



N° d'ordre 28/2016

THESE DE DOCTORAT

Présentée par

Mr : Hassane Brirhet

Spécialité : Eau et Environnement

INTEGRATION DES MODELES GLOBAUX ET DISTRIBUES DANS LA MODELISATION HYDROLOGIQUE DU BASSIN VERSANT D'ISSEN, REGION DE SOUSS

Thèse présentée et soutenue le 11 Octobre 2016 devant le jury composé de :

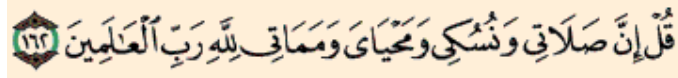
Lahcen BENAABIDATE	PES	Faculté des Sciences et Techniques, Fès	Directeur de thèse
Benoît Laignel	PES	Université de Rouen, France	Rapporteur
Nour-Eddine Laftouhi	PES	Faculté des Sciences Semlalia, Marrakech	Rapporteur
Hassan TABYAOUI	PES	Faculté Poly disciplinaire, Taza	Rapporteur
Mohammed ACHITE	PES	Université de Chlef, Algérie	Examineur
Ilias KACIMI	PES	Faculté des Sciences, Rabat	Examineur
Abderrahim El ACHHEB	PES	Faculté des Sciences, El Jadida	Examineur
Abderrahim Lahrach	PES	Faculté des Sciences et Techniques, Fès	Président

Laboratoire d'accueil : Géoressources et Environnement

Etablissement : Faculté des Sciences et Techniques, Fès.

Année universitaire 2015 - 2016

«بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ»



«صَدَقَ اللَّهُ الْعَظِيمُ»

DEDICACE

A LA MEMOIRE DE MON PERE.

Ton sacrifice était un signe de la responsabilité et du devoir.

Que dieu garde ton âme.

A LA MEMOIRE DE MA MERE.

Tu m'as beaucoup donné. Mes réussites étaient au dépend de ta souffrance.

J'ai bien espéré de Dieu, qu'il te garde aussi longtemps que possible, pour glorifier ce travail.

Mais Hélas, la fête était ton deuil.

Que Dieu garde ton âme.

A MA TRES CHERE EPOUSE .

Ton dévouement, ta compréhension, ton soutien moral, ta patience

M'ont toujours accompagné.

J'espère être digne de la confiance que tu as toujours su me porter.

Grâce à toi, j'ai eu le courage de mener à terme cette thèse.

MES FRERES ET SŒURS

A TOUS MES AMIS (ES) ET COLLÈQUES

A TOUS CEUX QUI ME SONT CHERS

Que cette thèse qui vous est dédiée aujourd'hui, soit le

Gage de mon amour et de ma profonde gratitude

QUE DIEU VOUS GARDE.

AVANT PROPOS

Au terme de cette recherche, il m'est très agréable d'exprimer mes remerciements à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce mémoire.

Je tiens tout d'abord à exprimer mes vifs remerciements à monsieur le Doyen de La Faculté des Sciences et Techniques de Fès pour l'importance qu'il accorde à la recherche Scientifique.

Je suis conscient de la reconnaissance que je dois à mon directeur de thèse Monsieur *Lahcen BENABIDATE*, professeur à la Faculté des Sciences et Techniques de Fès qui a toujours répondu favorablement pour toute sollicitation. Qui a encadré ce travail de recherche. Il a su par ses idées, ses conseils, ses explications et ses critiques, insuffler constamment de l'élan à cette recherche. J'ai bénéficié de son expérience en hydrologie et de la clairvoyance de ses opinions. La confiance qu'il m'a accordée et son soutien constant ont été précieux dans la conduite de cette thèse.

Je me permets de distinguer aussi, *Mr Abderrahim LAHRACH* professeur à la Faculté des Sciences et Techniques de Fès, pour l'intérêt qu'il a montré pour cette thèse, pour ses remarques sur mon travail, et pour sa participation au jury en tant que Président.

J'adresse toute ma gratitude à *Mr Benoit LAIGNEL*, Professeur à l'université de Rouen (France) pour avoir accepté d'être rapporteur de ces travaux.

J'adresse également ma profonde reconnaissance à *Mr Hassan TABYAOUI* Professeur à la Faculté Polydisciplinaire de Taza et *Mr Nour-Eddine LAFTOUHI* Professeur à la Faculté des Sciences Semailia, (Marrakech) pour leur participation au jury en tant que rapporteurs et pour le temps qu'il ont consacré à la critique de ce manuscrit.

Je voudrais remercier aussi, *Mr Mohammed ACHITE* Professeur à l'université de Chlef (Algérie), *Mr Ilias KACIMI* Professeur Faculté des Sciences (Rabat) et *Mr Abderrahim ACHHEB* Professeur à la Faculté des Sciences (El Jadida), qui ont accepté d'être examinateurs de ces travaux. Je leur exprime ma sincère reconnaissance.

Brirhet Mohssine et FATIME ZAHRAE elhallaoui, ingénieurs-chercheurs, ont également, par leurs commentaires et leurs encouragements, contribué à améliorer la qualité de ces travaux. Le temps qu'ils ont accepté de me consacrer malgré leurs agendas chargés.

Je remercie aussi Messieurs kharrim mohammed et nabil ala , météorologues, pour ses précieux conseils en programmation et son indulgence vis-à-vis de l'absence répétée de commentaires dans mes programmes; *Frej* pour sa contribution à la mise en place de la base de données et son aide efficace pour la gestion au quotidien des problèmes informatiques; khatati mourad pour ses conseils en athys; *Nabil* et Hanine pour avoir mis à ma disposition des programmes de conversion de format de données; Je n'oublierai pas non plus Messieurs Bakr et Arij BRIRHET qui m'ont encouragé durant ces années de recherche. Merci également à tous les thésards et stagiaires, que j'ai côtoyés au cours de ces trois années, en particulier ceux de la FST de fés et de la DRPE.

Enfin, j'adresse mes chaleureuses pensées à ma famille, pour leur soutien et leurs encouragements tout au long de ces trois années, ainsi que mes remerciements aux personnes, notamment ma femme Fatime Zahrae Elhallaoui , qui m'ont permis d'améliorer la qualité de ce mémoire par leur relecture attentive et leurs observations.

TABLE DES MATIERES

<i>RESME</i>	27
<i>ABSTRACT</i>	3
<i>AVANT PROPOS</i>	5
<i>TABLE DES MATIERES</i>	7
<i>LISTE DES FIGURES</i>	12
<i>LISTE DES TABLEAUX</i>	15
<i>LISTE DES ACRONYMES</i>	16
<i>INTRODUCTION GENERALE</i>	17
<i>OBJECTIFS DE LA THESE</i>	21
<i>ORGANISATION DE LA THESE</i>	23
1^{ère} PARTIE : GENERALITES SUR LES PROCESSUS HYDROLOGIQUES ET LEUR MODELISATION	
<i>CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LES PROCESSUS HYDROLOGIQUES ET LEUR MODELISATION:</i>	27
<i>INTRODUCTION :</i>	27
<i>I. PROCESSUS HYDROLOGIQUES</i>	27
1. <i>FACTEURS DE CONTROLE DES PROCESSUS HYDROLOGIQUES</i>	29
2. <i>TOPOGRAPHIE ET PEDOLOGIE :</i>	30
3. <i>OCCUPATION DU SOL :</i>	30
4. <i>CONDITION METEOROLOGIQUES :</i>	30
5. <i>VARIABILITE SPATIALE DES PARAMETRES :</i>	31
<i>II. MODELISATION HYDROLOGIQUE</i>	31
1. <i>LES MODELES HYDROLOGIQUES</i>	32
2. <i>CLASSIFICATION DES MODELES HYDROLOGIQUES</i>	33
2.1 <i>CLASSIFICATION SELON LA REPRESENTATION DE L'ESPACE</i>	35
2.2 <i>CLASSIFICATION SELON LA DISCRETISATION TEMPORELLE</i>	37
2.3 <i>CLASSIFICATION SELON LA DESCRIPTION DES PROCESSUS</i>	37
2.4 <i>CALAGE DES MODELES HYDROLOGIQUES</i>	39
2.5 <i>VALIDATION DES MODELES HYDROLOGIQUES</i>	42
2.6 <i>INCERTITUDES</i>	43
<i>III. STRATEGIE DE COMPARAISON DES MODELES HYDROLOGIQUES SELECTIONNES</i>	43

1.	CHOIX D'UNE DEMARCHE D'EVALUATION DES MODELES UTILISES	44
2.	LIMITATIONS DES COMPARAISONS EXISTANTES.....	45
	CONCLUSION	46
	CHAPITRE 2 : CRITERES D'EVALUATION DES PERFORMANCES DES MODELES PLUIE DEBIT.....	46
	INTRODUCTION	48
1.	PROTOCOLE D'EVALUATION DES MODELES HYDROLOGIQUES	48
2.	PROCEDURE DE CALAGE ET SELECTION DE CRITERES D'EVALUATION DES MODELES HYDROLOGIQUES	50
2.1	CRITERE D'ERREUR QUADRATIQUE.....	50
2.2	CRITERE D'ERREUR ABSOLUE	51
2.3	CRITERE D'ERREUR CUMULEE	52
2.4	FONCTION OBJECTIF ET CRITERES D'EVALUATION	53
2.4.1	FONCTION OBJECTIF	53
2.4.2	METHODE D'EVALUATION DES MODELES	55
2.4.2.1	CRITERES ASSOCIES AUX PERIODES DE CRUE :	55
2.4.2.2	CRITERES ASSOCIES AUX PERIODES DE BASSES EAUX :	55
2.4.2.3	CRITERES DE PERFORMANCE AVEC DES ILLUSTRATIONS GRAPHIQUES :	56
2.5	ANALYSE ET PROPOSITION D'UNE NOUVELLE FORMULATION.....	56
2.5.1	QUELQUES REFLEXIONS SUR LE CRITERE DE NASH-SUTCLIFFE.....	56
2.5.2	OBJECTIFS DE LA MISE AU POINT D'UN NOUVEAU CRITERE.....	57
	CONCLUSION :	59
	2ème PARTIE : PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE ET MISE EN ŒUVRE DES MODELES HYDROLOGIQUES SUR LE BASSIN D'ISSEN	
	CHAPITRE 1 : PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE.....	59
	INTRODUCTION :	62
1.	PRESENTATION DU BASSIN DE LA ZONE D'ETUDE	62
1.1	SITUATION ET PRESENTATION GEOGRAPHIQUE DE L'OUED ISSEN :	63
1.2	CONTEXTE GEOLOGIQUE DU BASSIN.....	65
1.3	CONTEXTE CLIMATOLOGIQUE ET HYDROLOGIQUE DU BASSIN :	66
1.3.1	LES PRECIPITATIONS.....	66
1.3.2	LES TEMPERATURES.....	66
1.3.3	L'EVAPORATION	66

1.3.4	RESSOURCES EN EAU DE SURFACE.....	67
1.3.5	RESSOURCES EN EAU SOUTERRAINE.....	67
1.3.6	OCCUPATION DES TERRES ET VEGETATION :.....	67
1.3.7	LES SOLS :.....	68
2.	LA MORPHOMETRIE DU BASSIN VERSANT D'ISSEN :.....	69
2.1	LES PARAMETRES MORPHO METRIQUES GENERALES.....	69
2.1.1	INDICE DE FORME :.....	70
2.1.2	PENTE DU BASSIN VERSANT.....	70
2.1.3	LE TEMPS DE CONCENTRATION.....	71
2.2	HYDROMETEOROLOGIE DU BASSIN VERSANT D'ISSEN.....	72
2.2.1	REGIME PLUVIOMETRIQUE.....	72
2.2.2	ANALYSE DU REGIME HYDROLOGIQUE DE BASSIN VERSANT D'ISSEN.....	77
	CONCLUSION.....	80
	CHAPITRE 2 : MISE EN ŒUVRE DE MODELE SWAT SUR LE BASSIN D'ISSEN	79
I.	PRESENTATION DU MODELE SWAT.....	82
II.	BASES DE LA MODELISATION HYDROLOGIQUE DES BASSINS VERSANTS PAR SWAT.....	87
1.	PRINCIPE DE MODELISATION.....	87
2.	DONNEES D'ENTREE ET DE SORTIE DU MODELE SWAT.....	89
2.1	DONNEES EN ENTREE DU MODELE SWAT.....	89
2.2	DONNEES EN SORTIE DU MODELE SWAT.....	89
III.	MISE EN ŒUVRE DU MODELE SWAT SUR LE BASSIN D'ISSEN.....	90
1.	DEMARCHE SUIVIE POUR L'IMPLEMENTATION DU MODELE SWAT DANS LE BASSIN D'ISSEN.....	90
2.	PREPARATION DES BASES DE DONNEES NECESSAIRES POUR LE FONCTIONNEMENT DU MODELE SWAT.....	96
3.	METHODOLOGIE DE LA MISE EN ŒUVRE DU MODELE SWAT.....	102
4.	CALAGE ET VALIDATION DE MODELE SWAT AU NIVEAU DE BASSIN D'ISSEN :.....	104
	CONCLUSION.....	110
	CHAPITRE 3 : PRESENTATION ET MISE EN ŒUVRE DU MODELE ATHYS SUR LE BASSIN D'ISSEN.....	108
	INTRODUCTION.....	112
I.	PRESENTATION DU MODELE ATHYS.....	112
1.	DESCRIPTION DU MODELE ATHYS.....	112
2.	FONCTIONNEMENT DU MODELE ATHYS.....	114

2.1 CHAÎNE DE CALCUL POUR DÉTERMINER LES DÉBITS RUISSELES	115
2.2 MODÈLES DE CALCUL	115
II. TRAITEMENT DES DONNÉES ET MISE EN ŒUVRE DE MODÈLE ATHYS.....	120
2.1 TYPOLOGIE DES FICHIERS UTILISÉS	120
2.2 DONNÉES HYDRO-CLIMATOLOGIQUES	121
2.3 PÉRIODE DE SIMULATION	122
CONCLUSION	124
CHAPITRE 4: INTÉGRATION DU MODÈLE GR4J DANS LE BASSIN D'ISSEN:	122
INTRODUCTION	126
I. HISTORIQUE ET PHILOSOPHIE DES MODÈLES GR.....	126
1. LE MODÈLE JOURNALIER GR4J.....	126
1.1 STRUCTURE DU MODÈLE	126
1.2 FONCTION DE PRODUCTION.....	127
1.3 FONCTION DE ROUTAGE	127
1.4 FONCTIONNEMENT DES MODÈLES GR :	127
2. DESCRIPTION ET MISE EN ŒUVRE DU MODÈLE GR4J :	128
2.1 DESCRIPTION MATHÉMATIQUE DU MODÈLE :	128
A. INTERACTIONS PLUIE-EVAPOTRANSPIRATION :	129
B. RÉSERVOIR SOL :	129
C. LES HYDROGRAMMES UNITAIRES :	130
D. LE RÉSERVOIR EAU GRAVITAIRE :	130
2.2 CALAGE DU MODÈLE ET DISCUSSION DES RÉSULTATS :	131
CONCLUSION	133
CHAPITRE 5 : MODELISATION DU BASSIN D'ISSEN AVEC LE MODÈLE HEC-HMS	131
INTRODUCTION	135
I- PRÉSENTATION DU MODÈLE HEC HMS	135
1- DESCRIPTION DU MODÈLE HEC HMS.....	135
2- SÉLECTION DU MODÈLE	136
II- MISE EN ŒUVRE DU MODÈLE HEC HMS SUR LE BASSIN D'ISSEN.....	137
1- BASES DE LA MODELISATION DES BASSINS VERSANTS PAR HEC HMS	137
1.1 DÉBIT DE BASE.....	137

1.2 FONCTION DE PRODUCTION	138
1.3 FONCTION DE TRANSFERT	139
1.4 CALIBRATION DU MODELE	142
1.5 EVALUATION DES SIMULATIONS	143
2-SIMULATIONS DE BASSIN D'ISSEN AVEC LE MODELE HEC-HMS	143
2.1 CONFIGURATION DU BASSIN :	143
2.2 ESTIMATION DES PARAMETRES DE MODELE HEC HMS AU NIVEAU DE BASSIN D'ISSEN	144
2.2.1 ESTIMATION DU CURVE NUMBER (CN)	145
2.2.2 CALCUL DU TEMPS DE CONCENTRATION (TC)	146
2.2.3 ROUTAGE UTILISANT LA METHODE DE PROPAGATION DITE 'LAG'	147
III-CALAGE ET VALIDATION DU MODELE HEC HMS AU NIVEAU DE BASSIN D'ISSEN	148
1.CALAGE DU MODELE HEC HMS	148
CONCLUSION	149
3^{ème} PARTIE : ANALYSE ET ETUDE COMPARATIVE DES RESULTATS OBTENUS	
INTRODUCTION	151
I-CADRE COMPARATIF DES MODELES HYDROLOGIQUES	151
1-OBJET DE LA COMPARAISON DES MODELES	151
2-EVALUATION DES MODELES	152
2.1PROTOCOLE DE TEST DES MODELES HYDROLOGIQUES	152
2.1.1 CRITERES NUMERIQUES :	153
2.1.2 CRITERES GRAPHIQUES :	154
2.2MISE EN ŒUVRE CONCRETE DES TESTS DE PERFORMANCE :	154
2.2.1ANALYSES DES RESULTATS FOURNIS PAR SWAT	155
2.2.2ANALYSES DES RESULTATS FOURNIS PAR ATHYS	158
2.2.3ANALYSES DES RESULTATS FOURNIS PAR GR4J	160
2.2.4ANALYSES DES RESULTATS FOURNIS PAR HEC-HMS	161
3-INTER COMPARAISON DES MODELES ET INTERPRETATION DES RESULTATS.....	163
CONCLUSION	171
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES	172
REFERENCES BEBLIOGRAPHIQUES	176
ANNEXES:	189

LISTE DES FIGURES

FIGURE	TITRE	PAGE
1-1	SCHEMATISATION DU PROCESSUS DE CYCLE DE L'EAU (TOONY, 2010).	27
1-2	TYPES D'UTILISATION DES MODELES MATHEMATiques EN HYDROLOGIE (BRIRHET , 2016)	31
1-3	SCHEMATISATION DES PRINCIPAUX FLUX PRIS EN COMPTE DANS LES MODELES HYDROLOGIQUES DE BASSIN VERSANT..	32
1-4	CLASSIFICATION DES MODELES HYDROLOGIQUES (AMBROISE ET AL 1998 ,SIMUNEK ET AL 2007, 2008)	33
1-5	TYPE DES MODELES HYDROLOGIQUES(AMBROISE ET AL 1998 ,SIMUNEK ET AL 2007, 2008).	33
1-6	CLASSIFICATION DES MODELES HYDROLOGIQUES UTILISEES POUR LA MODELISATION D'ISSEN (BRIRHET,2016) .	38
1-7	SCHEMA SIMPLIFIEE DE PROCEDURE DE CALAGE DES MODELES HYDROLOGIQUES	39
2-1	RELATION ENTRE LE CRITERE NSE ET LE CRITERE C2M (MATHEVET, 2005)	53
3-1	LOCALISATION DU BASSIN DE SOUSS. (PDAIRE 2006 - ABHSMD)	60
3-2	SITUATION GEOGRAPHIQUE DU BASSIN D'ISSEN	62
3-3	GEOLOGIE GENERALE DE LA PLAINE DE SOUSS (PDAIRE ,2006).	64
3-4	COURS D'EAU PRINCIPAL ET LE RESEAU HYDROGRAPHIQUE DE BASSIN D'ISSEN	67
3-5	CUMULS MOYENS ANNUELS DE PRECIPITATIONS POUR LES DIFFERENTES STATIONS SITUES DANS LE BASSIN D'ISSEN	70
3-6	LES PRECIPITATIONS MENSUELLES INTERANNUELLES DANS LES DEUX STATIONS D'AGUENZA ET AMSOUL (1981-2013)	70
3-7	CORRELATION LINEAIRE DES PRECIPITATIONS JOURNALIERES DES DEUX STATIONS D'AGUENZA ET AMSOUL (1981-2013)	71
3-8	CORRELATION LINEAIRE DES PRECIPITATIONS MENSUELLES DES DEUX STATIONS D'AGUENZA ET AMSOUL (1981-2013)	71
3-9	CORRELATION LINEAIRE DES PRECIPITATIONS INTERANNUELLES DES DEUX STATIONS D'AGUENZA ET AMSOUL (1981-2013)	72
3-10	AJUSTEMENT DES PJMAX AUX DIFFERENTES LOIS DE LA STATION AGUENZA	73
3-11	AJUSTEMENT DES PJMAX AUX DIFFERENTES LOIS DE LA STATION AMSOUL	74
3-12	DEBITS MOYENS ANNUELS DES DEUX STATIONS D'AGUENZA ET AMSOUL (1980-2012)	74
3-13	DEBITS MOYENS MENSUELS INTERANNUELS DES DEUX STATIONS D'AGUENZA ET AMSOUL (1980-2012)	75
3-14	AJUSTEMENT DES QJMAX AUX DIFFERENTES LOIS DE LA STATION AGUENZA	76
3-15	AJUSTEMENT DES QJMAX AUX DIFFERENTES LOIS DE LA STATION AMSOUL	76
4-1	ARCHITECTURE DE L'INTERFACE DU COUPLAGE SWAT ET SIG (BIAN ET AL. 1996)	80
4- 2	FONCTIONNEMENT SCHEMATIQUE DE SWAT (DUROS 2001)	81
4- 3	REPRESENTATION SCHEMATIQUE DU CYCLE HYDROLOGIQUE DE LA PHASE DU SOL (PROJET MAEILA-PLATFORM, 2011)	82
4-4	L'ORGANIGRAMME DES PROCESSUS POUR LA PHASE DU SOL (PROJET MAEILA-PLATFORM, 2011)	83
4-5	LE STOCKAGE DE LA CHEVILLE ET LE PRISME POUR UN TRONÇON DE COURS D'EAU (CHOW ET AL 1988)	84
4-6	SCHEMATISATION DES DIFFERENTES ETAPES DE MODELISATION DANS SWAT(CHAPONNIERE 2005)	86

FIGURE	TITRE	PAGE
4- 7	LES DIFFERENTS THEMES DE CARTES REQUIS EN ENTREE DE SWAT (HOLVOET ET AL. 2005) ET UN SCHEMA	89
	METHODOLOGIQUE DE MISE EN ŒUVRE DE SWAT (ADAPTE DE RUELLAND ET AL.2004)	
4- 8	CARTE DE MODELE NUMERIQUE DE TERRAIN DU BASSIN VERSANT D'ISSEN	90
4- 9	CARTE D'OCCUPATION DE SOL DU BASSIN D'ISSEN	91
4- 10	CARTE DE TYPE DE SOL DU BASSIN D'ISSEN	92
4-11	INTERFACE DU PROGRAMME PCPSTAT	96
4-12	INTERFACE DU PROGRAMME PCPSTAT	96
4-13	LES PARAMETRES DE SO A INTEGRER DANS LE MODELE SWAT POUR LA PARTIE SOL	98
4-14	LES EQUATIONS POUR LE CALCUL DES CARACTERISTIQUES DU SOL (SAXTON K.E ET .ALL 2006)	99
4-15	COMPARAISON ENTRE LES DEBITS MENSUELS SIMULES ET OBSERVES (M3/S)	105
4-16	COMPARAISON ENTRE LES VOLUMES MENSUELS SIMULES ET OBSERVES (M3/S) SUR LE BASSIN VERSANT D'ISSEN	106
4-17	CORRELATION LINEAIRE SIMPLE ENTRE LES DEBITS SIMULES ET OBSERVES	106
4-18	CORRELATION LINEAIRE SIMPLE ENTRE LES VOLUMES SIMULES ET OBSERVES	106
5-1	SCHEMA SIMPLIFIEE DE LA PLATEFORME ATHYS (IRD,2009-2011)	111
5- 2	DETAILS DE LA CHAINE DE CALCUL DU MODELE HYDROLOGIQUE ATHYS	112
5-3	FONCTIONNEMENT DU MODELE ATHYS (IRD,2009-2011)	113
5-4	FONCTION DE TRANSFERT POUR CHAQUE MAILLE DU BASSIN(COUSTAU ET AL., 2012)	115
5-5	STRUCTURE DU MODELE A MAILLES INTERACTIVES (HTTP://WWW.ATHYS-SOFT.ORG)	116
5-6	EXEMPLE DE CARTE DES ALTITUDES (A DROITE), CARTE DES PENTES (A DROITE) ET LA CARTE DU RESEAU HYDROGRAPHIQUE AVEC LES SOUS BASSINS (BAS AU MILIEU)	117
5-7	MOYENNE DES PRECIPITATIONS MENSUELLES (1980–2012)	118
5-8	LES DEBITS MOYENS MENSUELS OBSERVES ET SIMULES D'ISSEN	120
6-1	SCHEMA DE LA STRUCTURE DU MODELE GR4J (PERRIN ET AL, 2003).	125
6-2	VISUALISATION DE LA QUALITE DE SIMULATION	129
6-3	CORRELATION ENTRE LES DEBITS OBSERVES ET LES DEBITS SIMULES.	129
7- 1	LA NOTION D'HYDROGRAMME UNITAIRE ET SES CARACTERISTIQUES FONDAMENTALES	137
7-2	CONFIGURATION DU BASSIN ISSEN SOUS HEC HMS.	141
7-3	APPLICATION DU MODELE HYDROLOGIQUE (DETERMINATION DU CN)	142
7-4	GRAPHE POUR LE CALAGE COMPARANT LES DEBITS OBSERVES ET SIMULES	145
8-1	MODELES UTILISEES POUR SIMULER LE COMPORTEMENT HYDROLOGIQUE DE BASSIN VERSANT D'ISSEN	148
8- 2	PROCEDURE DE CALAGE –CONTROLE EFFECTUEE POUR CHAQUE MODELE(SOURCE : PERRIN (2000))	149
8-3	EXEMPLE DE GRAPHIQUE « RADAR »	151

8-4	ILLUSTRATION DES COMPARAISONS DES DEBITS OBSERVES ET SIMULES DE MODELE SWAT	153
8-5	ILLUSTRATION GRAPHIQUE « RADAR » UTILISE POUR RESUMER LES PERFORMANCES DE MODELE SWAT	153
8- 6	ILLUSTRATION DES COMPARAISONS DES DEBITS OBSERVES ET SIMULES DE MODELE ATHYS	155
8-7	ILLUSTRATION GRAPHIQUE « RADAR » UTILISE POUR RESUMER LES PERFORMANCES DE MODELE ATHYS	156
8-8	ILLUSTRATION DES COMPARAISONS DES DEBITS OBSERVES ET SIMULES DE MODELE GR4J	157
8-9	ILLUSTRATION DES COMPARAISONS DES DEBITS OBSERVES ET SIMULES DE MODELE GR4J	159
8-10	ILLUSTRATION GRAPHIQUE « RADAR » UTILISE POUR RESUMER LES PERFORMANCES DES QUATRE MODELES AU PAS DE TEMPS JOURNALIER	161
8-11	COMPARAISON DES CRITERES DE PERFORMANCE RELATIFS A NASH DES QUATRE MODELES HYDROLOGIQUES AU PAS DE TEMPS JOURNALIER	162
8-12	COMPARAISON DES CRITERES DE PERFORMANCE DE BILAN DES QUATRE MODELES HYDROLOGIQUES AU PAS DE TEMPS JOURNALIER	162
8-13	ILLUSTRATION GRAPHIQUE « RADAR » UTILISE POUR RESUMER LES PERFORMANCES DES QUATRE MODELES AU PAS DE TEMPS MENSUEL	164
8-14	COMPARAISON DES CRITERES DE PERFORMANCE RELATIFS A NASH DES QUATRE MODELES HYDROLOGIQUES AU PAS DE TEMPS MENSUEL	165
8-15	COMPARAISON DES CRITERES DE PERFORMANCE DE BILAN DES QUATRE MODELES HYDROLOGIQUES AU PAS DE TEMPS MENSUEL	165

LISTE DES TABLEAUX

Tab	TITRE	PAGE
1-1	SYNTHESE DE QUELQUES COMPARAISONS DE MODELES PLUIE-DEBIT	43
3-1	PARAMETRES MORPHOLOGIQUES DE BASSIN VERSANT D'ISSEN	67
3-2	INDICE DE FORME DE BASSIN VERSANT D'ISSEN	68
3-3	TEMPS DE CONCENTRATION DES SOUS- BASSINS VERSANTS D'ISSEN	69
3-4	TEMPS DE CONCENTRATION OPTES POUR LES SOUS- BASSINS VERSANTS D'ISSEN	69
3-5	ESTIMATION DES PRECIPITATIONS MAXIMALES JOURNALIERES ANNUELLES DE LA LOI DE GUMBEL .	73
3-6	ESTIMATION DES PRECIPITATIONS MAXIMALES JOURNALIERES ANNUELLES DE LA LOI DE GUMBEL	73
3-7	ESTIMATION DES DEBITS MAXIMUMS JOURNALIERS ANNUELS DE LA LOI DE GUMBEL	75
3-8	ESTIMATION DES DEBITS MAXIMUMS JOURNALIERS ANNUELS DE LA LOI DE GUMBEL	76
4-1	LISTE DES STATIONS PLUVIOMETRIQUES AU NIVEAU DE BASSIN D'ISSEN.	93
4-2	TABLE DE CORRESPONDANCE POUR LA CARTE D'OCCUPATION DE SOL	97
4-3	DEMARCHE DE LA MISE EN ŒUVRE DU MODELE SWAT SUR LE BASSIN ISSEN (SOURCE FADIL 2010)	100
4-4	FORMAT DE FICHIERS WGNLOCATIONS	102
4-5	PERIODE DE CALAGE ET VALIDATION DU MODELE SWAT	104
4-6	LES PARAMETRES CHOISIS POUR LE CALAGE	104
4-6	VALEUR DE COEFFICIENT DE NASH EN FONCTION DE PERIODE DE SIMULATION	107
5-1	LISTE DES STATIONS HYDRO-CLIMATOLOGIQUES AU NIVEAU DE BASSIN D'ISSEN	118
5-2	LES PARAMETRES RETENUS DE MODELE ATHYS AU NIVEAU DE BASSIN D'ISSEN	120
5-2	VALEUR DE COEFFICIENT DE NASH EN FONCTION DE LA PERIODE DE SIMULATION POUR LE MODELE ATHYS	120
6-1	PERIODES DE SIMULATION DE MUODELE GR4J	128
6-2	RESULTATS RETENUS POUR LE CALAGE DE MODELE	129
7-1	VARIABLES DE DEBIT DE BASE SOUS HEC HMS	135
7-2	VARIABLES DE FONCTION DE PRODUCTION SOUS HEC HMS	136
7-3	VARIABLES DE L'HYDROGRAMME UNITAIRE SOUS HEC HMS	138
7-4	NUMERO DE COURBE (CN) AFFECTE A CHAQUE TYPE D'UTILISATION DES TERRES	143
7-5	NUMERO DE COURBE (CN) COMPOSITE EVALUE POUR LES SOUS BASINS DU SOUS	143
7-6	FACTEUR C LIES AUX PARAMETRES DU COEFFICIENT DE STOCKAGE ET DU TEMPS DE CONCENTRATION	144
7-7	RESULTATS DU TEMPS DE CONCENTRATION ET DU COEFFICIENT DE STOCKAGE	144
7-8	VALEURS DU TEMPS DE PROPAGATION 'LAG' DEVELOPPEES A PARTIR DE LA VITESSE D'ECOULEMENT	144
7-9	PARAMETRES CHOISIS POUR CARACTERISER LE BASSIN VERSANT SUR HEC-HMS	145
7-10	VALEUR DE COEFFICIENT DE NASH EN FONCTION DE LA PERIODE DE SIMULATION POUR LE MODELE ATHYS	146
8-1	LISTE DES CRITERES D'EVALUATION ET SIGNIFICATION 126	150
8-2	LISTE DES CRITERES D'EVALUATION FOURNIS PAR SWAT	152
8-3	LISTE DES CRITERES D'EVALUATION FOURNIS PAR ATHYS	155
8-5	LISTE DES CRITERES D'EVALUATION FOURNIS PAR GR4J	157
8-6	LISTE DES CRITERES D'EVALUATION FOURNIS PAR HEC-HMS	158
8-7	LISTE DES CRITERES D'EVALUATION FOURNIS PAR LES QUATRE MODELES UTILISES AU PAS DE TEMPS JOURNALIER	160
8-8	LISTE DES CRITERES D'EVALUATION FOURNIS PAR LES QUATRE MODELES UTILISES AU PAS DE TEMPS MENSUEL	163

LISTE DES ACRONYMES

- **ASTER:** Advanced Spacebone Thermal Emission
- **ESA** : European Space Agency portal
- **FAO** : Food and Agriculture Organization
- **GR** : Génie Rural
- **GDEM** : Global Digital Elevation Map
- **HRU** : Hydrological Response Unit
- **IGBP** : The International Geosphere-Biosphere Programme
- **MNT** : Modèle Numérique de Terrain
- **NRCS** : Natural Ressources Conservation Service
- **NS** : Nash–Sutcliffe
- **SIG** : Système d'Information Géographique
- **SWAT** : Soil Water Assesement Tools
- **NOAA**: National Oceanic and Atmospheric Administration.
- **LAT** : latitude
- **LON** : longitude
- **HEC HMS:** hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System
- **SMA** : Soil Moisture Accounting
- **SCS** : Soil Conservation Service
- **CN** : Curve Number
- **TC** : Temps de Concentration
- **ST** : coefficient de Stockage
- **MNT** : Modèles Numériques du Terrain
- **USACE:** United States Army Corps of Engineers
- **ABHSMD:** Agence du Bassin Hydraulique Souss Massa Derâa.
- **PDAIRE** : Plan Directeur D'aménagement Intégré des Ressources en Eau.
- **PARASOL** : paramètre solution
- **PNE** : plan national d'eau
- **ATHYS** : Atelier Hydrologique Spatialisé
- **GR4J** : modèle du Génie Rural à 4 paramètres Journalier

RESUME

La simulation de la transformation de la pluie en débit à l'échelle du bassin versant par des modèles mathématiques hydrologiques a connu un fort essor depuis le début des années 60 grâce notamment à l'accroissement des capacités de calcul. Il existe aujourd'hui un grand nombre de modèles, parmi lesquels on trouve les modèles conceptuels ou empiriques globaux qui représentent le lien entre la pluie et le débit par des agencements variés de réservoirs. Les études comparatives ayant impliqué de tels modèles ont été une réponse à la difficulté d'appréciation de leurs qualités et de leurs faiblesses respectives au travers de simples exercices de validation individuels.

Le cadre comparatif établi ici a pour but de tester quatre types de structures de modèles hydrologiques sur un bassin versant aride typique, afin d'explorer le rôle du nombre de paramètres optimisables et celui de la formulation du modèle sur la qualité des simulations de débit. Toutes les structures ont reçu les mêmes données et leurs paramètres ont été calés à l'aide d'une même fonction objective qui s'est montrée fiable pour localiser des optima satisfaisants. La qualité des simulations a été mesurée en phase de contrôle grâce à plusieurs critères statistiques notamment le critère de Nash.

Les résultats des tests indiquent tout d'abord que les modèles testés ont paru assez proches dans leurs performances. Néanmoins, le modèle à base physique (SWAT) testé arrive à obtenir d'aussi bons résultats que des structures globales (HEC-HMS, GR4J) ou spatialisées (ATHYS). Cet avantage, tenant d'une meilleure robustesse lors du passage des phases de calage au contrôle.

Mots Clés: modélisation hydrologique, hydrologie, semi-aride, Haut Atlas, ATHYS, SWAT, HEC-HMS, GR4J, critères de performance, validation et calage.

ABSTRACT

The simulation of the transformation of the rain flow at the catchment scale by hydrological mathematical models has experienced strong growth since the early 60s thanks to increased computing capacity. Today there are many models, which include conceptual models or global empirical representing the link between rainfall and flow through various arrangements of tanks. Comparative studies that involved such models were a response to the difficulty of assessing their qualities and their weaknesses through simple individual validation exercises.

The comparative framework developed here aims to test four types of hydrological models of structures on a typical arid watershed, to explore the role of the number of optimizable parameters and of the formulation of the model on the quality of flow simulations. All structures are given the same data and parameters were calibrated using the same optimization procedure, which has proved reliable to locate satisfactory optima. The quality of the simulations was measured in the control stage with several statistical criteria including that of Nash criterion.

The test results indicate first of all that the tested models have appeared quite close in performance. Nevertheless, the physically based model (SWAT) tested seem to get as good results as global structures (HEC-HMS, GR4J) or spatial (ATHYS), taking the advantage of greater robustness in the phase of transition timing control.

Keywords: *hydrological modeling, hydrology, semi-arid, High Atlas, ATHYS, SWAT, HEC-HMS, GR4J, performance criteria, validation and calibration.*

INTRODUCTION

GENERALE

1- PROBLEMATIQUE :

De par sa situation géographique, le Maroc est caractérisé par un climat fortement contrasté avec un régime pluviométrique dominé par une forte irrégularité dans l'espace et dans le temps.

Les ressources naturelles en eau au Maroc sont parmi les plus faibles au monde. Le Maroc, par exemple, est parmi les pays ayant le moins de ressources en eau par habitant. En effet, le potentiel des ressources en eau naturelles est évalué à 22 milliards de m³ par an, soit l'équivalent de 730 m³ /habitant/an. Plus de la moitié de ces ressources sont concentrées dans les bassins du nord et le Sebou couvrant près de 7% du territoire national (Stratégie Nationale de l'Eau 2009).

De plus, les apports en eau sont très irréguliers dans le temps : ils peuvent varier dans un rapport de 1 à 9 suivant les années. Ils sont également variables dans l'espace : les apports par habitant peuvent varier dans un rapport de 1 à 8 entre les bassins.

Cette situation risque de se dégrader sous l'effet des changements climatiques. En effet, dans les dernières décennies, le Maroc a souffert de ce phénomène avec une aggravation des phénomènes extrêmes et une réduction importante de la pluviométrie et par conséquent des écoulements.

Devant cet accroissement de la demande en eau au Maroc lié à la multiplication des usages (consommation domestique, industrie, agriculture, loisirs, etc.), le développement des problèmes environnementaux dus aux pollutions d'origine humaine, et les conséquences de choix d'aménagements hydrauliques faits par le passé apparaissant aujourd'hui peu judicieux, les gestionnaires de cette ressource doivent faire face actuellement à des situations de plus en plus complexes, où interviennent de multiples acteurs, aux intérêts et objectifs parfois opposés. Dans ce contexte, on comprend alors aisément la nécessité de mettre au point des outils d'aide à la gestion et à la décision qui permettent de mieux cerner le fonctionnement des hydro-systèmes naturels et le devenir de l'eau dans son environnement. L'utilisateur de ces instruments peut bénéficier ainsi d'une meilleure connaissance de la répartition spatiale et temporelle des flux d'eau et des matières et composés qu'elle véhicule à l'échelle du bassin.

Face à cette situation, il est clair qu'il faut mettre en place toutes les mesures nécessaires afin d'assurer une gestion rationnelle, efficiente et intégrée des ressources en eau. Cette gestion doit se baser sur des systèmes d'aide à la décision capables d'évaluer le potentiel

disponible, de comprendre sa génération et sa répartition, d'assurer sa valorisation et sa mobilisation, de le protéger contre les aléas climatiques et anthropiques, de planifier son utilisation et de prévoir son évolution. La compréhension et la maîtrise de l'ensemble des processus intervenant dans le cycle de l'eau de point de vue quantitatif et qualitatif deviennent alors primordiales.

Notre travail de recherche s'inscrit dans le domaine de la modélisation de la transformation de la pluie en débit et de sa représentation à l'échelle du bassin versant. Notre objectif principal est de mesurer la performance de quatre modèles hydrologiques de différentes conceptions sur un bassin aride situé au Sud du Maroc, au travers d'une approche comparative. Pour cela, nous avons réalisé une revue des différentes approches de modélisation et mis en place un cadre de comparaison pour apprécier les forces et faiblesses de différentes représentations mathématiques existantes de la transformation pluie-débit.

La modélisation du fonctionnement d'un bassin versant cible en général l'étude du régime hydrologique du bassin, l'analyse de sa réponse aux divers aléas auxquels il est exposé (inondations, érosion, sécheresse, pollution,...) et l'étude et la simulation de l'impact des changements et des dynamiques opérés au niveau du bassin sur la gestion des ressources en eau.

Dans la présente thèse, cette problématique est traitée au niveau du bassin versant d'Issen au Sud de Maroc. Cette zone d'étude, s'étalant sur une superficie de l'ordre de 1300 km², a une importance capitale suite à la construction du **Barrage ABDELMOUMEN** en aval du bassin.

Afin d'assurer le bon fonctionnement de ce barrage et de garantir l'accomplissement de la mission pour laquelle il a été construit, il est évident qu'il faut procéder à l'étude et l'analyse de toute la zone drainée par cet ouvrage. Cette étude aura comme objectif principal d'identifier et de comprendre les mécanismes de fonctionnement de ce bassin versant et d'analyser par conséquence les différents processus de production et de transfert des éléments liés à l'eau en terme quantitatif. Explicitement, il s'agit de l'étude des apports en eau (disponibilité et mobilisation de l'eau).

Dans ce travail, Nous présentons quatre classes de modèles (ATHYS, SWAT, HEC-HMS et GR4J) permettant de différencier les grands types d'approches de construction de

modèles destinés à simuler la transformation de la pluie en débit appliquées à un bassin dans un contexte climatique aride très spécial.

2- OBJECTIFS DE LA THÈSE :

Le foisonnement actuel des modèles hydrologiques constitue une richesse que nous avons voulu exploiter. Nous avons regroupé des formulations mathématiques variées correspondant à des concepts et perceptions très diversifiés sur les processus de génération des débits à l'échelle du bassin versant. Ainsi 4 structures dérivées de modèles existants ont été comparées. L'établissement d'une procédure d'évaluation uniforme a permis de tester ces structures dans des conditions rigoureusement identiques, avec les mêmes données d'entrée et la même procédure d'estimation des paramètres, les mettant ainsi sur un pied d'égalité.

Cependant, l'objectif global de cette thèse est la modélisation du bassin versant d'Issen situé au Sud de Maroc, à travers une approche comparative de quatre modèles hydrologiques sous différentes approches de modélisation.

De cet objectif global, il découle un ensemble d'objectifs spécifiques qui peuvent être présentés comme suit :

- Mieux comprendre le fonctionnement hydrologique de la zone d'étude notamment un bassin aride typique ;
- Le traitement de la problématique de la qualité des données hydrométéorologiques dans la modélisation des processus de cycle d'eau ;
- Évaluer la pertinence des outils hydrologiques utilisés dans le contexte spécifique aride de l'étude pour la simulation du débit mais aussi les processus hydrologiques intermédiaires ;
- Développer des tests et des protocoles permettant l'intercomparaison entre les modèles hydrologiques ;
- Spécifier les limites des modèles hydrologiques pour reproduire fidèlement le comportement hydrologique d'un bassin aride ;
- explorer quel est le rôle de la structure du modèle sur ses performances.

Afin d'atteindre les objectifs cités ci-dessus, la méthodologie globale suivie et adoptée dans le cadre de ce travail de recherche est articulée autour des axes suivants :

- La recherche bibliographique : diagnostic et benchmark sur les modèles utilisés dans l'étude des bassins versants ;
- Collecte et structuration des données nécessaires pour le montage des modèles sélectionnés ;

- La prise en main des modèles hydrologiques. Cette étape a consisté en l'étude des bases de fonctionnement des modèles hydrologiques utilisés ;
- Calage et validation des modèles hydrologiques ;
- Inter comparaison entre les modèles hydrologiques utilisés.

3- ORGANISATION DE LA THESE

Ce rapport de thèse est constitué de trois parties

INTRODUCTION GENERALE

1^{ère} PARTIE : GENERALITES SUR LES PROCESSUS HYDROLOGIQUES ET LEUR MODELISATION

CHAPITRE 1 : MODELISATION HYDROLOGIQUE ET MODELES PLUIE-DEBIT

Ce chapitre présente les aspects liés à la description et la modélisation des cycles de l'eau. Il présente une typologie des différents modèles mis en œuvre pour la simulation de ces composantes et expose la démarche suivie de la modélisation d'un bassin versant.

CHAPITRE 2 : CRITERES D'EVALUATION DES PERFORMANCES DES MODELES PLUIE-DEBIT

Dans ce chapitre nous proposons un plan hiérarchique pour la vérification systématique des modèles de simulation hydrologique, la nature du test étant liée à la difficulté de la modélisation suivie.

2^{ème} PARTIE : PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE ET MISE EN ŒUVRE DES MODELES HYDROLOGIQUES SUR LE BASSIN D'ISSEN

CHAPITRE 1 : PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

Ce chapitre présente les principales caractéristiques et enjeux de la zone d'étude en précisant son périmètre et ses différentes propriétés en termes de géographie, morphométrie, géomorphologie, géologie, climat et ressources en eau.

CHAPITRE 2 : MISE EN ŒUVRE DU MODELE SWAT SUR LE BASSIN ISSEN

Ce chapitre présente les aspects liés à la constitution de la base de données SWAT du bassin versant d'Issen, le calage et la validation du SWAT ainsi que l'analyse de sensibilité et des incertitudes du modèle. Il détaille aussi les différents résultats obtenus de la modélisation du bassin d'Issen par SWAT.

CHAPITRE 3 : PRESENTATION ET MISE EN ŒUVRE DU MODELE ATHYS SUR LE BASSIN ISSEN

Ce chapitre présente la mise en œuvre du modèle ATHYS, les différentes étapes de calage et de validation de ce modèle, ainsi que l'analyse de sensibilité et des incertitudes

du modèle. Il présente les différents résultats obtenus de la modélisation du bassin Issen sous la plateforme ATHYS.

CHAPITRE 4 : INTEGRATION DU MODELE GR4J DANS LE BASSIN D'ISSEN

Ce chapitre présente les étapes de la mise en œuvre du modèle conceptuel GR4J au niveau de bassin versant d'Issen ainsi que les résultats obtenus lors de simulation hydrologique dudit bassin.

CHAPITRE 5 : MODELISATION DU BASSIN D'ISSEN AVEC LE MODELE HEC-HMS

Ce chapitre présente essentiellement les différents résultats obtenus de la modélisation du bassin Issen par le modèle HEC-HMS ainsi que le calage et la validation du bassin en question.

3^{ème} PARTIE : ANALYSE ET ETUDE COMPARATIVE DES RESULTATS OBTENUS

Dans ce chapitre, nous donnons les résultats des tests comparatifs des quatre modèles précédemment utilisés, que nous analysons, au travers des critères de qualité sélectionnés. Enfin, nous explorons quel est le rôle de la structure du modèle sur ses performances et dans quelle mesure le test de ces formulations mathématiques différentes permet d'entrevoir des pistes d'amélioration des structures existantes.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

1^{ère} PARTIE : GENERALITES SUR LES PROCESSUS HYDROLOGIQUES ET LEUR MODELISATION

« Dans cette partie, nous présentons un état de l'art sur la modélisation hydrologique pluie débit. Nous nous intéressons d'abord aux processus hydrologiques à l'origine de la formation des crues : leur connaissance doit permettre de faire des choix a priori de modélisations et/ou d'interpréter les modèles. Ensuite, nous présentons une classification des modèles. Enfin, nous nous intéressons aux incertitudes auxquelles sont soumis ces modèles, en particulier au niveau de leurs structuration. »

En suite, nous proposons un plan hiérarchique pour la vérification systématique des modèles de simulation hydrologique, la nature du test étant liée à la difficulté de la modélisation. Les vérifications sont dites en conditions réelles puisque leur but est simplement d'évaluer la fidélité d'un modèle dans des situations les plus possibles rapprochées de celles dans lesquelles Il est censé servir; en d'autres termes, il s'agit d'évaluer s'il est opérationnel.

La fidélité des modèles hydrologiques est le degré de concordance entre les résultats de la simulation et les observations. Il s'ensuit que la puissance des tests proposés est plutôt modeste, et même un résultat complètement positif peut seulement être considéré comme la **condition nécessaire plutôt que suffisante** de la fidélité du modèle. Le plan peut paraître une tentative pour généraliser le test répétitif en vue de prendre en charge la possibilité de vérifier l'adaptabilité des modèles, qu'elle soit du simple type géographique ou de types plus complexes tels que l'adaptabilité à différents types d'utilisation des terres de climat ou d'autres types de modifications de l'environnement » (*V. klems (2002)*) ».

CHAPITRE -1-

*ETAT DE L'ART SUR LA MODELISATION HYDROLOGIQUE
PLUIE DEBIT*

Introduction :

On entend généralement par modélisation des systèmes hydrologiques l'application d'expressions mathématiques et logiques qui définissent les relations quantitatives entre les caractéristiques de l'écoulement (sorties) et les facteurs influant sur ces valeurs (entrées). Il s'agit là d'une définition très générale qui englobe un large éventail de méthodes. A un extrême, se trouvent les techniques purement empiriques, dites de la « boîte noire », dont le but n'est pas de modéliser la structure interne et la réponse physique du bassin versant mais uniquement de rapprocher les entrées et les sorties du système que constitue un bassin versant. A l'autre extrême, des techniques font intervenir des ensembles complexes d'équations, fondées sur les lois physiques et les concepts théoriques régissant les processus hydrologiques : ce sont les modèles hydrodynamiques. Entre les deux extrêmes, se situent divers modèles conceptuels, représentations logiques d'éléments conceptuels simples, par exemple des réservoirs et des chenaux linéaires ou non linéaires, qui simulent les processus en jeu dans le bassin versant. Qu'ils soient purement empiriques, conceptuels ou hydrodynamiques, ces modèles donnent des résultats qui ne sont pas assortis d'indice de probabilité. C'est pourquoi on les qualifie souvent de déterministes.

I. Processus hydrologiques

Le volume d'une crue peut être décomposé en trois principales parties (**Fig. 1-1**) : le ruissellement de surface, l'écoulement hypodermique et l'écoulement de base. L'importance de chacune de ces grandeurs dépend du milieu étudié, des conditions initiales de l'écoulement, et des caractéristiques de l'événement pluvieux (distribution spatiotemporelle, intensité et volume).

Durant ces dernières décennies, on a assisté à une progression importante dans le domaine hydrologique, ainsi plusieurs études ont été menées se consacrant à l'identification des processus hydrologiques au niveau des bassins versants. De nombreuses expérimentations ont été réalisées sur une grande variété de bassins. Parmi les outils importants qui ont favorisé cette évolution et qui ont aidé dans le processus d'identification des facteurs principaux contrôlant la réponse hydrologique à l'exutoire d'un bassin versant, on peut citer l'instrumentation des bassins et leur échantillonnage en plusieurs stations.

Au niveau de la littérature, plusieurs travaux retracent la logique de progression et de compréhension des processus hydrologiques et des outils qui ont permis l'identification de ces processus. Dans cette partie, on abordera les grands axes de cette évolution.

Le premier pas et la première théorie importante concernant ce sujet est apparu au début du siècle dernier avec les travaux **d'Horton (1933)**. Cette théorie est basée sur le concept de

capacité d'infiltration des sols et la notion de dépassement de capacité. La logique du concept est simple, tant que la capacité maximale d'infiltration du sol concernant le bassin en question n'est pas dépassée, la totalité de l'eau de pluie se trouve dans le sol par infiltration ; et dès que les intensités pluviométriques dépassent ce seuil maximal, le surplus d'apport d'eau se trouve en surface et présente un volume d'eau ruisselée, c'est ce ruissellement qui va former l'écoulement rapide de crue, quand à l'eau infiltrée, elle se trouve dans les couches inférieures du sol et contribue très lentement à la recharge des nappes et au soutien du débit de base. Ce processus est conditionné par les états de surface du sol qui décident de la fraction d'eau de pluie qui peut être infiltrée ou pas.

Vers les débuts des années 60, on a commencé à mettre en cause cette théorie suite à des observations directes sur le terrain, et qui ont montré sous certaines conditions et restrictions, que l'écoulement souterrain pouvait participer directement ou indirectement à la formation des crues. Plusieurs autres mécanismes ont été proposés par la suite pour expliquer la formation des écoulements dans un bassin versant.

Selon **Dunne (1978)**, l'écoulement de surface se produit quand l'eau de la nouvelle pluie tombe sur des zones saturées. Le mélange entre la nouvelle eau et l'eau ancienne forme l'écoulement sur des surfaces saturées. Une fois l'apport de l'écoulement de subsurface dépasse la capacité du sol à transmettre un flux d'eau transversal, le processus d'exfiltration de l'eau souterraine s'active et l'eau sub-surfacique se trouve émergée à la surface du sol.

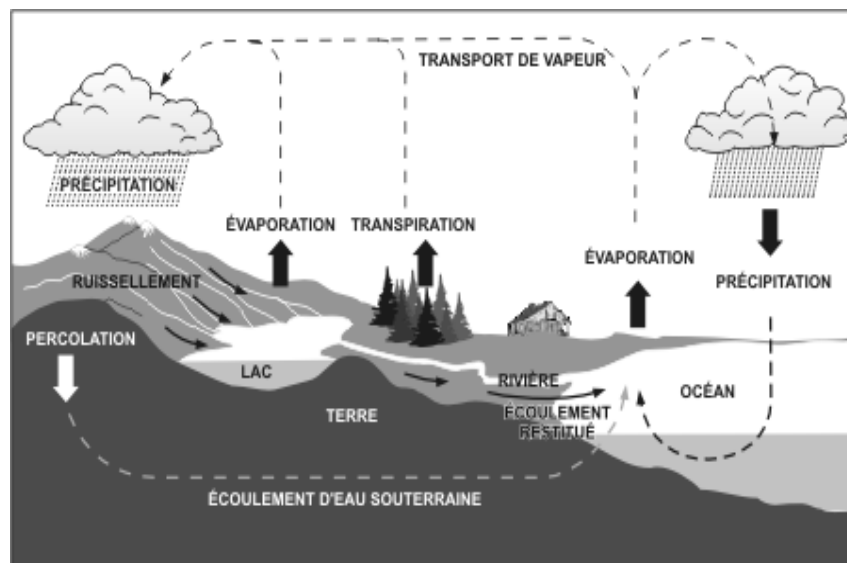


Figure 1-1: Schématisation du processus de cycle de l'eau (Chamley, 1987).

La prise en considération de l'effet de l'écoulement de subsurface (appelé aussi écoulement hypodermique ou retardé) dans la genèse des crues a été évoqué pour la première fois par **Hursh (1936)** mais il n'a pas pu avoir le même succès que la théorie de Horton(1933). Il a fallut

plusieurs années pour que les hydrologues reconnaissent la contribution de l'écoulement hypodermique à l'écoulement rapide des crues.

Ce type d'écoulement tend à ralentir le cheminement de l'eau et à allonger la durée de l'hydrogramme. On distingue souvent entre les deux types d'écoulement, celui de proche subsurface et celui en profondeur.

Un peu partout dans la littérature on trouve plusieurs autres mécanismes expliquant le phénomène en supposant que les écoulements latéraux de subsurface résultent de processus diffus impliquant des flux d'eau matricielle. Ainsi **Hewlett et Hibbert (1967)** ont expliqué le phénomène par un concept dit « effet piston » ; l'eau se trouvant en surface s'infiltre dans le sol non saturé et percole verticalement en poussant l'eau contenue dans le sol vers les profondeurs du sol, d'où l'appellation effet de piston. Quand à **Ambroise (1967)**, la formation du front d'infiltration est d'autant moins régulière et l'effet piston est d'autant moins efficace que l'apport en surface et la distribution de la porosité sont localement plus hétérogènes.

Sklash et Farvolden (1979) ont proposé un nouveau mécanisme expliquant la contribution de l'écoulement de base à la génération des crues nommée « intumescence de la nappe ». Ce mécanisme considère que le déficit de saturation dans les régions proches de la rivière est inférieur à celui des versants, ce qui provoque des gradients hydrauliques très élevés au niveau de la rivière et donc libération facile de l'écoulement souterrain vers la rivière. Les mêmes auteurs montrent dans une étude menée sur deux petit bassins versants (Ruisseau des eaux volées et **Hillman Creek**) à l'aide de l'approche isotopique, que pour des intensités pluviométriques modérées sur un bassin ayant des sols gorgés d'eau, l'écoulement de surface et celui de la rivière sont dominés par l'écoulement souterrain. Par contre, pour un événement pluvieux intense sur un bassin dont les sols sont très secs, l'écoulement de surface et celui de la rivière sont dominés par l'eau de pluie.

Le concept qui a été considéré comme une révolution importante dans le domaine de l'hydrologie est celui du développement de la notion des surfaces contributives variables. Ce concept a été évoqué par **Hewlett et Hibbert (1967)**, n'ayant pas observé d'écoulement sur l'ensemble du bassin de Coweet en USA, ils ont proposé le concept de zones contributives variables pour expliquer l'hydrogramme observé. Le concept suppose que la contribution du bassin à l'écoulement total varie dans l'espace durant l'événement pluvieux. En fait , l'eau de pluie parvient à s'infiltrer et alimente une nappe qui remonte dans le sol sous-jacent. Là où cette nappe finit par affleurer, c'est la totalité de la pluie qui est refusée et qui génère le ruissellement. Le contrôle se fait dans ce cas, du sol vers la surface, par la capacité locale de transit dans la couche superficielle du sol qui contrôle la remontée et son affleurement.

1. Facteurs de contrôle des processus hydrologiques

D'après ce qu'on a vu dans la partie précédente concernant les processus hydrologique par leurs diversités, on peut se faire une idée globale sur le débit que l'on mesure à l'exutoire d'un bassin

versant, ce débit est le résultat d'une succession de processus simultanés avec la prise en compte de la variabilité spatio-temporelle. L'activation des processus hydrologiques qui régissent le phénomène d'écoulement dépend en grande partie des propriétés physiques du bassin, des paramètres météorologiques, de l'occupation des sols et des conditions hydriques initiales.

2. Topographie et pédologie :

Des travaux récents : **Western et al (1999)** ; **Chaplot et Walter (2003)** ont montré que la topographie est parfois la géologie des couches profonde du sol jouent un rôle important dans le contrôle des processus hydrologiques au niveau des bassins versants et que la topographie est un facteur déterminant qui entre directement dans le comportement du système hydrique du sol.

Ces études ont été d'une grande utilité dans le domaine d'hydrologie vu que les informations sur la topographie du bassin et la connaissance géomorphologique des sols sont indispensables à la compréhension des écoulements et par la suite à une modélisation plus réaliste.

La mise en évidence du rôle de la morphologie dans le processus des écoulements a permis d'avoir une autre logique et une autre vision du phénomène. De nos jours, cette variabilité topographique est souvent prise en compte par exemple dans les entrées des modèles telles que les MNT (Modèles Numériques du Terrain).

3. Occupation du sol :

Quant à l'occupation du sol, elle a une influence directe sur le processus hydrologique. Dans les zones urbanisées ayant des sols imperméables ou en zones de cultures avec des sols tassés, les écoulements se concentrent en surface. Par contre, pour les zones forestières, où la porosité du sol est beaucoup plus importante, on assiste à une prépondérance de l'écoulement de subsurface par rapport aux autres types d'écoulements.

Le fait que les zones forestières jouent un rôle important dans les processus de contrôle du cycle de l'eau devient un point d'accord de la communauté des hydrologues. Un article publié dans une revue bibliographique exhaustive **d'Humbert et Najjar (1992)** démontre amplement la diversité des sujets de recherches dans le domaine, que ce soit au niveau de l'influence de la forêt sur le cycle de l'eau ou sur le fonctionnement et la contribution des arbres dans le conditionnement des données climatiques de la zone.

4. Conditions météorologiques :

Les facteurs météorologiques jouent aussi un rôle dans le phénomène de génération des crues. L'intensité et le volume des précipitations influencent fortement la réponse hydrologique. Le rayonnement solaire ainsi que la température du bassin nous aide à avoir une bonne estimation du phénomène de l'évapotranspiration.

5. Variabilité spatiale des paramètres :

Si on s'intéresse à la variabilité spatiale de ces facteurs, **Flugel (1997)** a affirmé que cette variabilité est un facteur important dans le processus d'infiltration et de l'écoulement de surface. Pour répondre à cette question, **Ambroise (1999)** a souligné qu'il faut considérer le bassin en question comme une entité spatialement organisée pour bien tenir compte de l'effet de variabilité. Un peu plus tard, **Western (2004)** a montré que les paramètres régissant le phénomène d'écoulement peuvent avoir une variabilité spatiale et temporelle avec l'état hydrique du bassin versant.

Il convient de signaler que les facteurs étudiés lors de cette synthèse bibliographique à savoir les facteurs topographiques, morphologiques, pédologiques et des caractéristiques d'occupation du sol et de la végétation avec la prise en compte de leurs variabilités spatio-temporelles sont étroitement liés. Ces facteurs constituent une trame d'entrée pour tout modèle hydrologique, ils constituent des paramètres d'entrée importants pour la modélisation des bassins versants.

II. Modélisation hydrologique

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

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

Il existe, dans la littérature, de nombreux modèles hydrologiques de bassins versants ayant chacun ses spécificités et son domaine d'application. Une fois le modèle choisi, il faut évaluer sa capacité à représenter la réalité. Ceci se fait le plus souvent en comparant les résultats du modèle avec les observations. C'est une étape très délicate.

On peut distinguer trois types d'utilisation des modèles mathématiques en hydrologie (**Fig. 1-2**):

- La modélisation comme outil de recherche : la modélisation peut être utilisée pour interpréter des données mesurées. Différents scénarios de fonctionnement hydrologique des bassins versants peuvent être confrontés aux mesures.
- La modélisation comme outil de prévision : elle nous donne une anticipation des évolutions futures du débit d'un cours d'eau. Il s'agit de l'utilisation opérationnelle la

plus courante des modèles hydrologiques. Dans la plupart des cas cependant, les modèles développés sont basés sur des régressions linéaires entre les variables indépendantes (pluie, débits amont) et les variables dépendantes (débits aval), et font appel aux connaissances sur les processus hydrologiques.

- La modélisation comme outil d'extrapolation : reconstitution de séries de débits plausibles. Dans certains cas, comme par exemple le dimensionnement de déversoirs de sécurité de barrages hydroélectriques ou encore la délimitation de zones inondables.

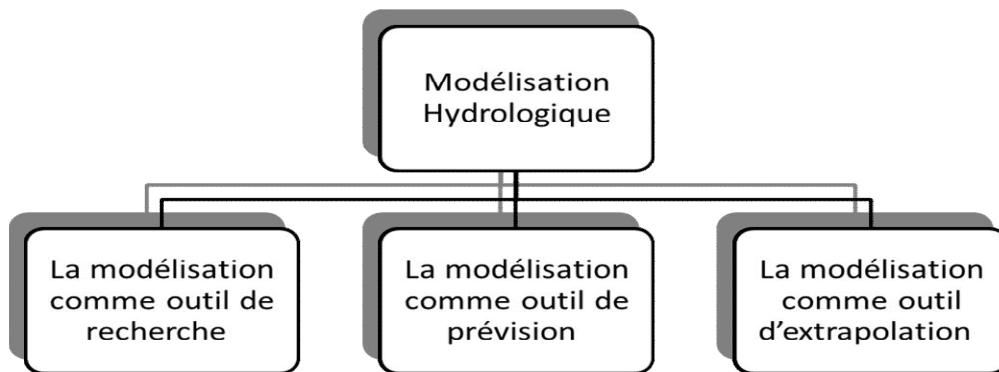


Figure 1-2: Types d'utilisation des modèles mathématiques en hydrologie

La modélisation du comportement hydrologique des bassins versants est incontournable chaque fois qu'on s'intéresse à des problèmes liés à la gestion des ressources en eau, à l'aménagement du territoire et aux différents risques hydrologiques (sécheresse, inondation.....). Cette modélisation doit décrire de manière fidèle et réaliste les différentes étapes liées à la transformation de la pluie en débit. On l'utilise aussi pour obtenir des informations intéressantes pour le dimensionnement des ouvrages hydrauliques.

1. Les modèles hydrologiques

Un modèle est une représentation d'un phénomène physique, dans le but de comprendre les processus qui le régissent. Cette représentation peut être physique, analogique ou mathématique. Dans le premier cas, le modèle est une maquette qui reproduit d'une manière plus au moins adéquate la réalité. Les modèles analogiques se basent sur les similitudes entre le phénomène à étudier et un autre phénomène physique. La modélisation mathématique est un outil essentiel pour la connaissance des phénomènes naturels, elle essaye d'établir un lien entre les variables d'entrées et de sortie par des relations mathématiques.

Au cours de ces dernières années, les efforts de la recherche pour la compréhension du cycle de l'eau dans les milieux naturels (bassins versants, rivières, nappes, etc.), associés aux

développements de l'informatique, se sont concrétisés par l'apparition d'une multitude de modèles mathématiques.

Il existe une très grande variété de modèles hydrologiques car les processus pris en compte (**Fig .1-3**) et l'approche adoptée pour les conceptualiser diffèrent selon les auteurs. Les modèles les plus complets prennent en compte les processus verticaux et latéraux.

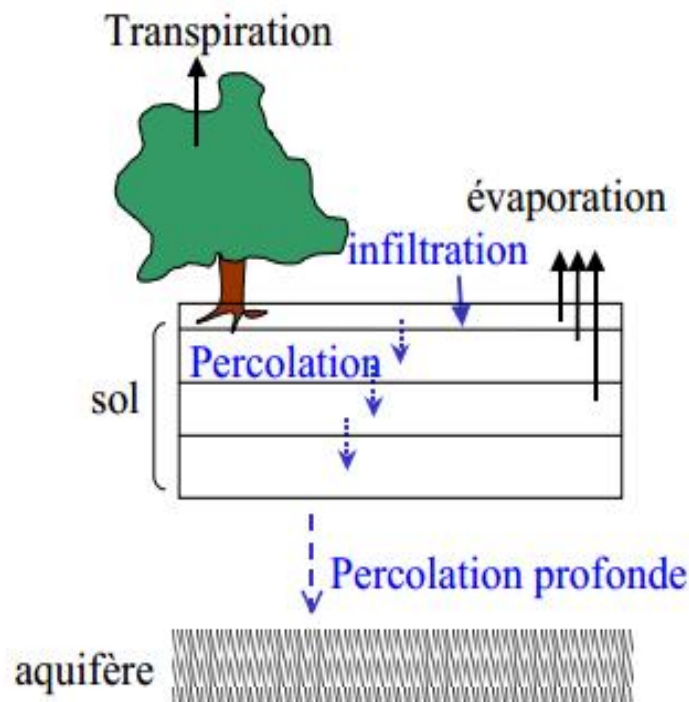


Figure 1-3: Schématisation des principaux flux pris en compte dans les modèles hydrologiques de bassin versant.

2. Classification des modèles hydrologiques

Depuis l'apparition de la modélisation hydrologique, de nombreux modèles ont été développés en fonction des objectifs recherchés, sur base de différents choix d'élaboration, menant à une multitude de modèles exploitables dont chacun est doté de champs d'application et de validité restreints. Les différences portent notamment sur les options de simulation en termes de discrétisation spatiale : les modèles sont globaux ou distribués. Et enfin, ils diffèrent au point de vue de l'expression des phénomènes hydrologiques, liés soit à des équations empiriques, soit à des équations physiques, soit à une simplification plus ou moins poussée de ces équations physiques (approche conceptuelle). Bref, les critères de classification des modèles reposent principalement sur la représentation de l'espace, du temps et des processus décrits (**Singh, 1995 Payraudeau, 2002**). La (**Fig. 1-4**) donne une classification des modèles hydrologiques en se basant sur ces critères sus-mentionnés.

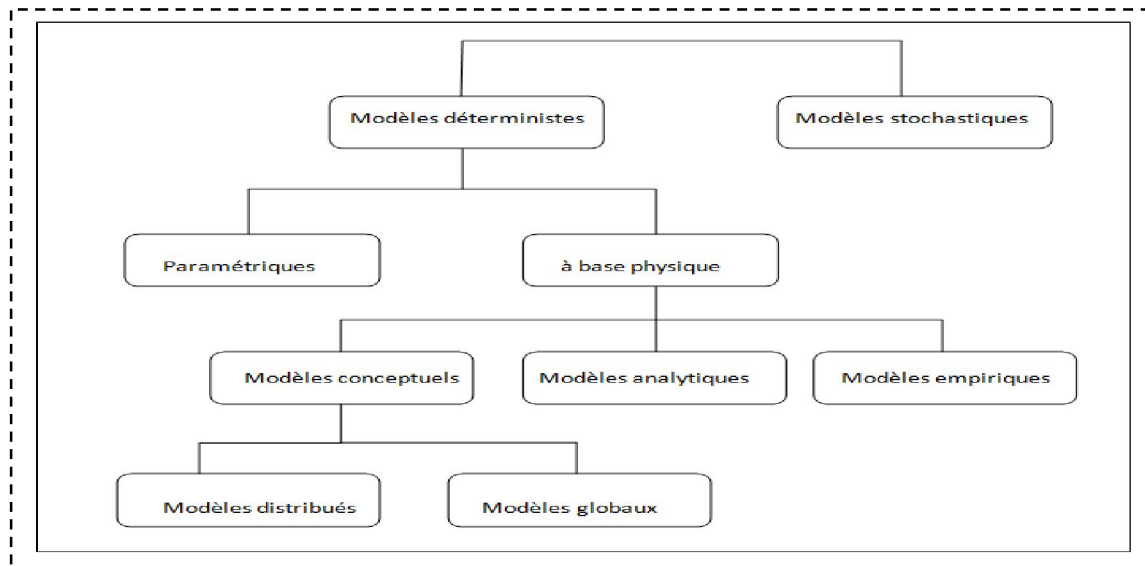


Figure 1-4: Types des modèles hydrologiques(Ambroise et al 1998,Simunek et al 2007, 2008).

Pour modéliser ces processus de production et de transferts, les hydrologues ont développé un très grand nombre d'outils. L'abondance des modèles témoigne de la variété des approches possibles pour conceptualiser les processus (approche dépendant du bassin et de l'objectif d'étude). Différentes « grilles de lecture » peuvent être utilisées pour distinguer les modèles entre eux compte **(Fig. 1-5)**. Nous proposons ici trois « grilles de lecture » qui nous paraissent pertinentes pour classer quasiment l'intégralité des modèles existants. N'ayant pas pour but de répertorier et classer tous les outils existants, nous illustrerons les différents niveaux de lecture en nous appuyant sur huit modèles classiques de bassins versants.

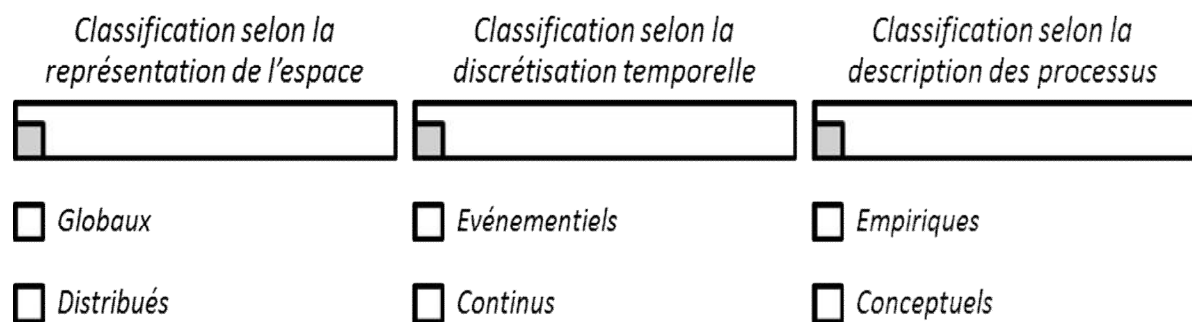


Figure 1-5: Classification des modèles hydrologiques.

2.1 Classification selon la représentation de l'espace

Selon la description des processus hydrologiques dans le modèle et sa liaison avec les caractéristiques du bassin versant, le modèle peut être global ou distribué, déterministe ou stochastique ou mixte. Dans un modèle **global** (*lumped model*) ou "**boîte noire**" le bassin est considéré comme une entité unique. Des relations empiriques (issues de l'expérience) relient les entrées et les sorties sans chercher à se rapprocher d'une loi physique. Les équations sont souvent des équations différentielles ordinaires (ODE, Ordinary differential equation) qui ne prennent pas en compte la variabilité spatiale des processus, des entrées, des conditions aux limites et les caractéristiques géométriques du système (dans ce cas, le bassin versant). Dans de nombreux modèles globaux, les processus sont décrits sous forme d'équations simplifiées ou d'équations issues de raisonnements empiriques (Singh, 1995). Parmi les modèles globaux qui existent dans la littérature on peut citer: le modèle GR (**Edijatno et Michel, 1989**), HEC-1 (Hydrologie Engineering Center, 1981).

Le modèle **distribué** (*Distributed model*), quant à lui, prend explicitement en compte la variabilité spatiale des processus et/ou des variables d'entrée et/ou des conditions aux limites et/ou des caractéristiques du bassin versant. Les équations sont parfois des fonctions de probabilité de type PDF (Probability Differential Function). Bien sûr, dans la réalité, le volume de données nécessaires pour l'implémentation de ce modèle n'est en général pas disponible sur le bassin d'application ce qui rend ce type de modèle peu opérationnel.

Dans la majorité des cas, le modèle n'est pas totalement distribué étant donné que certains composants du système peuvent être globalisés. Le modèle est alors de type **semi-distribué** (**semi-distributed model**) qui tient compte de la variabilité spatiale à travers des classes ayant des comportements hydrologiques supposés similaires. A titre d'exemple, nous pouvons citer TOPMODEL (**Beven et Kirkby, 1979 ; Obled, 2003**). En fonction du niveau de description des processus, le modèle peut être aussi déterministe, stochastique ou mixte. Dans un modèle **déterministe** (**Deterministic model**), nous supposons que les variables d'entrée et les paramètres du système sont parfaitement déterminés ou déterminables. Par contre dans un modèle **stochastique** (**Stochastic model**), ce sont plutôt des distributions de probabilité qui sont associées à ces grandeurs. La majorité des modèles sont déterministes. L'approche probabiliste est utilisée soit parce que le phénomène étudié est aléatoire soit parce que nous cherchons à représenter des permanences difficilement explicables physiquement (**Chocat, 1997**).

Une autre grille de lecture est l'échelle spatiale du modèle. Les fonctions de production sont calculées sur chaque « unité de production ». Au sein du bassin versant plusieurs unités peuvent être considérées :

- une seule « unité de production », l'échelle spatiale du modèle sera qualifiée de « globale » (comme dans **GR4J** ou **CEQUEAU**) ;

- Plusieurs unités de production dont les localisations géographiques ne sont pas connues : le modèle est « semi-distribué ». C'est le cas du modèle VIC : la fonction de production est dépendante de la profondeur du réservoir qui n'est pas homogène sur le bassin. En effet, une fonction de distribution de la profondeur affecte à des portions du bassin telle ou telle profondeur de sol : ainsi, la variable est distribuée mais la localisation de la portion du bassin présentant une profondeur donnée n'est pas connue. L'établissement de cartes des variables hydrologiques n'étant pas possible, le modèle ne sera pas qualifié de « distribué », par contre il est « semi-distribué » car il considère que le bassin n'a pas le même fonctionnement en tout point.
- Plusieurs unités de production localisées explicitement : le modèle est « distribué ». Ces unités peuvent être déterminées par une grille découpant le bassin (une maille = une unité), c'est le cas **du ATHYS**, SHE et de TOPOG. Les unités peuvent également être regroupées en classe dont le fonctionnement hydrologique est considéré comme identique : au lieu d'être calculé en chaque point, le bilan hydrologique est établi pour chaque classe. Chaque modèle a ses propres critères pour définir les classes hydrologiques (critères topographiques, critères de couverture sol/ végétation). C'est la démarche adoptée par POWER, SWAT et TOPMODEL (les « Unités de Réponse Hydrologique » de SWAT, les classes d'indices topographiques de TOPMODEL et les « colonnes élémentaires représentatives » de POWER). Le modèle est qualifié de distribué car il est possible d'établir, à chaque pas de temps, des cartes des variables hydrologiques (soit directement pour les modèles maillés soit en redistribuant le bilan hydrologique pour les modèles dont les unités de fonctionnement identique ont été regroupées).

Enfin, une dernière grille de lecture s'attache à la nature probabiliste ou déterministe des variables intégrées au modèle. Nous entendons par modèles probabilistes des modèles affectant aux variables des valeurs suivant une distribution donnée, comme le modèle VIC pour la profondeur de sol. Par « modèles déterministes » nous entendons ceux qui cherchent à affecter une valeur à une variable en fonction du terrain. L'utilisation d'un modèle probabiliste est adaptée si l'objectif n'est pas une connaissance réaliste du fonctionnement du bassin mais une reproduction optimale de ses variables de sortie (souvent, seul le débit est analysé). Ils sont typiquement employés en prévision. Les modèles déterministes sont adaptés à des analyses dont le but est par exemple de comprendre les processus menant à un certain débit, et d'exploiter les informations (cartes pédologiques par exemple) disponibles a priori.

2.2 Classification selon la discrétisation temporelle

Selon les objectifs recherchés à travers la modélisation, le comportement du bassin peut être reproduit uniquement pour des événements particuliers (typiquement des épisodes de crues) ou en continu sur une période plus ou moins longue englobant des périodes de temps sec (hors événements). Nous distinguons ainsi les modèles événementiels et les modèles continus.

Les modèles **événementiels** (**event-based model**) visent à reproduire la réponse du bassin en terme du débit lors d'un épisode pluvieux. Ce genre de modèle, qui n'est activé qu'au moment des pluies, nécessite de pouvoir préciser l'état initial du bassin en fonction des conditions climatiques antécédentes.

Les modèles **continus** (**continuous-time model**) permettent, quant à eux, de suivre l'évolution des variables d'état et/ou de sortie à plus long terme (Payraudeau, 2002). Dès lors, certains processus ne peuvent plus être négligés dans les modèles continus en particulier l'évaporation et l'évapotranspiration. Ces modèles nécessitent donc des variables de conditions aux limites (les précipitations, la température, le rayonnement solaire, le vent, ...) supplémentaires par rapport aux modèles événementiels pour expliquer l'évolution des stocks d'eau sur le bassin pour une ou plusieurs années hydrologiques.

2.3 Classification selon la description des processus

Pour décrire les processus de cheminement d'une goutte de pluie tombée sur le bassin jusqu'à l'exutoire, nous avons recours le plus souvent à une simplification qui consiste à décomposer le processus hydrologique en différents sous-processus qui peuvent être représentés séparément. Ceci facilite aussi l'acquisition des données d'expérimentation.

Les modèles **empiriques**, de type boîte noire, cherchent à reproduire la dynamique des variables de sortie en fonction des variables d'entrée sans tenter de décrire les processus élémentaires. A titre d'exemple de modèle empirique, nous pouvons citer la formule OÙ : e et / sont des coefficients déterminés par une régression effectuée sur les mesures pluie- débit (**Grayson et Blöschl, 2000**), tiré de **Indarto (2002)**.

Selon **Ambroise (1991)**, le modèle empirique caractérise globalement la relation pluie-débit par des traitements de séries chronologiques.

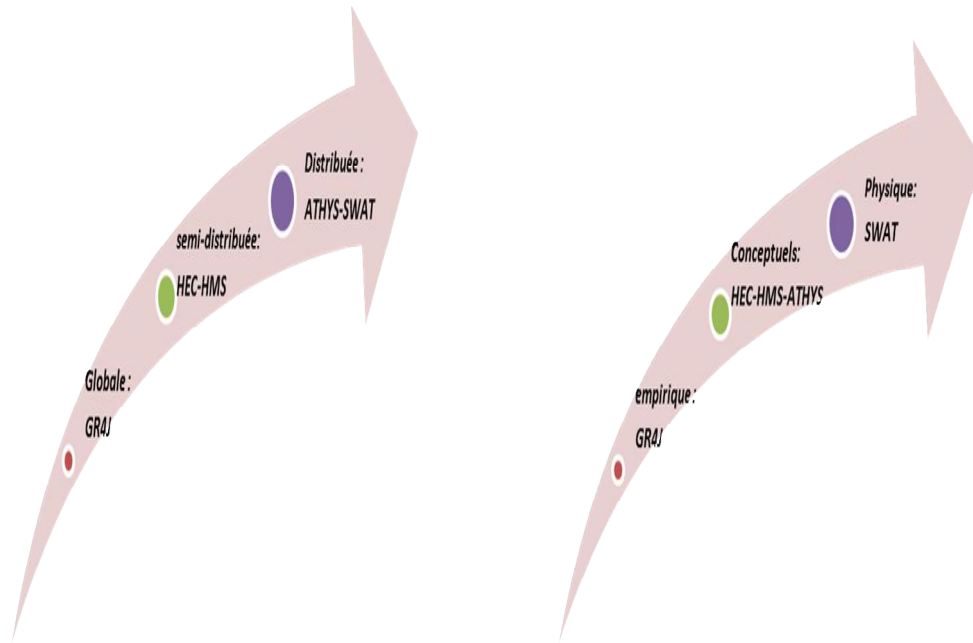
Les modèles **conceptuels** considèrent en général le bassin versant, après quelques simplifications du cycle de l'eau, comme un ensemble de réservoirs interconnectés.

Par exemple dans les modèles conceptuels semi-distribués, l'espace y est discrétisé en sous-unités que l'on considère "homogènes" en terme de caractéristiques physiques et/ou en terme de fonctionnement hydrologique (Ambroise, 1991). Plusieurs approches ont été développées pour mieux découper l'espace et intégrer ainsi une description de la variabilité spatiale des caractéristiques physiographiques du bassin dans la connaissance des processus hydrologiques. Dans la pratique, le choix de tel ou tel modèle est fortement lié aux composantes hydrologiques

que nous cherchons à reproduire à travers la modélisation mais aussi aux échelles spatio-temporelles. Un processus peut être considéré comme important dans un modèle et négligeable dans un autre. Le paragraphe suivant aborde les problèmes d'échelles dans la modélisation hydrologique distribuée.

Cependant, une distinction entre les modèles réside dans le choix des formalismes des processus simulés compte **(Fig. 1-6)** : des formulations à base plus ou moins physique peuvent être adoptées, permettant de classer le modèle comme étant :

- « à base physique » : citons dans cette catégorie le modèle S.H.E. « Système Hydrologique Européen » **(Abbott et al., 1986)**, P.O.W.E.R. « Planner Oriented evaluative Watershed model for Environmental and socio-economical Responses » **(Reggiani et al., 1998)**, TOPOG **(O'Loughlin, 1986)** et SWAT « Soil and Water Assessment Tool » **(Arnold et Allen, 1996)**. En effet, ces modèles reposent sur une physique assez complète. Il est possible de distinguer des « niveaux de physique » parmi ces trois modèles qui illustrent leur complexité croissante : à un premier niveau nous plaçons SWAT, à un deuxième niveau TOPOG, puis POWER et enfin SHE. Cependant dans **SWAT** si la plupart des modules sont à base physique, certains sont conceptuels comme le module de sol qui repose sur le concept de réservoir pour simuler les écoulements verticaux dans le sol, ainsi **SWAT** pour quelques modules, pourrait être rangé dans la seconde classe de modèle : la classe de modèles « conceptuels ».
- « conceptuel » : les modèles de ce type reposent sur des concepts leur permettant de simplifier les formulations de processus qui restent néanmoins fonction de paramètres physiques. Le concept de zones contributives est à la base des modèles TOPMODEL et **HEC-HMS**. Là encore, nous estimons une « hiérarchie » dans les modèles : VIC est très simple, TOPMODEL plus détaillé ;
- « empirique » : leurs paramètres n'ont aucune signification physique et sont déterminés par calibration. CEQUEAU **(Morin et al, 1981)** est entièrement basé sur des réservoirs qui se vident et se remplissent en fonction de la hauteur de l'exutoire du réservoir et GR4J **(Edijatno et al, 1999)** est un modèle pluie débit simple à seulement quatre paramètres.



*Figure 1-6: Classification des modèles hydrologiques utilisés
pour la modélisation d'Issen .*

2.4 Calage des modèles hydrologiques

Le calage consiste à ajuster les valeurs numériques attribuées aux paramètres du modèle pour reproduire au mieux la réponse observée (**Fig. 1-7**) . C'est le processus de choix de jeux de valeurs des paramètres. Cette opération peut se faire manuellement par une procédure "essai et erreur", ou automatiquement par une procédure d'optimisation en cherchant la valeur optimale d'un critère donné (communément appelé fonction objectif) qui améliore la cohérence entre la réponse observée et simulée du bassin (**Madsen, 2000**). Il existe plusieurs méthodes dans la littérature pour déterminer cette valeur optimale telle que la méthode de détermination directe. Nous pouvons citer par exemple la méthode d'optimisation de Rosenbrock (**Rosenbrock, 1960**) et la méthode Simplex (**Nelder et Mead, 1965**). Néanmoins, l'application de ce genre de méthodes trouve rapidement ses limites à cause de la présence de multiples valeurs optimales et de la dépendance le plus souvent forte entre les paramètres. Cela rend la surface de réponse discontinue, non-dérivable, présentant plusieurs zones de convergence et des optima locaux (**Beven et Binley 1992 , Duan, et al., 1992**), cités par (**Chahinian 2004**). D'autres algorithmes complexes, de type probabiliste, ont été ainsi développés pour chercher l'optimum global. Dans ce type de méthodes, la convergence ne se fait plus au sens de distance mathématique mais de distance probabiliste. Parmi celles-ci nous pouvons citer l'algorithme *Shuffled Complex Evolution* (SCE-UA) de **Duan, et al. (1992)** combinant des algorithmes simple et génétique. Ce genre d'algorithmes nécessite malheureusement des données et un temps de calcul considérables.

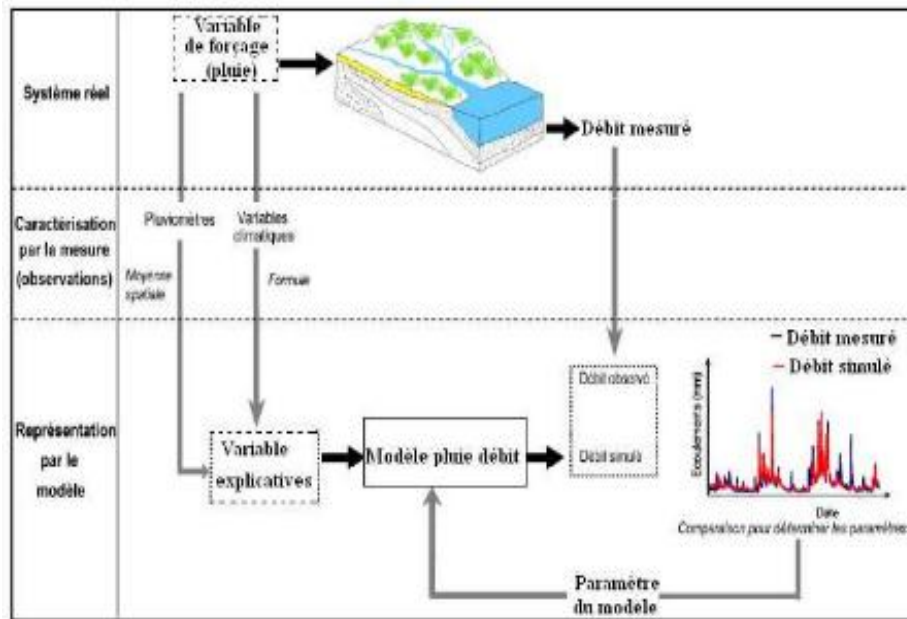


Figure 1-7: Schéma simplifié de procédure de calage des modèles hydrologiques(IRD,2009).

2.5 Optimisation en hydrologie: une problématique complexe

L'optimisation des paramètres d'un modèle pluie-débit a pour but de trouver le jeu de paramètres qui rapproche le plus possible le comportement du modèle de celui du bassin modélisé, la similitude des comportements étant quantifiée par un critère (fonction objectif) servant à l'optimisation des paramètres et mesurant ce degré de similitude. Le calage demande donc le choix à la fois d'un critère de qualité, d'une méthode pour identifier les paramètres, ainsi que de séries de données destinées à fournir l'information nécessaire au calage (**Sorooshian et Gupta, 1985**).

Cette phase de calage contribue également à compenser les erreurs internes ou imprécisions du modèle et les erreurs généralement contenues dans les données d'entrée. C'est une phase délicate, souvent d'autant plus délicate que le modèle a un nombre élevé de paramètres. Avec l'amélioration des moyens de calcul, on opte de plus en plus pour des méthodes automatiques de calage, par opposition à des techniques manuelles utilisant généralement des critères graphiques. Si ces procédures automatisées permettent généralement de gommer la subjectivité inhérente aux approches manuelles et sont souvent beaucoup plus rapides que ces dernières, elles sont en revanche confrontées à toute une série de problèmes numériques qui compliquent la phase d'optimisation.

Johnston et Pilgrim (1976) et Duan et al.(1992) ont répertorié certains de ces problèmes. Il s'agit notamment de:

- L'interdépendance entre paramètres: le changement de la valeur d'un paramètre peut être compensé par la modification d'autres paramètres, ceci entraînant des solutions équivalentes en terme de valeur du critère d'optimisation,
- La faible sensibilité de la fonction objectif à la modification de certains paramètres: d'importantes modifications de la valeur d'un paramètre n'entraînent que de faibles modifications de la fonction objectif, ce qui correspond à des régions plates de la surface de réponse,
- La présence de points de l'espace des paramètres où la fonction critère n'est pas différentiable (du fait par exemple de la présence de seuils dans le fonctionnement de certains réservoirs), et la structure non convexe de la surface de réponse, la présence d'optima locaux ou également l'existence de plusieurs zones de convergence.

Ibbitt et O'Donnell, 1971) donnent des illustrations très claires de ces problèmes au niveau des caractéristiques de la surface de réponse.

Cet ensemble de facteurs conduit souvent à une situation où l'optimum global est difficilement observable, ou même à la non-unicité d'un tel optimum (*Sorooshian et Gupta, 1983*). Sorooshian et Gupta (1985) définissent ainsi la notion d'identifiabilité des jeux de paramètres: la structure d'un modèle M paramétré par θ est globalement identifiable si et seulement si différentes valeurs de paramètres donnent lieu à différentes sorties du modèle. Compte tenu de la multitude des problèmes énoncés précédemment, cette équivalence est rarement vérifiable en modélisation hydrologique. Il devient alors vain d'essayer de trouver un quelconque optimum global, quelles que soient les performances de la méthode d'optimisation employée.

Par ailleurs, le jeu de paramètres qui caractérise le comportement du bassin devrait être une spécification intrinsèque du bassin. Le bassin réel donne en effet une réponse unique (chronique de débits) à une série de pluie indépendamment de la façon dont un observateur le perçoit. On devrait donc s'attendre à ce que les jeux de paramètres caractérisant le bassin ne varient guère si l'on change de fonction objectif, de technique d'optimisation ou de série de calage. Or, essentiellement du fait du caractère beaucoup trop approximatif du modèle et des problèmes numériques d'identifiabilité, cette indépendance n'est vérifiée pour aucun de ces points. Les paramètres obtenus restent dépendants à la fois du choix de la fonction objectif (*Sorooshian, 1981; Sefc et Boughton, 1982; Ibbitt et Hutchinson, 1984*), de la méthode d'optimisation (*Duanetal., 1992; Gan et Biftu, 1996*) ou des séries de données utilisées (*Gupta et Sorooshian, 1983; Sorooshianet al., 1983; Allred et Haan, 1991; Yapoet al., 1996*). De nombreux auteurs s'accordent donc pour dire que l'estimation des paramètres de modèles hydrologiques doit passer par une réflexion profonde sur les problèmes internes de ces modèles qui limitent l'efficacité des méthodologies de calage (*Pickup, 1977; Sorooshian, 1985; Hendricksonet al.,*

1988; Sorooshian et al., 1993; Gan et Biftu, 1996). Pickup (1977) et Gupta et Sorooshian (1983) montrent par exemple que l'étude fine des caractéristiques structurelles du modèle et la reparamétrisation judicieuse de certaines de ses composantes peuvent améliorer l'observabilité de l'optimum et la facilité de calage. Une attention particulière doit également être donnée à la qualité des séries employées pour caler les modèles. Celles-ci doivent être considérées davantage en terme de représentativité et de qualité d'information qu'en termes quantitatifs de longueur de séries de calage.

Les difficultés d'optimiser des paramètres de modèles hydrologiques cachent donc des problèmes liés à la définition, l'existence et l'identifiabilité d'un jeu optimal de paramètres pour le modèle, ceci provenant principalement de caractéristiques internes au modèle et secondairement des questions d'erreurs de données. Les qualités qui peuvent alors être exigées d'une méthode de calage semblent donc devoir se limiter à la capacité à fournir des paramètres 'conceptuellement acceptables' et stables (plutôt que d'hypothétiques optima mathématiques), le degré de 'réalisme' des paramètres ainsi identifiés pouvant être évalué par le niveau de performance du modèle au stade de la validation. Cependant, la première réponse apportée aujourd'hui aux problèmes d'optimisation a été une sophistication des méthodes de calage, bien avant une réflexion approfondie sur les remèdes à apporter aux problèmes structurels des modèles. Dans la suite, nous présentons quelques-unes de ces techniques.

2.6 Validation des modèles hydrologiques

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

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

- une approche classique de validation qui consiste à choisir aléatoirement une partie des données pour le calage des paramètres du modèle et une seconde partie pour la validation sans changement des valeurs des paramètres. C'est l'étape de validation interne qui a pour objectif d'analyser la sensibilité du modèle aux valeurs des paramètres qui le constituent.

- une approche basée sur la validation multi-critère et multi-échelle appliquée à l'ensemble du bassin. C'est l'étape de validation externe. Elle consiste à confronter les résultats du modèle à une réalité, c'est-à-dire concrètement à des données (hydrogrammes mesurés sur des stations intermédiaires, niveaux piézométriques, etc.) qui n'ont pas été utilisées pour le construire. Il importe de bien veiller à ce que la validation externe d'un modèle ne soit pas conduite sur des données qui ont servi à l'établir.

2.7 Incertitudes

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

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

III. Stratégie de comparaison des modèles hydrologiques sélectionnés

Une première étape a été la construction du cadre de comparaison. Après la sélection des modèles que nous avons exposée précédemment, chaque structure a été reprogrammée dans un environnement homogène. Un large échantillon de données a été constitué et pour chaque bassin, un découpage des enregistrements disponibles en sous-périodes a été réalisé. Nous avons ensuite choisi une procédure de calage. Un critère d'optimisation et des critères

d'évaluation ont été sélectionnés. Une procédure identique a été utilisée avec chacune des structures sélectionnées. L'évaluation a été opérée de la façon suivante. Sur notre bassin, la structure a été successivement calée sur chacune des périodes et testée en contrôle sur les périodes restantes.

1. Choix d'une démarche d'évaluation des modèles utilisés

La démarche de comparaison de modèles hydrologiques est assez complexe. Nous avons vu, dans les parties précédentes, que le modèle est construit à partir d'un objectif, sur une représentation du système réel. On est alors en droit de se demander s'il doit être jugé suivant le degré de satisfaction qu'il apporte aux questions qui sous-tendent son développement, ou suivant la fidélité de sa représentation de la réalité. Devant la complexité du système réel (le bassin versant), nous avons vu que même les modèles les plus complexes n'en sont que de subjectives et partielles imitations. Ils ne peuvent en effet prendre en compte qu'une petite partie de la réalité, celle jugée la plus pertinente dans l'explication ou la reproduction des phénomènes étudiés. Il semble donc difficile, en modélisation pluie-débit, de prendre la fidélité de représentation du bassin réel comme critère valide de comparaison. Elle n'en est pas moins souhaitable, mais reste, à l'heure actuelle, difficilement envisageable. L'adéquation entre question posée et réponse donnée par le modèle semble beaucoup plus instructive et primordiale dans l'utilisation que l'on fait du modèle. C'est avant tout suivant cet aspect que la crédibilité et l'utilité du modèle doivent être appréciées. C'est d'autant plus vrai que l'on se place dans un contexte d'hydrologie à vocation opérationnelle. Partant de ce point de vue, il faut arriver à cibler l'évaluation du modèle. Il en existe en effet plusieurs modes d'utilisation, dont les plus communs sont la simulation, la prévision ou la transposition (application aux bassins non jaugés). Le modèle peut aussi être testé en conditions stationnaires ou non. Par ailleurs, il n'existe pas d'unique critère permettant d'apprécier les performances des modèles, ces derniers étant souvent dépendants des objectifs fixés. Klemeš (1986b) a voulu systématiser l'évaluation des modèles en proposant une procédure hiérarchique, comprenant quatre types de tests:

Tableau 1-1 : synthèse des procédures de Klemeš

N°	Procédure
1	'split-sample test': séparation de la période disponible en deux sous-périodes indépendantes; calage du modèle sur la première période et test en simulation sur la deuxième; puis échange des rôles des deux sous-périodes,
2	'proxy-basin test': calage du modèle sur un bassin A et application à un bassin B; on échange ensuite le rôle des bassins A et B. Si les résultats sont satisfaisants dans les deux cas, le modèle est applicable en transposition sur un bassin C non-jaugé,

3	<i>'differential split-sample test': application du test n°1 mais avec non stationnarité des conditions (caractéristiques climatiques différentes d'une période à l'autre),</i>
4	<i>'proxy-basin differential split-sample test': application du test n°2 mais avec non-stationnarité des conditions climatiques.</i>

Cette procédure hiérarchique de Klemeš, 1986) est très exigeante (**Tab. 1-1**). Si elle paraît souhaitable et capable de mettre en évidence les qualités des modèles en les mettant à rude épreuve, elle est assez lourde à mettre en place sur un grand nombre de bassins versants.

La plupart des études comparatives existantes ont adopté le seul 'split-sample test' (avec dans certains cas le test en conditions non stationnaires, c'est-à-dire le test n°3). Nous adopterons ici une procédure identique (test n°1). Il nous semble en effet que ce test est assez robuste pour évaluer les qualités premières requises pour le modèle (souhaitables pour une grande partie des applications).

2. Limitations des comparaisons existantes

Dans la littérature, de nombreuses comparaisons des performances de modèles pluie-débit sont disponibles . Généralement, ces études rapportent plutôt les résultats de quelques modèles (**Tab.1-2**), testés sur quelques bassins versants. La revue de ces comparaisons a été faite par Michaud et Sorooshian [1994], Refsgaard et Knudsen [1996] et Perrin [2000].

Ces études ont testé différents types de modèles hydrologiques, fondés sur des approches conceptuelles, empiriques, physiques ou boîte-noire suivant une grande variété de méthodologies variant suivant :

- Le nombre, de la taille et du climat des bassins versants,
- Les représentations spatiales des bassins versants : global, semi-distribuée, distribuée,
- Les fonctionnements des modèles testés : continu ou événementiel.
- Les pas de temps testés : horaire, journalier, mensuel ou annuel,
- Les méthodes de calage, les critères de calage, les durées de calage et les stratégies d'évaluation des résultats (en calage, en validation, en suivant différents types de tests préconisés par Klemeš, 1986], etc.),
- Les critères d'évaluation des performances : critères qualitatifs ou de nombreux critères quantitatifs. Cette grande diversité de tests, effectués généralement avec peu de modèles et sur peu de bassins versants, rend l'interprétation et la synthèse de ces études assez difficile, comme le regrettent [*Perrin et al., 2001; Smith et al., 2004*]. Seules les études de quelques auteurs permettent d'avoir une vue d'ensemble des performances de plusieurs modèles sur un large échantillon de bassins versants.

Tableau 1-2 : Synthèse de quelques comparaisons de modèles pluie-débit (Gnouma, 2006)

Référence	Nombre de modèles	Type de modèle	bassin versant	Pas de temps testé	Nombre de bassins versants
Moore et Mein [1975]	3	CRR	L	J. M	4
WMO [1975]	10	CRR. 3B	L	J	2 à 6
Weeks et Hebben [1980]	5	CRR. 3B	L	J. M	3
Naef [1981]	6	CRR. 3B	L	<H	3
Loague et Freeze [1985]	3	BB. CRR. PB	L	H	3
Moussavi et Feyer [1990]	6	CRR	L	M	1
Willcox et al. [1990]	2	CRR	L	M, A	6
Franchira et Pacciani [1991]		CRR	L	M	4
Vandewiele et al. [1992]	2 à 8	CRR	L	M. A	1 à 79
Chiew et al. [1993]	6	BB. CRR	L	J.M. A	8
Makhlouf et Michel [1994]	5	CRR	L	M	81
Xu et Vandewiele [1995]	7	CRR		M	81
Refsgaard et Knudsen [1996]	3	CRR.PB.	L.D	J.M. A	3
Zhang et Lindstrom [1996]	2	CRR	L	J	2
Ye et al. [1997]	3	CRR. PB	D	J.M	3
Gan et al. [1997]	4 à 5	CRR	L	J	3
Yang et al. [2000]	3	PB.CRR.GB	D	J	1
Kokkonen et Jakeman [2001]	2	CRR	L	D	2
Perrin et al. [2001a]	19	CRR	L	D	429

Conclusion

Il s'avère que la description des processus qui entrent en jeu dans la réponse hydrologique d'un bassin versant n'est pas une tâche aussi facile, cette description demande la connaissance et la maîtrise d'une variété de facteurs et de paramètres. Des renseignements suffisants sur ces données ne sont pas toujours disponibles pour tous les bassins versants, d'où la nécessité de s'investir d'avantage dans l'étude de détermination de ces données pour développer des modèles qui représentent au mieux la réponse hydrologique du bassin versant.

CHAPITRE -2-

CRITERES D'EVALUATION DES PERFORMANCES DES MODELES PLUIE-DEBIT

Introduction

Une comparaison de modèles hydrologiques comme celle que nous voulons réaliser nécessite le choix de critères d'évaluation des performances. On peut en distinguer deux types. Les critères quantitatifs font appel à des évaluations numériques. Les critères qualitatifs, eux, s'appuient généralement sur des observations graphiques. Ces derniers critères sont largement utilisés en hydrologie (**WMO, 1975; Weeks et Hebbert, 1980; Loague et Freeze, 1985; Chiewet al., 1993; Michaud et Sorooshian, 1994; Refsgaard et Knudsen, 1996; Yeet al., 1997**) et sont, au cas par cas, des outils d'analyse appréciables pour juger de la qualité de simulation d'un modèle. Ils demeurent néanmoins des estimateurs subjectifs. Houghton-Carr (1999) montre notamment que deux personnes peuvent porter sur des mêmes illustrations graphiques (des hydrogrammes ou des courbes de débits classés par exemple) des jugements différents, attribuant aux modèles testés des valeurs relatives différentes. Il paraît donc difficile de faire reposer l'évaluation des performances de modèles uniquement sur de tels critères. Les critères quantitatifs ont donc été privilégiés dans notre travail comparatif. Certains auteurs, notamment Weglarczyk (1998), ont souligné qu'il n'existe pas de critère d'évaluation universel permettant de juger de la qualité d'un ajustement d'un modèle hydrologique. Ceci provient notamment du fait que les gammes de variation des événements hydrologiques sur un bassin sont souvent assez étendues (les débits pouvant varier typiquement d'un rapport de 1 à 100) et que chaque classe de débits ne présente pas le même intérêt pour l'utilisateur du modèle. Au même titre que le choix de la forme d'une fonction objectif pour le calage du modèle, celui de critères quantitatifs d'évaluation reste lié aux objectifs de l'utilisateur (prévision des crues, simulation des étiages, gestion de la ressource en eau, etc.).

L'évaluation du modèle demeure donc une opération partielle lorsqu'un seul critère d'appréciation est utilisé (**Diskin et Simon, 1977; Sefe et Boughton, 1982**). En mettant l'accent sur une caractéristique spécifique des hydrogrammes, il est alors difficile d'avoir un jugement global de la qualité des simulations (**WMO, 1975; 1986**).

1. Protocole d'évaluation des modèles hydrologiques

1.1 Objectifs d'évaluation des modèles hydrologiques :

La confiance que l'on peut accorder aux projections hydrologiques qui seront faites à l'horizon 2030 dépend en partie de la capacité des modèles hydrologiques à reproduire correctement le comportement hydrologique des bassins versants dans les conditions actuelles. Dans le cadre du projet, plusieurs modèles seront testés, ce qui permettra d'avoir une évaluation des incertitudes liées à l'approche de modélisation hydrologique choisie. Pour atteindre cet objectif, il semble intéressant de pouvoir évaluer les modèles dans des conditions permettant la comparaison objective de leur efficacité. Cette démarche présente donc un protocole objectif d'évaluation et de comparaison des différents modèles qui seront testés dans le cadre de ce travail.

1.2 Définitions et terminologie :

Dans la suite, on désignera par :

- **modèle hydrologique ou modèle pluie-débit** : l'ensemble des équations permettant à partir d'entrées météorologiques (pluie, évapotranspiration potentielle (ETP), température...) de simuler un débit à l'exutoire. Les modèles pourront être globaux, semi-distribués ou distribués. Ici, le pas de temps de fonctionnement sera journalier.
- **Simulation** : le calcul d'un débit à partir des entrées du modèle
- **Calage du modèle** : phase au cours de laquelle on détermine les paramètres du modèle sur la base des informations disponibles (séries hydrométéorologiques). Cette phase peut faire intervenir calage automatique et/ou manuel. Elle repose sur l'optimisation d'une ou plusieurs fonctions objectifs numériques et éventuellement de critères graphiques.
- **contrôle du modèle** : phase au cours de laquelle on évalue le modèle avec des données différentes de celles utilisées en calage, en utilisant les paramètres déterminés en phase de calage. Les périodes de calage et de contrôle doivent être indépendantes. On préférera le terme contrôle à celui de validation qui est plus ambitieux. Les performances du modèle obtenues en contrôle sont jugées plus représentatives des réelles capacités du modèle que les performances en calage, souvent trop optimistes. C'est donc sur les performances en contrôle que portera l'essentiel des analyses.
- **Période de mise en route** : période de simulation en début de période test (calage ou contrôle) au cours de laquelle les erreurs du modèle ne sont pas prises en compte

Dans le calcul des critères d'évaluation. Cette période permet de limiter les erreurs du modèle dues à la méconnaissance des conditions initiales. Les erreurs du modèle n'étant pas calculées en phase de mise en route, il n'est pas nécessaire de disposer de données de débit sur cette période.

1.3 Protocole de test des modèles hydrologiques

Nous adopterons ici la procédure du "**split sample test**" proposée par Klemesš (1986) pour le test des modèles hydrologiques. Il s'agit d'un test en calages-contrôles sur périodes indépendantes. La série totale disponible est divisée en deux périodes, P1 et P2. Le test consiste à réaliser :

- un calage du modèle sur la période P1 puis un contrôle sur la période P2 ;

Le modèle sera jugé acceptable sur le bassin si les résultats en contrôle sont acceptables au regard des critères d'évaluation utilisés. L'intérêt de cette procédure est qu'elle permet d'avoir une évaluation du modèle en contrôle sur l'ensemble des données disponibles.

2. Procédure de calage et sélection de critères d'évaluation des modèles hydrologiques

Dans notre travail, nous nous sommes ramenés à des critères numériques faisant appel à trois types de prise en compte de l'erreur du modèle :

- L'erreur quadratique,
- L'erreur absolue
- L'erreur cumulée.

Nous proposons ici une première sélection de trois critères faisant appel respectivement à ces trois erreurs.

2.1 Critère d'erreur quadratique

Les critères mesurent le degré d'adéquation entre les valeurs de la variable simulée par le modèle (ici le débit) et de la variable mesurée. Les critères en moindres carrés se basent sur une fonction suggérée par la régression linéaire (**Nash et Sutcliffe, 1970**), somme des erreurs quadratiques du modèle définie par:

$$F^2 = \sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{calc,i})^2 \quad (1)$$

où $Q_{obs,i}$ et $Q_{calc,i}$ sont respectivement les débits observé et simulé au pas de temps i , et n le nombre total de pas de temps de la période d'étude. F^2 est analogue à la variance résiduelle d'une régression linéaire. Il est cependant difficile en utilisant F^2 , de pouvoir comparer les performances du modèle d'une période à l'autre ou d'un bassin à l'autre, la valeur de cette fonction étant généralement d'autant plus élevée que le niveau des débits est fort (les erreurs absolues étant en moyenne plus élevées). Nash et Sutcliffe (1970) proposent donc de normer la fonction en effectuant une comparaison de F^2 avec ce même critère appliqué à un modèle élémentaire. Ils ont pris comme modèle $Q = cste$ et ont calé ce modèle élémentaire, ce qui donne $cste = Q_{obs}$, la moyenne des débits observés. Pour ce modèle élémentaire, utilisé comme référence³, la fonction F^2 devient F_0^2 définie par:

$$F_0^2 = \sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \overline{Q_{obs}})^2 \quad (2)$$

Ce qui correspond à la variance des débits observés. Nash et Sutcliffe (1970) construisent ainsi un critère d'efficacité R défini comme la proportion de la variance initiale des débits expliquée par le modèle. Il est défini par:

$$R = \frac{1 - F^2}{F_0^2} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{calc,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \overline{Q_{obs}})^2} \quad (3)$$

Ce critère (que nous appellerons critère de Nash-Sutcliffe ou critère de Nash), variant dans l'intervalle $]-\infty;1]$ a l'avantage d'être d'interprétation facile. Il estime l'amélioration d'ajustement que l'on obtient en utilisant le modèle pour simuler les débits par rapport à un modèle 'zéro' (modèle de référence) qui donnerait sur toute la période considérée un débit constant égal au débit moyen. Un critère de valeur 1 signifie que l'erreur du modèle est nulle (modèle parfait). Une valeur de R inférieure à zéro signifie que le modèle n'explique pas mieux le comportement du bassin que le modèle de débit constant. Ce critère d'évaluation des modèles est très largement utilisé en hydrologie, probablement en raison de sa simplicité et de son lien intrinsèque avec la régression linéaire. Le rapport F/F_0 , que l'on peut désigner par ε , correspond en fait à l'erreur relative moyenne du modèle. Le critère de Nash est alors donné par $1-\varepsilon^2$. Lorsque ε vaut 0,2 par exemple, ceci signifie que l'erreur quadratique moyenne correspond à 20 % de l'écart-type des débits observés. Dans ce cas, le critère de Nash vaut 96 %. De même, pour une erreur relative de 40 %, le critère de Nash vaut encore 84 %. Ces valeurs élevées du critère pour des valeurs assez élevées de l'erreur relative donnent en fait une idée un peu optimiste de la qualité réelle du modèle. L'association abusive que l'on peut faire du critère de Nash à un coefficient de détermination tend à faire croire que le modèle est bon alors que ce n'est pas vraiment le cas. Une image plus réaliste de la qualité du modèle pourrait être donnée en prenant la racine carrée du critère. Il faut noter toutefois que les mesures en milieu naturel conduisent, par leur seule présence, à un ε de l'ordre de 0,2. Obtenir pour la transformation pluie-débit une erreur relative du même ordre de grandeur confirme bien que la qualité du modèle est très élevée. Ici nous nous en tiendrons à la formulation du critère de Nash classiquement adoptée en hydrologie.

2.2 Critère d'erreur absolue

L'erreur moyenne absolue d'un modèle peut être définie par :

$$A = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Q_{obs,i} - Q_{calc,i}| \quad (4)$$

Cette erreur représente la déviation absolue du débit simulé par rapport à l'observé en moyenne à chaque pas de temps. Ce critère peut être intéressant dans le contexte de la prévision de débit, où l'on veut être aussi proche que possible de la valeur observée à chaque pas de temps. L'avantage de cette erreur par rapport à l'erreur quadratique est qu'elle n'accorde pas un poids proportionnellement plus important aux fortes erreurs. A l'instar de l'erreur quadratique définie à l'Eq. (1), A n'est cependant pas normée et ne permet pas une comparaison aisée des performances du modèle d'une période à l'autre ou d'un bassin à l'autre. Pour cette raison, nous pouvons utiliser une forme équivalente à la forme du critère de Nash, définie par :

$$AD = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |Q_{obs,i} - Q_{calc,i}|}{\sum_{i=1}^n |Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs}|} \quad (5)$$

AD est un critère relatif. Il varie ainsi également entre $]-\infty;1]$ et permet de réaliser des moyennes sur les performances des modèles sur un échantillon de bassins. En fait, le critère de Nash et le critère AD pourraient être rapprochés de la forme plus générale d'une norme N donnée par :

$$N = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n |Q_{obs,i} - Q_{calc,i}|^m}{\sum_{i=1}^n |Q_{obs,i} - \overline{Q_{obs}}|^m} \right]^{1/m} \quad (6)$$

où m est un exposant entier. A est la norme d'ordre 1 et le critère de Nash est fondé sur la norme d'ordre 2. Lorsque m devient très grand, on retrouve la norme de Tchebychev représentée par le rapport des écarts maximaux.

2.3 Critère d'erreur cumulée

L'erreur moyenne cumulée EC d'un modèle peut être définie par :

$$EC = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{calc,i}) = \overline{Q_{obs,i}} - \overline{Q_{calc,i}} \quad (7)$$

Elle indique, par comparaison des débits moyens observés et calculés, la capacité du modèle à reproduire le volume d'eau total observé sur la période étudiée. Egalement appelée erreur de bilan ou biais du modèle, cette erreur peut être positive ou négative suivant que le modèle surestime ou sous-estime les flux sur la période. A la différence des deux erreurs précédentes, celle-ci ne fait plus référence à une adéquation temporelle à chaque pas de temps entre le débit calculé et le débit observé (de la même façon que certains critères graphiques tels que la courbe des débits classés éludent cette référence temporelle). Elle ne peut donc être utilisée comme seul critère d'optimisation, un débit constant égal au débit moyen donnant un critère parfait. Cette erreur peut aussi être écrite sous forme relative, par :

$$B = \frac{\sum_{i=1}^n Q_{calc,i}}{\sum_{i=1}^n Q_{obs,i}} \quad (8)$$

Ou par

$$B' = \frac{\sum_{i=1}^n Q_{calc,i}}{\sum_{i=1}^n Q_{obs,i}} - 1 \quad (9)$$

Une valeur de 1 pour B ou 0 pour B' indiquera un bilan parfait. Une valeur supérieure à 1 pour B ou supérieure à 0 pour B' indiquera une surestimation du bilan. Ce critère permet de comparer les performances du modèle d'un bassin à l'autre ou d'une période à l'autre. Cependant, cette formulation présente quelques inconvénients que nous détaillerons dans la suite de ce chapitre. Remarquons que s'il ne peut être utilisé seul en optimisation, certains auteurs comme Lindström et al. (1997) et Quesney (1999) ont en revanche utilisé ce critère combiné au critère de Nash. Cette pondération, opération rendue possible par le fait que les critères sont adimensionnels,

permet d'attribuer un poids plus important à la bonne simulation des bilans lors de l'optimisation, sans pour autant revêtir un sens physique particulier.

Un des avantages des trois critères R, AD et B (ou B') réside dans le fait que l'on obtient une appréciation globale de la performance du modèle sur l'ensemble de la période. D'autres critères s'intéressent à des classes particulières de débit,

2.4 Fonction objectif et critères d'évaluation

Les critères globaux d'appréciation des performances des modèles de simulation des débits diffèrent sur trois points essentiels: la forme analytique de l'erreur (quadratique, absolue, cumulée...), la forme de la variable cible (transformée ou non) et le choix d'un modèle de référence (pour avoir une mesure relative).

2.4.1 Fonction objectif

Le critère de Nash et Sutcliffe (1970) est couramment employé en hydrologie comme fonction objectif. Il est basé sur la somme des erreurs quadratiques et sa formule est la suivante :

$$NASH = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{calc,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \overline{Q_{obs}})^2} \quad (10)$$

$Q_{obs,i}$: Débits observés au pas de temps i ,

$Q_{calc,i}$: Débits simulés au pas de temps i ,

$\overline{Q_{obs}}$: Moyenne des débits observés sur la période,

n : Nombre total de pas de temps de la période d'étude.

Néanmoins, ce critère a tendance à donner une grande importance aux écarts entre les débits de crue simulés et observés. Aussi, il est nécessaire de ne pas se limiter à l'étude de cette fonction objectif si l'on souhaite travailler à la fois sur des périodes de crues et d'étiages. Or, dans le cadre de ce projet, nous nous intéressons justement aux crues et aux étiages, il nous a donc semblé cohérent de retenir, comme fonction objectif, le critère de Nash-Sutcliffe calculé sur les racines carrées des débits. Ce critère est assez général et donne un poids similaire à la simulation des débits de crues et d'étiages :

$$NASH(\sqrt{Q}) = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\sqrt{Q_{obs,i}} - \sqrt{Q_{calc,i}})^2}{\sum_{i=1}^n (\sqrt{Q_{obs,i}} - \sqrt{\overline{Q_{obs}}})^2} \quad (11)$$

Plusieurs critères ont été retenus afin d'apprécier les capacités du modèle à reproduire le comportement des sous-bassins versants : En plus des critères de Nash-Sutcliffe calculés sur les débits et sur les racines des débits définis dans le paragraphe précédent, nous avons choisi d'utiliser le critère de Nash-Sutcliffe basé sur les logarithmes des débits. Ce dernier donne plus d'importance aux étiages, ce qui le rend intéressant dans l'évaluation des performances du modèle. Il est calculé selon la formule

$$NASH(\ln(Q)) = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\ln(Q_{obs,i} + \varepsilon) - \ln(Q_{calc,i} + \varepsilon))^2}{\sum_{i=1}^n (\ln(Q_{obs,i} + \varepsilon) - \ln(\overline{Q_{obs}} + \varepsilon))^2} \quad (12)$$

Avec $\varepsilon = \overline{Q_{obs}}/40$ pris au cas où il existerait un débit nul.

D'autre part, pour faciliter l'interprétation des résultats obtenus sur un grand nombre de bassins (Test en extrapolation), quatre autres critères d'évaluation ont été calculés. Trois d'entre eux dérivent de la formule de Nash et permettent de limiter l'impact des valeurs de critères de Nash fortement négatives dans le calcul de la moyenne. La formule générale pour calculer les C2M est donnée par :

$$C2M = \frac{NASH}{2 - NASH} \quad (13)$$

Ces critères varient entre -1 et 1.

Pour borner le critère NSE et garder la valeur 0 comme une valeur de référence, (**Mathevet , 2005**), (Fig.2-1), a proposé la formule suivante qu'il a nommé **C2M**.

La relation entre NSE et C2M est donnée par le graphique suivant :

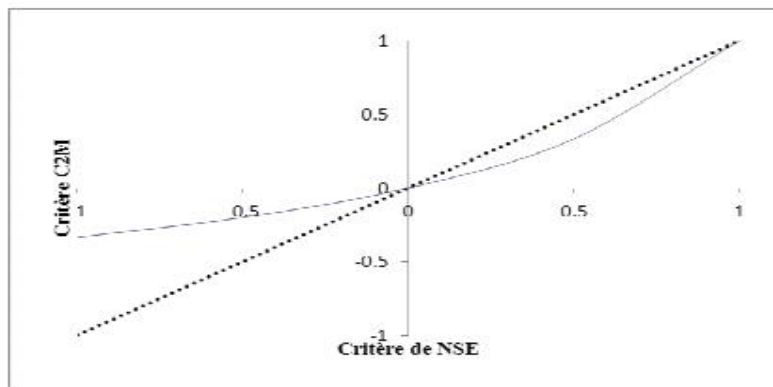


Figure 2-1 : Relation entre le critère NSE et le critère C2M(Mathevet, 2005)

L'intérêt de C2M est multiple :

- Le domaine de variation est compris entre -1 et 1 ;
- Le signe et le zéro du C2M coïncident avec le signe et le zéro du critère de NSE ;
- Dans sa partie positive, le critère de C2M est sensiblement inférieur au critère de NSE,

Ce critère donne ainsi une image moins bonne, de la qualité de simulation de modèle que le critère de NSE. Cela va dans le sens de point de vue de Garrick et al. (1978), qui faisaient remarquer que les valeurs du critère de NSE étaient généralement trop fortes. Le fait que le C2M soit borné (Contrairement au NSE) permet d'envisager plus sereinement l'utilisation des valeurs moyenne obtenues sur plusieurs bassins. Par la suite nous utiliserons la valeur moyenne de C2M

sur l'ensemble de l'échantillon, ainsi que la valeur médiane de NSE pour rendre compte de l'efficacité des différentes techniques de régionalisation envisagées.

Le quatrième critère d'évaluation est un critère de bilan. Il correspond au rapport des volumes annuels simulés et calculés. Une formulation variant sur le même intervalle que le critère de Nash $(]-\infty;1])$ a été utilisée:

$$NASH = 1 - \left| \frac{\sum_{i=1}^n Q_{calc,i}}{\sum_{i=1}^n Q_{obs,i}} - \frac{\sum_{i=1}^n Q_{obs,i}}{\sum_{i=1}^n Q_{calc,i}} \right| \quad (14)$$

2.4.2 Méthode d'évaluation des modèles

Pour l'interprétation des résultats, les critères classiques d'évaluation des performances ont été calculés. D'autre part, afin de mieux caractériser les performances du modèle, il nous avons aussi calculé des critères spécifiques aux hautes ou basses eaux. Ces indices CRUEM, VCRUE, ETIAM VETIAM mettent en évidence les capacités du modèle à représenter des événements extrêmes. Ils nécessitent la détermination d'un seuil de crue et d'étiage et sont calculés de la façon suivante :

2.4.2.1 Critères associés aux périodes de crue :

CRUEM est un critère qui permet d'évaluer la restitution des crues annuelles moyennes. Le critère VCRUE permet quant à lui d'évaluer les capacités du modèle à restituer les volumes en crue.

$$CRUEM = 1 - \left| 1 - \frac{\sum_{i=1}^n Q_j^{mensuel}}{\sum_{i=1}^n Q_j^{mensuel}} \right|_{sim} \quad VCRUE = 1 - \left| 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim} > Q_{crue})}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} > Q_{crue})} \right| \quad (15)$$

2.4.2.2 Critères associés aux périodes de basses eaux :

Le critère ETIAM évalue le rapport des étiages moyens. Il est complété par le critère VETIAM qui correspond au rapport des déficits de volume d'étiage.

$$ETIAM = 1 - \left| 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{j,mensuel}^{sim} < Q_{etiage})}{\sum_{i=1}^n (Q_{j,mensuel}^{obs} < Q_{etiage})} \right| \quad VETIAM = 1 - \left| 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim} < Q_{etiage})}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} < Q_{etiage})} \right| \quad (18)$$

Les seuils de crue et d'étiage sont définis comme les quantiles 0.9 et 0.1 de la courbe des débits classés sur la période d'évaluation. Pour évaluer les performances du modèle, une procédure de calage-contrôle (Klemeš, 1986) a été appliquée : la chronique de débit est scindée en deux

périodes de même longueur. La première période permet le calage du modèle avant son contrôle sur la seconde période.

2.4.2.3 Critères de performance avec des Illustrations graphiques :

Les graphiques synthétiques suivants seront utilisés pour illustrer les performances des modèles hydrologiques utilisées :

- Comparaison des débits observés et simulés, en m³/s, en utilisant une échelle logarithmique pour mieux mettre en évidence la restitution des débits d'étiage ;
- Comparaison des courbes des débits mensuels moyens observés et simulés, en m³/s ;
- Comparaison des courbes de débits classés observés et simulés. Pour la représentation on utilisera une fréquence expérimentale F au non dépassement donnée par :

$$F = \frac{i - 0.3}{n + 0.4} \quad (19)$$

où i est le rang de la valeur classée et n le nombre totale de valeurs. On tracera ensuite les valeurs de débit (en m³/s, échelle log) en fonction de la variable de Gumbel $-\ln(-\ln(F))$.

Ces graphiques seront réalisés pour les deux tests en contrôle. Que ce soit pour les critères numériques ou graphiques, ne sont pris en compte que les pas de temps où les débits observés ne sont pas en lacune.

2.5 Analyse et proposition d'une nouvelle formulation

2.5.1 Quelques réflexions sur le critère de Nash-Sutcliffe

Les critères en moindres carrés sont parmi les plus utilisés en modélisation pluie-débit. Certains ont fait l'objet de critiques contestant leur applicabilité au contexte hydrologique. Par exemple Willmott (1981) remet en cause l'utilisation du coefficient de corrélation: des variables observées et simulées peuvent être parfaitement corrélées, mais avec une surestimation systématique des sorties modélisées par exemple. Nous allons dans cette partie examiner un peu plus en détail le critère en moindres carrés que nous avons choisi, le critère de Nash-Sutcliffe. S'il est très utilisé en modélisation, ce critère a cependant fait l'objet de réflexions soulignant dans certains cas des faiblesses dans sa pertinence.

Martinec et Rango (1989), à la suite de l'intercomparaison de modèles réalisée par l'Organisation Mondiale de la Météorologie (**WMO, 1986**), ont montré que le choix du débit moyen de la période étudiée comme modèle de référence n'est pas toujours adapté pour évaluer la qualité d'un ajustement, notamment pour les périodes de comportement extrême (périodes beaucoup plus sèches ou plus humides qu'en moyenne). Dans ces cas, le module interannuel des débits peut être préféré.

2.5.2 Objectifs de la mise au point d'un nouveau critère

L'objectif principal sous-tendant la recherche d'une nouvelle formulation d'un critère est de trouver un critère pour lequel il y aurait peu de valeurs négatives, et en tout état de cause pas de valeurs très grandes en valeur absolue, car cette détérioration du critère ne correspond à rien de réel. Par ailleurs, elle peut biaiser les moyennes calculées sur plusieurs bassins, particulièrement importantes dans notre étude comparative pour avoir une appréciation d'ensemble des performances des modèles. Il serait donc intéressant d'avoir un critère qui prenne moins facilement des valeurs très négatives et qui permette ainsi d'assurer une bonne significativité des moyennes calculées sur plusieurs tests adaptés dans un contexte aride et semi-aride similaire à notre bassin test.

Pour parvenir à proposer une solution satisfaisante à la question soulevée précédemment, nous pouvons tout d'abord essayer de répondre à la question suivante: quel doit être la qualité requise essentielle d'un critère destiné à évaluer les performances d'un modèle de simulation des débits ? La qualité essentielle est de pouvoir rendre compte de la similitude entre hydrogrammes observés et simulés. Cela est rendu possible grâce à l'utilisation de l'erreur du modèle (absolue ou quadratique) vue aux paragraphes précédents. Pour rendre cette erreur interprétable, il faut choisir un modèle de référence (hypothèse 'zéro').

Ce dernier est construit, comme les modèles pluie-débit étudiés, à partir de fonctions agissant d'une part sur le rendement (calcul des volumes écoulés), et d'autre part sur le transfert (distribution dans le temps de ces volumes). C'est l'association de ces deux composantes qui permet au modèle de simuler les débits, le degré de satisfaction étant fonction à la fois de la qualité du module de rendement et de celle du module de routage. Une deuxième qualité du critère d'évaluation serait donc d'utiliser un modèle de référence qui traite de façon assez homogène ces deux fonctions dans le degré de vraisemblance qu'il leur accorde.

a. Critère limitant la grande variance de la pluie journalière :

Pour limiter les effets de la grande variance de la pluie journalière, on peut choisir d'utiliser comme opérateur de routage non pas l'opérateur 'instantané' mais l'opérateur 'infini'. Le critère ainsi construit s'écrit:

$$1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{calc,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \alpha \bar{P})^2} \right)^{\beta} \quad (20)$$

Où P est la pluie moyenne sur la période considérée. Cette solution donne de bons résultats en référence aux objectifs que nous nous sommes fixés. L'utilisation d'une valeur de α différente de 1 est néanmoins nécessaire. Plusieurs couples de valeurs de (α, β) donnent des résultats assez proches, dont les plus satisfaisants sont obtenus avec $(1/6, 5/6)$, $(1/5, 4/5)$, $(1/4, 3/4)$ ou $(1/3, 2/3)$. Assez curieusement, pour ces couples de valeurs, α et β semblent liés par la relation $\beta = 1 - \alpha$.

b. Critère ajustant l'opérateur de transfert :

Pour ce critère, nous avons adopté la même attitude que précédemment critère (changement d'opérateur de transfert), à partir cette fois de l'opérateur de rendement $\max(0, P - ETP)$ du critère 4. Ce sixième critère proposé est de la forme :

$$1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{calc,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \alpha \cdot \max(0, P - E))^2} \right)^\beta \quad (21)$$

où max est la moyenne des pluies journalières après neutralisation par l'ETP sur la période considérée. Les résultats trouvés ici sont proches de ceux du critère précédent (en prenant des valeurs de α légèrement plus élevées), pour la même raison que les résultats du critère 4 étaient proches de ceux du critère 1.

c. Coefficient de détermination :

La décomposition de la variabilité de Y (SCT) en variabilité expliquée par le modèle (SCE) et variabilité résiduelle (SCR) reste valable. Nous pouvons construire une version du tableau d'analyse de variance qui tient compte des valeurs des degrés de liberté.

La part de variance de Y expliquée par le modèle est toujours traduit par le coefficient de détermination :

$$\boxed{R^2 = \frac{SCE}{SCT} = 1 - \frac{SCR}{SCT}} \quad (22)$$

Bien évidemment ($0 \leq R^2 \leq 1$), plus il tend vers 1 meilleur sera le modèle. Lorsqu'il est proche de 0, cela veut dire que les exogènes X_i n'expliquent en rien les valeurs prises par Y. Nous retiendrons cette idée dans le test de significativité globale du modèle.

Conclusion :

Dans le cadre de ce travail, Plusieurs critères ont été retenus afin d'apprécier les capacités des modèles à reproduire le comportement hydrologique des sous-bassins versants : En plus des critères de Nash-Sutcliffe calculés sur les débits définis dans le paragraphe précédent, nous avons choisi de mettre en place un protocole de test type regroupant plusieurs critères de performance de différents concepts pour pouvoir juger et comparer entre les différents modèles hydrologiques.

2^{ème} PARTIE : *PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE ET MISE EN ŒUVRE DES MODELES HYDROLOGIQUES SUR LE BASSIN D'ISSEN*

« Cette partie présente les principales caractéristiques et enjeux de la zone d'étude (bassin d'Issen) en précisant ses différentes propriétés en termes de géographie, morphométrie, géomorphologie, géologie, climat et ressources en eau .

Ensuite cette partie révèle la mise en œuvre des modèles hydrologiques (SWAT, HEC HMS, GR4J et ATHYS) avec les différentes étapes de calage et de validation de ces modèles, ainsi que l'analyse de sensibilité et des incertitudes des modèles.

Cependant, l'objectif de cette partie est la modélisation du bassin versant à travers quatre modèles hydrologiques sous différentes approches de modélisation pour évaluer la pertinence de ces quatre modèles hydrologiques utilisés dans un contexte spécifique aride pour la simulation du débit et aussi pour mieux comprendre les processus hydrologiques intermédiaires »

.

CHAPITRE -1-

PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

Introduction :

Le bassin de Souss Massa présente une grande contrainte, qui pourrait être un facteur limitant si non un frein de son développement c'est la disponibilité des ressources en eau. En effet le bassin hydraulique du Souss-Massa est l'un des bassins du Maroc où le problème de l'eau se fait sentir avec le plus d'acuité : les besoins en eau sont en constante hausse sous la pression des demandes en eau potable et industrielle et en eau agricole.

La région de Souss connaît depuis le milieu des années 70 une succession des épisodes de sécheresse de plus en plus sévères. La conjugaison des effets de ces sécheresses et la multiplication des pompages imposés par le développement agricole dans la région, se sont traduites par une surexploitation intense des ressources en eau souterraine. A ce rythme, le développement de la région risque d'être compromis.

Pour faire face à cette situation, qui présente de réels dangers pour la pérennité des investissements déjà réalisés et hypothèque le développement futur de toute la région, un certain nombre des mesures sont prévus. En plus de ces mesures d'autres dispositions doivent impérativement être prises pour réduire la pression sur les ressources en eau souterraine.

La gestion de l'eau s'avère donc d'une importance capitale dans le développement de l'occupation du territoire. Nous nous sommes intéressés au problème d'inondation qui constitue une des catastrophes naturelles qui touchent le plus le Maroc et particulièrement la région du sud-ouest.

1. Présentation du bassin de la zone d'étude

Le bassin de Souss dont le bassin d'Issen fait partie est situé entre l'Océan Atlantique et les montagnes du Haut Atlas et de l'Anti Atlas (**Fig. 3-1**). Ce bassin a une superficie de 16200 Km² répartie approximativement entre 25 % de zones de plaine et 75 % de zones de montagne.

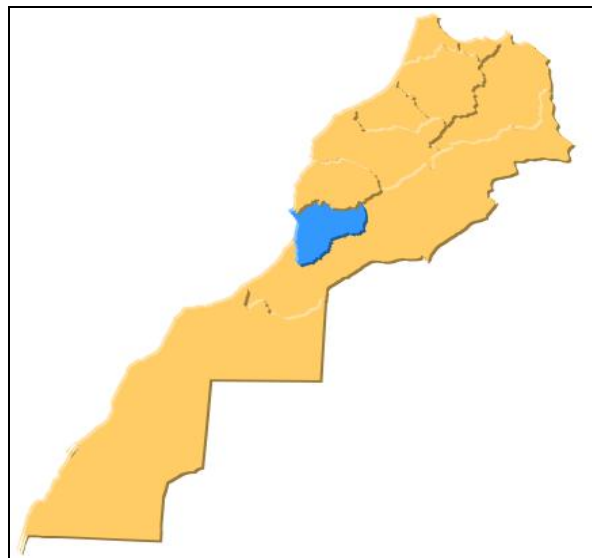


Figure 3-1: Localisation du bassin de SOUSS. (PDAIRE, 2006)

Le bassin de Souss couvre une superficie totale de 16200 Km², ce bassin est le plus arrosé de la région avec environ 45 oueds principaux qui en couvrent la presque totalité. Le cours d'eau principal est l'oued Souss qui prend naissance dans les hauteurs du Haut Atlas et se jette dans l'océan atlantique au Sud de la ville d'Agadir.

Le régime hydrologique du bassin de Souss est caractérisé par une forte irrégularité saisonnière et interannuelle. Le maximum des apports intervient pendant les mois de Janvier, Février et Mars et le minimum est observé en Aout.

Le bassin de souss renferme plusieurs sous bassins dont celui qui fait l'objet de notre étude « oued Issen » et ou se situe les stations d'Aguenza et d'Amsoul qui nous intéressent plus précisément.

1.1 Situation et présentation géographique de l'oued ISSEN :

Le bassin versant de l'oued Issen en amont du barrage Abdelmoumen, se situe dans la zone montagneuse semi-aride du Haut Atlas occidental, entre les parallèles 30°20' et 31°N, et entre le méridien 8°50'W et l'océan Atlantique. Il est limité à l'Est par le bassin mésozoïque d'Erguitta (région de Mentaga), et au Nord par la partie septentrionale de la dépression dite d'Argana. Au Sud, la limite géographique correspond à l'oued Souss (**Fig. 3-2**).

L'oued Issen, également dénommé Assif n'Ait Moussa en montagne, constitue le plus important affluent atlasique de la rive droite de l'oued Souss. Il est clairement individualisé grâce notamment à sa superficie importante et au grand nombre d'affluents qu'il reçoit. Il s'étend sur une vaste dépression creusée en très grande partie dans les formations gréseuses et argileuses permo-triasiques du couloir d'Argana. Sa vallée ne reçoit pas d'affluents importants sur sa rive droite, cependant les affluents de la rive gauche sont plus nombreux : l'assif n'Ait Bkhar, n'Ait Chaib, n'Ait Tounet, et assif n'Ait Driss.

Plus à l'aval, l'oued Issen est limité par les formations gréseuses des jbel Askal et l'Adrar-Tkhinkine entre lesquels il s'insinue pour traverser ensuite des crêtes rocheuses par des gorges profondes.

Avant son débouché en plaine, l'oued Issen reçoit encore quelques petits influents tel l'oued Taioukht sur la rive gauche, et l'assif Boulbaz qui traverse les grés et argiles salifères permo-triasiques sur la rive droite.

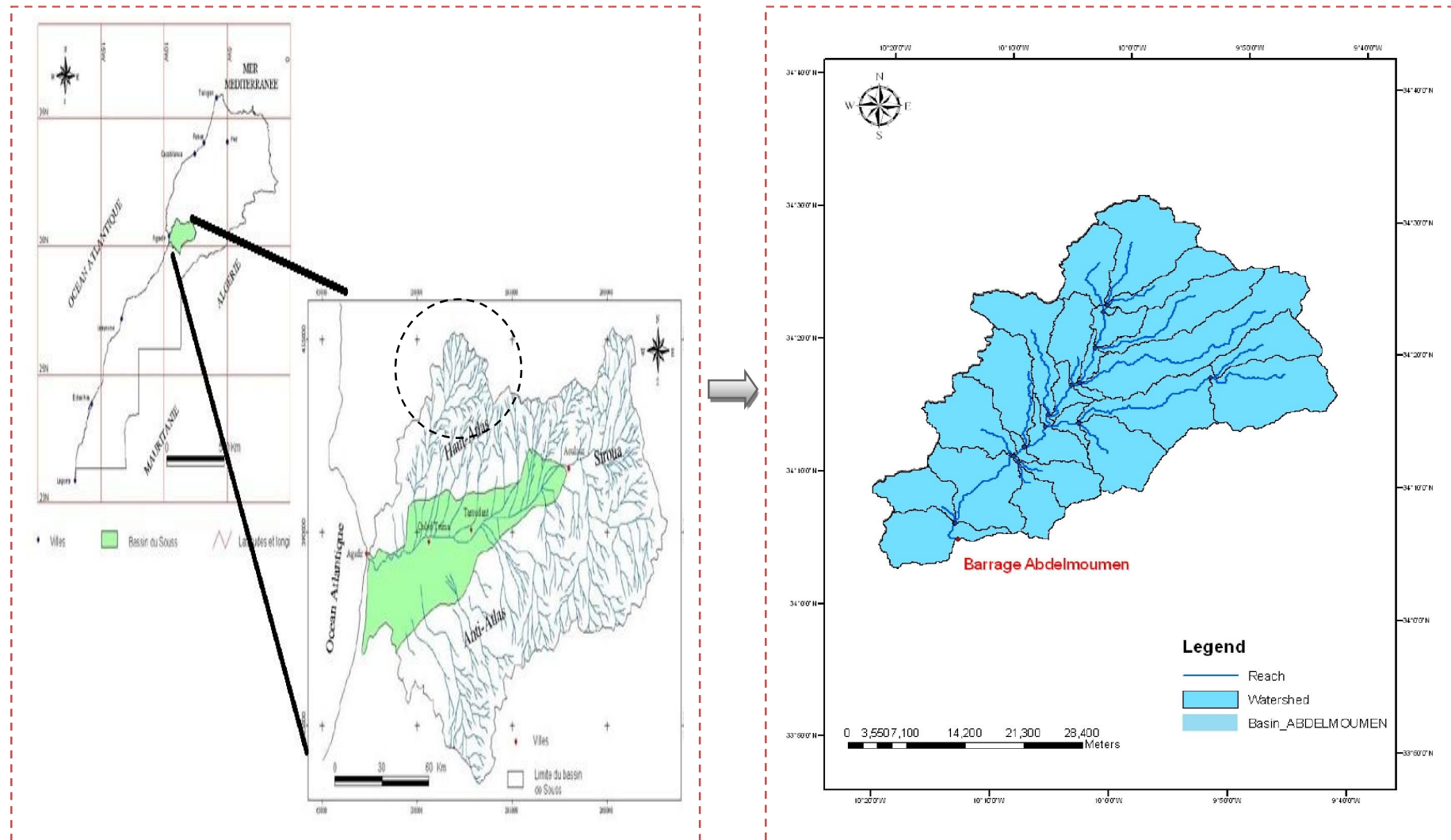


Figure 3-2: Situation géographique du bassin d'Issen

1.2 Contexte géologique du bassin

De nombreux travaux ont été consacrés à l'histoire géologique du Haut Atlas occidental, et de la plaine de Souss. Les premières investigations dans ce domaine remontent au début du 20^e siècle entre 1902 et 1921 avec Brives (1902), Gentil (1915), Kilian (1917) et Lemoine (1920). L'ensemble de ces auteurs s'est intéressé surtout à la géologie descriptive ou monographique du Haut Atlas. En 1930, Roché a présenté une étude détaillée dans laquelle il a apporté les éléments de base concernant la stratigraphie des étages Crétacés. Mais c'est Ambroggi en 1963 qui a fait une étude stratigraphique et paléontologique qui reste jusqu'à nos jours une référence de base pour toutes les études ultérieures dans ce domaine.

La figure ci après (**Fig. 3-3**) présente une géologie générale de la région de souss. L'ensemble du bassin versant de l'oued Issen présente une géologie formée par les successions suivantes :

- L'étage le plus récent formé de calcaires dolomitiques et grés fins formant les terrains les plus résistants à l'érosion. Cette caractéristique est d'ailleurs illustrée par une jonction brutale souvent sous forme de cascade ou de falaise entre ces calcaires et de terrains sous jacents très friables.
- Les argiles du Permo-Trias, de véritables régosols, avec un taux de salinité souvent élevé dans les cuvettes et au niveau des sources. Ces argiles ont un pouvoir de dispersion qui accentue le phénomène d'érosion. Il s'agit de la caractéristique essentielle de ce bassin. Ces argiles imperméables font que des sources apparaissent à leur contact avec les calcaires.
- A l'étage inférieur, apparaissent bien à l'aval du barrage Abdelmoumen, les roches du secondaire et du primaire (Silurien et Dévonien) gré et schistes et argiles.

L'étude des directions des structures plissées et des grandes failles montre des orientations variables : NW-SE, E-W, et NE-SW. Cependant, la direction de grande perméabilité (sens d'écoulement des eaux dans les aquifères) des formations Haut-Atlasique est NE-SW. La faille de l'oued Issen est de direction N70, elle met en contact les schistes paléozoïques au Nord avec les argiles du compartiment Sud. Vers l'Ouest elle se divise en plusieurs accidents successifs, tandis que vers l'Est elle se prolonge dans le paléozoïque rejoignant ainsi l'accident de Tizit n'Test.

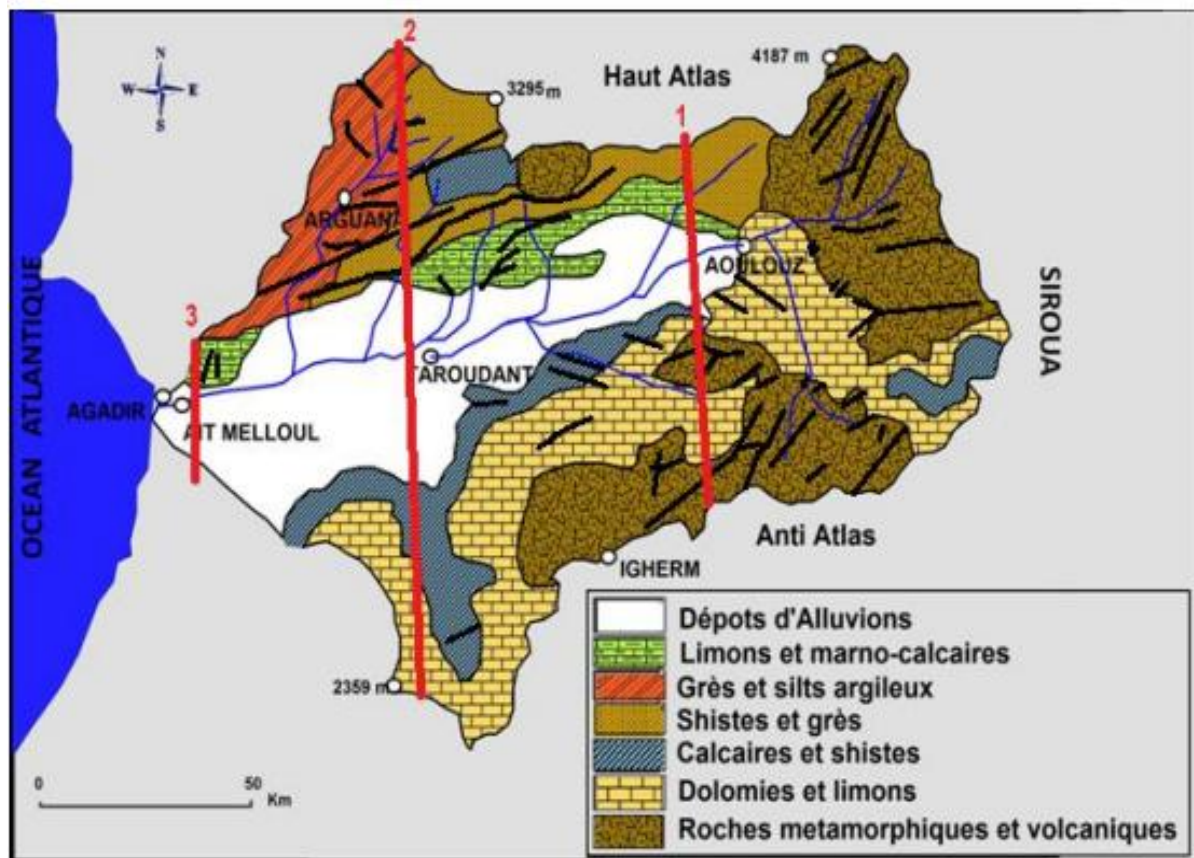


Figure 3-3 : Schéma géologique simplifié de la plaine de Souss (PDAIRE , 2006).

1.3 Contexte climatologique et hydrologique du bassin :

1.3.1 Les précipitations

La pluviométrie présente une grande variabilité spatiale et temporelle. Les moyennes des précipitations sont de l'ordre de 280 mm sur le Souss, 265 mm sur le Massa, 390 mm sur le bassin du Tamraght et 370 mm sur le bassin du Tamri.

1.3.2 Les températures

Les températures moyennes annuelles varient de 14°C sur le Haut-Atlas au Nord à 20°C sur l'Anti-Atlas au Sud. Les températures journalières minimale et maximale atteignent respectivement -3°C et 49°C.

1.3.3 L'évaporation

L'évaporation moyenne annuelle varie entre 1400 mm en montagne et près de la côte atlantique et 2000 mm en plaine. Le minimum est enregistré au mois de Janvier avec une moyenne de 35 mm, tandis que le maximum est enregistré en juillet avec une moyenne de 240 mm.

1.3.4 Ressources en eau de surface

Les ressources en eau de surface sont limitées et très irrégulières. Les débits des oueds présentent une forte irrégularité interannuelle. Ils ne sont pérennes que sur leurs cours de montagne et de piémont et ne coulent que pendant de courtes périodes où surviennent des crues, parfois rapides et violentes. L'apport moyen en eau de la région est évalué à 600 Mm³/an. Les apports minimum et maximum enregistrés sont respectivement de 35 Mm³ (1960-61) et 2.160 Mm³ (1962-63). (PDAIRE. 2006)

1.3.5 Ressources en eau souterraine

Le bassin hydrogéologique de la nappe du Souss s'étend sur une superficie de 4.150 km². Il est limité au Nord par le Haut Atlas, au Sud par l'Anti-Atlas et débouche à l'Ouest sur l'Océan Atlantique.

Constituée par les formations de remplissage de la vallée dont l'âge va de l'Eocène au Quaternaire, la nappe de Souss constitue le réservoir phréatique le plus important du Pays et joue un rôle primordial dans le développement économique et social de la région du Souss.

Finalement, le climat de la région est à prédominance aride mais il est également du type humide à hiver froid sur les sommets du Haut-Atlas occidental. Le caractère aride est atténué par la proximité de l'océan ainsi que par la protection contre les vents du Sud, par la barrière montagneuse de l'Anti-Atlas. (PDAIRE. 2006)

1.3.6 Occupation des terres et végétation :

On distingue deux principaux domaines :

a- Domaines des terres agricoles :

- **Terres irriguées** : c'est un domaine localisé autour des points d'eau. Il est caractérisé par système à plusieurs strates ; une strate arboricole dominée par l'olivier et l'amandier, suivie d'une multitude de rosacées fruitières (pommier, poirier, prunier, cognassier,... PDAIRE. 2006) ainsi que des vertiges de palmiers dattiers. La strate sous-jacente est dominée par la céréaliculture avec diverses cultures maraîchères, fourragères et légumineuses. Le domaine irrigué est également une zone de concentration des habitations.
- **Terres bours** : Se sont des terrains localisés essentiellement autour du domaine irrigué, là où les ressources en eau ne sont pas suffisantes pour assurer l'extension de l'irrigation. Ces terres sont réservées à la céréaliculture et sont souvent plantées, à coté de l'arganier et du caroubier, en oliviers et amandiers.

b- Domaines forestiers :

Ce domaine est soumis à une délimitation forestière. On peut y distinguer deux principaux niveaux :

- **Un niveau supérieur** : localisé sur les formations doléritiques et sur les assises calcaires à moyenne et haute altitude caractérisé par une calitriaie mixte avec une strate arborée à base d'arganier, de thuya, d'oléastre, et d'une strate arbustive à base de lentisque, thym, lavande et autres espèces de moindre importance (PDAIRE. 2006).
- **Un niveau inférieur** : localisé sur les formations argileuses du Trias et sur les glasisterrasses du Quaternaire, à basse altitude (650-800m), dominé par une arganerie avec un taillis de faible densité, parsemée par des caroubiers, d'oléastres et d'autres espèces d'importance secondaire (jujubier,...).

La forêt est un domaine qui assure aux habitants du bassin versant de nombreux usages. C'est un lieu de pâturage par excellence. Les ressources végétales permettent également de s'approvisionner en bois de feu, de bois de chauffe et de collecte de nombreuses plantes médicinales. Les amandes d'arganier, en particulier, sont récoltées pour l'extraction de l'huile d'arganier qui est une source de revenu importante.

1.3.7 Les sols :

L'évolution pédologique affecte seulement les sols stabilisés des vallées, c'est ainsi qu'on distingue dans le bassin versant (PDAIRE. 2006).:

- Les sols colluvions du piémont, leur richesse est en fonction de la nature minéralogique (limon superficiel ou profond, cailloutis plus ou moins abondants).
- Les sols alluviaux, dans les vallées, généralement profonds riches en éléments fins, faciles à travailler.
- Les sols de terrasse sur croûte calcaire ou gravileuse.
- Les sols alluviaux sur horizon sableux, argileux. Soumis à une forte insolation et à des précipitations brutales. Les sols du Souss, généralement riche en calcaire, ont une propension lorsque le lessivage croît (par irrigation notamment) à former un horizon d'accumulation pouvant dégénérer en croûte calcaire. Ces croûtes apparaissent parfois sous forme de dalles conglomératiques qui s'opposent à une mise en valeur économique.

2. La morphométrie du bassin versant d'Issen :

2.1 Les paramètres morpho métriques générales

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

Pour se faire, nous avons utilisé le logiciel ARCGIS et WMS qui remplit facilement cette tâche une fois la délimitation du bassin est effectuée (**Fig. 3-4**). Les tableaux ci-dessous (**Tab.3-1, 3-2**) renferme la liste des paramètres morphométriques d'Issen, calculés par l'intermédiaire de ce logiciel.

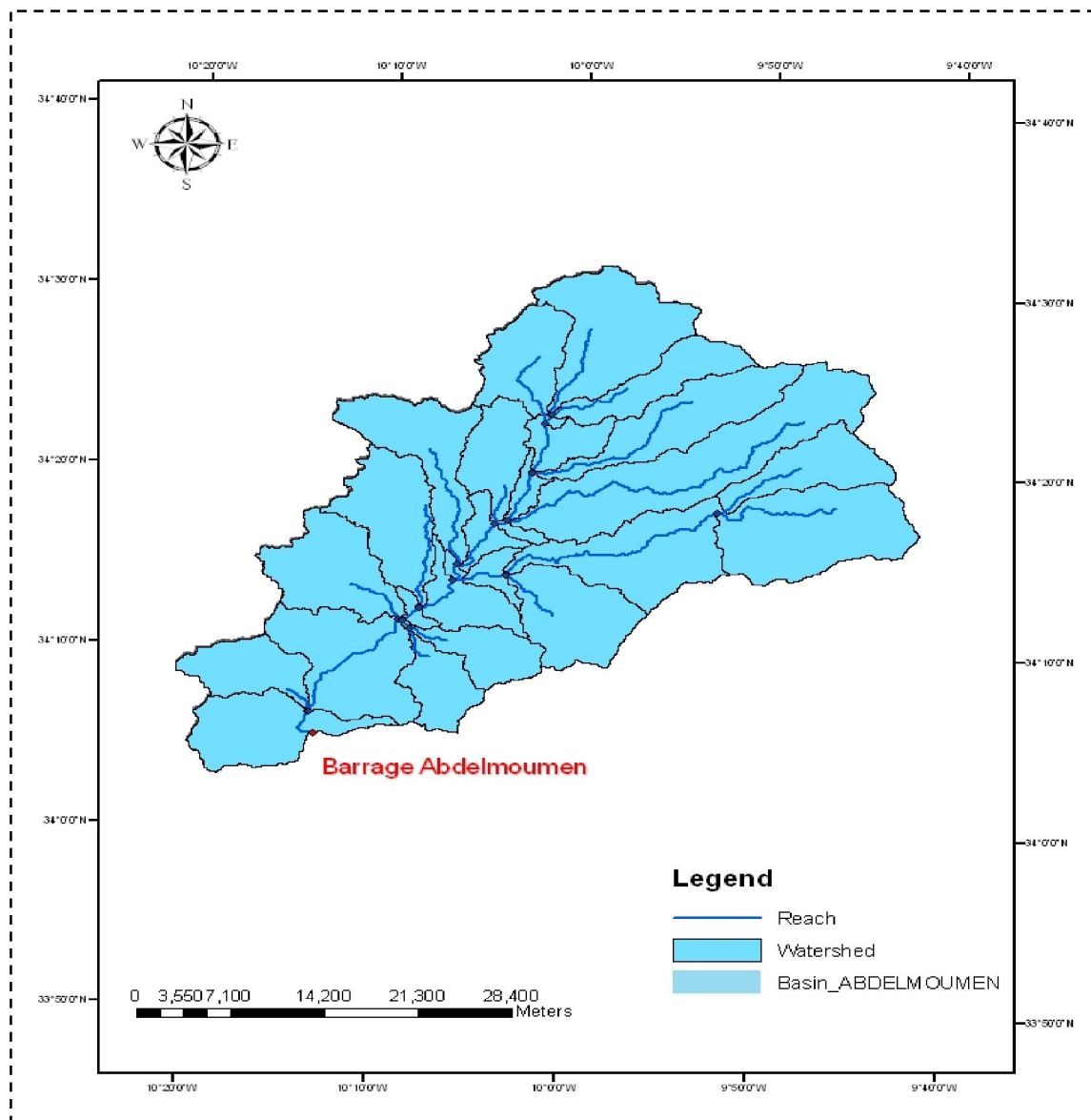


Figure 3-4 : Cours d'eau principal et réseau hydrographique de bassin d'Issen

Tableau 3-1 : paramètres morphologiques de bassin versant d'Issen

PARAMETRES MORPHO	ABDELMOUMEN	AGUENZA	AMSOUL
Surface (km ²)	1303.	1128.	482.
Pente (m/m)	0.033	0.038	0.049
Longueur du talweg (km)	78.601	64.728	47.025
Hmax (m)	3203	3203	3203
Hmin (m)	587	724	861

2.1.1 Indice de forme :

La forme du bassin d'Issen est allongée.

La forme du bassin est déterminée à l'aide de l'indice de compacité de Gravelius :

$$Kc = 0,28 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Avec : P: le périmètre du bassin (Km)

A : la surface du bassin versant (Km²)

Tableau 3-2 : indice de forme de bassin versant d'Issen

Périmètre	285 Km
Surface	1303 Km ²
Indice de compacité Kc	2.212

Pour le cas de ce bassin Kc est de l'ordre de 1,58, donc il est presque six fois plus long que large.

2.1.2 Pente du bassin versant

La pente influence puissamment l'importance de l'écoulement. Lorsque la pente augmente, l'écoulement s'accélère vers le bas.

La pente moyenne est donnée par les moyennes pondérées des pentes de toutes les surfaces élémentaires :

$$P \text{ (Pente moyenne)} = Dt/L$$

Avec : L : la longueur du rectangle et Dt : la dénivelée totale, on trouve donc P= 0.033.

P est la pente moyenne de tout le bassin. Les versants montagneux auront des pentes fortes et le cours principal une pente relativement douce.

2.1.3 Le temps de concentration

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

Pour le calculer, il existe une variété de formules où interviennent le plus souvent les paramètres géométriques et/ou l'état de surface.

On calcule les temps de concentration en se basant sur les formules empiriques suivantes **(Tab.3-3)** :

- Giandotti $t_c = \frac{4\sqrt{S} + 1.5 \cdot L}{0.8 \sqrt{H_m}}$
- Turazza $t_c = \frac{0.108}{\sqrt{I}} * \sqrt[3]{S * L}$
- Kirpich $t_c = 0.945 * \frac{L^{1.155}}{H^{0.385}}$
- Ventura $t_c = 0.1272 \sqrt{S/I}$
- Van Te Chow $t_c = \left(0.868 * \frac{L^2}{H}\right)^{0.385}$
- Espagnole $t_c = 0.3 * \left(\frac{L}{I^{0.25}}\right)^{0.77}$

L : Longueur du talweg **I** : pente de bassin versant

S : superficie du bassin versant **H** : Hauteur Max

Tableau 3-3 : Temps de concentration des sous- bassins versants d'Issen

BASSIN	Giandotti	Turazza	Kirpich	Ventura	Van Te Chow	Espagnole
Aguenza	6.5	23.0	5.8	21.8	5.8	13.9
Abdelmoumen	7.5	27.7	7.1	25.2	7.1	16.6
Amsoul	4.4	13.7	4.1	12.5	4.1	10.4

On calcule la moyenne des valeurs proches qui sont données par les méthodes Giandotti, Kirpich et Van Te Chow **(Tab.3-4)** :

Tableau 3-4 : Temps de concentration optés pour les sous- bassins versants d'Issen

BASSIN	Tc (h)
Aguenza	<u>6.02</u>
Abdelmoumen	<u>7.22</u>
Amsoul	<u>4.18</u>

2.2 Hydrométéorologie du bassin versant d'Issen

2.2.1 Régime pluviométrique

De façon générale nous constatons une diminution importante des apports pluviométriques sur le bassin d'Issen. C'est une résultante du contexte global de changement climatique aussi nous remarquons la fragilité de la région vis à vis de la ressource en eau.

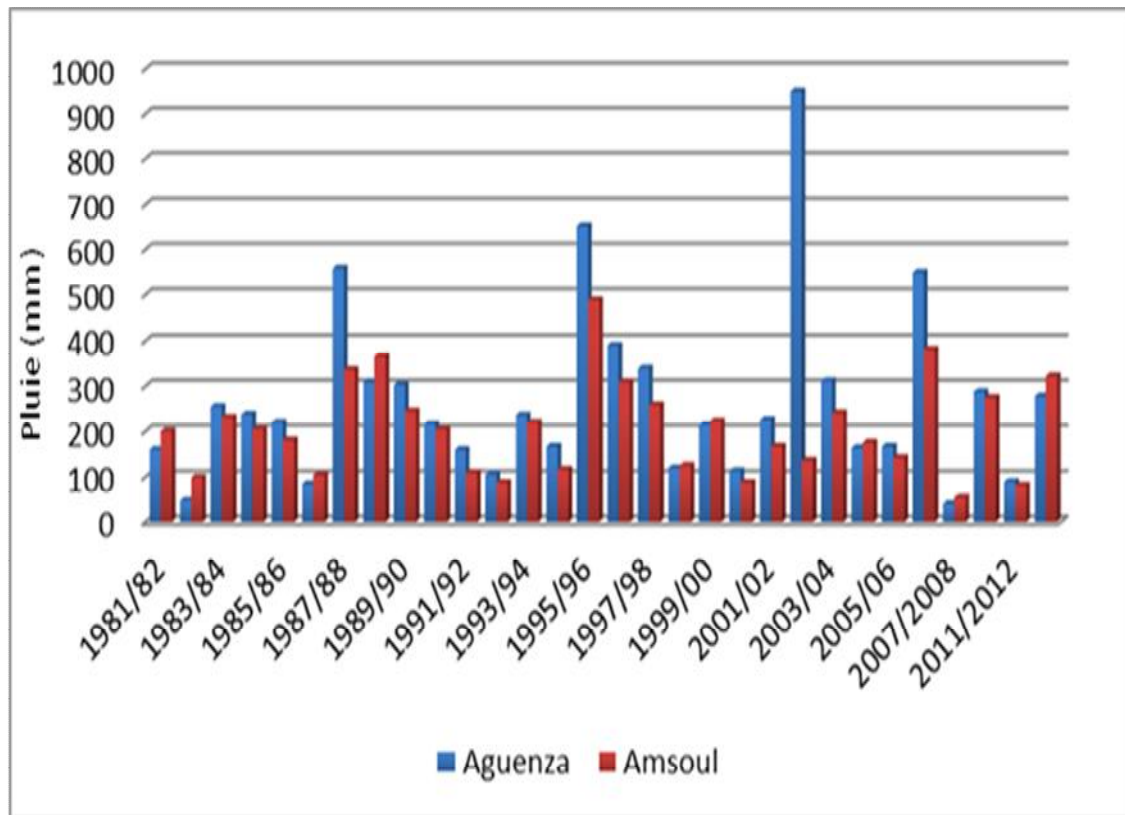


Figure 3-5 : Cumuls moyens annuels des précipitations pour les différentes stations situées dans le bassin d'Issen

a. Les précipitations mensuelles

A partir de l'observation de la **figure 3-6**, nous pouvons remarquer que les mois les plus arrosés de la station d'Aguenza sont novembre et décembre, pour Amsoul ce sont janvier et mars. Les mois les plus secs sont Juillet et Août pour Aguenza, juin et juillet pour Amsoul. En comparant les précipitations dans ces deux localités, il s'est avéré que celles d'Aguneza sont plus importantes qu'à Amsoul pour six mois, durant les six autres mois c'est le contraire qui se manifeste.

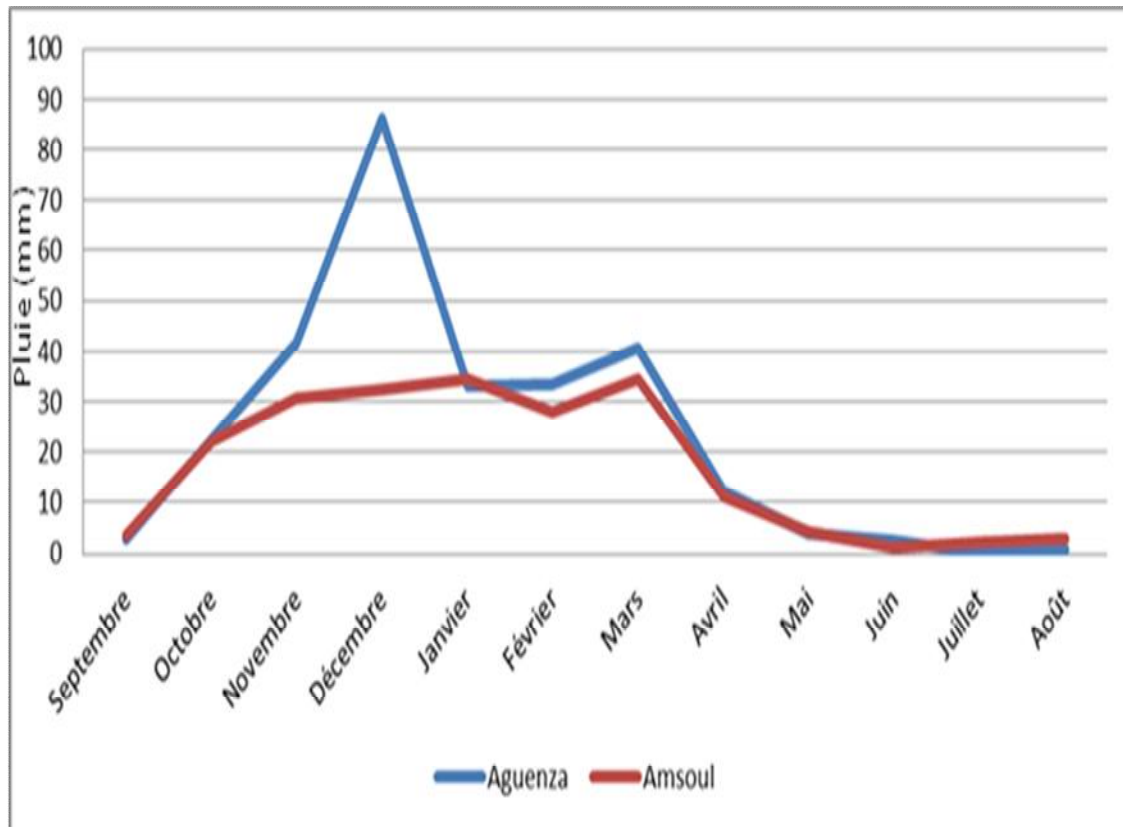


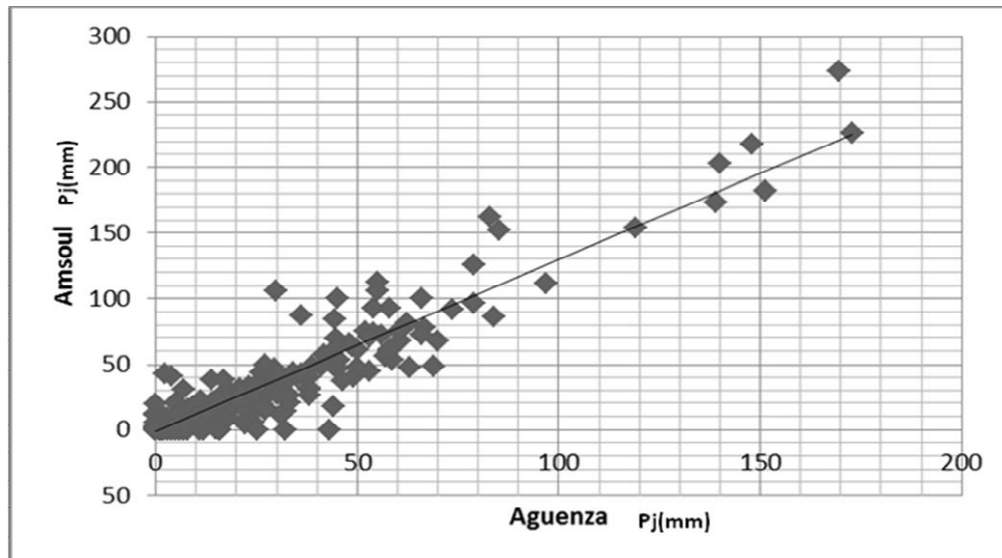
Figure 3-6 : Les précipitations mensuelles interannuelles dans les deux stations d'Aguenza et Amsoul (1981-2013)

b. La corrélation entre les précipitations

L'objectif de cette opération est de qualifier l'homogénéité des précipitations dans le Issen premièrement à l'échelle spatiale en prenant l'exemple d'une station en aval (Aguenza) et une autre en amont (Amsoul) et deuxièmement, à l'échelle temporelle en analysant les précipitations journalières, mensuelles, et annuelles. Les données qui seront utilisées sont recueillies par les deux stations, et sont étalées.

- Les précipitations journalières :

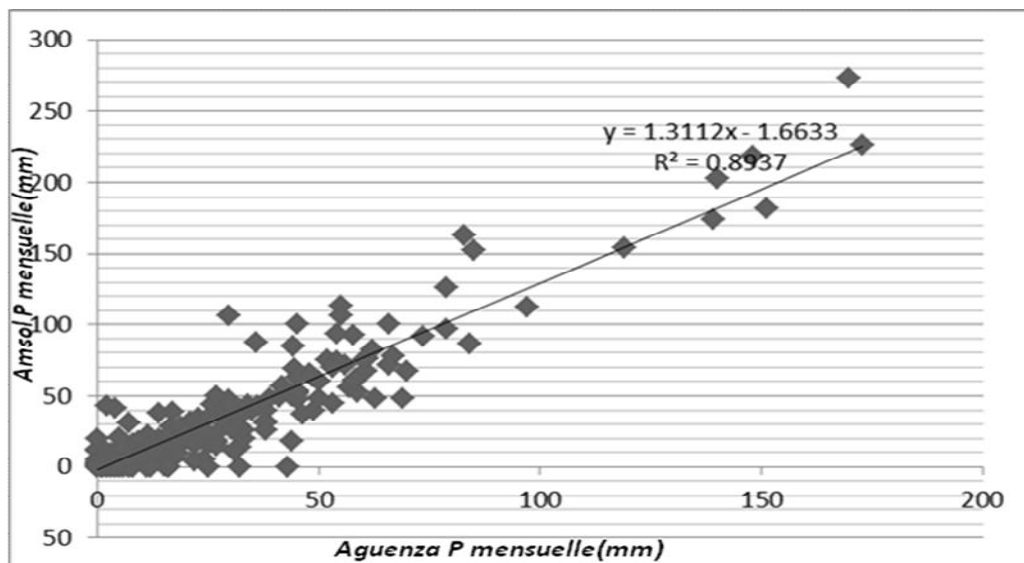
Avec un coefficient de corrélation de 0.12, la corrélation linéaire entre la pluie journalière de aguenza et celle d'Amsoul est faible (**Fig. 3-7**). De plus, la pente positive de la droite de régression signifie que généralement la pluie en Amsoul est plus importante qu'à aguenza.



*Figure 3-7 : Corrélation linéaire des précipitations journalières
des deux stations d'Aguenza et Amsoul (1981-2013)*

- les précipitations mensuelles :

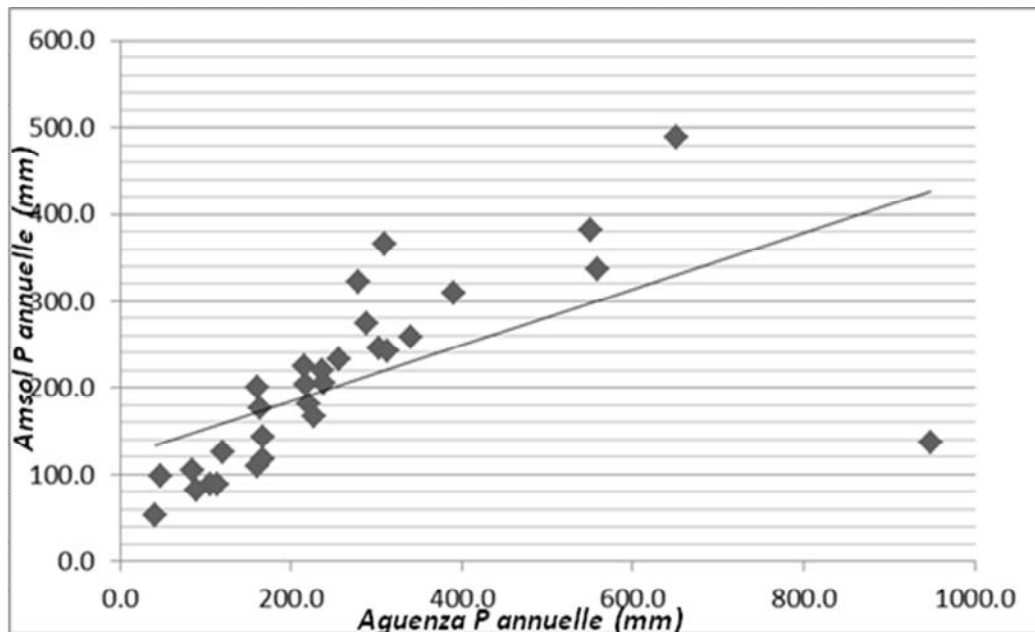
En remontant à une échelle de temps plus grande (mensuelle), nous constatons que le coefficient s'élève à 0.8 (**Fig. 3-8**), soit disant une amélioration de 60% dans la relation linéaire entre la pluie d' Amsoul et d'aguenza.



*Figure 3-8 : Corrélation linéaire des précipitations mensuelles
des deux stations d'Aguenza et Amsoul (1981-2013)*

- Les précipitations annuelles :

À cette échelle, la corrélation entre la pluie à Amsoul et Aguenza affiche une bonne valeur de 0.76 pour son coefficient (**Fig. 3-9**) . Cette valeur indique l'existence d'une relation linéaire entre les précipitations en amont et en aval de l'Issen dû à la restriction de l'action des facteurs impliqués dans le phénomène d'hétérogénéité spatiale.



*Figure 3-9 : Corrélation linéaire des précipitations interannuelles
des deux stations d'Aguenza et Amsoul (1981-2013)*

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

L'utilité de cette sous partie est de chercher les averses quantiles La méthode employée est l'ajustement des précipitations journalières de Aguenza et d'Amsoul aux lois de probabilité statistiques proposées par un logiciel d'analyse statistique probabiliste.

➤ La station d'aval (Aguenza)

L'ajustement des lois sur les données pluviométriques donne une estimation des périodes de retour des valeurs extrêmes de pluie (**Fig.3-10, Tab. 3-5**), qui possède une grande importance pour les travaux d'aménagement, prévision et protection. Les résultats des analyses fréquentielles des échantillons des pluies maximales journalières enregistrées à la station pluviométrique d'Aguenza .

Les ajustements statistiques de chacun des échantillons de P_{jmax} sont effectués selon différentes lois afin de ressortir la loi qui s'ajuste le mieux à l'échantillon considéré.

Tableau 3-5 : Estimation des précipitations maximales journalières annuelles de la loi de Gumbel avec intervalles de confiance à 95%.

période de retour (ans)	Lois d'ajustement retenu	Précipitations estimé (mm)
1000	Loi Gumbel	176
100		130
50		116
20		97.1
10		82.7
5		67.6
2		44.8

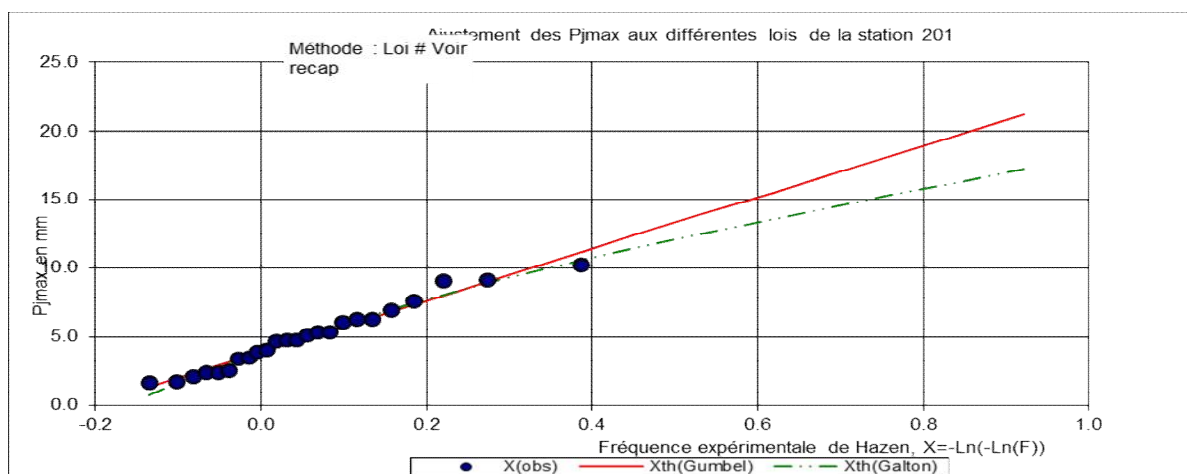


Figure 3-10 : Ajustement des Pjmax aux différentes lois statistiques de la station Agenza

➤ **La station d'aval (Amsoul)**

Tableau 3-6 : Estimation des précipitations maximales journalières annuelles de la loi de Gumbel. avec intervalles de confiance à 95%

période de retour (ans)	Lois d'ajustement retenu	Précipitations estimé (mm)
1000	Loi Gumbel	111
100		82
50		73
20		61
10		53
5		46
2		30

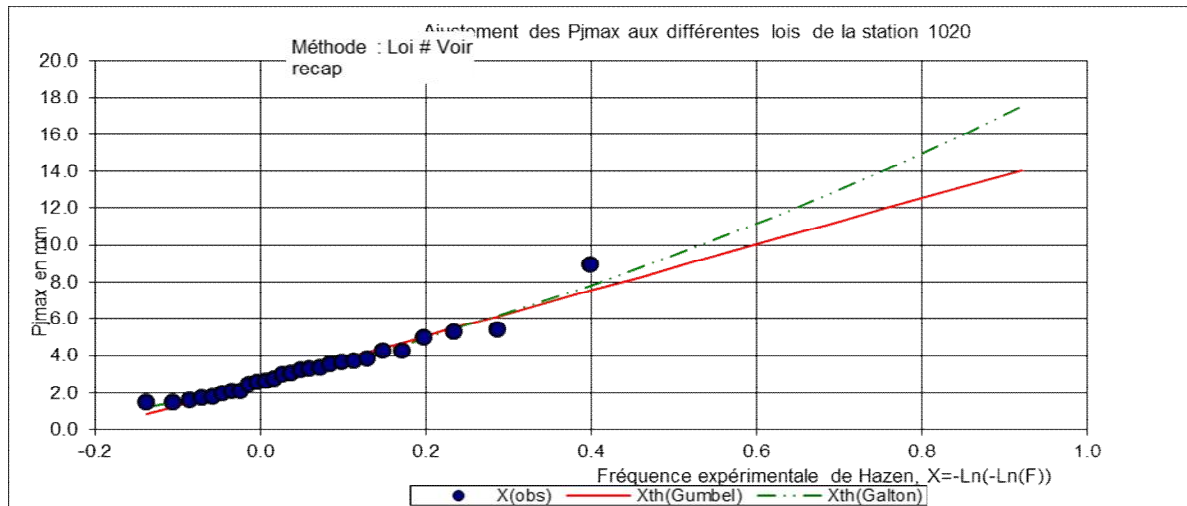


Figure 3-11 : Ajustement des Pmax aux différentes lois statistiques de la station Amsoul

les averses quantiles de la station aval à savoir Aguenza sont plus importants que celles de Amsoul ce qui reflète nettement le poids important de la station Aguenza dans la répartition des événements pluvieux dans le bassin d'Issen.

2.2.2 Analyse du régime hydrologique de bassin versant d'Issen

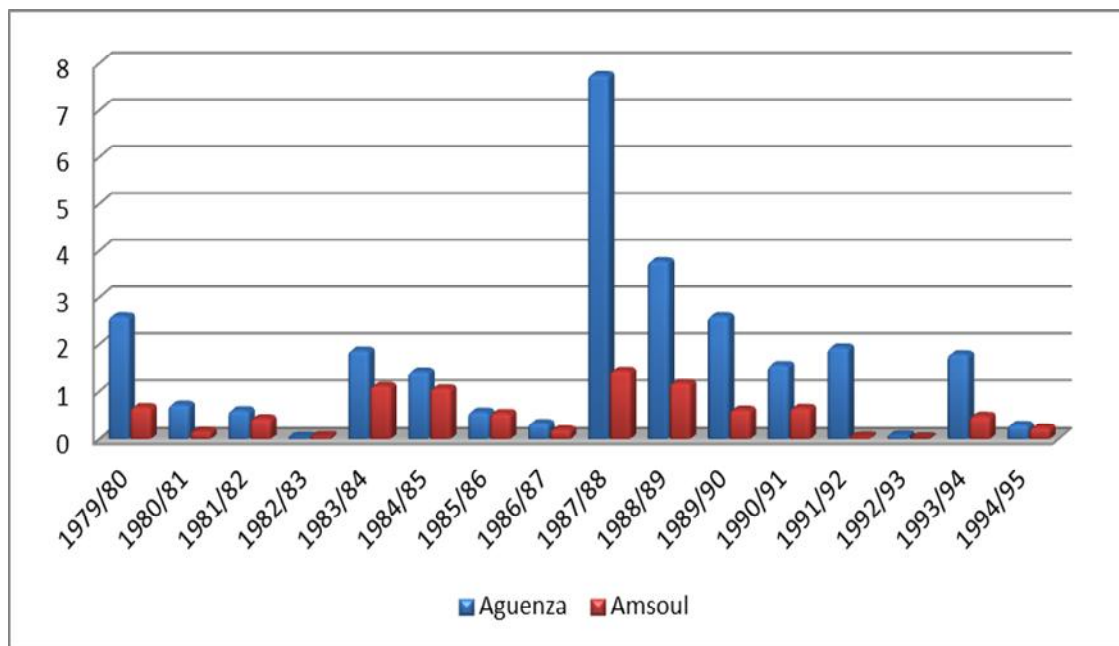


Figure 3-12 : Débits moyens annuels des deux stations d'Aguenza et Amsoul (1980-2012)

Nous remarquons sur la **Figure 3-12** une décroissance continue des débits à partir de 1988-89. Cela représente un très fort déficit. Ainsi que les apports au niveau d'Aguenza sont plus importants que celles d'Amsoul à cause des apports de bassin intermédiaire.

a. Les débits mensuels

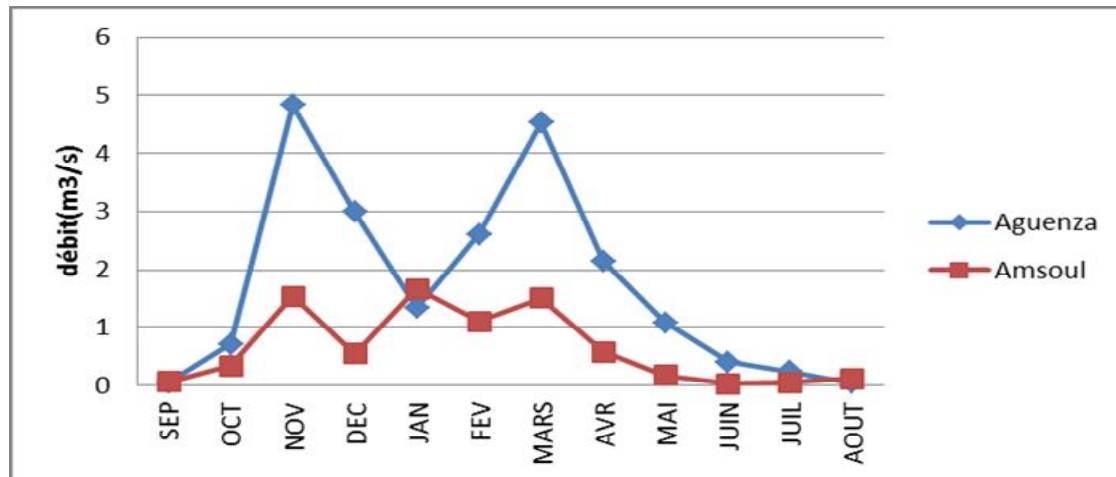


Figure 3-13 : Débits moyens mensuels interannuels des deux stations d'Aguenza et Amsoul (1980-2015)

La **figure 3-13** présente la variation des débits moyens mensuels interannuels à Amsoul et Aguenza, elle démontre le caractère pluvio-nival du régime hydrologique de l'Oued issen, manifesté par deux bosses de débit : une augmentation très marquée pendant les mois oct-déc suite aux premières précipitations, suivie d'une autre en fév-avril.

b. L'analyse statistique des débits maximums journaliers

L'essai d'ajustement des lois statistiques aux débits maximums journaliers mesurés a donné les résultats étalés sur les tableaux et les figures ci après illustrées :

➤ La station d'aval (Aguenza)

Les ajustements statistiques de chacun des échantillons de Q_{jmax} sont effectués selon différentes lois afin de ressortir la loi qui s'ajuste le mieux à l'échantillon considéré.

Tableau 3-7 : Estimation des débits maximums journaliers annuelles de la loi de Gumbel avec intervalles de confiance à 95%.

période de retour (ans)	Lois d'ajustement retenu	débit estimé (m³/s)
1000	Loi Gumbel	546
100		374
50		322
20		253
10		199
5		143
2		58

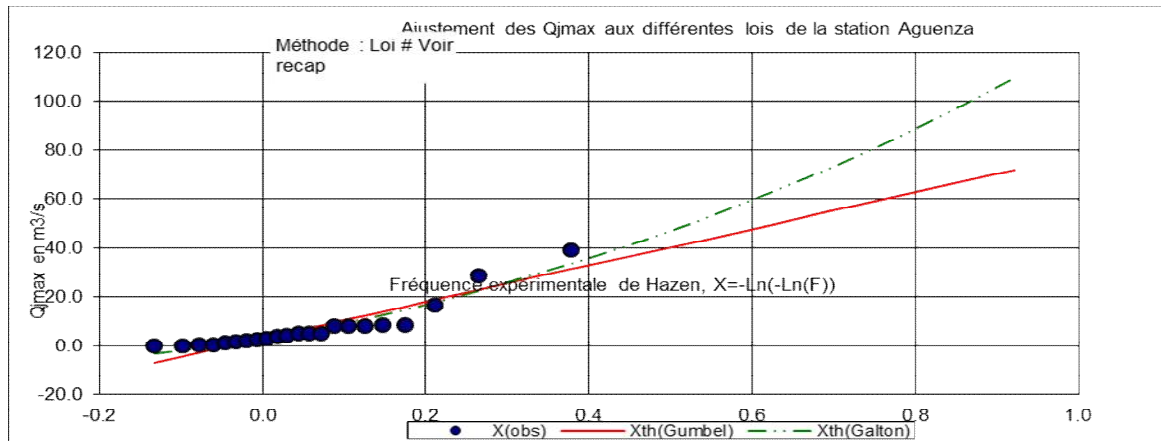


Figure 3-14 : Ajustement des Qjmax aux différentes lois statistiques de la station Agenza

➤ **La station d'aval (Amsoul)**

Tableau 3-8 : Estimation des débits maximums journaliers annuelles de la loi de Gumbel avec intervalles de confiance à 95%.

période de retour (ans)	Lois d'ajustement retenu	débit estimé (m³/s)
1000	Loi Gumbel	295
100		202
50		174
20		136
10		107
5		77
2		31

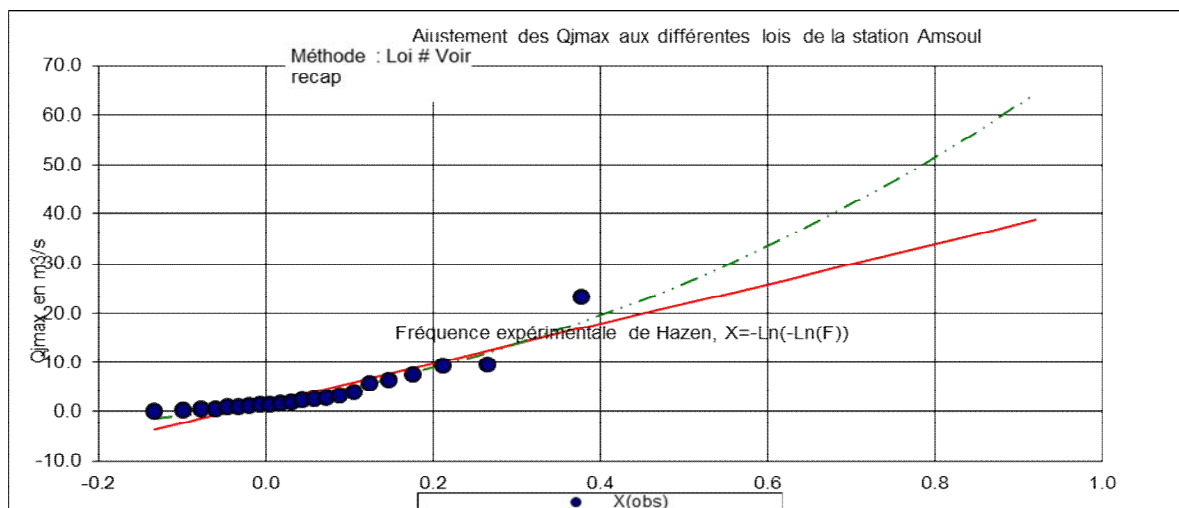


Figure 3-15 : Ajustement des Qjmax aux différentes lois statistiques de la station Amsoul

Conclusion

L'étude hydro-géomorphologique du bassin d'Issen a permis de caractériser ses composantes les plus importantes, et de révéler un tas d'informations qui vont aider à expliquer et à justifier les résultats obtenus dans les chapitres suivants.

Aussi, nous avons pu identifier quelques facteurs qui peuvent détériorer la qualité des résultats de la modélisation en l'occurrence les problèmes de l'hétérogénéité spatio-temporelle des précipitations.

Ce chapitre vient essentiellement, pour caractériser les éléments clés de comportement hydrologique, pour notre bassin versant en essayant d'identifier la plupart des paramètres capitales pour la modélisation hydrologique du bassin versant d'Issen à différents échelle .

CHAPITRE -2-

MISE EN ŒUVRE DU MODELE

SWAT SUR LE BASSIN ISSEN

I. Présentation du modèle SWAT

1. Description du modèle SWAT

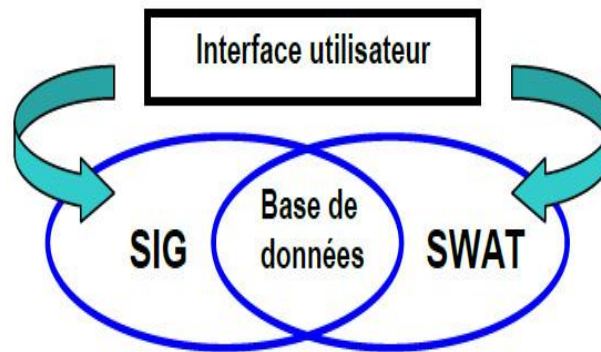


Figure 4-1 : Architecture de l'interface du couplage SWAT et SIG (Bian et al. 1996)

Le modèle SWAT est un modèle à l'échelle d'un bassin versant, qui modélise non seulement le cycle d'eau fluvial (phase routage), mais aussi le cycle d'eau sur terre (phase sol). Il est basé sur une description physique réaliste des processus en jeu. Le niveau d'abstraction dans SWAT est donc moins élevé que dans les modèles conceptuels. Même s'il est bien plus riche (en nombre d'équations et de variables), SWAT est plus immédiat à appréhender, car il propose une modélisation très descriptive et fidèle de la dynamique d'un bassin-versant.

SWAT intègre des processus modélisant les pressions anthropiques sur l'eau, notamment les activités agricoles,

SWAT est qualifié de modèle :

- Conceptuel à base physique en représentant les différents processus du terrain étudié à travers des équations mathématiques à paramètres basées sur des lois et des principes physiques ;
- Continu en fonctionnant à une échelle temporelle continue s'étalant sur plusieurs années et couvrant à la fois les périodes de crues et d'étiages. Tous les processus simulés par SWAT sont représentés à un pas de temps journalier ;
- Semi-distribué en discrétisant le bassin étudié en sous-basins contenant chacun un bief principal puis en divisant ces derniers en unités homogènes ayant le même type de sol, d'occupation du sol et de pente. Ces entités appelées Unités de Réponse Hydrologique (HRU : *Hydrologie Response Unit*) sont considérées comme l'unité spatiale fondamentale de la modélisation. Tous les processus simulés sont représentés à l'échelle spatiale des HRU.

SWAT a été mis en place au début des années 1990 par Jeff Arnold en combinant différents modèles développés à l'USDA dans le but d'avoir un outil intégré, robuste et opérationnel pour la modélisation, la gestion et la simulation des bassins versants complexes. Il est le fruit direct de l'intégration de deux outils principaux qui ont précédé sa mise en place à savoir SWRRB (*Simulator for Water Resources in Rural Basins*) et ROTO (Routing Outputs to Outlet).

Le couplage avec le SIG (**Fig. 4-1**) permet de gérer des données de type raster, vecteur et Alphanumériques. Il facilite et automatise la préparation des données d'entrées, il rend plus convivial la phase d'intégration, de manipulation et le paramétrage des données liées à la simulation. Le paramétrage des données numériques par l'utilisateur et la visualisation des résultats s'effectuent par le biais des formats « .Dbase ». Cependant, les fichiers de sorties sont convertis par SWAT en format ASCII possédant leurs propres structures. Plus d'une centaine de fichiers sont requis pour le bon fonctionnement du modèle : modèle numérique de terrain, pédologie, réseau hydrographique, données climatiques de températures et précipitations, occupation du sol, pratiques agricoles, etc....

2. Fonctionnement du modèle SWAT

Comme tout modèle hydrologique, SWAT reproduit bilan hydrologique sur le bassin versant de manière simplifiée. On peut schématiser le fonctionnement du modèle par trois gros modules principaux qui communiquent entre eux par la circulation d'eau (**Fig. 4-2**).

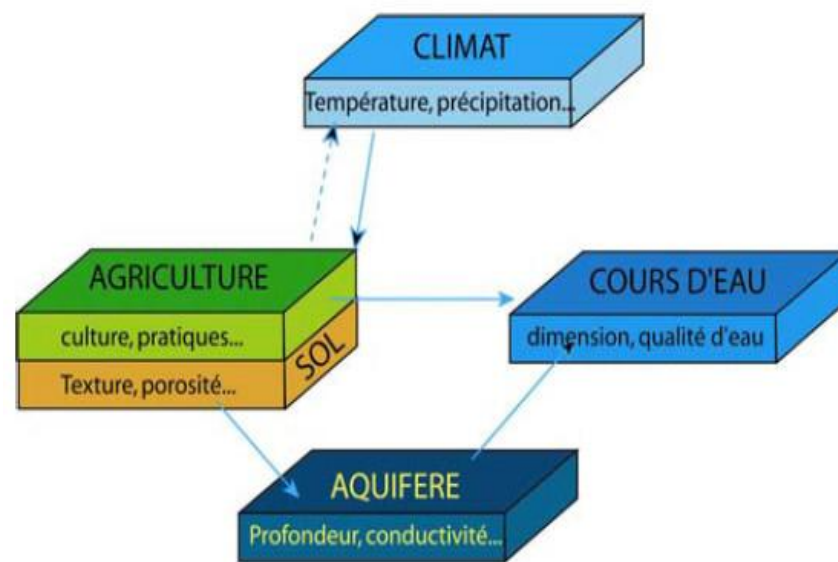


Figure 4- 2 : Fonctionnement schématique de SWAT (DUROS, 2001)

Le modèle hydrologique basé sur les formalismes SWAT peut se découper en deux grandes phases :

- La phase sol
- La phase routage

Avant de pouvoir effectuer les analyses et calculs des processus physiques du cycle de l'eau, certaines caractéristiques géographiques et hydrologiques du B.V. doivent être calculées à partir des données du MNT. Celles-ci incluent les temps de concentration pour les zones hydrographiques, les temps de latence des surfaces runoff (time-lag), les durées nécessaires aux flux latéraux pour atteindre le cour d'eau principale.

Les processus phase sol et phase routage sont organisés en plusieurs sections, chaque section représentant un sous-ensemble des phénomènes simulés par notre implémentation de SWAT. Pour une meilleure compréhension du modèle, et pour marquer une distinction claire entre les variables qui sont à nourrir par des données provenant du terrain et celles dont il faudra caler la valeur par ajustements successifs afin de reproduire finement les débits,

2.1 La phase sol :

La phase sol correspond aux processus représentant le transfert de l'eau de pluie du sol vers les cours d'eau de chaque sous sous-bassin versant (**Fig. 4-3**).

Résolution spatiale et temporelle de la phase sol :

La Résolution spatiale de la phase sol est la HRU (unité de même réponse hydrologique) de même que la résolution temporelle de la phase sol est la journée

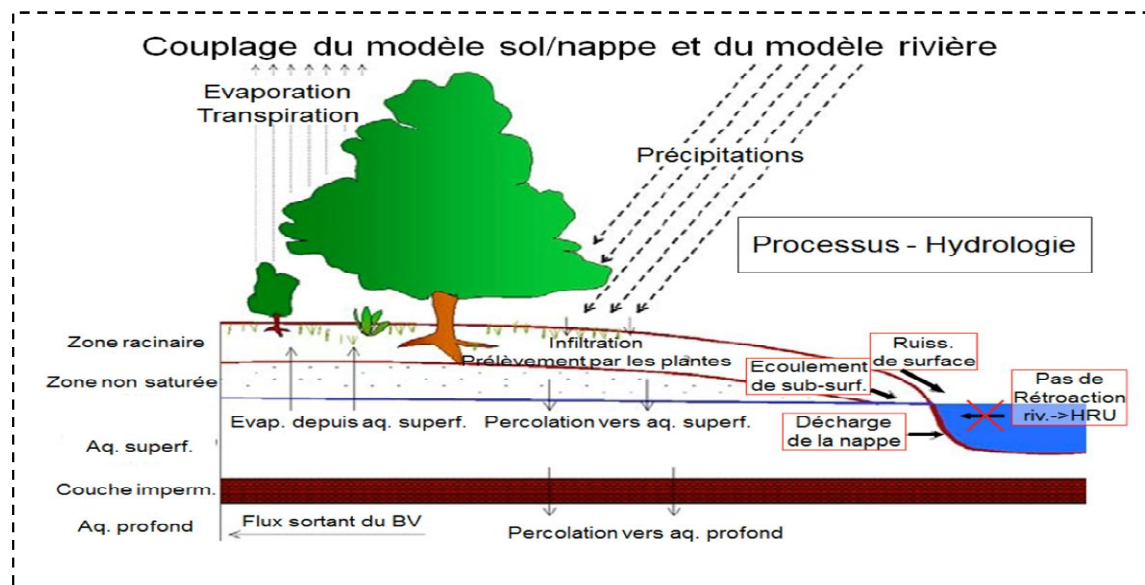


Figure 4- 3 : Représentation schématique du cycle hydrologique de la phase du sol (Projet Maeila-Platform, 2011)

La phase sol détermine la quantité d'eau qui alimente le cours d'eau principal. L'hydrologie de ce dernier est représentée par la phase du routage. La phase du sol est donc estimée en premier. Le cycle hydrologique dans la phase du sol est basé sur l'équation de bilan hydrique suivante :

Equation hydrologique de SWAT

Le bilan hydrique contrôle les différents processus hydrologiques qui se déroulent sur le bassin. Dans le cas de SWAT, il simule le cycle de l'eau par le biais de l'équation hydrologique suivante :

$$SWt = SWo + \Sigma (Rday - Qsurf - Ea - wseep - Qgw) \quad \text{Eq(1)}$$

avec :

- SWt= contenu en eau du sol (mm)
- SWo= eau disponible pour les plantes (mm)
- Rday= précipitation (mm)
- Qsurf= ruissellement de surface (mm)
- Ea= évapotranspiration (mm)
- Wseep= percolation (mm)
- Qgw= débit d'étiage (mm)

La figure suivante (**Fig.4-4**) présente l'organigramme des processus utilisés pour simuler le cycle hydrologique de la phase du sol :

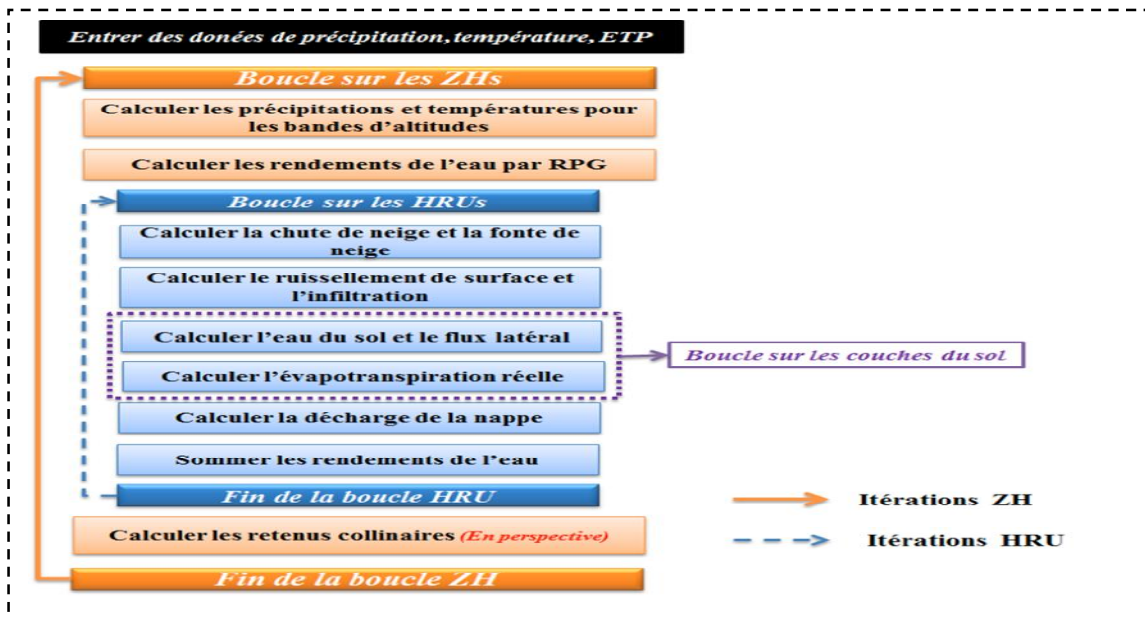


Figure 4-4 : L'organigramme des processus pour la phase du sol(Projet maeila-Platform-2011)

Tous les processus de la phase du sol (ruissellement de surface, percolation, écoulement sub-surface, évapo-transpiration, volumes provenant de l'eau souterraine) sont calculés à l'échelle de chaque HRU.

Un des processus clé de la phase du sol est le ruissellement de surface (*surface runoff*). SWAT propose deux méthodes pour le calculer :

- **SCS curve number** : méthode empirique représentant la relation entre la quantité de précipitations et le ruissellement de surface en fonction de l'état hydrique du sol. Elle repose sur deux paramètres : l'*initial absorption (Ia)* correspondant à une teneur en eau perdue avant le début du ruissellement (rétention de surface, l'interception par la

canopée) et le *Curve Number*. Ce formalisme est généralement simplifié à une équation contenant uniquement le *curve number*. Il existe des tables de valeurs du *curve number* en fonction de la nature du sol et de l'occupation du sol. Des améliorations par rapport à la méthode initiale ont été rajoutées de façon à tenir compte de la dynamique et de la pente (U.S. Soil Conservation Service 1986-Technical Release 55).

- **Green & Ampt** : une méthode calculant explicitement l'infiltration, on a alors $runoff = precip. - infiltr.$ Le stockage par la canopée est simulé séparément et trois paramètres supplémentaires sont utilisés (alors que la méthode des SCS curve number peut être ramenée à un seul paramètre. (Green W. H., Ampt G. A., 1911. Studies on soil physics),

Nous avons choisi d'utiliser la méthode de SCS curve number à l'implémentation de SWAT dans ce travail.

2.2 Phase de routage :

La phase routage correspond au phénomène du transit de l'eau d'un bassin versant à un autre.

Résolution spatiale et temporelle de la phase sol

La Résolution spatiale de la phase sol est la zone hydrographique de même que la résolution temporelle de la phase sol est la journée.

Les zones hydrographiques (ZH) jouent un rôle central dans le modèle. Tout d'abord, comme bassin de drainage élémentaire, la zone hydrographique est la cellule de base pour les processus liés à l'écoulement de l'eau. De plus, elle fournit une ressource commune pour les îlots agricoles (assemblages de parcelles contiguës, irriguées ou non) et les réserves de prélèvement d'eau (cours d'eau naturels, nappes phréatiques, lacs naturels ou artificiels, etc.) associées.

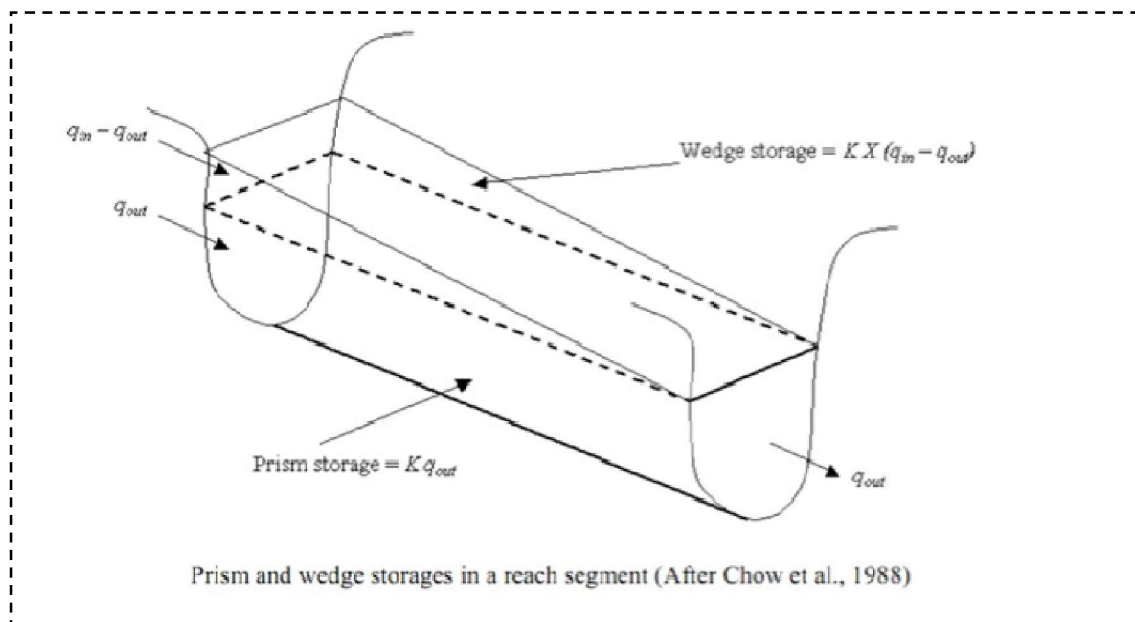


Figure 4-5 : Stockage pour un tronçon de cours d'eau (Chow et al, 1988)

On désigne par cours d'eau tout chenal superficiel ou tuyaux partiellement remplis dans lesquels s'écoule un flux d'eau continu ou temporaire. Le modèle utilise les équations de "Manning" pour définir le débit et la vitesse d'eau (**Fig. 4-5**).

Le routage de l'eau dans les réseaux hydrauliques est modélisé avec la *Muskingum Routing Method* (Gray, 1973), qui est une variation de l'onde cinématique.

Une fois les décharges d'eau pour le cours d'eau sont calculées, le routage de l'eau dans les réseaux hydrauliques peut être modélisé. Dans le modèle, le volume de stockage pour un tronçon de cours d'eau va être modélisé comme une combinaison de la cheville (*wedge*) et du prisme.

II. Bases de la modélisation hydrologique des bassins versants par SWAT

1. Principe de modélisation

Les bassins versants représentés dans ce modèle ont des superficies allant de quelques centaines à plusieurs milliers de km². Le modèle prend en compte l'ensemble du cycle hydrologique, représenté au niveau du bassin versant de façon spatialisée (**Fig. 4-6**). SWAT peut analyser le bassin versant dans sa globalité ou en le subdivisant en sous-bassins versants contenant des portions homogènes appelées Unités de Réponse Hydrologiques (HRU) (Green et Arnold. (2007)).

Il permet de manipuler et d'analyser de nombreuses données hydrologiques et agronomiques en vue de prédire les effets de la gestion des terres sur la ressource hydrique. Il permet de simuler les transferts de nutriments, de sédiments et pesticides vers le réseau de drainage et vers les aquifères. SWAT simule également les rendements des cultures en présence, en fonction des conditions environnementales et des techniques de culture.

a. Ruissellement (Qsurf) :

Le ruissellement de surface est estimé par SWAT par une modification de la méthode SCS (USDA Soil Conservation Service, 1992) ou par la méthode d'infiltration de Green et Ampt (1911) la méthode utilisée dans notre étude est la SCS

b. Evapotranspiration (Ea)

De nombreuses méthodes sont développées pour estimer l'évapotranspiration potentielle. Dans la version 2009 de SWAT, quatre méthodes sont proposées : la méthode Penman-Monteith (Monteith, 1965 ; Allen 1989), la méthode de Priestley-Taylor (Priestley-Taylor, 1972) Hargreaves (Hargreaves, et al. 1985). La méthode utilisée dans notre étude est la méthode Penman-Monteith

c. Constitution des HRU

L'unité spatiale élémentaire de SWAT est la HRU (Hydrologic Response Unit ou Unité de Réponse Hydrologique). L'obtention des différentes unités spatiales repose sur deux concepts :

- La définition d'unités reposant sur la structure du réseau hydrographique à partir duquel sont extraits les sous-bassins.
- La définition d'unités hydrologiques homogènes appelées HRU : celles-ci sont obtenues par croisement du découpage en sous-bassins versants, de l'occupation du sol et de la pédologie.
- Toute combinaison identique de ces trois éléments est supposée produire une réponse hydrologique similaire .

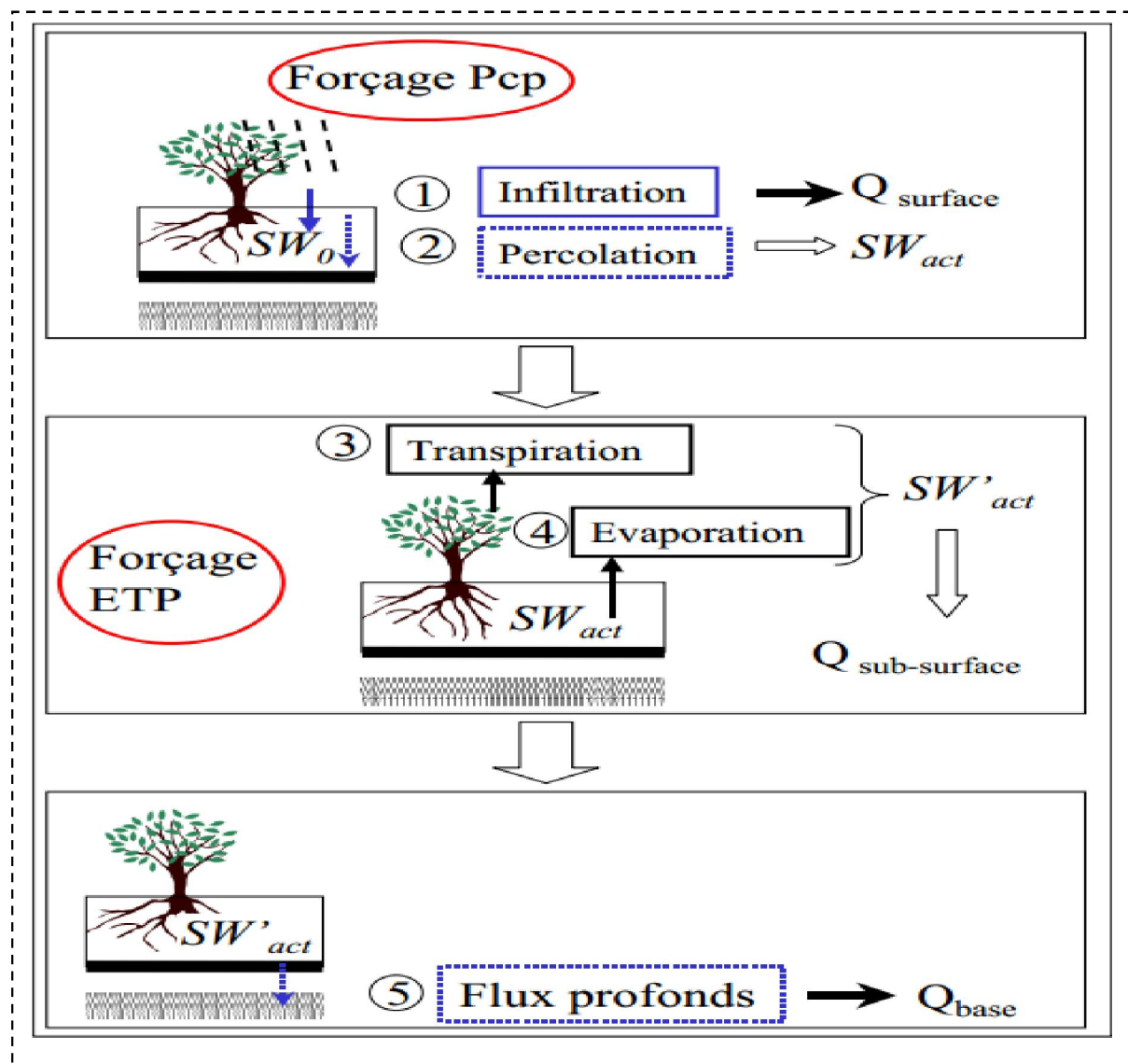


Figure 4-6 : Schématisation des différentes étapes de modélisation dans SWAT (Chaponnière, 2005)

2. Données d'entrée et de sortie du modèle SWAT

2.1 Données en entrée du modèle SWAT

Le modèle nécessite des informations spécifiques pour chaque HRU sur le climat, les propriétés du sol, la topographie, la végétation, les pratiques culturales. On peut distinguer trois étapes dans le fonctionnement de SWAT :

- la prise en compte de la topographie, par le MNT (Modèle Numérique de Terrain), qui permet de définir le réseau hydrographique. Il est possible de choisir les exutoires pour délimiter les sous-bassins versants,
- le croisement des informations relatives à l'occupation du sol et au type de sol. Il permet de définir les différentes HRU. Plus ces champs sont renseignés précisément, plus le nombre de HRU est grand. Alors, le modèle peut considérer les différentes valeurs d'évapotranspiration selon le type de culture, le type de sol et la gestion culturale,
- la prise en compte des données climatiques : précipitations journalières, températures (min, max, moyenne journalières), humidité relative, vitesse du vent et radiation solaire.

2.2 Données en sortie du modèle SWAT

Après exécution du modèle, un outil d'analyse des sorties (variables simulées par le modèle) permet d'extraire les données du fichier de sortie ASCII puis de les visualiser et de les analyser. Les sorties sont données à différentes échelles de temps : journalière, mensuelle ou annuelle, et d'espace : HRU ou sous-bassin.

Les données en sortie du modèle SWAT sont :

- hydrologie (ruissellement, interception par le couvert, évapotranspiration, drainage, percolation, - ruissellement de sub-surface, retenues, marécages),
- climat (température du sol, neige, générateur climatique),
- croissance des cultures,
- gestion agricole (irrigation, rotation, pesticides),
- transfert de l'eau dans le bief principal,
- sédimentation,
- nutriments.
- La vitesse de ruissellement n'est pas disponible,

III. Mise en œuvre du modèle SWAT sur le bassin d'Issen

1. Démarche suivie pour l'implémentation du modèle SWAT dans le bassin d'Issen

La robustesse du modèle SWAT et sa capacité de modéliser un ensemble de processus agro hydrologiques (écoulement, érosion, transfert des polluants) se heurte souvent à la complexité de sa mise en œuvre et particulièrement dans les zones où la disponibilité ou l'accès aux données posent de sérieux problèmes. Le fonctionnement du modèle, basé sur la représentation physique du bassin, le découpage de l'espace étudié en unités élémentaires homogènes et le calibrage et la validation du système dans le temps, pose en termes de la collecte et de la structuration des données d'entrée trois grands défis :

- L'acquisition d'un ensemble de données très variées et très détaillées pour reproduire la physique et la dynamique du milieu étudié. Il s'agit des informations sur le relief, le sol, l'occupation du sol, le climat (précipitations, température, évapotranspiration, etc.), l'hydrométrie, les pratiques agricoles, le travail du sol, les polluants, les modes de gestion des ouvrages hydrauliques, etc. ;
- La collecte de ces données à une résolution spatiale fine pour l'incarnation du principe de fonctionnement semi-distribué du modèle. Les données à collecter doivent donc être acquises dans l'ensemble des zones représentatifs du bassin étudié
- La collecte de ces données à un pas de temps journalier et sur une période de plusieurs années pour le calage et la validation du modèle.
- La mise en œuvre du modèle SWAT nécessite donc une série de données spatio-temporelles de différentes natures.
- La précision des données collectées conditionne d'une façon directe la fiabilité et la qualité du processus de la modélisation du bassin. Cette précision dépend de la disponibilité de la donnée, de l'échelle des cartes et des données de base ainsi que de la densité spatiale et temporelle des stations de mesure hydro-climatiques.
- Cette phase d'acquisition, de préparation et de structuration des données d'entrée est une étape délicate et très longue et particulièrement dans les pays comme le Maroc où l'infrastructure nationale de données spatiales et ses annexes n'a pas encore été mise en place. Cela engendre de multiples problèmes quant à l'accès, l'acquisition et le contrôle qualité des données.

Dans ce travail, il s'agit de la préparation, de la constitution et du contrôle des différents types de données disponibles afin de choisir l'information la plus adéquate à intégrer dans le modèle.

Ce chapitre présente la procédure de création et de préparation des différentes données d'entrée du modèle SWAT. Il détaille ainsi le travail effectué pour le diagnostic du MNA utilisé, la création de la carte d'occupation du sol et de la carte pédologique ainsi que la collecte et la

structuration des données hydro-climatiques à savoir les précipitations, la température minimale et maximale, l'évapotranspiration et les débits (**Fig. 4-7**).

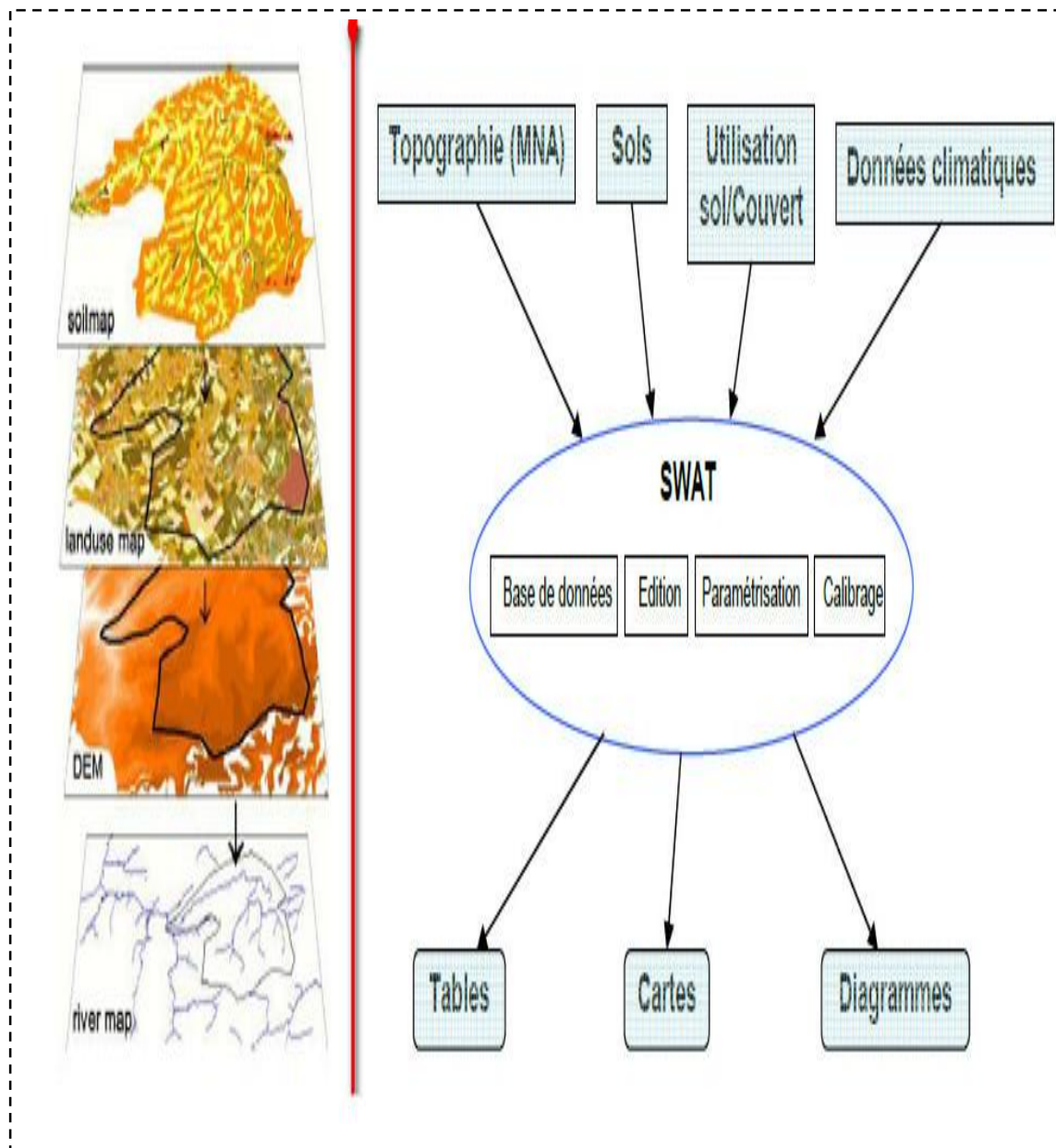


Figure 4- 7 : Les différents thèmes de cartes requis en Entrée de SWAT (Holvoet et al. 2005) et un Schéma méthodologique de mise en œuvre de SWAT (Ruelland et al. 2004)

1.1 Représentation du relief du bassin versant d'Issen

Le modèle numérique de terrain (MNT) utilisé est le GDEM-ASTER. Il a une résolution spatiale de 30 m et il a été extrait à partir des images satellites ASTER. Les caractéristiques physiographiques du bassin (limite du bassin, réseau hydrographique, géométrie du bassin, hiérarchisation des cours d'eau, profil en long...) : ces informations ont été extraites d'une façon automatique du MNT en utilisant le SIG ArcGIS (**Fig.4-8**).

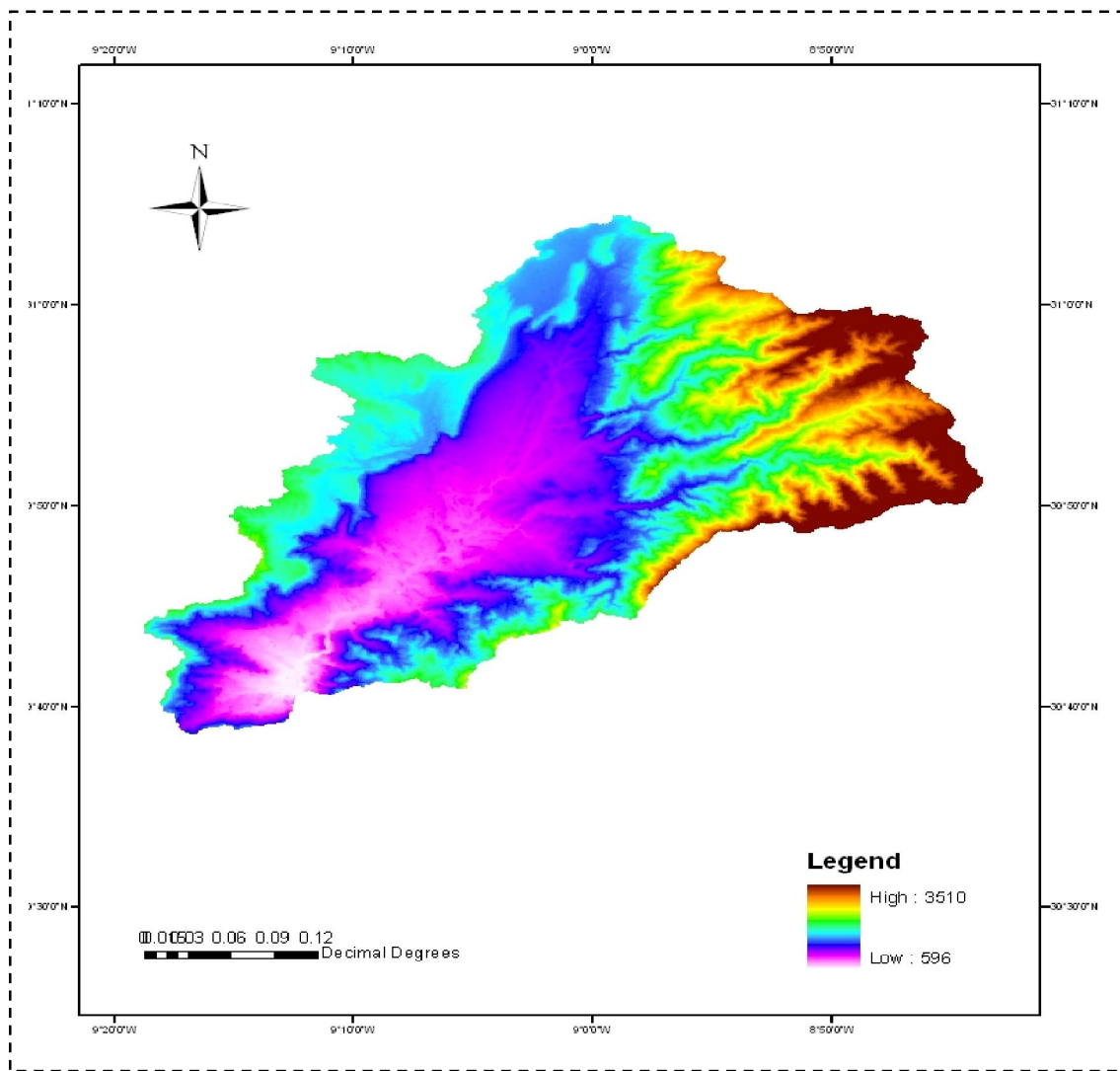


Figure 4-8 : Carte de modèle numérique de terrain (MNT) du bassin versant d'Issen

Le MNA ASTER-GDEM permet de représenter plus fidèlement la réalité du relief et permet de mieux relever les détails géomorphologiques et topographiques;

1.2 Information sur l'occupation du sol :

L'occupation du sol joue un rôle déterminant dans la modélisation des bassins versants. Elle est l'un des éléments fondamentaux qui régissent le fonctionnement des processus hydrologiques et la réponse aux aléas subis par le bassin versant. A titre d'exemple, Cognard-Plancq et al. (2001) et Cosandey et al. (1990) ont estimé qu'une coupe forestière génère directement une augmentation des débits. L'occupation du sol est aussi l'élément le plus souvent invoqué lorsqu'il est question des effets anthropiques sur le cycle de l'eau (Fritsch, 1995). Dans les modèles distribués ou semi-distribués, l'occupation du sol est largement utilisée pour le découpage du bassin étudié en unités élémentaires. Elle est utilisée aussi pour l'estimation des degrés de perméabilité (écoulement, infiltration), la simulation des besoins et de la consommation de l'eau, etc.

L'intégration de cette information dans les processus de la modélisation permet de bien

représenter le fonctionnement physique et naturel du milieu. Dans l'autre côté, une fois le modèle intégrant cette composante est calibré et validé, il est possible d'évaluer et de simuler l'impact du changement d'occupation du sol sur les différents processus du bassin (écoulement, érosion, transfert de pollution, etc) en intégrant la dynamique ou les scénarios d'évolution de cette information (Fohrer et al., 2002).

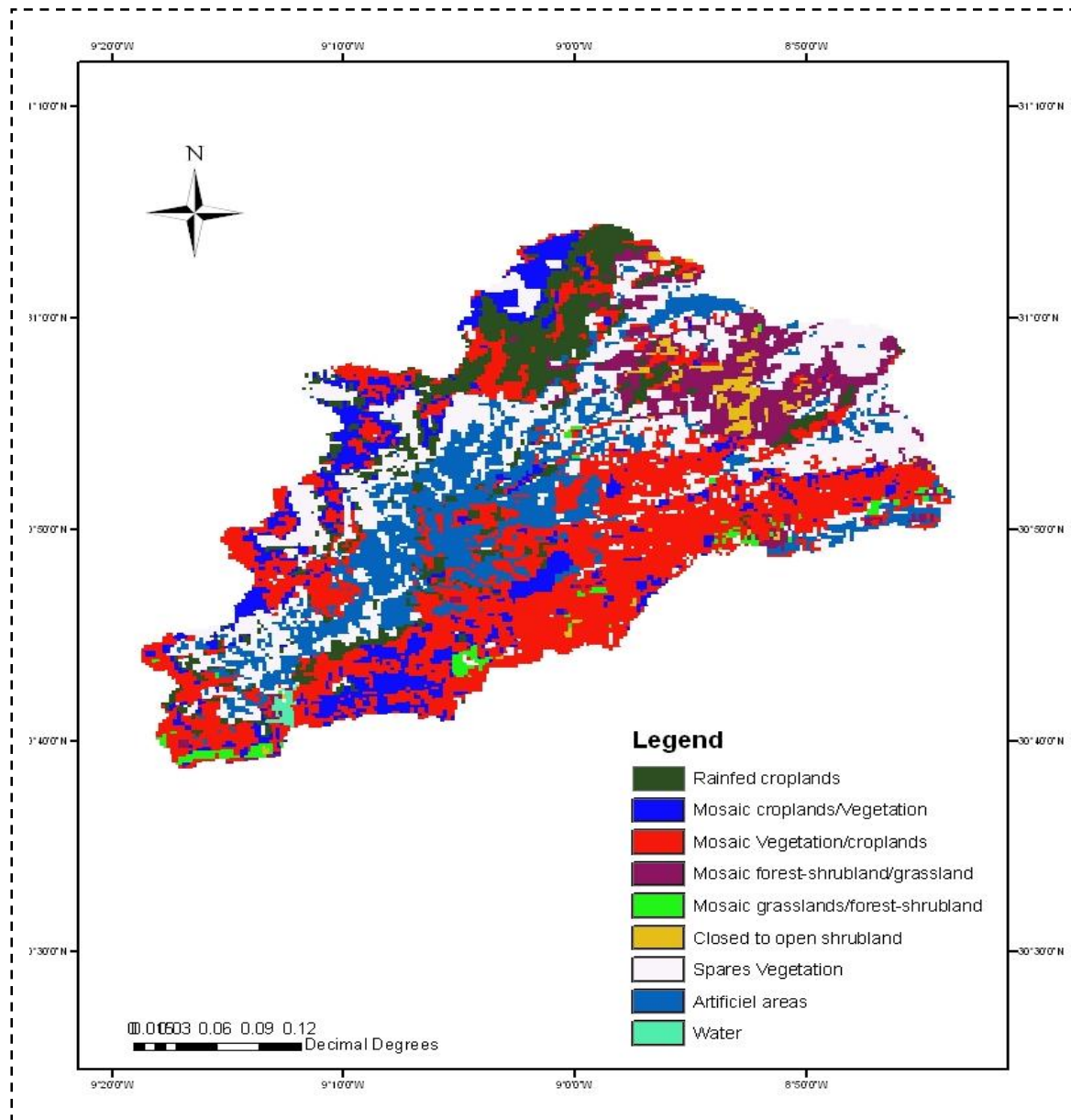


Figure 4-9 : Carte d'occupation de sol du bassin d'Issen

La carte d'occupation du sol a été extraite à partir de GlobalCover Map (**Fig.4-9**), c'est une initiative de l'ESA qui a débuté en 2005 en partenariat avec JRC, EEA, FAO, UNEP, GOFC-GOLD et IGBP. L'objectif du projet était de développer un service capable de fournir des composites et des cartes mondiale d'occupation du sol.

1.3 Cartographie des types de sol du bassin versant d'Issen :

La carte des sols (**Fig. 4-10**) a été obtenue principalement à partir de la base de données du Harmonized World Soil Database (HWSD v1.1) élaborée par Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO - ONU) (Nachtergaele et al. 2009). Cette base de données fournit des données pour 16 000 unités cartographiques de sols différents contenant deux couches (0 - 30 cm et de 30 à 100 cm de profondeur).

- Les Leptosols : les leptosols de la FAO comprennent « des sols limités en profondeur par une couche cimentée continue située endéans les 30 premiers cm du sol ». C'est-à-dire les couches pétrocalciques, pétrogypsiques, pétroferriques ou un duripan. Les leptosols comprennent également des sols dont la teneur en fragments grossiers est très élevée. (Base de référence mondiale pour les ressources en sols, FAO)
- Calcisols : les sols à haute teneur en CaCO_3 appartiennent aux calcisols. Ils sont relativement répandus dans les régions les plus sèches de la terre.

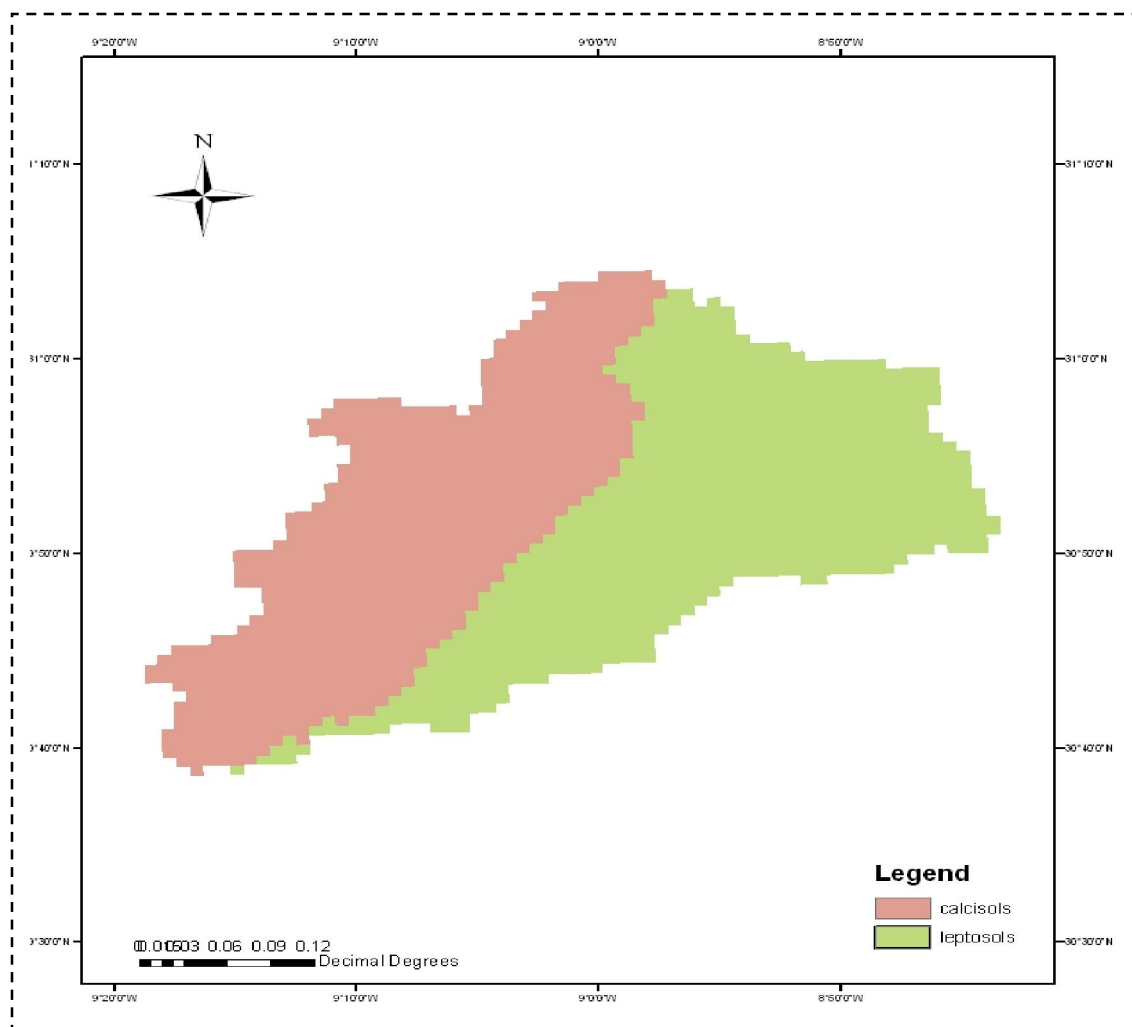


Figure 4- 10 : Carte de type de sol du bassin d'Issen

1.4 Données hydro-climatiques

Les données climatiques constituent la principale variable d'entrée des modèles hydrologiques. Elles définissent le comportement et l'évolution dans le temps des bassins versants et elles constituent les composantes fondamentales des bilans hydrologiques. Ainsi, elles permettent la détermination des quantités reçues (précipitations) et des fractions perdues (évapotranspiration) ainsi que la caractérisation de la dynamique et des interactions du sol avec l'eau, l'air et la végétation (température, rayonnement solaire, humidité, vitesse du vent, etc.). Ces données doivent à la fois refléter l'étendue spatiale de la zone d'étude (relief, proximité des océans, etc.) et son évolution temporelle (succession des saisons, sécheresse, inondations, etc.).

La collecte de cette information doit donc tenir compte de la configuration spatiale du bassin étudié (choix de la position des stations de mesures capables de représenter les différents types et zones climatiques) et du pas temporel du fonctionnement du modèle considéré (pas de temps journalier pour le modèle SWAT).

Dans le cas de la modélisation du bassin versant d'Issen, il s'agit de la collecte des données sur les précipitations, la température (minimale et maximale) et l'évapotranspiration à l'échelle des différentes zones du bassin et pour toute la période d'étude allant de 2007 à 2015 et cela avec un pas de temps journalier. Les données hydrométriques (débits), utilisées pour le calage et la validation du modèle, sont aussi collectées pour la même période et avec la même fréquence.

L'exécution de SWAT demande diverses données météorologiques :

Concernant la zone D'étude.

Cinq types de paramètres sont pris en compte par le modèle :

- les précipitations journalières ;
- les températures maximales et minimales journalières ;
- l'éclairement solaire journalier ;
- l'humidité relative moyenne journalière ;
- la vitesse moyenne journalière du vent.

les données collectées nous aideront par la suite à réaliser un système de génération de données météorologiques Weather Generator Data (WGN).

a- Précipitations

Dans ce travail, les précipitations journalières sur la durée de la simulation sont fournies par les trois stations pluviométriques Aguenza , Amsoul et le barrage Abdelmoumen (**Tab.4-1**) :

Tableau 4-1 : liste des stations pluviométriques au niveau de bassin d'Issen.

NOM STATION	TYPE DE LA STATION	LATITUDE	LONGITUDE	ELEVATION (M)	TIME STEP
7807 BGE ABDELMOUMEN	PLUVIO	29.38925879	-8.25894488	700	1DAY
BARRAGE ABDELMOUMEN	DAM	30.67659196	-9.200061855	700	IR-DAY
1020 AMSOUL	PLUVIO	30.59351151	-7.14211822	860	1DAY
201 AGUENZA	PLUVIO	31.38978931	-6.182067858	720	1DAY

b- Température

La température de l'air joue un rôle primordial dans la modélisation continue du bilan Hydrologique. Elle contrôle l'intensité d'un ensemble de processus liés au cycle de l'eau dont l'évaporation, la transpiration, la fonte de neige ainsi que la croissance des espèces végétaux.

Comme pour les précipitations, l'acquisition de cette information se fait à travers un système de réseau de mesure équipé de matériel permettant d'enregistrer la température instantanée. Les valeurs de la température minimale et maximale à l'échelle de la journée exigée par la modélisation par SWAT peuvent ainsi déduite de ces mesures instantanées stockés au niveau de la direction de la recherche et de la planification de l'eau.

2. Préparation des bases de données nécessaires pour le fonctionnement du modèle SWAT

Une fois qu'on a les données de la température minimale et maximale au pas de temps mensuel sur toute la période d'étude, la deuxième phase de la procédure consiste à générer les informations sur la température minimale et maximale à l'échelle journalière à partir des données mensuelles. Pour cela, SWAT dispose d'un générateur de climat baptisé WXGEN (*Weuiher Generaior*) qui permet d'estimer des données journalières à partir des données mensuelles pour les différents paramètres climatiques (Sharpley et Williams, 1990). L'outil WXGEN s'appuie à la fois sur la série des données mensuelle moyenne et une base de données statistique propre à chaque station à rééchantillonner. Pour effectuer ces tâches, le générateur de climat du modèle SWAT fait appel à un ensemble de concepts mathématiques et de lois statistique : les chaines de Markov pour les précipitations , la loi normal pour les températures minimale et maximale et le rayonnement solaire (Richardson, 1981), la loi exponentielle modifiée pour la vitesse du vent et la distribution triangulaire pour l'humidité relative (Sharpley and Williams, 1990).

Ce système de génération de données météorologiques (weather Generator data) inclus dans le Modèle permet également à l'utilisateur de générer des séries temporelles à partir des Caractéristiques moyennes (moyenne, écart-type, coefficient d'asymétrie, ...) des différentes

Variables. Une composante aléatoire est ajoutée grâce à un générateur de nombres aléatoires Afin de générer des séries différentes à partir d'un seul set de valeurs moyennes pour chaque Variable. Cette fonctionnalité permet donc d'effectuer des simulations dans le cas où les Données météorologiques recueillies ne seraient pas suffisamment abondantes ou de mauvaise Qualité. Ceci constitue un avantage certain pour les pays en développement puisque les bases De données météorologiques n'y sont pas toujours très fournies. Ce générateur de données Météorologiques permettra également d'effectuer des projections tenant compte de Changements climatiques futurs et d'en étudier l'impact sur le bilan hydrologique. Comme dans le cas des caractéristiques des sols, ces données devront être ajoutées à la base de données d'Arcswat via un éditeur de bases de données ou directement dans le fichier Access.

2.1 Elaboration du fichier « Weather Generator Data »

Ce fichier contient un certain nombre de variables statistiques liées aux différentes variables Météorologiques. Celles-ci sont utilisées pour l'estimation des données manquantes et pour la réalisation des simulations. Ces variables sont à calculer sur un maximum d'années, pour nous elles sont calculées sur 29 ans (1982-2010). Pour une description plus précise de ces variables ainsi que les formules permettant de les calculer, voir Deutsch et al. (2005) (Soil and Water Assessment Tool –Input/output File Documentation Version 2005).

Les variables cibles de cette démarche pour chaque mois de l'année sont :

- **TMPMXa** : moyenne mensuelle (mois a) des températures maximales journalières.
- **TMPMNa** : moyenne mensuelle (mois a) des températures minimales journalières.
- **TMPSTDMXa** : déviation standard des températures maximales journalières pour le mois a.
- **TMPSTDMNa** : déviation standard des températures minimales journalières pour le mois a.
- **PCPMma** : précipitations mensuelles (mois a) moyennes.
- **PCPSTDa** : déviation standard des précipitations journalières pour le mois a.
- **PCPSKWa** : coefficient d'asymétrie pour les précipitations journalières pour le mois a.
- **PR_W1a** : probabilité qu'un jour humide suive un jour sec durant le mois a.
- **PR_W2a** : probabilité qu'un jour humide suive un jour humide durant le mois a.
- **PCPDa** : Nombre moyen de jours où des précipitations sont enregistrées durant le mois a.
- **RAINHHMXa** : Précipitations maximum durant 30 minutes sur toutes les années d'enregistrement pour le mois a.
- **SOLARAVa** : éclaircissement solaire journalier moyen pour le mois a.
- **DEWPTa** : moyenne de la température journalière du point de rosée pour le mois a.
- **WINDAVa** : vitesse moyenne du vent pour le mois a.

Le calcul de 14 variables liées au système de génération de données météorologiques est fait comme suit :

Les variables de PCPMma, PCPSTDa, PCPSKWa, PR_W1a, PR_W2a et PCPDa sont calculés à l'aide de programme pcpSTAT (Liersh, 2003)(Fig. 4-11, 4-12).

Le programme pcpSTAT.exe calcule les paramètres statistiques de données de précipitations journalières utilisées par le système de génération des données météorologiques (userWgn.dbf) de modèle SWAT.

Certains de ces paramètres peuvent être calculés sans difficulté, par exemple en utilisant une application tel que MICROSOFT EXCEL, alors que le calcul de PR_W1 et PR_W2 peut prendre beaucoup de temps.

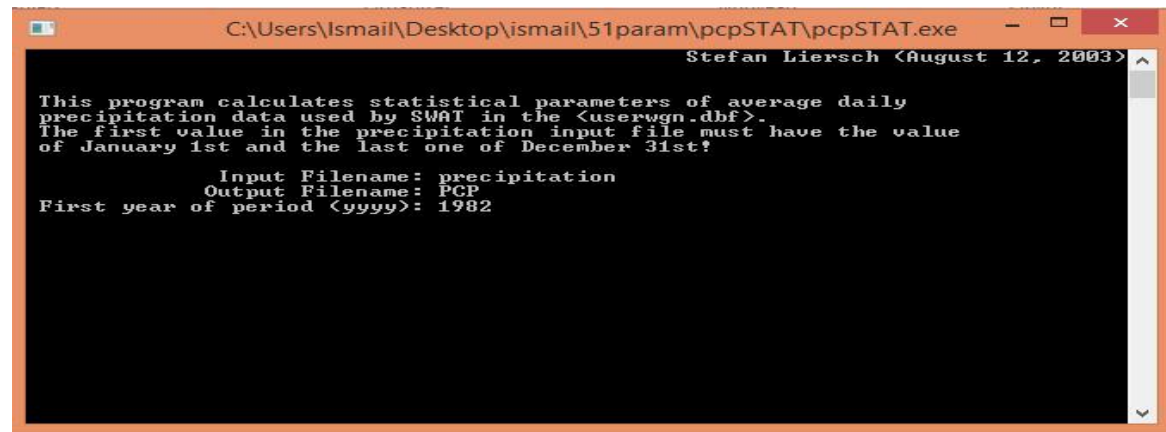


Figure 4-11 : Interface du programme pcpSTAT

Le Paramètre DEWPPT est calculé à l'aide de programme Dew.exe.

Le programme Dew.exe est destiné pour le calcul la température moyenne de point de rosé par mois en utilisant la température journalière et humidité.

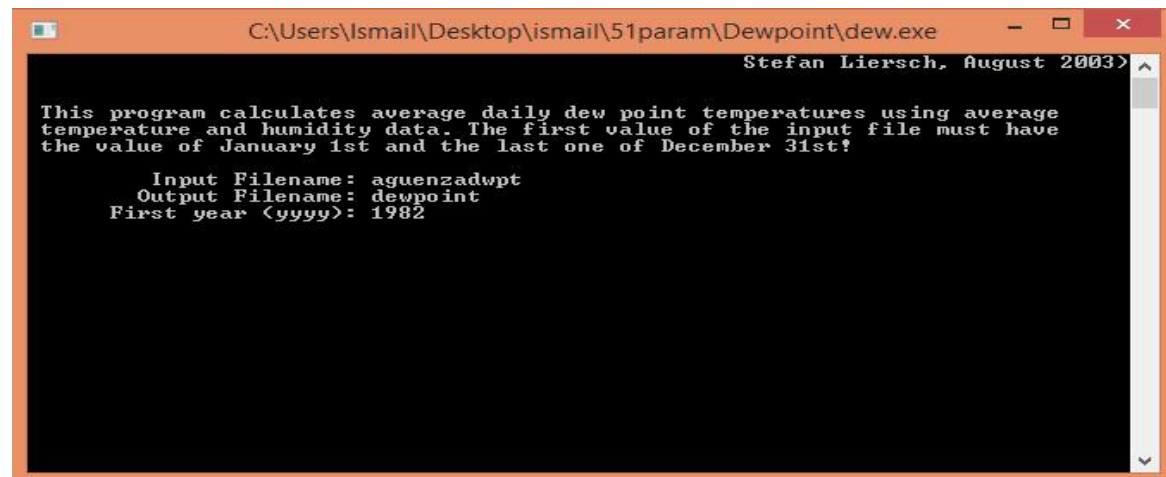


Figure 4-12 : Interface du programme pcpSTAT

2.2 Intégration de la base de données relative à l'Occupation du sol

Lors de l'étape d'intégration de l'occupation du sol, nous devons fournir au modèle la carte D'occupation des sols que nous venons de préparer ainsi qu'une table reprenant les différentes Occupations du sol (**Tab.4-2**). ARCSWAT possède sa propre liste d'occupations de sols parmi lesquelles on a choisi celles correspondant aux différentes classes présentes dans notre bassin

d'issen. et voilà les classes choisies en accord avec notre carte des sols et son table de correspondance.

Tableau 4-2 : Table de correspondance pour la carte d'occupation de sol

<i>OID</i>	<i>Value</i>	<i>SWAT</i>
<i>0</i>	<i>11</i>	<i>AGRL</i>
<i>1</i>	<i>14</i>	<i>AGRL</i>
<i>2</i>	<i>20</i>	<i>AGRL</i>
<i>3</i>	<i>30</i>	<i>RNGB</i>
<i>4</i>	<i>40</i>	<i>FRST</i>
<i>5</i>	<i>50</i>	<i>FRSD</i>
<i>6</i>	<i>60</i>	<i>FRSD</i>
<i>7</i>	<i>70</i>	<i>FRSE</i>
<i>8</i>	<i>90</i>	<i>FRSE</i>
<i>9</i>	<i>100</i>	<i>FRST</i>
<i>10</i>	<i>110</i>	<i>RNGB</i>
<i>11</i>	<i>120</i>	<i>RNGB</i>
<i>12</i>	<i>130</i>	<i>RNGB</i>
<i>13</i>	<i>140</i>	<i>RNGB</i>
<i>14</i>	<i>150</i>	<i>RNGB</i>
<i>15</i>	<i>160</i>	<i>WETL</i>
<i>16</i>	<i>170</i>	<i>WETF</i>
<i>17</i>	<i>180</i>	<i>WETN</i>
<i>18</i>	<i>190</i>	<i>URMD</i>
<i>19</i>	<i>200</i>	<i>RNGB</i>
<i>20</i>	<i>210</i>	<i>WATR</i>
<i>21</i>	<i>220</i>	<i>WATR</i>
<i>22</i>	<i>230</i>	<i>WATR</i>

2.3 Intégration de la base de données relative aux caractéristiques des sols

Les différentes données liées aux caractéristiques du sol à intégrer dans notre modèle :

- une carte pédologique (déjà préparée) ;
- une base de données reprenant les valeurs de plusieurs paramètres pour chaque type de sol Que nous allons décrire ci-après.

Les paramètres qu'on doit fournir sont présentés dans la (Fig, 4-13) .

Paramètre	Unités	Signification
SNAM	-	Nom du type de sol
NLAYERS	-	Nombre de couches dans le sol
HYDGRP	-	Groupe hydrologique
SOL_ZMX	mm	Profondeur racinaire maximum du sol
ANION_EXCL	fraction	Fraction de la porosité pour laquelle les anions sont exclus
SOL_CRK	fraction (m3/m3)	Volume des craquelures (potentiel ou maximum) du sol en fraction du volume total de sol.
TEXTURE	-	Texture du sol
SOL_Z*	mm	Profondeur de la couche (de la surface au fond de la couche)
SOL_BD*	g/cm3	Densité apparente humide
SOL_AWC*	mm/mm	Disponibilité en eau de la couche
SOL_CBN*	% en masse	Teneur en carbone organique
SOL_K*	mm/h	Conductivité hydraulique à la saturation
CLAY*	% en masse	Quantité d'argile contenue dans la couche
SILT*	% en masse	Quantité de limon contenue dans la couche
SAND*	% en masse	Quantité de sable contenue dans la couche
ROCK*	% en masse	Quantité de fragments rocheux contenus dans la couche
SOL_ALB*	nombre entre 0 et 1	Albédo du sol humide
USLE_K*	nombre sans dimension	Facteur d'érodibilité du sol
SOL_EC*	dS/m	Conductivité électrique du sol

Figure 4-13 : Les paramètres de sol à intégrer dans le modèle swat pour la partie sol(Saxton K.E et al 2006)

Dans notre cas, nous ne possédons pas de valeur mesurée sur le terrain. Nous Allons donc estimer ces paramètres. ARCSWAT possède une base de données des Caractéristiques d'un nombre important de sols aux États-Unis avec lesquels nous allons Comparer les sols du bassin d'Issen (Fig.4-14).

Variable	Equation	R^2/S_e	Eq.
Moisture Regressions			
θ_{1500}	$\theta_{1500} = \theta_{1500t} + (0.14 \times \theta_{1500t} - 0.02)$ $\theta_{1500t} = -0.024S + 0.487C + 0.006OM$ $+ 0.005(S \times OM) - 0.013(C \times OM)$ $+ 0.068(S \times C) + 0.031$	0.86/0.02	1
θ_{33}	$\theta_{33} = \theta_{33t} + [1.283(\theta_{33t})^2 - 0.374(\theta_{33t}) - 0.015]$ $\theta_{33t} = -0.251S + 0.195C + 0.011OM$ $+ 0.006(S \times OM) - 0.027(C \times OM)$ $+ 0.452(S \times C) + 0.299$	0.63/0.05	2
$\theta_{(S-33)}$	$\theta_{S-33} = \theta_{(S-33)t} + (0.636\theta_{(S-33)t} - 0.107)$ $\theta_{(S-33)t} = 0.278S + 0.034C + 0.022OM$ $- 0.018(S \times OM) - 0.027(C \times OM)$ $- 0.584(S \times C) + 0.078$	0.36/0.06	3
ψ_e	$\psi_e = \psi_{et} + (0.02\psi_{et}^2 - 0.113\psi_{et} - 0.70)$ $\psi_{et} = -21.67S - 27.93C - 81.97\theta_{S-33}$ $+ 71.12(S \times \theta_{S-33}) + 8.29(C \times \theta_{S-33})$ $+ 14.05(S \times C) + 27.16$	0.78/2.9	4
θ_S	$\theta_S = \theta_{33} + \theta_{(S-33)} - 0.097S + 0.043$	0.29/0.04	5
ρ_N	$\rho_N = (1 - \theta_S)2.65$		6
Density Effects			
ρ_{DF}	$\rho_{DF} = \rho_N \times DF$		7
θ_{S-DF}	$\theta_{S-DF} = 1 - (\rho_{DF}/2.65)$		8
θ_{33-DF}	$\theta_{33-DF} = \theta_{33} - 0.2(\theta_S - \theta_{S-DF})$		9
$\theta_{(S-33)DF}$	$\theta_{(S-33)DF} = \theta_{S-DF} - \theta_{33-DF}$		10
Moisture-Tension			
$\psi_{(1500-33)}$	$\psi_{\theta} = A(\theta)^{-B}$		11
$\psi_{(33-\psi_e)}$	$\psi_{\theta} = 33.0 - [(\theta - \theta_{33})(33.0 - \psi_e)/(\theta_S - \theta_{33})]$		12
$\theta_{(\psi_e-\theta)}$	$\theta = \theta_S$		13
A	$A = \exp(\ln 33 + B \ln \theta_{33})$		14
B	$B = [\ln(1500) - \ln(33)]/[\ln(\theta_{33}) - \ln(\theta_{1500})]$		15
Moisture-Conductivity			
K_S	$K_S = 1930(\theta_S - \theta_{33})^{(3-\lambda)}$		16
K_{θ}	$K_{\theta} = K_S(\theta/\theta_S)^{[3 + (2/\lambda)]}$		17
λ	$\lambda = 1/B$		18
Gravel Effects			
R_v	$R_v = (\alpha R_w)/[1 - R_w(1 - \alpha)]$		19
ρ_B	$\rho_B = \rho_N(1 - R_v) + (R_v \times 2.65)$		20
PAW_B	$PAW_B = PAW(1 - R_v)$		21
K_b/K_S	$K_b/K_S = \frac{1 - R_w}{[1 - R_w(1 - 3\alpha/2)]}$		22
Salinity Effects			
Ψ_O	$\Psi_O = 36EC$		23
$\Psi_{O\theta}$	$\Psi_{O\theta} = \frac{\theta_S}{\theta}(36EC)$		24

Figure 4-14 : Les équations pour le calcul des caractéristiques du sol (Saxton et al ; 2006)

3. Méthodologie de la mise en œuvre du modèle SWAT

3.1 Démarche de la modélisation spatialisée du bassin Issen par le modèle SW AT

En tant que modèle conceptuel, semi-distribué et à base physique, la mise en œuvre du modèle SWAT sur le bassin versant d'Issen a été effectuée en suivant les étapes de modélisation présentées ci-dessus.

L'objectif étant la modélisation du bassin versant d'Issen à travers une approche spatialisée, la démarche d'implémentation du SWAT (**Tab 4-3**) sur cette zone d'étude a porté sur la collecte et la structuration des données selon les exigences de SWAT, le traitement et la constitution de la base de données spatiale puis l'exécution, le calage et la validation du modèle et enfin l'édition et l'interprétation des résultats. L'enchaînement général de cette démarche est illustré au tableau ci-dessous.

Tableau 4-3 : Démarche de la mise en œuvre du modèle SWAT sur le bassin Issen (Fadil 2010)

Définition des objectifs du modèle	Définition des objectifs de la modélisation et des phénomènes à modéliser (hydrologie, érosion, transfert des nutriments)
Préparation des données d'entrée	Collecte et préparation des données d'entrée en fonction du phénomène à modéliser (MNT, pédologie, occupation du sol, climat, etc.)
Traitements SIG	Délimitation du bassin versant, des sous-bassins, du réseau de drainage, des HRU, etc.
Configuration des fichiers d'entrée	Ecriture et édition des fichiers d'entrée et de la base de données SWAT + fichiers utilisateur
Pré-configuration du modfile	Initialisation du modèle et analyse de sensibilité des paramètres du modèle SWAT
Calage t du modèle	1 Calage du modèle pour les phénomènes étudiés sur une période de temps donnée puis validation du modèle sur une autre période
Lecture des résultats	Lecture et interprétation des fichiers et de rapports de sortie (valeurs optimales des paramètres, bilans, etc.)

3.2 Discretisation spatiale du bassin versant d'Issen

La discrétisation spatiale est la première étape à effectuer pour faire tourner le modèle. Elle consiste à extraire à partir du MNT les limites du bassin versant d'Issen ainsi que son réseau hydrographique. Au niveau du modèle SWAT, la procédure de délimitation est automatisée la fenêtre guidant les opérations successives à mettre en place.

À noter que L'extraction du réseau hydrographique est d'une importance capitale pour le bon Déroulement de la simulation.

La discrétisation du bassin versant en sous-bassins se fait par rapport aux points d'exutoire situés sur le réseau hydrographique. Ces points sont définis principalement par :

- La confluence des différentes branches du réseau de drainage généré du MNA utilisé. La densité et le nombre de ces points sont fixés selon le paramètre « Seuil de drainage » qui définit la surface minimale drainée par une zone pour la considérer comme étant parti du réseau de drainage. Ce seuil est déterminé généralement d'une manière expérimentale selon la densité du réseau de drainage souhaité. Dans ce travail, le seuil utilisé est 200 km². Cette valeur correspond au seuil qui permet de générer l'ensemble du réseau hydrographique permanent transcrit dans les cartes topographiques à l'échelle de 1/50 000 ;
- Les stations hydrométriques où les observations mesurées peuvent être utilisées pour le contrôle et le calage du modèle ;
- Les points remarquables du réseau hydrographique qui permettent de générer des zones plus au moins homogènes de point de vue géomorphologique et climatique.
- Il faut signaler que la discrétisation du bassin en sous-bassins revoit une cruciale importance dans le modèle SWAT du fait que les données d'entrée climatiques (précipitations, température, évapotranspiration, etc.) sont affectées directement aux sous-bassins à partir de la station de mesure la plus proche.

3.3 Découpage du bassin en unités homogènes (HRU)

L'unité spatiale de base de fonctionnement du modèle SWAT est l'unité appelée HRU. Cette unité spatiale, censée fournir la même réponse hydrologique, est obtenue à travers la combinaison de 4 couches :

- La couche des sous-bassins ;
- La couche de l'occupation du sol ;
- La couche représentant les types de sol (pédologie) ;
- La couche des pentes extraite du relief.

Chaque unité appartient donc à un seul sous-bassin et elle est constituée du même type de sol, d'occupation du sol et de classe de pente.

Une fois que les couches de sol, d'occupation des sols et de pente ont été importées, la distribution des HRU sur le bassin doit être déterminée. La commande de distribution des HRU SWAT permet à l'utilisateur de spécifier certains critères pour la distribution.

Une ou plusieurs combinaisons sol/culture/pente peuvent être créées sur le bassin. L'utilisateur peut assigner une seule HRU à chaque sous bassin selon la classe de sol, de culture et de pente dominante ou assigner plusieurs HRU. C'est cette méthode qui a été choisie. La distribution des HRU a abouti à la création de 71 unités combinant sol, la pente et cultures.

La création de ces unités entraîne la création d'une vue nommée SWAT View, dernière interface avant le lancement du modèle. C'est à partir de cette vue que vont être rentrées les dernières données nécessaires : données climatiques et pratiques agricoles.

3.4 Intégration des données climatiques

Les données climatiques qui ont été utilisées pour la simulation sur le bassin sont importées une fois que les HRUs ont été distribuées. Une fenêtre spéciale permet l'intégration de l'ensemble des données climatiques. Cette interface nous permet de charger la localisation des trois stations météo. Par la suite on intègre les données des précipitations journalières ainsi que les données de température.

Les données journalières doivent être structurées au préalable avant d'être intégrées dans le modèle. Chaque type de paramètres à sa structure propre afin que l'ensemble des données soient compatible avec le modèle. Un remodelage des données fournies par les stations météo a donc été nécessaire. Cette transformation s'est effectuée avec le logiciel open office. La table des précipitations localisant trois pluviomètres doit être structurée de la façon indiquée sur le tableau ci-dessous,

Tableau 4-4 : Format de fichiers WGN locations

<i>OID</i>	<i>ID</i>	<i>NAME</i>	<i>XPR</i>	<i>YPR</i>
1	2	W34250	140550	422600
2	3	W35000	148975	432400
3	4	W35450	148970	432430

Le principe est identique pour les autres paramètres (température, vitesse du vent, Ensoleillement...) seule la structure des tables diffère légèrement.

Lorsque l'intégration des données d'entrée est achevée, SWAT prépare les tables de base contenant les informations nécessaires à la création des données d'entrée par défaut. Elles récapitulent les caractéristiques physiques et chimiques des sols, des bassins versants, des HRU, des chenaux d'écoulement, de la nappe, des pratiques (activités pastorales et agricoles) et de la météorologie.

4. Calage et validation de modèle SWAT au niveau de bassin d'Issen :

4.1 Approche et démarche suivies pour le calage du modèle SWAT :

Il est nécessaire de caler le modèle pour réduire l'écart entre les débits observés et simulés, pour ce faire, il est possible d'ajuster certains paramètres.

a- 1 ère catégorie de paramètres :

L'ajustement de ces paramètres a pour but de répartir les précipitations entre percolation, transfert de subsurface et percolation. Le but ici est d'augmenter le débit d'étiage et favoriser les transferts d'eau vers la rivière en général, pour ce faire, il faut:

- Augmenter le CN (curve number), pour réduire la perméabilité du sol et favoriser le ruissellement.
- Augmenter Sol_AWC : teneur en eau initiale du sol. Augmenter la teneur en eau initiale du sol permet également d'atteindre plus rapidement les conditions de saturation lors d'un évènement pluvieux, donc d'augmenter le ruissellement.
- Diminuer GWQMN (profondeur limite de l'aquifère de surface pour qu'un flux en direction de la rivière se produise). En abaissant ce critère, un flux d'eau allant de l'aquifère de surface vers la rivière se développera plus facilement, permettant de soutenir le débit d'étiage.
- Diminuer RCHRG_DP (taux de recharge de l'aquifère profond par percolation). L'aquifère profond participe peu ou pas au soutien du débit de la rivière; diminuer son taux de recharge permet d'allouer plus d'eau aux aquifères de surface.

b- Seconde catégorie de paramètres :

L'ajustement de ces paramètres a pour but de réduire l'évapotranspiration, et ainsi d'augmenter le rendement en eau.

- Augmenter ESCO (Facteur de compensation de l'évapotranspiration)
- Diminuer GW_REVAP (coefficient de ré-évaporaion directement à partir de l'aquifère de surface). Une partie de l'eau de l'aquifère de surface peut s'évaporer directement, ce coefficient permet de définir ce taux d'évaporation; le réduire permet de conserver davantage d'eau dans le sol.
- Augmenter REVAP_MN (profondeur limite de l'aquifère de surface pour que la re-évaporation ait lieu). Augmenter ce critère permet de ne permettre l'évaporation de l'eau du sol d'avoir lieu seulement lorsque l'aquifère est au plus haut niveau de remplissage.

c- Troisième catégorie de paramètres :

- Cette troisième catégorie de paramètres permet d'ajuster le temps de transfert de l'eau depuis les parcelles vers la rivière; et depuis les affluents vers l'exutoire.
- Diminuer la rugosité du sol (coefficient de Manning); cet ajustement permet à l'eau de parvenir plus rapidement au réseau de drainage, et devrait permettre d'aligner le pic de débit simulé sur le pic de débit observé.

- Diminuer la rugosité du lit principal (Manning_chn); cet ajustement permet également d'accélérer le transfert de l'eau dans le réseau de drainage.

4.2 Périodes de Calage et de validation du modèle SWAT :

La procédure de calage-validation nécessite le choix d'une période de calage et d'une ou plusieurs périodes pour la validation.

La période de calage dure 4 ans, de 01/01/2007 à 31/12/2010 (**Tab.4-5**) , le calage consiste en l'ajustement des paramètres du modèle permettant de minimiser les écarts entre débits observés et débits simulés. Pour ce faire, nous faisons varier les paramètres les plus prépondérants afin d'obtenir une simulation correcte tant au niveau hydrologique que d'un point de vue physique.

La période de validation permet d'évaluer si le modèle a été bien calé, en utilisant une ou Plusieurs périodes dont les conditions climatiques sont différentes de celles de la période de calage.

En effet, un modèle hydrologique robuste est capable de représenter les processus d'écoulement quelles que soient les conditions météorologiques mises en jeu. Dans notre étude, la validation concerne la période de 1/01/2011 à 1/1/2015.Ce calage manuel consiste à adapter les valeurs de **14** paramètres de nature empirique choisis

Comme étant prépondérants pour le calage jusqu'à obtenir des sorties du modèle les plus proches possibles des données observées. Nous comparons alors les débits journaliers simulés à l'exutoire avec les débits journaliers des cours d'eau mesurés à l'entrée de barrage.

Tableau 4-5 : Période de calage et validation du modèle SWAT

<i>PHASE</i>	<i>DE</i>	<i>A</i>
<i>CALIBRATION</i>	<i>1/1/2007</i>	<i>12/31/2010</i>
<i>VALIDATION</i>	<i>1/1/2010</i>	<i>31/01/2015</i>

La plateforme SWAT est un modèle fortement paramétré, il nous propose 31 paramètres à utiliser durant le calage des débits, parmi eux 25 sont avérés influents.

Le tableau 4-6 montre les paramètres que nous avons choisis avec leurs significations et leurs valeurs après calage.

Tableau 4-6 : les paramètres choisis pour le calage

Paramètre	Nom de paramètre	MIN	MAX	Valeur de calage
CN2	Numéro de courbe de ruissellement	30	98	84
ESCO	Facteur de compensation d'évaporation du sol	0	1	0.84
SOL-AWC	Capacité en eau disponible de la couche de sol considérée (mmH ₂ O/mm sol)	0.001	1	25
ALPHA-BF	Constante de récession de l'écoulement de base souterrain	0.001	1	0.048
GW-DELAY	Délai de recharge de l'aquifère (j)	0.001	365	31
GW-REVP	Coefficient d'évaporation à partir de la nappe souterraine	0	0.2	0.02
CH-K2	Perméabilité des berges des chenaux principaux (mm.h ⁻¹)	-0.01	150	125

La méthode utilisée pour changer les valeurs initiales des paramètres CN2 et SOL_AWC est de multiplier la valeur initiale par une autre valeur en pourcentage, car chaque URH a une valeur de CN2 et de SOL_AWC différente aux autres HRUs, pour les autres paramètres (ALPHA_BF, GW_DELAY, CW_REVP, ESCO, CH_K2) ils sont les mêmes pour tout le bassin, donc on a juste remplacé les valeurs initiales de ces paramètres par d'autres valeurs optimales.

Plusieurs simulations ont été réalisées et plusieurs essais de calibration ont été effectués. Cette procédure est un travail de longue durée et demande beaucoup de temps. Beaucoup de paramètres (seuils, délais) contrôlent l'écoulement de l'eau, et plusieurs combinaisons de Facteurs doivent être essayées.

La simulation a été effectuée au pas de temps journalier mais la visualisation et la représentation des résultats est faite par un Pas de temps mensuel afin de simuler les grandes tendances saisonnières des processus en jeu.

Les graphiques ci-après (**Fig.4-15**) présentent les résultats obtenus pour les deux périodes (calage et validation).

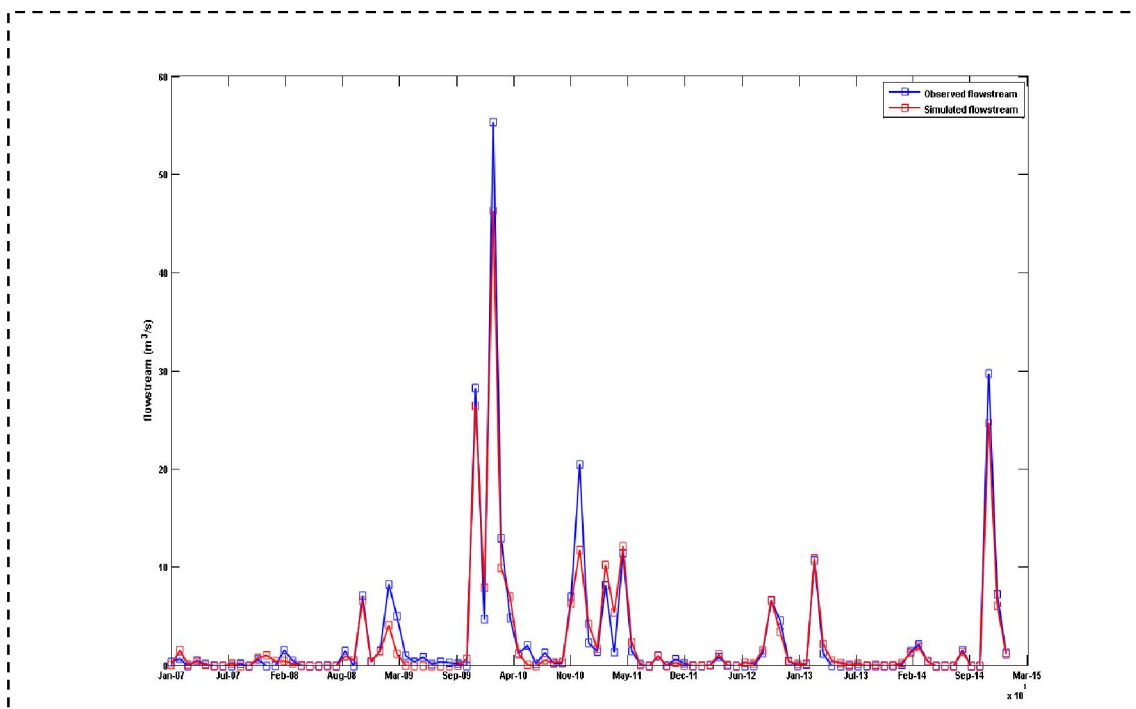


Figure 4-15 : Comparaison entre les débits mensuels simulés et observés (m³/s) sur le bassin versant d'Issen

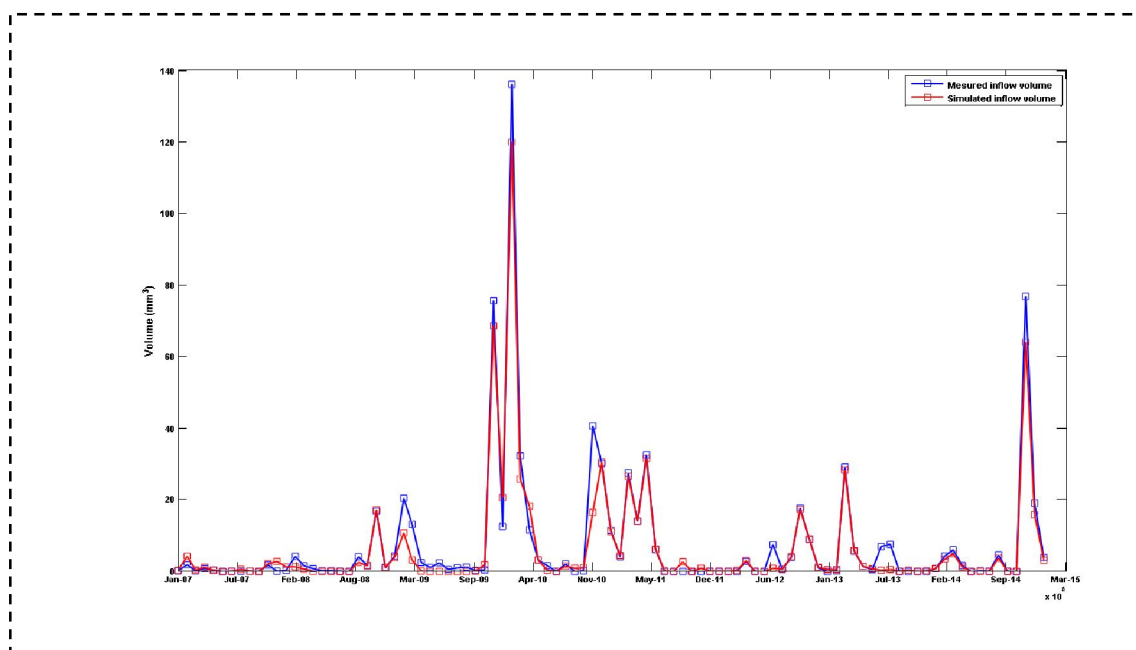


Figure 4-16 : Comparaison entre les volumes mensuels simulés et observés (m³/s) sur le bassin versant d'Issen

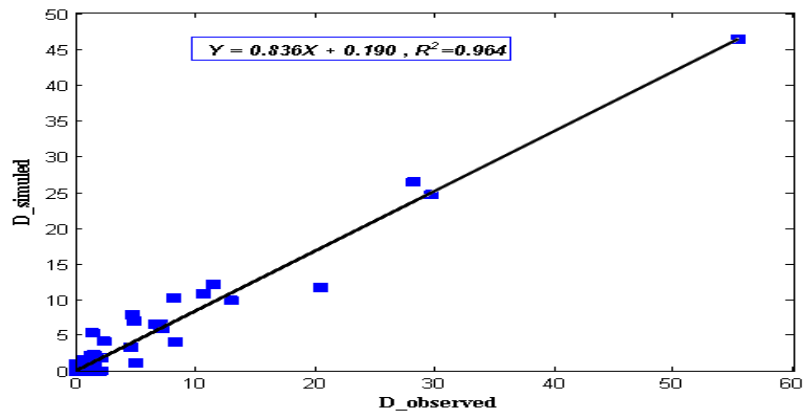


Figure 4-17 : corrélation linéaire simple entre les débits simulés et observés

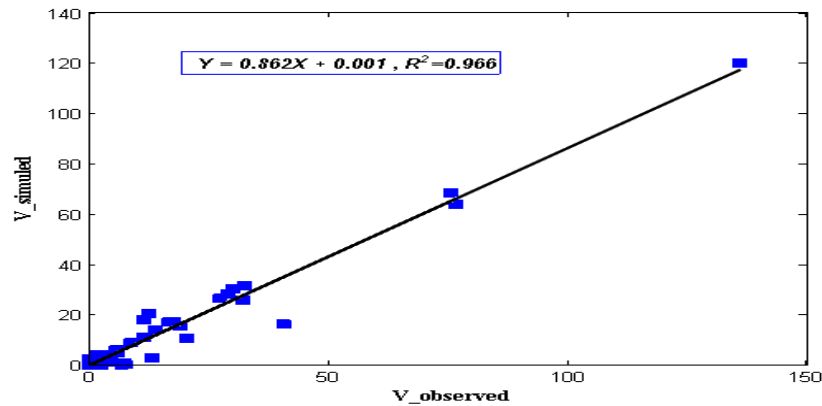


Figure 4-18 : corrélation linéaire simple entre les volumes simulés et observés

Pour l'évaluation de la performance des modèles, le coefficient de Nash (Nash & Sutcliffe, 1970) est utilisé comme critère pour quantifier la précision des simulations.

Le calage de modèle a abouti à un coefficient de Nash sur la période de calage (2007-2010) de NS = 0,84.

Pour la période de validation (2010-2015), le coefficient de Nash est de NS= 0,71.

Tableau 4-7 : valeur de coefficient de Nash en fonction de période de simulation

Période	Coefficient de Nash Journalier	coefficient de Nash Mensuel
Période de calage (2007-2010)	<u>0.84</u>	<u>0.92</u>
Période de validation (2011-2015)	<u>0.71</u>	<u>0.94</u>

Les résultats au pas de temps mensuels apparaissent très satisfaisants, la simulation des débits est fidèle à la réalité. Les coefficients permettant de juger de la qualité de la corrélation Sont très bons, le coefficient de corrélation sur l'ensemble des années modélisées s'élève à 0.94 (Fig.4-18) alors que pour le coefficient de Nash s'élève à 0.84 (Tab.4-7) pour la période de calage mais aussi se décroît à 0.71 pour la période de validation.

A partir des résultats de la modélisation par SWAT, on peut tirer une conclusion pour la présente chapitre, à savoir que le modèle SWAT reproduit de manière satisfaisante les débits mesurés pour la période 2007-2010, ainsi que pour les débits mesurés pour la période 2010-2015, les critères de performance (coefficient de Nash) témoignent d'un bon ajustement des modèles pour la période de calage et validation sur le bassin d'Issen.

Conclusion

L'objectif du présent chapitre était de trouver et d'exploiter un outil capable d'étudier le système bassin versant dans toute sa complexité. Le Soil and Water Assessment Tool (SWAT) s'avère être un outil qui peut répondre à cette demande. Il propose une modélisation hydrologique physique et distribué du bassin versant dont les performances ont été évaluées. Les premières étapes de ce chapitre qui consistaient à mettre en place les premières couches de données nécessaires au fonctionnement de SWAT ont été réalisées avec succès. Les données recueillies auprès des différents intervenants ont été intégrées au modèle, permettant ainsi son bon fonctionnement. Le bassin versant a ainsi été découpé en plus de 37 sous-bassins dont chacun possède une combinaison sol/occupation propre. Une calibration et un ajustement préliminaire ont été réalisés. Beaucoup d'améliorations doivent encore être apporté au modèle pour que celui-ci soit complètement fiable.

CHAPITRE -3-

PRESENTATION ET MISE EN ŒUVRE DU MODELE ATHYS SUR LE BASSIN ISSEN

Introduction

La modélisation du comportement hydrologique des bassins versants est incontournable dès lors que l'on s'intéresse à des problématiques relatives à la gestion des ressources en eau, à l'aménagement du territoire, ou à l'une des différentes facettes du risque hydrologique (Gnouma, 2006). Différentes approches sont utilisées : La modélisation physiquement basée (où chaque phénomène du cycle hydrologique est modélisé sur base de paramètres physiques), la modélisation conceptuelle (où les paramètres empiriques peuvent être abordés par voie itérative ou estimés, le cycle hydrologique restant la base de la conception du modèle) et la modélisation stochastique, qui fait appel à l'analyse statistique ou aux réseaux neuronaux (Todini, 1988 ; Singh, 1995). Jainet al. (2006) présentent une approche mixte dite " boîte grise " intégrant des principes conceptuels dans un réseau neuronal. Le Logiciel ATHYS (Atelier Hydrologique Spatialisé) réunit dans un environnement convivial et homogène un ensemble de modèles hydrologiques associés à des traitements de données hydro-climatiques et géographiques. Il a été développé à l'IRD pour des applications diverses : gestion de la ressource en eau, prévision des événements extrêmes, études d'impact liées à des modifications anthropiques ou climatiques, il a été proposé par Bouvier et al (1996), le projet ATHYS a cherché en priorité à intégrer les fonctions, programmes et modèles existants. Cette première phase a permis de valoriser les différents logiciels jusque-là épars, et de consolider la réflexion concernant l'avenir du projet. Le but de cette présente étude est l'application de divers modèles distribués sur un bassin versant semi-aride d'Issen au sud de Maroc.

1. Présentation du modèle ATHYS

1. Description du modèle ATHYS

Le Logiciel ATHYS a été développé à L'Institut de recherche pour le développement (IRD) par une équipe de chercheurs menée par Christophe Bouvier. ATHYS représente un environnement convivial à vocation hydrologique, destiné à l'analyse et à l'application de modèles spatialisés. Il comprend un module de traitement et de visualisation de données hydro-pluviométriques, un module de traitement et de visualisation de données géographiques et un catalogue de modèles. ATHYS est développé avec le langage Tcl/Tk et le générateur Xf, pour fonctionner sur station de travail. Le premier objectif d'ATHYS est donc de rassembler et d'uniformiser. Les possibilités de visualisation étant naturellement importantes pour préparer les données nécessaires aux modèles et interpréter leurs résultats, le second objectif d'ATHYS est de fournir dans ce domaine un support puissant.

Enfin, ATHYS prétend être un outil ouvert, capable d'intégrer toute sorte de développement futur, programmé en C ou en fortran, sans autre travail que la réalisation de l'interface de présentation, et la transmission des options de traitement et des résultats par voie interne.

ATHYS est constitué de 4 modules (**Fig. 5- 1**):

- **MERCEDES** (Maillage Elémentaire Régulier Carré pour l'Etude Des Ecoulements Superficiels) : plate-forme de modélisation spatialisée pour l'étude de la transformation pluie- débit. MERCEDES est basée sur la discrétisation spatiale du bassin en mailles carrées régulières qui permet de prendre en compte la variabilité spatiale des principaux facteurs qui déterminent les écoulements.
- **VISHYR** (Visualisation des données Hydrologiques) : traitement des données hydro climatiques situationnelles intervenant dans les modèles pluie – débit spatialisés (pluies, débits, températures, évaporation, etc...) comme la visualisation, la correction, la conversion des fichiers de données.
- **VICAIR** (Visualisation des Cartes et Images Raster) : traitement des données géographiques spatialisées intervenant dans les modèles pluie – débit (sols, reliefs, etc...) comme la visualisation, la correction, la conversion des fichiers image ou encore le traitement des MNT.
- **SPATIAL** : plate-forme d'interpolation spatiale.

ATHYS permet de réaliser des simulations Pluies - Débits en intégrant toute une chaîne de traitement à travers 4 modules : MERCEDES : plate-forme de modélisation spatialisée, VISHYR: traitement des données hydro-climatiques stationnelles, VICAIR: traitement des données géographiques spatialisées, SPATIAL: plate-forme d'interpolation spatiale.

Le principal module de calcul est le module **MERCEDES** (Maillage Elémentaire Régulier Carré pour l'Etude Des Ecoulements Superficiels) qui est une plate-forme de modélisation spatialisée pour l'étude de la transformation pluie-débit qui propose ainsi un grand nombre de fonctions de production et de transfert, applicables dans un environnement homogène et convivial.

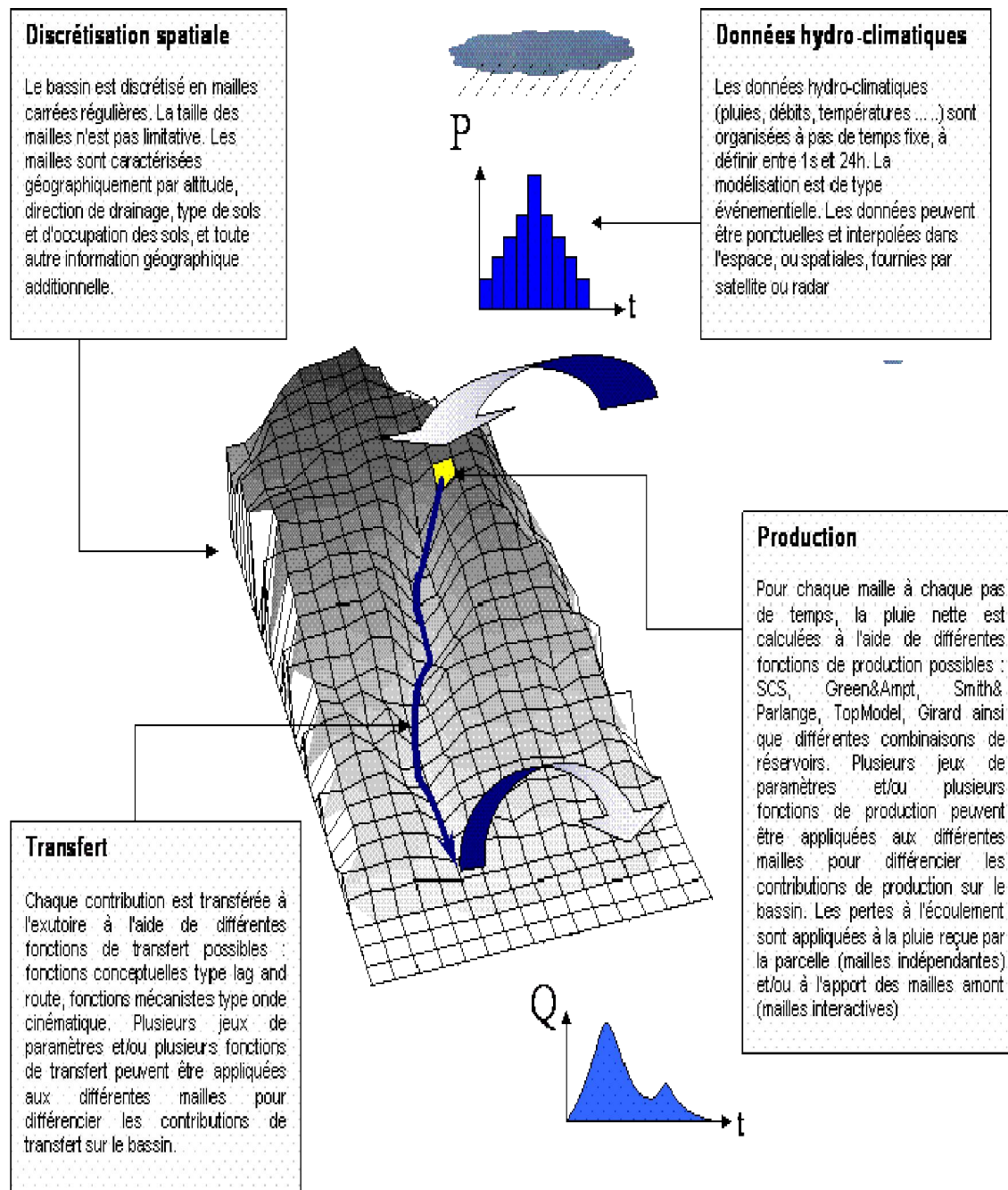


Figure 5-1 : schéma simplifiée de LA plateforme Athys (IRD,2009-2011)

2. Fonctionnement du modèle ATHYS

L'intérêt principal de ce modèle réside dans la possibilité de spatialiser la transformation pluie-débit. En effet, le modèle utilise pour entrant un modèle numérique de terrain (MNT) qui permet de calculer des apports au ruissellement maille par maille. Ce principe est combiné à une spatialisation des données de pluies, qui permet sur de grands bassins versants de tenir compte de la variation spatiale des intensités de pluies.

Le modèle est conçu pour travailler soit en mode continu à l'aide d'une chronique de pluies soit en mode événementiel à partir d'une pluie unique de projet ou réelle.

2.1 Chaîne de calcul pour déterminer les débits ruisselés

Le schéma ci-après (**Fig. 5- 2**) précise la chaîne de calcul du modèle hydrologique ATHYS. Les données de pluie entrées dans le modèle tiennent compte des pertes par évapotranspiration. A partir des pluies efficaces, la fonction de production SCS définie la lame ruisselée, qui représente la proportion des précipitations qui va ruisseler, puis la fonction de transfert (hydrogramme unitaire) calcule les débits à l'exutoire des bassins versants identifiés comme des nœuds de calcul.

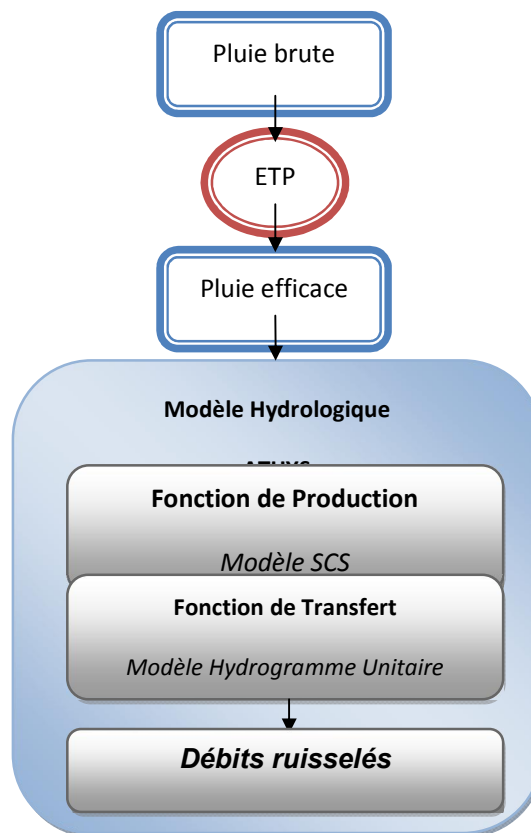


Figure 5- 2 : Détails de la chaîne de calcul du modèle hydrologique ATHYS (khatatti, 2010)

2.2 Modèles de calcul

Le débit généré pour un événement pluvieux (transformation pluie-débit) est calculé en trois étapes (**Fig. 5- 3**):

- Pour chaque maille, le modèle de production permet d'estimer la quantité de pluie qui va contribuer au ruissellement.

- Le modèle de transfert calcule l'hydrogramme produit par chaque maille à l'exutoire du bassin versant. Ce calcul est réalisé à partir du résultat obtenu en appliquant la fonction de production.
- Les apports de chaque maille sont sommés pour obtenir le débit à l'exutoire.

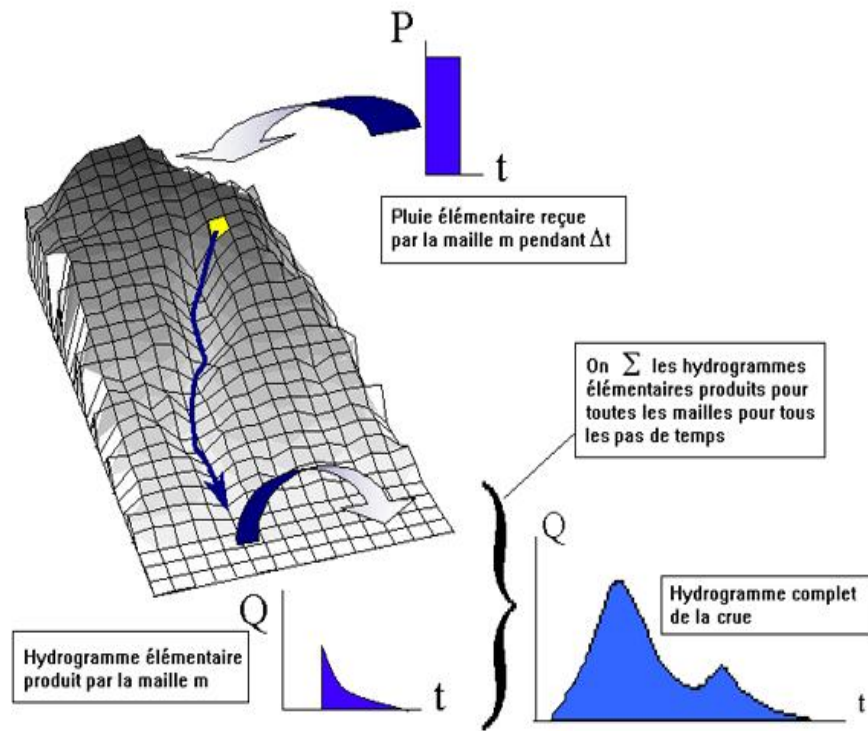


Figure 5-3 : Fonctionnement du modèle ATHYS (IRD,2009-2011)

Le modèle met à disposition plusieurs fonctions de production et de transfert. Les choix suivants ont été opérés :

- Pour la production, le modèle SCS. C'est un modèle conceptuel à deux réservoirs particulièrement adapté pour les débits d'étiage ;
- Pour le transfert, le modèle de l'hydrogramme unitaire, couramment utilisé en hydrologie ;

a- Fonction de production

La fonction de production qui a été utilisée est la fonction SCS (Soil Conservation Service) de l'USDA relie le cumul de la pluie efficace P_e au cumul de la pluie brute P_b (Steenhuis et al., 1995), par l'équation:

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

Où I_a désigne les pertes intervenant en début d'événement et S la capacité de rétention en eau du sol (l'infiltration cumulée). Le modèle exprime l'évolution du coefficient de ruissellement, de 0 lorsque le cumul de pluie brute est inférieur à I_a à 1 lorsque le cumul de pluie brute tend vers l'infini. Dans MERCEDES, on utilise l'expression du coefficient de ruissellement instantané, qui s'écrit (Gaume et al., 2004) :

$$C(t) = \frac{\partial P_b}{\partial P_s} = \left(\frac{P_b - 0.2S}{P_b + 0.8S} \right) \left(2 - \frac{P_b - 0.2S}{P_b + 0.8S} \right) \quad (2)$$

Ce schéma a également été complété, dans MERCEDES, par un réservoir sol, dont le niveau décrit l'évolution du stock hydrique en continu. Le réservoir est alimenté par l'eau qui s'infiltre, et il est vidangé par la reprise évaporatoire, la percolation vers la nappe profonde et l'eau exfiltrée, remise en écoulement gravitaire. La vidange est calculée globalement à l'aide du modèle du réservoir linéaire. Les équations du schéma adopté deviennent donc ; Le Ruissellement est donné par :

$$R(t) = C(t) \cdot i(t) \quad (3)$$

Et pour le coefficient du ruissellement on garde l'équation (2) et la pluie brute P_b devient P^* qui correspond au cumul de la pluie, diminué en fonction de la vidange du réservoir sol. Donc le modèle SCS comporte 3 paramètres: S ou CN , DS , α , S , en mm = la capacité maximale du réservoir sol. Cette capacité dépend de nombreuses caractéristiques du sol : profondeur, hétérogénéité, porosité, conductivité hydraulique, pendage du sous-sol ... Plusieurs interprétations sont possibles pour S : abaques figurant dans la littérature, et reliant S à la nature et à l'occupation des sols (dans le cas de processus dominants hortonien), ou produit de la profondeur du sol par la porosité moyenne sur un profil vertical (dans le cas de processus dominants de type aires contributives). CN , adimensionnel = le Curve Number du modèle SCS original. Si la valeur de CN est différente de 0, le paramètre S est calculé en fonction de CN , quelle que soit la valeur qui figure dans le champ réservé à S . Si la valeur déclarée pour CN est égale à 0, alors la valeur de S sera celle qui figure dans le champ réservé à S .

DS , en jour⁻¹ = coefficient de la vidange exponentielle de la lame infiltrée, simulant la vidange du réservoir sol (évaporation, percolation, ruissellement hypodermique). Une valeur 1 conduit à un taux journalier de vidange de 63% ($=1-\exp(-1)$), et à un taux horaire de vidange de 4% ($=1-\exp(-1/24)$). Les valeurs de DS sont théoriquement comprises entre 0 (pas de vidange) et α (vidange complète du réservoir à chaque pas de temps de calcul, même pour des pas de temps inférieurs à 24h). En pratique, DS peut être assimilé à la pente de la décrue, représentée en coordonnées logarithmique. α , ad. = fraction de la vidange qui participe au ruissellement, sous forme d'exfiltration. Ce paramètre traduit l'écoulement retardé qui provient de la vidange des profils supérieurs des sols, et doit être calé sur des décrues observées.

b- Fonction de transfert

MERCEDES nous offre deux modes de transferts ; transfert en mode mailles indépendantes et transfert en mode mailles interactives ; En mode mailles indépendantes, chaque maille produit à chaque pas de temps un hydrogramme élémentaire à l'exutoire (**Fig. 5- 4**). L'addition de tous les hydrogrammes élémentaires, pour toutes les mailles et tous les pas de temps, fournit l'hydrogramme complet de la crue. L'hydrogramme élémentaire est déterminé par un schéma de type translation/stockage, dépend de :

T_m , le temps de propagation à l'exutoire de la contribution produite par la maille, calculé en fonction des longueurs l_k et des vitesses V_k relatives à chacune des k -mailles de la trajectoire :

$$T_m = \sum_k \cdot \frac{l_k}{V_k} \cdot \frac{60}{dt}$$

K_m , le temps d'amortissement, figurant les variations des vitesses dans le temps. L'amortissement est simulé par un réservoir linéaire, dont la capacité K_m .

$$K_m = K_0 \cdot T_m$$

Où l_k est les longueurs des k -cellules entre la cellule m et l'exutoire, V_0 la vitesse de parcours, qui est censé être uniforme sur l'ensemble du bassin versant (paramètre de routage).

Le temps d'amortissement le K_m est supposé pour être proportionnel au temps de propagation T_m , utilisant un coefficient constant K_0 que l'on suppose aussi pour être uniforme sur le captage entier (le paramètre de décalage), donc le débit élémentaire pour chaque maille du bassin s'écrit :

$$q(t) = \frac{p(\Delta t)}{K_m} \cdot \exp\left(-\frac{t - (t_0 + T_m)}{K_m}\right) \cdot A$$

Avec : A la superficie du bassin versant

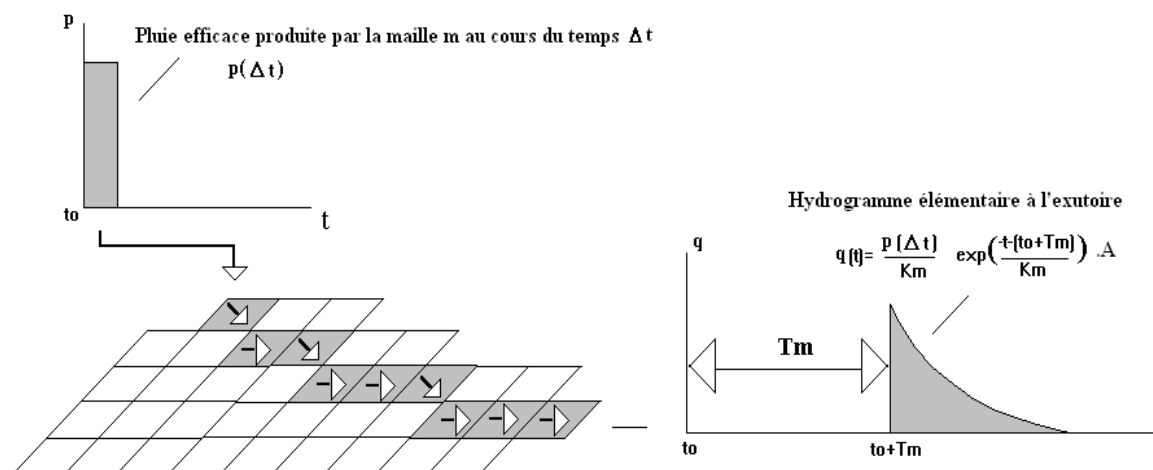


Figure 5-4 : Fonction de transfert pour chaque maille du bassin (Coustaou et al., 2012)

En mode maille interactives, le transfert de l'écoulement de surface sur chacune des mailles est réalisé par le schéma de l'onde cinématique :

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0$$

$$S_0 = S_f$$

où Q désigne le débit (en m³/s), A la surface de la section mouillée (en m²), S₀ et S_f respectivement la pente du fond et la pente de la ligne d'énergie (en m/m), x l'abscisse (en m) et t le temps (en s).

L'application de ce schéma à une structure de mailles carrées régulières a été proposée dans différents modèles (**Fig. 5- 5**), notamment (Vieux et Gaur, 1994), abc (Cappelaere et al., 2003), Marine (Estupina-Borrell, 2004; Roux et al., 2011). A un pas de temps donné et pour une maille donnée, la hauteur d'eau est calculée par le bilan des apports amont (Q_e), du débit de sortie (Q_s), et du débit produit par la maille (Q_p). Le débit produit par la maille résulte de l'application de la fonction de production au total de la pluie reçue augmentée éventuellement d'une partie des apports de débit provenant des mailles amont. Le coefficient γ fixe la proportion des apports amont auxquels s'applique le schéma de production. Si Q_e est le débit d'entrée et P l'intensité de la pluie reçue sur une maille donnée, le schéma de production qui règle l'infiltration est appliquée à la quantité :

$$P + \gamma \frac{Q_e}{A}$$

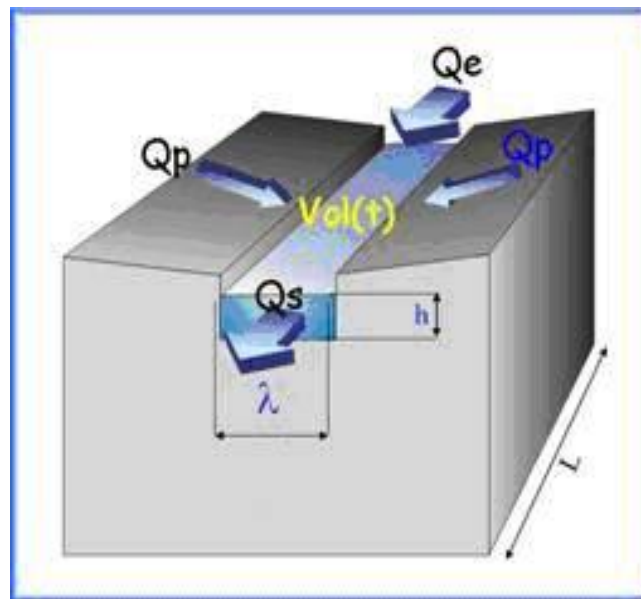


Figure 5-5 : Structure du modèle à mailles interactives (<http://www.athys-soft.org>)

Où A désigne la superficie de la maille.

Les variations des volumes d'eau transitant sur la maille sont calculés par :

$$\frac{dVol(t)}{dt} = (1 - \gamma) \cdot Q_e(t) - Q_s(t) + Q_p(t)$$

II. Traitement des données et mise en œuvre de modèle ATHYS

1- Traitement des données géographiques

Le MNT est un ensemble de points altimétriques (trois coordonnées, x, y et z) situé tous les 90 m. L'assemblage de ces points permet de reconstituer la topographie du site (illustration ci-dessous). Le logiciel traite alors ces données pour obtenir le réseau hydrographique, les sous bassins versants, les classes des pentes...etc (**Fig 5-6**). et pour avoir des résultats correcte il faut apporter des corrections à la main surtout pour les fichiers des drainages (illustration ci-dessous pour quelques traitements).

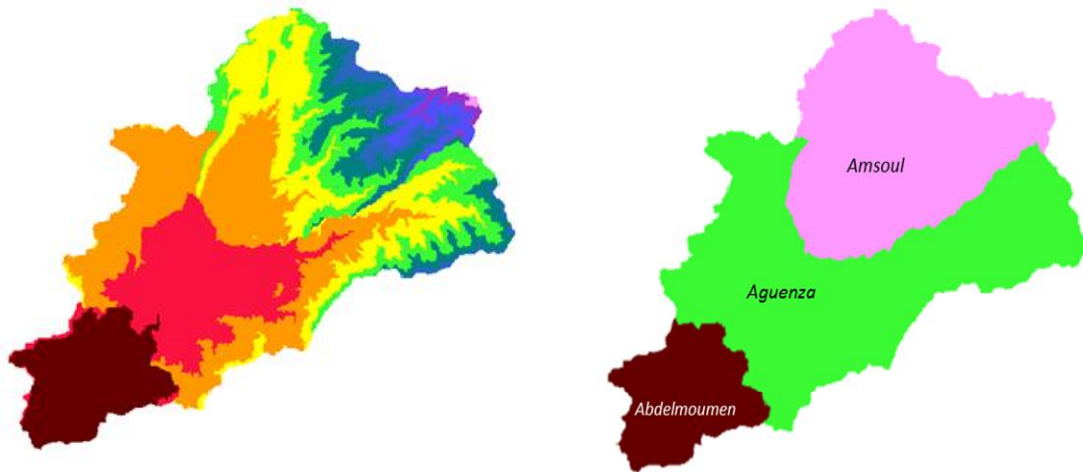


Figure 5-6 : Ttraitement spatial sous ATHYS : carte des altitudes (à gauche), et la carte du réseau hydrographique avec les sous bassins (à droite)

2- Traitement des données météorologiques :

2.1 Typologie des fichiers utilisés

Les fichiers des périodes utilisées peuvent être constitués à partir d'un fichier ascii, de type **csv**. Ces opérations sont réalisées dans le module **Vishyr**. Une fois élaborés, les fichiers des deux périodes de calage et de validation peuvent également être visualisés et modifiés dans le module **Vishyr**.

Les fichiers .csv peuvent être constitués sous open office ou excel. Ils contiennent les données de pluie et débit des stations situés dans le bassin d'Issen.

Chaque pas de temps est associée une ligne contenant les données hydrométriques et pluviométriques correspondantes. Ces données sont séparées par des points virgules ou des espaces.

Pour le calcul hydrologique nous avons utilisé les données météorologiques de trois postes pluviométriques : Aguenza , Amsoul et le barrage Abdelmoumen.

Vishyr propose différentes opérations de correction, calcul, gestion et visualisation de données hydro climatiques ponctuelles.

Ces données doivent être préalablement archivées dans un fichier au format FTS62 ou **FTS63**. A travers l'importation à partir d'un fichier ASCII type .CSV, contenant l'ensemble des données.

2.2 Données Hydro-climatologiques

Toutes les données utilisées dans cette étude sont développés par DRPE (direction de la recherche et de la planification de l'eau), avec un pas de temps tous les jours de janvier **2007** à **janvier 2015**.

Le tableau suivant (**Tab. 5-1**) résume l'information sur les stations météorologiques dans la zone d'étude:

Tableau 5- 1: liste des stations hydro-climatologiques au niveau de bassin d'Issen

STATION NAME	STATION TYPE	LATITUDE	LONGITUDE	ELEVATION (M)	TIME STEP
7807 BGE	PLUVIO	29.38925879	-8.25894488	700	journalier
ABDELMOUMEN					
BARRAGE	BARRAGE	30.67659196	-9.200061855	700	journalier
ABDELMOUMEN					
1020 AMSOUL	PLUVIO	30.59351151	-7.14211822	860	journalier
201 AGUENZA	PLUVIO	31.38978931	-6.182067858	720	journalier

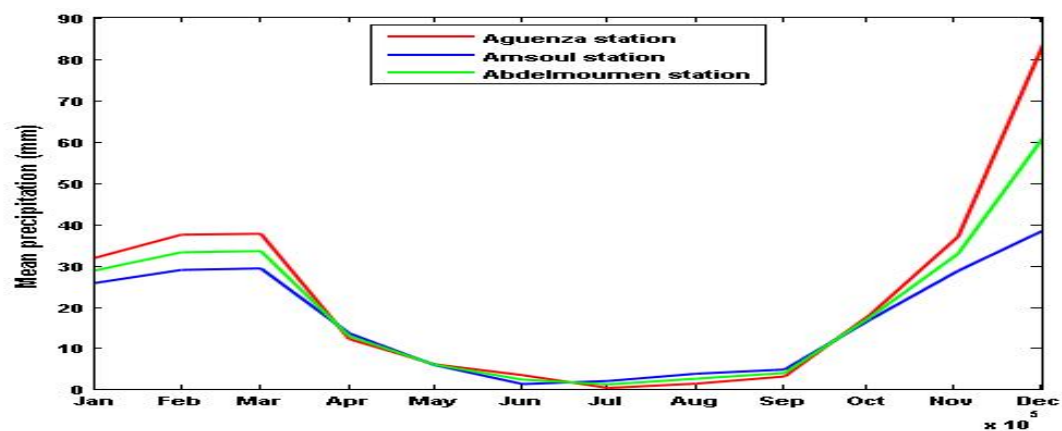


Figure 5-7: moyenne des précipitations mensuelles (1980–2012).

2.3 Période de simulation

Le logiciel est utilisé pour simuler les débits de janvier **2007 à janvier 2015** avec un calage par calcul du débit à l'entrée de barrage Abdelmoumen . La sortie du modèle est un débit journalier entre janvier **2007 à janvier 2015**

Les hydro grammes calculés par le modèle sont au pas de temps journalier. Ce pas de temps est particulièrement intéressant pour les problématiques de gestion de la retenue de barrage Abdelmoumen.

3- Calage et discussion des résultats

Le calage consiste à ajuster les valeurs numériques attribuées aux paramètres du modèle pour reproduire au mieux la réponse observée. C'est le processus de choix de jeux de valeurs des paramètres. Cette opération peut se faire manuellement par une procédure d'analyse de sensibilité du modèle ou automatiquement par une procédure d'optimisation en cherchant la valeur optimale d'une fonction critère donnée qui améliore la cohérence entre la réponse observée et simulée du bassin.

Nous utiliserons dans cette étude une procédure manuelle par l'analyse de sensibilité essentiellement pour les quatre paramètres de chaque fonction de production et par la suite pour la fonction de transfert.

Le modèle ATHYS a été utilisé sur **la période janvier 2007 à janvier 2015** pour réaliser un calage essentiellement pour le barrage Abdelmoumen.

Dans cette étude, les fonctions utilisées sont celles du SCS pour la fonction de production et l'hydrogramme unitaire pour la fonction de transfert, et partir des premiers résultats la fonction SCS a été adoptée vu la qualité des simulations surtout pour les résultats en journalier.

La méthode utilisée à partir de l'analyse de sensibilité permet de :

- Montrer les meilleures valeurs du paramètre S (SCS) qui influence surtout le débit de observé.
- La décrue de l'hydrogramme expliqué par le temps de vidange est généralement influencée par le paramètre DS qui permet d'avoir une meilleur allure entre le simulé et l'observé en terme de tarrisement.

Nous essaierons donc de fixer préférentiellement ceux qui ont le moins d'influence sur l'allure générale de l'hydrogramme, essentiellement pour la fonction de transfert à savoir, le coefficient de diffusion (K0), les paramètres Alfa et K1, et la vitesse de transfert V0.

Les paramètres retenus sont indiqués dans le tableau ci-dessous **(Tab.5-2)** :

Tableau 5-2: Les paramètres retenus de modèle athys au niveau de bassin d'Issen

Paramètres		Classe de production
Fonction de production	$S [mm]$	110
	$w[ad]$	0.1
	$ds [jour^{-1}]$	0.1
Fonction de Transfert	$V0 [m.s^{-1}]$	3
	$Alfa [ad]$	0.1
	$K0 [ad]$	0.7

Le fonctionnement de ATHYS repose sur un calage automatique, qui repose sur la détermination d'un jeu de paramètres optimal par minimisation d'une fonction critère, reprenant la procédure du simplex de Nelder et Mead(Himmelblau, 1972;), et analyse de la sensibilité de la fonction critère aux variations des paramètres.

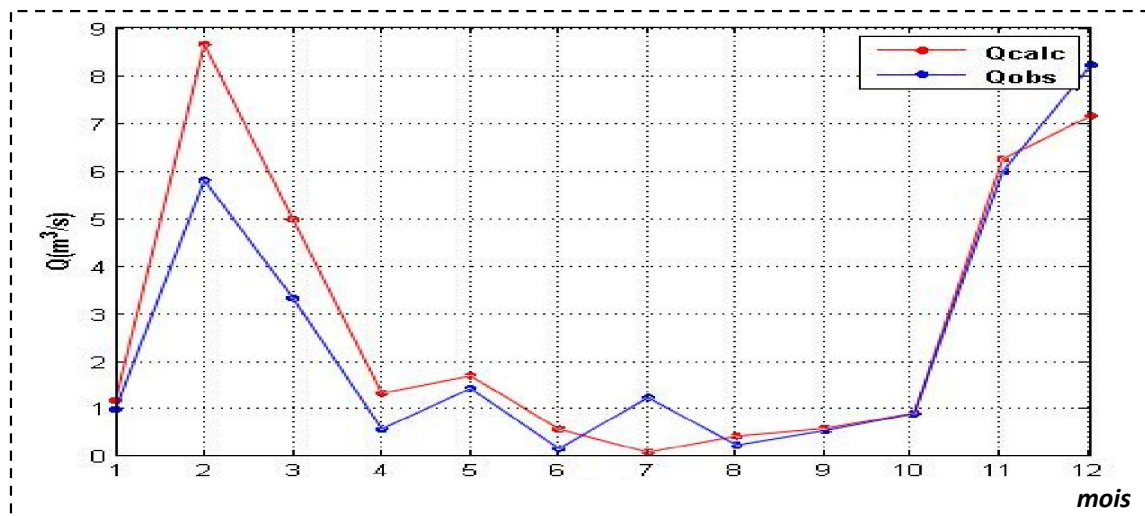


Figure 5-8: Les Débits moyens mensuels observés et simulés d'Issen

Le calage de modèle a abouti à un coefficient de Nash sur la période de calage (2007-2010) de $NS = 0,76$. Pour la période de validation (2010-2015), le coefficient de Nash est de $NS = 0,71$.

Tableau 5-2: valeur de coefficient de Nash en fonction de la période de simulation pour le modèle athys

Période	Coefficient de Nash Journalier	coefficient de Nash Mensuel
Période de calage (2007-2010)	0.76	0.77
Période de validation (2011-2015)	0.71	0.80

Le calage du modèle est donc jugé satisfaisant pour ce qui correspond à l'utilisation ultérieure du modèle.

on remarque que le modèle distribué a tendance surestime les débits observés (**Fig. 5-8**), Nous expliquons cette différence entre les débits simulés et observés par d'éventuelles pertes qui n'ont pas été prise en considérations ou qui n'ont pas été bien optimisés lors de la simulation.

Les résultats de modélisations semblent tirer profit de l'augmentation du nombre de mailles lors de la simulation distribuée dans le bassin versant étudié, mais induit un temps de calcul plus important,

Conclusion

Le modèle ATHYS est d'une grande simplicité d'utilisation. Il réunit dans un environnement convivial et homogène un ensemble de modèles hydrologiques spatialisés, des séries chronologiques pluviométriques journalières permettent le calage automatique des paramètres du modèle, avec l'information sur Le MNT et les directions de drainage du bassin versant, les 4 modules d'ATHYS se chargent de réunir ces données préalables à la simulation.

Le nombre réduit des paramètres du modèle ATHYS, et sa capacité à simuler le comportement hydrologique du bassin versant aride comme Issen nous donnent un large nombre d'applications hydrologiques qui peuvent être envisagées sur le long terme comme la prédiction en temps réel.

CHAPITRE -4-

INTEGRATION DU MODELE GR4J SUR LE BASSIN ISSEN

Introduction

La simulation du débit à l'exutoire d'un bassin versant est nécessaire voire indispensable pour de nombreuses applications d'ingénierie et de gestion de la ressource en eau, telles que le dimensionnement et la gestion d'ouvrages, la prévision des crues ou des étiages, la détection d'impact, etc. C'est pour répondre à ces questions que le Cemagref a commencé à développer au début des années 1980 des modèles hydrologiques (du Génie Rural – GR) permettant de faire le lien entre la lame d'eau précipitée sur un bassin versant et son débit à l'exutoire (Michel, 1983). Au-delà de leur aspect pratique, ces modèles ont soulevé des questions essentielles sur la façon de représenter la transformation de la pluie en débit à l'échelle du bassin versant (Andréasian et al. 2004).

L'idée de la modélisation 'GR' a été lancée par Michel en 1983 après l'analyse d'un modèle conceptuel CREC (Cormary et Guilbot, 1973) à neuf paramètres sur le bassin expérimental de l'Orgeval. Il a été constaté que ce modèle présentait des difficultés au niveau de la mise en œuvre et du calage. L'idée s'est développée alors, en partant du modèle le plus élémentaire possible (un unique paramètre lié à un unique réservoir) et en ne compliquant cette architecture que pour faire face aux difficultés à reproduire les débits réels et non pour satisfaire des conceptions a priori sur le cycle hydrologique. Cette démarche a débouché sur un modèle simple à deux paramètres GR2J (Michel, 1983). Nous avons porté en Annexe 6 un résumé des travaux de modélisation, dont un schéma récapitulatif apparaît par la suite.

I. Historique et philosophie des modèles GR

La division hydrologie du Cemagref Antony développe depuis une vingtaine d'années une série de modèles pluie-débit pour l'hydrologie opérationnelle : les modèles GR pour Génie Rural (Edijatno et Michel 1989; Edijatno et al. 1999). Ces modèles appartiennent à la famille des modèles conceptuels à réservoirs. L'approche est globale. Le pas de temps est le plus souvent journalier même si des modèles dérivés à pas de temps mensuel, annuel et interannuel ont été construits (Makhlouf et Michel 1994). Ces modèles privilégient le principe de parcimonie: la version de base GR3J possède trois paramètres ajustables et aucune version n'en compte plus de cinq.

1. Le modèle journalier GR4J

1.1 Structure du modèle

Le modèle GR4J est le modèle GR le plus largement utilisable. Il s'agit d'un modèle pluie débit à pas de temps journalier et 4 paramètres ajustables. Les données d'entrée sont uniquement les précipitations et l'ETP. La version de base (Nascimento, 1995) a subi plusieurs modifications (Perrin 2000). La plus récente est présentée en Figure 3. Une description mathématique du

modèle est proposée en Annexe 1. La structure du modèle repose sur deux réservoirs : le réservoir sol et le réservoir de routage ainsi que sur deux hydrogrammes unitaires: SH1 et SH2. Une fonction de production assure la répartition quantitative de l'eau dans le modèle. Une fonction de transfert contrôle la répartition temporelle de l'eau alimentant l'écoulement.

1.2 Fonction de production

Une pluie nette P_{net} une évaporation nette E_{sont} calculées à partir des précipitations P_{et} de l'ETP E . P_n alimente le réservoir de production (pluie stockée P_s) et contribue à l'écoulement (Pluie routée P_r). Lorsque toute la pluie est consommée par l'ETP, celle-ci prélève directement E_{ssur} le réservoir de production. Un terme de percolation $P_{erccsort}$ du réservoir de production et alimente l'écoulement. Des échanges F_{se} produisent entre le système modélisé et le milieu extérieur.

1.3 Fonction de routage

P_s se partage en Q_1 et Q_9 . Q_9 est routé par l'hydrogramme unitaire SH2 et alimente le réservoir de routage. Q_1 rejoint l'exutoire après routage par l'hydrogramme unitaire SH1 (débit Q_d). La vidange du réservoir R produit le débit Q_r qui alimente le débit à l'exutoire. La somme de Q_d et de Q_r est égale au débit total Q_du cours d'eau calculé par le modèle.

1.4 Fonctionnement des modèles GR :

Bien que ces modèles soient parfois apparentés à des modèles conceptuels du fait de leur structure à réservoirs, ce sont en fait des modèles empiriques: leur construction s'est faite sur la base de grands jeux de données et en découvrant progressivement la structure permettant de reproduire au mieux le comportement hydrologique du bassin versant (c'est-à-dire sa réponse aux pluies).

Les idées suivantes se sont progressivement imposées au cours du développement de ces modèles pour permettre d'obtenir des modèles fiables et robustes (Mathevet, 2005):

- représentation globale du bassin versant ;
- approche empirique de développement sans recours a priori à la physique des écoulements ;
- augmentation progressive de la complexité de la structure du modèle en partant de structures simples;
- justification de la complexité de la structure d'un modèle par ses performances;
- recherche de structures de modèle générales (applicables à des bassins variés);
- utilisation de larges échantillons de bassins versants pour tester les performances des modèles (Andréassian *et al*, 2006);
- évaluation d'un modèle par comparaison à d'autres structures du modèle.

2. Description et mise en œuvre du modèle GR4J :

Le modèle GR4J (modèle du Génie Rural à 4 paramètres Journalier) est un modèle pluie-débit global à quatre paramètres (**Fig.6-1**). La version utilisée a été mise au point par Perrin en 2002 et améliorée par Perrin et al. en 2003.

Architecture du modèle :

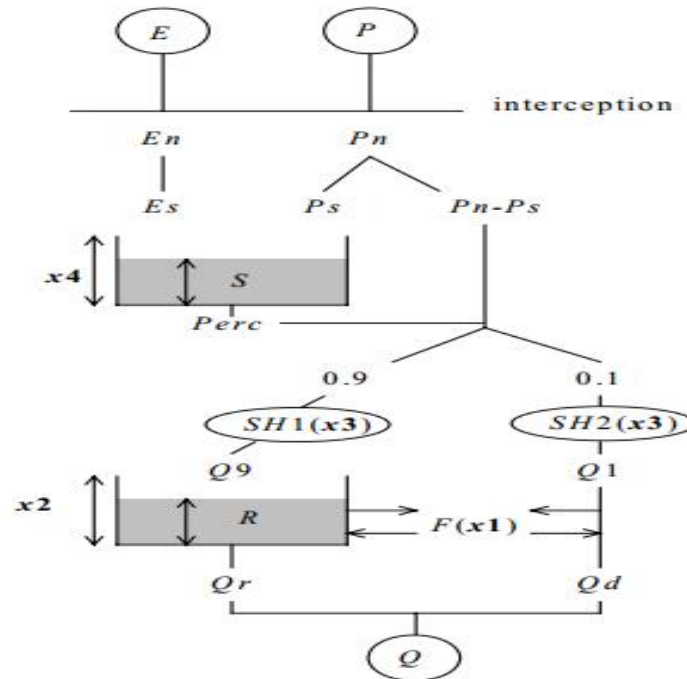


Figure 6-1 : Schéma de la structure du modèle GR4J (Perrin et al, 2003).

- Les quatre paramètres du modèle :
- $X1$: coefficient de la fonction d'échanges souterrains(en mm) ;
- $X2$: Capacité maximale du réservoir de routage (en mm) ;
- $X3$: Temps de base de l'hydrogramme unitaire (en jours) ;
- $X4$: Capacité maximale du réservoir de production (en mm) ;
- Données d'entrée : précipitation et ETP journalières (mm/j) ;
- Données produites : écoulement moyens journaliers (mm/j).

2.1 Description mathématique du modèle :

Selon le schéma de la structure (fig.40), P est la pluie journalière pour un jour donnée et E l'évapotranspiration potentielle moyenne pour le même jour calendaire.

a. Interactions pluie-éapotranspiration :

La pluie brute P du jour j est soumise à l'éapotranspiration E du jour j. Si $P > E$ alors la pluie nette P_n est déterminée par $P_n = P - E$ et $E_n = 0$, sinon $P_n = 0$ et $E_n = E - P$

b. Réservoir sol :

Ce réservoir, caractérisé par sa capacité X_4 exprimé en mm, est alimenté par une partie de la pluie. Ses sorties sont la percolation vers l'hydrogramme unitaire et l'éapotranspiration.

- Si à l'entrée du modèle une quantité de pluie dP_n arrive, il entrera alors dans le réservoir sol :

$$\left[1 - \left(\frac{S}{X_4} \right)^2 \right] dP_n \quad (1)$$

- Si $P_n > 0$, $E_n = 0$, la variation du niveau du réservoir sol est alors :

$$dS = \left[1 - \left(\frac{S}{X_4} \right)^2 \right] dP_n \quad (2)$$

En intégrant cette expression on obtient P_s c'est-à-dire la quantité de pluie s'infiltrant le réservoir :

$$P_s = \frac{P_n \left(1 - \left(\frac{S}{X_4} \right)^2 \right)}{1 + \frac{P_n}{X_4} \left(1 + \frac{S}{X_4} \right)} \quad (3)$$

Cette situation correspond au cas où la pluie neutralise l'éapotranspiration ($P_n > 0$, $E_n = 0$)

Dans le cas où l'éapotranspiration neutralise la pluie, une éapotranspiration élémentaire dE_n correspond à une éapotranspiration réelle de

$$\frac{S}{X_4} \left[2 - \left(\frac{S}{X_4} \right) \right] dE_n \quad (4)$$

Ce qui correspond à une variation négative du niveau dans le réservoir sol :

$$dS = - \frac{S}{X_4} \left[2 - \left(\frac{S}{X_4} \right) \right] dE_n \quad (5)$$

Après intégration :

$$E_s = \frac{E_n \frac{S}{X_4} \left(2 - \frac{S}{X_4} \right)}{1 + \frac{E_n}{X_4} \left(2 - \frac{S}{X_4} \right)} \quad (6)$$

Si les précipitations et éapotranspiration sont égales, le niveau du réservoir sol ne varie pas. Cependant, quelles que soient les données précédentes, il se produit dans le réservoir une percolation qui rejoindra le terme $P_n - P_s$, le niveau du réservoir étant $S = S + P_s - E_s$:

$$perc = S - \left[S^{-4} + \left(\frac{9}{4} X_4 \right)^{-4} \right]^{-\frac{1}{4}} \quad (7)$$

Le niveau définitif du réservoir sol en fin de pas de temps est : $S=S\text{-perc}$.

c. Les hydrogrammes unitaires :

L'eau est ensuite propagée par deux hydrogrammes unitaires dépendant d'un seul paramètre X_3 exprimé en jour.

Première partie : qui représente 90 % de l'eau est traitée par l'hydrogramme SH1 et est ensuite introduite dans le réservoir eau gravitaire. Au jour j si :

- $0 \leq j \leq X_3$:

$$SH1(j) = \left(\frac{j}{X_3} \right)^{\frac{5}{2}} \quad (8)$$

- $j > X_3$, $SH1(j)=1$

Q_9 est le débit sortant de SH1

Deuxième partie : qui représente 10 % de l'eau est traitée par l'hydrogramme SH2. Le débit sortant de ce hydrogramme contribue directement au débit de l'exutoire. Au jour j , k étant la partie entière de X_3 et i la partie entière de $2X_3$, si :

- $0 \leq j \leq k$:

$$SH2(j) = \frac{1}{2} \left(\frac{j}{X_3} \right)^{\frac{5}{2}} \quad (9)$$

- $k < j \leq i$:

$$SH2(j) = 1 - \frac{1}{2} \left(2 - \frac{j}{X_3} \right)^{\frac{5}{2}} \quad (10)$$

- $j > i$, $SH2(j)=1$.

Q_1 est le débit issu de SH2

d. Le réservoir eau gravitaire :

Ce réservoir reçoit le débit Q_9 et est caractérisé par le paramètre X_2 , exprimé en mm, qui caractérise sa capacité. De plus, il existe un flux noté F échangé avec l'eau souterraine qui est calculé à partir du paramètre X_1 . Si X_1 est positif F est un apport sinon F est une sortie. Le flux F est égal à :

$$F = X_1 \left(\frac{R}{X_2} \right)^{\frac{7}{2}} \quad (11)$$

Cet échange concerne non seulement R mais aussi Q_1 qui deviennent :

$$Q_d = \max(0, Q_1 + F) \text{ et } R = \max(0, R + Q_9 + F)$$

Le réservoir se vidange ensuite selon son niveau avec un débit Q_r :

$$Q_r = R - (R^{-4} + X_2^{-4})^{-\frac{1}{4}} \quad (12)$$

Le niveau de ce réservoir en fin de pas de temps devient alors $R=R-Q_r$ et le débit à l'exutoire est donc $Q_{ex}=Q_r+Q_d$.

2.2 Calage du modèle et discussion des résultats :

Quatre paramètres sont optimisés : La méthode est dite 'pas à pas' (Edijatno et Michel 1989).

- x4: capacité maximale du réservoir de production (fixée à 330 mm dans GR3J d'Edijatno et al., 1999)
- x2: capacité maximale du réservoir de routage
- x3: durée de l'hydrogramme unitaire
- x1: paramètre d'échanges souterrains

La procédure de calage a consisté à déterminer les paramètres optimisés à partir des différents critères de qualité en augmentant la longueur des phases de calage et de validation. Les paramètres obtenus ainsi que les critères correspondants ont été représentés en fonction de la longueur de la phase de calage. Nous avons retenu les paramètres pour lesquels les critères de qualités sont optimaux.

La version que nous avons utilisée retenue est la version Excel disponible dans le site du CEMAGREF. Les modèles ont été appliqués sur le bassin d'Issen. Cette station contrôle les entrées dans la retenue de barrage Abdelmoumen. Les données utilisées sont les débits moyens journaliers (GR4J) à l'entrée de barrage. les pluies journalières et les ETP relevées à Abdelmoumen et aux stations les plus proches ont été utilisées. Les données de pluies journalières proviennent des bases de BADRE21 (DRPE). La période choisie pour l'étude est la période allant de 2007 à 2015. Il faut noter que le calage a consisté à déterminer les paramètres optimisés à partir des différents critères de qualité en augmentant la longueur des phases de calage et de validation. Les paramètres obtenus ainsi que les critères correspondants ont été représentés en fonction de la longueur de la phase de calage. Nous avons retenu les paramètres pour lesquels les critères de qualités sont optimaux.

Les périodes modélisés sont présenté dans le tableau suivant (**Tab. 6-1**):

Tableau 6-1 : périodes de simulation. de modèle GR4J

<i>N° de période</i>	<i>période de simulation</i>	<i>Fonction</i>
1	01/01/2007 - 31/12/2010	calage
2	01/01/2011 - 01/01/2015	validation

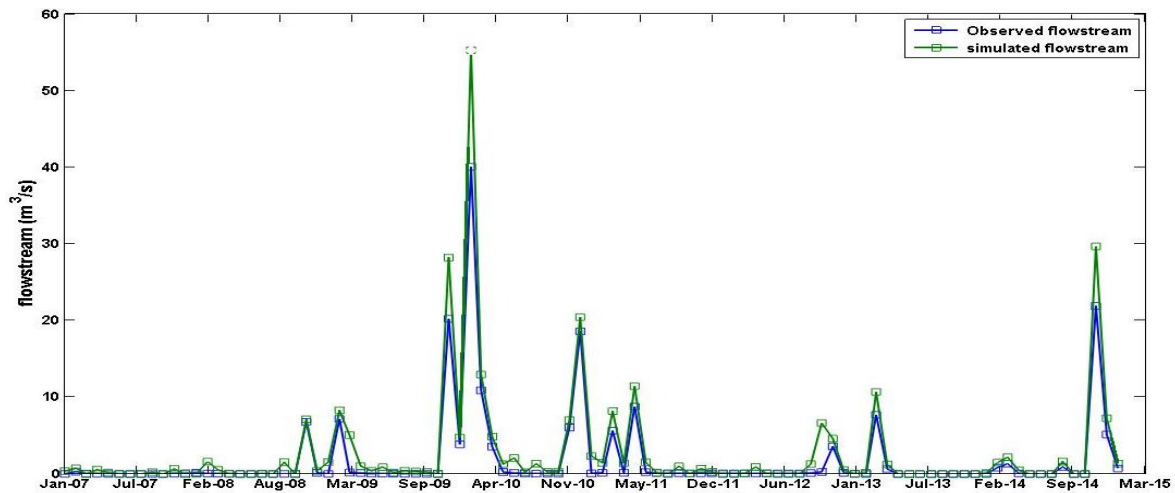


Figure 6-2 : Visualisation de la qualité de simulation avec le modèle GR4J

D'après ces résultats, on peut dire que l'hydrogramme observé est très proche à celui simulé (**Fig.6-2**) , également on peut remarquer que les débits de pointes sont sous-estimé par le modèle et les périodes des étiages sont bien reproduits. Selon le coefficient de corrélation de la fonction débit observé et débit simulé une représentation de la répartition des points selon la droite $y = x$ est importante pour déceler l'alignement des points de ces débits :

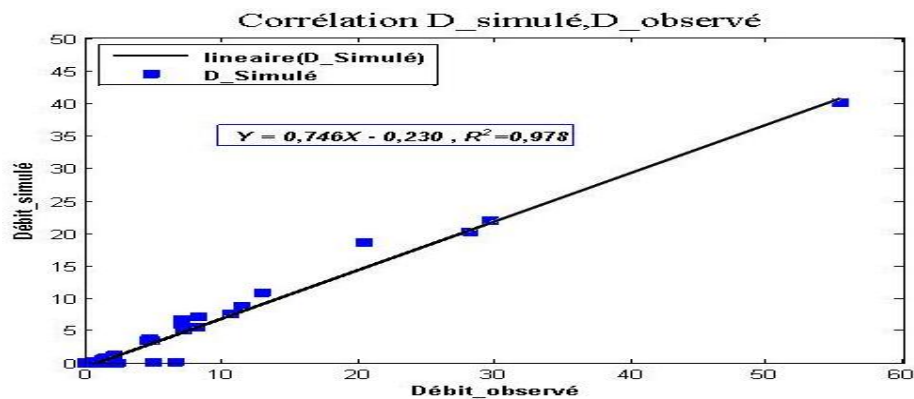


Figure 6-3 : Corrélation entre les débits observés et les débits simulés.

Nous avons reporté dans le tableau 4 les paramètres obtenus pour les différentes périodes. Pour faciliter la comparaison, nous avons représenté l'évolution des paramètres et des critères de qualité en fonction des longueurs des phases de calage et de validation.

Tableau 6-2 : Résultats retenus pour le calage de modèle.

période de simulation	Critère					
	X1	X2	X3	X4	Nash %	R ²
Période de calage						
2007-2010					71.1	0.90
Période de validation						
2011-2015	5.10	0.10	2.30	--0.10	67.2	0.81

- **X1** : capacité du réservoir de production (mm) ;
- X2** : Paramètre d'échange (mm) ;
- X3** : Capacité du réservoir routage (mm) ;
- X4** : Délai (jours) ;
- R²** : Coefficient de corrélation.

Différents essais ont été réalisés pour obtenir le meilleur jeu de paramètres issus du modèle GR (X1, X2, X3, X4). Ces 4 paramètres ont alors été testés mais les valeurs de Nash ne changeaient que très peu. Néanmoins, les paramètres les plus sensibles se sont avérés être la capacité du réservoir de production (X1) et de routage (X3). C'est en insistant sur ces deux paramètres, que le meilleur jeu est finalement obtenu.

Pour le GR4J, les paramètres X2, X3 et X4 varient très peu. Par contre X1 est sensible à la à la période de calage. Le critère de qualité est toujours supérieur à 70%. Le modèle GR4J simulera mal les débits élevés, mais reproduira bien les débits moyens et les débits d'étiage.

Conclusion

Ce chapitre a porté sur la mise en œuvre de modèle GR4J qui a permis de simuler le comportement hydrologique de bassin d'Issen mais il semble être un peu limité du fait qu'il ne tienne pas compte des aspects physiques du bassin versant dans la simulation des écoulements. Il y-a donc lieu de revoir la conception du GR4J ou d'utiliser un autre modèle qui prend compte des propriétés physiques du bassin.

CHAPITRE -5-

M*ODELISATION DU BASSIN D'ISSEN AVEC LE MODELE*

HEC-HMS

«

Introduction

La modélisation hydrologique permet de simuler la réponse hydrologique (débit) d'un bassin suite à une entrée donnée, celle, des précipitations. La détermination des débits de crue et d'étiage permettent une analyse plus profonde des phénomènes hydrologiques extrêmes, tels les inondations, mais aussi de mieux prévenir les périodes de sécheresse, ainsi que d'améliorer la gestion des ressources en eau et des aménagements.

1- Présentation du modèle HEC HMS

1- Description du modèle HEC HMS

Le modèle "Hydrologic Engineering Center Hydrologic Modeling System (HEC-HMS)" Centre d'Ingénierie Hydrologique - Système hydrologique de modélisation a été utilisé pour effectuer des simulations ponctuelles d'écoulement des eaux pour le bassin de Souss Massa. Le modèle fut développé par l'"Army Corp of Engineers", Corps d'Armée d'Ingénieurs des Etats-Unis et est disponible sur son site Web à <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/>.

Le modèle HEC-HMS est conçu pour simuler des eaux de ruissellement et l'écoulement naturel dans les cours d'eau et peut être appliqué à un large éventail de zones géographiques et climatiques. Il peut modéliser les grands bassins fluviaux, les petites lignes urbaines de partage des eaux et toute situation entre ces deux cas de figure. HEC-HMS a été appliquée avec succès dans des études antérieures d'approvisionnement en eau, de disponibilité de l'eau, de drainage urbain, des débits de prévision, des impacts de l'urbanisation, de la conception de lacs artificiels, de réduction de dégâts dû aux inondations, réglementation des inondations des plaines, et le fonctionnement du système (site Web HEC).

Un modèle de base HEC-HMS requière deux principales composantes: un bassin hydrographique et des données d'entrée de précipitation. Les bassins versants sont modélisés dans HEC-HMS en utilisant les sous-bassins. Pour chaque sous-bassin l'utilisateur définit la zone du sous bassin et la méthode pluie-débit. HEC-HMS utilise 3 processus physiques qui sont les méthodes : pertes, transformation et écoulement de base.

La méthode « perte » compte les précipitations qui ne sont pas transformées en ruissellement dans le bassin car elles s'infiltrant dans le sol. La méthode « transformation » contrôle la façon dont les précipitations qui retombent sur le bassin versant deviennent les débits à l'exutoire du sous-bassin. Etant donné que l'HEC-HMS n'est qu'un modèle d'eau de surface, une représentation complète du flux des eaux souterraines n'est pas disponible. Cependant, tout apport aux débits venant des eaux souterraines est estimé par la méthode d'écoulement de base. Pour des modèles HEC-HMS plus complexes, de plus amples éléments peuvent être modélisés dans le bassin versant. Les autres éléments utilisés dans le modèle HEC-HMS du bassin incluent les biefs de routage de l'écoulement, les nœuds de jonction, les lacs artificiels et un exutoire

complet du bassin. Un élément de bief de routage est représenté par les rivières, les cours d'eau et les canaux. Un nœud de jonction est utilisé pour connecter des sous-bassins aux biefs de routage en amont à un simple bief en aval. Les séries chronologiques des débits d'écoulement sont additionnées mais il n'existe pas d'autres méthodes de transformation au niveau des nœuds de jonction. Les éléments de lacs artificiels dans l'HEC-HMS sont très simples. Plus amples informations se trouvent dans la partie 'Lacs artificiels' ci-dessous. Enfin, l'exutoire du bassin de Souss Massa est modélisé par un évier. Dans ce cas là l'élément 'évier' sert comme fin du modèle.

2- Sélection du modèle

Les paramètres initiaux du modèle ont été estimés en utilisant la plateforme de WMS: Watershed Modeling System. WMS utilise les données du MNT, l'occupation du sol et le type de sols comme paramètres d'entrée. WMS permet de faire automatiquement la délimitation des sous bassin et l'estimation des paramètres initiaux.

Les données d'occupation du sol et type de sol sont disponibles sur le bassin d'Issen et serviront de base pour le modèle choisi.

Pour la méthode de transformation, l'hydrogramme unitaire de Clark a été choisi. Les paramètres du temps de concentration initial et du coefficient de stockage peuvent être estimés à l'aide des méthodes empiriques usuels (kirpich,ventura,turraza,...). Ces paramètres ont été ensuite calés. Puisque la grande majorité des bassins n'ont pas d'écoulement important, excepté durant les événements d'averses, les débits de base n'ont pas été intégrés dans la modélisation.

Pour le routage des hydrogrammes, la méthode qui a été analysée c'est la méthode de « Lag time »

La méthode fonctionne bien dans les régions montagneuses qui ont peu ou aucune atténuation. C'est une méthode simple à caler.

Pour l'analyse météorologique en HEC-HMS, il y a deux types de méthodes qui permettent d'utiliser les données des postes pluviométriques disponibles :

- La méthode de pondération dite 'Inverse-Distance' ; pour cette méthode, la latitude et la longitude de chaque poste pluviométrique ont été entrées. Les centres du bassin ont été fournis. Le modèle détecte automatiquement la distance inverse pour chaque poste pluviométrique pour chaque pas de temps. Cette méthode a l'avantage de générer automatiquement les données manquantes dans les séries pour un poste pluviométrique donné à partir des postes voisins. Elle requiert que les séries pluviométriques soient observées à des intervalles réguliers.
- La méthode basée sur les poids attribués aux postes pluviométriques. Elle requière que l'utilisateur sélectionne les postes à utiliser pour chaque sous bassins. Ensuite, il renseigne le poids à attribuer par poste pour la lame de pluie et sa répartition

temporelle. La méthode de Thiessen peut être utilisée pour l'évaluation des poids à attribuer.

II- Mise en œuvre du modèle HEC HMS sur le bassin d'Issen

1- Bases de la modélisation des bassins versants par HEC HMS

Cette section décrit la modélisation mise en œuvre dans le bassin d'Issen en utilisant la plateforme HEC-HMS, disponible gratuitement sur internet (<http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/>) La modélisation pluie-débit des crues nécessite de considérer plusieurs composantes de l'écoulement ; le débit de base, les pertes et le transfert de l'écoulement des versants vers l'exutoire.

1.1 Débit de base

Le débit de base est la composante du débit qui retourne dans le cours d'eau depuis le stockage souterrain et les aquifères. La connaissance du débit de base est importante pour modéliser la récession de l'hydrogramme après la pointe de débit, ainsi que pour estimer le volume de la crue. HEC-HMS dispose de trois modèles pour le débit de base : constant mensuel, réservoir linéaire et récession. Le modèle constant mensuel est une approche très simple mais qui n'est pas adaptée au contexte semi aride, des variations importantes des conditions de saturation des bassins peuvent être observées au cours d'un même mois. La méthode du réservoir linéaire peut être utilisée seulement avec un modèle de pertes de type SMA continu. La méthode de récession est une approche qui utilise un modèle de récession exponentielle du débit de base. Cette approche couramment utilisée est retenue dans le cadre de ce projet (**Tab.7-1**), elle est adaptée pour les bassins où le volume des crues est fortement influencé par les événements pluvieux (USACE 2010). Dans le modèle de récession exponentielle, le débit de base B_t au pas de temps t est défini par :

$$B_t = B_i R_c^t \quad (1)$$

Où B_i est le débit de base initial au temps t_0 et R_c la constante de décroissance exponentielle. Les paramètres de la récession sont :

1. Le débit de base initial, B_i (m^3s^{-1})
2. La constante de récession R_c ([0-1])
3. Seuil, T_d ([0-1])

Le débit de base est le débit initial au début de la simulation. La constante de récession décrit le taux de décroissance du débit de base. C'est la part du débit de base au temps t par rapport au temps $t-1$. Le seuil est le point de l'hydrographe où le débit de base remplace le débit de ruissellement direct, il est exprimé en proportion du débit de pointe de la crue (USACE, 2010).

Tableau 7-1: variables de débit de base sous hec hms

<i>variables</i>	<i>Signification</i>
<i>La constante de récession Rc</i>	<i>ce paramètre dépend des propriétés hydrogéologiques du réservoir souterrain. Elle varie entre 0 et 1. Si sa valeur vaut 1, la contribution du module sera constante avec $Q_t=Q_0$. Puisque, on n'a pas d'informations permettant d'attribuer une valeur initiale à ce paramètre, et que sa valeur peut être calibrée, on se contentera d'une valeur bibliographique en attendant sa calibration.</i>
<i>Le seuil Td</i>	<i>lui aussi varie entre 0 et 1. Il est lié au débit de pointe sous forme de rapport. Par exemple, une valeur de 0.1 et un débit de pointe de 10 m³/s signifie que le module reprendra son intervention une fois le débit atteint 1 m³/s. De même que le RC, nous se limiterons à une valeur bibliographique en attendant sa calibration.</i>

1.2 Fonction de production

Dans le cadre de cette étude, le modèle de pertes SCS (USDA-SCS, 1985) à été retenu (Tab.7-2). De nombreuses études ont en effet utilisé avec succès ce modèle en contexte méditerranéen semi-aride (Brocca et al., 2009; Trambly et al., 2010). Par ailleurs ce modèle est adapté pour rendre compte des conditions initiales d'humidité des bassins versants à l'échelle évènementielle. Le paramètre CN (ou S) peut en effet être relié à différents indicateurs d'humidité des sols, mesurés sur le terrain (Huang et al., 2007 ; Brocca et al., 2009 ; Trambly et al., 2010), issu de modèles (Marchandise et Viel, 2009) ou obtenus par satellite (Brocca et al., 2010).

Dans le modèle SCS, l'excès de précipitations est estimé en fonction des précipitations cumulées sur l'épisode :

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \quad (2)$$

Où P_e désigne l'excès de précipitations, P le total des précipitations, I_a les pertes initiales et S le potentiel maximum de rétention. Dans la méthode SCS, les pertes initiales sont données par la relation $I_a = 0,2S$. Le potentiel de rétention S est relié au *Curve Number* (CN), lui-même pouvant être estimé par des tables décrivant les différents types de sols (USDA-SCS, 1985) ou bien par calibration avec des données observées :

$$S = \frac{254400 - 254CN}{CN} \quad (3)$$

Tableau 7-2: variables de Fonction de production SCS sous hec hms

variables	Signification
<i>CN :</i>	sa valeur varie entre 100 (surface d'eau) et 30 pour des sols très perméables à haut potentiel d'infiltration Il est déterminé pour un composé hydrologique de sol à partir de tables NRCS où on combine la nature de l'utilisation du sol, son traitement, les conditions hydrologiques avec le type de sol pour trouver la valeur de CN normal, qui va être utilisée directement dans les équations citées, ou après l'avoir convertie selon la hauteur de pluie tombée pendant les cinq jours avant l'événement.
<i>Ia :</i>	abstraction initiale mesurée en mm, elle correspond aux pertes initiales provenant durant la première phase de l'événement pluvieux, dû aux interceptions, au stockage naturel dans les dépressions,...etc. L'écoulement ne débute qu'une fois la pluie brute dépasse la valeur de Ia. On estime sa valeur le plus souvent par calibration, cependant il existe des tableaux qui donnent des ordres de grandeur de ce paramètre
<i>Le pourcentage d'imperméable</i>	il désigne la portion de la surface du bassin considérée comme étanche et directement connectée au réseau de drainage. Ce pourcentage est déduit lors de l'élaboration de la carte d'occupation du sol.

1.3 Fonction de transfert

Une fois que les précipitations en excès sont connues, elles sont transformées en ruissèlement direct à travers la notion de l'hydrogramme unitaire (**Fig. 7-1**). La plateforme HEC-HMS dispose de plusieurs fonctions de transfert: hydrogrammes unitaires de Clark, Snyder et SCS, hydrogramme défini par l'utilisateur, la transformation de Modclark et l'onde cinématique. Parmi ces méthodes, l'hydrogramme unitaire de Clark est fréquemment utilisé pour une modélisation événementielle. Cette méthode est particulièrement efficace pour reproduire des hydrogrammes complexes, dans des bassins présentant une topographie et une occupation des sols variés (Sabol, 1988).

La méthode de l'hydrogramme unitaire de Clark représente 2 processus ; la translation et l'atténuation. La translation est basée sur un histogramme synthétique temps-surface avec un temps de concentration T_c . L'histogramme représente la superficie du bassin qui contribue à l'écoulement à l'exutoire en fonction du temps. L'atténuation est modélisée par un réservoir linéaire. Le réservoir représente le stock à l'échelle du bassin, S_t . Le débit sortant moyen du réservoir pendant une période t est donné par :

$$O_t = C_A I_t + C_B O_{t-1} \quad (4)$$

Avec I_t , le débit entrant dans le réservoir au temps t , C_A , C_B , des coefficients calculés avec la relation :

$$C_A = \frac{\Delta t}{S_t + 0,5\Delta t} \text{ et } C_B = 1 - C_A \quad (5)$$

Δt est le pas de temps de calcul.

Les paramètres requis par la méthode de Clark sont donc :

1. Le temps de concentration, T_c (heures)
2. Le coefficient de stockage, S_t (heures)

Ces variables **(Tab.7-3)** peuvent être estimés par calibration lorsque des enregistrements de pluie et débit sont disponibles.

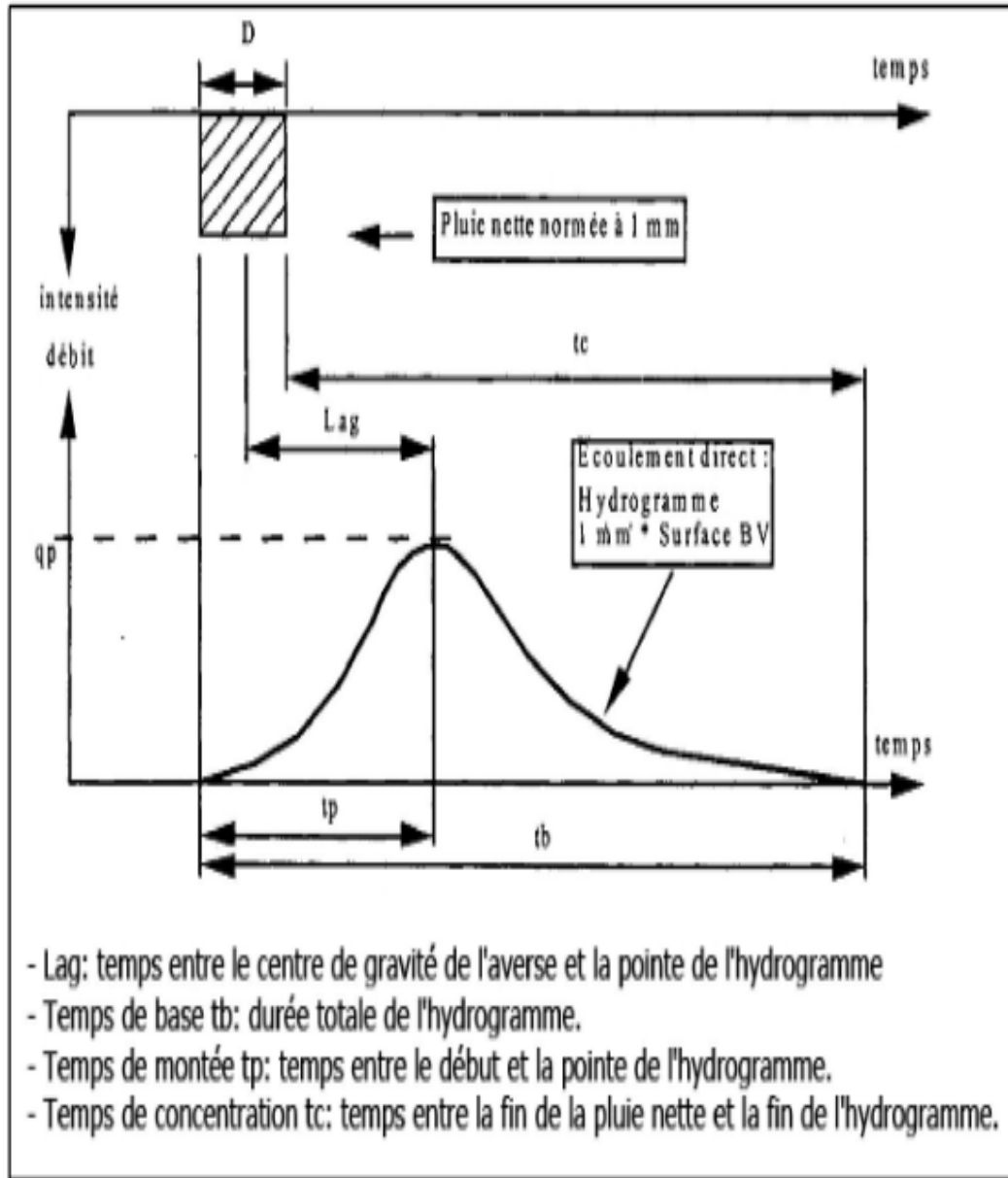


Figure7- 1: La notion d'hydrogramme unitaire et ses caractéristiques fondamentales

(Musy A. et Higy C. 2004.).

Tableau7-3: variables de l'hydrogramme unitaire sous hec hms

variables	Signification
Le temps de concentration TC	résume le processus de translation de la pluie nette le long du réseau hydrographique.
Le coefficient de stockage St :	représente le phénomène de stockage provisoire de la pluie nette dans le bassin versant. Ces deux paramètres sont calculés par le WMS doté de 11 formules pour l'estimation du TC qui donnera par la suite le St. la formule choisie est la méthode de Kirpich définie comme suit: $C_t = 1 + ((80 - CN) \times 0,04)$ $T_c = m \times 0,00013 \times \left(\frac{L^{0,77}}{S^{0,385}} \right) \times C_t$ $S_T = R_{coef} \times T_c$ Où, Ct : le coefficient du temps de concentration ; CN : le CN composite du bassin ; Tc: le temps de concentration ; m : coefficient du type d'occupation du sol ; L : la longueur depuis l'exutoire jusqu'à l'amont du plus grand cours d'eau en pied ; S : pente moyenne du bassin en pied/pied ; S: le coefficient de stockage en heures ; R_{coef}: le coefficient de Clark, il vaut 1.6316.
<u>Tlag :</u>	Le seul paramètre de cette méthode est le T_{Lag}, il sera calculé directement par le WMS qui offre 17 formules pour le faire, parmi elles on a choisi la formule NRCS définie comme suit : $T_{lag} = L^{0,8} \times \left(\left(\left(\frac{1000}{CN} \right) - 10 \right) + 1 \right)^{0,7} / (1900 \times \sqrt{Y})$ Avec, T_{Lag} : le lag en heures ; L : la longueur depuis l'exutoire jusqu'à l'amont du plus grand cours d'eau en pied ; CN : le CN composite du bassin ; Y : pente du bassin en %. Notez bien que la valeur de ce paramètre peut être calibrée par le modèle HEC-HMS.

1.4 Calibration du modèle

La calibration est un processus systématique d'ajustement des paramètres du modèle jusqu'à ce qu'il reproduise fidèlement les données observées.

La mesure quantitative du degré d'ajustement est donnée par la fonction objective. Dans la modélisation pluie-débit, cette fonction mesure la différence entre un hydrogramme observé et celui simulé par le modèle. Différentes fonctions objectives sont disponibles dans HEC-HMS ; la somme du carré des résidus, l'erreur en pourcentage sur le volume ou le débit maximum. La fonction par défaut, la racine de l'erreur quadratique moyenne pondérée pour les fortes valeurs (*peak-weighted root mean square error*) présente l'avantage de considérer à la fois la magnitude et la synchronisation temporelle de la crue. Elle utilise un facteur de pondération, qui donne plus de poids aux valeurs de débit supérieures à la moyenne des débits de l'épisode considéré.

$$PWRMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^N (Q_o(t) - Q_M(t))^2 \frac{Q_o(t) + Q_A}{2Q_A}}{N}} \quad \text{et} \quad Q_A \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N Q_o(t) \quad (6)$$

Avec Q_o le débit observé, Q_M le débit simulé au pas de temps t , et Q_A le débit moyen observé.

Le processus de calibration vise à trouver les paramètres optimaux pour minimiser la fonction objective. Elle peut être manuelle, par essai-erreurs de différentes valeurs de paramètres, ou automatique. Deux méthodes de calibration automatiques sont disponibles dans HEC-HMS :

1. La méthode du gradient univariée, qui permet d'ajuster un paramètre à la fois en tenant les autres constants.
2. La méthode de Nelder et Mead, qui utilise l'approche du Simplex pour optimiser tous les paramètres simultanément.

Le processus d'optimisation automatique est contraint par les valeurs initiales des paramètres à optimiser ainsi qu'un intervalle de valeurs probables à spécifier dans HEC-HMS. Ainsi il est nécessaire de tester l'optimisation avec plusieurs valeurs initiales des paramètres, pour éviter des minimums locaux de la fonction objective pouvant donner des jeux de paramètres non-optimaux. Les valeurs initiales peuvent être estimées de manière empirique avec différentes caractéristiques du bassin versant, comme les tables destinées à estimer le paramètre CN de la méthode SCS (USDA-SCS, 1985). Il est à noter que HEC-HMS ne permet pas la calibration multicritères.

La calibration multicritère repose sur l'utilisation conjointe de plusieurs fonctions objectives, par exemple sur les volumes, la pointe de crue et la synchronisation des évènements de crue (Moussa et Chahinian, 2009).

1.5 Evaluation des simulations

Outre l'examen visuel des hydrogrammes simulés, différentes métriques peuvent être utilisées pour mesurer la capacité du modèle pluie-débit à reproduire le comportement hydrologique d'un bassin. une mesure couramment utilisée en hydrologie est le coefficient de Nash entre les débits mesurés Q et les débits calculés Q_e pour chaque pas de temps t :

$$NASH = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n \left(Q_t - Q_{e_t} \right)^2}{\sum_{t=1}^n \left(Q_t - \bar{Q} \right)^2} \quad (7)$$

2- Simulations de bassin d'Issen avec le modèle HEC-HMS

La structure du modèle détaillé dans la section précédente est utilisée pour modéliser le comportement hydrologique du bassin de d'Issen. Les données de précipitations sont disponibles dans la base de données BADRE21 de la DRPE. Les précipitations sont interpolées par la méthode de l'inverse distance afin de produire une pluie moyenne à l'échelle du bassin. On considère ainsi une modélisation globale, sans spatialisation de la pluie ni des propriétés des sols,

il est nécessaire de fixer tous les paramètres et de proposer de techniques d'estimation pour les paramètres ne pouvant être fixés à une valeur unique pour tous les évènements (Bouvier et al., 2006). Dans un premier temps, les paramètres sont calibrés pour reproduire au mieux le débit observé.

L'intégration des données dans le modèle HEC-HMS, permet d'exécuter la simulation du système de réservoirs de la Tafna. Parmi les résultats engendrés par l'utilisateur, notre intérêt se porte sur les hydrogrammes d'entrée des réservoirs dans l'objectif de gérer les apports du système de bassin d'Issen.

2.1 Configuration du bassin :

La configuration du modèle de bassin (**Fig.7-2**), choisie pour la modélisation du système de réservoir de Abdelmoumen doit s'accorder avec l'objectif de notre travail, pour cela une configuration incluant tous les sous-bassins est nécessaire (Figure 7-2).

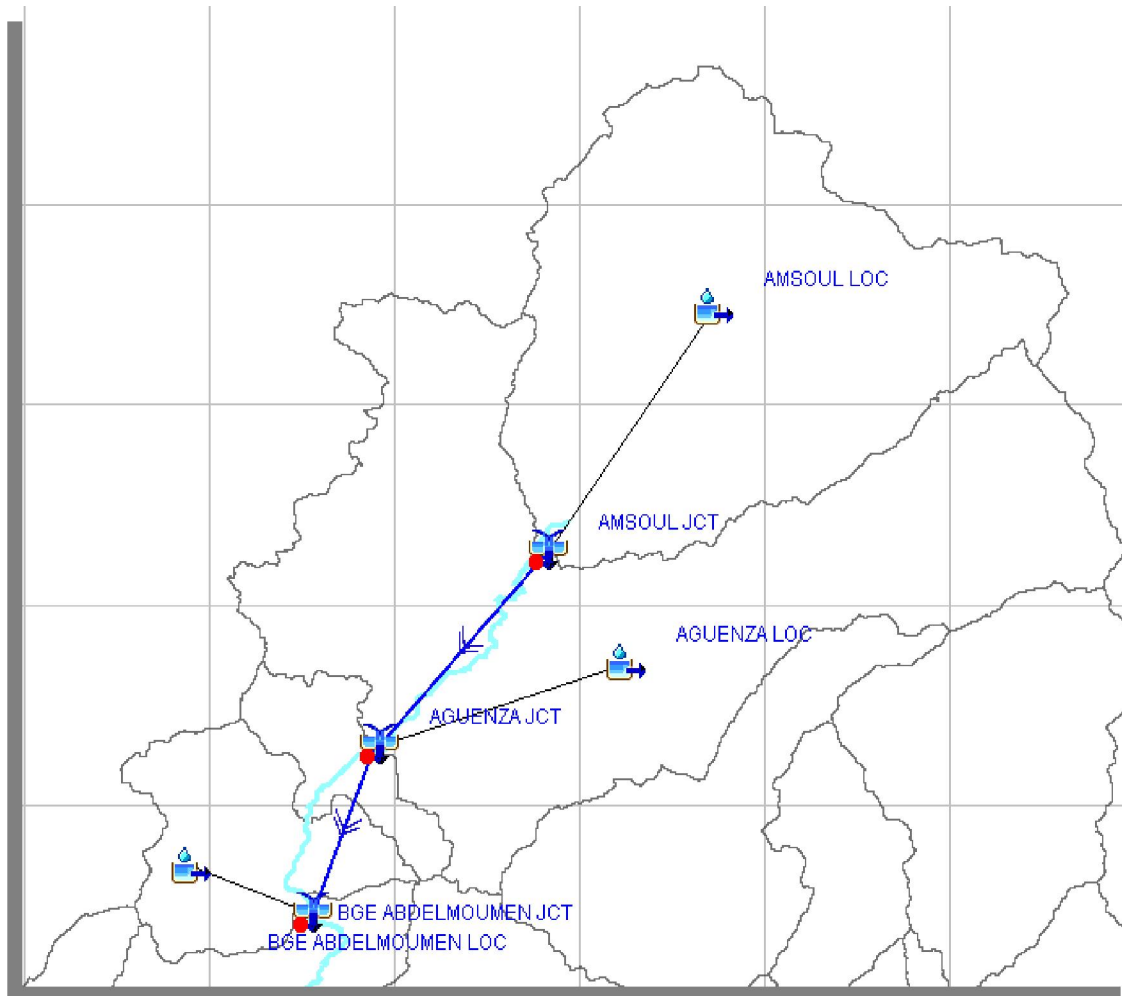


Figure7-2: Configuration du bassin issen sous HEC HMS.

2.2 Estimation des paramètres de modèle HEC HMS au niveau de bassin d'Issen

Les paramètres du modèle de récession pour le débit de base sont fixés par calibration et examen visuel préalable sur toute la période. En effet, ils sont déterminés par les propriétés physiques du bassin. La constante de récession R_c est fixée à 0,75 et le seuil T_d à 0,3. Seul le débit de base initial en début d'épisode est nécessaire. L'approche retenue ici par rapport à un débit de base fixé mensuel.

Les paramètres de l'hydrogramme de Clark sont également déterminés par les caractéristiques du bassin tels que sa superficie, sa forme et sa topographie, mais néanmoins dans certains cas la calibration peut s'avérer problématique et influencer les résultats.

L'estimation des paramètres initiaux a été réalisée dans la plateforme de WMS utilisant la délimitation du bassin, les cartes d'utilisation des terres et de type de sol. Ces paramètres ont été utilisés comme point de départ pour le calage du modèle. Le processus de calage manuel a été limité par l'étendue des données de débits observés.

2.2.1 Estimation du Curve Number (CN)

Le numéro de courbe (CN) (**Fig. 7-3**) renseigne sur la capacité du sol à infiltrer l'eau de pluie. Les valeurs sont typiquement entre 30 et 99 (**Tab.7-4**). Une valeur de 30 correspond à une importante capacité d'infiltration, alors que la valeur de 99 correspond à une absence d'infiltration.

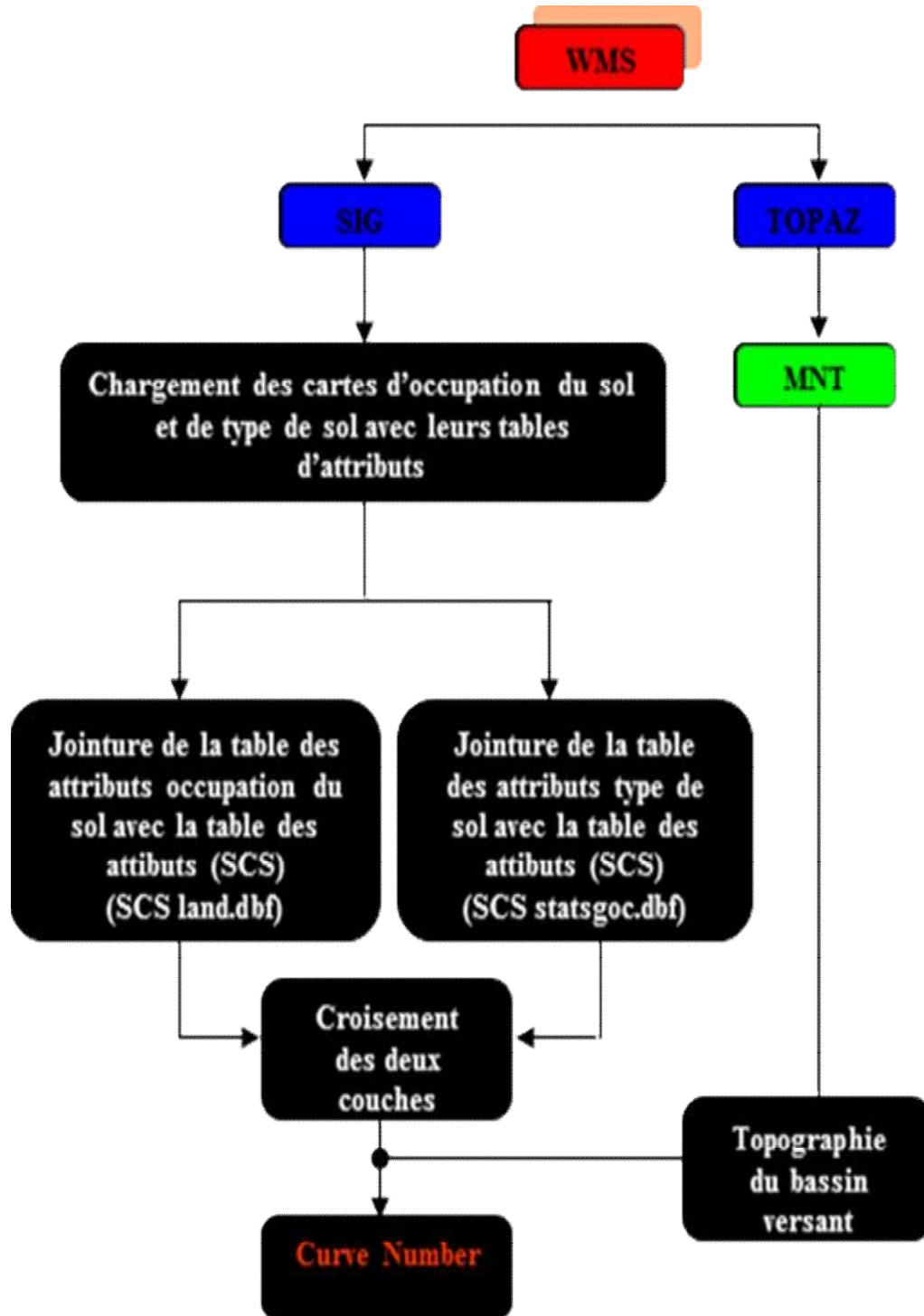


Figure 7-3 : Application du modèle hydrologique (détermination du CN)

La détermination du SCS-CN (Soil Conservation Service - curve number) a été réalisé en utilisant le Module GIS de WMS, par la superposition des deux cartes d'occupation du sol et du types du sol (En code A, B, C) et par la construction des tables attributaires pour chacune de ces cartes en WMS (**Tab.7-5**).

Tableau 7-4: Numéro de Courbe (CN) affecté à chaque type d'utilisation des terres

Code LU	Description	Numéros de Courbe (CN) pour le groupe de sols			
		A	B	C	D
14	Rainfed Croplands	64	75	82	85
16	Rainfed Shrub or Tree Crops	32	58	72	79
20	Mosaic Croplands/Vegetation	64	75	82	85
30	Mosaic Vegetation/Croplands	64	75	82	85
110	Moasic Forest - Shrubland/Grassland	32	58	72	79
120	Mosaic Grassland/Forest - Shrubland	32	58	72	79
130	Closed to open shrubland	30	58	71	78
134	Closed to open broadleaved deciduous shrubland	30	58	71	78
150	Sparse vegetation	39	61	74	80
151	Sparse grassland	39	61	74	80
190	Artificial area	39	61	74	80
200	Bare areas	74	83	88	90
201	Consolidated bare areas	77	86	91	94
210	Water bodies	0	0	0	0

Tableau 7-5 : Numéro de Courbe (CN) composite évalué pour les sous bassins du Souss

Sub-bassin	Curve Number
AMSOUL LOC	79
AGUENZA LOC	77
BGE ABDELMOUMEN LOC	77

2.2.2 Calcul du temps de concentration (Tc)

Le temps de concentration est le temps écoulé entre le début d'une précipitation et l'atteinte du débit maximal à l'exutoire du bassin versant. Il correspond au temps nécessaire pour permettre à l'eau de ruisseler du point le plus reculé du bassin versant jusqu'à l'exutoire.

Le temps de concentration a été calculé par la méthode de Map Data qui se base généralement sur les paramètres géométrique du bassin tel que la pente, la longueur du cours d'eau, . C'est une méthode généralement précise mais qui prend aussi du temps lors du calcul.

La formule utilisée est l'équation de Kerby :

$$\text{Equation} \quad Tc = ((0.67 * n * Lo) / \sqrt{S})^{0.467}$$

Variables:

- **N** : Coefficient de rugosité ;
- **Lo** : Longueur du tronçon (ft);
- **S** : Pente du bassin versant.

Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau suivant:

Une fois le temps de concentration du sous-bassin a été défini, le coefficient de stockage est estimé en fonction du temps de concentration et de l'utilisation du sol (tableau 9). Les hypothèses suivantes doivent être suivies :

$$\text{Storage Coefficient} = C * \text{Time of Concentration}$$

Tableau 7-6 : Facteur C liés aux paramètres du coefficient de stockage et du temps de concentration

Utilisation des terres	Plage de valeurs inférieures	Plage des valeurs supérieures
Zone forestière dense	8	12
Zone agricole	1.5	2.8
Zone urbaine	1.1	2.1

Les résultats d'évaluation du temps de concentration et coefficient de stockage sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 7-7 : Résultats du Temps de Concentration et du coefficient de stockage

Basin	Temps de concentration (hr)	Coefficient de stockage
AGUENZA	3	5
AMSOUL	5	7
BGE ABDELMOUMEN	7	9

2.2.3 Routage utilisant la méthode de propagation dite 'Lag'

Les estimations initiales du temps de routage dit 'Lag' ont été déterminées par une estimation de la longueur du bief à l'intérieur de chaque bassin, et la vitesse d'écoulement. En multipliant ces deux éléments on peut estimer le temps du 'Lag'. La longueur des biefs dans chaque sous-bassin de la zone a été déterminée à l'aide d'ArcGIS et les fichiers shapefiles des sous-bassins et des cours d'eau. La vitesse d'écoulement pour déterminer le temps de propagation a été calée par les données en amont et en aval.

Tableau 7-8 : Valeurs du temps de propagation 'Lag' développées à partir de la vitesse d'écoulement

Bief	Longueur du bief (m)	Aval du	Vitesse (m/s)	T _t (h)
AMSOUL RTD	18345		1.95	2
AGUENZA RTD	5129		1.95	1
BGE ABDELMOUMEN RTD	22199		1.95	3

III- Calage et validation du modèle HEC HMS au niveau de bassin d'Issen

1. Calage du modèle HEC HMS

Après avoir défini, de manière approximative, les paramètres du la plateforme, il est nécessaire d'effectuer un calage du modèle. Le modèle devant être efficient sur plusieurs saisons, il sera calé sur 4 ans (entre 2007 et 2010).

Les paramètres finaux choisis sont récapitulés dans le tableau suivant (**Tab.7-9**) :

Tableau 7-9 : Paramètres choisis pour caractériser le bassin versant sur HEC-HMS

Calage				
Période	Paramètres			
	CN	T _c (heures)	S _t (heures)	Lag(min)
SOUS BASSIN AMSOUL	64	5	5	120
SOUS BASSIN AGUENZA	61	3	3	60
SOUS BASSIN ABDELMOUMEN	62	4	9	60

Lors de ce calage, certains paramètres se sont avérés très sensibles. Une modification mineure de leur valeur entraîne des résultats très différents. Le CN et le Lag Time, pour la modélisation du bassin d'Issen sont apparus comme les paramètres clé à caler.

Les débits moyens à l'exutoire finalement modélisés sont présentés sur ci-après (**Fig.7-4**). On peut observer d'une part les débits moyens mensuels sur chaque année (2007au 2015).

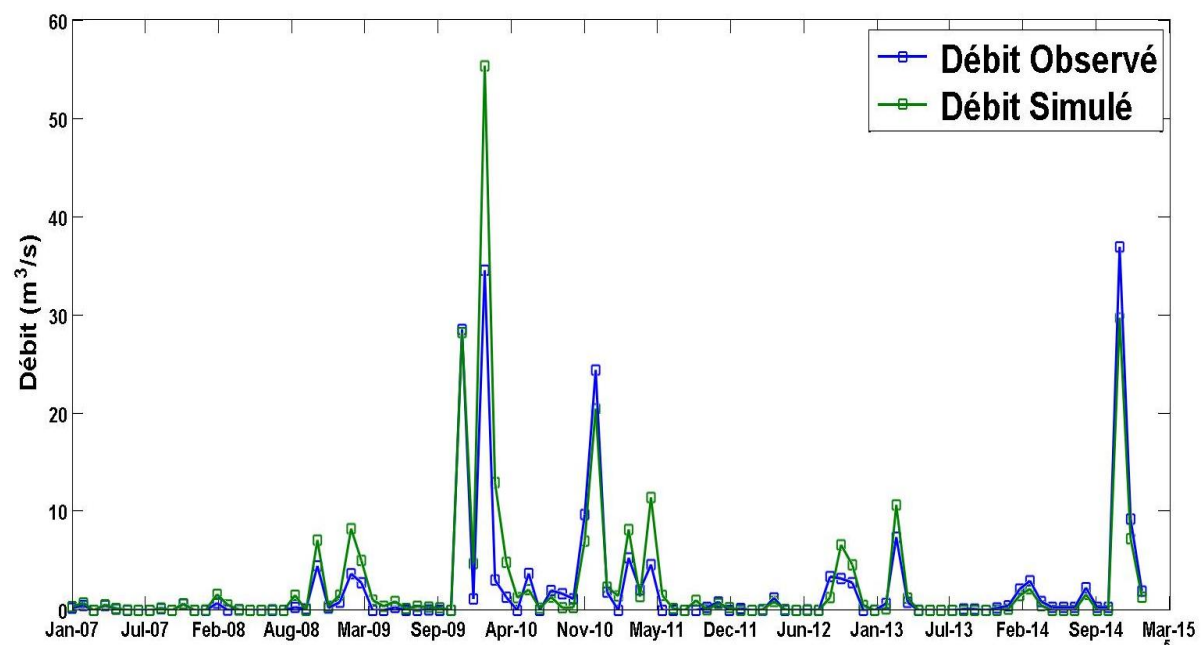


Figure 7-4 – Résultats du calage comparant les débits observés et simulés

On remarque que l'allure générale de la courbe est respectée. Cependant, pour la saison estivale et automnale, les résultats sont souvent sous-estimés. Étant dans l'impossibilité d'obtenir une estimation correcte sur toutes les années de validation.

Les courbes de débits moyens obtenus pour sont généralement très proches,

Le calage de modèle a abouti à un coefficient de Nash sur la période de calage (2007-2010) de $NS = 0,76$. **(Tab.7-10)** Pour la période de validation (2010-2015), le coefficient de Nash est de $NS = 0,71$ **(Tab.7-10)**.

Tableau 7-10: valeur de coefficient de Nash en fonction de la période de simulation pour le modèle Athys

<i>Période</i>	<i>Coefficient de Nash Journalier</i>	<i>coefficient de Nash Mensuel</i>
<i>Période de calage (2007-2010)</i>	<i>0.71</i>	<i>0.76</i>
<i>Période de validation (2011-2015)</i>	<i>0.67</i>	<i>0.71</i>

Conclusion

On constate que les performances en validation sont presque semblables à celle de calage. Il semble que la simulation est satisfaisante puisque le critère de Nash est supérieur à 70%.

Pour conclure, on remarquera que l'interprétation des résultats est rendue difficile par les singularités propres aux zones arides. Le manque de données précises limite les performances du modèle. En effet, les phénomènes hydrologiques (écoulement de surface, pluie) possèdent une très grande variabilité spatiale, les données de débit sont très souvent absentes, la présence tout au plus d'un pluviomètre à l'aval du bassin ne permet pas de prendre en compte l'effet local des précipitations.

3^{ème} PARTIE : *ANALYSE ET ETUDE* *COMPARATIVE DES RESULTATS OBTENUS*

« Dans cette partie, nous présentons résultats des tests comparatifs des quatre modèles précédemment utilisées, que nous analysons, à travers des critères de qualité sélectionnés. Enfin, nous explorons quel est le rôle de la structure du modèle sur ses performances »

Introduction

Le cadre comparatif établi ici a pour but de tester quatre types de structures de modèles hydrologiques sur un bassin versant aride typique, afin d'explorer le rôle du nombre de paramètres optimisables et celui de la formulation du modèle sur la qualité des simulations de débit. Toutes les structures ont reçu les mêmes données et leurs paramètres ont été calés à l'aide d'une même procédure d'optimisation, qui s'est montrée fiable pour localiser des optima satisfaisants. La qualité des simulations a été mesurée en phase de contrôle grâce à plusieurs critères statistiques notamment celle du critère de Nash.

I- Cadre comparatif des modèles hydrologiques

1- Objet de la comparaison des modèles

La comparaison des modèles ci après mentionnés (**Fig. 8-1**) est basée à la fois sur l'étude des performances des modèles, sur le réalisme des modélisations optimales et sur les incertitudes de structure. L'étude des performances est réalisée en trois étapes :

- Identification d'un ensemble de paramètres qui satisfont à un certain seuil de performance sur une base de données de calage.
- Etude des performances sur une base de données de validation.
- Etude des capacités des modèles à travers un Protocole de test des modèles hydrologiques.

L'originalité de la méthodologie d'évaluation des performances des modèles mise en application ici porte sur L'utilisation d'indicateurs spécifiques pour une évaluation multi-critères et multiobjectifs des modèles.



Figure 8-1 : modèles utilisés pour simuler le comportement hydrologique de bassin versant d'Issen

2- Evaluation des modèles

2.1 Protocole de test des modèles hydrologiques

Nous adopterons ici la procédure du "split sample test" proposée par Klemeš (1986) pour le test des modèles hydrologiques. Il s'agit d'un test en calages-contrôles croisés sur périodes indépendantes. La série totale disponible est divisée en deux périodes, P1 et P2, ayant des longueurs similaires. Le test consiste à réaliser :

un calage du modèle sur la période P1 puis un contrôle sur la période P2 ;

Le modèle sera jugé acceptable sur le bassin si les résultats en contrôle sont acceptables au regard des critères d'évaluation utilisés (**Fig. 8- 2**). L'intérêt de cette procédure est qu'elle permet d'avoir une évaluation du modèle en contrôle sur l'ensemble des données disponibles.

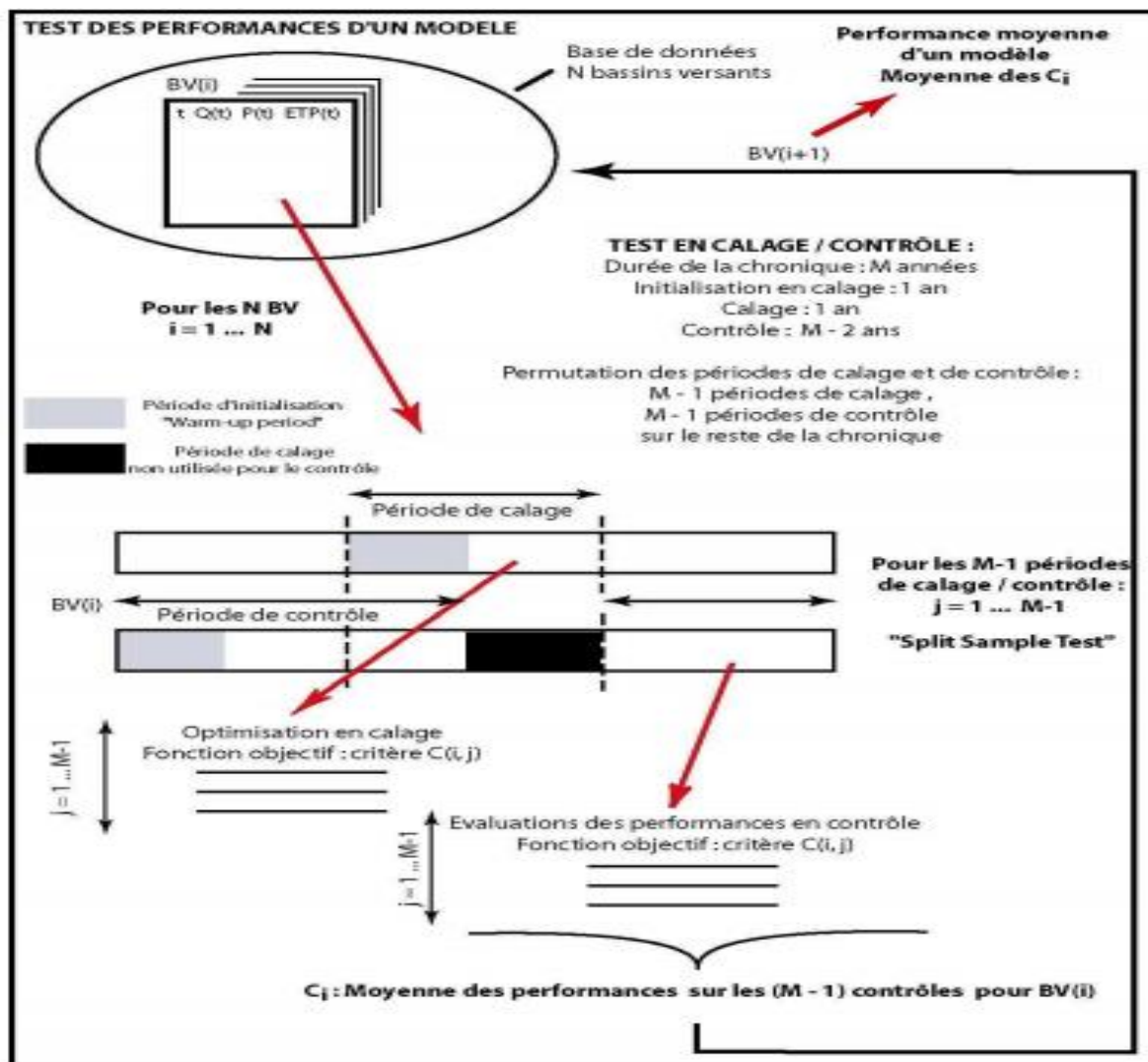


Figure 8- 2 : procédure de calage -contrôle effectuée pour chaque modèle (perrin, 2000)

2.1.1 Critères numériques :

Dans le tableau suivant (**Fig.8-1**) les Critères adoptés pour l'analyse des performances des modèles sélectionnées dans ce cadre comparatif précédemment établi (voir chapitre II) :

Tableau 8- 1 : Liste des critères d'évaluation et signification

Critère	Formulation	Signification
Nash et Sutcliffe	$NASH = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{calc,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \overline{Q_{obs}})^2}$	la proportion de la variance initiale des débits expliquée par le modèle
Ecart Arithmétique Moyen	$EAM = \frac{\sum X_i - Y_i }{\sum Y_i}$	Il mesure la performance globale de modèle hydrologique
Ecart Quadratique Moyen	$EQM = \frac{\sqrt{\sum (X_i - Y_i)^2}}{\sum Y_i}$	Il mesure la performance globale de modèle hydrologique
L'erreur moyenne absolue normée	$AD = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n Q_{obs,i} - Q_{calc,i} }{\sum_{i=1}^n Q_{obs,i} - \overline{Q_{obs}} }$	Elle représente la déviation absolue du débit simulé par rapport à l'observé en moyenne à chaque pas de temps.
Critère d'erreur cumulée Ou Critère de bilan	$B = \frac{\sum_{i=1}^n Q_{calc,i}}{\sum_{i=1}^n Q_{obs,i}} \quad \text{ou} \quad B' = \frac{\sum_{i=1}^n Q_{calc,i}}{\sum_{i=1}^n Q_{obs,i}} - 1$	Ce critère, basé sur l'erreur cumulée, permet de mesurer les sur- ou sous-estimations des volumes sur la période. Des valeurs de B supérieures à 1 correspondent à des débits simulés surestimés, des valeurs inférieures à 1 à des débits sous-estimés.
Nash-Sutcliffe calculé sur les racines carrées des débits	$NASH(\sqrt{Q}) = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\sqrt{Q_{obs,i}} - \sqrt{Q_{calc,i}})^2}{\sum_{i=1}^n (\sqrt{Q_{obs,i}} - \sqrt{\overline{Q_{obs}}})^2}$	Nash-Sutcliffe calculé sur les racines carrées des débits si l'on souhaite travailler à la fois sur des périodes de crues et d'étiages.
Nash-Sutcliffe basé sur les logarithmes des débits.	$NASH(\ln(Q)) = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\ln(Q_{obs,i} + \varepsilon) - \ln(Q_{calc,i} + \varepsilon))^2}{\sum_{i=1}^n (\ln(Q_{obs,i} + \varepsilon) - \ln(\overline{Q_{obs}} + \varepsilon))^2}$	Ce critère donne plus d'importance aux étiages
C2M	$C2M = \frac{NASH}{2 - NASH}$	Pour borner le critère NSE et garder la valeur 0 comme une valeur de référence

2.1.2 Critères graphiques :

Les graphiques synthétiques suivants seront utilisés pour illustrer les performances des modèles hydrologiques utilisées :

- Comparaison des courbes des débits mensuels moyens observés et simulés, en m³/s ;
- Comparaison des courbes de débits classés observés et simulés. Pour la représentation on utilisera une fréquence expérimentale F au non dépassement donnée par :

$$F = \frac{i - 0.3}{n + 0.4}$$

Dans notre étude, une illustration graphique « radar » (**Fig.8-3**) sera utilisé pour résumer les performances de chaque modèle pour faciliter l'inter comparaison des modèles utilisés :

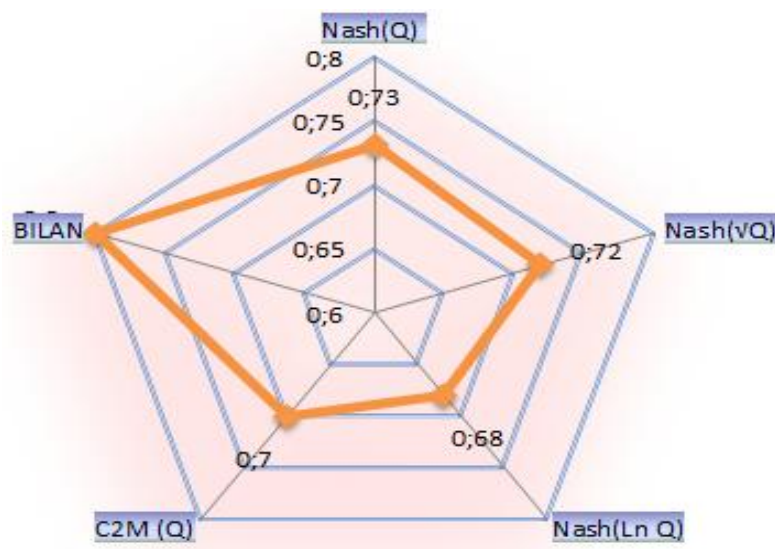


Figure 8-3 : Exemple de graphique « radar »

2.2 Mise en œuvre concrète des tests de performance :

Les Tableaux et les graphiques suivants présentent les performances moyennes des critères d'évaluation selon la fonction objective choisie et les caractéristiques des années utilisées pour le calage et le contrôle.

Le calcul des résultats a été réalisée de manière identique, à partir de scripts écrits sous MATLAB, qui permettent à la fois de calculer l'ensemble des critères numériques et de générer en séries toutes les illustrations graphiques.

Nous utiliserons les résultats obtenus suivant les cinq critères de performance (les critères de Nash sur les débits, sur les racines carrées des débits et sur les logarithmes des débits, le critère Nash-bis, et le critère de bilan. Nous garderons cependant à l'esprit que le critère de bilan n'est

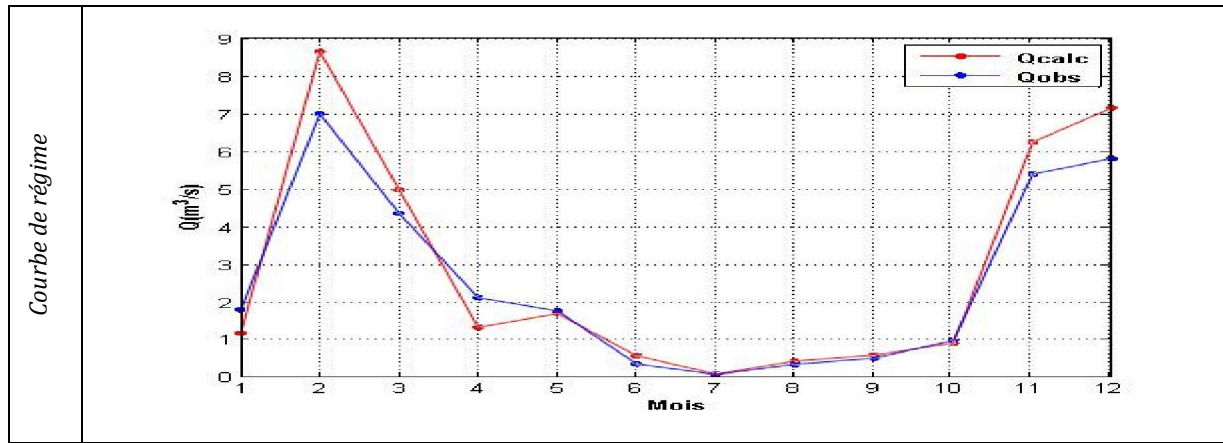


Figure 8-4 : illustration des comparaisons des débits observés et simulés de modèle SWAT

En comparant les débits moyens mensuels (**Fig.8-4**), les valeurs observés et simulés sont proches essentiellement pour la période estivale. Le modèle calé présente les avantages/inconvénients suivants :

- Les débits de pointe sont sous-estimés ;
- Le module annuel simulé est très proche de l'observé
- Les périodes d'étiage sont correctement simulés.

Les périodes entre Avril-Mai et Octobre-Décembre sont mal reproduites par le modèle, ce phénomène peut expliquer par la nature de l'hydro système à caractère aride à semi-aride. La validation du modèle est donc jugée satisfaisante pour les débits d'étiage et des crues tout en notant que le modèle sous-estime les débits observés nettement dans la période hivernale.

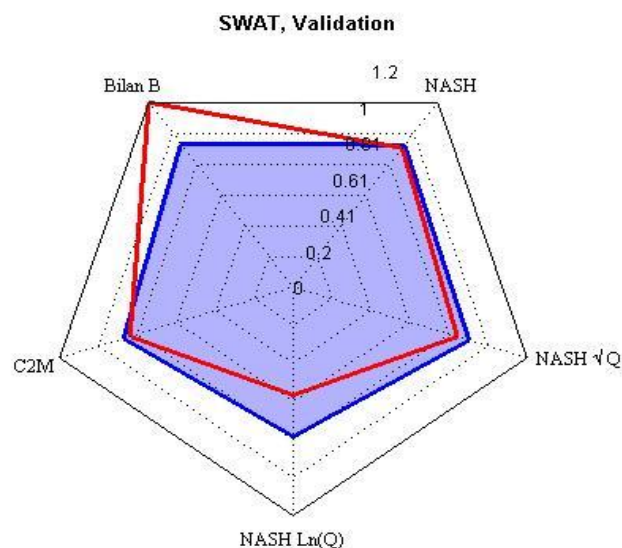


Figure 8-5 : illustration graphique « radar » utilisé pour résumer les performances de modèle SWAT

La figure **(Fig.8-5)** présente les critères de performances de modèle SWAT sous une illustration radar qui résume les performances de modèle SWAT.

Dans cette partie, nous présentons une synthèse des principaux résultats obtenus lors des tests de performance précédemment cités :

- Le modèle SWAT a tendance à présenter de meilleures performances sur l'ensemble des critères, mais moins bonnes sur les critères liés au bilan (c'est notamment particulièrement visible pour les critères B, AD, EQM et B').
- Les informations mises en évidence par la figure 4 nous indiquent qu'il y a une meilleure performance de modèle SWAT sur le bassin d'Issen ce qui veut une bonne similitude entre les données observés et simulés. Cependant Les prévisions que nous apporte le modèle sur ce bassin sont très fiables.
- Nous pouvons observer aussi que le modèle SWAT sur le bassin d'Issen arrive à simuler le comportement hydrologique en phase étiages mieux que celles des crues et cela due à Certaines caractéristiques des crues qui sont assez difficiles à modéliser dans un bassin aride même avec un modèle à base physique.
- le modèle SWAT par agrégation des sorties au pas de temps mensuel présente des résultats meilleures que le modèle au pas de temps journalier. Nous pouvons imputer ceci à la répartition des pluies journalières sur le mois. En effet, un nombre faible de jours pluvieux pourrait bien constituer la majorité de la pluviométrie du mois correspondant. Cette hypothèse pourrait bien être considérée comme une piste de recherche en vue d'améliorer encore la performance du modèle.
- Pour le modèle SWAT les paramètres calés au pas de temps journalier semblent être transférables au pas de temps mensuel,

2.2.2 Analyses des résultats fournis par ATHYS

Le tableau suivant (**Tab. 8-3**) résume les principaux résultats issus de la simulation en période de calage et de validation sous la plateforme ATHYS au pas de temps journalier et mensuel :

Tableau 8-3 : Liste des critères d'évaluation fournis par ATHYS

Critères	Nash(Q)	Nash($\sqrt{Q}$)	Nash(Ln Q)	C2M (Q)	BILAN-B	EAM	EQM	B'	AD
Au pas de temps journalier									
Calage	0,76	0,62							
Contrôle	0,71	0,62	0,67	0,55	0,85	0,69	0,15	-0,14	0,52
Au pas de temps mensuel									
Calage	0,77	0,79	0,76	0,63	1,15	0,54	0,18	0,15	0,60
Contrôle	0,80	0,75	0,66	0,67	1,14	0,39	0,14	-0,12	0,72

Les résultats de simulation réalisés (**Fig. 8-6**) apparaissent acceptables, les critères de performance indiquent clairement la fidélité de modèle ATHYS aussi à reproduire en moyenne le comportement hydrologique de bassin versant d'Issen.

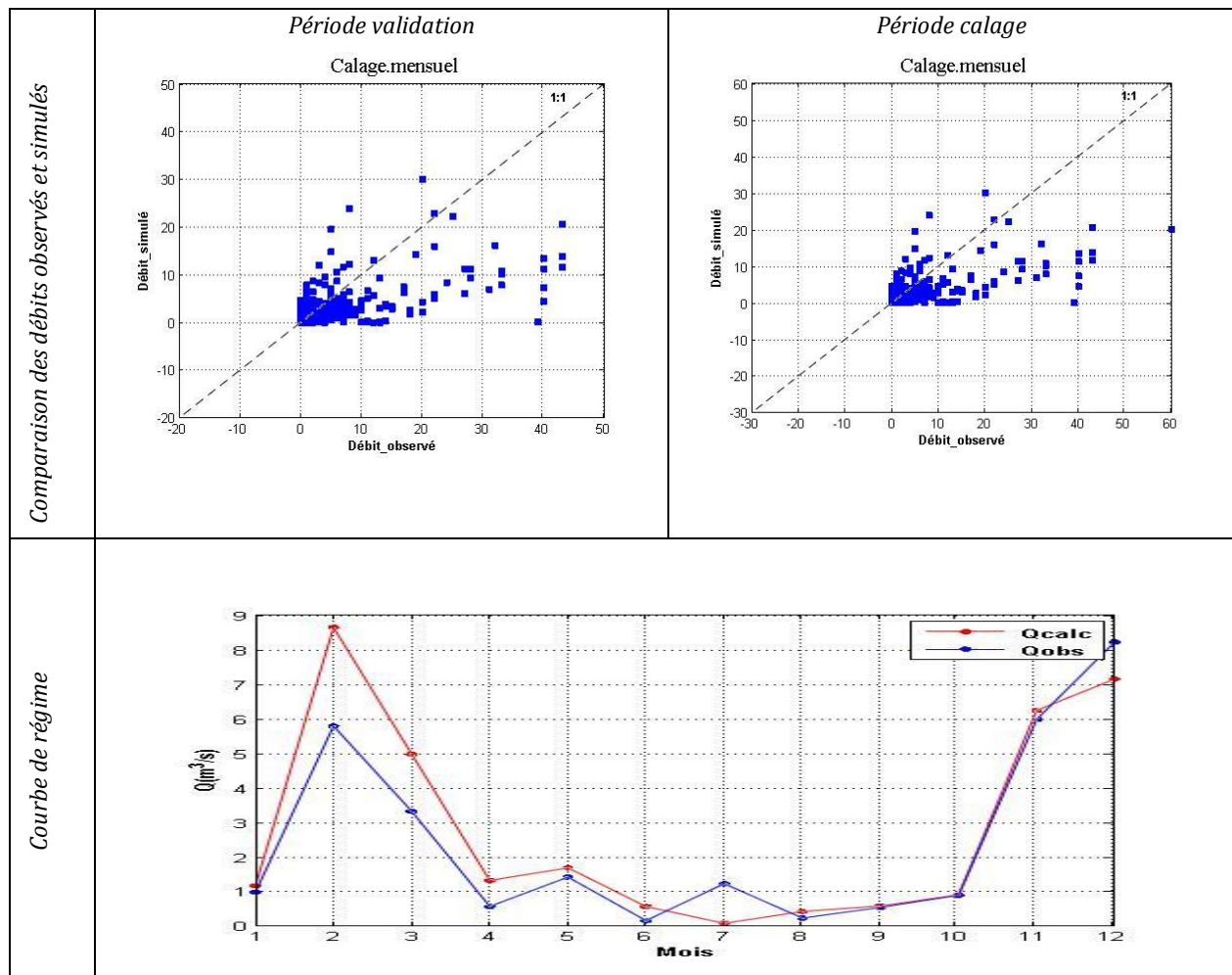


Figure 8- 6: Illustration des comparaisons des débits observés et simulés de modèle ATHYS

Le Tableau (**Tab. 8-3**) indique qu'en général les performances des critères d'évaluation de modèle Athys sont satisfaisantes.

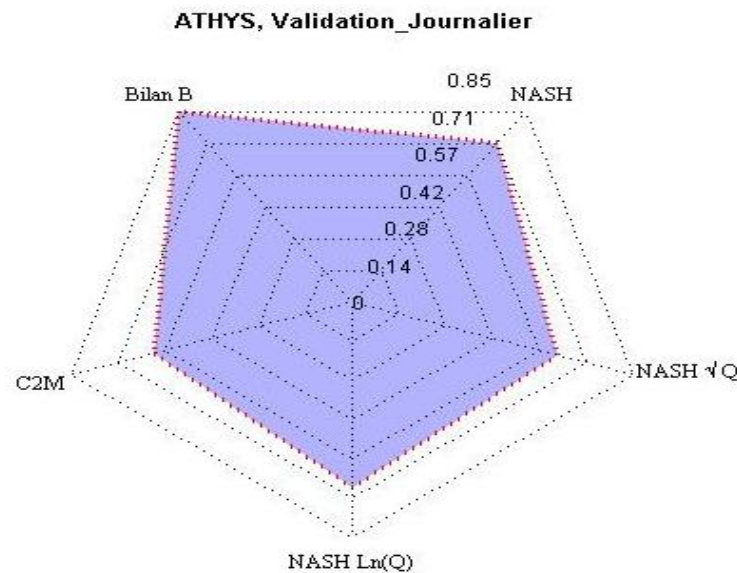


Figure 8-7 : illustration graphique « radar » utilisé pour résumer les performances de modèle ATHYS

D'après les tests de performance de modèle ATHYS indiqués dans le tableau (**Tab. 8-3**) et la (**Fig.8-7**) on peut tirer les conclusions suivantes :

- Les résultats au pas de temps journaliers et mensuels apparaissent acceptables, la simulation au pas de temps mensuel présente toujours des critères meilleurs que celle au pas de temps journalière (**Tab. 8-3**) .
- En comparant les débits moyens mensuels, les valeurs observés et simulés sont de même allure, néanmoins le modèle Athys sous-estime les débits observés au bassin versant d'issen sauf pour le mois de juillet qui présente une valeur exceptionnelle au régime hydrologique observé (**Fig.8-7**).
- Les critères de bilan notamment B et B' sont moins bonnes par rapport aux autres critères utilisées (**Tab. 8-3**).
- Le modèle d'Athys arrive à reproduire parfaitement le régime hydrologique de la période Mi-oct. sauf pour le mois de juillet
- Le modèle Athys présente également des baisses de performance sur les critères de caractéristique des crues que celle d'étiage(**Tab. 8-3**) .
- Les paramètres calés au pas de temps journalier semblent être transférables au pas de temps mensuel(**Tab. 8-3**).

2.2.3 Analyses des résultats fournis par GR4J

Le tableau suivant (**Tab. 8-4**) résume les principaux résultats issus de la simulation sous le modèle GR4J au pas de temps journalier et mensuel :

Tableau 8-4 : Liste des critères d'évaluation fournis par GR4J

Critères	Nash(Q)	Nash ($\sqrt{Q}$)	Nash(Ln Q)	C2M (Q)	BILAN-B	EAM	EQM	B'	AD
Au pas de temps journalier									
Calage	0,71	0,69							
Contrôle	0.67	0.61	0.45	0.50	0.77	0.70	0.05	-0.22	0.09
Au pas de temps mensuel									
Calage	0,76	0,71	0,45	0,61	1,43	0,44	0,15	-	0,72
								0,43	
Contrôle	0,71	0,69	0,53	0,55	1,65	0,67	0,20	-	0,55
								0,65	

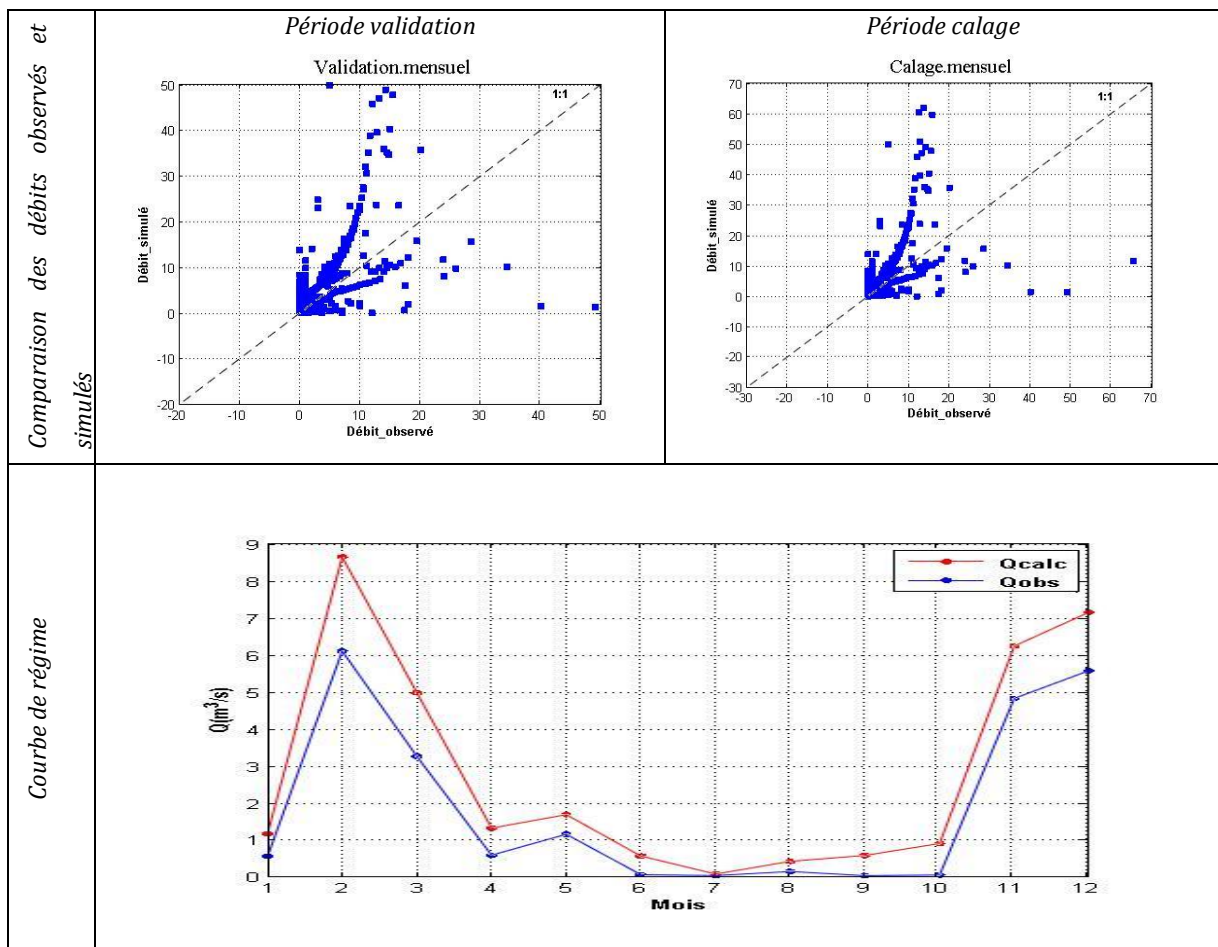


Figure 8-8: illustration des comparaisons des débits observés et simulés de modèle GR4J

Nous allons présenter ici une analyse des performances du modèle GR4J (**Tab. 8-4**). Elles sont l'image de l'adéquation de la structure du modèle et du jeu de paramètres calés au bassin étudié.

La bonne performance du modèle sur un bassin est une condition nécessaire pour assurer une bonne fiabilité des paramètres, même si elle ne représente pas une condition suffisante.

- La phase de validation a donné de bons résultats confirmant le bon calage du modèle sur le bassin et la performance acceptable quant à l'utilisation des modèles GR pour des bassins à climats semi-arides.
- En calage, la Figure 6 montre que le modèle réussit à atteindre des valeurs de critère satisfaisants Ceci se traduit par la similitude des allures des débits observés et simulés.
- Le modèle est moins souvent en échec, avec moins de faibles valeurs du critère
- Les critères liés au bilan montrent que le modèle GR4J a tendance à sous-estimer le bilan au niveau de bassin versant d'Issen (**Tab. 8-4**).
- La période estivale est mal reproduite par le modèle, autrement dit Les périodes d'étiage ne sont pas correctement simulés (**Fig.8-8**).
- Les débits de pointe sont sous-estimés par le modèle GR4J;
- L'analyse des critères de performance (C2M, B, B',AD et EQM) de modèle GR4J montre clairement que le modèle a des difficultés à reproduire parfaitement le comportement hydrologique de bassin versant d'Issen (**Tab. 8-4**), et surtout en phase de validation (**Fig.8-8**) ceci est due principalement à la complexité de contexte aride de notre zone d'étude et l'aspect empirique de modèle GR4J.

2.2.4 Analyses des résultats fournis par HEC-HMS

Le tableau suivant (**Tab. 8-5**) résume les principaux résultats issus de la simulation sous la plateforme HEC-HMS au pas de temps journalier et mensuel :

Tableau 8-5 : Liste des critères d'évaluation fournis par HEC-HMS

Critères	Nash(Q)	Nash ($\sqrt{Q}$)	Nash(Ln Q)	C2M (Q)	BILAN-B	EAM	EQM	B'	AD
Au pas de temps journalier									
Calage	0.67	0.63							
Contrôle	0.63	0.56	0.45	0.46	0.53	0.77	0.07	-0.46	0.44
Au pas de temps mensuel									
Calage	0.84	0.84	0.68	0.73	0.74	0.39	0.14	-0.25	0.71
Contrôle	0.86	0.80	0.53	0.76	0.94	0.43	0.12	-0.05	0.66

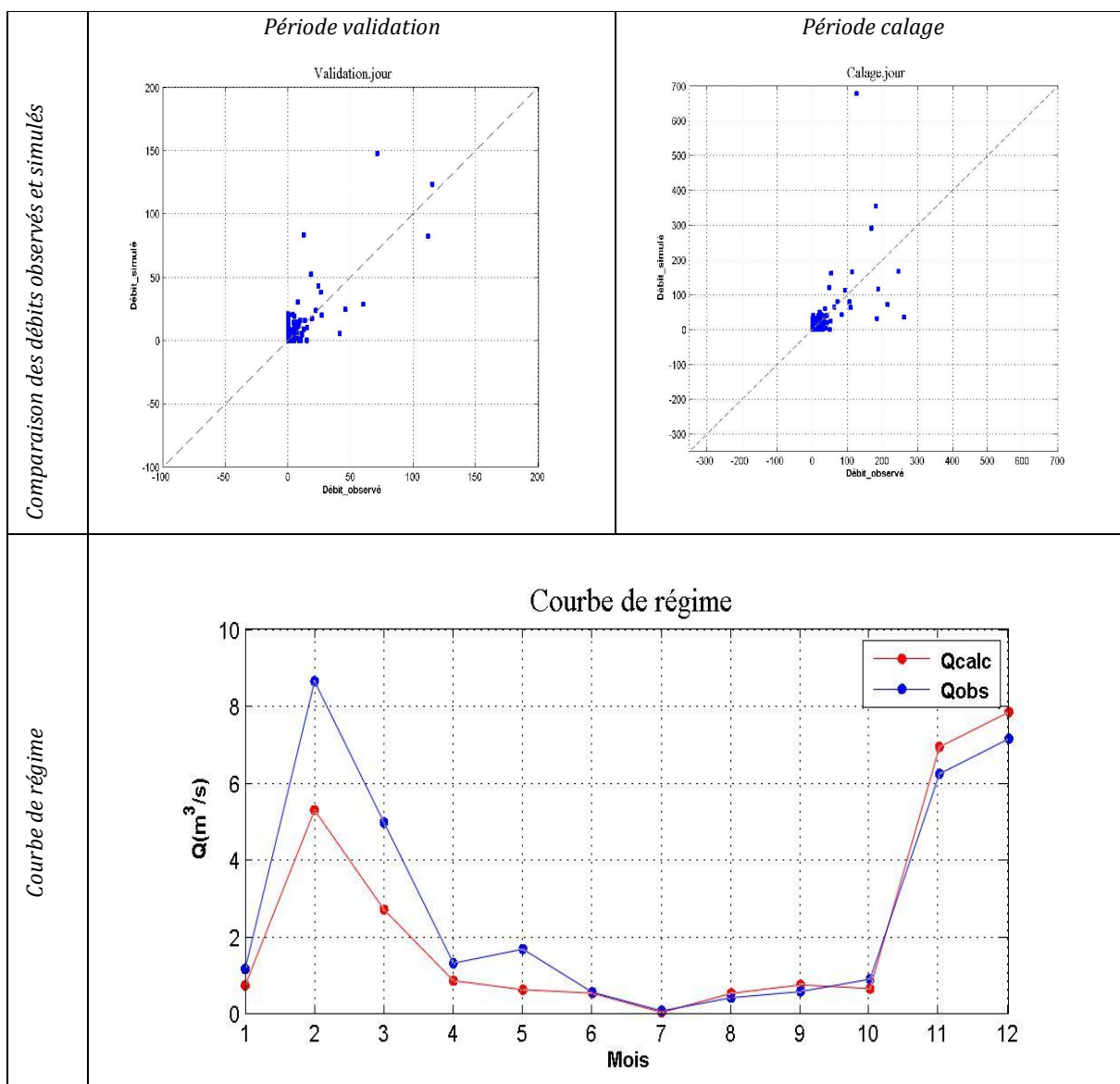


Figure 8-9: illustration des comparaisons des débits observés et simulés de modèle GR4J

Suite aux tests de performance de modèle HEC-HMS indiqués dans le tableau (**Tab. 8-4**) et la figure (**Fig.8-8**) on peut constater les remarques suivantes :

- Le modèle HEC-HMS a tendance à présenter de meilleures performances sur l'ensemble des critères au pas de temps mensuel, mais moins bonnes au pas de temps journalier (**Tab. 8-4**) ;
- En comparant les débits moyens mensuels, les valeurs observés et simulés sont de même allure, néanmoins le modèle HEC-HMS sous-estime les débits observés au bassin versant d'issen surtout pour la période janvier-mai (**Fig.8-8**).

- L'analyse des critères de performance de modèle HEC-HMS montre que le modèle a des difficultés à reproduire correctement le comportement hydrologique de bassin versant au pas de temps journalier (**Tab. 8-4**) ;
- Comme pour les autres modèles précédemment cités Les paramètres calés au pas de temps journalier semblent être transférables au pas de temps mensuel (**Tab. 8-4**) ;
- Les débits de pointe sont souvent sous-estimés par le modèle HEC-HMS;
- Au pas de temps mensuel le modèle HEC-HMS semble avoir amélioré quelques critères de performance notamment Nash, EQM, B' et C2M en phase de validation par rapport à la phase de calage ;
- Au niveau mensuel une corrélation très marquée entre les débits observés et simulés.

3- Inter comparaison des modèles et interprétation des résultats

Le tableau ci-dessous (**Tab. 8-6**) montre les différentes valeurs des critères associés à l'échantillon de validation, pour les jeux de paramètres retenus au pas de temps journalier pour chaque modèle utilisé.

Tableau 8-6 : Liste des critères d'évaluation fournis par les quatre modèles utilisés au pas de temps journalier

Critères	Nash(Q)	Nash ($\sqrt{Q}$)	Nash(Ln Q)	C2M (Q)	BILAN-B	EAM	EQM	B'	AD
<i>Au pas de temps journalier</i>									
SWAT	0.71	0.68	0.64	0.55	0.56	0.70	0.09	-	0.49
								0.43	
ATHYS	0.71	0.62	0.67	0.55	0.85	0.69	0.15	-	0.52
								0.14	
GR4J	0.67	0.61	0.45	0.50	0.77	0.70	0.05	-	0.09
								0.22	
HEC-HMS	0.63	0.57	0.44	0.45	0.52	0.62	0.20	-	0.39
								0.32	

On voit que les résultats des modèles sont relativement proches dans l'ensemble (tableau (**Tab. 8-4**) et figure (**Fig.8-8**)), excepté HEC-HMS qui semble avoir plus de difficultés sur un certain nombre de critères de performance.

Aussi, Ce tableau montre tout d'abord qu'il n'est pas possible de distinguer statistiquement les performances de modèles dont la différence de performance moyenne est trop faible (SWAT et ATHYS).

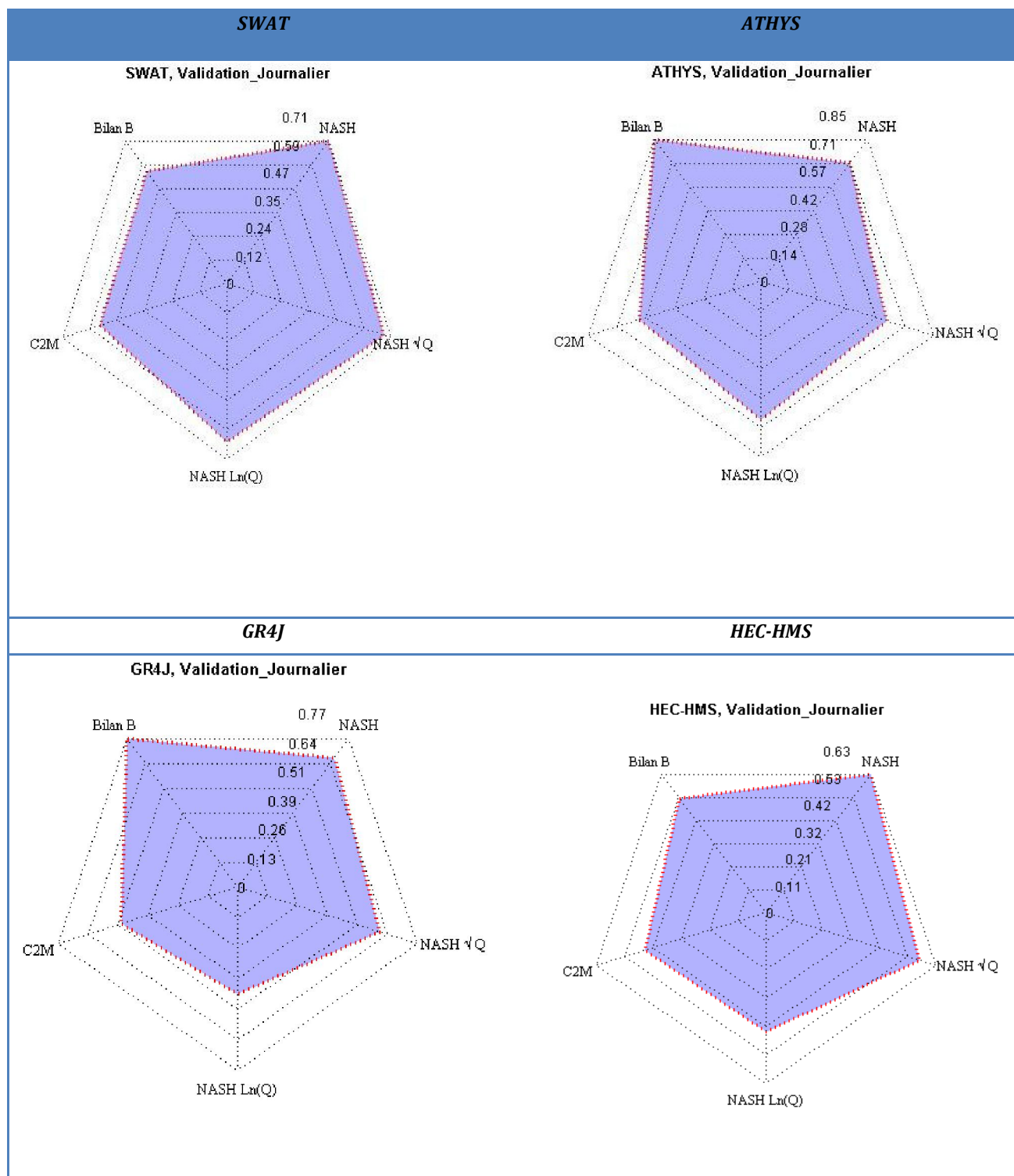


Figure 8-10: illustration graphique « radar » utilisé pour résumer les performances des quatre modèles au pas de temps journalier

Au pas de temps journalier, Il apparait délicat d'établir une hiérarchie claire entre les quatre modèles utilisés, aucun ne fournissant les meilleurs résultats sur tous les critères. si l'on regarde leur classement sur chaque critère (**Fig.8-11, 8-12**), SWAT se classe mieux que les autres modèles sur quatre critères de performances, alors que HEC-HMS sur aucun.

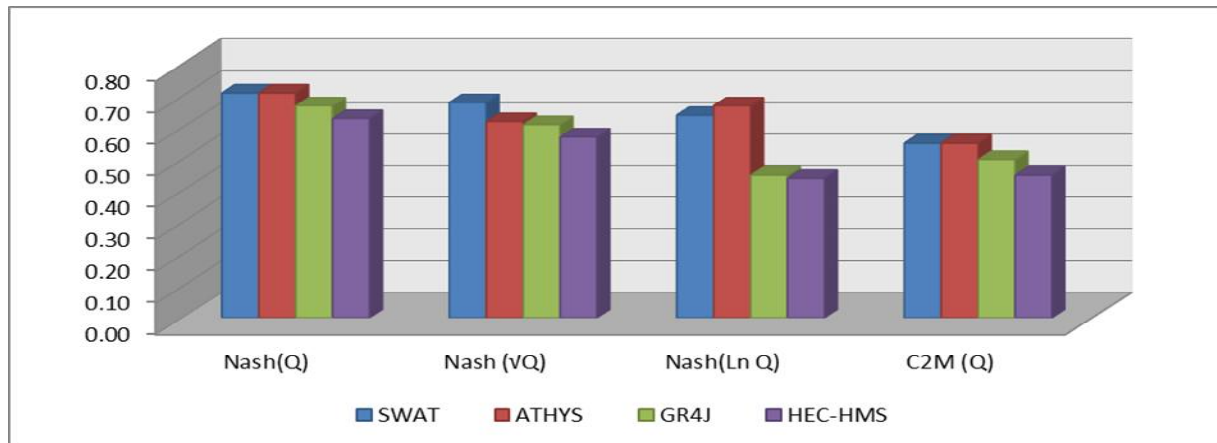


Figure 8-11: comparaison des critères de performance relatifs à nash des quatre modèles hydrologiques au pas de temps journalier

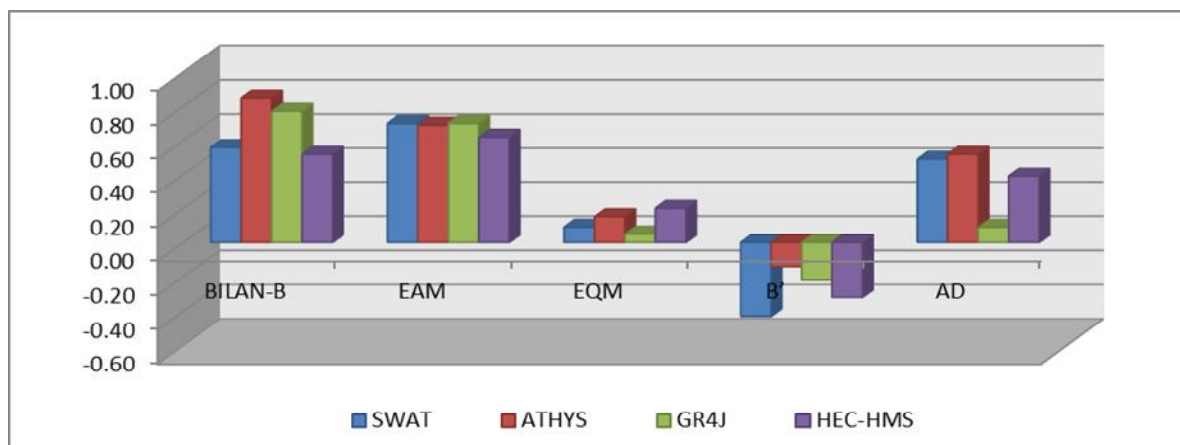


Figure 8-12: comparaison des critères de performance de bilan des quatre modèles hydrologiques au pas de temps journalier

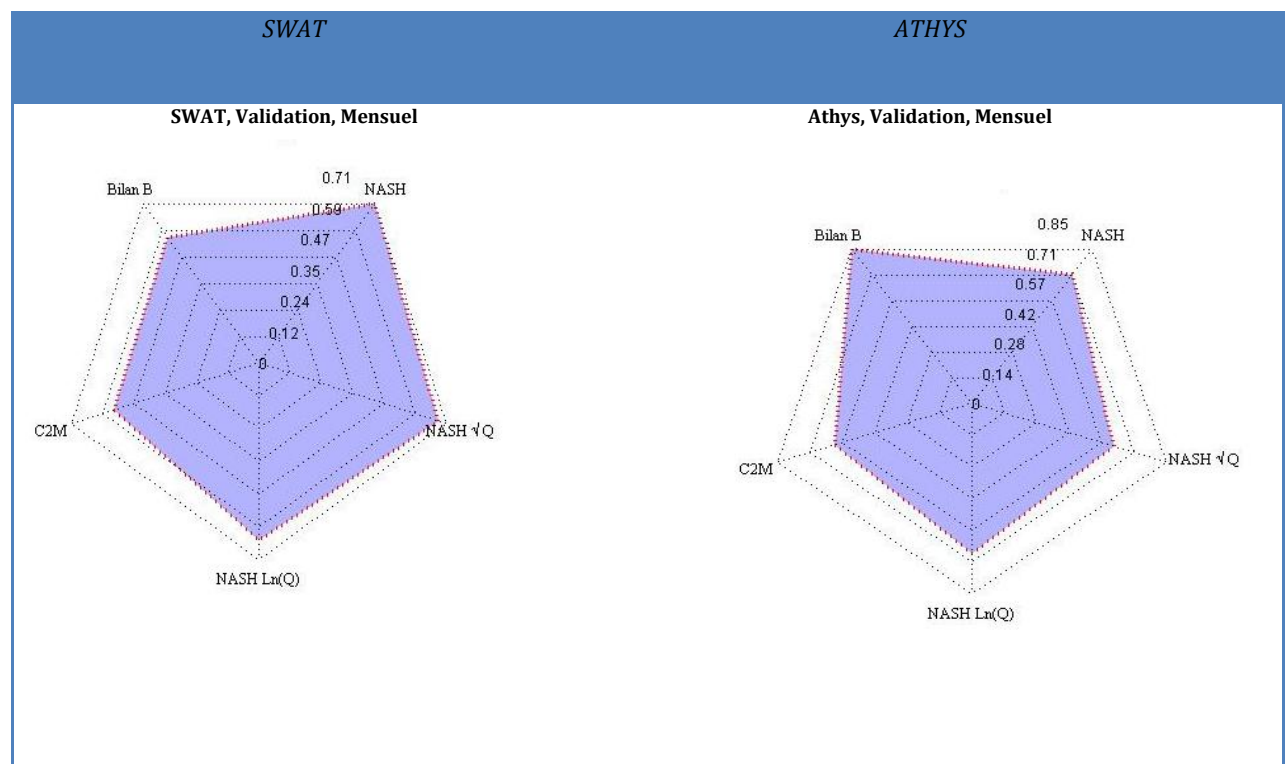
Finalement, dans notre zone d'étude qui est le bassin d'Issen, le modèle le plus complexe (SWAT) a les meilleures performances en général, mais comme l'indique les Figures (**Fig.8-11, 8-12**) , il n'y pas une classification claire des performances des modèles en fonction de leur degré de complexité (nombre de paramètres à optimiser). Cela veut dire qu'en phase de calage, les modèles ont à peu près la même capacité à simuler les débits, quels que soient leurs niveaux de complexité et que les modèles se différencient surtout par leur structure.

Le tableau suivant (**Tab. 8-7**) montre les différentes valeurs des critères associés à l'échantillon de validation au pas de temps mensuel, pour les jeux de paramètres retenus pour chaque modèle utilisé.

Tableau 8-7 : Liste des critères d'évaluation fournis par les quatre modèles utilisés au pas de temps mensuel

Critères	Nash(Q)	Nash ($\sqrt{Q}$)	Nash(Ln Q)	C2M (Q)	BILAN-B	EAM	EQM	B'	AD
<i>Au pas de temps mensuel</i>									
SWAT	0,94	0,91	0,79	0,88	0,94	0,22	0,07	-0,05	0,82
ATHYS	0,80	0,75	0,66	0,67	1,14	0,39	0,14	-0,12	0,72
GR4J	0,71	0,69	0,53	0,55	1,65	0,67	0,20	-0,65	0,55
HEC-HMS	0,86	0,80	0,53	0,76	0,94	0,43	0,12	-0,05	0,66

On remarque qu'au pas de temps mensuel, et sur l'ensemble des critères, SWAT est le plus régulièrement classé parmi les meilleurs modèles, suivi de HEC-HMS, ATHYS, et enfin GR4J. Ces classements sont cependant à nuancer tant les différences moyennes peuvent être faibles sur certains critères, comme l'illustre le tableau (Tab. 8-6) .



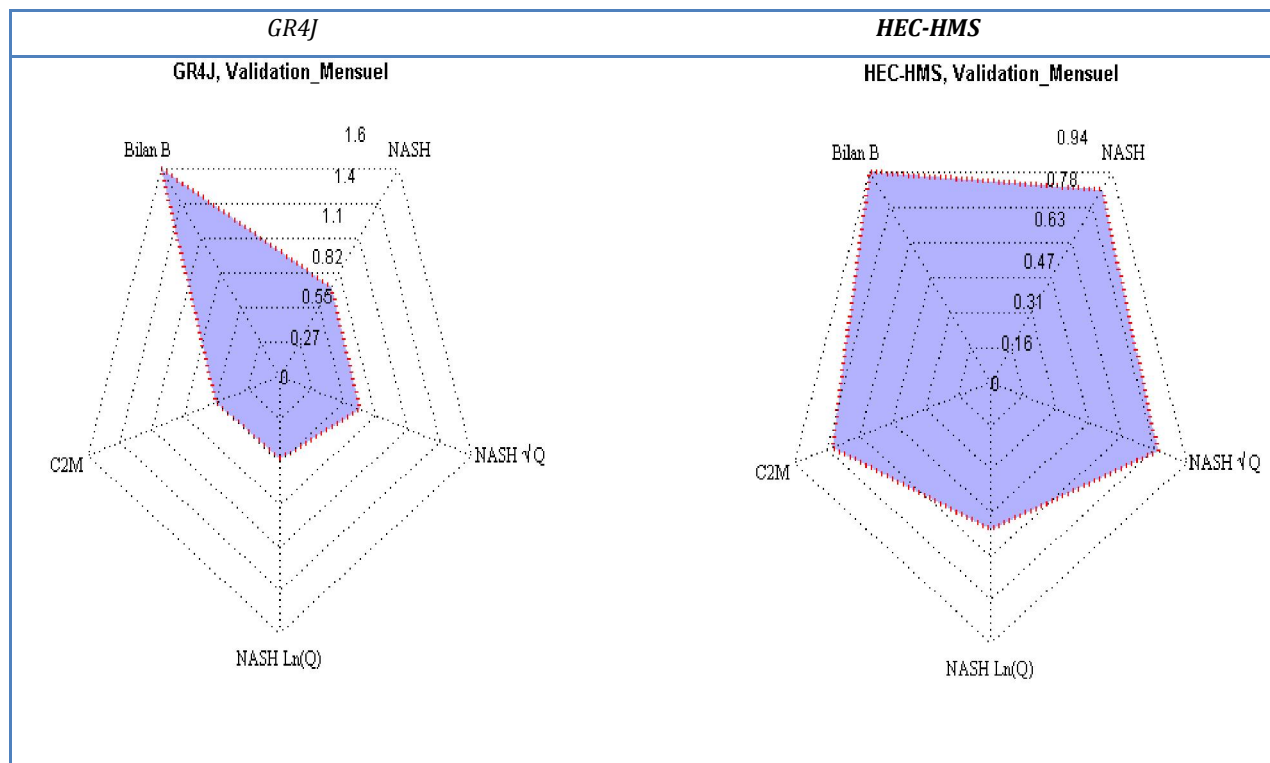


Figure 8-13 : Illustration graphique « radar » utilisé pour résumer les performances des quatre modèles au pas de temps mensuel

Il apparaît que, tous les modèles hydrologiques utilisés fournissent généralement des résultats proches en termes de valeur des fonctions objectifs adoptés. Par ailleurs, les différences observées peuvent être attribuées, dans le cas de modèles utilisés, davantage à des problèmes de qualité des données utilisées et de spécificités du bassin sélectionné.

Au niveau de l'efficacité en terme de temps de calcul, les modèles conceptuels et globaux (HEC-HMS et GR4J) présentent le gros avantage d'être des modèles rapides.

La synthèse présentée dans le dernier chapitre de la thèse sur les résultats que nous avons obtenus avec nos différentes approches et ceux obtenus avec le modèle distribué, convergent vers la conclusion qu'en moyenne, les gains de performance que l'on peut espérer en modélisation pluie-débit en prenant en compte la variabilité spatiale des pluies sont moyens. La relative concordance des résultats entre les différentes approches et différents modèles testés donne une certaine confiance dans ce résultat.

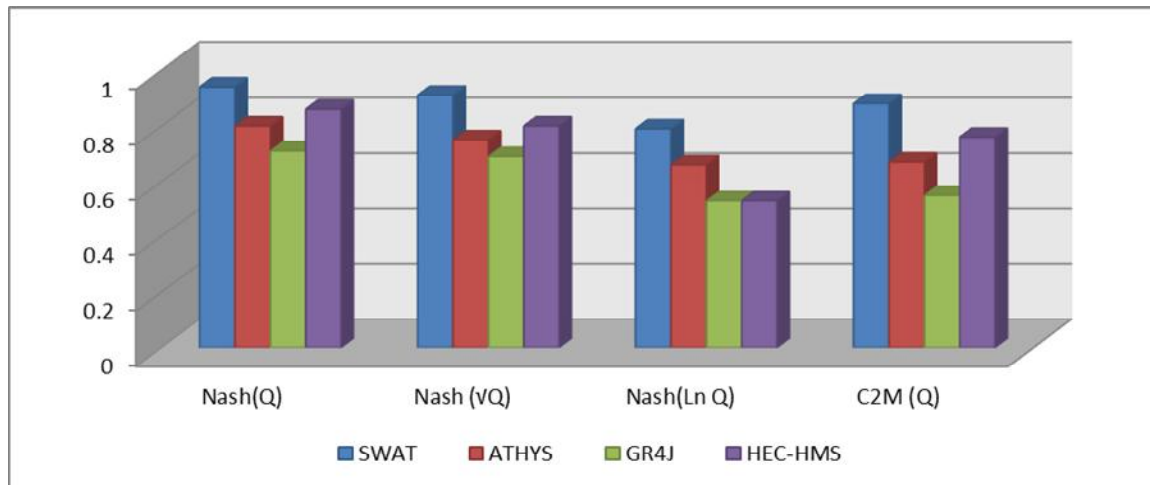


Figure 8-14: comparaison des critères de performance relatifs à Nash des quatre modèles hydrologiques au pas de temps mensuel

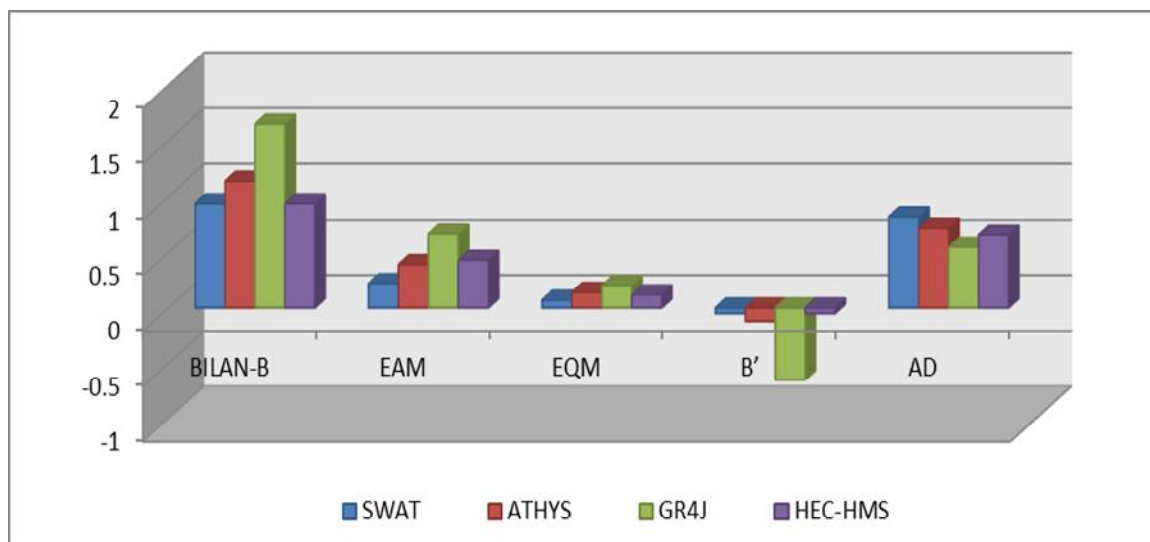


Figure 8-15: comparaison des critères de performance de bilan des quatre modèles hydrologiques au pas de temps mensuel

Les figures **(Fig.8-14, 8-15)** montrent tout d'abord, une hausse nette des performances des modèles sélectionnés au pas de temps mensuel par rapport aux résultats fournis au pas de temps journalier.

Comme le montre le tableau **(Tab. 8-7)**, le rang des modèles peut être assez variable, en fonction du critère d'évaluation choisi. Néanmoins, pour les modèles de 'tête', les résultats et classements sont assez stables.

Perrin [2000] ayant montré que le classement des modèles dépendait fortement du critère utilisé, mais les tendances entre modèles sont globalement conservées en fonction des différents critères.

Un des résultats étonnant de ces tests est le faible niveau de performance de modèle HEC-HMS au niveau journalier contrairement aux résultats dudit modèle au pas de temps mensuel qui sont largement améliorés(**Tab. 8-6, 8-7**),

Ces résultats sont à relativiser : une analyse sur tous les pas de temps et avec un échantillon beaucoup plus large que celui retenue peut conduire à des conclusions d'ordre général.

Finalement et au travers des résultats exposés précédemment se dégagent quelques points importants :

- L'écart que l'on constate entre les résultats des approches de modélisation adoptées (globale ou distribuée ; physique, conceptuel ou empirique) dépend non seulement des caractéristiques du bassin mais aussi du modèle avec lequel on travaille. Pour un même bassin et des données identiques on peut obtenir selon le modèle utilisé des écarts assez différents ;
- Parmi ces quatre catégories de modèles, les plus adaptés semblent être les modèles conceptuels. Les modèles distribués à base physique, difficiles à mettre en œuvre, sont ainsi peu adaptés à un contexte opérationnel et restent pour l'instant cantonnés à la recherche. Quant aux modèles boîte noire, leurs applications demeurent parfois un peu limitées. Ce sont les modèles conceptuels (HEC-HMS, ATHYS) qui représentent le meilleur compromis entre données et résultats dans un contexte opérationnel ;
- L'approche distribuée n'est donc pas systématiquement synonyme d'améliorations significatives des résultats (exemple : HEC-HMS et ATHYS au pas de temps mensuel), le bénéfice apportée par cette approche dépendant vraisemblablement beaucoup des caractéristiques propres aux bassins versants et aux évènements pluvieux ;
- il est délicat de justifier la mise en œuvre d'une approche (semi) distribuée sans l'aide d'une comparaison avec une approche globale (GR4J) effectuée dans les mêmes conditions puisque les raisons pouvant permettre d'anticiper une amélioration des résultats sont encore mal connues ;
- Certains modèles hydrologiques censés représenter l'approche distribuée et d'autres l'approche globale. Là encore il est difficile de démêler les effets des approches distribuée et globale et ceux dus aux différentes structures proposées par les modèles. Car si les modèles cherchent tous à représenter de la manière la plus efficace possible le fonctionnement d'un bassin versant les hypothèses envisagées pour parvenir à ce résultat sont très variées et plus ou moins réussies. Les modèles n'étant donc pas équivalents ;

- Il est impossible, en travaillant sur un unique bassin versant, de pouvoir affirmer que l'approche distribuée est invariablement supérieure à l'approche globale ou l'inverse sachant que les résultats peuvent aussi dépendre de la spécificité même des caractéristiques du bassin versant. On imagine assez bien que pour un bassin versant très hétérogène (pluies et sols) les besoins ne sont pas semblables à ceux d'un bassin versant dont les caractéristiques sont plutôt homogènes ;
- Lors d'un événement pluvieux l'intensité de la pluie est rarement uniforme sur l'ensemble du bassin versant. Si la prise en compte de la distribution temporelle des pluies est depuis longtemps acquise au sein des modèles pluie débit, ce n'est pas le cas de la variabilité spatiale. C'est un point non négligeable les pluies étant les entrées principales d'un modèle conceptuel pluie- débit ;
- Quel que soit l'approche envisagée, distribuée ou globale, il est primordial de prendre en compte (explicitement ou implicitement) la variabilité spatiale de la pluie. Bien évidemment si l'on dispose de peu de données il est normal de choisir une approche globale mais même en optant pour ce type d'approche, les résultats de la modélisation seront d'autant plus précis que l'on a une bonne connaissance de la pluie ;
- La comparaison des approches de modélisation utilisées dans le cadre de ce travail aboutit à des résultats différents et ceci pour des modèles différents, ce qui rend d'autant plus difficile l'interprétation des résultats. Tous ces facteurs influent probablement sur les résultats sans qu'il soit possible de déterminer lesquels et de quelle manière ont permis l'amélioration des résultats ;
- Cette étude concluait qu'il n'existait pas de lien entre les différents résultats observés pour le bassin d'Issen selon l'approche choisie et des éléments comme la pédologie, la géologie, le couvert végétal, la densité de drainage et la topographie ;
- En passant de l'approche globale (GR4J) à l'approche semi-distribuée ou distribué (ATHYS ou SWAT), on distribue à la fois les précipitations et les comportements (par l'intermédiaire des paramètres). la part de la spatialisation des pluies et la part de la spatialisation des comportements dans l'amélioration des résultats n'est pas maîtrisée ;
- L'obtention de données de pluies suffisamment détaillées pour être distribuées. Ce n'est qu'ensuite que peut être envisagée la distribution des paramètres qui n'est que secondaire mais peut apporter une amélioration ;
- Les modèles conceptuels (GR4J) sont en effet les modèles les plus utilisés pour ce genre d'études car ils représentent un bon compromis entre données nécessaires et résultats ;
- Nous comprenons à présent pourquoi les publications hydrologiques comparant les approches de modélisation présentent des résultats si variés : aucune des approches

- n'est invariablement supérieure à l'autre, les résultats dépendant du bassin et notamment des caractéristiques des précipitations sur ses sous bassins ;
- Nous avons recherché dans ce travail à explorer une des voies d'application des modèles hydrologiques, qui a pour but ultime de pouvoir utiliser ces modèles sur des sites arides. Classiquement, il s'agit d'établir un protocole comparatif, par des procédures statistiques. Ici, nous avons proposé une méthode qui paraît plus apte à comparer les modèles hydrologiques. La nouvelle méthodologie fait intervenir les différents aspects en termes de bilan et des forme de l'hydrogramme ;

Conclusion

Dans notre étude, les modèles utilisés sont apparus parmi les plus fiables et les plus robustes. Leur qualité provient à la fois de leur parcimonie et de l'approche adoptée dans leur développement, qui a permis de choisir les différents éléments de leur structure.

Notre réflexion de recherche s'est fondée seulement sur les résultats des 4 structures obtenus en phase de contrôle. Une première conclusion de ces tests est que ces modèles apparaissent tous grossièrement équivalents.

Les résultats de la comparaison ont indiqué aussi que, si l'accroissement du nombre de paramètres améliore logiquement en phase de calage la capacité du modèle à obtenir de bons résultats, des structures simples avec seulement trois à cinq paramètres optimisés obtiennent en revanche en phase de contrôle des résultats aussi satisfaisants que des structures plus complexes. Le manque de robustesse des structures les plus complexes provient principalement de leur sur-paramétrisation. Les gains de performance obtenus en calage par ajout de paramètres supplémentaires sont perdus en contrôle par l'effet des incertitudes plus importantes que ces derniers apportent.

CONCLUSION GENERALE

Et perspectives

La mise en service de la modélisation comme outil pour la compréhension du fonctionnement hydrologique des bassins versants et d'aide à la décision est l'une des meilleures méthodes reconnue à la fois simple et fructueuse. Dans cette optique, la présente étude de recherche s'est intéressé à réaliser une évaluation comparative de quatre modèles hydrologiques (SWAT, ATHYS, GR4J, HEC HMS) considérés comme opérationnels ou pré-opérationnels sur un bassin aride situé au sud de Maroc.

Cet objectif global d'établir un cadre comparatif a pour but de tester quatre types de structures de modèles hydrologiques sur un bassin versant aride typique. Toutes les structures ont reçu les mêmes données et leurs paramètres ont été calés à l'aide d'une même procédure d'optimisation, qui s'est montrée fiable pour localiser des optima satisfaisants. La qualité des simulations a été mesurée en phase de contrôle grâce à plusieurs critères statistiques notamment critère de Nash.

Le protocole de test mis en place a permis de s'assurer que les résultats obtenus par les différents modèles sur le bassin d'Issen soient rigoureusement optimaux et comparables. Des jeux de critères numériques ont permis d'évaluer différents aspects des performances des modèles utilisés.

Cependant, les quatre modèles testés dans le cadre de ce travail ont été sélectionnés parce qu'ils sont largement utilisés. Ce sont des modèles à base physique, conceptuels ou empiriques, mais ils reposent tous sur des philosophies de modélisation et des niveaux de complexité différents (approches de développement, nombre de paramètres libres, nombre de réservoirs, formulations mathématiques du modèle). Ces quatre modèles sont testés au pas de temps journalier et mensuel, sur les mêmes périodes, les mêmes données d'entrée (pluie, ETP) et de calage (débits).

Aussi, cette grande diversité de tests effectués généralement avec seulement quatre modèles et sur un seul bassin versant, rend l'interprétation et la synthèse des résultats assez compliquées, néanmoins, cette étude a permis d'avoir une vue d'ensemble des performances de plusieurs modèles sur un bassin aride rarement modélisé et étudié.

Toutefois, il est à noter ici que la grande difficulté rencontrée dans la mise en œuvre de ce travail de recherche est le problème de la qualité et la réparation spatiale des données hydrométéorologiques. En effet, les données exigées par la modélisation hydrologique doivent être bien réparties dans l'espace et dans le temps avec une bonne qualité des données utilisées pour pouvoir reproduire fidèlement le comportement hydrologique de bassin versant sélectionné.

Ce travail ouvre donc plusieurs perspectives pour le raffinement de cette modélisation hydrologique des bassins versants arides et semi-arides et la mise en œuvre des modèles testés sur le territoire marocain caractérisé par un climat aride. Dans ce sens, les pistes suivantes peuvent être envisagées comme perspectives de recherche :

- Intérêt à élargir l'échantillon de bassins versants étudiés ; une plus vaste étude permettrait de pouvoir généraliser les résultats.
- Le passage du pas de temps journalier et mensuel à horaire,
- pouvoir établir des relations entre performances et paramètres du modèle et le pas de temps de fonctionnement, l'utilisation d'un plus grand nombre de pas de temps pourrait être judicieux et intéressante.
- Développer des stratégies d'évaluation souples et efficace , des résultats à travers le développement de nouveaux concepts de calage,
- Elaboration de nouvelles formulations des critères d'évaluation des performances qui facilitent l'inter comparaison des modèles hydrologiques testés,
- L'exploitation des modèles calés à la simulation de l'impact des changements climatiques des ressources en eau de la zone étudiée,
- La définition du nombre de bassins versants nécessaires pour différencier significativement les performances de deux modèles hydrologiques,
- les critères morphométriques et le nombre optimum de sous bassins.

Cette thèse a constitué une première étape ; le but de ce travail était de mettre en place les éléments nécessaires à une modélisation du fonctionnement hydrologique sur un sous-bassin aride de Souss avec différentes approches et concepts de modèles hydrologiques dans un cadre comparatif. Cet objectif a été atteint. La deuxième étape consistera en une validation des résultats obtenus tout en multipliant l'échantillon des bassins versants testés.

Ainsi, cette étude permet de montrer que le débat sur la sensibilité des modèles hydrologiques à leurs champs d'application très ouvert. Un certain nombre de pistes de recherche intéressantes pourraient être approfondies, afin d'identifier et de comprendre toutes les sensibilités des modèles et ainsi optimiser au mieux leur utilisation.

A la suite de ces résultats, plusieurs questions restent posées :

- Comment ces résultats peuvent-ils être transposés à d'autres bassins ? On retrouve ces caractéristiques sur un nombre important de bassins versants du Royaume, qui peuvent être éligibles à cette modélisation ?
- Comment prendre en compte la bonne connaissance de l'état hydrique initial pour améliorer sensiblement les simulations des modèles ?
- Comment évaluer l'impact de la variabilité spatiale du champ de pluie sur la qualité des résultats obtenus ?

Finalement, les progrès accomplis durant cette thèse dans l'étude comparative des quatre modèles au pas de temps journalier et mensuel ne doivent cependant pas occulter les points d'interrogation qui subsistent. Nous pensons que les modèles hydrologiques développés actuellement restent relativement éloignés du comportement réel du bassin versant et qu'ils ne peuvent de ce fait supporter qu'un faible degré de complexité. Même si les modèles ont montré des performances satisfaisantes, le manque de pertinence du modèle ne nous permet de savoir que de façon grossière le degré de justesse de sa structure. En particulier, il est très difficile de dire si les jugements que nous avons adoptés dans ce travail sont réellement judicieux et s'ils ne sont pas apparus satisfaisants seulement dans la mesure où ils compensent d'autres maladroites du modèle. La simplicité du modèle, tant dans sa formulation que dans le nombre de paramètres utilisés, demeure cependant un garde-fou efficace à la multiplication de ces maladroites.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES :

- Abbott M. B., Bathurst J. C., Cunge J. A., et al. 1986 An introduction to the European Hydrological System Système Hydrologique Européen, "SHE", 1. History and philosophy of a physically-based, distributed modelling system. *Journal of Hydrology*, , vol. 87, pp. 45-59.
- Allen, R.G., Jensen, M.E., Wright, J.L., Burman, R.D., 1989. Operational estimates of reference évapotranspiration. *Agron.J.* 81, 650-662.
- Allred, B. et Haan, C.T. (1991). Variability of optimized parameter estimates based on observed record length. *Trans. of Amer. Soc. Agr. Eng.*, 34(6), 2421-2426.
- Ambroggi, r. (1963) - Etude géologique du versant méridional du Haut-Atlas Occidental et de la plaine de Souss. *Notes et Mémoires du Service géologique du Maroc*, 157 : 1-321.
- Ambroise B. 1991 Hydrologie des petits bassins versants ruraux en milieu tempéré : Processus et Modèles. Séminaire du Conseil Scientifique du Département "Science du Sol" de l'INRA, (26-27/03/1991), Dijon, 34 p.
- Ambroise B. Genèse des débits dans les petits bassins versants ruraux en milieu tempéré : 1 - Processus et facteurs. *Revue des Sciences de l'Eau*, 1998, vol. 11, n° 4, pp. 471-495.
- Ambroise B. Bucarest, 1999 La dynamique du cycle de l'eau dans un bassin versant : Processus, Facteurs, Modèles. HGA, , 200 p.
- Ambroise B., Beven K. et Freer J. Toward 1996 a generalization of the TOPMODEL concepts : Topographic indices of hydrological similarity. *Water Resources Research*, vol. 32, n° 7, pp. 2135-2145.
- Andreassian V, Perrin C, Le Moine N, Lerat J, LoumagneC, Oudin L, et al. (2009) HESS Opinions 'Crash tests for a standardized evaluation of hydrological models'. *Hydrology and Earth System Sciences* 13: 1757-1764.

- Beven K. et Binley A. The future of distributed models : model calibration and uncertainty prediction. Hydrological Processes, 1992, vol. 6, pp. 279-298.
- Beven K. J. et Kirkby M. J. 1979 A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. Hydrological Sciences Bulletin, , vol. 24, n° 1, pp. 43-69.
- Bian L., H.Sun ,C.blogett,W. Li,an koussis (1996) an interface system to couple the swat model and arc/info Third international conference on integrating environmental odeling,Mexico 21_25_1996
- Bouvier CH., DELCLAUX F., CRESPIY A., 1996. ATHYS : Atelier Hydrologique Spatialisé. In. "L'Hydrologie tropicale : géoscience et outil pour le développement" Publication AISH np238,pp.425-435.
- Brives A. La constitution géologique du Maroc Occidental (cr. AC.SC. CXXXXIV, 1920, p922-925)
- Brocca, L., MELONE, F., MORAMARCO T. and SINGH, V.P. (2009): Assimilation of observed soil moisture data in storm rainfall-runoff data. J. Hydrol. Engng ASCE, 14(2), 153–165.
- Brocca, L., Barbetta, S., Melone, F. and Moramarco,T. (2010a): A continuous rainfall-runoff model derivedfrom investigations on a small experimental basin. IAHS Publ. 336, 179–185.
- Brocca, L., MELONE, F., MORAMARCO, T., WAGNER, W.,NAEIMI, V., BARTALIS, Z. and HASENAUER, S. (2010b):Improving runoff prediction through the assimilation ofthe ASCAT soil moisture product. Hydrol. Earth Syst.Sci., 14, 1881–1893.
- Cappelaere, B., Vieux, B., Peugeot, C , Maia, A. & Séguis, L. (2003) Hydrologie process simulation of a semiarid,endoreic catchment in Sahelian West Niger, Africa: 2. Model calibration and uncertainty characterization. Soumis àJ. Hydrol.
- Hervé Chamley ,1987 Collection "Géosciences"Volume 2de Géosciences
Géosciences: Dunod (Paris. 1987)

- Chahinian N. 2004 Paramétrisation multi-critère et multi-échelle d'un modèle hydrologique spatialisé de crue en milieu agricole. Thèse : Université de Montpellier II, spécialité Sciences de la terre et de l'eau, 2004, 258 p.
- Chaplot V. et Walter C. 2003 Subsurface topography to enhance the prediction of the spatial distribution of soil wetness. *Hydrological Processes*, vol. 17, n° 3, pp. 2567-2580.
- Chaponniere A. 2005 Fonctionnement hydrologique d'un bassin versant montagneux semi-aride Cas du bassin versant du Rehraya (Haut Atlas marocain) Thèse Pour obtenir le grade de Docteur.
- Chocat B. Encyclopédie de l'hydrologie urbaine et de l'assainissement. Paris : Lavoisier TEC&DOC, 1997, 1124 p.
- Cognard-Plancq, A. L., Marc, V., Didon-Lescol, J. F. & Normand, M. (2001) The role of forest cover on streamflow down sub-Mediterranean mountain watersheds: a modelling approach. *J. Hydrol.* 254, 229 - 243.
- Cormary, Y. et Guilbot, A. (1973). Etude des relations pluie-débit sur trois bassins versants d'investigation. *Proceedings of the IAHS Madrid Symposium*, IAHS Publ. 108, 265-279.
- Cosandey, C., Boudjemline, D., Roose, E. & Lelong, F. (1990) Etude expérimentale du ruissellement sur des sols à végétation contrastée du Mont Lozère. *Zeit.fur Géomorph. N. F.* 34(1), 61 - 77.
- Coustau, M., Bouvier, C., Borrell-Estupina, V., and Jourde, H. Flood modelling with a distributed event-based parsimonious rainfall-runoff model: case of the karstic Lez rivercatchment, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 12, 1119-1133, doi:10.5194/nhess-12-1119-2012, 2012.
- Deutsch, B., et al., 2005. Re-Greening Washington, DC: A Green Roof Vision Based on Quantifying Storm Water and Air Quality Benefits, Casey Trees Endowment Fund and Limno-Tech, Inc., Washington, DC.
- Direction de la recherche et de la planification de l'eau. (2006). Etude de révision du plan directeur d'aménagement intègre des ressources en eau de bassin du

Souss-Massa, Mission collecte des données diagnostic et évaluation des ressources en eau et état de leur utilisation ;

-
- Diskin, M.H. et Simon, E. (1977). A procedure for the selection of objective functions for hydrologic simulation models. *Journal of Hydrology*, 34, 129-149.
- Duan Q. Y., Sorooshian S. et Gupta H 1992 Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. *Water Resources Research*, , vol. 28, n° 4, pp. 1015-1031.
- Dunne T. 1978 Field studies of hillslope flow processes. In : *Hillslope hydrology*. Kirkby, M.J. New York, Wiley, pp. 227-293.
- Duros, V. (2001) : Adaptation d'un modèle agri-environnemental au contexte dedeux bassins versants Bretons. Mémoire de DESS. Université Jean Monnet de St-Etienne. Cemagref Rennes 57 pp.
- Edijatno, Nascimento, N.O., Yang, X., Makhoulf, Z. et Michel, C. (1999). GR3J: a daily watershed model with three free parameters. *Hydrological Sciences Journal*44(2), 263-277.
- Edijatno et Michel, C. (1989). Un modèle pluie-débit à trois paramètres. *La Houille Blanche*, n°2, 113-121.
- Estupina borrell V. (2004). Vers une modélisation hydrologique adaptée à la prévision opérationnelle des crues éclairApplication à de petits bassins versants du sud de la France
- Fadil A., H. Rhinane, A. Kaoukaya, Y. Kharchaf, and O. A. Bachir, 2011 "Hydrologic Modeling of the Bouregreg Watershed (Morocco) Using GIS and SWAT Model," *J. Geogr. Inf. Syst.*, vol. 03, no. 04, pp. 279-289.
- FAO/IIASA/ISRIC/ISS-CAS/JRC, 2009 Harmonized World Soil Database (version 1.2) FAO, Rome, Italy and IIASA, Laxenburg, Austria.
- Flugel W. A. 1997 Combining GIS with regional hydrological modeling using hydrological response units (HRUs) : An application from Germany. *Mathematics and Computers in Simulation*, vol. 43, n° 3-6, pp. 297-304.

- Fohrer N, Haverkamp S, Frede HG. 2005. Assessment of the effects of land use patterns on hydrological landscape functions: development of sustainable land use concepts for low mountain range areas. *Hydrological Processes* 19: 659–672. DOI: 10.1002/hyp.5623.
- Fritsch, J.M. (1995). Occupation des sols et régimes hydrologiques : les enseignements de bassins versants guyanais. *Ann.Géo.*, n° 581-582, 26-63.
- Gan, T.Y. et Biftu, G.F. (1996). Automatic calibration of conceptual rainfall-runoff models: optimization algorithms, catchment conditions, and model structure. *Water Resources Research*, 32(12), 3513-3524.
- Garrick, M., Cunnane, C. et Nash, J.E. (1978). A criterion of efficiency for rainfall-runoff models. *Journal of Hydrology*, 38, 375-381.
- Gaume, E., Livet, M., Desbordes, M., Villeneuve, J.-P., 2004. Hydrological analysis of the river Aude, France, flash flood on 12 and 13 November 1999. *Journal of Hydrology* 286, 135–154.
- Gentil .1905 Sur la présence de schistes à graptolites dans le haut atlas marocain (cr, AC, SC, CXL, p1659-1660).
- Gnouma R., 2006. Aide à la calibration d'un modèle hydrologique distribué au moyen d'une analyse des processus hydrologiques: application au bassin versant de l'Yzeron. Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, Lyon, 412 p.
- Grayson R. B. et Blöschl G. 2000 Spatial modelling of catchment dynamics. In *Spatial patterns in catchment hydrology : observation and modelling*. Grayson, R. and Blöschl, G. (eds), Cambridge University Press, UK., pp. 51-81.
- Green et Arnold. (2007). The Soil and Water Assessment Tool: Historical development, applications, and future directions. *Transactions of the ASABE* 50 (4): pp. 1211-1250.
- Green W. H., Ampt G. A., 1911. Studies on soil physics, The flow of air and water through soils. *Journal of Agricultural Sciences*, 4, pp. 11-24.

- Gupta, H.V., Sorooshian, S. et Yapo, P.O. (1998). Toward improved calibration of hydrologic models: multiple and noncommensurable measures of information. *WaterResources*
- Hargreaves, G. H., & Samani, Z. A. (1985). Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engineering in Agriculture*, 1(2), 96–99.
- Hewlett J. D. et Hibbert A. R. 1967 Factors affecting the response of small watersheds to precipitation in humid area. *International Symposium on Forest Hydrology*, Pergamon, Oxford, pp. 275-290.
- Himmelblau D.M. (1972). *Applied nonlinear programming*, Ed. McGrawHill, N.Y., 497p.
- .Horton R. E. 1933 The role of infiltration in the hydrologic cycle. *Transactions American Geophysical Union*, vol. 14, pp. 446-460.
- Huang, M., Gallichand, J., Dong, C., Wang, Z., and Shao, M. 2007 Use of soil moisture data and curve number method for estimating runoff in the Loess Plateau of China, *Hydrol. Process.*, 21, 1471–1481,.
- Humbert J. et Najjar G. 1992 Influence de la forêt sur le cycle de l'eau en domaine tempéré : une analyse de la littérature francophone. *Université Louis Pasteur - Strasbourg I*, 85 p.
- Hursh C. R. 1936 Storm-water and absorption. *Transactions, American Geophysical Union*, vol. 17, pp. 301-302.
- Ibbitt, R.P. et Hutchinson, P.D. (1984). Model parameter consistency and fitting criteria. *Proceedings of the 9th IFAC Triennial World Congress*, Budapest, Hungary, IFAC Pub., 3169-3173.
- Ibbitt, R.P. et O'Donnell, T. (1971a). Designing conceptual catchment models for automatic fitting methods. *IAHS Publication* n° 101, 462-475.

- Indarto K. 2002 Découpages spatiaux et conséquences sur le bilan hydrologique - Application au bassin de l'Orb à travers une démarche de modélisation hydrologique distribuée. Thèse : ENGREF Montpellier, 252 p.
- Jain A. & Srinivasulu S., 2006. Integrated approach to model decomposed flow hydrograph using artificial neural network and conceptual techniques. J. Hydrol., 317(3-4), 291-306.
- Johnston, P.R. et Pilgrim, D.H. (1976). Parameter optimization for watershed models. Water Resources Research, 12(3), 477-486.
- Klemes V. 1983 Conceptualisation and scale in hydrology. Journal of Hydrology, vol. 65, n° 13, pp. 1-23.
- Madsen H. 2000 Automatic calibration of a conceptual rainfall-runoff model using multiple objectives. Journal of Hydrology, vol. 235, n° 3-4, pp. 276-288.
- Makhoul, Z. et Michel, C. (1994). A two-parameter monthly water balance model for French watersheds. Journal of Hydrology, 162, 299-318.
- MARCHANDISE A. 2010 Modélisation hydrologique distribuée sur le Gardon d'Anduze ; étude comparative de différents modèles pluie-débit, extrapolation de la normale à l'extrême et tests d'hypothèses sur les processus hydrologiques. Thèse de Doctorat universelle.
- Marchandise, A. and Viel, C., 2009. Utilisation des indices d'humidité de la chaîne Safran-Isba-Modcou de Météo-France pour la vigilance et la prévision opérationnelle des crues - Using the Météo-France Safran-Isba-Modcou data for operational flood warning and forecasting. La Houille Blanche(6), 35-41.
- Martinec, J. et Rango, A. (1989). Merits of statistical criteria for the performance of hydrological models. Water Resources Bulletin, 25(2), 421-432.
- Melching C. S. 1995 Reliability estimation. In : Computer models of watershed hydrology. Editor Vijay p. singh, Water Resources Publications, Louisiana, USA, pp. 69-118.

- Michel, C. (1983). Que peut-on faire en hydrologie avec un modèle conceptuel à un seul paramètre ? La Houille Blanche, 1, 39-44.
- Monteith, J. L. 1965. "Evaporation and Environment." In: The state and movement of water in living organism. 19th Symp. Soc. Exptl. Biol. P. 205-234.
- Morin Guy, Denis Couillard , Daniel Cluis , H. Gerald Jones & Jean Maurice Gauthier (1987) prévision des températures de l'eau en rivière à l'aide d'un modèle conceptuel, Hydrological Sciences Journal, 32:1, 31-41, DOI: 10.1080/02626668709491160.
- Mouelhi S. 2003 Vers une chaîne cohérente de modèles pluie-débit conceptuels globaux aux pas de temps pluriannuel, annuel, mensuel et journalier. Thèse : ENGREF Paris, Cemagref Antony, 323 p.
- Mouelhi S., Michel C., Perrin C., et al. 2006 Stepwise development of a two-parameter monthly "water balance model. Journal of Hydrology, vol. 318, n° 1-4, pp. 200-214.
- Moussa, R. and Chahinian, N. 2009 Comparison of different multi-objective calibration criteria using a conceptual rainfall-runoff model of flood events, Hydrol. Earth Syst. Sci., 13, 519-535, doi:10.5194/hess-13-519-2009.
- MUSY A. et HIGY C., 2004, Hydrologie (1. Une science de la nature), Presses polytechniques et universitaires romandes, (21), 314 p.
- Nachtergaele F, Petri M, Van Velthuisen H, Biancalani R, Van Lynden G, George H (2009) Forthcoming. Global land degradation information system (GLADIS in preparation). LADA internal document. FAO.
- Nascimento, N.O. (1995). Appréciation à l'aide d'un modèle empirique des effets d'actions anthropiques sur la relation pluie-debit à l'échelle du bassin versant. Thèse de Doctorat, CERGRENE, ENPC, Paris, France, 550 p.
- Nash J. E. et Sutcliffe J. V. 1970 River flow forecasting through conceptual models. Part I - A discussion of principles. Journal of Hydrology, vol. 10, n° pp. 282-290.

- Nelder J. A. et Mead R. 1965, A simplex method for function minimization. The Computer Journal, vol. 9, pp. 308-313.
- Obled C. 2003 Topmodel : principes de fonctionnement et limitation. Séminaire SHF : Genèse des crues et inondations : compréhension actuelle des phénomènes physiques, Paris.
- Payraudeau S. Modélisation distribuée des flux d'azote sur des petits bassins versants méditerranéens. Thèse : ENGREF Montpellier, spécialité Sciences de l'eau, 2002, 225 p.
- Perrin, C. (2000). Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative. INPG (Grenoble), Cemagref (Antony), 530 p.
- Perrin, C., Michel, C., Andréassian, V. (2003). Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. Journal of Hydrology 279 (1-4), 275-289.
- Perrin, C., Michel, C., Andréassian, V. (2001). Long-term low flow forecasting for French rivers by continuous rainfall-runoff modelling, Meeting of the British Hydrological Society on Continuous River Flow Simulation. BHS Occasional Paper n° 13, Wallingford, UK, 5th July 2001, 21-29.
- PRIESTLEY C.H.B., TAYLOR R.J. (1972). On the assessment of surface heatflux and evaporation using large-scale parameters. Monthly weatherreview, 100(2), 81-92.
- Refsgaard J. C. et Storm B. Chapter 3 : Construction, calibration and validation of hydrological models. In : Distributed Hydrological Modelling. Kluwer Academic Publishers. Netherlands, 1996, pp. 41-42.
- Reggiani P., Sivapalan M. et Hassanizadeh S. M. A unifying framework for watershed thermodynamics : balance equations for mass, momentum, energy and entropy, and the second law of thermodynamics. Advances in Water Resources, 1998, vol. 22, n° 4, pp. 367-398.
- Richardson, C. W. (1981), Stochastic simulation of daily precipitation, temperature, and solar radiation, Water Resour. Res., 17(1), 182-190, doi:[10.1029/WR017i001p00182](https://doi.org/10.1029/WR017i001p00182).

- Rosenbrock H. H. An automatic method for finding the greatest or the least value of a function. The Computer Journal, 1960, vol. 3, pp. 175-184.
- Roux, H., Labat, D., Garambois, P.-A., Maubourguet, M.-M., Chorda, J., and Dartus, D.: A physically-based parsimonious hydrological model for flash floods in Mediterranean catchments, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 11, 2567–2582, doi:10.5194/nhess-11-2567-2011, 2011.
- Ruelland, D., 2004. Seneque, logiciel SIG de modélisation prospective de la qualité de l'eau. Revue Internationale de Géomatique, 14: 97-117.
- Sabol G.V 1988 Clark unit hydrograph r-parameter estimation journal of hydraulic :114/1 1,103-111
- Saxton, K.E., Rawls, W.J., 2006. Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions. Soil Sci Soc Am J, 70. pp. 1569-1578.
- Sefe, F.T. et Boughton, W.C. (1982). Variation of model parameter values and sensitivity with type of objective function. Journal of Hydrology, 21(2), 117-132.
- Sharpley, A. N. and Williams, J. R. Editors. EPIC Erosion-Productivity Impact Calculator: 1. Model Documentation. USDA Technical Bulletin No. 1768. 235 pp. U.S. Govt. Printing Office, Washington, DC. 1990.
- Šimůnek J., Šejna M. & van Genuchten M.Th., 2007. The HYDRUS Software package for simulating the two- and three-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media. Technical manual version 1.0. Riverside, CA, USA: Department of Environmental Sciences, University of California Riverside.
- Šimůnek J. & van Genuchten R., 2008. The HYDRUS-1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media. Technical manual version 4.0. Riverside, CA, USA: Department of Environmental Sciences, University of California Riverside.
- Singh V. P. Watershed modeling. In : V.P. Singh (Editor), Computer Models of Watershed Hydrology. Water Resources Publications, Highlands Ranch, Colorado, USA, 1995.

- Sklash M. G. et Farvolden R. N. The role of groundwater in storm runoff. *Journal of Hydrology*, 1979, vol. 43, n° 1-4, pp. 45-65.
 - Sklash M. G., Farvolden R. N. et Fritz P. A conceptual model of watershed response to rainfall, developed through the use of oxygen-18 as a natural tracer. *Can. J. Earth Sci.*, 1976, vol. 13, pp. 271-283.
 - Smith, M.B., Seo, D.-J., Koren, V.I., Reed, S., Zhang, Z., Duan, Q.-Y., Cong, S., Morel, F., 2004. The distributed model intercomparison project (DMIP): motivation and experiment design. *Journal of Hydrology*, 298(1-4), 4-26.
 - Sorooshian, S. (1981). Parameter estimation of rainfall-runoff models with heteroscedastic streamflow errors - the non-informative data case. *Journal of Hydrology*, 52, 127-138.
 - Sorooshian, S. (1985). Synthesis of hydrologic and system sciences in the development of rainfall-runoff models. *Applied mathematics and Computation*, 17, 279-298.
 - Sorooshian, S., Gupta, V.K. et Fulton, J.L. (1983). Evaluation of maximum likelihood estimation techniques for conceptual rainfall-runoff models: influence of calibration data variability and length on model credibility. *Water Resources Research*, 19(1), 251-259.
- Sorooshian, S. et Gupta, V. (1985). The analysis of structural identifiability: theory and applications of conceptual rainfall-runoff models. *Water Resources Research*, 21(4), 487-495.
- Steenhuis, T.S., Winchell, M., Rossing, J., Zollweg, J.A., Walter, M.F., 1995. SCS runoff equation revisited for variable-source runoff areas. *American Society of Civil Engineers, Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 121, 234- 238
 - Todini, E. 1988. Rainfall-runoff modeling-- past, present, and future. *J. Hydrol.* 100: 341 - 352.
 - Trambly, Y., Bouvier, C., Martin, C., Didon-Lescot, J.-F., Todorovik, D., and Domergue, J.-M.: Assessment of initial soil moisture conditions for event-based rainfall-runoff modeling, *J. Hydrol.* 387, 176-187, 2010

- USACE: Hydrologic Modeling System HEC-HMS, Technical reference manual version 3.5, US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering center, Davis, USA, 2010.
- USDA-SCS: National Engineering Handbook, Section 4, Hydrology, Washington, DC, USA, 1985
- Vieux, B. E. & Gaur, N. (1994) Finite-element modeling of storm water runoff using G R A S S GIS. *Microcomputers in Civil Engineering* 9, 263 - 270 .
- Weeks, W.D. et Hebbert, R.H.B. (1980). A comparison of rainfall-runoff models. *Nordic Hydrology*, 11, 7-24.
- Weglarczyk, S. (1998). The interdependence and applicability of some statistical quality measures for hydrological models. *Journal of Hydrology*, 206, 98-103.
- Willmott, C.J. (1981). On the validation of models. *Physical Geography*, 2(2), 184-194.
- Western A. W., Grayson R. B., Blöschl G., et al. Observed spatial organization of soil moisture and its relation to terrain indices. *Water Resources Research*, 1999, vol. 35, n° 3, pp. 797-810.
- Western A. W., Zhou S. L., Grayson R. B., et al. Spatial correlation of soil moisture in small catchments and its relationship to dominant spatial hydrological processes. *Journal of Hydrology*, 2004, vol. 286, n° 1-4, pp. 113-134.
- WMO (1975). Intercomparison of conceptual models used in operational hydrological forecasting. Operational Hydrology Report n° 7, WMO n° 429, World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland.
- WMO (1986). Intercomparison of models of snowmelt runoff. Operational Hydrology Report n° 23, WMO n° 646, World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland.

- WMO (1992). Simulated real-time intercomparison of hydrological models. Operational Hydrology Report n° 38, World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland.

- Yapo, P.O., Gupta, H.V. et Sorooshian, S. (1996). Automatic calibration of conceptual rainfall-runoff models: sensitivity to calibration data. Journal of Hydrology, 181, 23-48.

ANNEXES

COMPARAISON OF TWO HYDROLOGICAL MODELS (LUMPED AND DISTRIBUTED) OVER A PILOT AREA OF THE ISSEN WATERSHED IN THE SOUSS BASIN, MOROCCO

Hassan Brirhet, (PhD)

Lahcen Benaabidate (Pr.)

University of Sidi Mohammed Ben Abdellah, Faculty of Sciences and Techniques, Morocco

Abstract:

The present study aims to develop a hydrological model of forecasting and flood adapted to the arid environment in the Issen basin (sub Aguenza basin) through a comparison between two conceptual hydrological models (HEC HMS), part of global models and Athys is a conceptual distributed model rarely used in the Moroccan context.

The aim is to measure the degree of adaptability of these models to this area in order to generalize the selected model to the whole watershed

The results obtained from the validation phase of the two models were satisfactory, the two models were able to reproduce the hydrological behavior of the Aguenza watershed during floods, as this study has shown that a good model distributed can provide improvements over a global model for ads and flood forecasting and particularly in terms of forecasting the flood volume as in our case study.

Key Words: Hydrology, Issen, Modeling, HEC-HMS, ATHYS

Introduction:

Flood forecasting involves simulating the hydrologic response of a watershed to environmental inputs, principally precipitation and temperature. A flood forecast system, therefore, must integrate components or sub-systems that estimate recent and future precipitation and temperature, simulate the hydrologic response, and provide useful information about the resulting streamflow, stage, and other impacts. Because the value of a hydrologic forecast system depends on predicting runoff conditions before they occur, it is vital that the system minimize potential delays in performing these functions and preparing the forecast output. The following discussion describes typical requirements of a forecast system, although specific requirements may vary depending on watershed characteristics, available data, and other resources.

The present study has as main aim the research of the model which to allow to represent the hydrological operation of the area catchment of Aguenza basin (under basin of Issen

in souss) through the test and the implementation of certain hydrological models which showed their robustness and their performance with the international scale on a pilot zone of the basin, in prospect to generalize the model retained on all the basin.

The two models chosen for this study are HEC-HMS (Lumped Model) and Athys (Distributed Model)

The study area

The river basin of Aguenza extends over an area of 648 Km² (Fig.1). The High Atlas Mountains form the northern and eastern boundary of the basin. The Anti-Atlas Mountains form the southern boundary. The climate in the basin is arid to semi-arid with the largest precipitation occurring in the High Atlas Mountains.

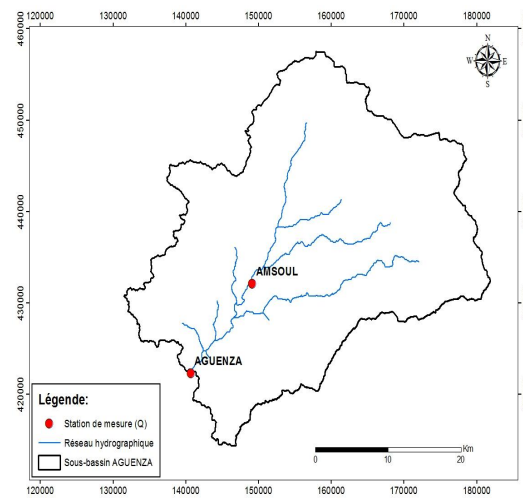


Figure1: Location of climate stations

The average annual precipitation in the upper elevation zones of the High Atlas Mountains ranges from 500 to 600 mm per year, 150 to 200 mm for the Anti-Atlas Mountains, with a total average for the basin of 280 mm.

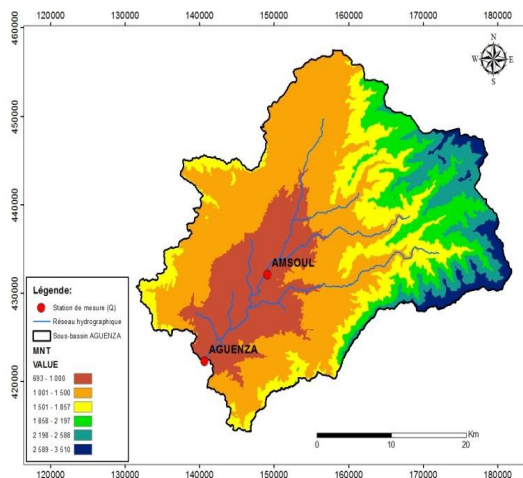


Figure2: Digital elevation Model (DEM)

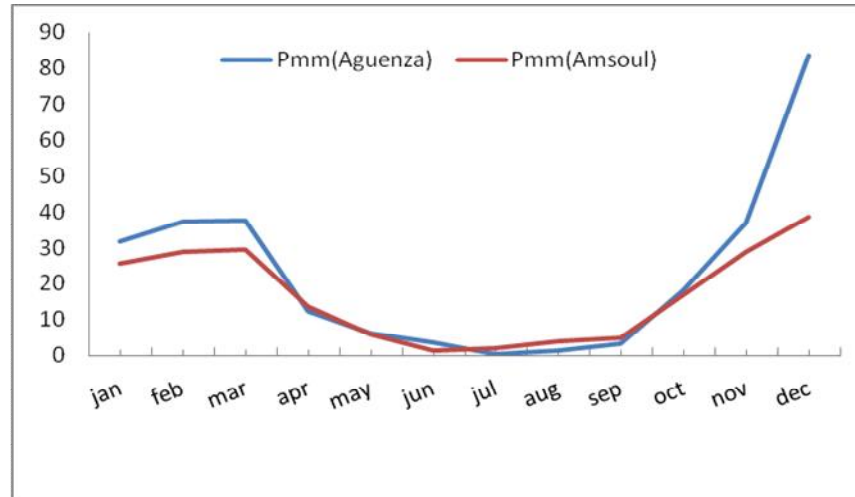


Figure 3: Monthly mean precipitation (1980–2010) at the different stations

Materials and Methods

Hydrological models simulate the conversion of rainfall (and snowmelt) depth to runoff amount. This process includes the losses due to interception of rainfall by leaf cover, infiltration of rainfall into the soil as well as the timing of the runoff.

In general, two distinct options are available to model the hydrological processes. The lumped model considers individual sub-basins as a single unit, whereas the distributed model sub-divides each sub-basin in smaller cells. A lumped hydrological model averages spatial characteristics related to rainfall-runoff response for the entire area of a sub-basin being analyzed, whereas a distributed model explicitly accounts for spatial variability using spatial datasets describing soils, vegetation, and land use. A distributed model will subdivide a sub-basin area based on a particular grid size to capture spatial and temporal variability and then route flows through the sub-basin from cell to cell. For a lumped model a sub-basin may be subdivided into elevation zones in order to capture the variability of snow accumulation at different elevations. Figure 1 demonstrates the conceptual difference between lumped and distributed subdivisions for a sub-basin. In either case sub-basins may be aggregated through routing models to form the simulation of a complete river basin.

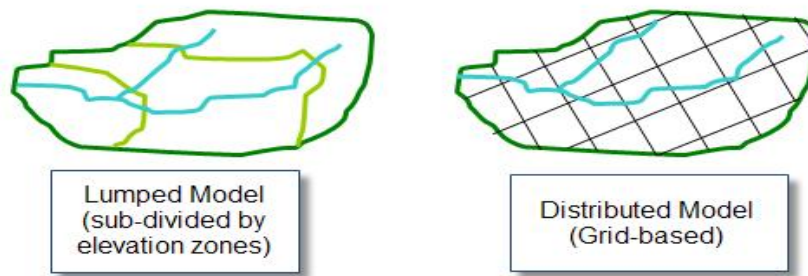


Figure 4: Lumped versus Distributed Basin

With lumped models, various parameters related to the volume and timing of hydrologic processes are calibrated to accurately simulate historical streamflow from historical precipitation and temperature observations. Distributed models rely on spatial data sets but generally also require some calibration to optimize simulations.

Some advantages of distributed models compared with lumped models include their ability to predict runoff at un-gauged locations in the watershed, simulation of water quality parameters, and predicting impacts due to change in land use (Smith et al., 2004). In theory, the ability to account for spatial variability of rainfall and physical features within a basin should achieve better simulations. However, recent studies have suggested that distributed modeling approaches do not always provide improved basin outlet simulations compared to lumped conceptual models (Reed et al., 2004; Smith et al., 2004).

The general approach first of all consisted in preselecting the models to be studied and to apply to the zone controls then to gather and prepare the data necessary while carrying out creation of a space database under a geographical information system (SIG). An evaluation of the quality of existing and collected information was carried out to come to a conclusion about the data which will be taken into account. Then, the list of the data which will be generated starting from the satellite images or other layers by using the SIG was defined. The second phase related to the execution of hydrological models HEC-HMS and ATHYS on Aguenza watershed then the validation of these models. The last phase was booked with the analysis and the interpretation of the got results.

III.1 Preselection of the models to be applied to the study area .

The choice of conceptual models HEC-HMS and ATHYS is justified by several criteria which are essential for the total modeling of the catchment area of Aguenza. These elements can be summarized as follows:

▪ Approach of Preparations of the Data

On the basis of list of the risings recorded on the basin, which was used as a basis for the data-gathering, of the events of risings were selected for the chock of the parameters of the model. The selection criteria are:

- ✓ Availability of sufficient data of rains day labourers on the basin to represent the space distribution of the event;
- ✓ Disponibilty of data of close recording rain-gauges to represent the temporal repair of the event of rain;
- ✓ Compatibilté between the rain day labourer recorded on the zone of the recording rain-gauge and the other stations pluviometric, proving that it is about a generalized event and who allows to be able to apply the temporal distribution to all the basin; Indeed, for the zones chosen for the chock of the model, there N is generally only one recording rain-gauge and which is located generally downstream and not at the top of

basin and its data could not represent what occurs on the upstream from the basin if it is not about a generalized event.

▪ **The basic information necessary to the operation of the selected models**

- a- **Relief:** digital terrain model (MNT) used is the GDEM-ASTER. It has a space resolution of 30 m and it was extracted from the satellite images ASTER through the process of stereoscopy;
- b- **Land use :** it was generated starting from Global Land Cover Map- European Space Agency (ESA) GlobalCover9
- c- **Soil types:** the data are extracted by combining the existing pedological map with the level of the basin (map au1/500 000) and the database of the grounds worked out by the FAO which provides a set of information on the ground. On the basin of Tsalat it there are a predominance of the podzolised red grounds, brown grounds of the forests of mountains and not very advanced grounds. The soil coverage that was used in the model was downloaded from the FAO Geonetwork (www.FAO.org/geonetwork) Harmonized World Soil Database (HWSD) Version 1.2 (FAO, 2012).
- d- **Weather data:** precipitations were spatialized starting from pluviometric stations installed in the basin by using the interpolation by the method of Thiessen.
- e- **Data of flows:** this information was collected and structured in digital files starting from the base of data BADRE21 of the direction of research and Moroccan planning.
- f- **Data processing :** The preparation of the data for HEC-HMS was carried out by using the extension HEC-DSS which makes it possible to prepare all the data, diagrams and files necessary to the operation of model HEC-HMS. The version of the software used in this work is version HEC-HMS 3.5
The preparation of the data for model ATHYS was made by using the platform available to the level of model ATHYS with the conversion of the data the extension fts.63.

I- DESCRIPTION OF HEC-HMS AND ATHYS MODELS

It was decided to adopt a noncontinuous model, based on the events. Table below watch methods definitively adopted and parameters necessary for the two models.

A. HEC-HMS

platform HEC-HMS, free available on Internet (<http://www.hec.usace.army.mil/software/hechms/>) modeling rain-flow of the risings requires to consider several components of the flow; basic flow, losses and the transfer of the flow of the slopes towards the downstream.

Baseflow Method

Five baseflow methods are offered in HEC-HMS. The baseflow represents contributions from the aquifer or from interflow. For all of the baseflow methods, the initial baseflow volume strongly influences the amount of baseflow the model simulates.

in the method of the Recession Baseflow: This method resets after precipitation events and therefore can be used for either event or long term simulations, but is primarily intended for event simulation.

$$B_t = B_i R_c^t$$

Where B_i is the initial basic flow in time t_0 and R_c the constant of exponential decay. The parameters of the recession are:

1. Initial basic flow, B_i (m³s⁻¹)
2. The constant of R_c recession ([0-1])
3. Threshold, T_d ([0-1])

Loss method

In this study, the model of losses SCS (USDA-SCS, 1985) at appointed summer. Many studies indeed used successfully this model in Mediterranean context and semi-arid (Brocca and al., 2009; Trambly and al., 2010). In addition this model is adapted to give an account of the initial conditions of moisture of the basins slopes to the event-driven scale. The parameter CN (or S) can indeed be connected to various indicators of moisture of the grounds, measured on the ground (Huang and al., 2007; Brocca and al., 2009; Trambly and al., 2010), resulting from models (Goods and Viel, 2009) or obtained by satellite (Brocca and al., 2010).

The SCS Curve Number Loss method calculates the incremental precipitation lost to infiltration for each time step. The parameters for the method must be derived from physical properties of the basin, including soil type and land use.

The curve number has clearly defined ranges and should not be specified with values beyond the defined ranges. This method is recommended for basins that do not have a good flow record for calibration.

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

Where P_e indicates the excess of precipitations, P the total of precipitations, I_a the initial losses and S the maximum potential of retention. In the method SCS, the losses initial are given by the I_a relation = 0,2S. The potential of retention S is connected to Curve Number (CN), itself being able to be estimated by tables describing the various soil types (USDA-SCS, 1985) or by calibration with data observed data:

$$S = \frac{254400 - 254CN}{CN}$$

Transform Method

The method of the unit hydrograph of Clark represents 2 processes; translation and attenuation. The translation is based on a synthetic histogram time-surface with a time of concentration T_c . The histogram represents the surface of the basin which contributes to the flow with the discharge system according to time. The attenuation is modelled by a linear tank. The tank represents stock at the level of the basin, S_t the average outgoing flow of the tank for one period T is given by:

$$O_t = C_A I_t + C_B O_{t-1}$$

With I_t , flow entering the reservoir at time t , C_A , C_B , of the coefficients calculated with the relation:

$$C_A = \frac{\Delta t}{S_t + 0,5\Delta t} \text{ et } C_B = 1 - C_A$$

dt is the step of computing time, here 1 hour.

The parameters required by the method of Clark are thus:

1. The time of concentration, Tc (hours)
2. The coefficient of storage, St (hours)

These two parameters can be estimated by calibration when recordings of rain and flow are available.

B. ATHYS

The model of production developed by Soil Conservation Service (SCS) of the USDA (Mishra and Singh, 2003; Steenhuis and al., 1995) connect to the office plurality of the effective rain EP to the office plurality of the rough rain Pb, by the equation:

$$P_e = \frac{(P_b - I_a)^2}{(P_b - I_a) + S}$$

The parameters of adjustment of the model are Ia and S. One generally admits that Ia and S are bounded by the relation:

$$I_a = 0.2 * S$$

S, expressed in mm, can also be connected to Curve Number of the SCS by :

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

In MERCEDES, one uses the expression of the coefficient of instantaneous streaming, which is written (Gaume et al., 2004):

$$f) = \frac{\partial P_b}{\partial P_e} = \left(\frac{P_b - 0.2S}{P_b + 0.8S} \right) \left(2 - \frac{P_b - 0.2S}{P_b + 0.8S} \right)$$

This diagram was also supplemented, in MERCEDES, by a tank ground, whose level describes the evolution of stock. The tank is supplied by the water which infiltrates, and it is drained by the evaporating recovery, the percolation towards the deep and exfiltrated water. The equations of the diagram are as follows:

$$= C(t) \times i(t)$$

and

$$\frac{i(t) - 0.2S}{i(t) + 0.8S} \left(2 - \frac{P^*(t) - 0.2S}{P^*(t) + 0.8S} \right)$$

where P*correspond with the excess of of the rain, supply réservoir

$$f(t) = (1 - C(t)) \times i(t)$$

Draining of the tank ground

$$Vid(t) = DS.S(t)$$

The $S(t)$ désigne le niveau du réservoir sol à l'instant t

In independent pixels mode, each pixel produces with each step of time an elementary hydrograph to the discharge system. The addition of all the elementary hydrographs, for all the pixels and all the steps of time, provides the complete hydrograph of the rising.

The elementary hydrograph is determined by a diagram of type translation/storage, dependent on:

- T_m , travel time to the discharge system of the contribution produced by the mesh, calculated according to the L_k lengths and V_k speeds relative to each K-mesh of the trajectory:

$$T_m = \sum_k \frac{l_k}{V_k} \cdot \frac{60}{dt}$$

K_m , the time of damping, appearing the variations speeds in time. Damping is simulated by a linear tank, of which capacity k_m .

The equation of the elementary hydrograph is :

$$q(t) = 0 \quad t < t_0 + T_m$$

$$q(t) = \frac{p(\Delta t)}{K_{ne}} \cdot \exp\left(-\frac{t - (t_0 + T_m)}{K_{ne}}\right) \cdot A \quad t < t_0 + T_m$$

Results and Discussions:

Calibration consists in adjusting the numerical values assigned to model parameters to best reproduce the observed response. It is the process of choice of parameter values games. This can be done manually by a model sensitivity analysis procedure or automatically by an optimization procedure in seeking the optimum value of a given criterion function that improves consistency between observed and simulated response of the basin.

The calibration test is the standard deviation and coefficient of MSE Nash. We will use in this study a manual procedure by the sensitivity analysis primarily for all parameters of each production function and thereafter to the transfer function.

➤ Calibration of model parameters HEC-HMS

The table below shows the calibration results of HEC-HMS model parameters used for each event:

Table 1 : Calibration results of HEC-HMS model parameters

Episode	CN	Tc (h)	St (h)	NASH	Observed volume (m ³)	Observed Qp (m ³ /s)	Simulated Qp (m ³ /s)	Simulated volume (m ³)
---------	----	-----------	-----------	------	--------------------------------------	------------------------------------	-------------------------------------	---------------------------------------

12/26/1996	70	3	3	0.7	11736000	326	301	10836000
1/10/1996	40	3	5	0.8	8316000	220	217	8202600
12/13/1995	60	3	3	0.7	14580000	540	530	14310000
2/17/1991	64	3	3	0.8	4284000	140	142	4345200
11/9/1988	63	3	3	0.8	9450000	350	270	7290000
11/5/1988	65	3	3	0.7	1458000	81	90	1620000
10/15/1988	55	3	2	0.7	1749600	81	38.2	825120
11/4/1984	65	3	3	0.8	8640000	200	192	8294400

➤ Calibration of model parameters ATHYS

The table below shows the calibration results of ATHYS model parameters used for each event:

Table 2 : Calibration results of ATHYS model parameters

Episode	Obs. Qp (m ³ /s)	Obs. Vol. (m ³)	Tb (h)	Sim. Qp (m ³ /s)	Sim. Vol. (m ³)	NASH	S	W	DS	V0	K
12/26/96	326	11736000	20	312	11232000	0.8	130	0.2	0.5	3	0.9
1/10/96	220	8316000	21	243	9185400	0.7	100	0.5	0.49	0.7	0.8
12/13/95	540	14580000	15	600	16200000	0.59	73	0.2	3	4	0.7
2/17/91	140	4284000	17	156	4773600	0.46	70	0.1	0.1	0.5	0.1
11/9/88	350	9450000	15	290	7830000	0.87	35	0.20	1	3	0.7
11/5/88	81	1458000	10	95	1710000	0.44	87	0.1	1	3	0.7
10/15/88	81	1749600	12	78	1684800	0.83	87	0.10	0.5	3	0.7
11/4/84	200	8640000	24	145	6264000	0.81	130	0.10	0.1	3	0.7

➤ Validation phase

The model is validated using two different approaches. Due to the limited sample size a classical split-sample approach is tested, using the 8 first events for calibration and the remaining 5 events for validation.

Table 3 : validation results of HEC-HMS model parameters

Episode	CN	Tc(h)	St(h)	NASH	Observed volume (m ³)	Observed Qp (m ³ /s)	Simulated Qp (m ³ /s)	Simulated volume (m ³)
11/28/2014	70	3	3	0.6	11485800	425.4	393	10611000
12/21/2000	69	3	2	0.9	3045600	94	91	2948400
12/20/2000	90	3	3	0.5	414720	12.8	11.7	379080

12/6/1999	90	3	2	0.4	4989600	126	119	4712400
2/1/1998	72	3	3	0.7	6300000	140	135.7	6106500

➤ Calibration of model parameters ATHYS

The table below shows the calibration results of ATHYS model parameters used for each event:

Table 4 : validation results of ATHYS model parameters

Episode	Obs. Qp (m ³ /s)	Obs. Vol. (m ³)	Tb (h)	Sim. Qp (m ³ /s)	Sim. Vol. (m ³)	NASH	S	W	DS	V0	K
11/28/14	425.4	11485800	15	362	9774000	0.8	62	0.2	4	4	0.7
12/21/00	94	3045600	18	87	2818800	0.8	50	0.1	0.5	3	3
12/20/00	12.8	414720	18	10	324000	0.5	50	1	15	1.5	2
12/6/99	126	4989600	22	110	4356000	0.6	20	0.1	2.5	1	0.7
2/1/98	140	6300000	25	132	5940000	0.6	100	0.2	20	0.5	0.1

➤ Evaluation simulations

Besides the visual examination of the simulated hydrographs, different metrics can be used to measure the ability of the rainfall-runoff model to reproduce the flood events. For each event, a measure commonly used in hydrology is the Nash coefficient between the measured flow rates and calculated flows Q Q_e for each time t :

$$NASH = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n \left(Q_t - Q_{e_t} \right)^2}{\sum_{t=1}^n \left(Q_t - \bar{Q} \right)^2}$$

To assess the ability of the model to reproduce several episodes, one can make the mean or median of the Nash coefficient, or calculate the bias (RBIAS) and quadratic errors related (RRMSE) on volumes and pics:

$$RBIAS[\%] = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{X_i - Y_i}{X_i} \right) \times 100$$

$$RRMSE [\%] = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{X_i - Y_i}{X_i} \right)^2} \times 100$$

Wherein X and Y are the volumes or flood peaks respectively observed and measured for each episode i .

Table 5: Indicators results of ATHYS and HEC-HMS models

	Indicators			
	HEC-HMS		ATHYS	
	Calibration	Validation	Calibration	Validation
MEANS NASH	0,65	0.62	0.67	0.66
RBIAS VOLUME	9.75%	5.6%	2.1%	7.8%
RRMSE VOLUME	16.45%	3.74%	11.58%	8.58%

Conclusion:

The implementation of conceptual hydrological models is a tedious job as it requires the collection of basic space-time multi-source data .

As part of this work it is to compare the performance of two hydrological models global and distributed on a pilot area of Issen basin (Aguenza Basin)

The results obtained show that the variation of the two models is not very different, and the resulting Nash coefficient is in the same range of values.

References:

- Mishra, S. K. and Singh, V. P.: Soil Conservation Service Curve Number (SCS-CN) Methodology, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, ISBN 1-4020-1132-6, 2003.
- Steenhuis, T.S., Winchell, M., Rossing, J., Zollweg, J.A., Walter, M.F., 1995. SCS runoff equation revisited for variable-source runoff areas. American Society of Civil Engineers, Journal of Irrigation and Drainage Engineering 121, 234– 238
- Gaume, E., Livet, M., Desbordes, M., Villeneuve, J.-P., 2004. Hydrological analysis of the river Aude, France, flash flood on 12 and 13 November 1999. Journal of Hydrology 286, 135–154
- Seann Reed, Victor Koren, Michael Smith, Ziya Zhang, Fekadu Moreda, Dong-Jun Se, : Overall distributed model intercomparison project results , National Institute of Water and Atmospheric Research, New Zealand; 2004 Published by Elsevier B.V. doi:10.1016/j.jhydrol.2004.03.031
- BROCCA, L., MELONE, F., MORAMARCO T. and SINGH, V.P. (2009): Assimilation of observed soil moisture data in storm rainfall-runoff data. J. Hydrol. Engng ASCE, 14(2), 153–165
- Huang, M., Gallichand, J., Dong, C., Wang, Z., and Shao, M.: Use of soil moisture data and curve number method for estimating runoff in the Loess Plateau of China, Hydrol. Process., 21, 1471–1481, 2007.
- Tramblay, Y., Bouvier, C., Martin, C., Didon-Lescot, J.-F., Todorovik, D., and Domergue, J.-M.: Assessment of initial soil moisture conditions for event-based rainfall–runoff modeling, J. Hydrol. 387, 176–187, 2010
- FAO/IIASA/ISRIC/ISS-CAS/JRC, 2009. Harmonized World Soil Database (version 1.2). FAO, Rome, Italy and IIASA, Laxenburg, Austria.

- Smith, M.B., Seo, D.-J., Koren, V.I., Reed, S.M., Zhang, Z., Duan, Q., Moreda, F., Cong, S., 2004b. The distributed model intercomparison project (DMIP): motivation and experiment design. *Journal of Hydrology* 298, 4–26.
- USDA-SCS: National Engineering Handbook, Section 4, Hydrology, Washington, DC, USA, 1985
- USACE: Hydrologic Modeling System HEC-HMS, Technical reference manual version 3.5, US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering center, Davis, USA, 2010.

MODELING A RESERVOIR IN ARID REGIONS: ABDELMOUMEN DAM CASE.

(1) Direction of Research Management and Water Planning(DRPE), Rabat , Maroc

(2) PhD at the Faculty of Science and Technology of Fez, Morocco

(3) student at the Faculty of Science and Technology of Fez, Morocco

Email: brirhet@gmail.com

ABSTRACT

Water plays a very important role in the socio-economic development of the country and if its shortage endures, that may affect the country's economy, particularly the agriculture, a big user of water. Problem concerning water, are to be very complex in the future (population growth, climate changes, etc...). For this purpose, water management aims to find the right equilibrium between resources and usage.

Thus, the aim of this work was to calibrate and validate in a daily time scale, the SWAT model (Soil and Water Assessment Tool) to the watershed of the Issen , located in south of morocco . The study area is the Issen Basin. This watershed includes Abdelmoumen reservoir. The objective was to simulate the hydro- logical functioning of this area that had never been modeled in order to assess the management of this Abdelmoumen reservoir. The implementation of the SWAT model required a spatial database that was built from topography, soil, land use and climate data. In modeling were used time series corresponding to the periods Jan **1/1/2007 to 12/31/2010 and 1/1/2011 to 31/01/2015** for calibration and validation, respectively. Model performance evaluation was done using the Nash-Sutcliffe coefficient (ENS).The validation of SWAT model was successfully done with **0.74**. As value of Nash coefficient used commonly in hydrology to evaluate the model performance.

Keywords: Modeling; Hydrology; Issen; Reservoir; GIS; SWAT; Watershed

1- INTRODUCTION

The Impact assessments on water resources are one of the most relevant factors of hydrological models, which are fundamental tools for a basin planning and management (VIOLA et al., 2009). ANDRADE et al. (2013) report that hydrological models can be applied to evaluate management strategies for water resources and basin response to periodic climatic variations, project floods, real time floods. From an agricultural standpoint, hydrological simulation is an important tool for water resource management, characterizing grant flow for the irrigation projects (VIOLA et al., 2009).

The adequate approach for a rational management of hydraulic structures located in arid regions often passes by a difficult and complex modeling. In this study, a decision support system is proposed for Abdelmoumen dam, using swat model.

2- SUBJECT DESCRIPTION

2.1- THE STUDY AREA

The river basin of Issen (Abdelmoumen basin) extends over an area of 1400 Km². The High Atlas Mountains form the northern and eastern boundary of the basin. The Anti-Atlas Mountains form the southern boundary. The outlet of the basin near of the city of Taroudant. The climate in the basin is arid to semi-arid with the largest precipitation occurring in the High Atlas Mountains. the average annual precipitation is show in **Figure1**.

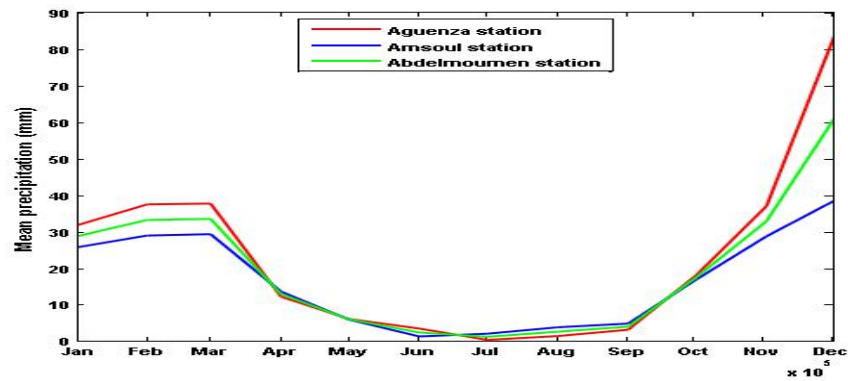


Figure1: Monthly mean precipitation (1980–2012) at the different stations.

The average annual precipitation in the upper elevation zones of the High Atlas Mountains ranges from 500 to 1000 mm per year, 150 to 200 mm for the Anti-Atlas Mountains and the Souss Massa Valley, with a total average for the basin of 290mm. There is no significant snowfall in the basin. The Issen basin generally experiences two seasons. The wet season from November to March delivers about 70-75% of the average annual rainfall with a first peak in the fall and a second peak in the winter. The dry season from April to October delivers about 25-30% of the average annual rainfall. The average annual temperature varies between 14 °C in the High Atlas Mountains to 20 °C in the Anti-Atlas Mountains. The minima and maxima are -3 °C and 49 °C. Evaporation data collected from the reservoirs indicates an average annual evaporation ranging from 1400 mm to 2000mm.

There are five major reservoirs in the Souss Massa River Basin. The oldest reservoir is Abdelmoumen, which was commissioned in 1981. It is located on the Oued Issen. It provides hydropower production, irrigation water, and potable and industrial water. It has the largest storage capacity of all the reservoirs in the basin (201 Mm³).

2.2- Data Analysis and Preparation

The minimum required data inputs to develop the SWAT model are a digital elevation model (DEM-**Figure 3**), locations of basin outlet points for basin delineation and land use and soil coverage for determining the model parameters.

The minimum required data inputs to run and verify our models are precipitation and observed streamflow to perform calibrations. These datasets were provided by DRPE (Research Management and Water Planning),

- **GIS Data**

The use of a highly parameterized model as SWAT requires initial preparation of a very large, multidisciplinary database. These data are essential to make use of this model, so the use of this model in developing countries or countries that do not have well-structured data bases is a little difficult.

- ***The relief***

The representation of the terrain of the ISSEN catchment and the extraction of different morphological parameters (surface, basin boundary, river network...) requires the use of digital terrain models and topographic maps, in this project, we used a digital terrain model-GDEM-ASTER with a spatial resolution of 30 m.

- ***The land use***

The land use map has been extracted from Global Cover Map which is an ESA initiative that began in 2005 in partnership with JRC, EEA, FAO, UNEP, IGBP and GOF-C-GOLD.

The project's objective was to develop a service that can provide composites and global and use maps from input case 300m MERIS aboard the ENVISAT satellite emission. ESA provides maps of land cover, which cover two periods: December 2004 - June2006 and from January to December, 2009, it is the version used in this project.

- ***Soil type***

The soil map was obtained primarily from the Harmonized World Soil Database's database (HWSD v1.1) developed by Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO - UN) [8]. This database provides data for 16,000 map units containing two different soil layers (0-30 cm and 30-100 cm deep).

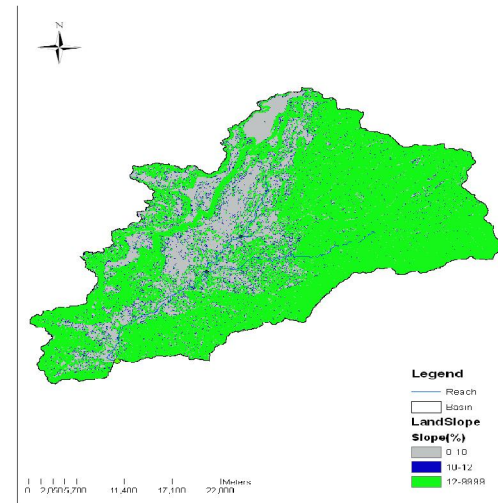
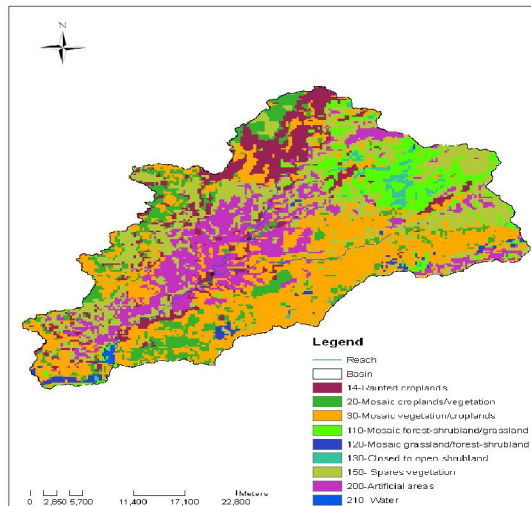
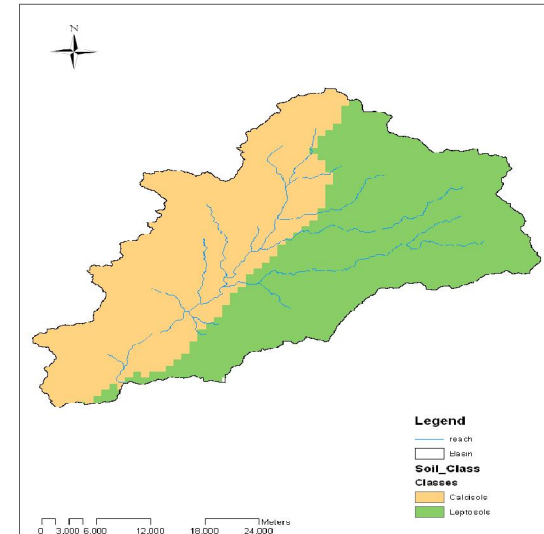
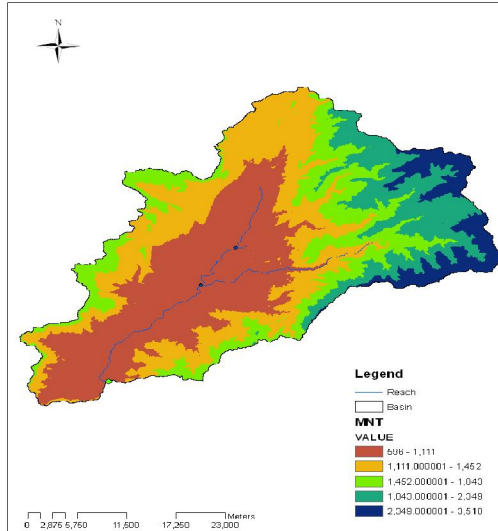
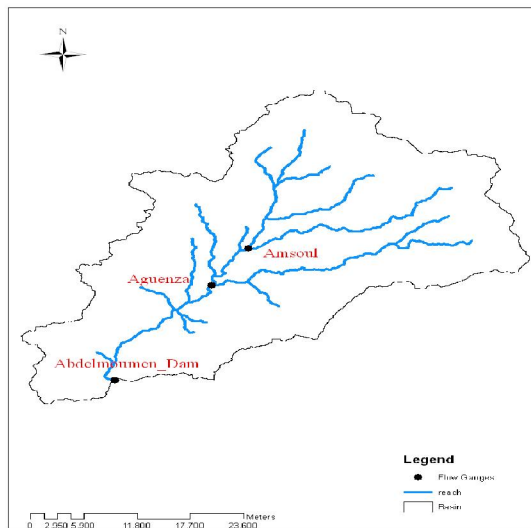


Figure 2: Basic spatial and weather data input.

- (A) Location of weather stations;
- (B) Digital Elevation Model (DEM)
- (C) Soil map
- (D) Land use map
- (E) Land slope map

- **Hydro-climatic data**

All data used in this project are developed by DRPE (Research Management and Water Planning), with a daily time step from January 2007 to January 2015.

The following table summarizes the information about weather stations in the study area:

Table 1: Weather stations in the study area

STATION NAME	STATION TYPE	LATITUDE	LONGITUDE	ELEVATION (M)	TIME STEP
7807 BGE ABDELMOUMEN	PLUVIO	29.38925879	-8.25894488	700	1DAY
BARRAGE ABDELMOUMEN	DAM	30.67659196	-9.200061855	700	IR-DAY
1020 AMSOUL	PLUVIO	30.59351151	-7.14211822	860	1DAY
201 AGUENZA	PLUVIO	31.38978931	-6.182067858	720	1DAY

3- DESCRIPTION OF SWAT MODEL

The Soil Water Assessment Tool (SWAT) is a watershed-scale model; it is primarily used to predict and evaluate the effect of long-term land cover and land management practices on the quantity and quality of water that is exported from a watershed. This model can estimate the amount of water that contributes to stream flow and the relative sediment, nutrient, and pesticide losses under different agricultural field conditions and management scenarios.

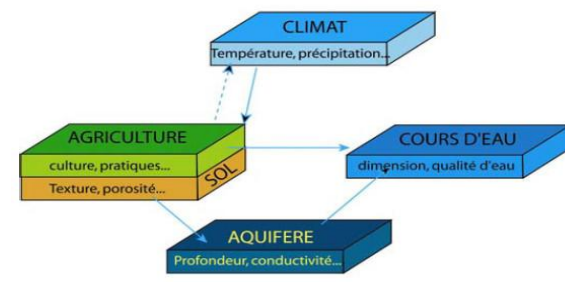


Figure 2 : Schematic Operation of SWAT (DUROS 2001)

Hydrological simulation was performed with the 2009 version of SWAT model through an interface between the model and ArcGIS software that is called ARCSWAT. Through this, the

basin was divided into sub-basins based on HCDem and, then, each sub-basin was subdivided into Hydrological Response Units (HRUs) which are homogeneous areas in respect to vegetation and soil type.

Each HRU was associated with a climate database, soil hydro-physical characteristics, groundwater and vegetation.

With the input parameters, water balance component modeling in daily time scale was performed according to method suggested by Neitsch et al. (2009), as follows:

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^n (P_i - Q_{sup_i} - Q_{lat_i} - ET_i - Q_{sub_i}) \quad (1)$$

where SW_t - final water content of the soil, mm; SW_0 - initial soil water content, mm; P_i - pluvial precipitation, mm; Q_{sup_i} - surface runoff, mm; Q_{lat_i} - lateral flow, mm; ET_i - evapotranspiration, mm; and Q_{sub_i} - groundwater flow, mm.

The model estimates runoff through curve number method (SCS - CN) or Green Ampt model (GREEN & AMPT, 1911; ARNOLD et al., 2011), which was selected for the curve number simulation method. Regarding lateral flow component, the method for its storage kinematic estimate is used.

To estimate real evapotranspiration (ET), the model calculates separately plant transpiration and water evaporation from soil. Transpiration is estimated by correcting potential evapotranspiration to conditions of vapor pressure deficits and then to water content in soil. Potential evapotranspiration was estimated by the Penman-Monteith method (JENSEN et al., 1990; ARNOLD et al., 2011).

Groundwater flow is estimated by separating the contribution of shallow and deep aquifers, where shallow aquifer contribution is considered in water balance and the deep as system loss (ARNOLD et al., 2011).

Two data series of daily flow, corresponding to **1/1/2007 to 12/31/2010** and **1/1/2010 to 31/01/2015** were respectively used for model calibration and validation. The years 1995 and 1996 were used as model warm-up period, since initial conditions were unknown. Warm-up period is aimed at stabilizing initial conditions of soil water (VIOLA et al., 2009; CIBIN et al., 2010), which was observed from second year of simulation.

4- RESULTS AND DISCUSSION

Calibration/Validation method:

Calibration consists in adjusting the numerical values assigned to model parameters to best reproduce the observed response. It is the process of choice of parameter values. This can be done manually by a model sensitivity analysis procedure or automatically by an optimization procedure in seeking the optimum value of a given criterion function that improves consistency between observed and simulated response of the basin.

The calibration period lasts four years, from 2007 to 2010. The calibration involves the adjustment of the model parameters to minimize the differences between observed and

simulated flow rates. To do this, we vary the most dominant parameters in order to obtain accurate simulation at both the hydrological level from and the physical point of view.

The validation period allows to assess whether the model has been properly seated, using one or more periods where climatic conditions are different from those of the calibration period. In fact, a robust hydrological model is able to present flow processes whatever the weather involved.

The analysis based on surface runoff showed that the most sensitive parameters for hydrology modeling of Abdelmoumen basin using swat model are CN2, SOL_AWC and ESCO.

The optimal values of calibrated parameters in our case are given in **Table 2**. Running SWAT model with the specified optimal values allow measuring the performance of the model.

This is done by comparing the observed and similituated streamflow at the Abdelmoumen dam for both the calibration and validation periods.

Table 2 shows the parameters we have chosen with their meanings and values after calibration.

Table 2: The parameters used for calibration with optimum values

Parameter	Parameter name	Lower band	Upper band	Optimal value
CN2	Moisture condition II curve number	-25	25	-17.5
ESCO	Soil evaporation compensation factor	0	1	0.55
SOL-AWC	Available capacity of the soil layer (mmH2O/mm sol)	-25	25	14.12
ALPHA-BF	Base flow alpha factor	0	1	0.72
CH-K2	Effective hydraulic conductivity of main channel (mm.h-1)	0	150	120
GW-REVAP	Groundwater "revap" coefficient	0	0,2	0,2
GW-DELAY	Groundwater Delay	30	450	282

Evaluation of the model's performance:

To evaluate model accuracy based on ENS coefficient , van LIEW et al. (2007) classification was adopted and used by several authors (VIOLA et al., 2009; DURÃES et al., 2011, ANDRADE et al., 2013). According to this classification, ENS value = 1 means perfect fit data simulated by the model; ENS> 0.75 (model is suitable and good); 0.36 <ENS <0.75 model is satisfactory and <0.36 model is not satisfactory.

(2)

$$E_{NS} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (2)$$

Table 2 : Nash coefficient results for the period of calibration and validation

<i>Period</i>	<i>Nash coefficient</i>
<i>Calibration period (2007-2010)</i>	<i>0.81</i>
<i>Validation period (2011-2015)</i>	<i>0.74</i>

The statistic evaluator (Nash coefficient) showed a good correlation between the observed and simulated discharge with NSE of **0.81** for SWAT model in the calibration period. The validation period revealed good values too with Nash coefficient of 0.74 .

The SWAT model performance based on the previous classification for both calibration and validation periods is evaluated as “satisfactory”.

Figures 4 and 5, illustrating the comparison of simulated discharges by SWAT with observed discharges in the 2 periods (calibration and validation), show that this model comes to represent in a global way the discharges in the periods studied, taking into account different approximations considered as part of this work for lack of availability of more accurate and spatial data as soil science,rain,temperatureandevaporation.

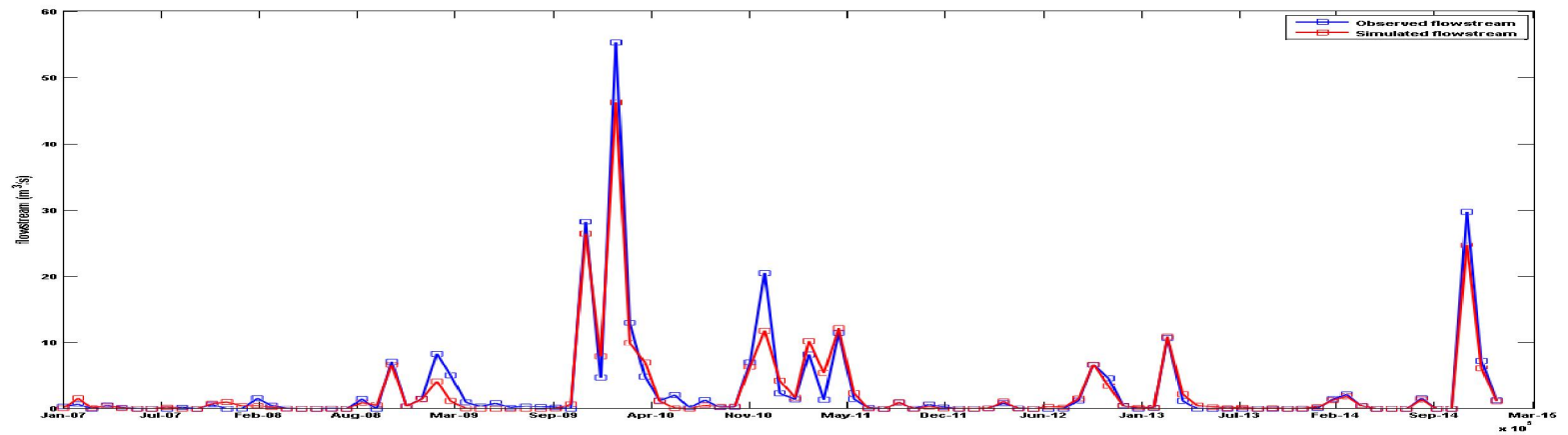


Figure 3 : comparison of monthly observed and simulated dam inflow for the validation and calibration period (2007-2015)

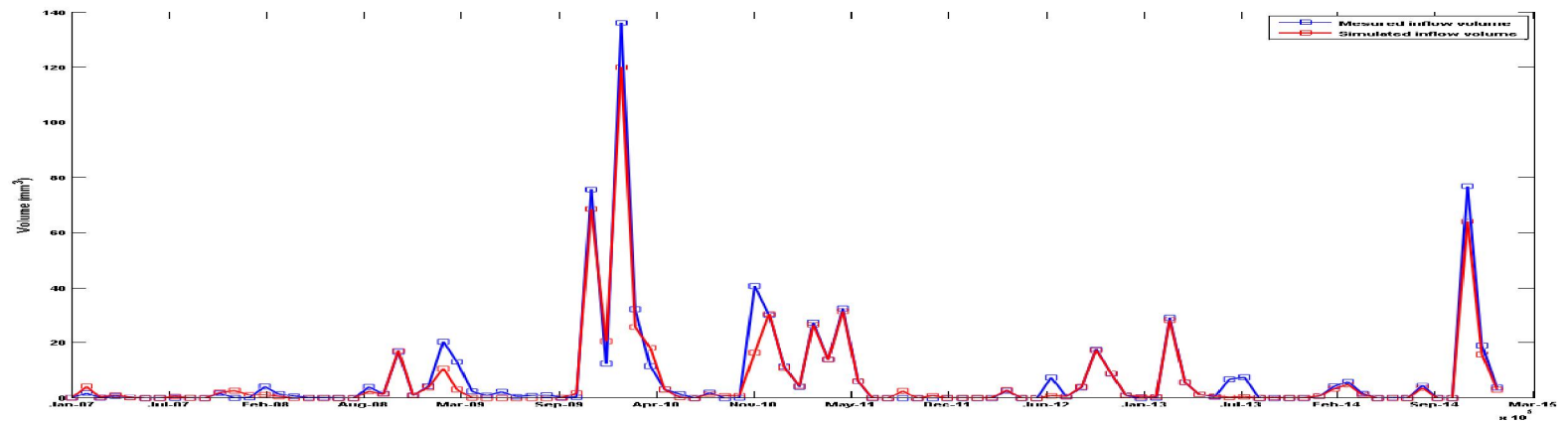


Figure 4 : comparison of monthly observed and simulated inflow volume for the validation and calibration period (2007-2015)

For the estimation of Abdelmoumen Dam inflow, The results obtained showed a good correlation between the monthly observed and simulated inflow volume for the validation and calibration period (2007-2015) and the two patterns with R^2 of 0.96 (**Figure 5** , **Figure 6**) for the calibration period and the validation period. therefore, the calibrated model can be used successfully to predict the volume inflow to the Abdelmoumen Dam and facilitate the storage and release water management .

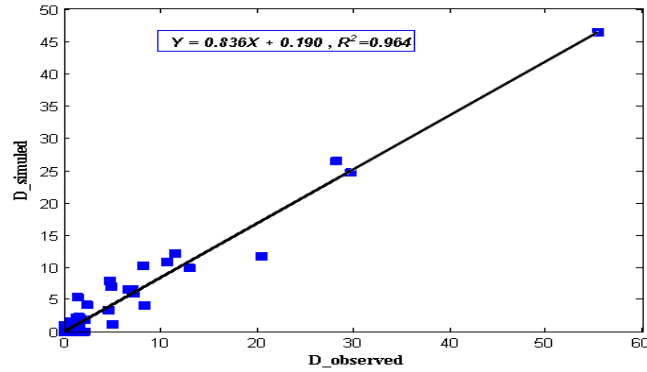


Figure 5 : comparison of monthly observed and simulated dam inflow for the period (2007-2015)

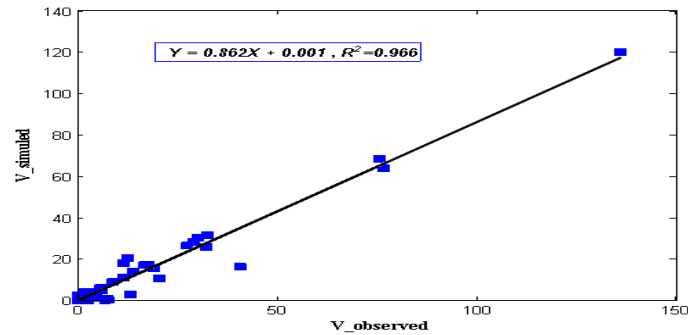


Figure 6 : comparison of monthly observed and simulated inflow volume for the calibration and validation period (2007-2015)

5- CONCLUSIONS

The calibration and validation of the SWAT model for Abdelmoumen basin, characterized as a headwater basin, was good. The model showed good predictive ability for monthly and daily flow rates and for reference flow rates, adopted for purposes of granting water use in Morocco.

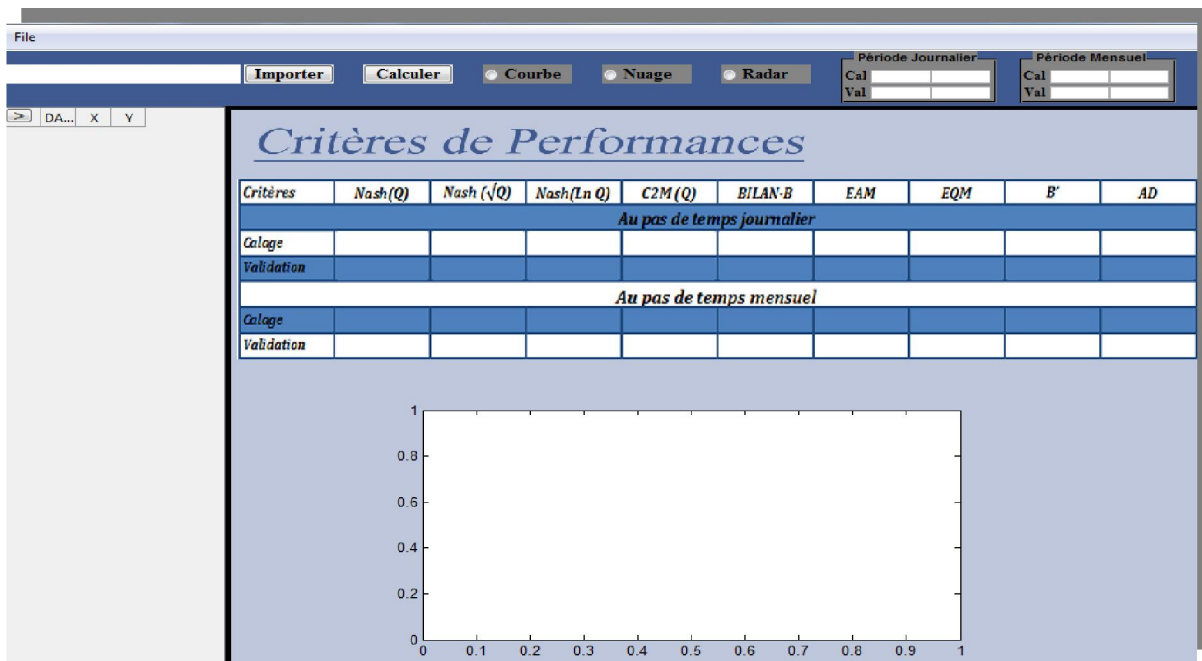
In conclusion the results obtained are satisfactory for both phases: calibration and validation. This will provide a better guide for the management methods in these dams. Nevertheless, simulations and water balance can be improved by integrating more data, especially climate related data.

The use of this model also opens new perspectives on the study of the effects of climate change, and the change induced by human activities on water resources, in both quantity and quality terms.

6- REFERENCES

- Fadil, H. Rhinane, A. Kaoukaya, Y. Kharchaf and O. Bachir, "Hydrologic Modeling of the Bouregreg Water- shed (Morocco) Using GIS and SWAT Model," *Journal of Geographic Information System*, Vol. 3 No. 4, 2011, pp. 279-289.
- S. L. Neitsch, J. G. Arnold, J. R. Kiniry, J. R. Williams and K. W. King, "Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation—Version 2005," *Soil and Water Research Laboratory, Agricultural Research Service, US Department of Agriculture, Temple*, 2005.
- G. S. Shimelis, R. Srinivasan and B. Dargahi, "Hydro- logical Modelling in the Lake Tana Basin, Ethiopia Using SWAT Model," *The Open Hydrology Journal*, Vol. 2, No. 1, 2008, pp. 49-62.
- C. Santhi, J. G. Arnold, J. R. Williams, W. A. Dugas and L. Hauck, "Validation of the SWAT Model on a Large River Basin with Point and Nonpoint Sources," *Journal of the American Water Resources Association*, Vol. 37, No. 5, 2001, pp. 1169-1188.
- HÖRMANN, G.; KÖPLIN, N.; CAI, Q.; FOHRER, N. Using a simple model as a tool to parameterise the SWAT model of the Xiangxi river in China. *Quaternary International*, Heshigton, v.208, n.1/2, p.116-120, out. 2009.
- SETEGN, S. G.; SRINIVASAN, R.; MELESSE, A. M.; DARGAHI, B. SWAT model application and prediction uncertainty analysis in the Lake Tana Basin, Ethiopia. *Hydrological Processes*, Chichester, v. 24, n.3, p.357 - 367, jan. 2010.
- BESKOW, S.; MELLO, C. R.; NORTON, L. D.; SILVA, A. M. Performance of a distributed semi-conceptual hydrological model under tropical watershed conditions. *Catena*, Amsterdam, v.86, n.3, p.160-171, set. 2011
- J. E. Nash and J. V. Sutcliffe, "River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles," *J. Hydrol.*, vol. 10, no. 3, pp. 282–290, Apr. 1970
- S. D. Rasolomanana, "Modélisation des petits bassins versants en milieu rural: problématique des modèles fortement paramétrés," *Université Laval*, 2012.
- Y. Kharchaf, H. Rhinane, A. Kaoukaya, and A. Fadil, "The Contribution of the Geospatial Information to the Hydrological Modelling of a Watershed with Reservoirs: Case of Low Oum Er Rbiaa Basin (Morocco)," *J. Geogr. Inf. Syst.*, vol. 05, no. 03, pp. 258–268, 2013.
- J. G. Arnold, D. N. Moriasi, P. W. Gassman, K. C. Abbaspour, M. J. White, R. Srinivasan, C. Santhi, R. D. Harmel, A. Van Griensven, M. W. Van Liew, and others, "SWAT: Model use, calibration, and validation," *Trans. ASABE*, vol. 55, no. 4, pp. 1491–1508, 2012.
- D. N. Moriasi, J. G. Arnold, M. W. Van Liew, R. L. Bingner, R. D. Harmel, and T. L. Veith, "Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations," *Trans Asabe*, vol. 50, no. 3, pp. 885–900, 2007.

APPLICATION STAT-HYDRO POUR LE CALCUL DES CRITERES DE PERFORMANCE DES MODELES UTILISES :



EXTRAIT DE CODE SOURCE SOUS MATLAB :

```
function Main
global handles
global ok;
global tab;
ok = 0;
%create the object Figure
unitsEcran = get(0, 'Units');
set(0, 'Units', 'pixels');
% On récupère la taille de l'écran
posScreen = get(0, 'ScreenSize');
% On gère la position de la fenêtre
posFigure = [0 0 posScreen(3) posScreen(4)];
handles(1)=figure('units','pixels',...
'Position', posFigure,...
'color',[1 1 1],...
'numbertitle','off',...
'name','NABIL.21',...
'menubar','figure',...
'tag','interface');
set(0, 'Units', unitsEcran);

%-----
% create an axes that spans the whole gui
ah = axes('unit', 'normalized', 'position', [0 0 1 1]);
% import the background image and show it on the axes
bg = imread('D:\matlab-data\Arièreplan.jpg'); imagesc(bg);
% prevent plotting over the background and turn the axis off
set(ah,'handlevisibility','off','visible','off')
%making sure the background is behind all the other uicontrols
```

```

uistack(ah, 'bottom');
%-----
% Create object Uicontrol browse for foldre
handles(2)=uicontrol('style','pushbutton',...
'units','pixels',...
'fontName','Times New Roman',...
'fontSize',6,...
'value',0,...
'units','normalized',...
'position',[0.2 0.95 0.075 0.03],...
'FontSize',11,...
'FontWeight','bold',...
'string','Importer',...
'callback',@importer,...
'tag','bouton-');
%-----
% Create object Uicontrol edit path
handles(3)=uicontrol('style','text',...
'units','pixels',...
'ForegroundColor',[0 0 0],...
'BackgroundColor',[1 1 1],...
'FontName','Times New Roman',...
'FontSize',11,...
'FontWeight','bold',...
'units','normalized',...
'position',[0 0.95 0.197 0.03],...
'string','',...
'tag','resultat');
%-----
% Create object Uicontrol edit path
cnames = {'DATE','X','Y'};
handles(4)=uitable('Parent',handles(1),...
'ColumnName',cnames,...
'ColumnWidth',{30},...
'units','normalized',...
'position',[ 0 0 0.185 0.915]);
%-----
% Create object Uicontrol edit path
handles(5)=uicontrol('style','text',...
'units','pixels',...
'ForegroundColor',[0 0 0],...
'BackgroundColor',[1 1 1],...
'FontName','Times New Roman',...
'FontSize',16,...
'FontWeight','bold',...
'units','normalized',...
'position',[0.278 0.69 0.076 0.034],...
'string','',...
'tag','C');
%-----
% Create object Uicontrol edit path
handles(6)=uicontrol('style','text',...
'units','pixels',...
'ForegroundColor',[0 0 0],...
'BackgroundColor',[0.30 0.50 0.74],...
'FontName','Times New Roman',...
'FontSize',16,...
'FontWeight','bold',...
'units','normalized',...
'position',[0.278 0.65 0.076 0.034],...
'string','',...

```

```

'tag','C1');
%-----
% Create object Uicontrol edit path
handles(7)=uicontrol('style','text',...
    'units','pixels',...
    'ForegroundColor',[0 0 0],...
    'BackgroundColor',[0.30 0.50 0.74],...
    'FontName','Times New Roman',...
    'FontSize',16,...
    'FontWeight','bold',...
    'units','normalized',...
    'position',[0.278 0.571 0.076 0.034],...
    'string','',...
    'tag','C3');
%-----
% Create object Uicontrol edit path
handles(8)=uicontrol('style','text',...
    'units','pixels',...
    'ForegroundColor',[0 0 0],...
    'BackgroundColor',[1 1 1],...
    'FontName','Times New Roman',...
    'FontSize',16,...
    'FontWeight','bold',...
    'units','normalized',...
    'position',[0.278 0.533 0.076 0.033],...
    'string','',...
    'tag','C4');
%-----
% Create object Uicontrol edit path
handles(9)=uicontrol('style','text',...
    'units','pixels',...
    'ForegroundColor',[0 0 0],...
    'BackgroundColor',[1 1 1],...
    'FontName','Times New Roman',...
    'FontSize',16,...
    'FontWeight','bold',...
    'units','normalized',...
    'position',[0.358 0.69 0.076 0.034],...
    'string','',...
    'tag','H');
%-----
% Create object Uicontrol edit path
handles(10)=uicontrol('style','text',...
    'units','pixels',...
    'ForegroundColor',[0 0 0],...
    'BackgroundColor',[0.30 0.50 0.74],...
    'FontName','Times New Roman',...
    'FontSize',16,...
    'FontWeight','bold',...
    'units','normalized',...
    'position',[0.358 0.65 0.076 0.034],...
    'string','',...
    'tag','H1');
%-----
% Create object Uicontrol edit path
handles(11)=uicontrol('style','text',...
    'units','pixels',...
    'ForegroundColor',[0 0 0],...
    'BackgroundColor',[0.30 0.50 0.74],...
    'FontName','Times New Roman',...
    'FontSize

```

Précipitations mensuelles des stations hydrologiques

MOIS	PMM(AGUENZA)	PMM(AMSOUL)	BARRAGE_ABDELMOUMEN
JAN	31.75	25.74	28.745
FEB	37.46	28.96	33.21
MAR	37.68	29.33	33.505
APR	12.3	13.69	12.995
MAY	6.2	6.03	6.115
JUN	3.58	1.43	2.505
JUL	0.5	2.18	1.34
AUG	1.54	3.93	2.735
SEP	3.26	4.94	4.1
OCT	18.13	16.96	17.545
NOV	37	28.75	32.875
DEC	83.48	38.51	60.995

Les apports observés au niveau du bassin d'Issen

MOIS	APPORT (MM3)	DEBIT_MENSUELLE (M3/S)
JAN-07	0.2	0.4
FEB-07	1.9	0.8
MAR-07	0.2	0.0
APR-07	0.8	0.6
MAY-07	0.4	0.2
JUN-07	0.0	0.0
JUL-07	0.1	0.0
AUG-07	0.1	0.0

SEP-07	0.1	0.2
OCT-07	0.0	0.0
NOV-07	1.8	0.7
DEC-07	0.1	0.0
JAN-08	0.3	0.0
FEB-08	4.2	1.6
MAR-08	1.6	0.5
APR-08	0.8	0.1
MAY-08	0.2	0.0
JUN-08	0.2	0.0
JUL-08	0.1	0.1
AUG-08	0.0	0.0
SEP-08	4.1	1.5
OCT-08	1.7	0.0
NOV-08	16.8	7.1
DEC-08	1.0	0.4
JAN-09	4.3	1.5
FEB-09	20.4	8.3
MAR-09	13.2	5.1
APR-09	2.5	1.0
MAY-09	1.1	0.4
JUN-09	2.4	0.9
JUL-09	0.6	0.2
AUG-09	1.0	0.4
SEP-09	1.2	0.3
OCT-09	0.3	0.3
NOV-09	0.4	0.0
DEC-09	75.5	28.2

JAN-10	12.5	4.7
FEB-10	135.9	55.3
MAR-10	32.2	13.0
APR-10	11.6	4.9
MAY-10	3.2	1.3
JUN-10	1.6	2.1
JUL-10	0.0	0.2
AUG-10	2.1	1.4
SEP-10	0.0	0.3
OCT-10	0.2	0.3
NOV-10	40.6	7.0
DEC-10	30.1	20.5
JAN-11	11.5	2.4
FEB-11	4.1	1.5
MAR-11	27.4	8.2
APR-11	14.0	1.4
MAY-11	32.5	11.5
JUN-11	6.1	1.5
JUL-11	0.0	0.2
AUG-11	0.0	0.0
SEP-11	0.0	1.0
OCT-11	0.0	0.1
NOV-11	0.0	0.7
DEC-11	0.0	0.3
JAN-12	0.0	0.0
FEB-12	0.0	0.0
MAR-12	0.0	0.1
APR-12	2.8	0.9

MAY-12	0.0	0.1
JUN-12	0.0	0.0
JUL-12	7.5	0.0
AUG-12	0.6	0.0
SEP-12	3.9	1.3
OCT-12	17.7	6.6
NOV-12	8.9	4.6
DEC-12	1.0	0.5
JAN-13	0.0	0.0
FEB-13	0.2	0.2
MAR-13	29.1	10.7
APR-13	5.7	1.2
MAY-13	1.4	0.0
JUN-13	0.5	0.0
JUL-13	6.9	0.0
AUG-13	7.6	0.0
SEP-13	0.0	0.0
OCT-13	0.0	0.0
NOV-13	0.0	0.0
DEC-13	0.0	0.0
JAN-14	0.8	0.1
FEB-14	4.3	1.5
MAR-14	6.0	2.2
APR-14	1.7	0.5
MAY-14	0	0.0
JUN-14	0.2	0.0
JUL-14	0.1	0.0
AUG-14	4.6	1.6

SEP-14	0.1	0.0
OCT-14	0	0.0
NOV-14	76.68	29.7
DEC-14	19.1	7.3
JAN-15	3.9	1.3

Résultats ATHYS

MOIS	QOBS-MENSUELLE	QSIMULE-MENSUELLE
Jan-07	0.4	0.2
Feb-07	0.8	2.0
Mar-07	0.0	0.3
Apr-07	0.6	0.7
May-07	0.2	0.4
Jun-07	0.0	0.1
Jul-07	0.0	0.2
Aug-07	0.0	0.7
Sep-07	0.2	0.1
Oct-07	0.0	0.1
Nov-07	0.7	1.1
Dec-07	0.0	1.2
Jan-08	0.0	0.7
Feb-08	1.6	0.8
Mar-08	0.5	0.6
Apr-08	0.1	0.2
May-08	0.0	0.0
Jun-08	0.0	0.0
Jul-08	0.1	0.0
Aug-08	0.0	0.1
Sep-08	1.5	1.3
Oct-08	0.0	0.8
Nov-08	7.1	8.5
Dec-08	0.4	0.3
Jan-09	1.5	1.7
Feb-09	8.3	3.5
Mar-09	5.1	1.5
Apr-09	1.0	0.2
May-09	0.4	0.0
Jun-09	0.9	0.0
Jul-09	0.2	0.0
Aug-09	0.4	0.1
Sep-09	0.3	0.1
Oct-09	0.3	0.3

Nov-09	0.0	0.1
Dec-09	28.2	43.4
Jan-10	4.7	4.8
Feb-10	55.3	37.5
Mar-10	13.0	3.8
Apr-10	4.9	2.1
May-10	1.3	0.4
Jun-10	2.1	0.0
Jul-10	0.2	0.0
Aug-10	1.4	0.9
Sep-10	0.3	0.7
Oct-10	0.3	0.8
Nov-10	7.0	11.8
Dec-10	20.5	14.4
Jan-11	2.4	1.1
Feb-11	1.5	1.2
Mar-11	8.2	7.3
Apr-11	1.4	1.1
May-11	11.5	10.4
Jun-11	1.5	1.1
Jul-11	0.2	0.0
Aug-11	0.0	0.0
Sep-11	1.0	1.0
Oct-11	0.1	0.0
Nov-11	0.7	0.1
Dec-11	0.3	0.0
Jan-12	0.0	0.0
Feb-12	0.0	0.0
Mar-12	0.1	0.0
Apr-12	0.9	0.0
May-12	0.1	0.0
Jun-12	0.0	0.0
Jul-12	0.0	0.0
Aug-12	0.0	0.0
Sep-12	1.3	1.1
Oct-12	6.6	5.2
Nov-12	4.6	3.5
Dec-12	0.5	0.0
Jan-13	0.0	0.0
Feb-13	0.2	0.0
Mar-13	10.7	9.5
Apr-13	1.2	0.1
May-13	0.0	0.0
Jun-13	0.0	0.0
Jul-13	0.0	0.0
Aug-13	0.0	0.0

Sep-13	0.0	0.0
Oct-13	0.0	0.0
Nov-13	0.0	0.0
Dec-13	0.0	0.0
Jan-14	0.1	0.1
Feb-14	1.5	1.2
Mar-14	2.2	3.5
Apr-14	0.5	0.0
May-14	0.0	0.0
Jun-14	0.0	0.0
Jul-14	0.0	9.5
Aug-14	1.6	0.1
Sep-14	0.0	0.0
Oct-14	0.0	0.0
Nov-14	29.7	22.6
Dec-14	7.3	6.3
Jan-15	1.3	0.3

Résultats SWAT

MOIS	APPORT	DEBIT_MENSUELLE	DEBIT_SIMULE
Jan-07	0.2	0.4	0.1
Feb-07	1.9	0.8	1.6
Mar-07	0.2	0.0	0.2
Apr-07	0.8	0.6	0.5
May-07	0.4	0.2	0.1
Jun-07	0.0	0.0	0.0
Jul-07	0.1	0.0	0.0
Aug-07	0.1	0.0	0.3
Sep-07	0.1	0.2	0.0
Oct-07	0.0	0.0	0.0
Nov-07	1.8	0.7	0.8
Dec-07	0.1	0.0	1.1
Jan-08	0.3	0.0	0.5
Feb-08	4.2	1.6	0.5
Mar-08	1.6	0.5	0.3
Apr-08	0.8	0.1	0.0
May-08	0.2	0.0	0.0
Jun-08	0.2	0.0	0.0
Jul-08	0.1	0.1	0.0
Aug-08	0.0	0.0	0.0
Sep-08	4.1	1.5	1.0
Oct-08	1.7	0.0	0.6
Nov-08	16.8	7.1	6.6
Dec-08	1.0	0.4	0.4

Jan-09	4.3	1.5	1.5
Feb-09	20.4	8.3	4.1
Mar-09	13.2	5.1	1.2
Apr-09	2.5	1.0	0.1
May-09	1.1	0.4	0.0
Jun-09	2.4	0.9	0.0
Jul-09	0.6	0.2	0.0
Aug-09	1.0	0.4	0.0
Sep-09	1.2	0.3	0.0
Oct-09	0.3	0.3	0.0
Nov-09	0.4	0.0	0.7
Dec-09	75.5	28.2	26.4
Jan-10	12.5	4.7	7.9
Feb-10	135.9	55.3	46.2
Mar-10	32.2	13.0	9.9
Apr-10	11.6	4.9	7.0
May-10	3.2	1.3	1.2
Jun-10	1.6	2.1	0.1
Jul-10	0.0	0.2	0.0
Aug-10	2.1	1.4	0.6
Sep-10	0.0	0.3	0.4
Oct-10	0.2	0.3	0.4
Nov-10	40.6	7.0	6.3
Dec-10	30.1	20.5	11.8
Jan-11	11.5	2.4	4.3
Feb-11	4.1	1.5	1.7
Mar-11	27.4	8.2	10.2
Apr-11	14.0	1.4	5.4
May-11	32.5	11.5	12.2
Jun-11	6.1	1.5	2.4
Jul-11	0.0	0.2	0.1
Aug-11	0.0	0.0	0.0
Sep-11	0.0	1.0	1.0
Oct-11	0.0	0.1	0.0
Nov-11	0.0	0.7	0.3
Dec-11	0.0	0.3	0.1
Jan-12	0.0	0.0	0.1
Feb-12	0.0	0.0	0.0
Mar-12	0.0	0.1	0.1
Apr-12	2.8	0.9	1.2
May-12	0.0	0.1	0.0
Jun-12	0.0	0.0	0.0
Jul-12	7.5	0.0	0.3
Aug-12	0.6	0.0	0.3
Sep-12	3.9	1.3	1.6
Oct-12	17.7	6.6	6.7

Nov-12	8.9	4.6	3.5
Dec-12	1.0	0.5	0.4
Jan-13	0.0	0.0	0.2
Feb-13	0.2	0.2	0.2
Mar-13	29.1	10.7	10.9
Apr-13	5.7	1.2	2.2
May-13	1.4	0.0	0.5
Jun-13	0.5	0.0	0.3
Jul-13	6.9	0.0	0.1
Aug-13	7.6	0.0	0.2
Sep-13	0.0	0.0	0.0
Oct-13	0.0	0.0	0.1
Nov-13	0.0	0.0	0.0
Dec-13	0.0	0.0	0.1
Jan-14	0.8	0.1	0.3
Feb-14	4.3	1.5	1.3
Mar-14	6.0	2.2	1.9
Apr-14	1.7	0.5	0.5
May-14	0.0	0.0	0.0
Jun-14	0.2	0.0	0.0
Jul-14	0.1	0.0	0.0
Aug-14	4.6	1.6	1.4
Sep-14	0.1	0.0	0.0
Oct-14	0.0	0.0	0.0
Nov-14	76.7	29.7	24.6
Dec-14	19.1	7.3	6.1
Jan-15	3.9	1.3	1.2

Résultats HEC HMS

<u>MOIS</u>	<u>SIMULE</u>	<u>OBSERVE</u>
JAN-07	0.2	0.4
FEB-07	0.5	0.8
MAR-07	0.0	0.0
APR-07	0.5	0.6
MAY-07	0.1	0.2
JUN-07	0.0	0.0
JUL-07	0.0	0.0
AUG-07	0.0	0.0
SEP-07	0.2	0.2
OCT-07	0.0	0.0
NOV-07	0.6	0.7
DEC-07	0.0	0.0
JAN-08	0.0	0.0

<i>FEB-08</i>	<i>0.7</i>	<i>1.6</i>
<i>MAR-08</i>	<i>0.0</i>	<i>0.5</i>
<i>APR-08</i>	<i>0.1</i>	<i>0.1</i>
<i>MAY-08</i>	<i>0.0</i>	<i>0.0</i>
<i>JUN-08</i>	<i>0.0</i>	<i>0.0</i>
<i>JUL-08</i>	<i>0.0</i>	<i>0.1</i>
<i>AUG-08</i>	<i>0.0</i>	<i>0.0</i>
<i>SEP-08</i>	<i>0.3</i>	<i>1.5</i>
<i>OCT-08</i>	<i>0.1</i>	<i>0.0</i>
<i>NOV-08</i>	<i>4.5</i>	<i>7.1</i>
<i>DEC-08</i>	<i>0.2</i>	<i>0.4</i>
<i>JAN-09</i>	<i>0.8</i>	<i>1.5</i>
<i>FEB-09</i>	<i>3.7</i>	<i>8.3</i>
<i>MAR-09</i>	<i>2.8</i>	<i>5.1</i>
<i>APR-09</i>	<i>0.0</i>	<i>1.0</i>
<i>MAY-09</i>	<i>0.0</i>	<i>0.4</i>
<i>JUN-09</i>	<i>0.3</i>	<i>0.9</i>
<i>JUL-09</i>	<i>0.0</i>	<i>0.2</i>
<i>AUG-09</i>	<i>0.0</i>	<i>0.4</i>
<i>SEP-09</i>	<i>0.0</i>	<i>0.3</i>
<i>OCT-09</i>	<i>0.0</i>	<i>0.3</i>
<i>NOV-09</i>	<i>0.0</i>	<i>0.0</i>
<i>DEC-09</i>	<i>28.5</i>	<i>28.2</i>
<i>JAN-10</i>	<i>1.2</i>	<i>4.7</i>
<i>FEB-10</i>	<i>34.5</i>	<i>55.3</i>
<i>MAR-10</i>	<i>3.1</i>	<i>13.0</i>
<i>APR-10</i>	<i>1.3</i>	<i>4.9</i>
<i>MAY-10</i>	<i>0.0</i>	<i>1.3</i>
<i>JUN-10</i>	<i>3.7</i>	<i>2.1</i>
<i>JUL-10</i>	<i>0.0</i>	<i>0.2</i>
<i>AUG-10</i>	<i>2.0</i>	<i>1.4</i>
<i>SEP-10</i>	<i>1.7</i>	<i>0.3</i>
<i>OCT-10</i>	<i>1.2</i>	<i>0.3</i>
<i>NOV-10</i>	<i>9.7</i>	<i>7.0</i>
<i>DEC-10</i>	<i>24.4</i>	<i>20.5</i>
<i>JAN-11</i>	<i>1.9</i>	<i>2.4</i>
<i>FEB-11</i>	<i>0.0</i>	<i>1.5</i>
<i>MAR-11</i>	<i>5.3</i>	<i>8.2</i>
<i>APR-11</i>	<i>2.1</i>	<i>1.4</i>
<i>MAY-11</i>	<i>4.6</i>	<i>11.5</i>
<i>JUN-11</i>	<i>0.0</i>	<i>1.5</i>
<i>JUL-11</i>	<i>0.0</i>	<i>0.2</i>
<i>AUG-11</i>	<i>0.0</i>	<i>0.0</i>
<i>SEP-11</i>	<i>0.0</i>	<i>1.0</i>
<i>OCT-11</i>	<i>0.3</i>	<i>0.1</i>
<i>NOV-11</i>	<i>0.9</i>	<i>0.7</i>

DEC-11	0.0	0.3
JAN-12	0.2	0.0
FEB-12	0.0	0.0
MAR-12	0.0	0.1
APR-12	1.3	0.9
MAY-12	0.0	0.1
JUN-12	0.0	0.0
JUL-12	0.0	0.0
AUG-12	0.0	0.0
SEP-12	3.4	1.3
OCT-12	3.2	6.6
NOV-12	2.8	4.6
DEC-12	0.0	0.5
JAN-13	0.0	0.0
FEB-13	0.7	0.2
MAR-13	7.4	10.7
APR-13	0.8	1.2
MAY-13	0.0	0.0
JUN-13	0.0	0.0
JUL-13	0.0	0.0
AUG-13	0.0	0.0
SEP-13	0.1	0.0
OCT-13	0.1	0.0
NOV-13	0.0	0.0
DEC-13	0.2	0.0
JAN-14	0.5	0.1
FEB-14	2.2	1.5
MAR-14	3.0	2.2
APR-14	0.9	0.5
MAY-14	0.3	0.0
JUN-14	0.3	0.0
JUL-14	0.3	0.0
AUG-14	2.3	1.6
SEP-14	0.3	0.0
OCT-14	0.3	0.0
NOV-14	36.9	29.7
DEC-14	9.3	7.3
JAN-15	2.0	1.3

Résultats GR4J

<u>MOIS</u>	DEBIT_SIMULE- GR4J	DEBIT OBSERVE
JAN-07	0.0	0.4
FEB-07	0.3	0.8
MAR-07	0.1	0.0
APR-07	0.0	0.6
MAY-07	0.0	0.2
JUN-07	0.0	0.0
JUL-07	0.0	0.0
AUG-07	0.0	0.0
SEP-07	0.0	0.2
OCT-07	0.0	0.0
NOV-07	0.0	0.7
DEC-07	0.1	0.0
JAN-08	0.2	0.0
FEB-08	0.1	1.6
MAR-08	0.0	0.5
APR-08	0.0	0.1
MAY-08	0.0	0.0
JUN-08	0.0	0.0
JUL-08	0.0	0.1
AUG-08	0.0	0.0
SEP-08	0.0	1.5
OCT-08	0.0	0.0
NOV-08	6.8	7.1
DEC-08	0.2	0.4
JAN-09	0.0	1.5
FEB-09	7.2	8.3
MAR-09	0.2	5.1
APR-09	0.1	1.0
MAY-09	0.1	0.4
JUN-09	0.1	0.9
JUL-09	0.0	0.2
AUG-09	0.0	0.4
SEP-09	0.0	0.3
OCT-09	0.0	0.3
NOV-09	0.0	0.0
DEC-09	20.3	28.2
JAN-10	3.9	4.7
FEB-10	40.1	55.3
MAR-10	10.9	13.0
APR-10	3.6	4.9
MAY-10	0.3	1.3

<i>JUN-10</i>	0.1	2.1
<i>JUL-10</i>	0.1	0.2
<i>AUG-10</i>	0.1	1.4
<i>SEP-10</i>	0.0	0.3
<i>OCT-10</i>	0.0	0.3
<i>NOV-10</i>	6.1	7.0
<i>DEC-10</i>	18.6	20.5
<i>JAN-11</i>	0.1	2.4
<i>FEB-11</i>	0.2	1.5
<i>MAR-11</i>	5.6	8.2
<i>APR-11</i>	0.2	1.4
<i>MAY-11</i>	8.8	11.5
<i>JUN-11</i>	0.2	1.5
<i>JUL-11</i>	0.1	0.2
<i>AUG-11</i>	0.1	0.0
<i>SEP-11</i>	0.1	1.0
<i>OCT-11</i>	0.1	0.1
<i>NOV-11</i>	0.1	0.7
<i>DEC-11</i>	0.1	0.3
<i>JAN-12</i>	0.1	0.0
<i>FEB-12</i>	0.1	0.0
<i>MAR-12</i>	0.1	0.1
<i>APR-12</i>	0.1	0.9
<i>MAY-12</i>	0.1	0.1
<i>JUN-12</i>	0.1	0.0
<i>JUL-12</i>	0.1	0.0
<i>AUG-12</i>	0.1	0.0
<i>SEP-12</i>	0.1	1.3
<i>OCT-12</i>	0.3	6.6
<i>NOV-12</i>	3.6	4.6
<i>DEC-12</i>	0.2	0.5
<i>JAN-13</i>	0.1	0.0
<i>FEB-13</i>	0.0	0.2
<i>MAR-13</i>	7.7	10.7
<i>APR-13</i>	0.7	1.2
<i>MAY-13</i>	0.0	0.0
<i>JUN-13</i>	0.0	0.0
<i>JUL-13</i>	0.0	0.0
<i>AUG-13</i>	0.0	0.0
<i>SEP-13</i>	0.0	0.0
<i>OCT-13</i>	0.0	0.0
<i>NOV-13</i>	0.0	0.0
<i>DEC-13</i>	0.0	0.0
<i>JAN-14</i>	0.0	0.1
<i>FEB-14</i>	0.8	1.5
<i>MAR-14</i>	1.4	2.2

<i>APR-14</i>	0.1	0.5
<i>MAY-14</i>	0.0	0.0
<i>JUN-14</i>	0.0	0.0
<i>JUL-14</i>	0.0	0.0
<i>AUG-14</i>	0.9	1.6
<i>SEP-14</i>	0.0	0.0
<i>OCT-14</i>	0.0	0.0
<i>NOV-14</i>	21.9	29.7
<i>DEC-14</i>	5.2	7.3
<i>JAN-15</i>	0.7	1.3