.21	45.21	40.72
Volume de ruissellement direct [mm]	17.38	17.38	21.87
Temps de pic [h]	24:00	25:00	23:00

IV.2.2.5- Sous-bassin W160 :

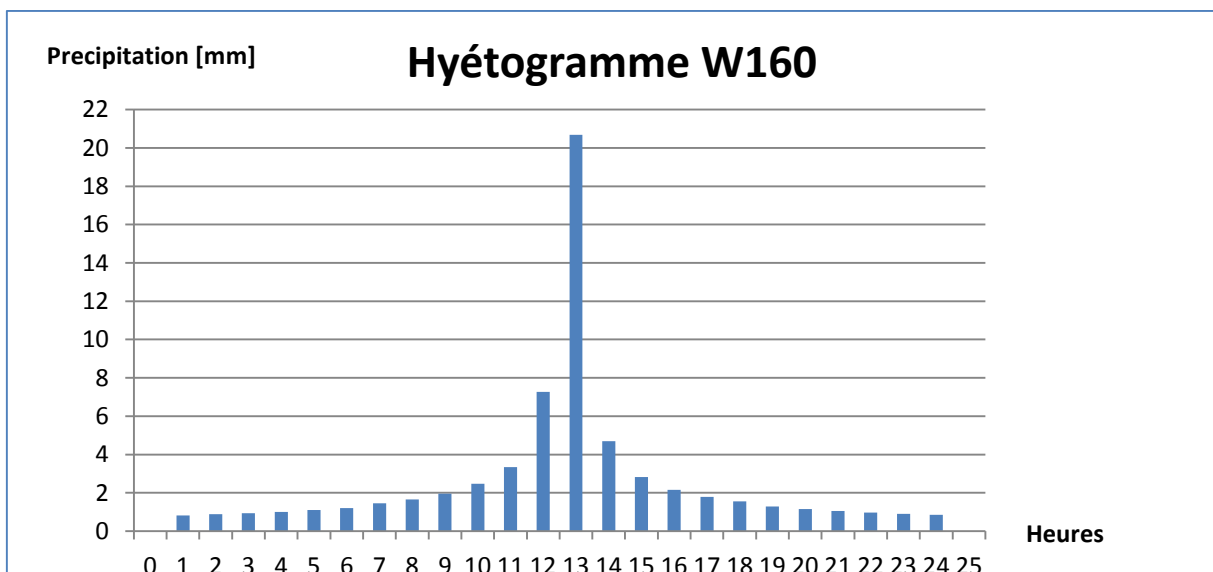


Fig. IV.10 : Hyétogramme du sous bassin W160.

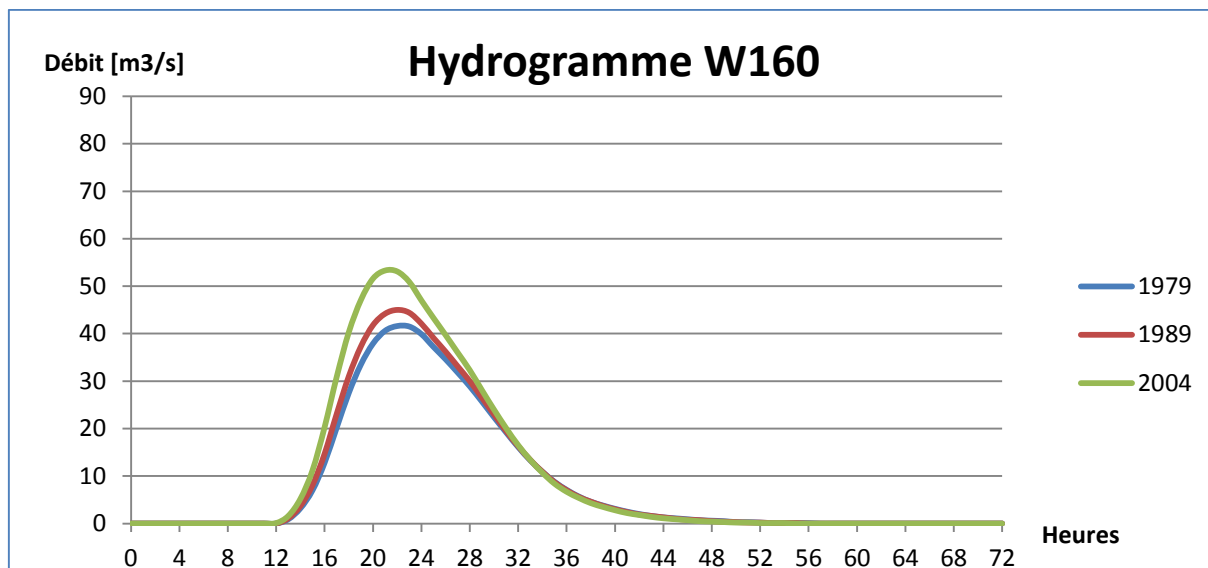


Fig. IV.11 : Hydrogramme du sous bassin W160.

Tab.IV.6 : Apports hydrologiques du SB W160.

W160			
Années	1979	1989	2004
Débit de pointe [m³/s]	41.6	45	53.3
Volume de précipitation [mm]	64.07		
Volume de perte [mm]	52.66	51.95	50.23
Volume de ruissellement direct [mm]	11.41	12.11	13.84
Temps de pic [h]	22:00	22:00	21:00

IV.2.2.6- Sous-bassin W170 :

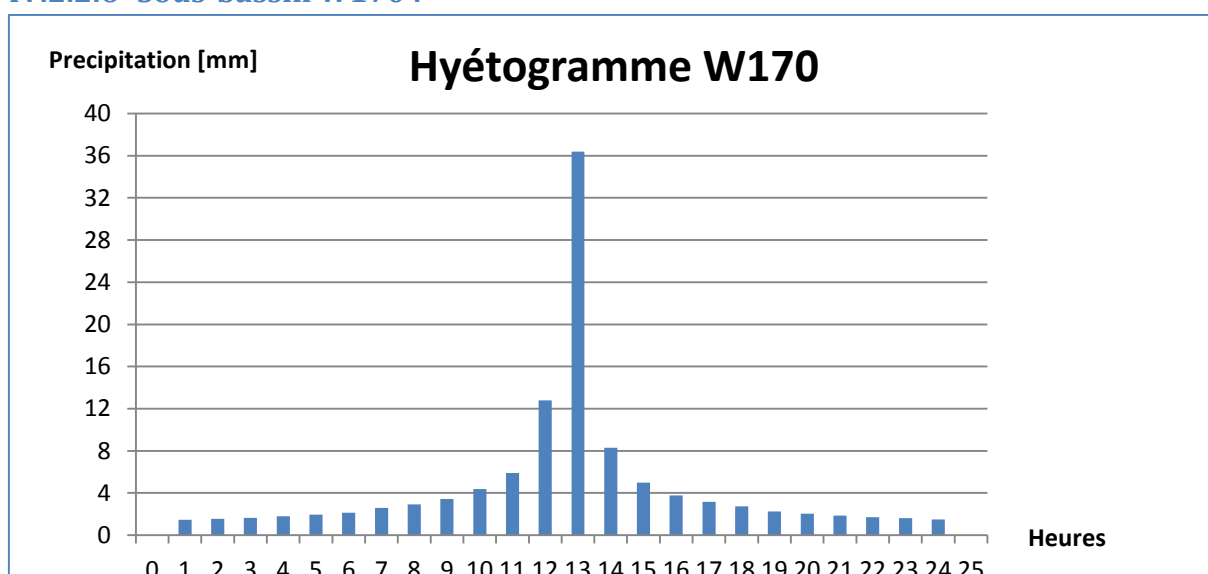


Fig. IV.12 : Hyétogramme du sous bassin W170.

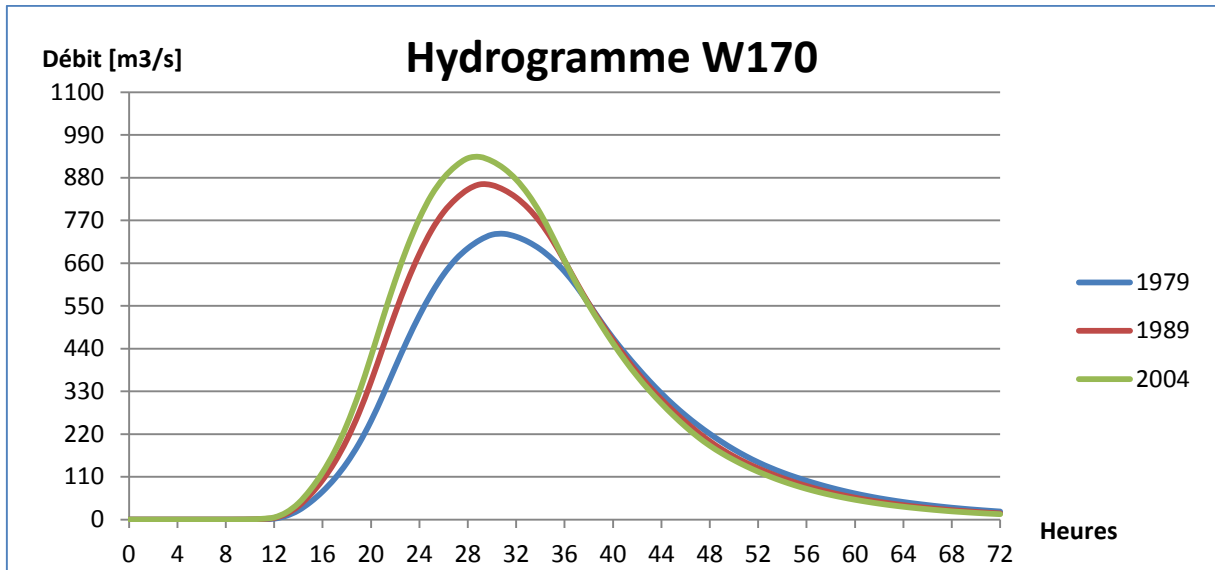


Fig. IV.13 : Hydrogramme du sous bassin W170.

Tab.IV.7 : Apports hydrologiques du SB W170.

W170			
Années	1979	1989	2004
Débit de pointe [m3/s]	735.6	862.9	933.6
Volume de précipitation [mm]	112.76		
Volume de perte [mm]	63.45	58.3	55.63
Volume de ruissellement direct [mm]	49.78	54.1	57.84
Temps de pic [h]	31:00	29:00	29:00

IV.2.2.7- Sous-bassin W180 :

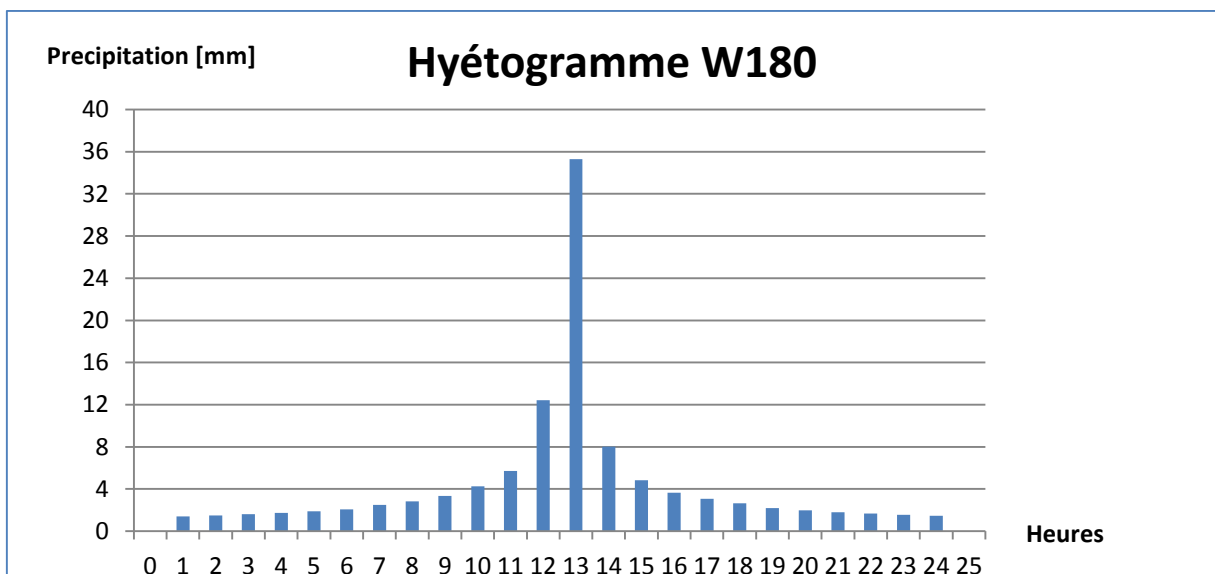


Fig. IV.14 : Hyétogramme du sous bassin W180.

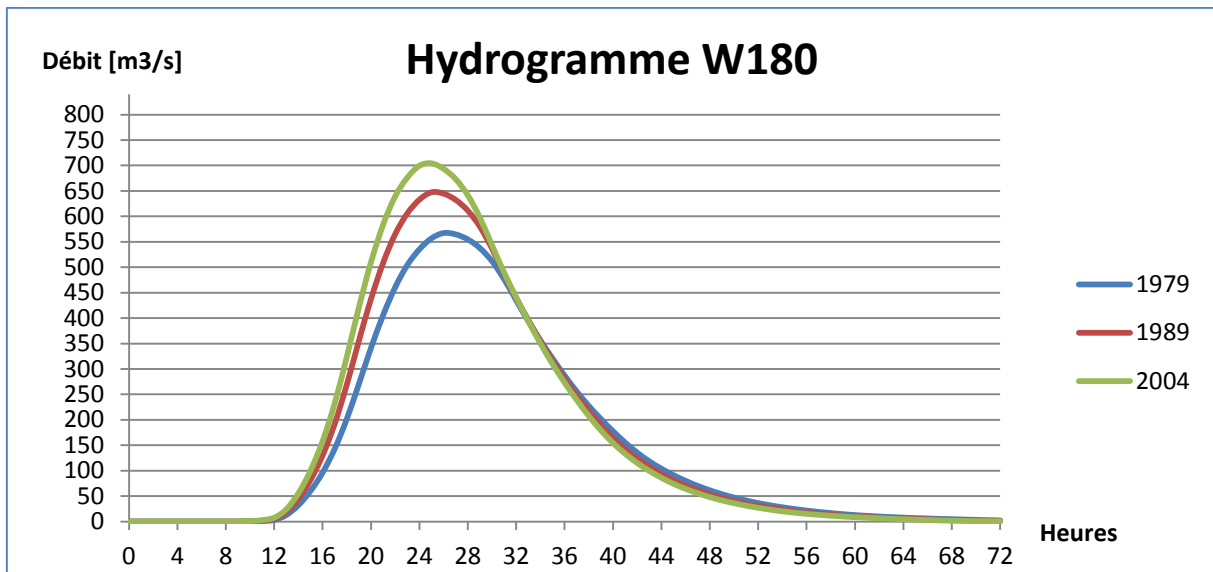


Fig. IV.15 : Hydrogramme du sous bassin W180.

Tab.IV.8 : Apports hydrologiques du SB W180.

W180			
Années	1979	1989	2004
Débit de pointe [m³/s]	567.2	647.3	704.2
Volume de précipitation [mm]	109.38		
Volume de perte [mm]	59.72	55.38	52.49
Volume de ruissellement direct [mm]	49.63	54	56.89
Temps de pic [h]	26:00	25:00	25:00

IV.2.2.8- Sous-bassin W190 :

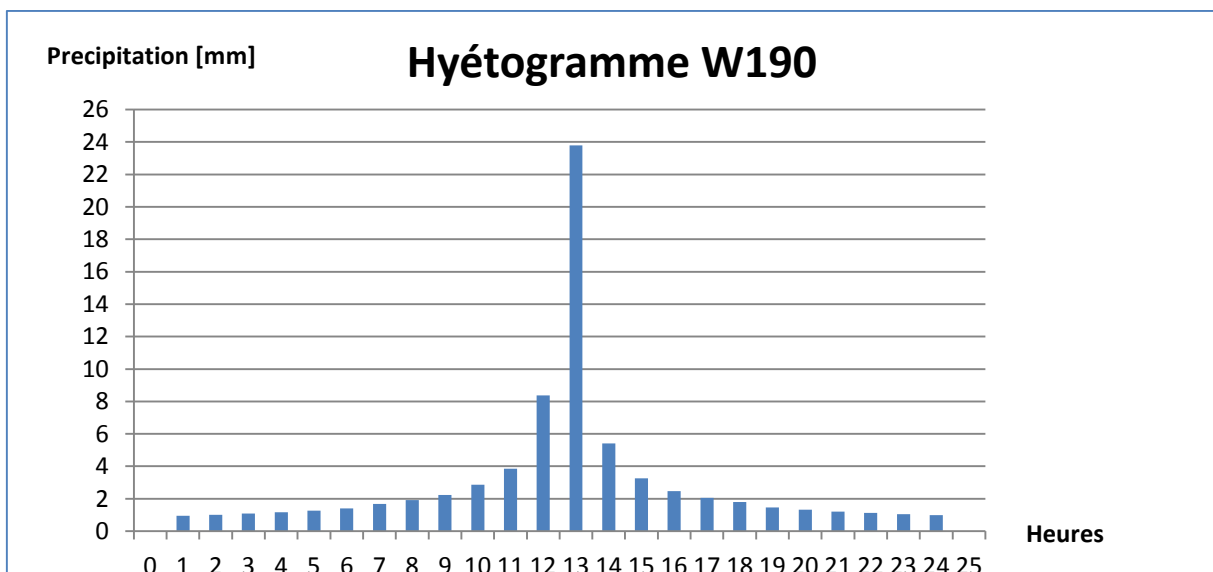


Fig. IV.16 : Hyétogramme du sous bassin W190.

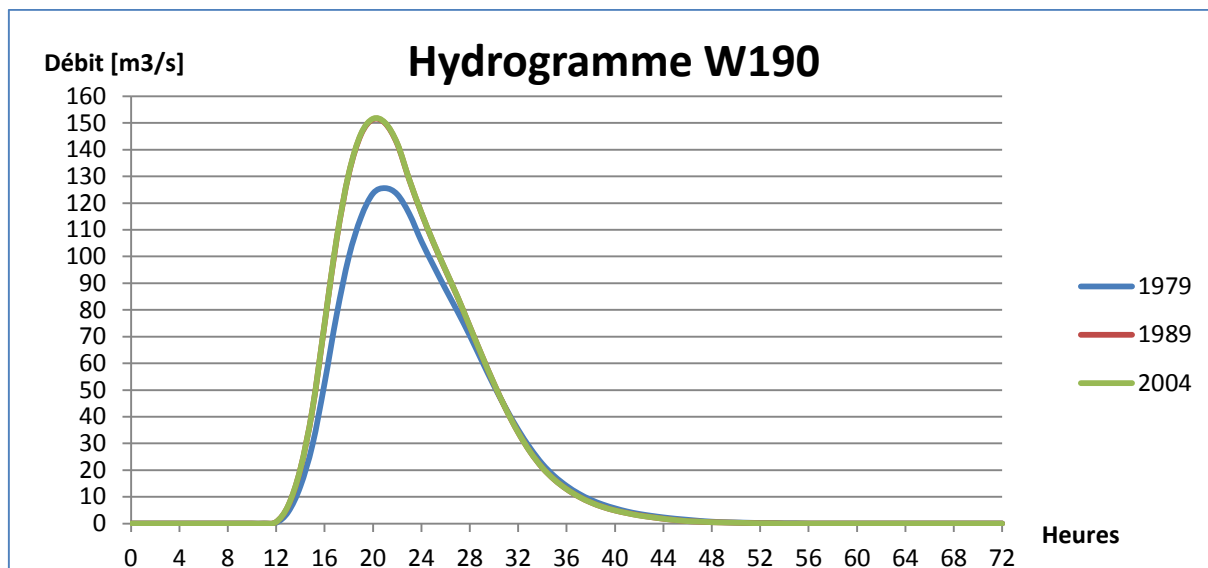


Fig. IV.17 : Hydrogramme du sous bassin W190.

Tab.IV.9 : Apports hydrologiques du SB W190.

W190			
Années	1979	1989	2004
Débit de pointe [m3/s]	125.6	151.4	151.6
Volume de précipitation [mm]	73.75		
Volume de perte [mm]	54.89	52.12	52.1
Volume de ruissellement direct [mm]	18.86	21.63	21.65
Temps de pic [h]	21:00	20:00	20:00

IV.2.2.9- Sous-bassin W200 :

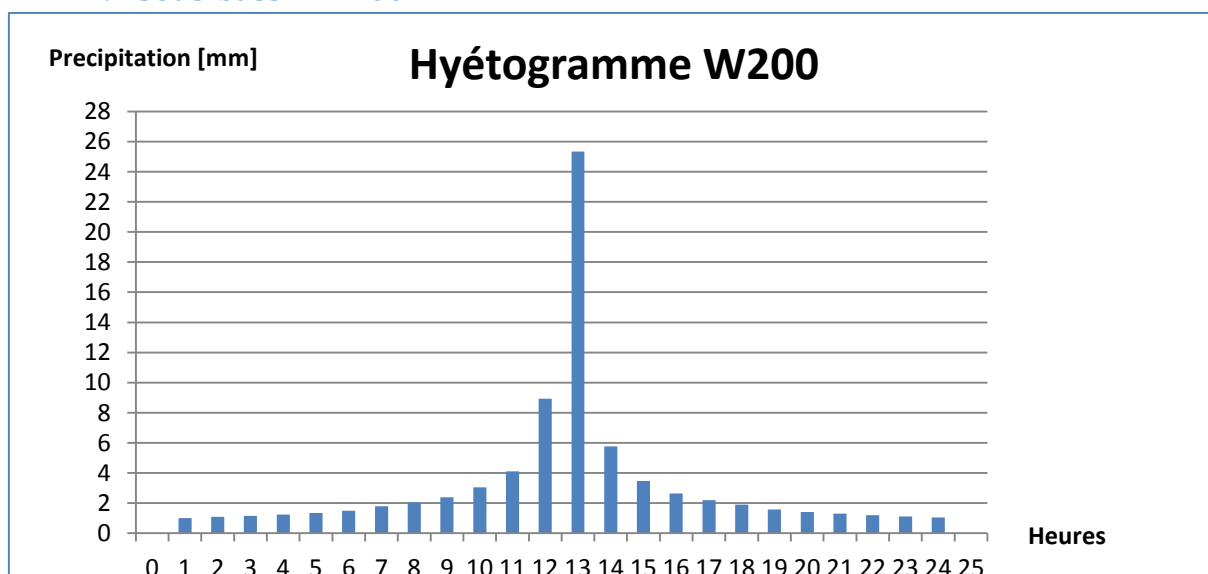


Fig. IV.18 : Hyétogramme du sous bassin W200.

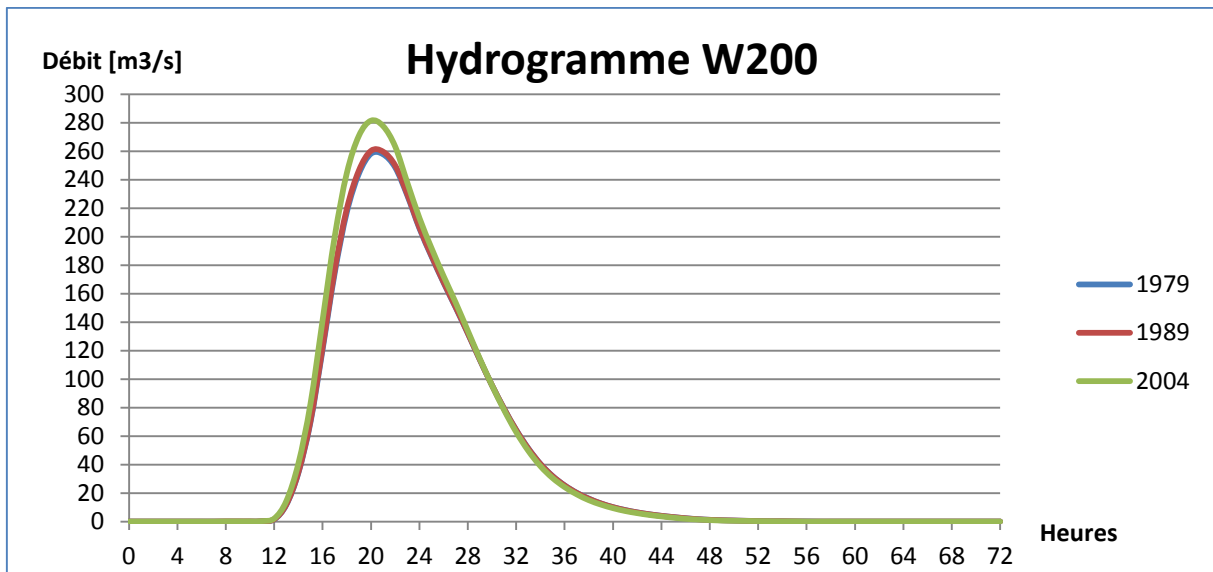


Fig. IV.19 : Hydrogramme du sous bassin W200.

Tab.IV.10 : Apports hydrologiques du SB W200.

W200			
Années	1979	1989	2004
Débit de pointe [m3/s]	258.3	260.3	281.5
Volume de précipitation [mm]	78.53		
Volume de perte [mm]	52.91	52.77	51.38
Volume de ruissellement direct [mm]	25.62	25.76	27.14
Temps de pic [h]	20:00	20:00	20:00

IV.2.2.10- Sous-bassin W210 :

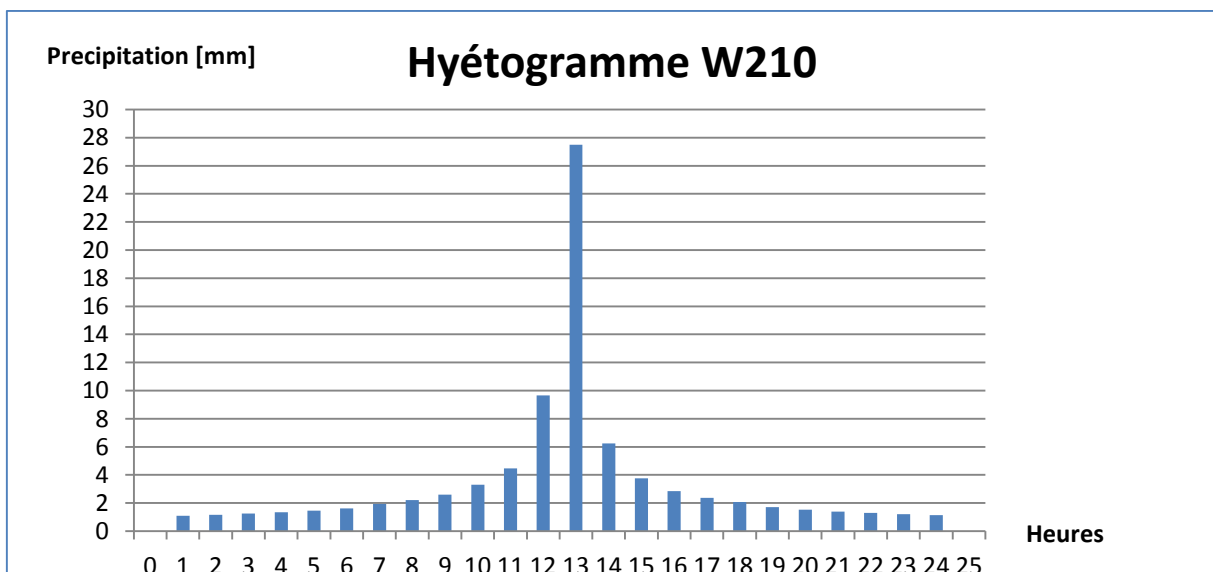


Fig. IV.20 : Hyétogramme du sous bassin W210.

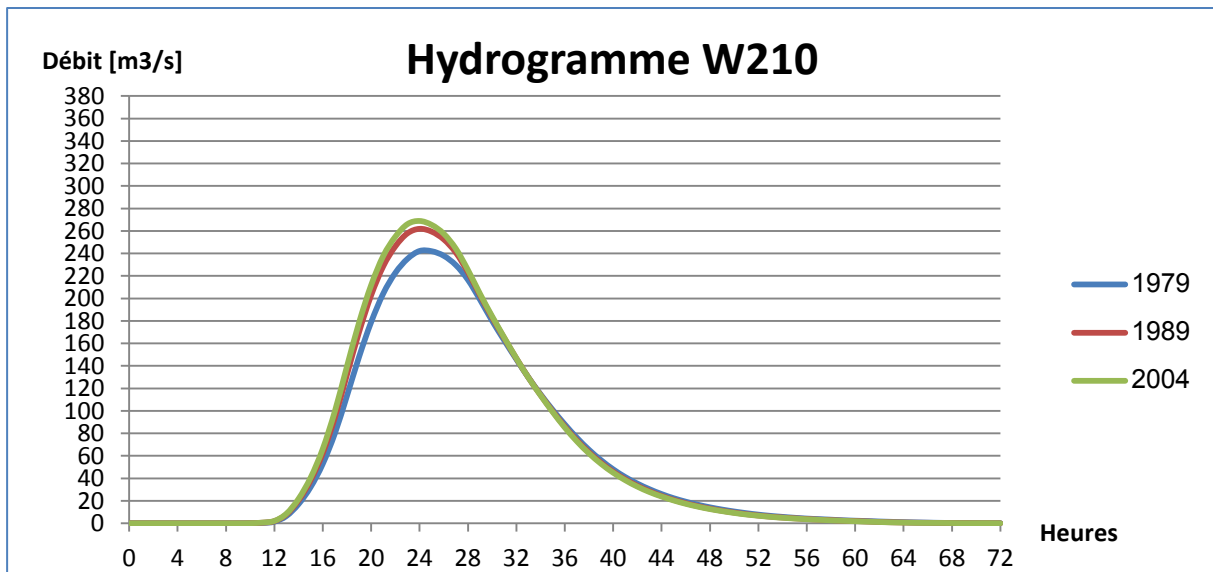


Fig. IV.21 : Hydrogramme du sous bassin W210.

Tab.IV.11 : Apports hydrologiques du SB W210.

W210			
Années	1979	1989	2004
Débit de pointe [m3/s]	242.2	261.9	268.9
Volume de précipitation [mm]	85.19		
Volume de perte [mm]	49.53	47.67	47.01
Volume de ruissellement direct [mm]	35.66	37.52	34.19
Temps de pic [h]	24:00	24:00	24:00

IV.2.2.11- Sous-bassin W220 :

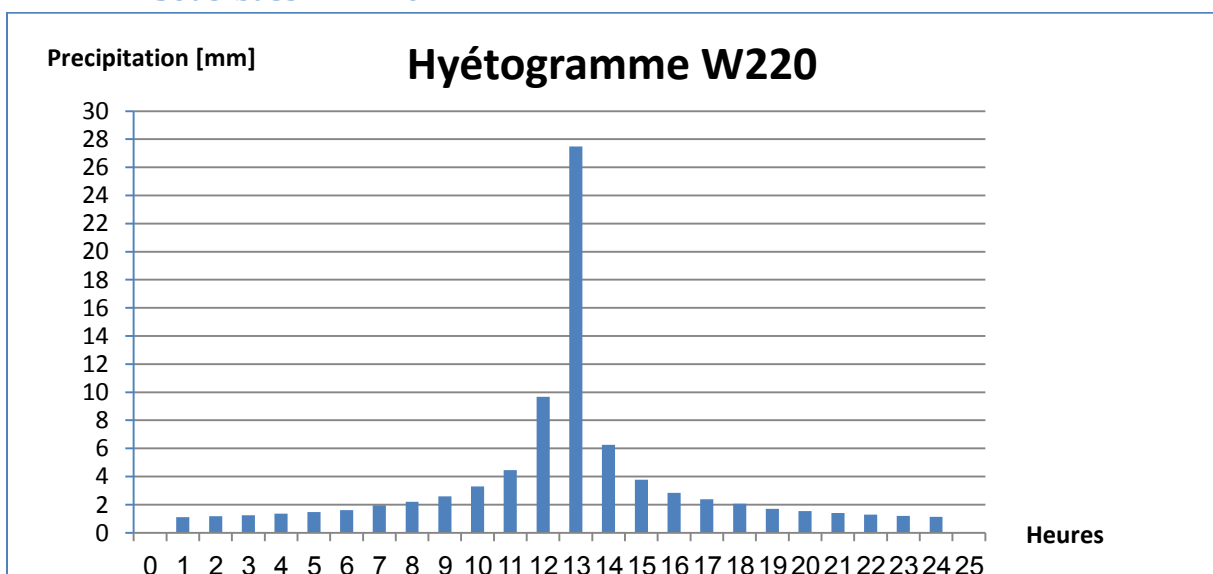


Fig. IV.22 : Hyétogramme du sous bassin W220.

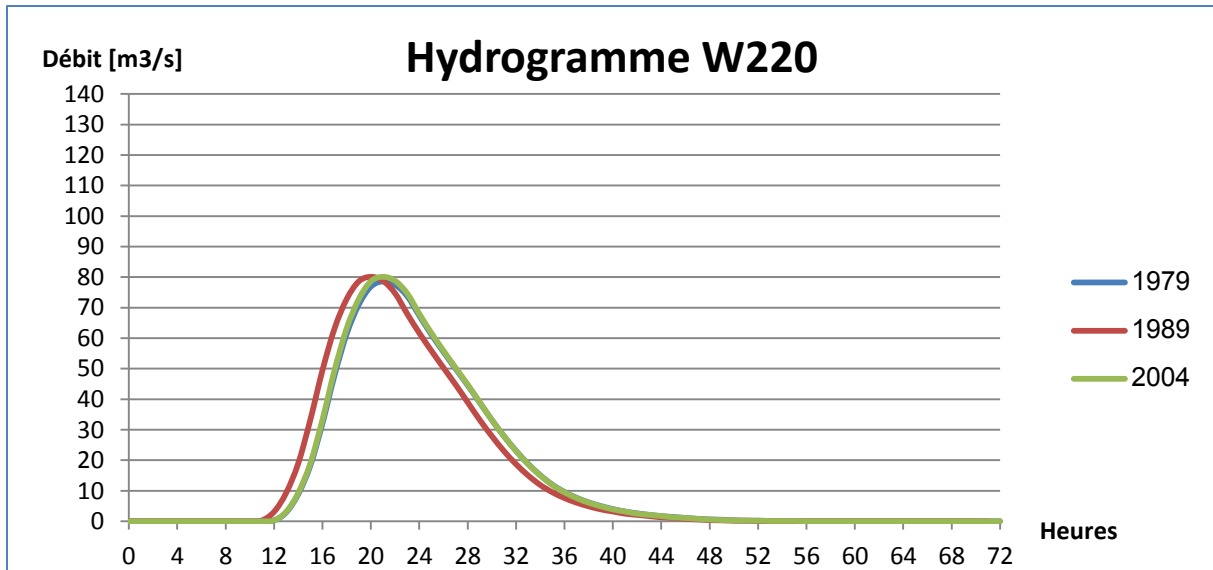


Fig. IV.23 : Hydrogramme du sous bassin W220.

Tab.IV.12 : Apports hydrologiques du SB W220.

W220			
Années	1979	1989	2004
Débit de pointe [m ³ /s]	78.6	80.1	80.1
Volume de précipitation [mm]	85.19		
Volume de perte [mm]	59.39	59.04	59.04
Volume de ruissellement direct [mm]	25.81	26.16	26.16
Temps de pic [h]	21:00	21:00	21:00

IV.2.2.11- Exutoire:

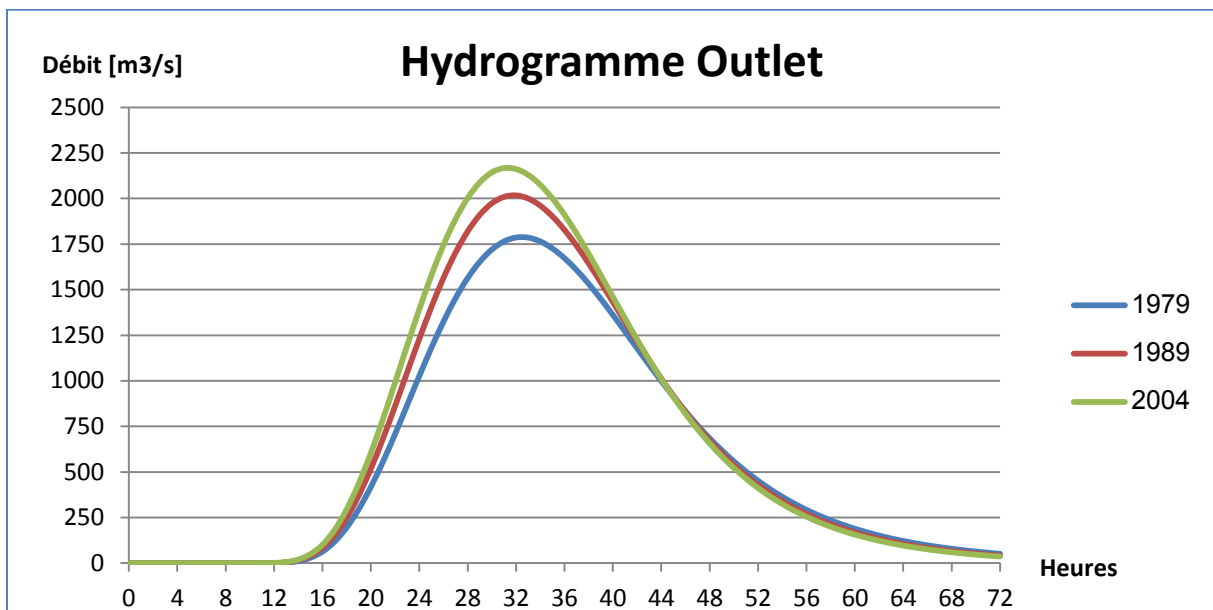


Fig. IV.24 : Hydrogramme de crue à l'exutoire.

Tab.IV.13 : Apports hydrologiques à l'exutoire.

Outlet (Exutoire)			
Années	1979	1989	2004
Débit de pointe [m3/s]	1786	2017.1	2166.9
Volume [mm]	33.54	36.47	38.43
Temps de pic [h]	32:00	32:00	31:00

IV.2.3- Discussion des résultats obtenus

Les résultats obtenus après simulation par le modèle d'Hydrogramme de SCS, montre que l'allure des hydrogrammes simulés de tous les sous bassins, sont en parfaite concordance avec les changements pluviométriques (influant sur le volume de précipitation) (voir Fig. III.6 - III.8) et les changements d'occupation (influant sur le volume de perte) (voir Fig. III.23 – III.28) qui se sont manifestés lors des trois scénarios.

Un accroissement des volumes ruisselés a été constaté au fil des périodes. Cet accroissement peut être expliqué par l'expansion des terres agricoles par rapport aux forêts, bâtis et plan d'eau observée entre 1970 et 2004. Il a été remarqué une ascension rapide des courbes de montée et une récession relativement lente des courbes de décrue.

Dans cette étude nous pouvons déduire que les changements d'occupation de sol (voir Fig. III.23 – III.28) ont un certain d'impact sur le ruissellement.

IV.3- Étude de performance du sous bassin W180

L'optimisation des paramètres du modèle hydrologique (CN et Lag time) a été réalisée selon trois fonctions objectives ; L'erreur moyenne quadratique (RMSE), le coefficient de détermination et le critère Nash-Sutcliff. L'optimisation a été appliquée sur le sous bassin versant W180 qui est doté d'une station de jaugeage de Morsott.

IV.3.1- Calage du sous bassin W180

A partir de la station Morsott, nous avons pu construire l'hydrogramme de crue observé pendant la période de 1 et 4 janvier (1979-1989-2004). Les hydrogrammes ont été ajoutés au modèle et les résultats suivants ont été obtenus :

Tab.IV.14 : Comparaison des apports hydrologiques simulés et observés sur le sous bassin W180.

		Débit de pointe [m3/s]	Volume [mm]	Temps de pic [h]	RMSE STD Dev	% Bias	Nash-Sutcliff
1979	Simulé	567.2	109.38	26:00	0.4	-36.27	0.80
	Observé	639.6	77.73	27:00			
1989	Simulé	647.3	109.38	25:00	0.2	-6.06	0.95
	Observé	615.7	57.41	23:00			
2004	Simulé	704.2	109.38	25:00	0.2	-4.14	0.98
	Observé	751.2	59.26	23:00			

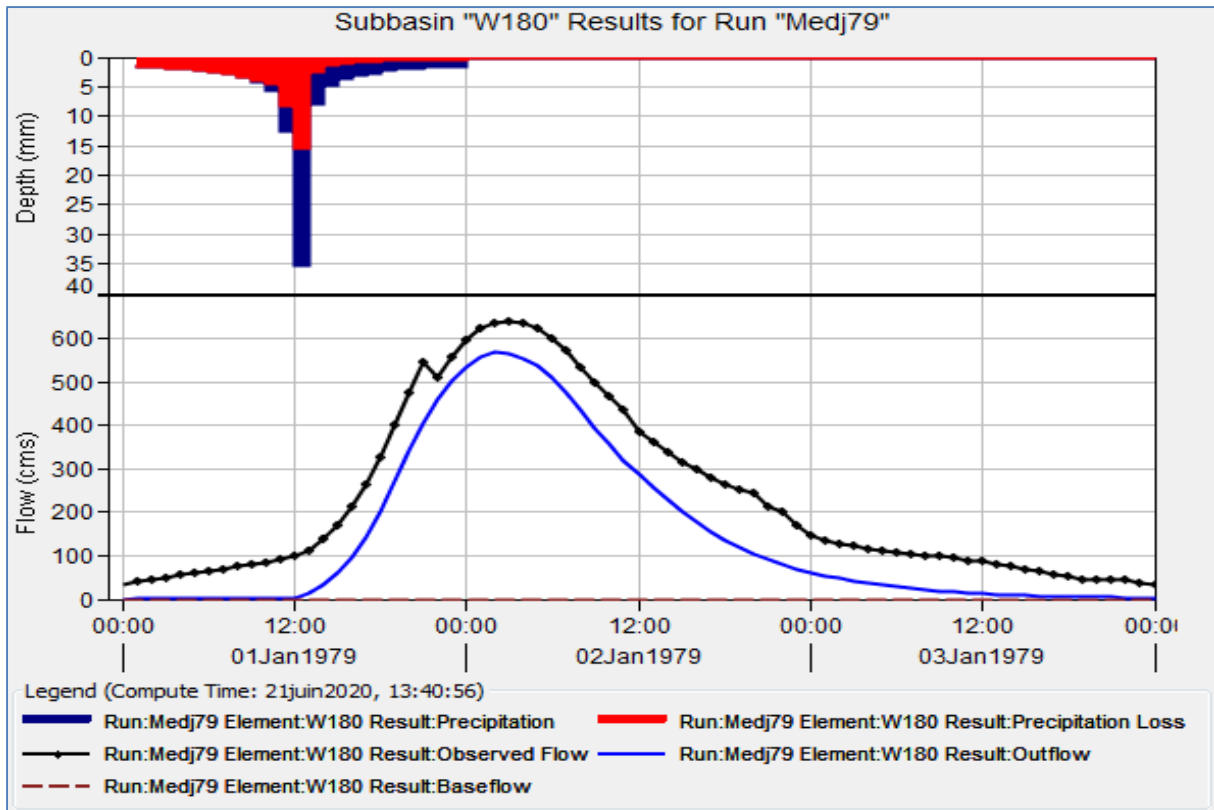


Fig. IV.25 : Hyétogrammes et hydrogramme de crue simulé et observé (1979).

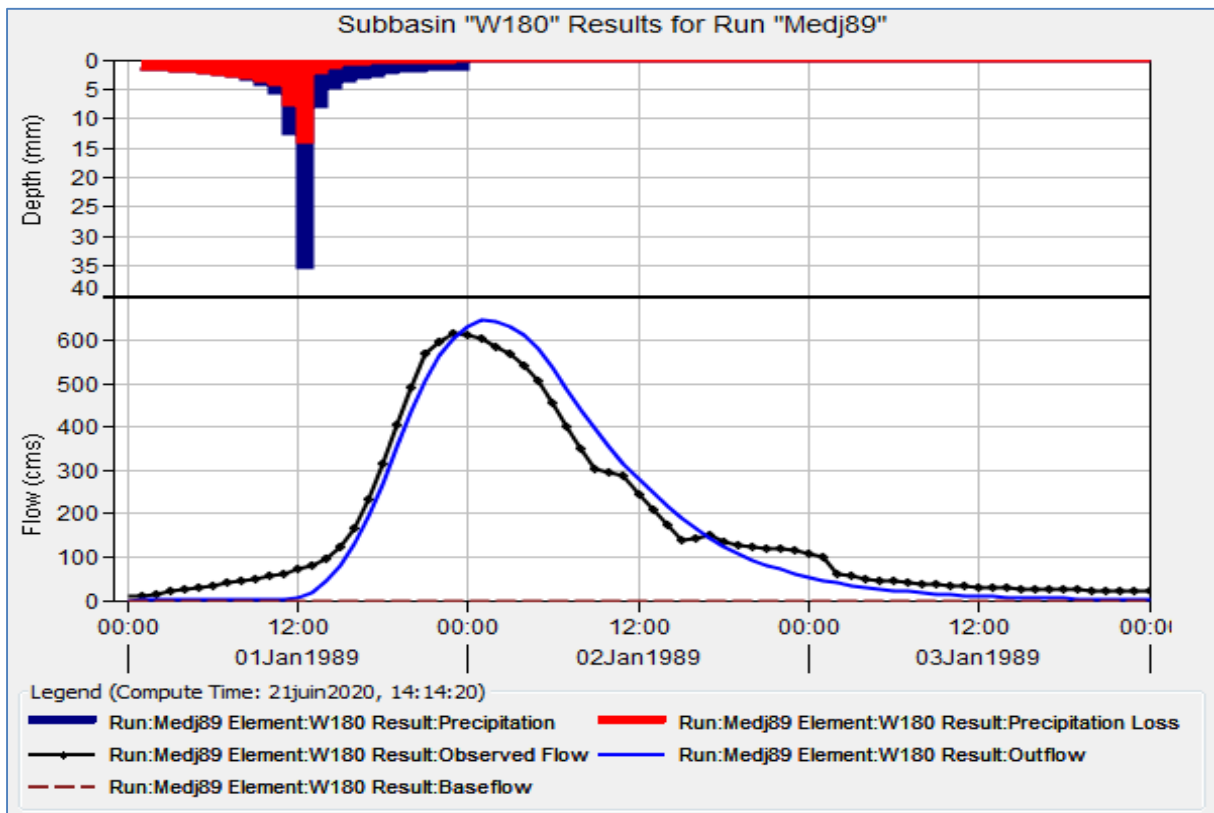


Fig. IV.26 : Hyétogrammes et hydrogramme de crue simulé et observé (1989).

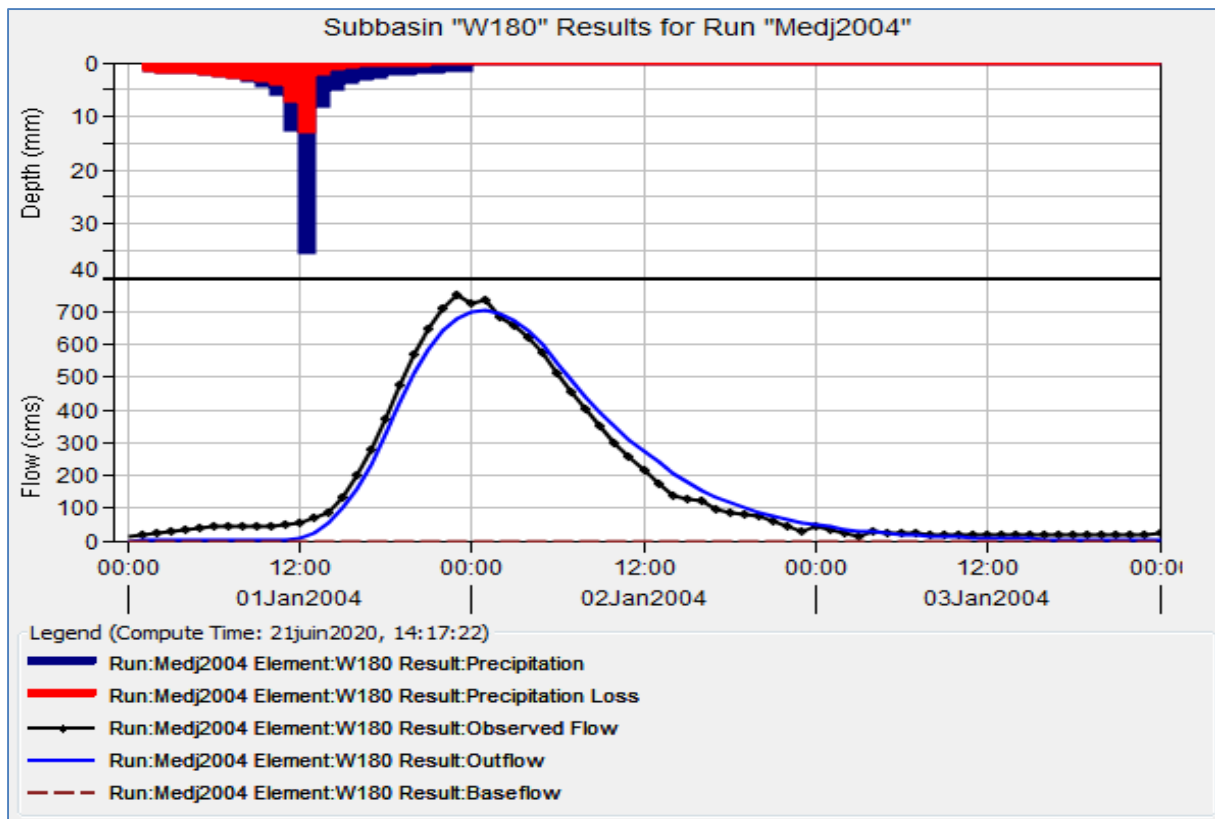


Fig. IV.27 : Hyetogrammes et hydrogramme de crue simulé et observé (2004).

Nous remarquons que les hydrogrammes simulés de 1989 et 2004, par logiciel HEC-HMS, sont très proches des hydrogrammes observés. Les modèles simulés approchent de près les modèles réels. Contrairement à la simulation pour l'année 1979, ou nous observons un petit écart entre les deux modèles. Cet écart peut être expliqué par des incertitudes liées aux données ou à la modélisation.

IV.3.2- Analyse de sensibilité du sous bassin W180

La méthode simplexe optimise les paramètres CN Curve Number et le Lag time simultanément.

IV.3.2.1- Fonction RMSE

Les figures (IV.28, IV.29, IV.30) illustrent une optimisation des données des hydrogrammes simulés et des hydrogrammes observés :

- Pour l'année 1979 : la différence entre débit simulé et observé (Tab. IV.15) est estimée à 64.1 m³/s (10 %), et le volume ruisselé est de - 12.45 mm (- 16.01 %), avec une différence de temps de pic estimée à 1 heure.
- Pour l'année 1989 : la différence entre débit simulé et observé (Tab. IV.16) est estimée à 5.1 m³/s (0.8 %), et le volume ruisselé est de - 8.42 mm (- 14.67 %), avec une différence de temps de pic estimée à 2 heures.
- Pour l'année 2004 : la différence entre débit simulé et observé (Tab. IV.17) est estimée à 17.2 m³/s (- 2.3 %), et le volume ruisselé est de - 3.36 mm (-5.67 %), avec une différence de temps de pic estimée à 30 minutes.

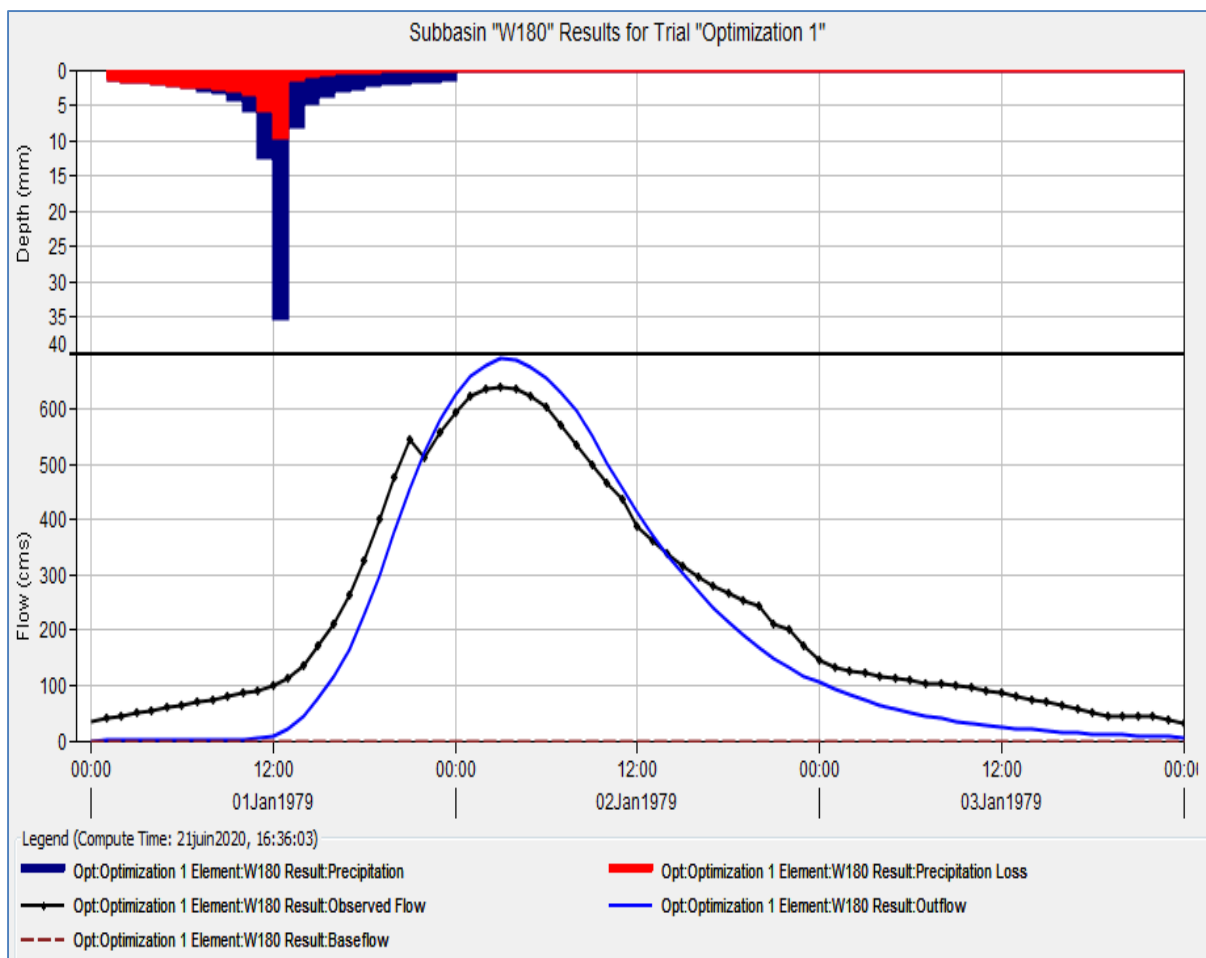


Fig. IV.28 : Optimisation des résultats des débits simulés et observés par la méthode RMSE (1979).

Tab.IV.15 : Optimisation de la réponse du sous bassin « W180 » par RMSE (1979).

1979				
Mesures	Simulé	Observé	Différence	Différence %
Volume [mm]	65.28	77.73	-12.45	-16.01
Débit de pointe [m3/s]	703.7	639.6	64.1	10
Temps de pic [h]	02janv.1979, 02:00	02janv.1979, 03:00		

La courbe de l'hydrogramme simulé approche la courbe de l'hydrogramme observé. Cependant un écart certain entre les deux est visible.

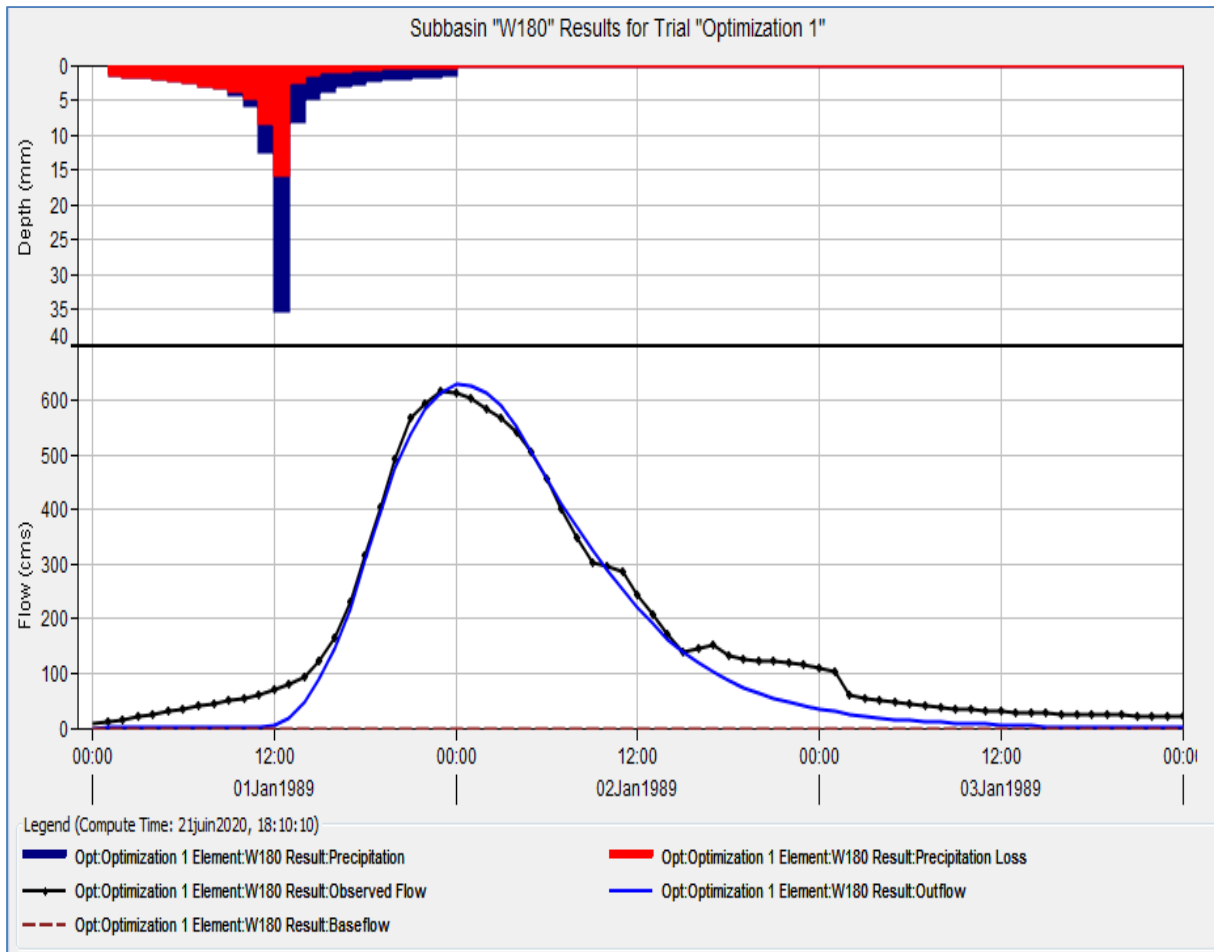


Fig. IV.29 : Optimisation des résultats des débits simulés et observés par la méthode RMSE (1989).

Tab.IV.16 : Optimisation de la réponse du sous bassin « W180 » par RMSE (1989).

1989				
Mesures	Simulé	Observé	Différence	Différence %
Volume [mm]	48.99	57.41	-8.42	-14.67
Débit de pointe [m3/s]	620.8	615.7	5.1	0.8
Temps de pic [h]	02janv.1989, 01:00	01janv.1989, 23:00		

La courbe de l'hydrogramme simulé approche le mieux la courbe de l'hydrogramme observé entre 12h et 36h. Au-delà de cet intervalle temporel un certain écart est visible.

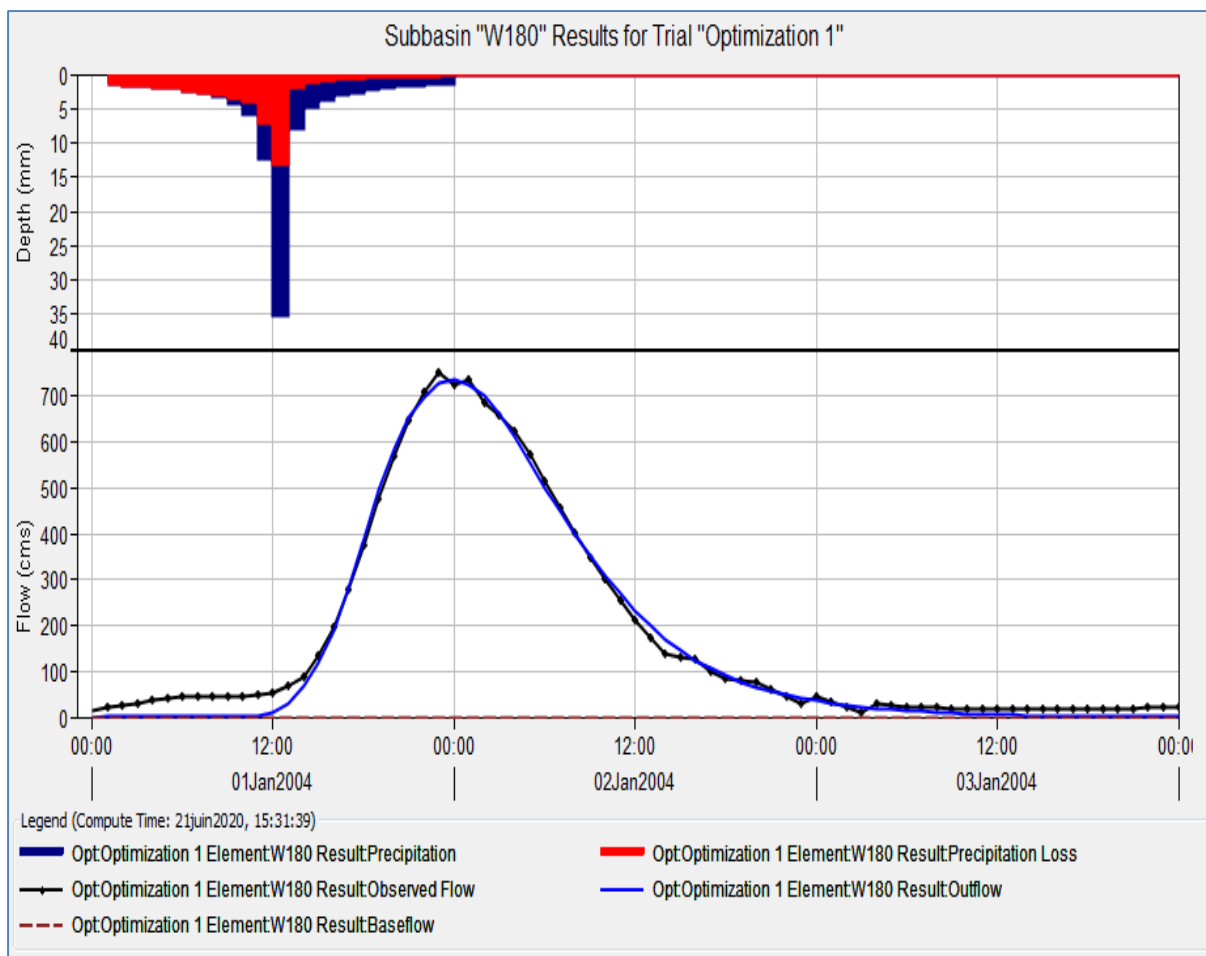


Fig. IV.30 : Optimisation des résultats des débits simulés et observés par la méthode RMSE (2004).

Tab.IV.17 : Optimisation de la réponse du sous bassin « W180 » par RMSE (2004).

2004				
Mesures	Simulé	Observé	Différence	Différence %
Volume [mm]	55.9	59.26	-3.36	-5.67
Débit de pointe [m3/s]	734	751.2	-17.2	-2.3
Temps de pic [h]	02janv.2004, 00:00	01janv.2004, 23:00		

La courbe de l'hydrogramme simulé approche de très près la courbe de l'hydrogramme observé. Un petit écart est visible avant 12h.

Dans la modélisation pluie-débit de la zone d'étude, pour les scénarios (1979, 1989, 2004), la variabilité des paramètres de nombre de courbes (CN) et Lag time est relativement faible (entre 0 et 12%). Ces résultats dépendent essentiellement de la topographie du bassin, du type de sol, de l'occupation des sols et d'autres caractéristiques du bassin versant (Tab. IV.18).

Tab.IV.18 : Optimisation des paramètres CN et Lag par RMSE.

1979					
Élément	Paramètre	Valeur Initiale	Valeur Optimisée	Différence %	NSE
W180	SCS Unit Hydrograph - Lag Time	715.67	797.64	11.45	0.911
W180	SCS Curve Number - Curve Number	75.73	83.30	10	
1989					
Élément	Paramètre	Valeur Initiale	Valeur Optimisée	Différence %	NSE
W180	SCS Unit Hydrograph - Lag Time	671.16	607.91	9.42	0.966
W180	SCS Curve Number - Curve Number	77.90	75.38	3.24	
2004					
Élément	Paramètre	Valeur Initiale	Valeur Optimisée	Différence %	NSE
W180	SCS Unit Hydrograph - Lag Time	643.10	592.22	7.91	0.992
W180	SCS Curve Number - Curve Number	79.30	78.83	0.60	

Les valeurs NSE (entre 0.91 et 0.99), pour les trois scénarios (1979, 1989, 2004), démontrent que les tests de performances RMSE relatifs au modèle sont assez corrects.

Les figures (IV.31, IV.32, IV.33) signalent :

- Pour le scénario 1979 : une bonne corrélation entre les débits observés et ceux simulés avant le débit de pointe. La corrélation après le débit de pointe est faible.
- Pour le scénario 1989 : une quasi concordance entre les débits observés et ceux simulés, avant et après le débit de pointe.
- Pour le scénario 2004 : une correspondance entre les débits observés et ceux simulés, avant et après le débit de pointe.

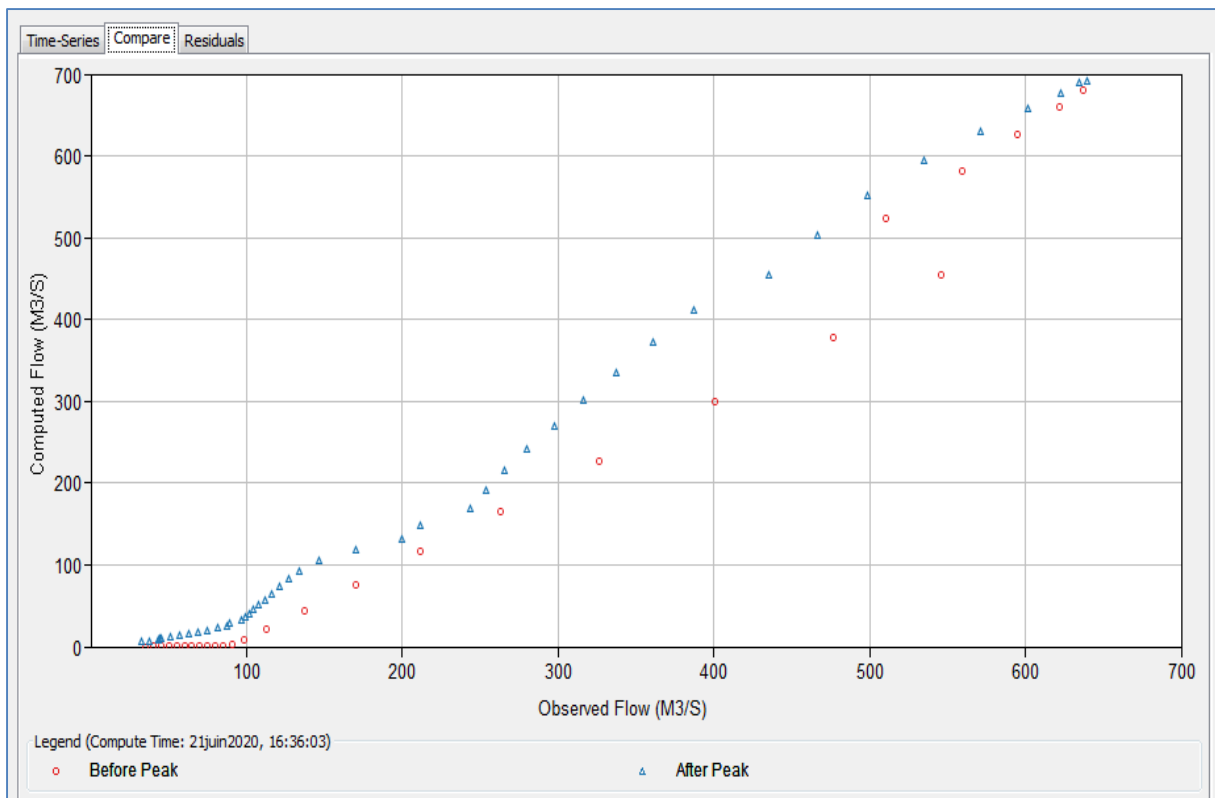


Fig. IV.31 : Corrélation entre le débit observé vs débit simulé par RMSE (1979).

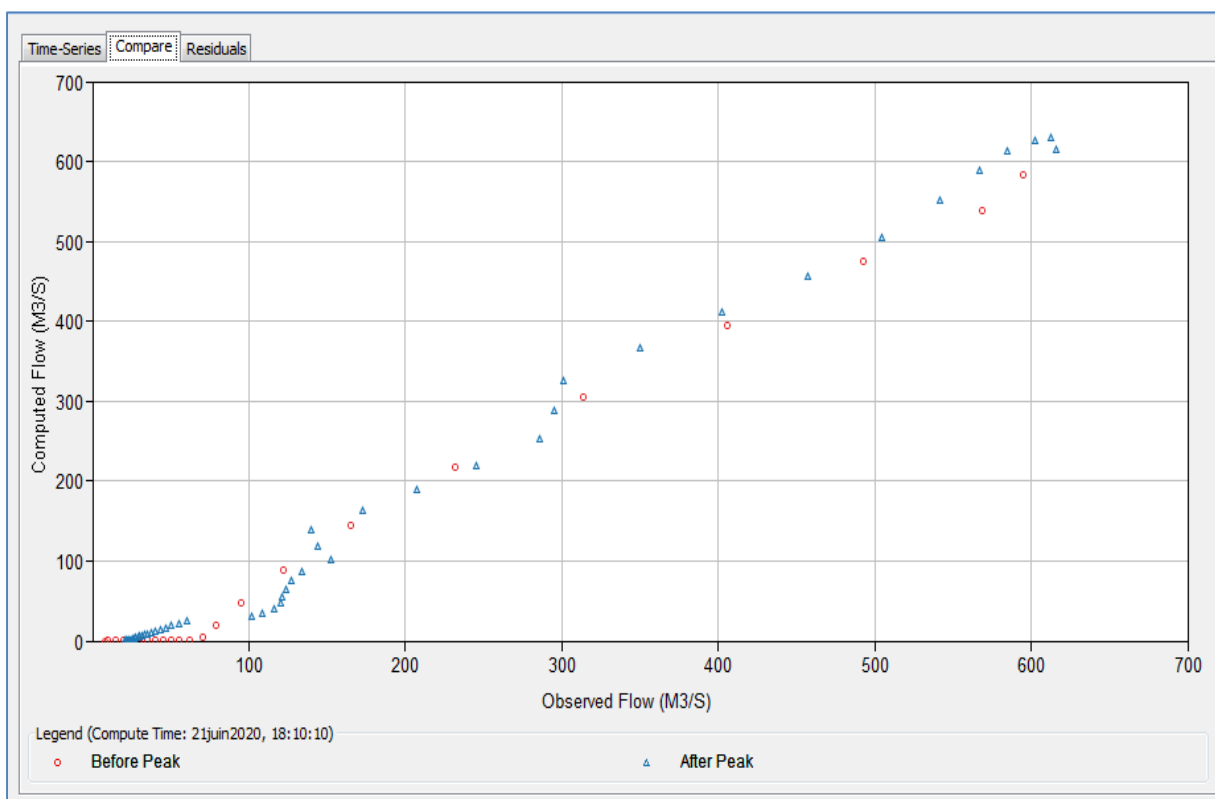


Fig. IV.32 : Corrélation entre le débit observé vs débit simulé par RMSE (1989).

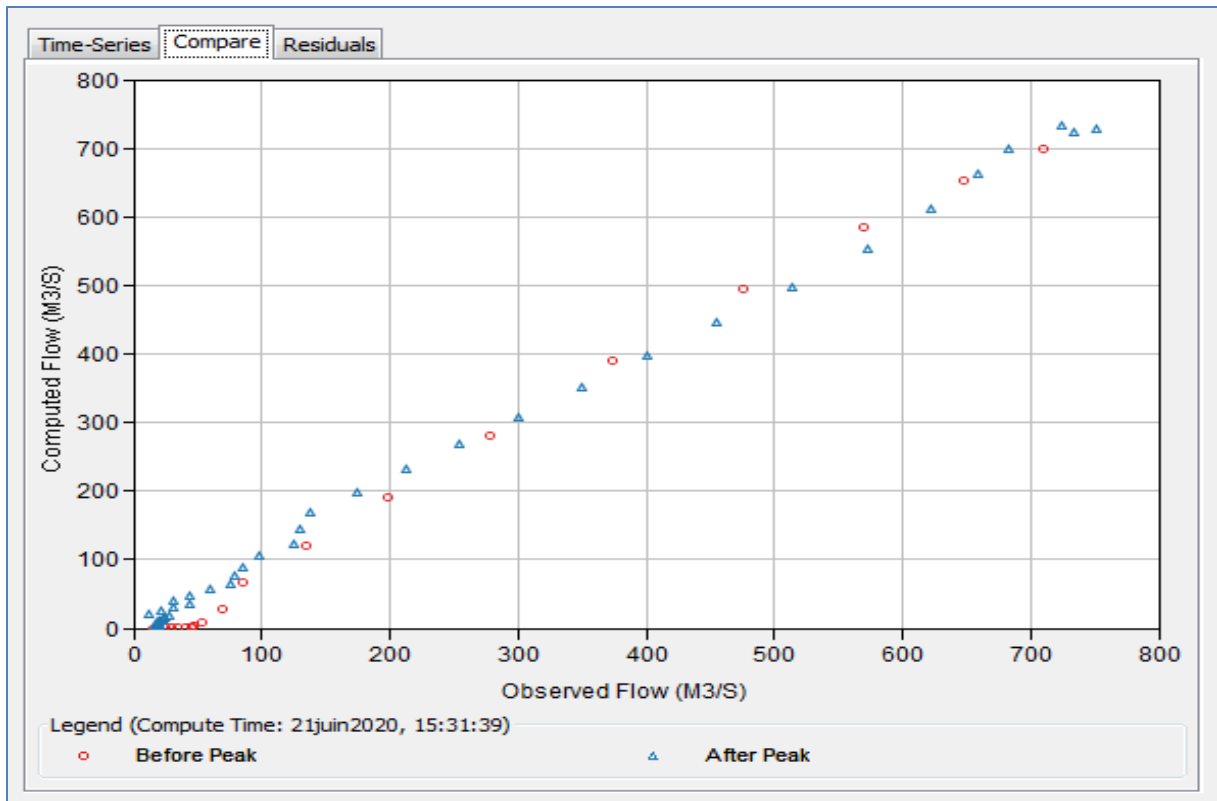


Fig. IV. 33 : Corrélation entre le débit observé vs débit simulé par RMSE (2004).

Dans les figures (Fig. IV.34 - 39) nous pouvons voir que nous approchons les valeurs optimales du CN et du Lag time après 30 itérations de la fonction objective.

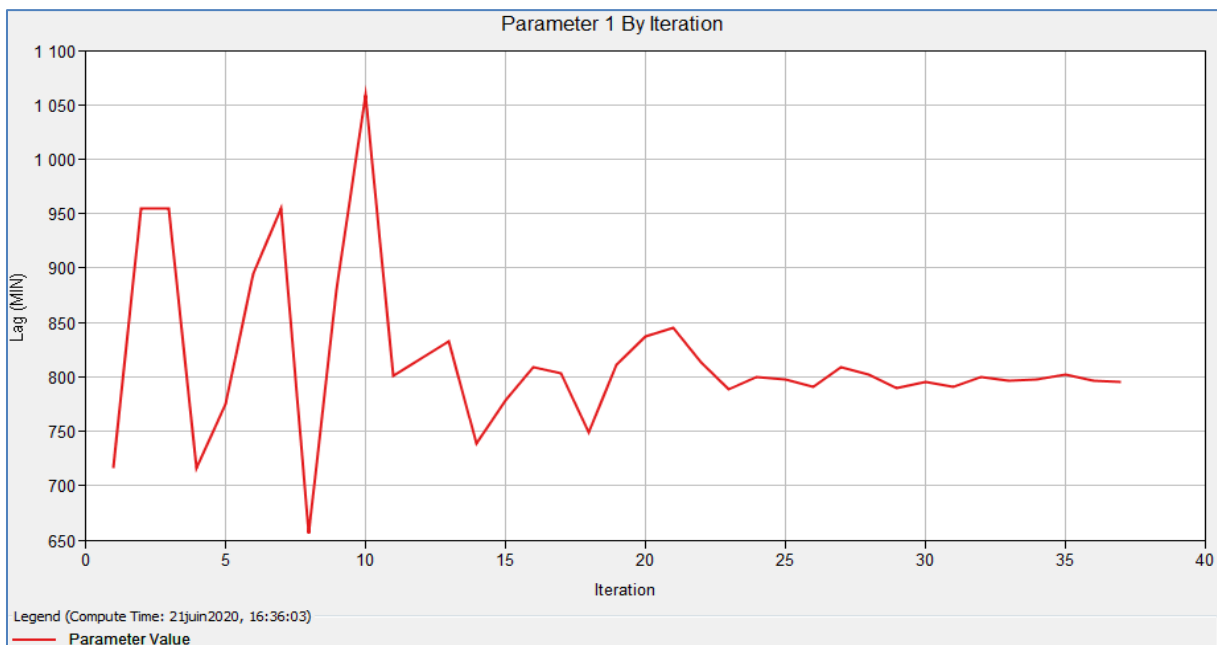


Fig. IV. 34 : Optimisation du Lag time par RMSE (1979).

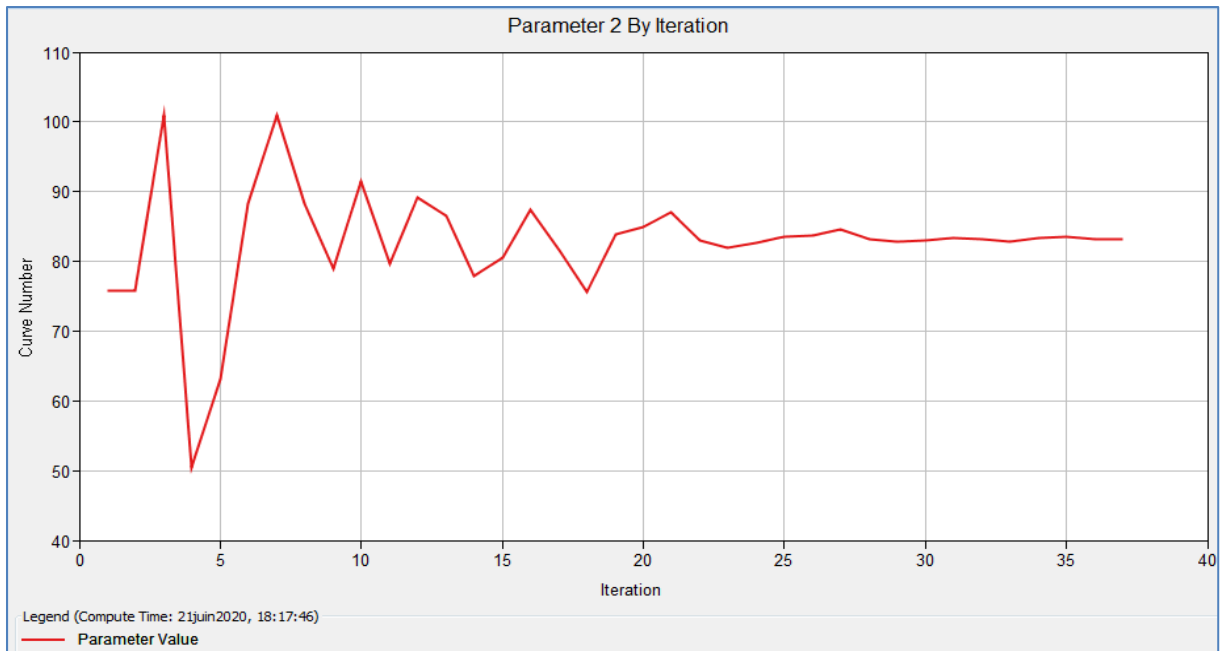


Fig. IV. 35 : Optimisation du CN par RMSE (1979).

L'optimisation des paramètres CN et Lag time par la fonction objective RMSE, pour le scénario de 1979, montre que la valeur optimisée du CN est idéale à la valeur 83.30 pour un Lag time optimisé de 797.64min.

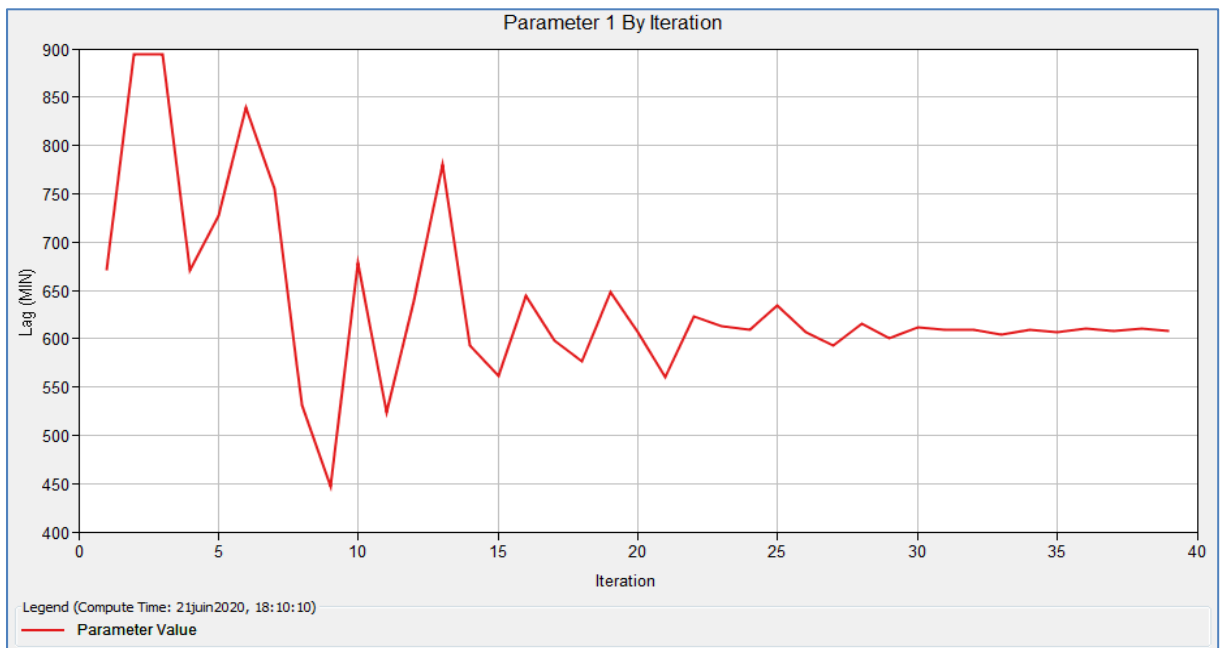


Fig. IV. 36 : Optimisation du Lag time par RMSE (1989).

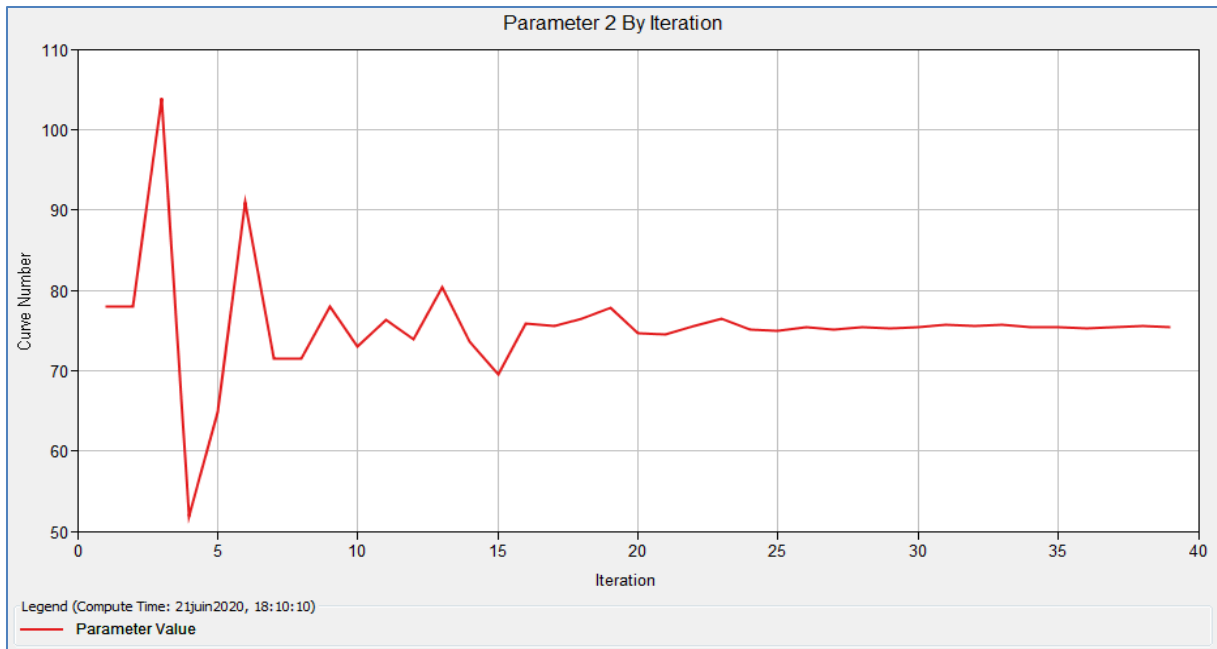


Fig. IV. 37 : Optimisation du CN par RMSE (1989).

L'optimisation des paramètres CN et Lag time par la fonction objective RMSE, pour le scénario de 1989, montre que la valeur optimisée du CN est idéale à la valeur 75.38 pour un Lag time optimisé de 607.91min.

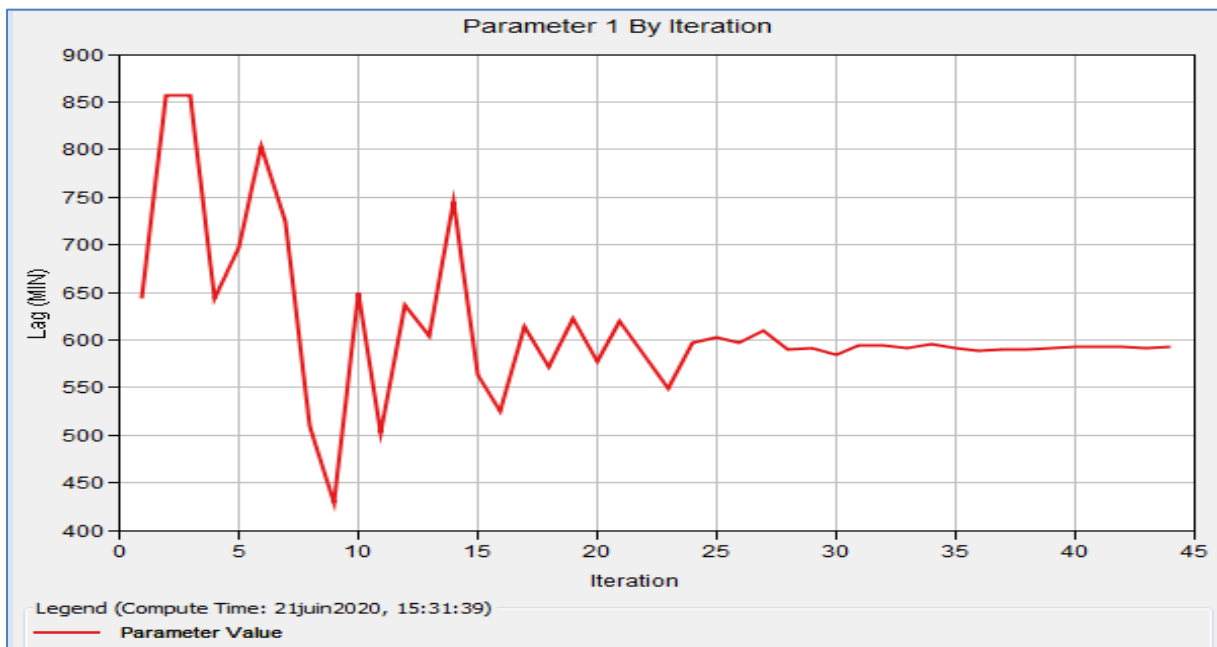


Fig. IV. 38 : Optimisation du Lag time par RMSE (2004).

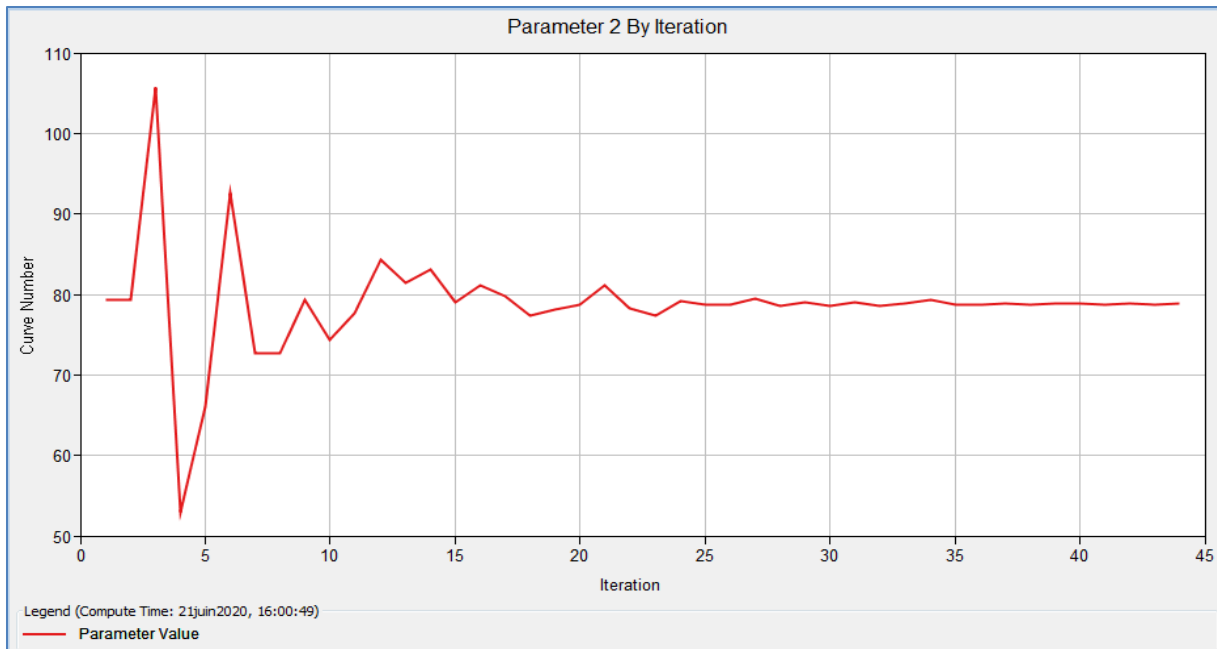


Fig. IV. 39 : Optimisation du CN par RMSE (2004).

L'optimisation des paramètres CN et Lag time par la fonction objective RMSE, pour le scénario de 2004, montre que la valeur optimisée du CN est idéale à la valeur 78.83 pour un Lag time optimisé de 592.22min.

IV.3.2.2- Fonction Nash-Sutcliff

Les figures (IV.40, IV.41, IV.42) illustrent une optimisation des données des hydrogrammes simulés et des hydrogrammes observés :

- Pour l'année 1979 : la différence entre débit simulé et observé (Tab. IV.19) est estimé à 64.1 m³/s (10 %), et le volume ruisselé est de - 11.22 mm (- 14.43 %), avec une différence de temps de pic estimée à 1 heure.
- Pour l'année 1989 : la différence entre débit simulé et observé (Tab. IV.20) est estimé à 5.1 m³/s (0.8 %), et le volume ruisselé est de - 6.11 mm (- 10.65 %), avec une différence de temps de pic estimée à 2 heures.
- Pour l'année 2004 : la différence entre débit simulé et observé (Tab. IV.21) est estimé à 17.2m³/s (- 2.3 %), et le volume ruisselé est de - 1.45 mm (-2.45 %), avec une différence de temps de pic estimée à 30 minutes.

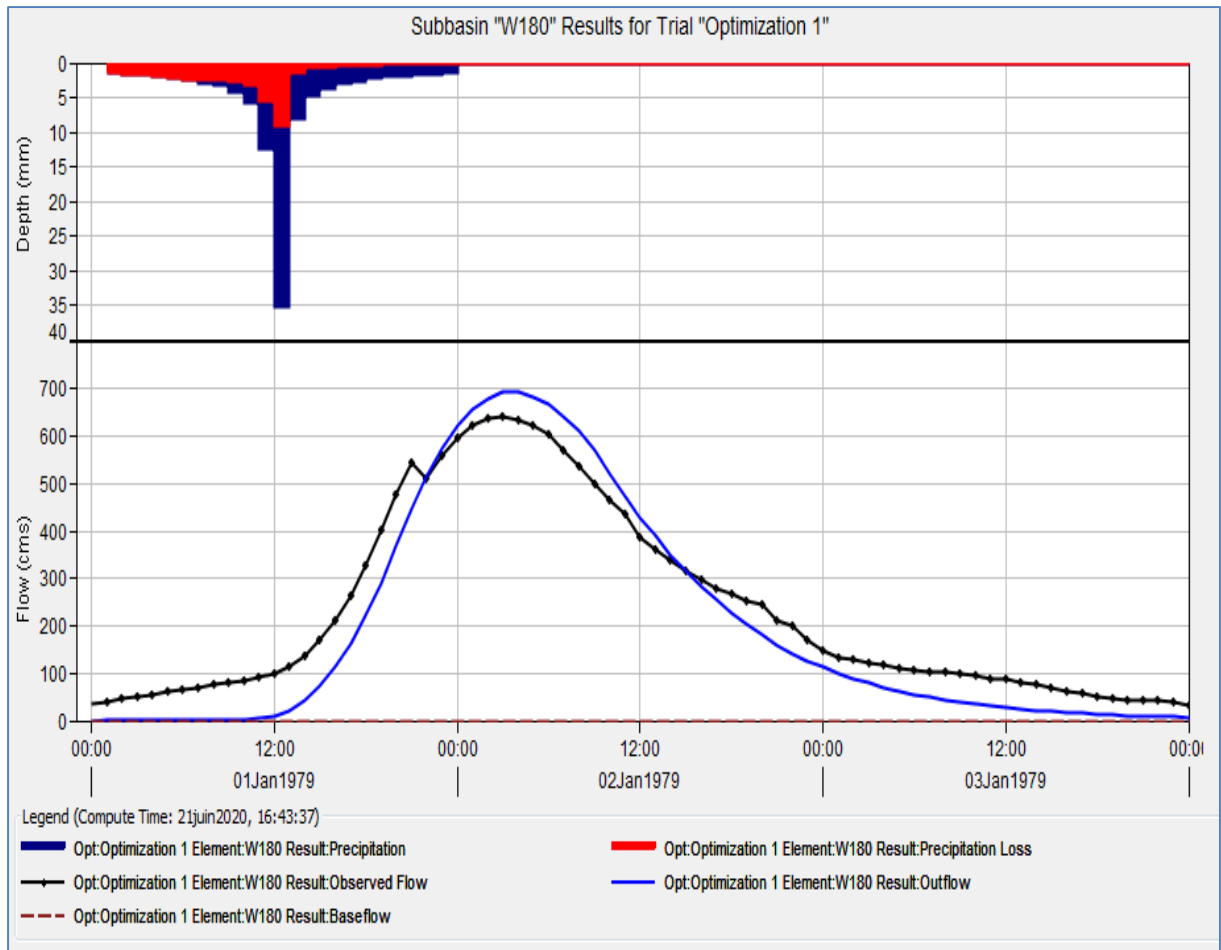


Fig. IV.40 : Optimisation des résultats des débits simulés et observés par la méthode Nash-Sutcliffe (1979).

Tab.IV.19 : Optimisation de la réponse du sous bassin « W180 » par Nash-Sutcliffe (1979).

1979				
Mesures	Simulé	Observé	Différence	Différence %
Volume [mm]	66.52	77.73	-11.22	-14.43
Débit de pointe [m ³ /s]	703.7	639.6	64.1	10
Temps de pic [h]	02janv.1979, 02:00	02janv.1979, 03:00		

La courbe de l'hydrogramme simulé approche la courbe de l'hydrogramme observé. Cependant un écart certain entre les deux est notable.

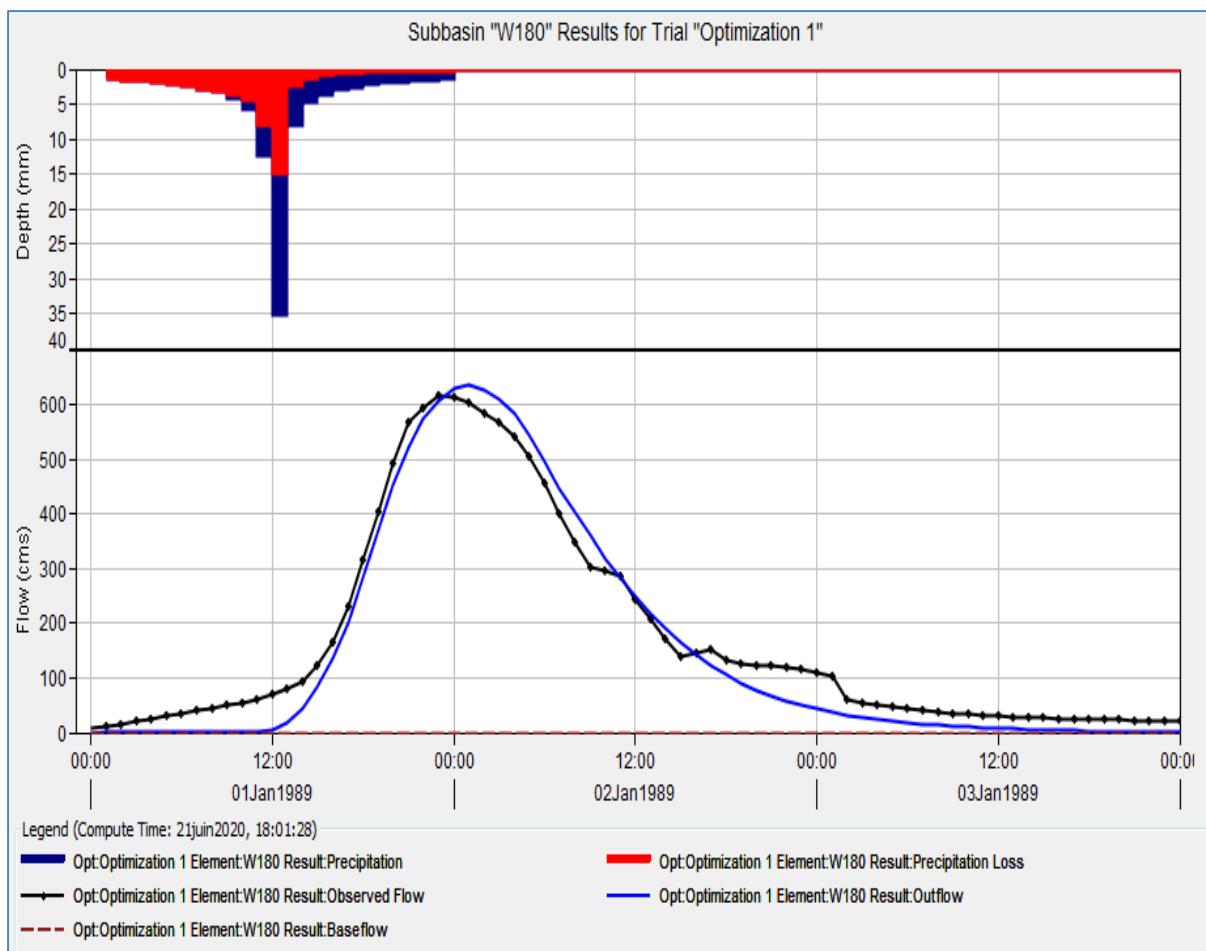


Fig. IV.41 : Optimisation des résultats des débits simulés et observés par la méthode Nash-Sutcliffe (1989).

Tab.IV.20 : Optimisation de la réponse du sous bassin « W180 » par Nash-Sutcliffe (1989).

1989				
Mesures	Simulé	Observé	Différence	Différence %
Volume [mm]	51.3	57.41	-6.11	-10.65
Débit de pointe [m3/s]	620.8	615.7	5.1	0.8
Temps de pic [h]	02janv.1989, 01:00	01janv.1989, 23:00		

La courbe de l'hydrogramme simulé approche le mieux la courbe de l'hydrogramme observé entre 12h et 36h. Au-delà de cet intervalle temporel un certain écart est notable.

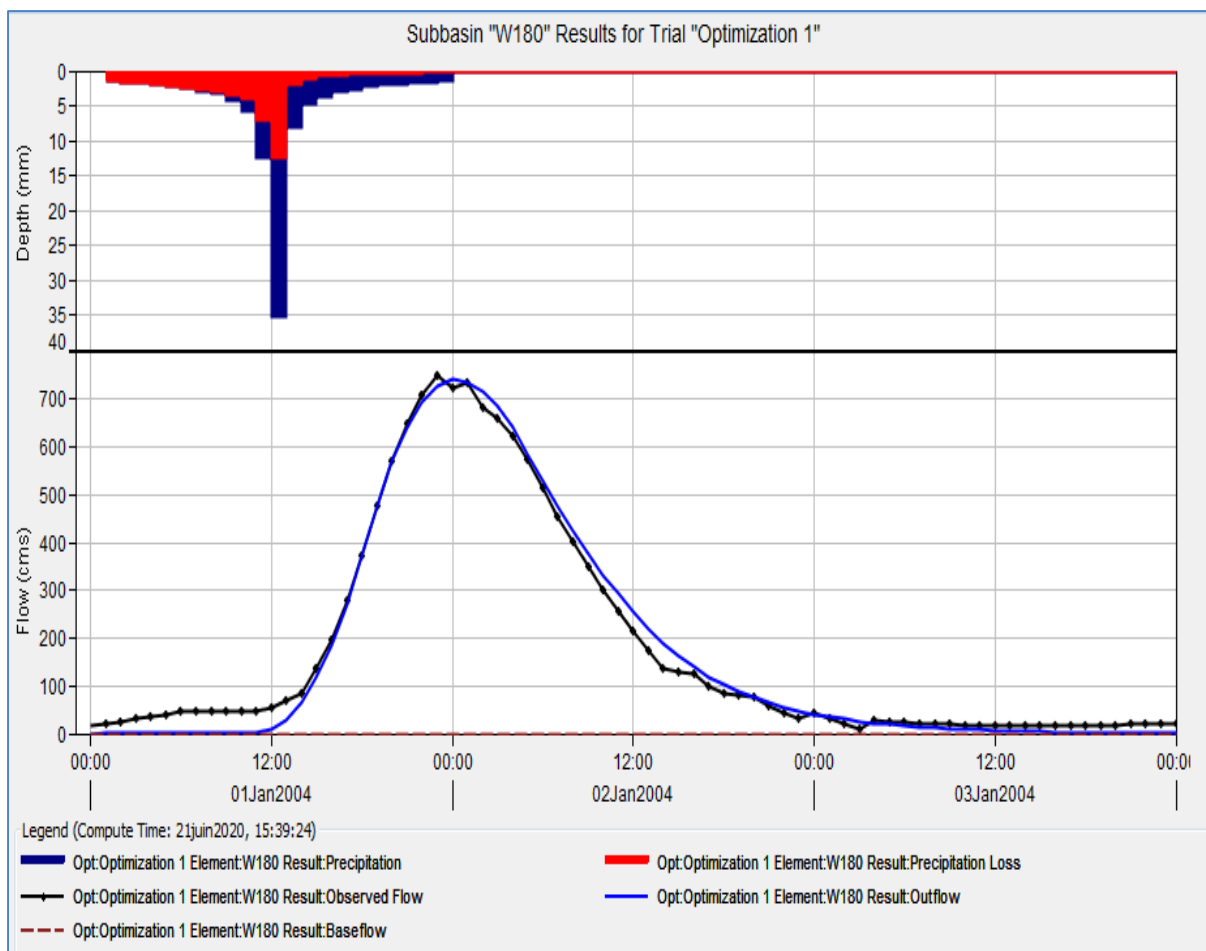


Fig. IV.42 : Optimisation des résultats des débits simulés et observés par la méthode Nash-Sutcliff (2004).

Tab.IV.21 : Optimisation de la réponse du sous bassin « W180 » par Nash-Sutcliff (2004).

2004				
Mesures	Simulé	Observé	Différence	Différence %
Volume [mm]	57.81	59.26	-1.45	-2.45
Débit de pointe [m3/s]	734	751.2	-17.2	-2.3
Temps de pic [h]	02janv.2004, 00:00	01janv.2004, 23:00		

La courbe de l'hydrogramme simulé approche de très près la courbe de l'hydrogramme observé. Un petit écart est visible avant 12h.

Dans la modélisation pluie-débit de la zone d'étude, pour les scénarios (1979, 1989, 2004), la variabilité des paramètres de nombre de courbes (CN) et Lag time est relativement faible (entre 0 et 14%). Ces résultats dépendent essentiellement de la topographie du bassin, du type de sol, de l'occupation des sols et d'autres caractéristiques du bassin versant (Tab.IV.22).

Tab.IV.22 :Optimisation des paramètres CN et Lag par Nash-Sutcliff.

1979					
Élément	Paramètre	Valeur Initiale	Valeur Optimisée	Différence %	NSE
W180	SCS Unit Hydrograph - Lag Time	715.67	811.35	13.37	0.910
W180	SCS Curve Number - Curve Number	75.73	83.81	10.68	
1989					
Élément	Paramètre	Valeur Initiale	Valeur Optimisée	Différence %	NSE
W180	SCS Unit Hydrograph - Lag Time	671.16	640.46	4.57	0.964
W180	SCS Curve Number - Curve Number	77.90	76.56	1.73	
2004					
Élément	Paramètre	Valeur Initiale	Valeur Optimisée	Différence %	NSE
W180	SCS Unit Hydrograph - Lag Time	643.10	613.48	4.61	0.989
W180	SCS Curve Number - Curve Number	79.30	79.74	0.55	

Les valeurs NSE (entre 0.91 et 0.99), pour les trois scénarios (1979, 1989, 2004), démontrent que les tests de performances Nash-Sutcliff relatifs au modèle sont assez corrects.

Dans les figures (Fig. IV.43 - 48) nous pouvons voir que nous approchons les valeurs optimales du CN et du Lag time au-delà de 16 itérations de la fonction objective.

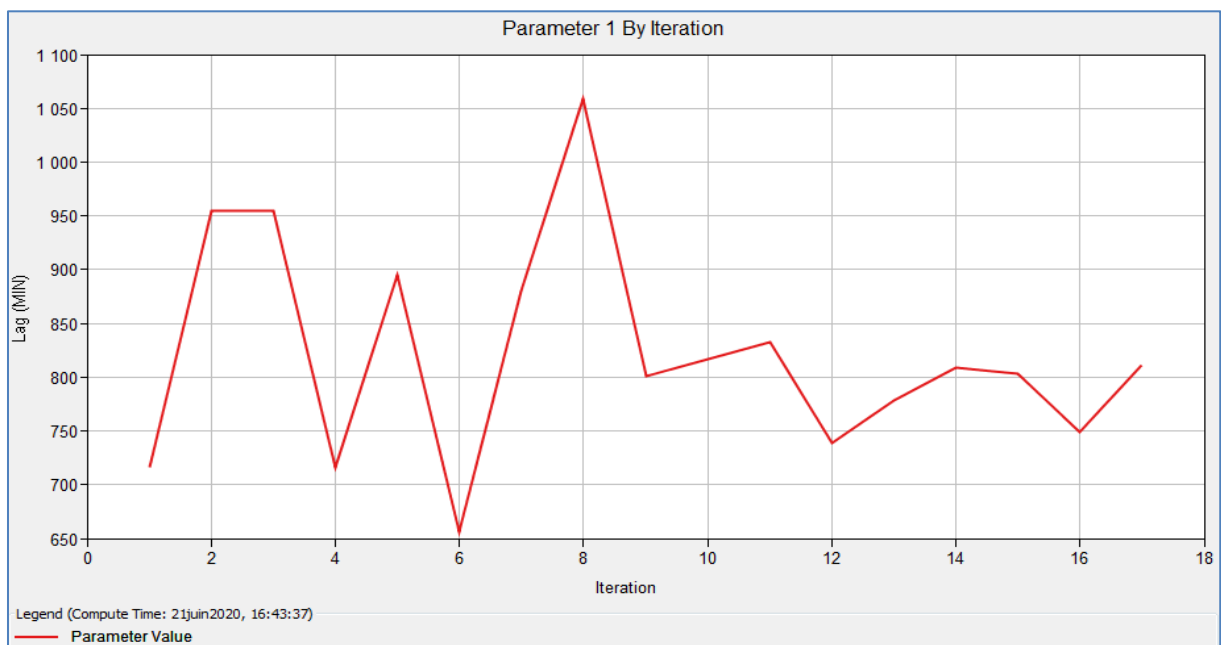


Fig. IV.43 : Optimisation du Lag time par Nash-Sutcliff (1979).

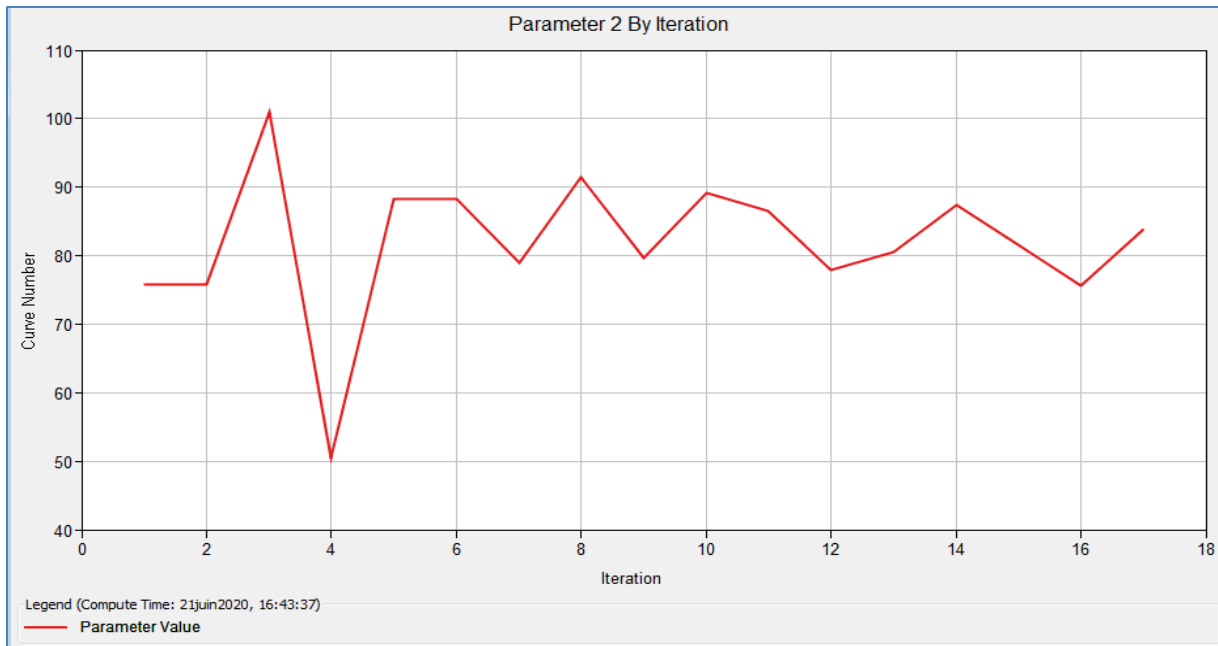


Fig. IV. 44 : Optimisation du CN par Nash-Sutcliff (1979).

L'optimisation des paramètres CN et Lag time par la fonction objective Nash-Sutcliff, pour le scénario de 1979, montre que la valeur optimisée du CN est idéale à la valeur 83.81 pour un Lag time optimisé de 811.35min.

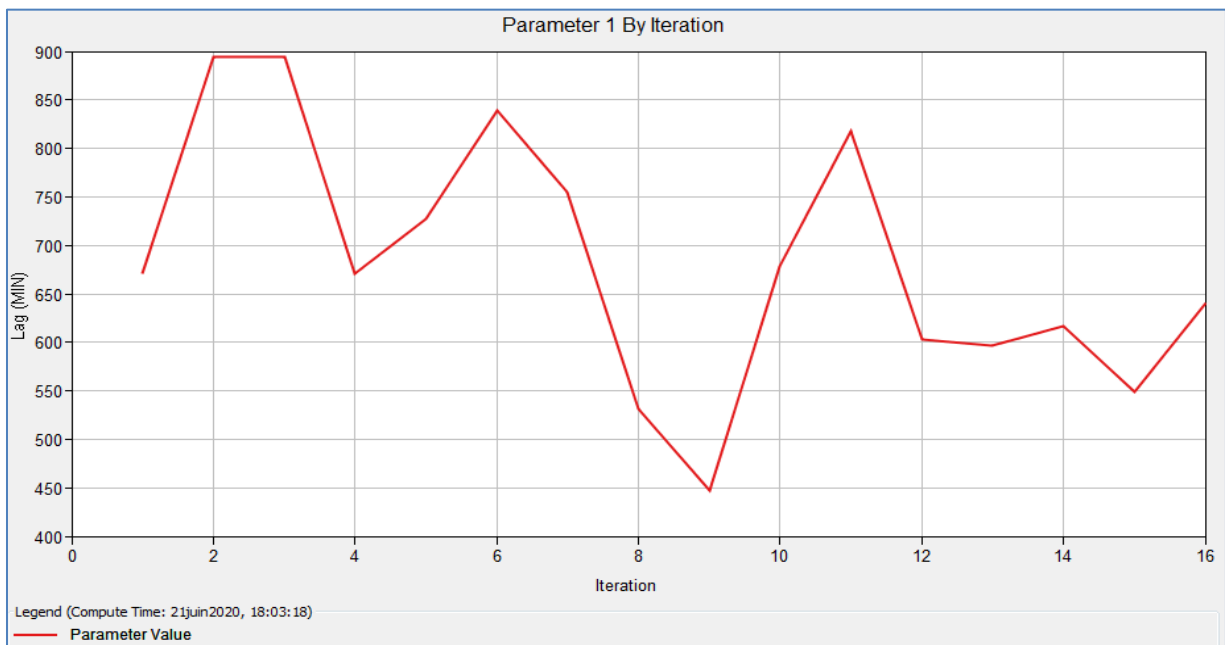


Fig. IV. 45 : Optimisation du Lag time par Nash-Sutcliff (1989).

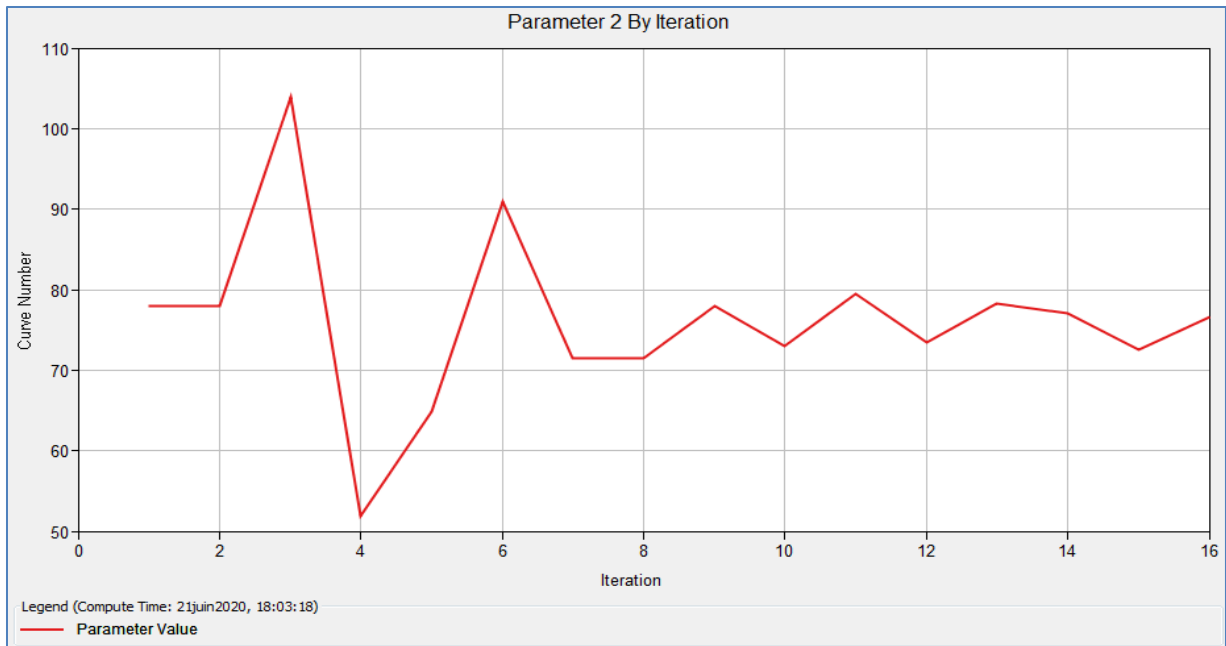


Fig. IV. 46 : Optimisation du CN par Nash-Sutcliff (1989).

L'optimisation des paramètres CN et Lag time par la fonction objective Nash-Sutcliff, pour le scénario de 1989, montre que la valeur optimisée du CN est idéale à la valeur 76.56 pour un Lag time optimisé de 640.46min

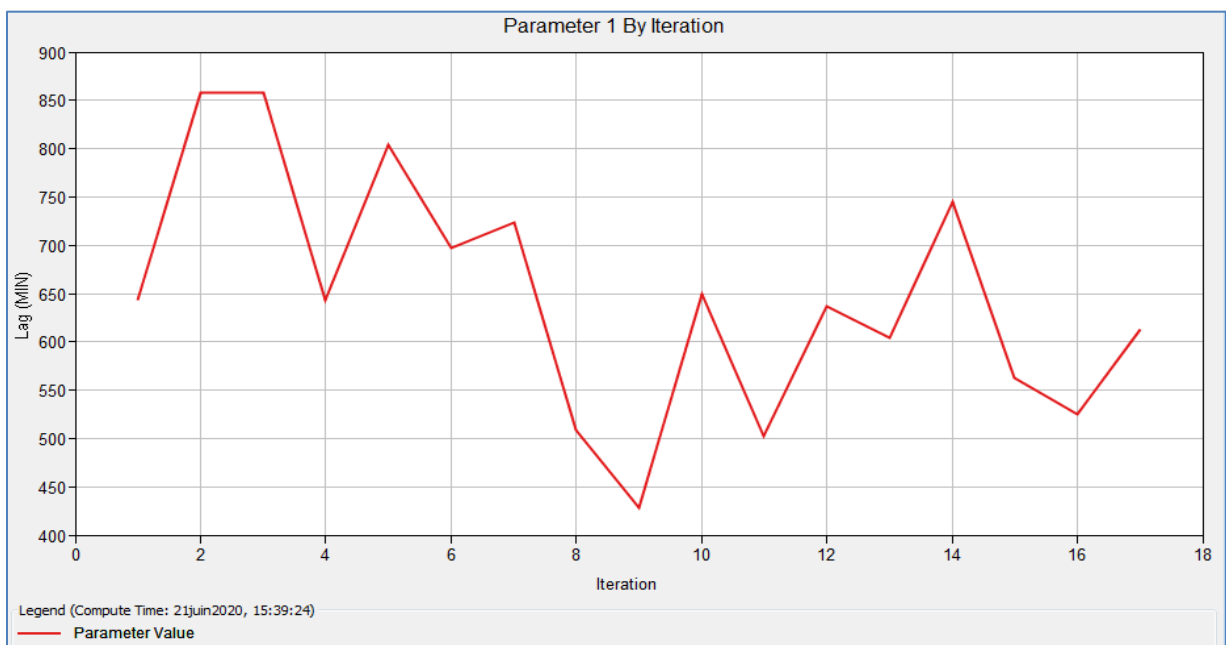


Fig. IV. 47 : Optimisation du Lag time par Nash-Sutcliff (2004).

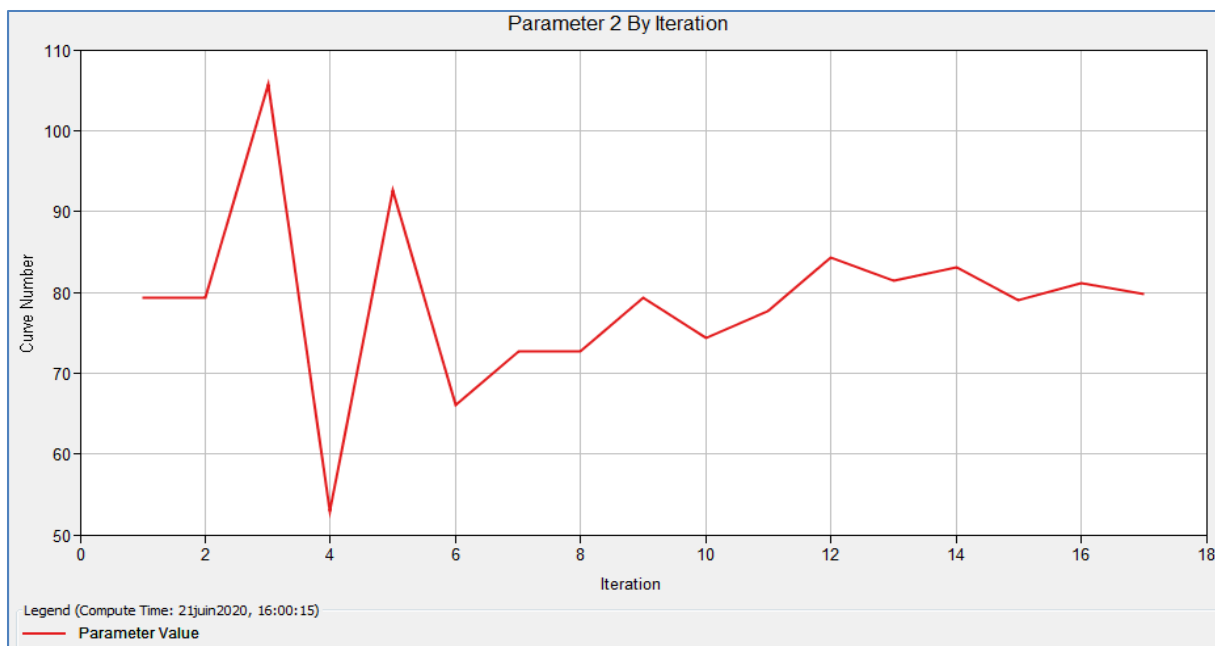


Fig. IV. 48 : Optimisation du CN par Nash-Sutcliff (2004).

L'optimisation des paramètres CN et Lag time par la fonction objective Nash-Sutcliff, pour le scénario de 2004, montre que la valeur optimisée du CN est idéale à la valeur 79.74 pour un Lag time optimisé de 613.48min.

IV.3.3.3- Fonction Coefficient de détermination

Les figures (IV.49, IV.50, IV.51) illustrent une optimisation des données des hydrogrammes simulés et des hydrogrammes observés :

- Pour l'année 1979 : la différence entre débit simulé et observé (Tab. IV.23) est estimé à 64.1 m³/s (10 %), et le volume ruisselé est de - 8.88 mm (-11.42 %), pour une différence de temps de pic estimée à 1 heure.
- Pour l'année 1989 : la différence entre débit simulé et observé (Tab. IV.24) est estimé à 5.1 m³/s (0.8 %), et le volume ruisselé est de 48.92 mm (85.21 %), pour une différence de temps de pic estimée à 2 heures.
- Pour l'année 2004 : la différence entre débit simulé et observé (Tab. IV.25) est estimé à 17.2 m³/s (- 2.3 %), et le volume ruisselé est de - 17.98 mm (-30.34%), pour une différence de temps de pic estimée à 30 minutes.

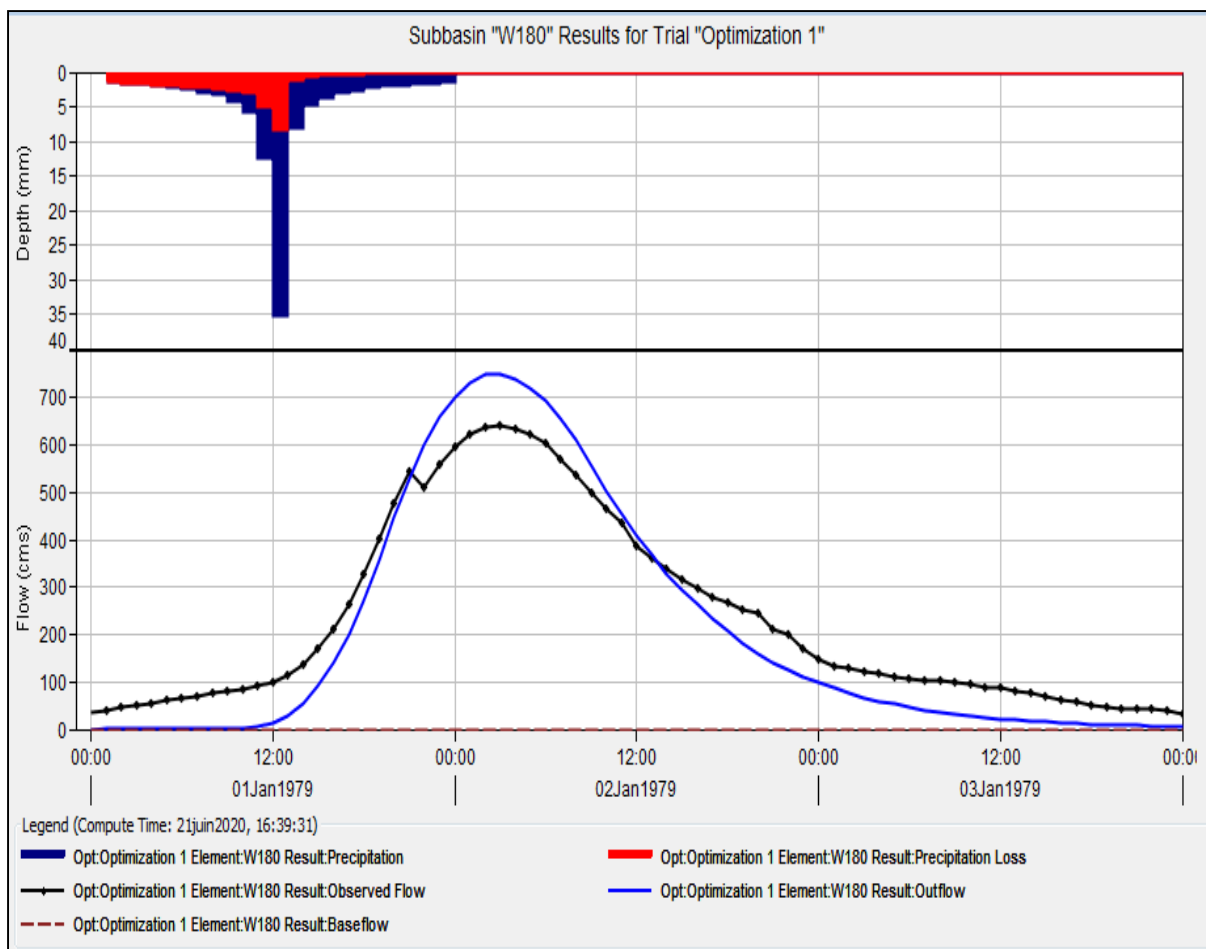


Fig. IV.49 : Optimisation des résultats des débits simulés et observés par la méthode Coefficient de détermination (1979).

Tab.IV.23 : Optimisation de la réponse du sous bassin « W180 » par le Coefficient de détermination (1979).

1979					
Mesures	Simulé	Observé	Différence	Différence %	
Volume [mm]	68.85	77.73	-8.88	-11.42	
Débit de pointe [m3/s]	703.7	639.6	64.1	10	
Temps de pic [h]	02janv.1979, 02:00	02janv.1979, 03:00			

La courbe de l'hydrogramme simulé approche mal la courbe de l'hydrogramme observé. Cependant un écart certain entre les deux est notable.

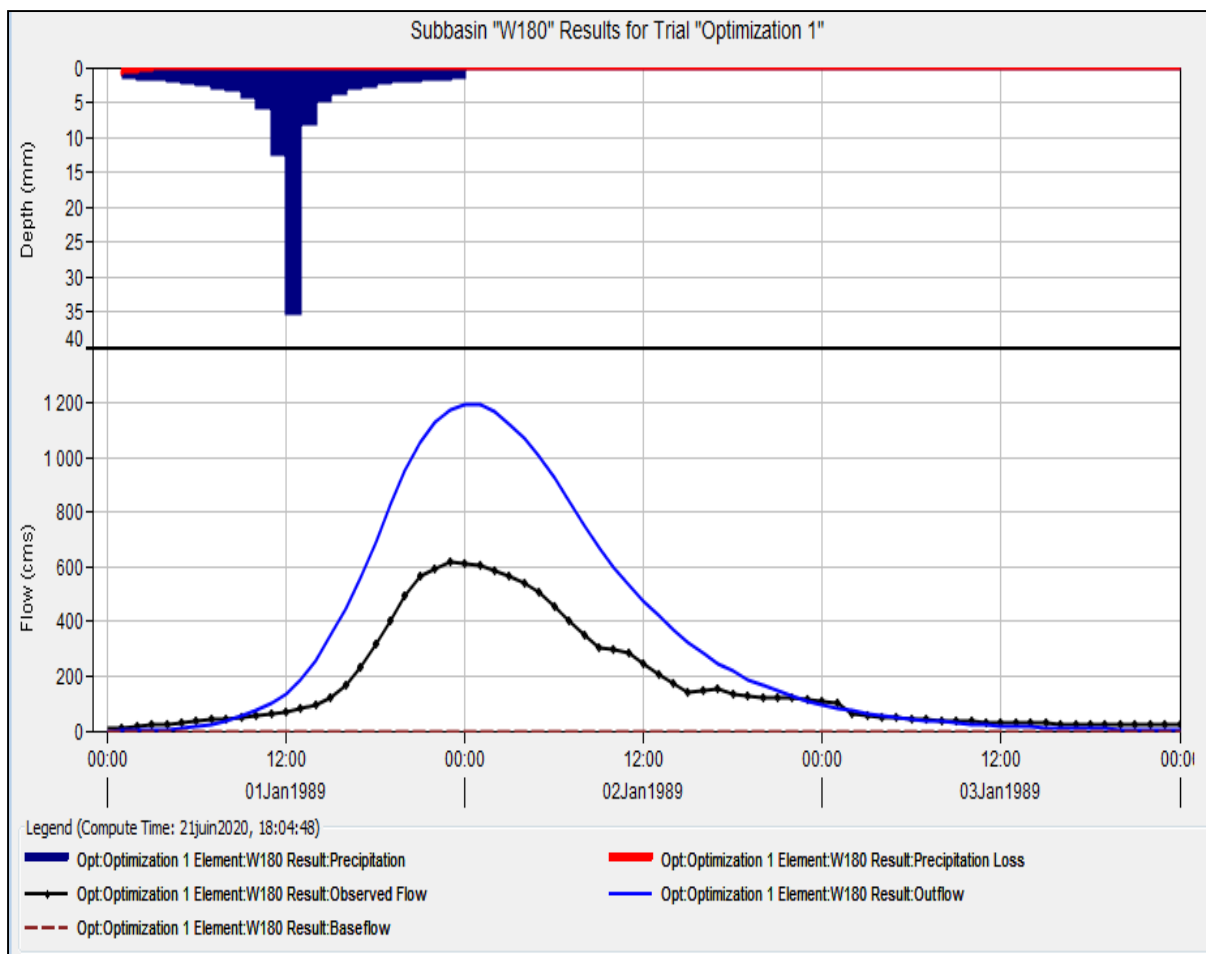


Fig. IV.50 : Optimisation des résultats des débits simulés et observés par la méthode Coefficient de détermination (1989).

Tab.IV.24 : Optimisation de la réponse du sous bassin « W180 » par le Coefficient de détermination (1989).

1989					
Mesures	Simulé	Observé	Différence	Différence %	
Volume [mm]	106.33	57.41	48.92	85.21	
Débit de pointe [m3/s]	620.8	615.7	5.1	0.8	
Temps de pic [h]	02janv.1989, 01:00	01janv.1989, 23:00			

La courbe de l'hydrogramme simulé est fortement majorée par rapport à la courbe de l'hydrogramme observé entre 12h et 48h. Dans cet intervalle temporel un écart entre les valeurs observées et les valeurs simulées est visible.

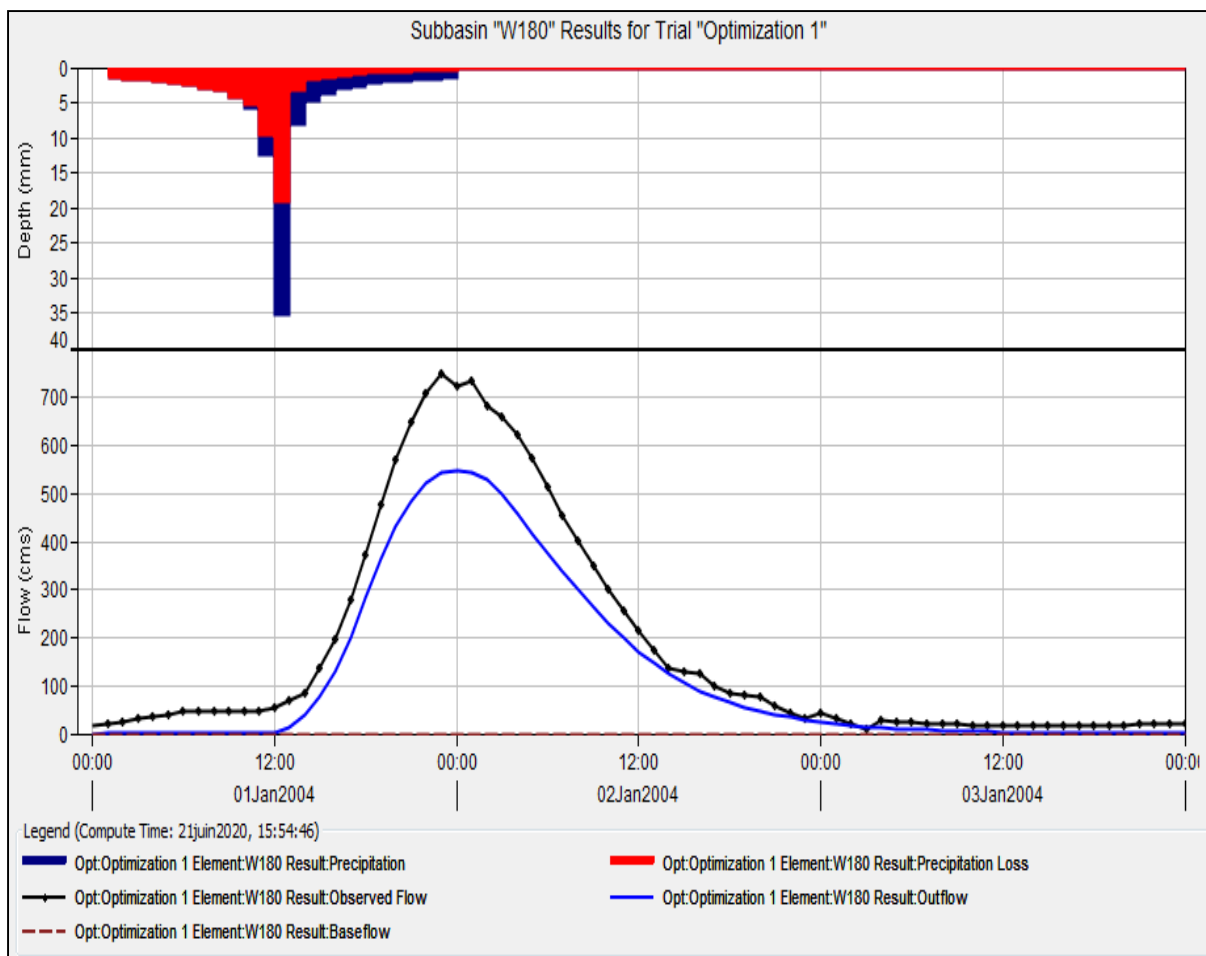


Fig. IV.51 : Optimisation des résultats des débits simulés et observés par la méthode Coefficient de détermination (2004).

Tab.IV.25 : Optimisation de la réponse du sous bassin « W180 » par le Coefficient de détermination (2004).

2004				
Mesures	Simulé	Observé	Différence	Différence %
Volume [mm]	41.29	59.26	-17.98	-30.34
Débit de pointe [m3/s]	734	751.2	-17.2	-2.3
Temps de pic [h]	02janv.2004, 00:00	01janv.2004, 23:00		

La courbe de l'hydrogramme simulé est moyennement minorée par rapport à la courbe de l'hydrogramme observé avant 48h. Un écart entre les valeurs observées et les valeurs simulées est visible.

Dans la modélisation pluie-débit de la zone d'étude, pour les scénarios (1979, 1989, 2004), la variabilité des paramètres de nombre de courbes (CN) et Lag time est relativement faible (entre 3 et 17%). Ces résultats dépendent essentiellement de la topographie du bassin, du type de sol, de l'occupation des sols et d'autres caractéristiques du bassin versant (Tab.IV.26).

Tab.IV.26 : Optimisation des paramètres CN et Lag par le Coefficient de détermination.

1979					
Éléme nt	Paramètre	Valeur Initiale	Valeur Optimisée	Différence %	NSE
W180	SCS Unit Hydrograph - Lag Time	715.67	775.31	8.33	0.892
W180	SCS Curve Number - Curve Number	75.73	94.66	25	
1989					
Éléme nt	Paramètre	Valeur Initiale	Valeur Optimisée	Différence %	NSE
W180	SCS Unit Hydrograph - Lag Time	671.16	650.19	3.12	-
W180	SCS Curve Number - Curve Number	77.90	90.48	16.15	0.758
2004					
Éléme nt	Paramètre	Valeur Initiale	Valeur Optimisée	Différence %	NSE
W180	SCS Unit Hydrograph - Lag Time	643.10	535.92	16.67	0.890
W180	SCS Curve Number - Curve Number	79.30	59.48	25	

Les valeurs NSE (entre 0.75 et 0.89), pour les trois scénarios (1979, 1989, 2004), démontrent que les tests de performances Coefficient de détermination relatifs au modèle sont assez mauvais.

Dans les figures (Fig. IV.35 - 39) nous pouvons voir que nous approchons les valeurs optimales du CN et du Lag time après 30 itérations de la fonction objective.

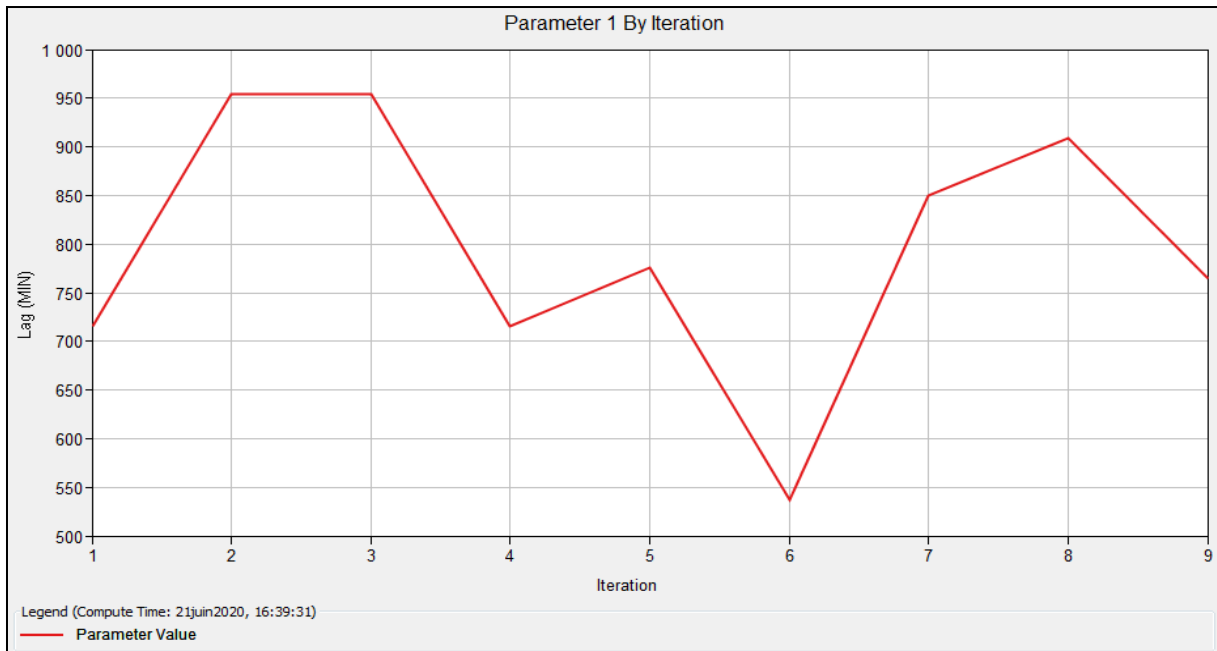


Fig. IV. 52 : Optimisation du Lag time par le Coefficient de détermination (1979).

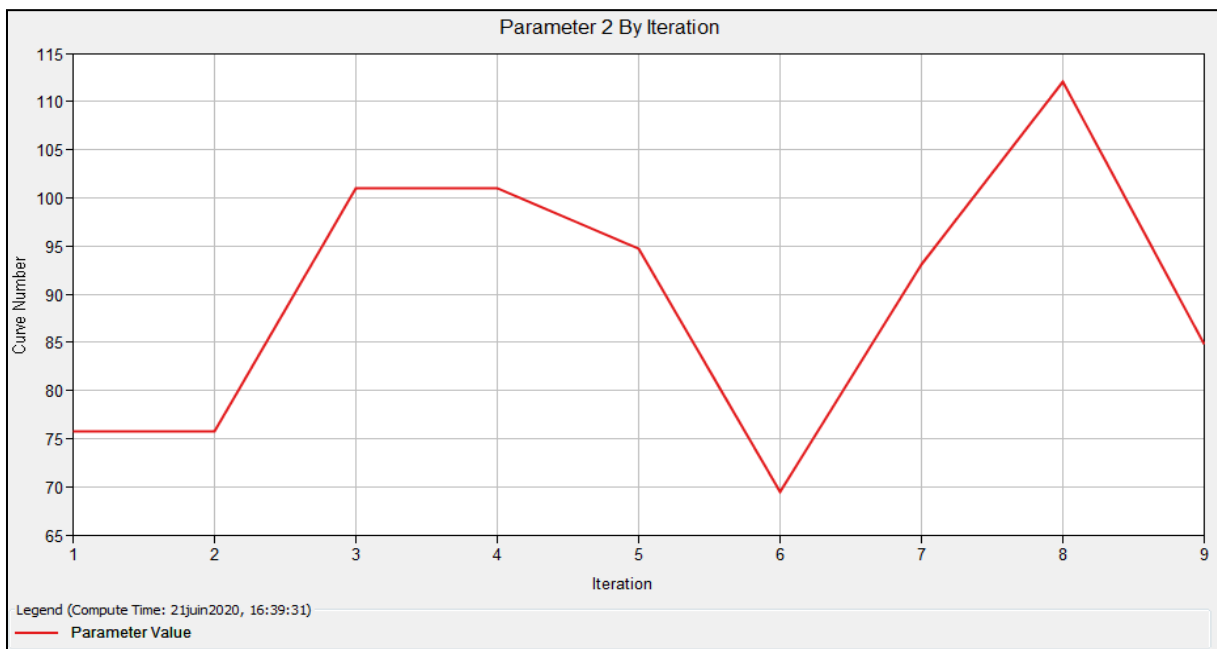


Fig. IV. 53 : Optimisation du CN par le Coefficient de détermination (1979).

L'optimisation des paramètres CN et Lag time par la fonction objective Coefficient de détermination, pour le scénario de 1979, montre que la valeur optimisée du CN est idéale à la valeur 94.66 pour un Lag time optimisé de 775.31 min.

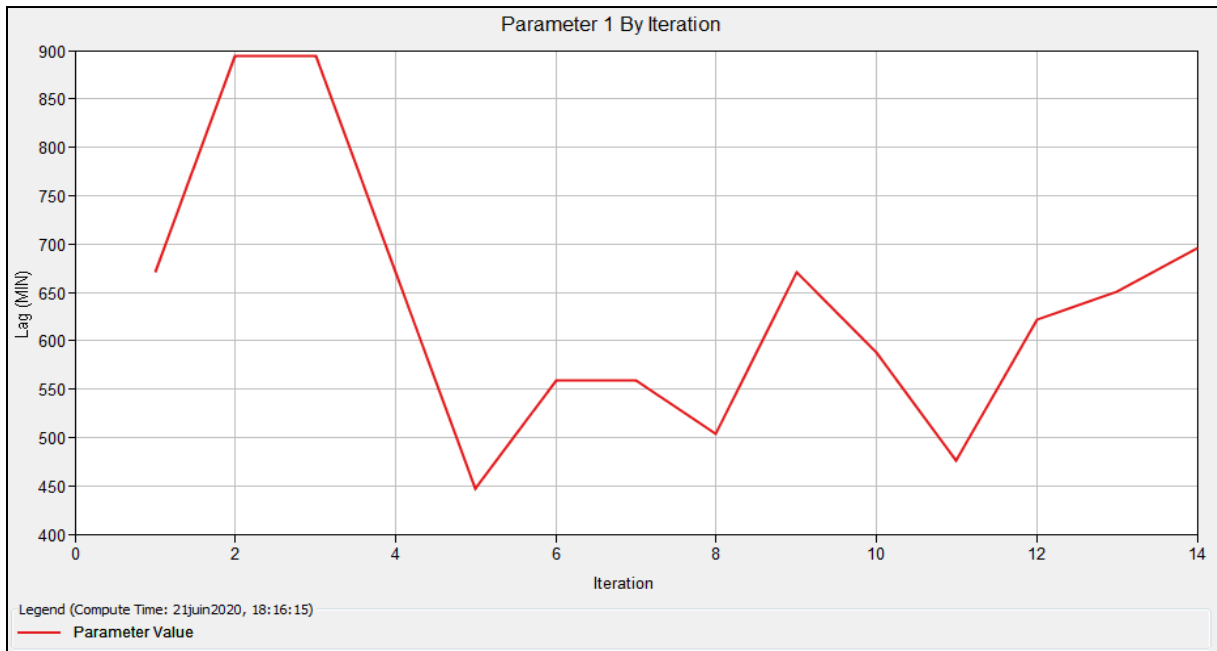


Fig. IV. 54 : Optimisation du Lag time par le Coefficient de détermination (1989).

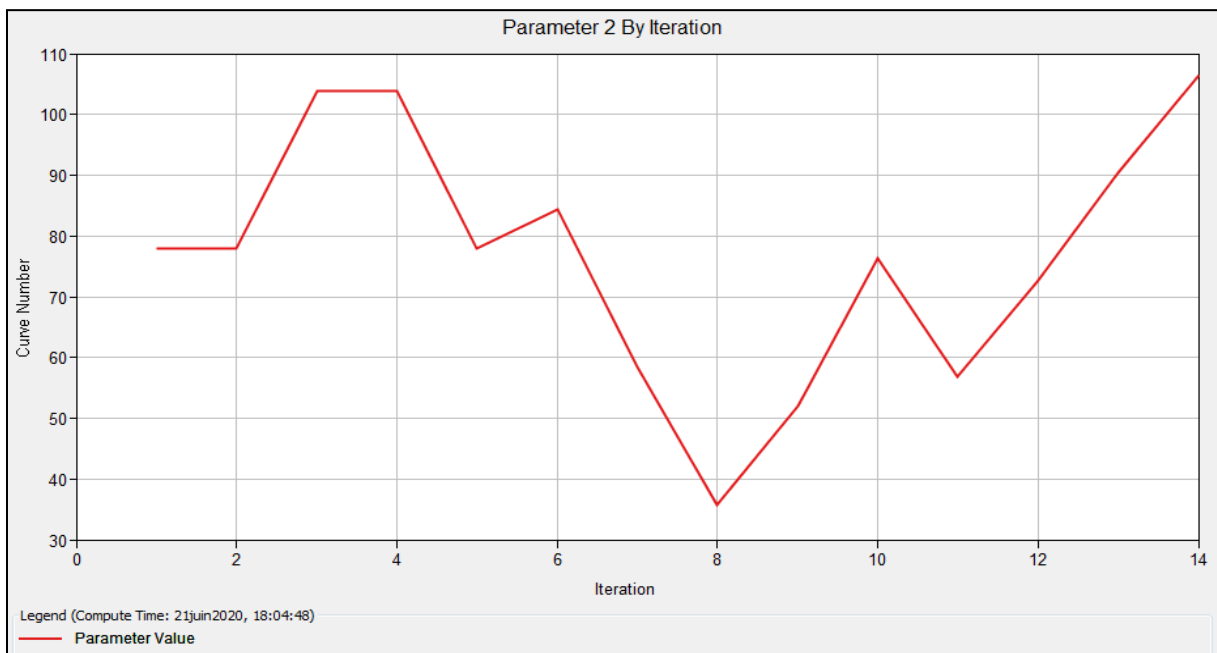


Fig. IV. 55 : Optimisation du CN par le Coefficient de détermination (1989).

L'optimisation des paramètres CN et Lag time par la fonction objective Coefficient de détermination, pour le scénario de 1989, montre que la valeur optimisée du CN est idéale à la valeur 90.48 pour un Lag time optimisé de 650.19 min

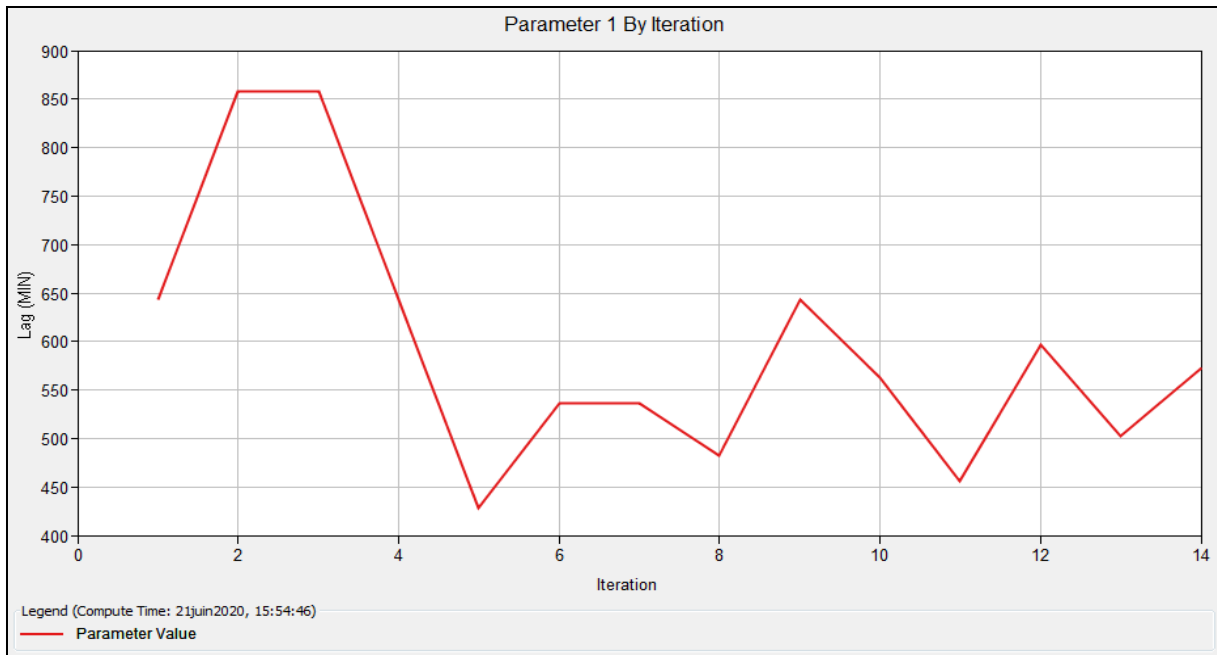


Fig. IV. 56 : Optimisation du Lag time par le Coefficient de détermination (2004).

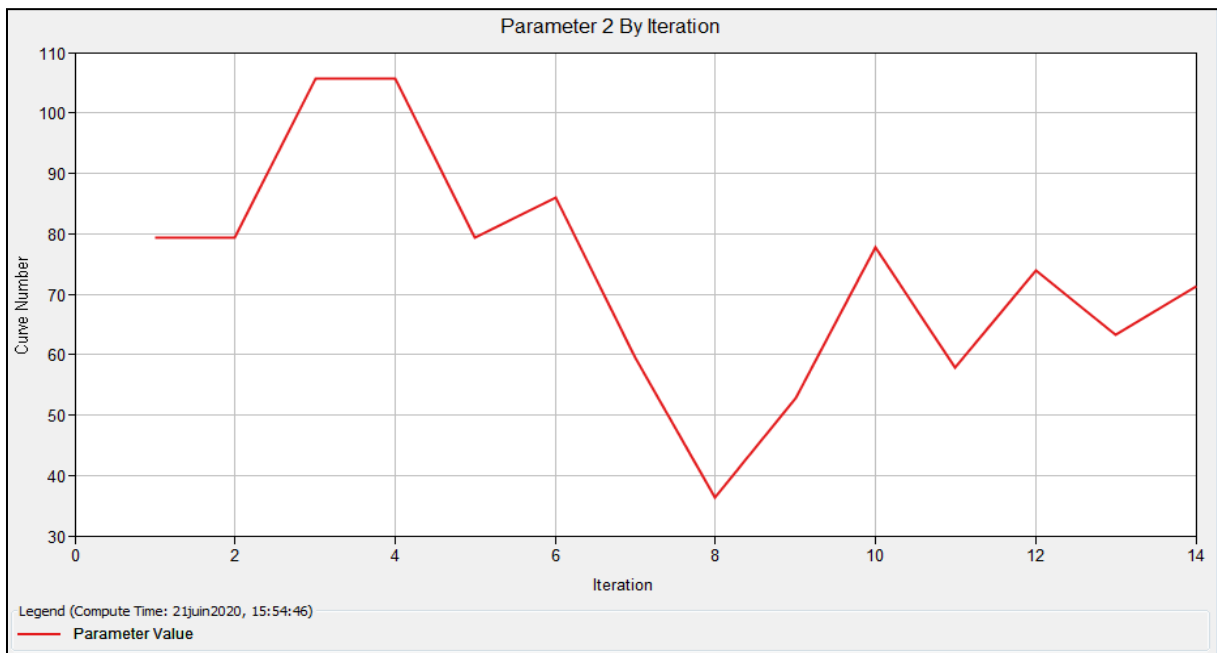


Fig. IV. 57 : Optimisation du CN par le Coefficient de détermination (2004).

L'optimisation des paramètres CN et Lag time par la fonction objective Coefficient de détermination, pour le scénario de 2004, montre que la valeur optimisée du CN est idéale à la valeur 59.48 pour un Lag time optimisé de 535.92 min.

IV.3.3- Discussion des résultats obtenus

Les résultats de comparaison entre les débits simulés et les débits observés (Tab.IV.18, IV.21, IV.26) ont montré que :

- Pour le scénario de 1979, le CN est très sensible dans le cas de la fonction objective RMSE (10%). En ce qui concerne le Lag Time, il est très sensible dans le cas de la fonction objective Coefficient de détermination (8.3%).
- Pour le scénario de 1989, le CN est très sensible dans le cas de la fonction objective Nash-Sutcliff (1.76%). En ce qui concerne le Lag Time, il est très sensible dans le cas de la fonction objective Coefficient de détermination (3.12%).
- Pour le scénario de 2004, le CN et le Lag Time sont très sensibles dans le cas de la fonction objective Nash-Sutcliff (0.55% et 4.61%).

L'optimisation effectuée par la fonction objective RMSE est la plus performante pour approcher le modèle réel. L'optimisation par la fonction Nash-Sutcliff est aussi performante néanmoins moins performante que celles via la fonction RMSE. Par contre, la fonction du Coefficient de détermination a été jugée insatisfaisante.

IV.4- Analyse de l'index de précipitation standardisé

Cet indice définit la sévérité de la sécheresse en différentes classes (Tab.III.9). Les valeurs annuelles négatives indiquent une sécheresse par rapport à la période de référence choisie et les positives une situation humide.

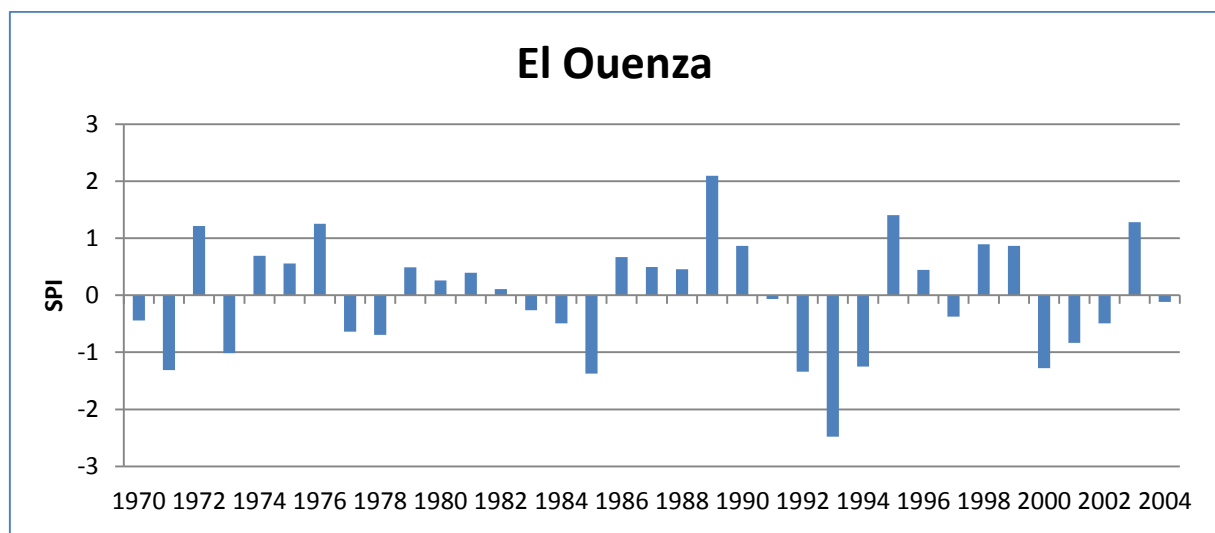


Fig. IV.58 : Valeurs annuelles de l'Index Standardisé des Précipitations de la station pluviométriques El Ouenza sur la période 1970-2004.

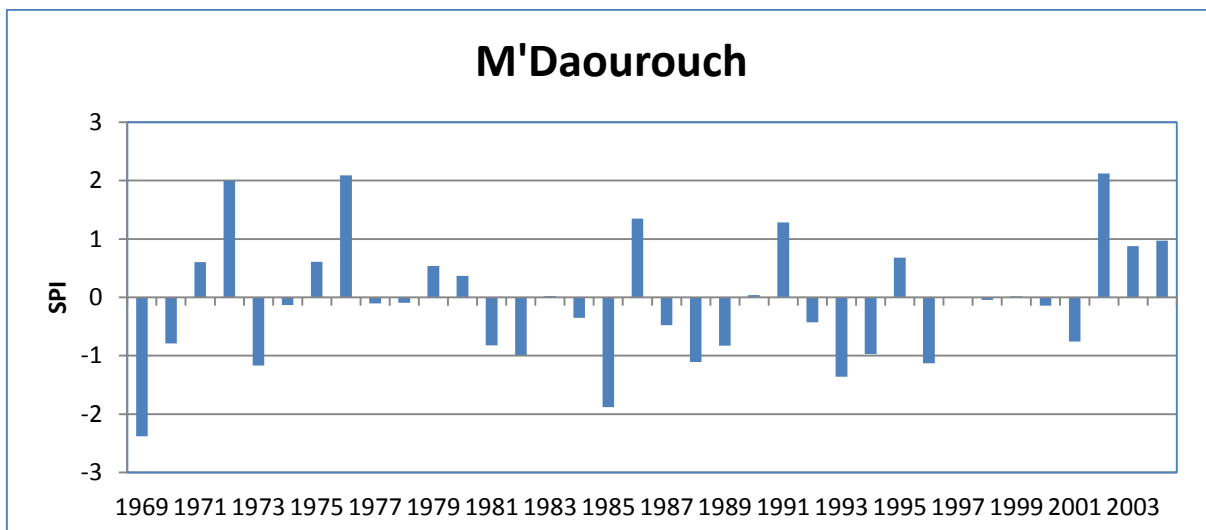


Fig. IV.59 : Valeurs annuelles de l'Indice Standardisé des Précipitations de la station pluviométriques M'Daourouch sur la période 1970-2004.

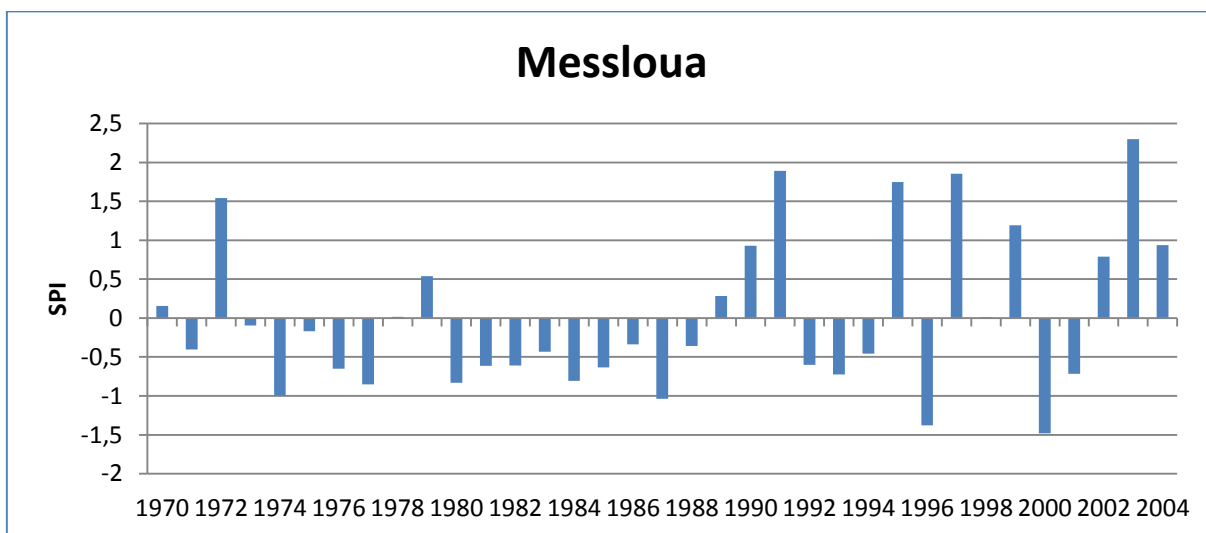


Fig. IV.60 : Valeurs annuelles de l'Indice Standardisé des Précipitations de la station pluviométriques Messloua sur la période 1970-2004.

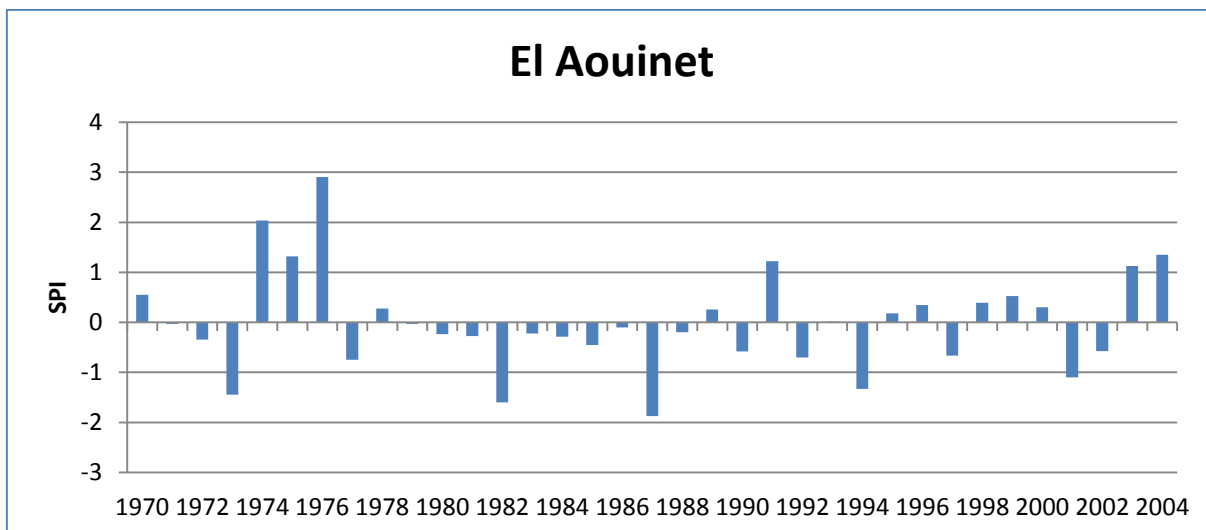


Fig. IV.61 : Valeurs annuelles de l'Indice Standardisé des Précipitations de la station pluviométriques El Aouinet sur la période 1970-2004.

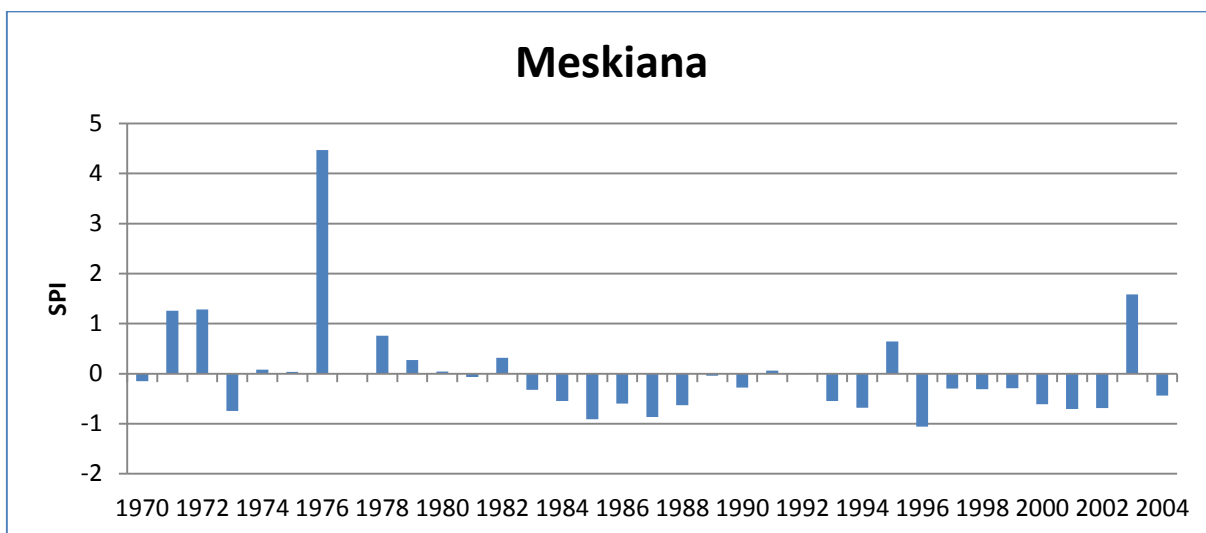


Fig. IV.62 : Valeurs annuelles de l'Indice Standardisé des Précipitations de la station pluviométriques Meskiana sur la période 1970-2004.

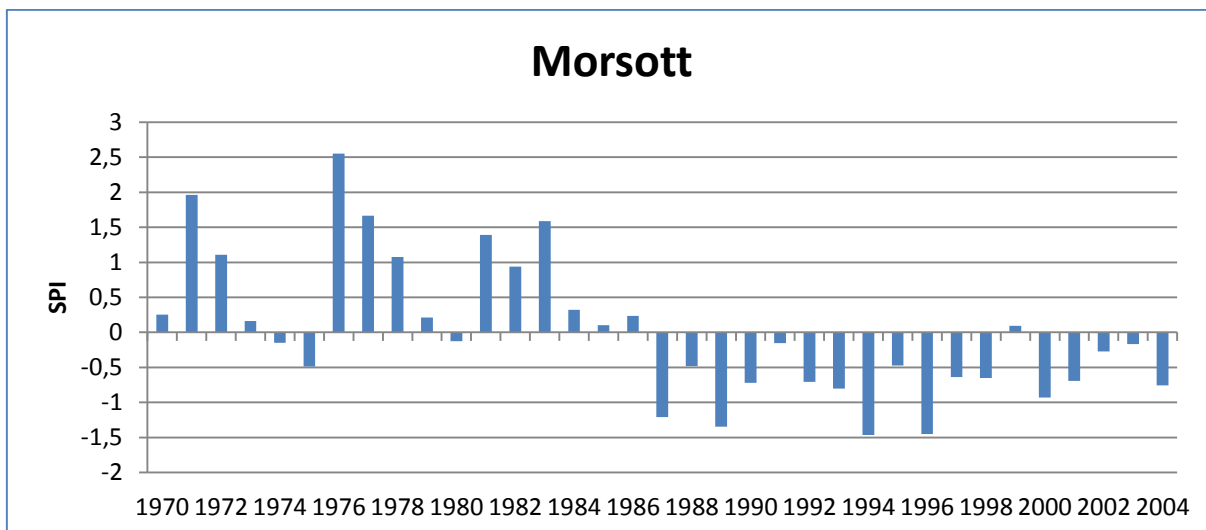


Fig. IV.63 : Valeurs annuelles de l'Indice Standardisé des Précipitations de la station pluviométriques Morsott sur la période 1970-2004.

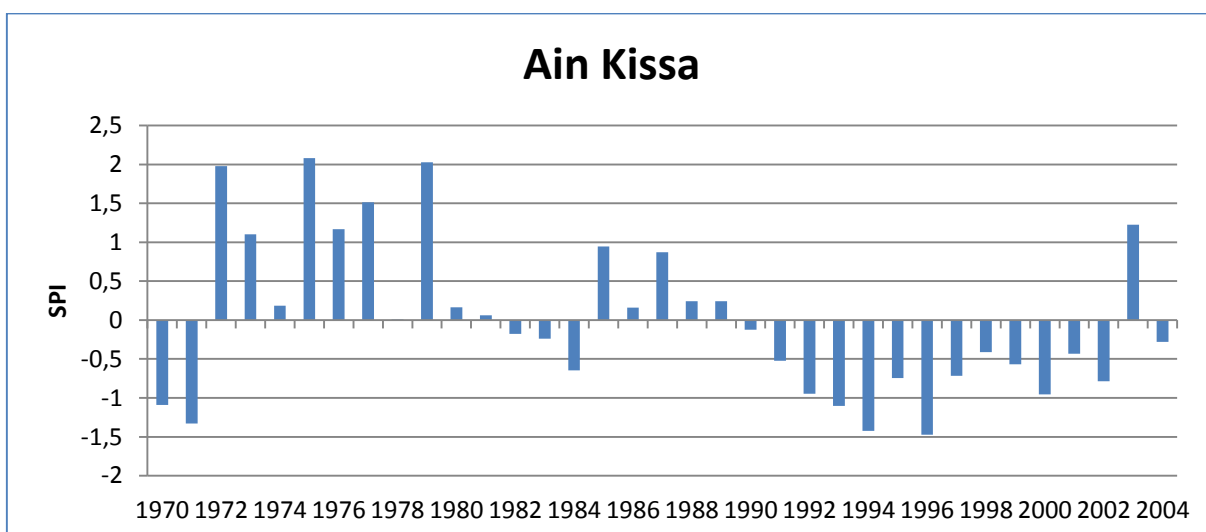


Fig. IV.64 : Valeurs annuelles de l'Indice Standardisé des Précipitations de la station pluviométriques Ain Kissa sur la période 1970-2004.

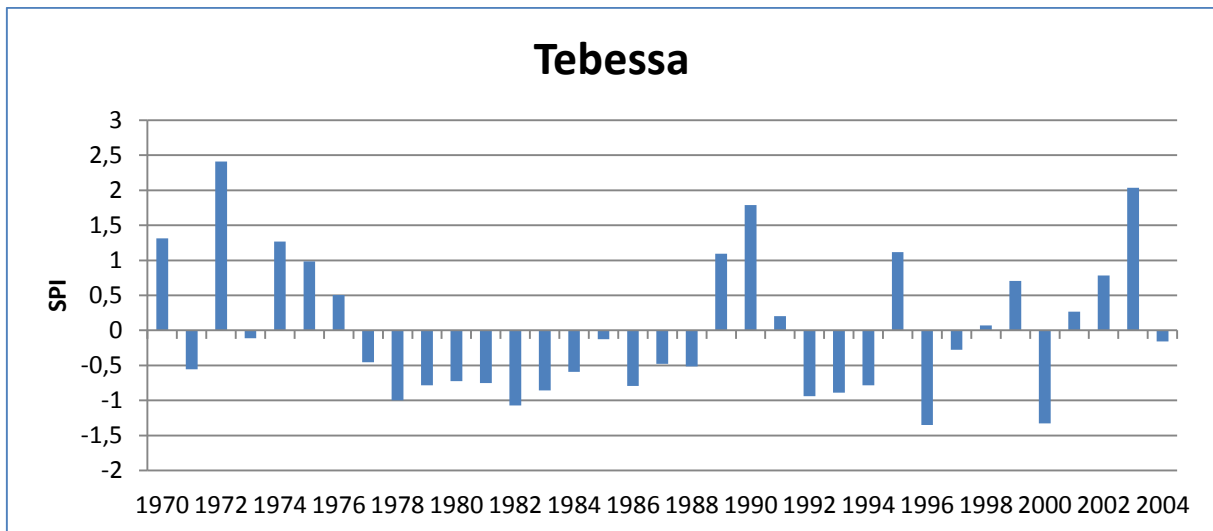


Fig. IV.65 : Valeurs annuelles de l'Indice Standardisé des Précipitations de la station pluviométriques Tebessa sur la période 1970-2004.

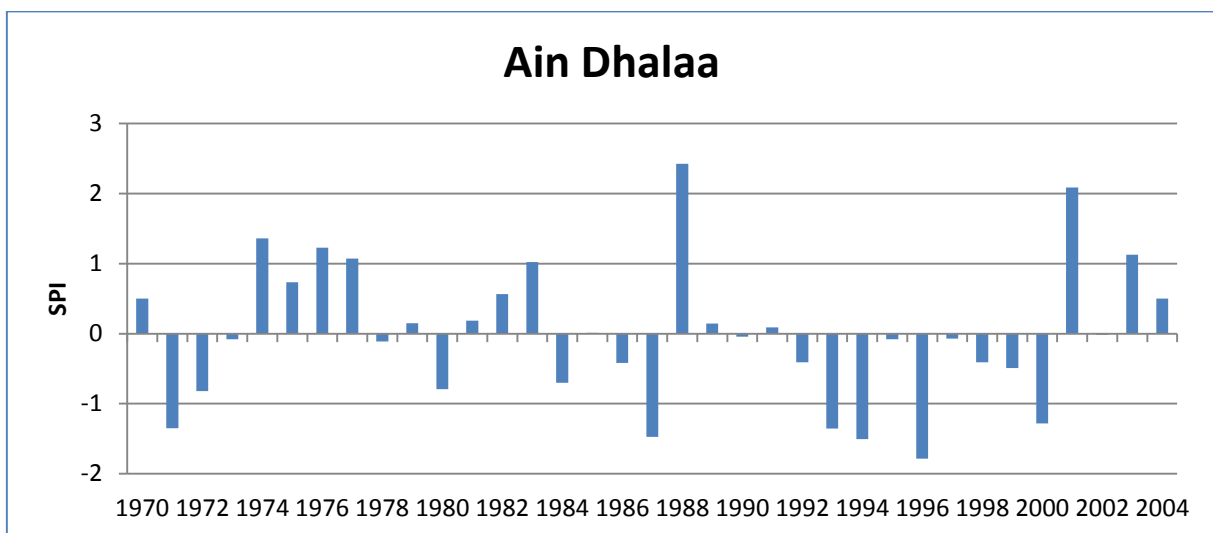


Fig. IV.66 : Valeurs annuelles de l'Indice Standardisé des Précipitations de la station pluviométriques Ain Dhalaa sur la période 1970-2004.

D'après les données d'étude, il est indiqué une situation majoritairement dominée par une sécheresse modérée. Les valeurs moyennes de l'indice SPI sont globalement négatives entre les années 1970-2004. Cependant, les événements extrêmes sont assez rares et les valeurs SPI sont généralement comprises entre $[-1,1]$ ce qui désigne des précipitations proches de la normale.

Ces résultats corroborent l'existence de variation climatique notamment l'installation d'une sécheresse perceptible. Néanmoins ces variations climatiques n'influent pas énormément sur la réponse de notre bassin versant.

Conclusion

Conclusion

Notre travail consiste à étudier le ruissellement généré par le bassin versant Mellegue selon les variations climatiques et les variations d'occupation du sol. Sur la base de ces considérations, nous avons construit un modèle hydrologique et choisi des méthodes adéquates pour déterminer l'existence d'impacts.

Dans notre simulation, nous avons pris en compte la totalité du bassin ainsi que ses sous bassins pour établir les hydrogrammes de crues et les volumes ruisselés selon les scénarios d'occupation de sol des années (1979 – 1989 – 2004). Les premiers résultats prouvent que les changements liés à l'occupation du sol ont un impact visible sur le ruissellement. En effet, ce dernier a crû au fil des ans.

Une analyse de sensibilité des paramètres Curve Number CN et le Lag time a été appliquée sur le sous bassin versant W180. Nous avons utilisé trois fonctions objectives; RMSE, coefficient of determination et Nash-Sutcliff. L'optimisation établie par la fonction RMSE est la mieux indiquée pour approcher le modèle réel. Nous pouvons tout aussi bien faire appel à l'optimisation par la fonction Nash-Sutcliff. Quant à la fonction du coefficient de détermination, elle a été jugée insuffisante.

Nous avons également étudié les variations pluviométriques, sur une période de 34 ans pour neuf stations, via l'indice de précipitation standardisée (SPI). Il a été remarqué que le climat a une tendance sèche modérée. Les valeurs SPI sont généralement comprises entre [-1,1] signalant une pluviométrie proche de la normale. Ce qui nous pousse à conclure que les changements pluviométriques manifestés dans la région pour cette période n'ont pas un impact imposant.

Annexes

Annexe :

Tab.1 : les données de pluies interannuelles relatives à la station d'El Ouenza.

Années	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Aout	Total
1970	41.2	25.1	2	10	24.9	35.7	9.8	11.7	48.9	11.5	5.5	19.3	245.6
1971	35.4	32.9	6	11	32.5	6.7	17.2	23.4	18.9	26.2	12	2.5	224.7
1972	59.6	81.4	2.5	37.3	42	41.9	136.7	45.1	0.3	16.7	13.8	21.4	498.7
1973	7	4.2	2.1	19.4	2.5	29.5	19.9	44.9	35.4	3.9	4.8	2.8	176.4
1974	16.6	18.3	16.8	8.6	17.9	74.2	26.3	57.7	42.6	1.1	6	12.5	298.6
1975	21.8	4	53.6	8.6	22.7	26	60	39.8	56.1	33.7	4.9	0	331.2
1976	1.3	32.8	77.7	19.1	30.6	2.3	48.5	39.6	70.2	37.5	0	17.2	376.8
1977	11.2	0.5	58.6	1.7	4.8	29.8	39.6	22.8	21.5	2.8	0	21.6	214.9
1978	0	16.5	4.2	7.5	2.3	35.1	31.6	57.8	38.8	75.8	0	0	269.6
1979	102	15.9	19.6	0.7	25.5	16.6	50.2	28.1	30.3	3.5	0	6.7	299.1
1980	22.1	0.5	25.1	54.2	16.7	25.4	24.6	22.5	2.5	29.2	0	44.2	267
1981	51.1	12.7	1.5	17.1	13.6	34	24.4	54.5	59.8	18.7	16.1	0	303.5
1982	58.1	9.7	15.4	24	18.6	25.3	30.1	35.4	67.8	17.1	5.3	16.9	323.7
1983	1.1	10	29.5	4.5	35.8	68.4	41.5	13.7	0	8.9	5.5	3	221.9
1984	12.7	28	3.2	26.5	12.6	18.6	39	13	54	0.7	0	0	208.3
1985	5.9	5.7	0	2.5	17.2	15.1	46.8	1.2	4.1	29	0.3	21.4	149.2
1986	39	29.2	38	40.3	21.7	20.1	48.9	13	36.2	0	30.8	13	330.2
1987	7.5	20.5	18.2	1.7	14.5	3.9	11.3	34	78.9	34.2	14.1	10.6	249.4
1988	8.3	17.5	22.7	38.7	6.5	19.2	3.7	16	20.8	36	30.2	24.5	244.1
1989	30.4	11.5	24.4	6	55.1	0	58	33.6	79.1	11.5	17.8	69.5	396.9
1990	29.8	15.2	78.5	51	20.7	28.1	51.1	41.5	33.7	18.5	0	1.5	369.6
1991	16.8	18.3	11	6.5	19.3	20.3	31.5	26.6	97.2	0	0	0	247.5
1992	5.5	14.3	32.7	37	3.6	20.8	19.1	0.5	17	12	0	0.8	163.3
1993	0	5.3	0	7.7	1.2	5.1	6	6.5	0	2	0	0	33.8
1994	2.4	9.7	1.6	0	28	0	15.8	6.3	0	62.3	3	33.5	162.6
1995	120.8	51	8.3	5.6	21.3	56.7	38	24	23.7	8.5	41	14.8	413.7
1996	36.9	5.3	0.7	7.6	28.2	5.3	17.7	79.9	17.8	21.7	6.1	36	263.2
1997	48.9	4	56.2	35.4	4.2	8.8	13.4	36.5	25.9	19.5	0	22.8	275.6
1998	56.5	16.1	71.2	0	51.5	6.2	26.2	5.5	22.3	22.7	24.6	1	303.8
1999	90.7	5	24.2	13.2	2	8.5	4.5	8.7	146.4	56	0	17	376.2
2000	12.7	19	0.6	5.3	37.2	17.9	6.4	15.7	39	0	0	0	153.8
2001	64.6	19	11.4	0	2.1	5.3	0	15	20.6	21.7	18.9	18.8	197.4
2002	4	6.4	46.3	19.1	88.6	15.5	15.8	30.8	19.9	7.5	5.4	3.2	262.5
2003	13.8	55.4	1.7	81	5.2	3.7	35.8	18.6	75.9	64.1	2.9	49	407.1
2004	12.5	17.5	80.8	67.9	17.4	40.9	12.8	18.5	0	6.5	2.6	3	280.4

Tab.2 : les données de pluies interannuelles relatives à la station Meskiana.

Années	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Aout	Total
1970	1.5	43.6	0	6.5	60.5	28.9	0.2	3.5	41.5	12.5	16.4	18.5	233.6
1971	100.5	52.8	8.9	10.8	69	11.4	31.5	51.7	20.3	136.1	13.5	24.9	531.4
1972	18.8	108.9	5.2	31	59.1	60	130	54.6	4.5	16	1.8	38.8	528.7
1973	5.2	8.5	9	17.1	1	40	2	35.9	19.2	4.8	0.9	13.2	156.8
1974	1.3	12.5	23	8	12.7	68.2	37.8	50	58	0	8.5	24.1	304.1
1975	16.5	3.9	9.2	29.2	14.5	28.4	44.4	27.4	28.7	33.9	8.2	23.9	268.2
1976	6.2	6.7	30	54	3	6.5	5.3	11.3	30.5	0	0.6	1.3	155.4
1977	33.2	62.8	42.1	63.9	20.4	14.3	15.7	66	16.6	3.9	1.2	6.8	346.9
1978	22.9	37.5	15.9	27.6	1.5	22.3	15.7	66	1	67.2	0	23.9	301.5
1979	72.1	19.8	6.1	2.1	22.9	30.8	64.9	33	1	67.2	0	23.9	343.8
1980	41.6	0.6	43.4	56.6	17.8	26.3	41.3	21.6	15.8	27.1	1	10.8	303.9
1981	40.4	14	2.5	27.9	14.2	30.6	7	60.7	83	0	0	0	280.3
1982	42.7	49	53.3	23	3	0	32.4	4	27	14.8	0	31.3	280.5
1983	7	15.2	16.7	12	60.6	96.6	22.7	17.6	0	8.1	0	0	256.5
1984	11.4	36.7	4.3	69.6	22.7	3.8	52	19	27	0	0	0	246.5
1985	0	0	0	3.5	23.2	13.9	75.4	0.8	19.2	20.5	15.9	0	172.4
1986	62.6	4.6	18.9	20.5	0	17.2	31.9	0	15.2	0	0	23	193.9
1987	0	2.5	0	1.8	4.4	13.8	11.8	20.7	32.1	40.2	0	0	127.3
1988	13.5	22.6	28.5	23.1	2.7	19.5	0	6.9	0	0	0	49.9	166.7
1989	6.8	0	22.1	7.9	62.8	0	39.3	32.7	149.2	0	3.6	16.5	340.9
1990	31	7.5	56.9	35.2	2.9	19.5	40.6	54.8	32	0	0	0	280.4
1991	0	39	27.5	0	37.6	51.3	45.5	24.9	69.8	0	0	7.5	303.1
1992	3	64	37.4	44.8	0	14.1	8.2	1.4	38.4	2.6	2.3	24.9	241.1
1993	24.5	3.2	3.9	25	7.5	26.8	19	28.9	10.5	0	0	2.3	151.7
1994	7.5	26.2	6.5	5.8	44.2	0	8.8	11.5	0	74.9	23.1	6.7	215.2
1995	98.7	26.8	7	12	88	63	66	33.2	12.2	15.8	0	3.5	426.2
1996	8.6	0	0	2.4	10.5	0	11	33.5	13.3	7	1.7	0.6	88.6
1997	65.7	4.9	40.2	22.6	14.8	4	27.8	56.7	11.6	12	0	19.4	279.7
1998	20.1	15.5	16.7	3.4	88	2	15.7	9.9	17.8	38.3	11	0	238.4
1999	25.1	57.7	43.8	27.9	2.9	0.3	0	0	97.1	22	0	0	276.8
2000	19	27.8	9.5	23.2	20	14.8	6.1	12	49	20.8	0	0	202.2
2001	12	25	12.8	0	0	0	5.5	11.1	8	28	0	87.2	189.6
2002	3.4	6	52.9	6.8	12.3	12.1	16	36.5	28	11.1	0	0	185.1
2003	26.3	79.9	10.2	71.7	10.2	4.3	31	13.9	92.6	40.9	16.2	36.8	434
2004	32.4	1.2	80.3	52.7	2.7	13.4	5.6	13.7	0.3	4.5	0	3.5	210.3

Tab.3 : les données de pluies interannuelles relatives à la station Ain Dhalaa.

Années	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Aout	Total
1970	7.3	28	0	7.8	66	23.7	30.1	28.3	33.4	17.3	0	11.8	253.7
1971	24.7	37.2	2.8	6.6	28.1	72.7	30.4	49	17.6	15.2	0	0	284.3
1972	42.1	19.8	1.4	7.2	47.1	27.2	18.5	35.1	1.9	39.2	0	3.9	243.4
1973	29.7	54.9	17.4	9.1	54.3	79.5	26.3	21.3	3.9	78.5	0	7.9	382.8
1974	17.3	30.1	33.4	11	61.8	132.3	32.2	56.1	33.6	0	0	2.5	410.3
1975	40.7	4.3	42.1	0	29.9	7.5	72.5	29.1	73.2	45.2	19.9	18.4	382.8
1976	78.2	20.4	165.2	59.2	48.9	0	73.5	50.7	24.8	0	0	0	520.9
1977	0	0	94.5	0	0.6	31.3	24.1	62.9	25.6	0	27.5	81.1	347.6
1978	0	29.6	16.9	0.8	3.2	43.2	35.1	53.9	13.7	26.2	0	31.5	254.1
1979	134.6	32.3	0.4	2.5	15.3	1.5	131.7	24.3	42.7	0	0	0	385.3
1980	4.1	0	64.2	59.1	55.6	12.1	13.2	12.3	11.7	20.6	0	1.1	254
1981	74.6	0	0	14.8	97.2	66.3	54.2	41.3	32.1	13.1	6.7	19.2	419.5
1982	48.4	27.2	16.1	27.8	59.2	75.3	37.5	23.4	34.8	6.5	0	17.1	373.3
1983	22.2	54.4	32.1	42.6	21.2	41.2	20.9	23.1	37.5	0	0	15.1	310.3
1984	20.6	13.4	9.5	21.3	15.2	29	44.9	29.4	45	0	0	0	228.3
1985	19	17.7	20.3	15.8	5.4	16.8	68.9	36.2	52.5	0	0	0	252.6
1986	22.4	22.1	31.1	19.3	14.6	0	39.1	23.1	33.9	0	0	0	205.6
1987	19.5	20.2	24.5	7.1	3.9	0	9.3	10.1	15.2	0	0	0	109.8
1988	30.9	15.6	19.4	11.6	11.8	11.7	10.6	8.5	18.8	63.9	0	68.1	270.9
1989	38.4	5.1	13.7	16.1	62.7	0	42.7	36.7	88.2	0	0	18	321.6
1990	11	15.1	19.1	11.6	26.1	3.9	20.8	18.4	66	7.8	0	1.6	201.4
1991	13.1	48.5	27.9	15.7	23.9	30.3	45.7	13.6	72.5	4.4	0	0	295.6
1992	10.4	7.2	46.6	7.3	0	20	21.9	2.8	48.2	0	3.5	20.2	188.1
1993	7.8	8	26.8	1.5	0.1	0	24.1	21	11.4	0	0	0	100.7
1994	5.2	21.3	8.4	2.6	15.8	0	3.4	0.9	0	24.4	0	17.8	99.8
1995	3.6	36.1	3.9	8.8	39.2	63.9	57.1	41.1	25.8	32.1	0	12.8	324.4
1996	22.1	0	3.8	8.2	19.5	0	0	32.7	0	0	9.3	8.9	104.5
1997	34.8	31.9	46.9	22.8	0	11	34.3	45.5	12.6	22.4	0	16.5	278.7
1998	17	10.8	14.5	2.3	56	9	11.2	2.8	16	34	4.4	25	203
1999	31.5	37.2	34.9	30.6	8.1	0.6	3.2	4.6	50.9	24.8	3.6	3.8	233.8
2000	41.3	16.6	9.7	24.6	19.9	7.6	3	0.7	38.1	0	9.7	3.8	175
2001	52.6	51.9	20	6.9	7.6	8.5	2.3	11.9	17.3	14.7	31.6	90.8	316.1
2002	16.2	21.2	29	21.5	46.5	19.3	16.6	69	39.5	28.2	1	0	308
2003	45.8	74.9	13.9	56.2	8.2	2	31.1	13.9	72.3	59.9	12	4.2	394.4
2004	6	0	134.2	75.5	5.8	24	12.8	15.1	0	27.6	4.3	35.8	341.1

Tab.4 : les données de pluies interannuelles relatives à la station Hammamet.

Années	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Aout	Total
1970	34.5	31.2	27.6	23.1	27.4	22.9	40.2	31.1	22.9	0	0	0	260.9
1971	97.7	60.9	8.1	9.8	56.9	8.8	60	70.7	31.4	50.9	8.9	5.8	469.9
1972	51	114.8	8.5	16.8	36.6	42.9	155.2	50.8	39.5	29.1	16	27.6	588.8
1973	6.1	16.8	9.2	132	3.3	26.3	19.3	35.1	20.5	34.1	0.7	1.1	304.5
1974	76.3	28.9	17	9.4	39.3	79.9	20.8	33.9	69.3	0	9.4	20.7	404.9
1975	39.1	1.6	82.4	7	33	48.9	110.5	21.7	57.7	47.1	17.7	20.4	487.1
1976	38.5	25.1	121.8	14.9	13	5.4	70.8	30	87.8	15.1	13.1	17.9	453.4
1977	13.6	2.5	67.2	1	4.5	57.8	43.7	42.1	34.3	15.6	0	46.6	328.9
1978	12.5	27	11.9	2.6	25.6	35.5	35.5	72.4	17.9	48.9	4	0	293.8
1979	43.1	36.9	9.9	1.2	26.8	20.4	72.9	38.1	46.6	0.8	0	6.4	303.1
1980	91.9	1	24.9	39.8	19.9	37.6	26.5	12.9	14	29.3	0	3.4	301.2
1981	43.7	20.1	2.6	0	15.9	28.6	7.4	73.1	85.8	29.5	1.9	2	310.6
1982	46.6	30.5	3.4	21.8	24.9	35.6	56.6	43.7	45.8	17.2	0	0	326.1
1983	2	33.6	24	11.7	39.2	57.6	24.4	21.7	4.8	7.9	0	17.6	244.5
1984	29.3	72.6	27.1	58.8	23.6	9.2	51.9	20.7	66	3.8	4.5	1.8	369.3
1985	36.8	22.1	3.7	16.5	25.3	4.8	84.4	1.6	19.8	29.7	42.9	14.5	302.1
1986	31.9	24.6	26.3	15.3	9.6	22.5	63.4	6.2	19.3	0	14	2.2	235.3
1987	15.2	0	24	10.1	11.9	4.7	24.1	27.8	32.4	47.7	1.7	14.3	213.9
1988	15.1	35.5	22.5	32.6	14.2	21.3	9.6	10.4	10	73.6	2.8	39.5	287.1
1989	35	8	14.3	19.8	131.4	0	44.7	35.2	77.6	14.4	7.4	61.6	449.4
1990	38.9	10.8	103.3	59.4	18.5	21.9	85.7	33.7	74.3	22.6	6.3	0.5	475.9
1991	39.3	37	31.7	14.5	30.4	33.5	51.3	35.1	83.1	13.5	8.7	0.5	378.6
1992	12.6	33.4	41.2	20.3	32.8	15.6	42.1	28.1	63.1	16.6	0	0	305.8
1993	25.6	27.2	30.7	26.2	33.7	19.5	48.2	21.8	43.1	19.8	0	0	295.8
1994	3.9	29.9	1.2	2.7	40.4	0.4	14.1	16.5	1.2	73.4	0.3	27	211
1995	91.3	12.4	6.9	7.9	31.6	54.5	55.2	43.6	16.2	12.6	8.1	12.1	352.4
1996	18.1	3	1.5	3.9	23	15.7	9.3	25.8	2	0.8	46	13.2	162.3
1997	59.2	46.5	15.9	15.7	11	13.3	32.2	36.6	25.6	26.7	0	3	285.7
1998	29.3	37.5	21.4	7.2	73.3	2.2	5	4.7	2.8	20.8	7.1	40.7	252
1999	11.6	11	74.8	29.5	9.1	3.5	7.1	15.2	63.7	36.5	1.2	1.5	264.7
2000	26.3	8.6	4.7	5.1	14.3	16.6	10	1.6	38.9	0	7.9	32.2	166.2
2001	25.5	14	19.6	3.2	2.4	2.5	0.5	21.3	23.7	9.9	16.2	43.3	182.1
2002	11	51	48	17.4	87.5	24.3	17.3	83.1	25.4	9	7.4	4.5	385.9
2003	53.7	87.2	19.3	107.2	10.1	1.6	57	20.5	224.2	83.6	9.5	2.7	676.6
2004	19.4	59.7	50.2	75	6.4	59.4	4	27.7	5.7	35.7	4.6	44	391.8

Tab.5 : Précipitations journalières maximum de 1970 à 2004.

Code	120201	120202	120301	120302	120306	120304	120307	120311	120318	120401	120402	120403	120405	120514
Station	Meskiana	Ain Dhalaa	Tebessa	Boukhadra	Hamamet	Ain Kissa	Bekkaria	Ain El Kebira	Morsott	Quenza	El Aouinet	M'Daourouch	Messioula	Ain Erkel
Années	Max	Max	Max	Max	Max	Max	Max	Max	Max	Max	Max	Max	Max	Max
1970	41.3	102.7	48.7	29.3	37.6	22.0	42.8	35	44.0	23.2	29.0	34.5	26.5	30.9
1971	80.5	31.2	30.3	52.0	39.2	28.9	45.0	64	113.5	13.5	39.9	45.7	21.7	29.5
1972	61.5	25.8	94	38.5	88	80.2	62.0	48	67.0	55.5	25.2	66.1	38.0	56.6
1973	20.0	23.5	50.2	31.0	81.8	51.1	45.9	40	50.0	33.6	17.0	34.3	21.5	24
1974	31.5	51.3	53.4	42.7	44	43.2	30.6	96	52.2	47.0	40.6	70.3	17.5	40.7
1975	23.0	40.7	35.3	41.9	58.5	69.0	40.0	50.4	34.2	44.0	39.8	25.7	19.2	50.5
1976	211.2	66.2	73.1	56.5	61	65.2	94.0	51.2	89.2	33.8	47.8	42.2	22.5	56.8
1977	27.7	83.8	43.5	33.5	36	63.4	18.6	61.3	100.5	26.7	26.1	31.9	15.8	57.4
1978	42.2	29.8	27.6	32.0	33.3	46.0	31.5	45.2	91.7	33.5	38.3	39	35.3	40.6
1979	41.0	59.3	35.1	22.0	42	71.3	41.2	41.5	54.2	35.9	30.7	32.4	29.3	44.4
1980	27.6	22.7	27	27.5	36.2	48.4	52.2	95.4	35.5	33.7	42.0	48	23.1	20.7
1981	30.8	27.8	29.1	32.0	20.9	36.0	44.5	50.3	73.5	26.3	29.2	19.5	28.0	34.1
1982	34.5	30.0	32.2	48.0	36.5	44.8	46.0	39.2	74.9	18.2	20.0	22	21.9	57.4
1983	32.4	33.2	46.8	29.0	24.7	34.0	52.0	61.5	73.2	35.0	49.0	35	34.0	34.3
1984	18.1	27	22	34.7	36.7	41.5	24.0	51.2	116.0	45.8	28.0	42.0	36.2	40.2
1985	17.0	28.5	58	32.0	30.7	47.2	30.3	45.4	37.8	18.5	26.0	19	23.4	24.1
1986	17.1	40	21.5	24.0	16.5	34.4	25.5	37	50.0	21.5	21.5	56.9	19.7	36.8
1987	18.7	16.4	30	44.3	16.3	41.4	28.0	51.5	27.4	37.0	22.0	21.1	37.5	23.4
1988	22.6	68.1	22.4	26.0	31.3	36.5	27.5	38	71.4	28.1	31.5	19.2	18.9	28.6
1989	44.0	28.0	67.3	68.0	67.9	39.2	122.0	80.4	22.5	38.5	48.3	32.3	32.8	35.5
1990	21.0	28.0	59.2	51.0	38	22.0	52.5	6.5	33.7	29.0	36.5	49.8	34.1	32.8
1991	32.0	30.5	43.8	40.0	30.7	40.0	112.0	27.4	69.3	61.3	73.7	41	96.5	60
1992	37.0	42.0	25.3	57.0	30	47.0	51.0	28.7	58.5	20.0	23.6	37.7	28.7	101.7
1993	24.5	22.8	21.8	45.0	25.9	19.2	21.5	22.4	32.2	6.0	47.0	25.5	31.8	39.7
1994	20.0	24.4	27	32.0	24.3	27.5	44.5	31.5	27.5	28.5	17.5	21.2	26.4	65.2
1995	54.0	32.1	53	52.5	37.8	24.8	27.0	17.4	45.5	40.0	40.0	34.2	36.0	19.2
1996	13.0	20.3	19.8	28.2	32.2	16.6	16.5	18.0	26.4	48.0	75.0	20.5	24.0	24.2
1997	19.0	22.6	31.8	27.6	27.8	30.5	22.5	15.7	49.2	23.5	25.1	36	47.2	22
1998	25.2	34.0	33.2	55.0	30	44.0	29.0	18.5	33.0	47.5	29.6	38.2	26.9	40.1
1999	34.8	24.8	45.3	58.0	46	40.0	51.0	12	30.5	49.0	46.2	59.2	38.6	66
2000	23.0	18.8	17.5	48.0	18.3	36.0	15.0	11	32.0	21.0	35.5	33.7	13.6	21
2001	20.2	90.8	29	48.0	13.5	24.0	35.0	11	44.5	25.0	28.6	35.4	14.0	56.2
2002	21.5	24.6	34	47.5	38.5	26.7	35.5	12	31.0	40.0	16.6	42	51.8	29.9
2003	58.2	38.8	74.1	79.5	83.8	57.7	53.0	15	62.2	48.0	42.6	38.7	45.6	82
2004	32.5	57.4	33.2	47.1	43.5	41.3	17.5	15.5	25.3	28.8	30.8	41.6	28.2	32

Tab.6 : Détermination du CN selon différentes utilisation du sol (USDA-NRCS, 2004).

Utilisation	Pratique culturale	Condition d'infiltration	Groupe hydrologique			
			A	B	C	D
jachère	sol nu avec résidus	-	77	86	91	94
		pauvre	76	85	90	93
		bonne	74	83	88	90
cultures en rangs	en ligne droite	pauvre	72	81	88	91
	en ligne droite	bonne	67	78	85	89
	en ligne droite + résidus	pauvre	71	80	87	90
	en ligne droite + résidus	bonne	64	75	82	85
	en contour	pauvre	70	79	84	88
	en contour	bonne	65	75	82	86
céréales	en ligne droite	pauvre	65	76	84	88
	en ligne droite	bonne	63	75	83	87
	en ligne droite + résidus	pauvre	64	75	83	86
	en ligne droite + résidus	bonne	60	72	80	84
	en contour	pauvre	63	74	82	85
	en contour	bonne	61	73	81	84
légumineuses ou prairies en rotation	en rangées	pauvre	66	77	85	89
	en rangées	bonne	58	72	81	85
	en contours	pauvre	64	75	83	85
	en contours	bonne	55	69	78	83
pâturages		pauvre	68	79	86	89
		moyenne	49	69	79	84
		bonne	39	61	74	80
prairies permanente	non pâturées	bonne	30	58	71	78
boisés		pauvre	45	66	77	83
		moyenne	36	60	73	79
		bonne	25	55	70	77
cour de fermes		-	59	74	82	86
route non-asphaltée avec fossé		-	72	82	87	89
route asphaltée avec fossé		-	74	84	90	92

¹ Les résidus ne sont considérés que s'ils couvrent au moins 5 % de la surface toute l'année

Tab.7 : Courbes Intensité – Durée – Fréquence (IDF), station El Ouenza.

El Ouenza										
Hauteur maximale de pluie (mm)	Durée									
	(h)									
	0	0.3	0.5	0.8	1.0	2.0	3.0	6.0	12.0	24.0
10 ans	0	15.8	18.8	20.8	22.4	26.6	29.4	35.0	41.6	49.5
20 ans	0	18.7	22.3	24.6	26.5	31.5	34.9	41.5	49.3	58.6
50 ans	0	20.9	24.9	27.5	29.6	35.2	39.0	46.3	55.1	65.5
100 ans	0	23.1	27.5	30.4	32.7	38.8	43.0	51.1	60.8	72.3

Tab.8 : Courbes Intensité – Durée – Fréquence (IDF), station M'Daourouch.

M'Daourouch										
Hauteur maximale de pluie (mm)	Durée									
	(h)									
	0	0.3	0.5	0.8	1.0	2.0	3.0	6.0	12.0	24.0
10 ans	0	17.1	20.3	22.5	24.2	28.7	31.8	37.8	45.0	53.5
20 ans	0	20.1	23.9	26.4	28.4	33.8	37.4	44.5	52.9	62.9
50 ans	0	22.4	26.6	29.4	31.6	37.6	41.6	49.5	58.9	70.0
100 ans	0	24.6	29.3	32.4	34.8	41.4	45.8	54.5	64.8	77.0

Tab.9 : Courbes Intensité – Durée – Fréquence (IDF), station Messloul.

Messloul										
Hauteur maximale de pluie (mm)	Durée									
	(h)									
	0	0.25	0.5	0.75	1	2	3	6	12	24
10 ans	0	15.9	18.9	20.9	22.5	26.7	29.6	35.2	41.8	49.8
20 ans	0	19.4	23.0	25.5	27.4	32.6	36.0	42.8	51.0	60.6
50 ans	0	22.0	26.1	28.9	31.1	37.0	40.9	48.6	57.8	68.8
100 ans	0	24.6	29.2	32.3	34.7	41.3	45.7	54.3	64.6	76.9

Tab.10 : Courbes Intensité – Durée – Fréquence (IDF), station El Aouinet.

El Aouinet										
Hauteur maximale de pluie (mm)	Durée									
	(h)									
	0	0.25	0.5	0.75	1	2	3	6	12	24
10 ans	0	16.9	20.0	22.2	23.8	28.3	31.4	37.3	44.4	52.8
20 ans	0	20.1	23.9	26.4	28.4	33.7	37.3	44.4	52.8	62.8
50 ans	0	22.5	26.7	29.6	31.8	37.8	41.9	49.8	59.2	70.4
100 ans	0	24.9	29.6	32.7	35.2	41.9	46.3	55.1	65.5	77.9

Tab.11 : Courbes Intensité – Durée – Fréquence (IDF), station Meskiana.

Meskiana										
Hauteur maximale de pluie (mm)	Durée									
	(h)									
	0	0.25	0.5	0.75	1	2	3	6	12	24
10 ans	0	25.7	30.6	33.9	36.4	43.3	47.9	56.9	67.7	80.5
20 ans	0	33.6	40.0	44.2	47.5	56.5	62.6	74.4	88.5	105.2
50 ans	0	39.6	47.1	52.1	56.0	66.6	73.7	87.6	104.2	123.9
100 ans	0	45.5	54.1	59.8	64.3	76.5	84.6	100.6	119.7	142.3

Tab.12 : Courbes Intensité – Durée – Fréquence (IDF), station Morsott.

Morsott										
Hauteur maximale de pluie (mm)	Durée									
	(h)									
	0	0.25	0.5	0.75	1	2	3	6	12	24
10 ans	0	27.9	33.1	36.7	39.4	46.8	51.8	61.6	73.3	87.2
20 ans	0	33.9	40.3	44.6	47.9	56.9	63.0	74.9	89.1	106.0
50 ans	0	38.4	45.7	50.5	54.3	64.6	71.5	85.0	101.1	120.2
100 ans	0	42.9	51.0	56.4	60.6	72.1	79.8	94.9	112.9	134.2

Tab.13 : Courbes Intensité – Durée – Fréquence (IDF), station Ain Kissa.

Ain Kissa										
Hauteur maximale de pluie (mm)	Durée									
	(h)									
	0	0.3	0.5	0.8	1.0	2.0	3.0	6.0	12.0	24.0
10 ans	0	19.6	23.3	25.7	27.7	32.9	36.4	43.3	51.5	61.2
20 ans	0	23.2	27.6	30.5	32.8	39.0	43.1	51.3	61.0	72.5
50 ans	0	25.9	30.8	34.1	36.6	43.5	48.2	57.3	68.1	81.0
100 ans	0	28.6	34.0	37.6	40.4	48.1	53.2	63.2	75.2	89.4

Tab.14 : Courbes Intensité – Durée – Fréquence (IDF), station Tebessa.

Tebssa										
Hauteur maximale de pluie (mm)	Durée									
	(h)									
	0	0.25	0.5	0.75	1	2	3	6	12	24
10 ans	0	20.2	24.0	26.6	28.6	34.0	37.6	44.7	53.2	63.2
20 ans	0	24.4	29.0	32.1	34.5	41.0	45.4	54.0	64.2	76.4
50 ans	0	27.6	32.8	36.3	39.0	46.4	51.3	61.0	72.6	86.3
100 ans	0	30.7	36.5	40.4	43.4	51.6	57.1	67.9	80.8	96.1

Tab.15 : Courbes Intensité – Durée – Fréquence (IDF), station Ain Dhalaa.

Ain Dhalaa										
Hauteur maximale de pluie (mm)	Durée									
	(h)									
	0	0.25	0.5	0.75	1	2	3	6	12	24
10 ans	0	21.2	25.2	27.9	29.9	35.6	39.4	46.9	55.7	66.3
20 ans	0	26.1	31.1	34.4	37.0	44.0	48.7	57.9	68.8	81.8
50 ans	0	29.9	35.6	39.4	42.3	50.3	55.7	66.2	78.7	93.6
100 ans	0	33.6	40.0	44.2	47.5	56.5	62.6	74.4	88.5	105.2

Référence :

- A. MUSY, C. H. 1999. Hydrologie appliquée. *Presses Polytechniques et Universitaires Romandes (PPUR)*.
- AMBROISE, B. 1991. Hydrologie des petits bassins versants ruraux en milieu tempéré, processus et modèles.
- BERREZOUG, N. 2016. Hydrologie et modélisation Pluie-Débit de l'oued Boukiou (NW algérien).
- BOLIN, B. 1980. Climate change and their effects on the biosphere. *Genève, OMM*.
- BOUDRAHAA, H. 2007. Modélisation pluie - débit à base géomorphologique en milieu semi-aride rural Tunisien : Association d'approches directe et inverse. *Thèse*, pp. 227.
- BOURGIN, F. 2015. Comment quantifier l'incertitude prédictive en modélisation hydrologique ? : Travail exploratoire sur un grand échantillon de bassins versants. *Thèse*, pp. 231.
- CNRS Extrait de la Lettre du Changement global n°19. Programme Mondial de Recherches sur le Climat (WCRP) - Programme International «Dimensions Humaines» (IHDP) - Diversitas - Earth System Science Partnership (ESSP) - Programme International Géosphère Biosphère (IGBP).
- COALITION-EAU 2014. EAU ET CHANGEMENT CLIMATIQUE.
- EL-MOCTAR, M. 2009. Les changements climatiques.
- ELMEDDAHI, Y. 2016. Les changements climatiques et leurs impacts sur les ressources en eau, cas du bassin du Cheliff. *Thèse*.
- ESTUPINA-BORRELL, V. 2004. Vers une modélisation hydrologique adaptée à la prévision opérationnelle des crues éclair. Application à de petits bassins versants du sud de la France. *Thèse*, pp. 254.
- EXPLORE-2070 2012. Hydrologie de surface: B2a – Hydrologie de la Métropole.
- F. LAOUACHERIA, M. M. Comparison of WBNM and HEC-HMS for runoff hydrograph prediction in a small urban catchment. *Water Resources Management*, 29.
- FARAH, A. K. 2014. Changement climatique ou variabilité climatique dans l'Est algérien. *Thèse*, pp. 29.
- GIUNTOLI, I., VIDAL, J. P., PRUDHOMME, C., & HANNAH, D. M. 2015. Future hydrological extremes: the uncertainty from multiple global climate and global hydrological models. *Earth Syst. Dynam.*, 6, pp. 267–285.
- GOUADIA, L. 2008. INFLUENCE DE LA LITHOLOGIE ET DES CONDITIONS CLIMATIQUES SUR LA VARIATION DES PARAMETRES PHYSICO – CHIMIQUES DES EAUX D'UNE NAPPE EN ZONE SEMI ARIDE, CAS DE LA NAPPE DE MESKIANA NORD-EST ALGERIEN. . *Thèse*.
- GUIDE 2009. Modélisation des systèmes hydrologiques. *Guide des pratiques hydrologiques.*, Chapitre 6.
- KESSARA, F. 2016. Cours de modélisation en Hydrologie et hydrogéologie.
- MARTIN CLAUSSEN, V. B., ANDREY GANOPOLSKI, CLAUDIA KUBATZKI & VLADIMIR PETOUKHOV 2003. Climate change in northern Africa: The past is not the future. *Climatic Change* 57.
- MATE. 2003. Rapport sur l'état et l'avenir de l'environnement. pp 465.
- MOUSSU, F. 2007. Modélisation couplée pluie/débit débit/débit : Développement et application aux bassins non jaugés.
- NICHANE M., K. M. A. 2002. CHANGEMENTS CLIMATIQUES ET RESSOURCES EN EAU EN ALGERIE; VULNERABILITE, IMPACT ET STRATEGIE D'ADAPTATION. *Larhyss Journal*.
- OCDE 2006. Organisation de Coopération et de Développement Économiques

- OUDIN, L. 2004. Recherche d'un modèle d'évapotranspiration potentielle pertinent comme entrée d'un modèle pluie-débit global. *Thèse*, pp.495.
- PUGET, J. L. 2010. Le changement climatique.
- R. RAGAB, C. P. 2002. Climate change and water resources management in arid and semi-arid regions: Prospective and challenges for the 21st Century. *Biosystems Eng*, 81, 3-34.
- SEGHIR, K. 2008. Vulnérabilité à la pollution, protection des ressources en eaux et gestion active du sous système aquifère de Tébessa Hammamet (Est Algérien). *Thèse*.
- SINGH P.V., F. D. K. 1996. Watershed Models. *CRC Press, Taylor & Francis Group*, pp. 1-42.
- T.B. MCKEE, N. J. D., AND J. KLIEST 1993. The Relationship of Drought Frequency and Duration of Time Scales. *Eighth Conference on Applied Climatology*.
- WEILL, S. 2007. Modélisation des échanges surface/subsurface a l'échelle de la parcelle par une approche darcéenne multi domaine. *Thèse*, pp. 170.
- ZIADI, K. 2010. Modélisation des crues de l'oued N'fis : application du modèle de Muskingum.