

Table des matières

INTRODUCTION GENERALE	9
Chapitre I : présentation de la zone d'étude :.....	11
1. Localisation :	11
2. Géologie :	14
3. Relief :	14
4. Occupation des terres et végétation :.....	17
4.1 – Domaines des terres agricoles :.....	17
4.2 – Domaines forestier :	17
5. Contexte Climatologique de la zone d'étude :.....	17
5.1. Pluviométrie :	17
5.2 – Température et évaporation :.....	19
5.3. Vent :	20
5.4 – Humidité :.....	21
6. Hydrologie :.....	21
7. Conclusion :.....	23
Chapitre II : généralités sur la modélisation hydrologique	24
1. Objectif de la modélisation :.....	25
2. Intérêts du modèle Pluie-débit:.....	26
3. Choix d'un modèle :	26
4. Etape d'élaboration d'un modèle :	27
5. Typologie des modèles hydrologiques :	27
5.1. Selon le degré d'abstraction :.....	28
5.2. Selon la nature des variables:	28
5.3. Selon la discrétisation spatiale:	28
5.4. Selon la discrétisation spatiale:	29
6. Conclusion :.....	29
Chapitre III : MODELISATION DE BASSIN AGUENZA SOUS LE PLATEFORME ATHYS ET GR4J:	30
1. Modélisation pluies-débits « ATHYS » :	31
1.1. Présentation du modèle hydrologique « ATHYS» :.....	31
1.1.1 Généralité :	31
2.2.2. Modèles de calcul :.....	32

2.2.3. Présentation détaillé du modèle SCS –LR :	32
1.2. Traitement des données :	36
1.2.1. Traitement des données géographiques :	36
1.2.2. Traitement des données météorologiques :	37
1.3. Modélisation en mode événementiel des crues:	38
1.3.1. Calage et discussion des résultats :	38
1.3.2. Evaluation du modèle :	46
1.3.3. Validation du modèle :	49
1.4. Modélisation en mode continu :	54
1.4.1. Calibration et calage de modèle :	54
1.4.2. Evaluation de qualité du modèle:	55
1.4.3. Validation du modèle:	56
2. Modélisation hydrologique « GR4J » :	57
2.1. Généralité sur les modèles GR :	57
2.1.1. Objectifs de développement:	58
2.1.2. Mode de développement:	58
2.1.3. Principales caractéristiques:	59
2.2. Description du modèle pluie-débit journalière GR4J:	60
2.2.1. Généralité :	60
2.2.2. Description mathématique du modèle :	61
2.2.3. Calage du modèle et discussion des résultats :	63
2.2.4. Validation du modèle :	68
3. Conclusion :	69
CONCLUSION GENERALE.....	65
REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE.....	67

REMERCIEMENTS

Je remercie Dieu tout puissant qui m'a donné la force et la volonté d'achever ce projet de fin d'étude.

*Toute ma reconnaissance et mon respect vont à Mr **Lahcen BENAABIDATE**, qui après m'avoir encadré, Je le remercie aussi pour sa gentillesse, ses nombreux conseils et pour son aide précieuse dans la correction du rapport.*

*Je remercie chaleureusement **Hassane BRIRHET**, Chef de service Hydrologie à la Ministère chargé de l'Eau, qui m'a fait confiance en me proposant ce projet. Il m'a offert de travailler très librement sur ce projet et m'a accordé, tout au long de la période de ce travail, le temps nécessaire pour me renseigner, me conseiller, me soutenir et répondre à mes nombreuses interrogations. Avec lui, j'ai pu goûter aux plaisirs multiples de la recherche, mettre au point ce projet master et la présenter devant le jury. Si j'ai pu réaliser ce travail dans les meilleures conditions, c'est grâce à sa disponibilité.*

*Je voudrais remercier aussi Monsieur **Lahrach A.** et Monsieur **Benabdelhadi M.** et Monsieur **Chaouni A.**, pour avoir eu la bienveillance d'accepter d'examiner ce travail.*

Enfin, tout mes respect et ma reconnaissance vont à ma famille et mes amis, source de ma motivation et de mes espoirs.

*A tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin, à tous ceux qui m'ont encadré, à tous ceux qui m'ont encouragé, à tous ceux qui m'ont accordé leur confiance, à tous ceux qui m'ont montré leur intérêt, à vous tous **MERCI !!***

Liste des Figures

Figure 1 : Localisation de bassin du souss au Maroc.	11
Figure 2 : Localisation de notre zone d'étude « Aguenza ».	13
Figure 3 : Schéma simplifié des sous-bassins hydrographiques et stations hydrométriques du Souss.	13
Figure 4 : carte géologique schématique du bassin de Souss.	14
Figure 5 : Carte des reliefs du bassin Aguenza.	15
Figure 6 : Courbe hypsométrique de bassin versant Aguenza.	16
Figure 7 : Pluviométrie moyenne mensuelle des stations (1984-2011).	19
Figure 8 : Température Max, Min et Moyenne au niveau d'Aguenza(1996-2005), en C°.	19
Figure 9 : Evaporation mensuelle Max, Min et moyenne à la station d'Aguenza (1996-2005).	20
Figure 10 : Humidité mensuelle Max, Min et moyenne à la station d'Aguenza (1996-2005).	21
Figure 11 : Réseau hydrographique de bassin Aguenza.	22
Figure 12 : Profile en long du cours d'eau principal -Bassin versant d'Aguenza.	23
Figure 13 : Schéma général des modèles de transformations des pluies en débits.	25
Figure 14 : Les différentes applications de la modélisation pluie-débit (Perrin, 2000).	26
Figure 15 : Les différentes approches de modélisation (Gaume, 2002).	28
Figure 16 : Représentation schématique d'un modèle hydrologique (Perrin et al., 2009).	30
Figure 17 : Interface principal d'ATHYS et de ses 4 modules.	31
Figure 18 : Fonctionnement du modèle ATHYS (source : IRD).	32
Figure 19 : Détails de la chaîne de calcul du modèle hydrologique ATHYS.	33
Figure 20 : principe de la fonction de production SCS.	35
Figure 21 : principe de la fonction de transfert Lag and route.	36
Figure 22 : la carte des altitudes d'Aguenza (à droite)) et la carte du réseau hydrographique avec les sous bassins (à gauche).	36
Figure 23 : La corrélation linéaire entre la précipitation d' Aguenza et d'Amsoul.	37
Figure 24 : hydrogramme de crue du première événement « 04/11/1984 - 12/11/1984 » à la station d'Aguenza.	39
Figure 25 : les hydrogrammes de crue et la variation des précipitations des stations d'Amsoul et d'Aguenza en octobre 1988.	40
Figure 26 : Hydrogrammes de crue et la variation des précipitations dans les stations d'Amsoul et d'Aguenza en novemvre 1988.	41
Figure 27 : hydrogramme de crue du quatrieme événement « 09/11/1988 - 13/11/1988 1984 » à la station d'Aguenza.	42
Figure 28 : hydrogramme de crue du cinquieme événement « 17/02/1991 - 23-02-1991 » à la station d'Aguenza.	43
Figure 29 : Hydrogramme de crue du 6ème événement « 01/02/1998 - 07/02/1998 » à la station d'Aguenza.	43
Figure 30 : Hydrogramme de crue du 7ème événement « 01/02/1998 - 07/02/1998 » à la station d'Aguenza.	44
Figure 31 : Variations des paramètres de calage pour chaque événement.	46
Figure 32 : Variartion de critère Nash d'un événement à une autre.	48
Figure 33 : Hydrogrammes de crue et la variation des précipitations des stations d'Amsoul et d'Aguenza en décembre 1999.	51

Figure 34 : Hydrogrammes de crue et la variation des précipitations des stations d'Amsoul et d'Aguenza en décembre 2000.....	51
Figure 35 : Hydrogrammes de crue et la variation des précipitations des stations d'Amsoul et d'Aguenza en novembre 2014.....	52
Figure 36 : Variation de critère Nash pour les trois événements.....	53
Figure 37 : Hydrogrammes simulé et la variation des précipitations des stations d'Amsoul et d'Aguenza le long des trois ans.	54
Figure 38 : Hydrogrammes de cure simulé et la variation des précipitations des stations d'Amsoul et d'Aguenza en 2011.	56
Figure 39 : Evolution des travaux des modèles 'GR'	58
Figure 40 : Schéma de la structure du modèle GR4J (Perrin et al, 2003).....	60
Figure 41 : Visualisation de la qualité du calage de deux ans « 2006-2007 ».	64
Figure 42 : Corrélation entre les débits observés et les débits simulés.....	65
Figure 43 : Visualisation de la qualité du calage de deux ans « 2008-2009 ».	66
Figure 44 : Corrélation entre les débits observés et les débits simulés.....	66
Figure 45 : Variation de critère Nash des périodes de simulation.	67
Figure 46 : Visualisation de la qualité du calage de la période de validation « 2010-2011 ».	68
Figure 47 : Validation du modèle par corrélation entre les débits observés et les débits simulés.	69

Liste des tableaux

<i>Tableau 1 : Les sous-bassins du souss par ordre décroissante d'altitude.</i>	12
<i>Tableau 2 : Répartition de la surface du bassin par tranche d'altitude – Bassin versant d'Aguenza. .</i>	16
<i>Tableau 3 : Pluviométrie moyenne mensuelle, moyenne, et écart type pour les deux stations</i>	18
<i>Tableau 4 : Températures au niveau de la station d'Aguenza (1996-2005), en °C.</i>	19
<i>Tableau 5 : Evaporation mensuelle bac Colorado (mm) à la station d'Aguenza (1996-2005).</i>	20
<i>Tableau 6 : Vitesse moyenne mensuelle du vent à la station d'Aguenza (1996-2005) en (m/s).</i>	20
<i>Tableau 7 : Direction du vent à la station d'Aguenza (1996-2005) en (%).</i>	20
<i>Tableau 8 : Humidité relative mensuelle de l'air (%) au barrage d'Abdelmounim (1996 – 2005).</i>	21
<i>Tableau 9 : Longueur et pente moyenne par tranche d'altitude du cours.</i>	23
<i>Tableau 10 : : Numérotation des événements, relatives au stations d'Aguenza.</i>	38
<i>Tableau 11 : les paramètres retenus pour le calage des événements.</i>	45
<i>Tableau 12 : Critères d'évaluation des simulations.</i>	47
<i>Tableau 13 : critères de performance pour chaque événement.</i>	48
<i>Tableau 14 : Qualité de la simulation des événements.</i>	48
<i>Tableau 15 : les caractéristiques extraites par l'hydrogramme après le calage.</i>	49
<i>Tableau 16 : Numérotation des événements de validation.</i>	50
<i>Tableau 17 : Paramètres retenus pour le calage des événements.</i>	50
<i>Tableau 18 : critères de performance pour chaque événement.</i>	52
<i>Tableau 19 : Qualité de la simulation des événements.</i>	53
<i>Tableau 20 : les caractéristiques extraites par l'hydrogramme après le calage.</i>	53
<i>Tableau 21 : période de simulation en mode continu.</i>	54
<i>Tableau 22 : paramètres optimaux pou le calage du modèle.</i>	55
<i>Tableau 23 : critères d'évaluation de la période de simulation.</i>	55
<i>Tableau 24 : Evaluation de la qualité de calage.</i>	56
<i>Tableau 25 : période utilisé pour la fonction de validation.</i>	56
<i>Tableau 26 : paramètres sélectionnés pour le calage.</i>	57
<i>Tableau 27 : critère retenus après le calage de modèle.</i>	57
<i>Tableau 28 : périodes de simulation.</i>	64
<i>Tableau 29 : Résultats retenus pour le calage de modèle.</i>	67
<i>Tableau 30 : périodes de validation.</i>	68
<i>Tableau 31 : Résultats retenus pour le calage de modèle.</i>	69

Liste des abréviations

EAM : Ecart arithmétique moyen.

EQM : Ecart Quadratique Moyen.

ATHYS : Atelier Hydrologique Spatialisé.

MERCEDES : Maillage Elémentaire Régulier Carré pour l'Etude Des Ecoulements Superficiels

PDAIRE: Plan Directeur D'aménagement Intégré des Ressources en Eau.

SCS: Soil Conservation Service.

CN: Curve Number.

MNT : Modèles Numériques du Terrain.

IRD : Institut de recherche pour le développement.

Abstract

The watershed of Aguenza (1162 km²) - Souss - was the subject of a rainfall-runoff modeling, by using a GR model (Agricultural Engineering) in no time Daily and a rainfall-runoff model "ATHYS". Initially, we sought to characterize some factors in the physical, geological and climatic particular governing the flow. Then a hydrological study based on the processing of hydrometric data for a period of 27 years.

The second phase of our work is primarily concerned with hydrological modeling description by determining their purpose and interest of modeling and its typology.

The third phase of this work is the development of models that can account for the rainfall-runoff relationship. To this end, we tried two rather different approaches: An overall conceptual model represented by the Rural Engineering "GR4J" and other conceptual distributed represented by the platform "ATHYS" is determined by a regression performed on chronic pluies- rates.

The results obtained by the simulation processing speed in continuous mode the rain through the use of Rural Engineering models "GR4J" are more satisfactory than modeling discrete approach "Athys". Indeed the GR model takes into account the chronological succession of phenomena on one hand and the influence of climatic parameters as well (evapotranspiration) than physico-hydrogeological catchment (soil moisture and external exchanges). But the distributed model provides the means to very good results in event mode.

Keywords: rainfall-runoff modeling, Aguenza (Souss) ATHYS, GR4J.

INTRODUCTION GENERALE

L'importance de l'eau en tant que support de vie et de facteur régulateur du développement d'un pays est universellement reconnue. Aussi est-il nécessaire de la quantifier et de la gérer aussi rigoureusement que possible. Dans ce contexte, on comprend alors aisément la nécessité de mettre au point des outils d'aide à la gestion et à la décision. Parmi ces outils, les modèles hydrologiques qui ont vu le jour au cours des vingt dernières années, surtout en regard de la relation pluie - débit.

La simulation de la transformation de la pluie en débit du bassin versant par des modèles mathématiques est devenue très répandue grâce à l'accroissement des capacités de calcul et l'amélioration de l'outil informatique. Parmi le nombre de modèles existants, les modèles conceptuels ou empiriques globaux sont les plus performants, ils présentent le lien entre la pluie et le débit par des agencements variés de réservoirs.

Ce travail porte sur la gestion de la ressource en eau dans la région de Souss Massa et plus précisément sur le bassin d'Aguenza. Le bassin de Souss présente une grande contrainte, qui pourrait être un facteur limitant si non un frein de son développement c'est la quantité des ressources en eau disponibles. 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. Certes, les besoins en eau sont en constante hausse sous la pression des demandes en eau potable, 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, un certain nombre des mesures sont prévues. 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 de la région Souss Massa Draa. Nous nous sommes intéressés au problème de l'inondation qui constitue une des catastrophes naturelles qui touchent le plus le Maroc et particulièrement la région du sud-ouest.

Dans ce travail, on a pu aborder différents travaux notamment, la modélisation hydrologique (préparation de la modélisation, traitements des données géographiques, calage du modèle..) et l'analyse des données pluviométriques et hydrométriques,....

CHAPITRE I : PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE :

Le contexte général de l'étude s'inscrit dans un cadre global qui inclut toute l'étendue du terrain touchée par le problème des inondations à savoir la plaine du Souss qui fait partie du grand bassin de Souss Massa Daraa. L'origine des inondations parvient des différents affluents du bassin de Souss qui présentent des crues violentes et irrégulières, c'est donc le bassin de Souss et plus précisément la station d'AGUENZA « sous bassin » qui fera l'objet de la présente étude.

1. Localisation :

Le bassin versant hydrographique du Souss se situe dans le sud-ouest marocain (figure 1), soit approximativement entre 9,6 et 7,47 degré de longitude ouest et entre 29,70 et le 31,11 degré de latitude nord. Il est délimité par l'Océan atlantique à l'ouest, le massif éruptif de Souira à l'est, la chaîne alpine du Haut Atlas au nord et le bombement anticlinal de l'Anti-Atlas occidental au sud.

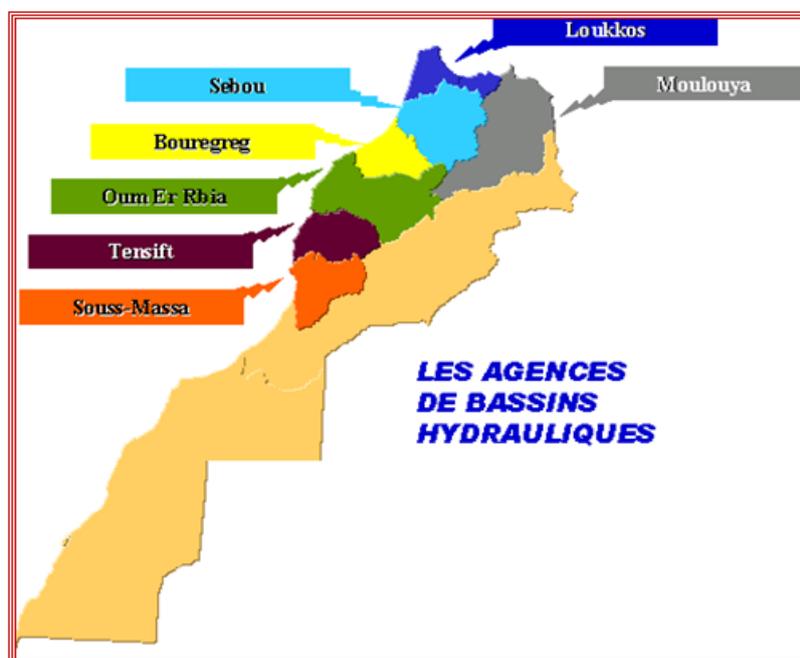


Figure 1 : Localisation de bassin du souss au Maroc (ABHS).

Le territoire ainsi délimité couvre une superficie de 17 986 km² soit l'équivalent de 2.5% du territoire national. L'Oued Souss représente l'affluent principal du bassin.

Ouverte sur l'océan atlantique, la plaine du Souss constitue un bassin subsident de forme triangulaire de 140 km de long et 38 km de plus grande largeur, soit une superficie de 3530

km², ce qui représente le cinquième de l'ensemble du bassin. Cette vallée est bien individualisée dans son cadre montagneux, s'étendant sur le versant sud du Haut-Atlas et le versant nord de l'Anti-Atlas occidentaux.

Le bassin du Souss peut être subdivisé en quatre zones d'altitude décroissante de l'Est à l'Ouest.

Tableau 1 : Les sous-bassins du souss par ordre décroissante d'altitude.

Sous-bassin	Superficie (km ²)	Proportion superficie (%)	Périmètre (km)	Altitude moyenne (m)	penne moyenne (°)	superficie de la plaine (km ²)
Haut-bassin	4463	25	463	1666	6.8	–
Aoulouz-Taroudant	5311	30	483	1010	6.2	1069
Taroudant-issen	5919	33	623	966	5.9	1224
Maritime	2224	12	355	286	2.7	1227

Le bassin souss renferme le sous-bassin « oued issen » qui fait l'objet de notre étude dont les stations qui nous intéressent plus précisément sont « Aguenza » et « Amsoul ».

2. Géologie :

Les affleurements les plus représentés sont ceux attribués à l'épaisse série monotone d'âge triasique, qui reposent en discordance sur le Primaire du massif ancien du Haut Atlas, et qui remplit le couloir d'Argana jusqu'à la plaine du Souss.

Cette série est un complexe détritique comprenant de bas en haut les ensembles suivants :

- Conglomérat de base (10 à 60m d'épaisseur) ;
- grès rouge : 1500m ;
- pélites, argiles et marnes avec parfois du sel (400 à 800m) ;
- basaltes doléritique (100 à 200m au voisinage d'Argana).

Les sols sont constitués de grès roses, durs à très durs, peu fracturés et peu altérés. Les grès sont couverts d'une couche limono-argileuse, enrobant des blocs de quelques centimètres à quelques décimètres.

La région de l'Oued Issen est particulièrement sensible à l'érosion hydrique des sols avec une zone de dégradation spécifique variant 212 tonnes/km²/an, 75% du bassin versant est sujet à des risques d'érosion hydrique.

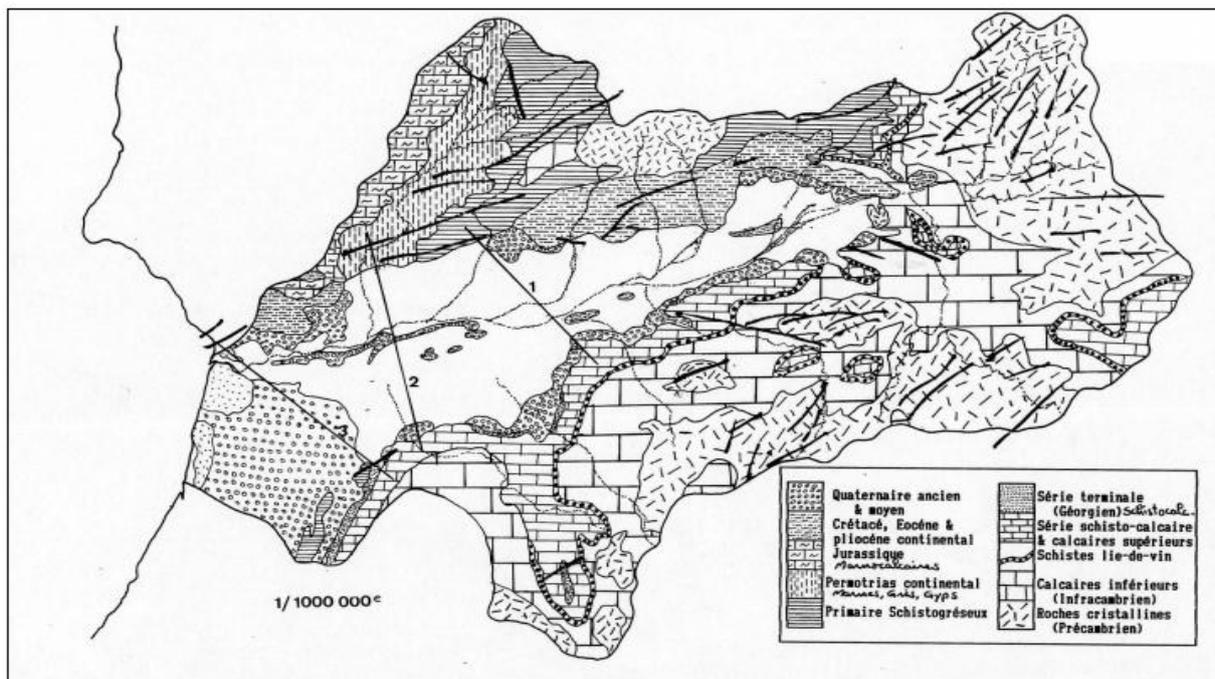


Figure 4 : carte géologique schématique du bassin de Souss (Combe et El Hebil, 1972).

3. Relief :

Le bassin versant se caractérise par un relief montagneux typique du Haut-Atlas méridional portant l'emprunte géomorphologique du corridor d'Argana. Il se présente comme une grande vallée à deux versants d'exposition opposée Sud Ouest et Nord Est. Il est très accidenté dans sa partie amont (Nord Ouest) et sa partie sud et Sud Ouest.

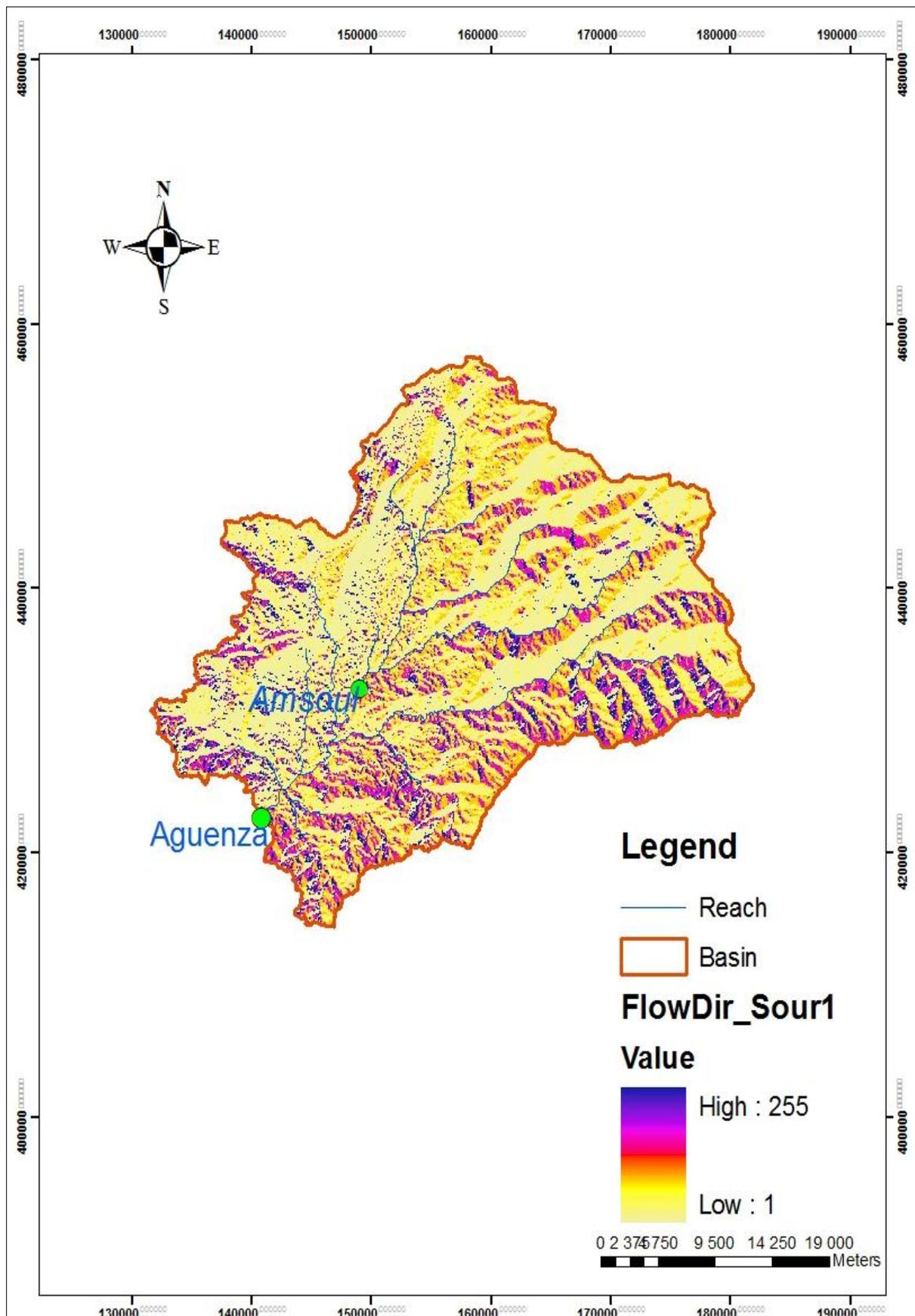


Figure 5 : Carte des reliefs du bassin Aguenza.

L'altitude varie d'environ 1650m sur les crêtes calcaires au Nord (Jbel Isk Elbaze, 1650 m ; Jbel Iguer Ouharim, 1658m et 1703m) à 800m (tableau2).

Sur les crêtes calcaires, les pentes sont fortes et abruptes avec des falaises profondes. Sur le reste du bassin versant en majorité sous forme de talus d'érosion disséqués en modelé de talwegs et inter-fleuves, les pentes sont plutôt moyennes à faibles.

La répartition de la surface du bassin par tranche d'altitude figure dans le tableau qui montre que plus de 40 % de la superficie du bassin est située au-dessus de 1100 m d'altitude. L'altitude moyenne est de 1068 m et l'altitude de fréquence 50 % est à peu près 1100 m.

Tableau 2 : Répartition de la surface du bassin par tranche d'altitude – Bassin versant d'Aguenza.

la tranche d'altitude	superficie en km2	superficie cumulé au-dessus de la limite inférieure de la tranche
>1600	0.75	0.026
1600-1500	1.93	0.092
1500-1400	2.5	0.187
1400-1300	3.18	0.278
1300-1200	2.95	0.388
1200-1100	3.93	0.523
1100-1000	5.1	0.689
1000-900	4.9	0.866
900-800	3.9	1
superficie total	29.14km2	

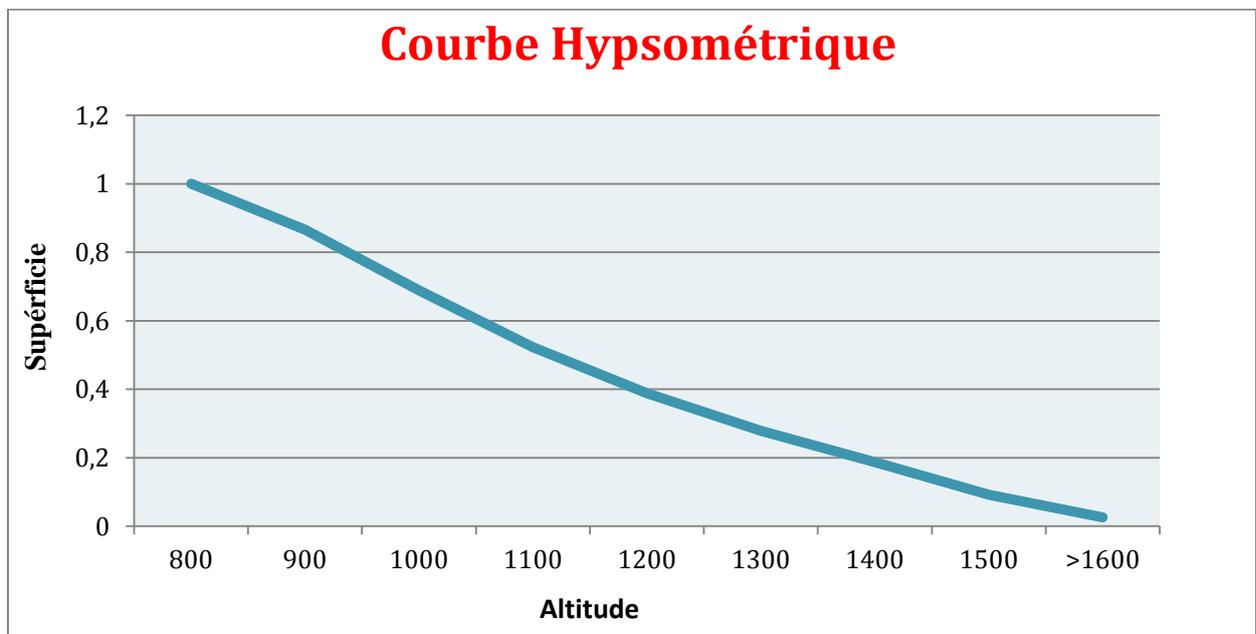


Figure 6 : Courbe hypsométrique de bassin versant Aguenza.

4. Occupation des terres et végétation :

On distingue deux principaux domaines :

4.1 – 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,...) 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 côté de l'arganier et du caroubier, en oliviers et amandiers.

4.2 – Domaines forestier :

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.
- **Un niveau inférieur** : localisé sur les formations argileuses du Trias et sur les glasterrasses 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.

5. Contexte Climatologique de la zone d'étude :

5.1. Pluviométrie :

Les données pluviométriques qui nous intéressent sont celles des stations suivantes:

- La station d'Amsoul (1984 - 2011),
- La station d'Aguenza (1984 - 2011)

Ces stations sont situées dans le bassin-versant d'Issen, non loin du bassin de Bigoudine. Le tableau 3 présente la moyenne, l'écart type et le pourcentage mensuel de la pluviométrie dans la zone. Le régime inter - annuel de la pluviométrie se caractérise par une grande

variabilité entre année. Celle-ci est à la fois spatiale et temporelle. En effet, la pluviométrie moyenne annuelle est 200.45 mm à Amsoul et 271.34 mm à Aguenza.

L'évolution moyenne de la pluviométrie au cours de l'année est illustrée par la figure 2 pour les deux stations de la région. L'analyse de la figure montre que la saison humide s'étend, globalement pour les deux stations, sur 6 mois (Octobre - Mars), avec un pic pluviométrique généralement observé au mois de décembre ou janvier et qui varie de 38.51 mm à Amsoul et 83.48 mm à Aguenza.

Par ailleurs, la pluviométrie moyenne mensuelle dans la région présente une variabilité très importante.

Tableau 3 : Pluviométrie moyenne mensuelle, moyenne, et écart type pour les deux stations (1984-2011).

	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aoû	Année
station d'Aguenza													
Moyenne (mm)	3.26	18.13	37	83.48	31.75	37.46	37.68	12.3	6.2	3.58	0.5	1.54	271.34
% Annuel	1.20	6.68	13.64	30.77	11.70	13.81	13.89	4.53	2.28	1.32	0.18	0.57	100
Ecart Type	1.22	3.92	6.16	28.46	4.79	6.41	5.65	2.34	1.76	1.74	0.41	0.54	63.40
station d'Amsoul													
Moyenne (mm)	4.94	16.96	28.75	38.51	25.74	28.96	29.33	13.69	6.03	1.43	2.18	3.93	200.45
% Annuel	2.46	8.46	14.34	19.21	12.84	14.45	14.63	6.83	3.01	0.71	1.09	1.96	100
Ecart Type	1.25	3.21	4.56	5.06	3.49	4.57	3.82	2.23	1.41	0.45	0.84	1.45	32.34

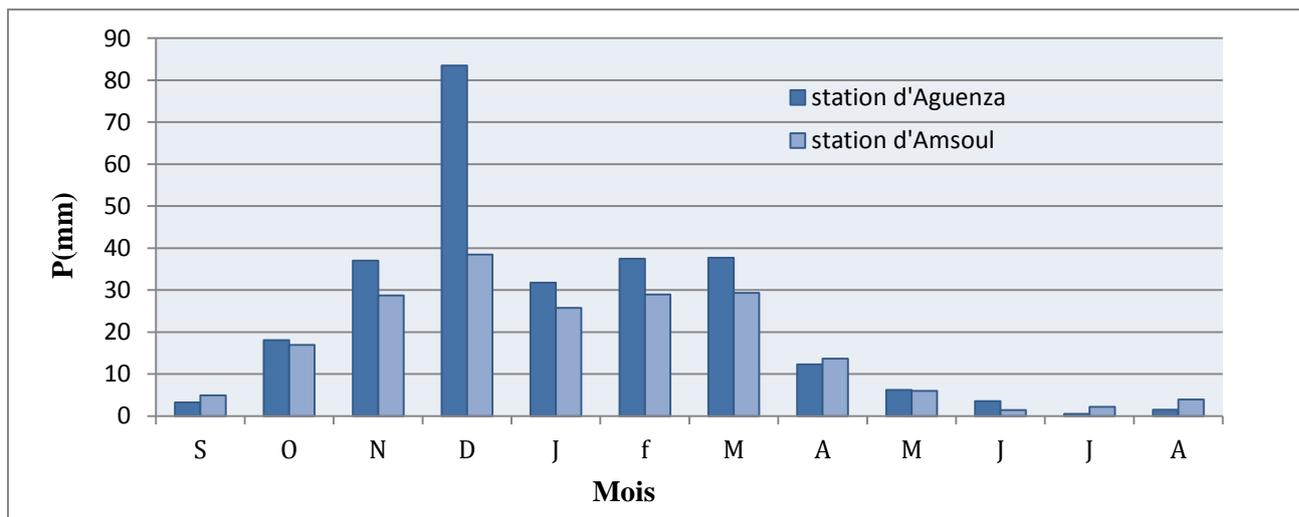


Figure 7 : Pluviométrie moyenne mensuelle des stations (1984-2011).

5.2 – Température et évaporation :

Le tableau montre la température max et min dans notre station et présente également que la moyenne de la température est de l'ordre de 13°C pour le mois le plus froid (Janvier) et de 30°C pour le mois le plus chaud (Août). La moyenne annuelle est de 20.1C.

Tableau 4 : Températures au niveau de la station d'Aguenza (1996-2005), en °C.

Année	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou	Sêp	Oct	Nov	Déc	MOY
Moy	13.4	14.9	17.4	19.1	21.5	26.3	29.3	29.7	25.7	22.6	17.4	13.8	20.9
Max	16	17	19.8	21.1	23.9	29.3	30.9	32.4	28.2	27.2	19.2	15.6	23.4
Min	11.2	11.8	14.4	17.1	18.8	22.3	25.4	26.8	23.7	19.8	16.3	11.9	18.3

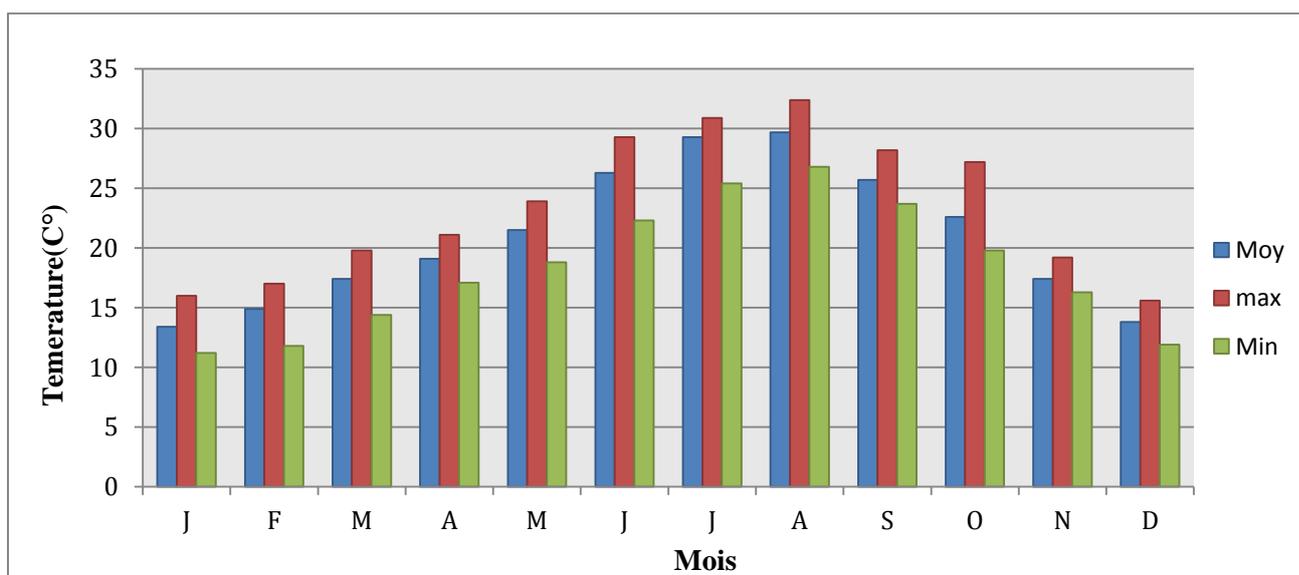


Figure 8 : Température Maximum, Minimum et Moyenne au niveau d'Aguenza (1996-2005), en C°.

L'évaporation mensuelle est mesurée sur bacs enterrés du type Colorado. L'évaporation annuelle est de 2279 mm. L'évaporation est maximale en Juillet (360mm) et minimale en Décembre et Janvier (46mm).

Tableau 5 : Evaporation mensuelle bac Colorado (mm) à la station d'Aguenza (1996-2005).

Année	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	MOY
Moy	70	88	139	165	254	307	343	318	245	172	105	72	2279
Max	87	116	164	244	278	349	360	356	307	226	139	148	2602
Min	46	64	81	77	195	277	314	279	197	135	83	46	1948

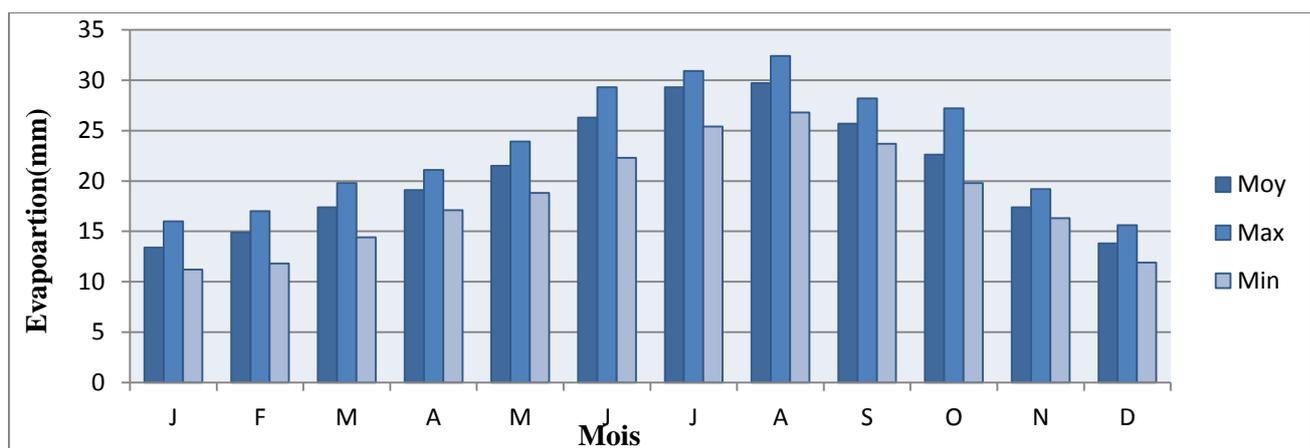


Figure 9 : Evaporation mensuelle Maximum, Minimum et moyenne à la station d'Aguenza (1996-2005).

5.3. Vent :

La vitesse moyenne annuelle du vent à la station d'Aguenza est de 1,2 m/s.

Les vents les plus forts se produisent entre avril et août .tout en restant inférieurs à 2m/s. Les plus grosses variations de vitesse de vent sont visibles de décembre à février.

Tableau 6 : Vitesse moyenne mensuelle du vent à la station d'Aguenza (1996-2005) en (m/s).

Année	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou	Sep	Oct	Nov	Déc	MOY
Moyenne	1	1	1.2	1.4	1.6	1.6	1.6	1.5	1.3	1.1	1	0.9	1.3
Maximum	1.3	1.4	1.4	1.6	1.8	1.8	1.7	1.6	1.5	1.4	1.2	1.2	1.5
Minimum	0.8	0.8	0.9	1.1	1.5	1.4	1.3	1.3	1.1	0.9	0.9	0.6	1

Les vents sont la plupart du temps de direction Sud.

Tableau 7 : Direction du vent à la station d'Aguenza (1996-2005) en (%).

Année	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	CALME
Moyenne	6.5	0.2	2.6	0	6.5	0.6	5.1	0.2	24	0.3	3.1	0.1	43	0.2	2.3	0.2	43.9

5.4 – Humidité :

L'humidité relative moyenne annuelle de l'air à la station Aguenza est de 55 %. Elle est maximale pendant les mois d'hiver (70 à 89 %) et minimale pendant les mois d'été (30 à 35%).

Tableau 8 : Humidité relative mensuelle de l'air (%) au barrage d'Abdelmounim (1996 – 2005).

Année	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou	Sep	Oct	Nov	Déc	MOY
Moyenne	65	60	56	60	56	48	44	45.5	49	52	58	65	55
Maximum	85	89	85	86	68	66	71	58	59	70	68	72	73
Minimum	49	40	44	44	48	34	34	32	35	34	49	51	41

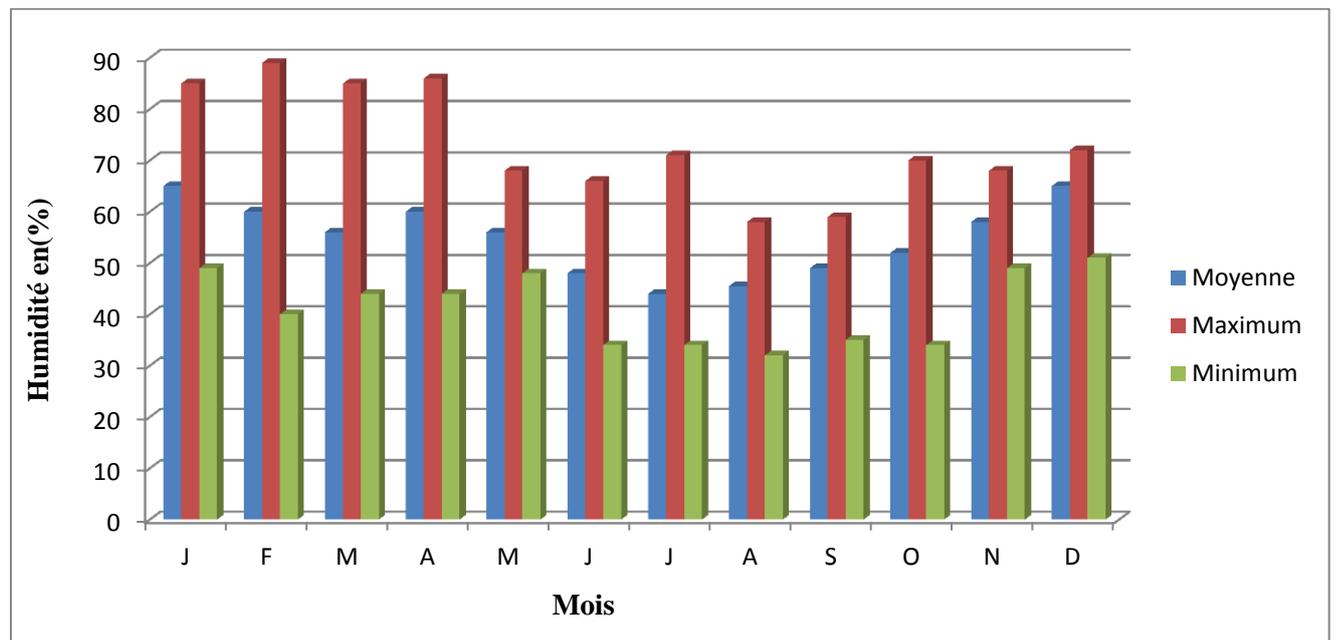


Figure 10 : Humidité mensuelle Maximum, Minimum et moyenne à la station d'Aguenza (1996-2005).

6. Hydrologie :

Le bassin versant d'Aguenza est drainé par un cours d'eau principal qui prend sa source aux environs de 1600 m à l'amont et se prolonge jusqu'à la confluence de l'Oued Issen juste à l'entrée du réservoir à 610 m. En aval du bassin et à la cote de 600 m, se trouve le barrage Abdelmounen qui a été mise en service au début des années quatre vingt pour fournir l'eau d'irrigation au périmètre d'Issen et assurer l'alimentation en eau potable de la ville d'Agadir.

Le réseau hydrographique (figure 11) est relativement dense avec une longueur totale de **163.6 km** et une densité très élevée qui est de l'ordre de **4.5 km/km²**. Le cours d'eau principal mesure 11.9 km.

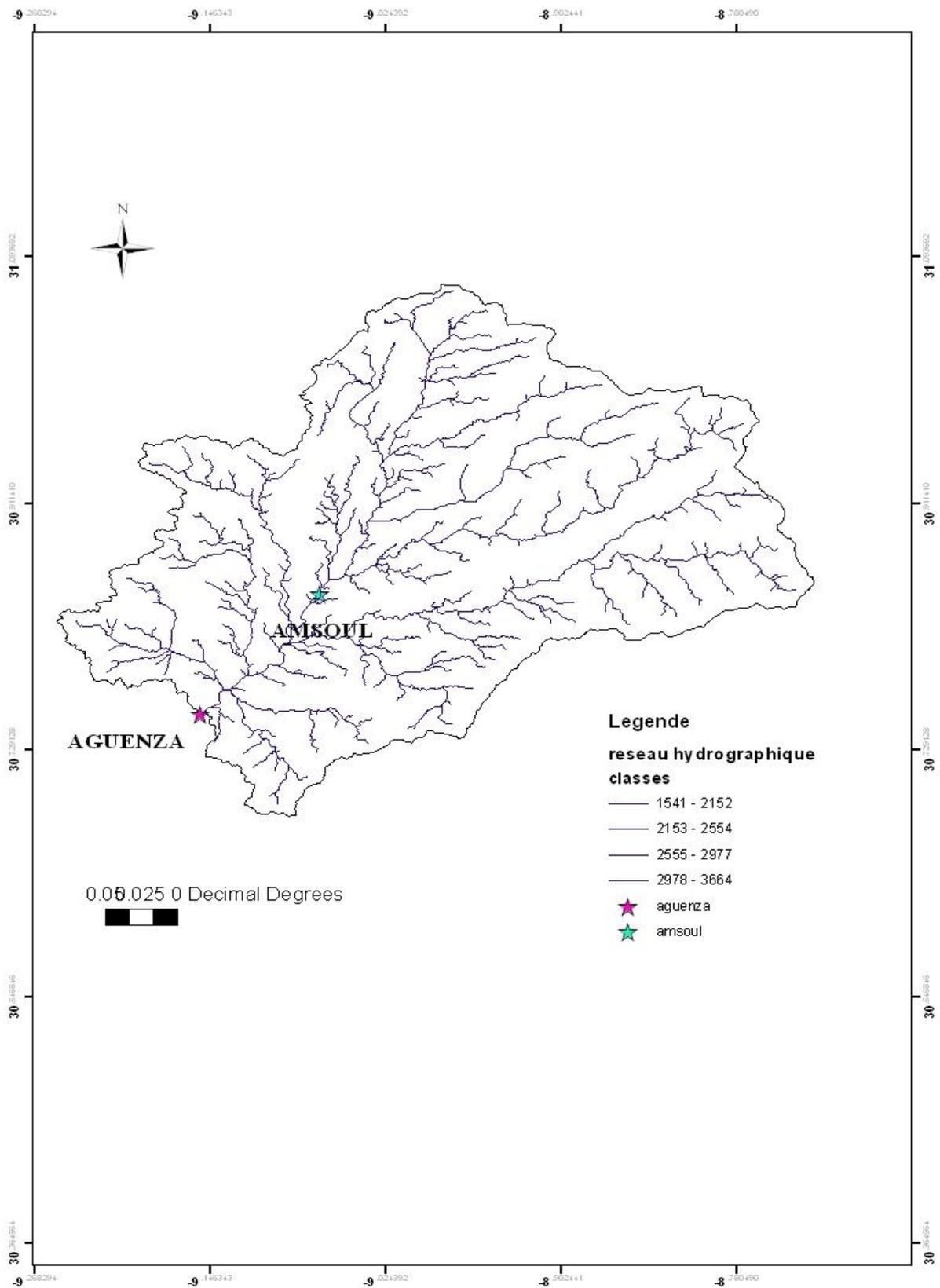


Figure 11 : Réseau hydrographique de bassin Aguenza.

La figure 12 illustre le profile en long du cours d'eau principal dont la pente moyenne varie entre 50 % à l'amont et 5.6 % à l'aval avec une moyenne de 20.05 % (Tableau 9). Il faut signaler que le réseau hydrographique est caractérisé par des affluents dont les trois principaux sont : Assif Dina, Assif Miranne et Assif Imouz gaoumen.

Tableau 9 : Longueur et pente moyenne par tranche d'altitude du cours.

tranches d'altitudes	longueur du cours d'eau principal (km)		Pente %
	Distance	distance cumulée	
1500-1600	0.2	0.2	50
1400-1500	0.2	0.4	50
1300-1400	0.4	0.8	25
1200-1300	0.6	1.4	16.7
1100-1200	1	2.4	10
1000-1100	1	3.4	10
900-1000	1.1	4.5	9.1
800-900	1.8	6.3	5.6
Total / Moyenne		6.3	22.05

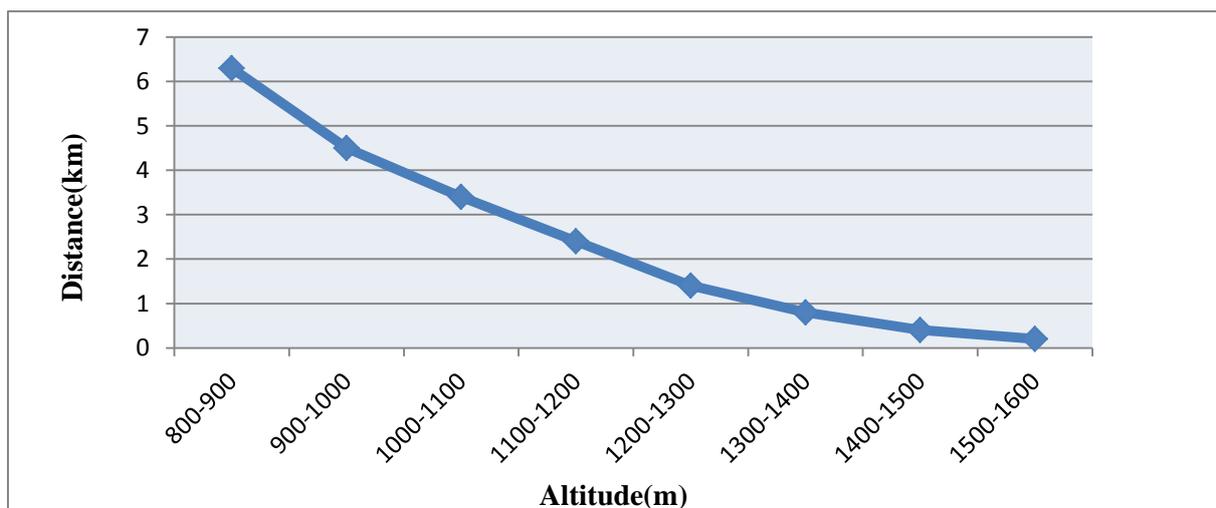


Figure 12 : Profile en long du cours d'eau principal - Bassin versant d'Aguenza.

7. Conclusion :

La présente étude a permis de remarquer que les facteurs lithologie et relief sont les plus opérants dans la répartition des sols dans le bassin versant. De façon générale, les sols sont très peu développés à cause d'une érosion hydrique très apparente, favorisée par une dégradation du couvert végétal imposée par un climat semi-aride et intensifiée par l'action destructrice de l'homme. Les zones irriguées sont les seuls endroits où on observe des actions d'aménagement en terrasses assez entretenues et qui échappent à ce phénomène. L'érosion n'affecte pas seulement les sols, mais également l'infiltration du peu de précipitation que reçoit la région. Ce qui se répercute encore une fois en cycle sur la persistance des ressources végétales.

CHAPITRE II : GENERALITES SUR LA MODELISATION HYDROLOGIQUE

La modélisation est un Outils désigné pour représenter une version simplifiée de la réalité, En hydrogéologie la modélisation c'est de simplifier la représentation d'un système hydrogéologique.

La modélisation du comportement hydrologique des bassins versant est incontournable dès lors que l'on s'intéresse à des problématiques relatives a la gestion des ressources en eau, à l'aménagement du territoire , ou à l'une des différentes facettes du risque hydrologique .elle doit pouvoir d'écrire les différents 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'ouvrage hydraulique, de protection contre les crues la gestion hydrologique et écologique du bassin versant étudié.

Dès la fin des années cinquante, les hydrologues se préoccupèrent de développer des modèles de calcul mathématique des relations entre pluies et débits des rivières de façon à pouvoir prédire l'impact de sécheresses durables ou de fortes précipitations sur les écoulements. Si l'usage de ces modèles hydrologiques, traités manuellement à l'origine, demeura longtemps laborieux, l'utilisation de l'informatique, à partir de 1967, permit de notables progrès dans la conception et le calcul de ces modèles hydro-pluviométriques.

A partir des années 1980, les hydrologues ont utilisé des modèles de plus en plus diversifiés pour répondre au mieux à des demandes variées. Des modèles " couplés ", combinant les écoulements souterrains et ceux de surface, ont amélioré la connaissance de la ressource en eau à l'échelle d'un bassin comme d'une région.

Aujourd'hui, l'ingénieur ou l'hydrologue s'oriente de plus en plus vers des modèles qui intègrent la composante spatiale (Systèmes d'Information Géographique) vu que les systèmes naturels étudiés sont si complexes qu'il est nécessaire de les représenter schématiquement par un modèle.

La première partie de ce chapitre se propose de déterminé les objectifs de la modélisation hydrologique d'en rappeler l'intérêt des modèles pluie-débit et de définir les typologies des modèles hydrologiques dans la dernière partie.

1. Objectif de la modélisation :

La modélisation mise en place dans cette étude avec l'utilisation d'un module hydrologique ATHYS et GR4J pour la prévision des crues dans notre zone d'étude.

Le concept de modèle relie généralement un système, qui constitue la réalité à modéliser, et sa représentation. Par exemple pour le cas des modèles de transformations des pluies en débits est illustré dans la figure13 :

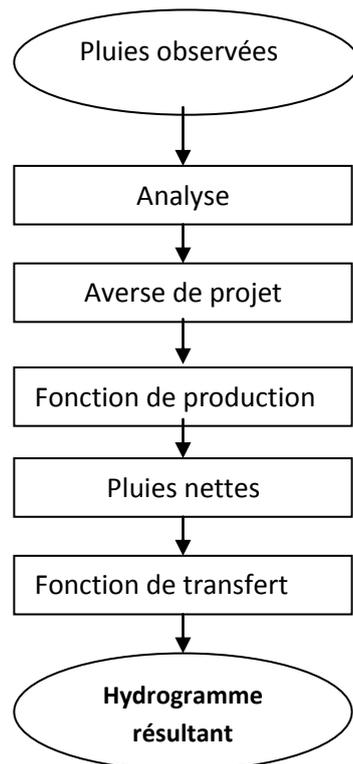


Figure 13 : Schéma général des modèles de transformations des pluies en débits.

La modélisation pluie-débit peut donner la réponse aux nombreuses questions, relatives à l'eau, axée sur la gestion des ressources et de risque. Parmi ces questions on note:

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

Dans le cadre de l'étude, la modélisation sert à analyser la dynamique de fonctionnement des hydrosystèmes, qu'ils soient influencés ou non, avec la reconstitution de l'hydrologie avec les débits des cours d'eau.

Compte tenu de l'objectif de l'étude, **les résultats des modèles hydrologiques seront traités statistiquement** afin de reconstituer des chroniques de débits naturels dont les caractéristiques statistiques sont semblables aux valeurs observées sans l'influence des prélèvements.

2. Intérêts du modèle Pluie-débit:

Les caractéristiques des débits et les données pluviométriques :

- Les débits sont parfois inexistantes ou connus sur une durée trop faible.
- Les pluies sont plus faciles à observer et à modéliser.
- Le délai de prévision est augmenté si l'on remonte aux pluies.
- Avec les débits seuls, on ne peut pas faire la différence entre variation climatique et évolution du bassin.

Les différentes applications de la modélisation pluie-débit (Fig.14) :

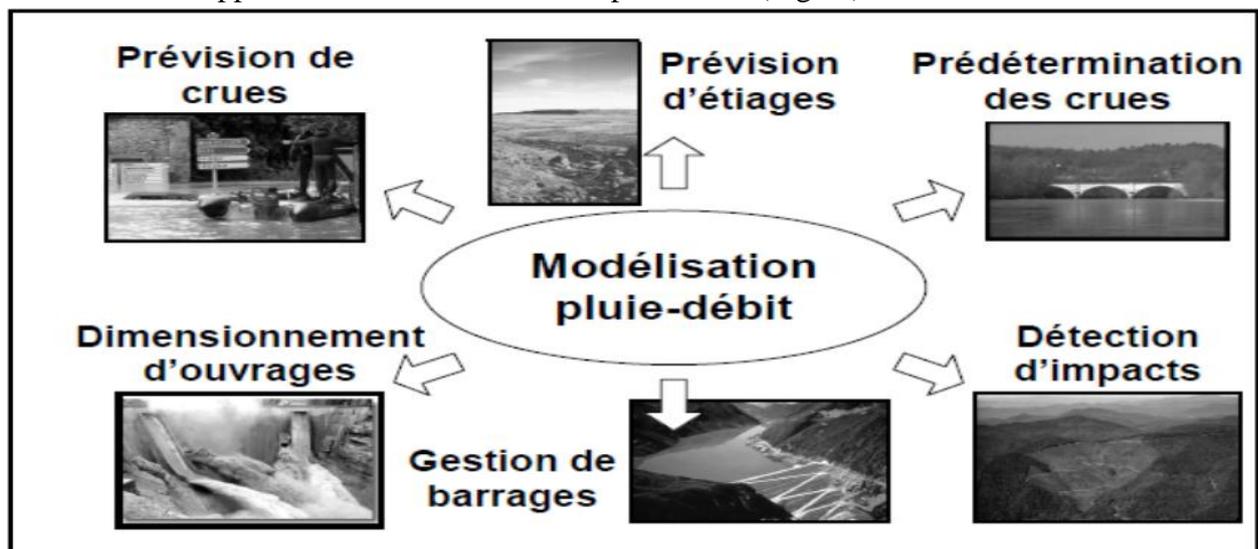


Figure 14 : Les différentes applications de la modélisation pluie-débit (Perrin, 2000).

3. Choix d'un modèle :

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

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

4. Etape d'élaboration d'un modèle :

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

- **Définir** : le modèle et ses objectifs en termes de précision. Cette définition permettra de déterminer les choix à faire par la suite et donc de préciser les chemins à suivre dans l'élaboration des étapes suivantes.
- **Identifier** : le modèle, pour pouvoir définir et caractériser le système, ses frontières et sa structure ; définir l'événement, les variables et les paramètres ; et émettre les hypothèses et le choix des échelles de temps et d'espace caractéristiques des processus de base.
- **Elaborer** : l'algorithme à incorporer dans un outil informatique capable de procéder aux instructions. Cet algorithme doit être suivi de la vérification du logiciel lui-même.
- **Caler** : le modèle, par estimation des paramètres du modèle, non mesurables, selon des critères déductifs ou des observations des entrées et des sorties. Il existe deux façons d'estimer les paramètres à partir d'un échantillon : la méthode passive (on prend tous les couples entrées-sorties disponibles, et par des méthodes statistiques, on évalue les coefficients des équations) et la méthode active (en donnant un poids spécifique plus grand à certaines observations ou groupe d'observations). Le calage peut être manuel ou automatique.
- **Evaluer** : le modèle, en comparant la réponse simulée par le modèle à une sollicitation expérimentale et la réponse réelle, à partir de données différentes de celle utilisées pour le calage.
- **Valider** : La validation du modèle ou la vérification des paramètres est une suite et un complément indispensable à l'étape de calage. Elle consiste à tester si le modèle est capable de simuler le comportement du système en utilisant une série de données d'entrées autre que celle avec laquelle il a été identifié.

5. Typologie 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 figure (15) donne une classification des modèles hydrologiques en se basant sur ces critères :

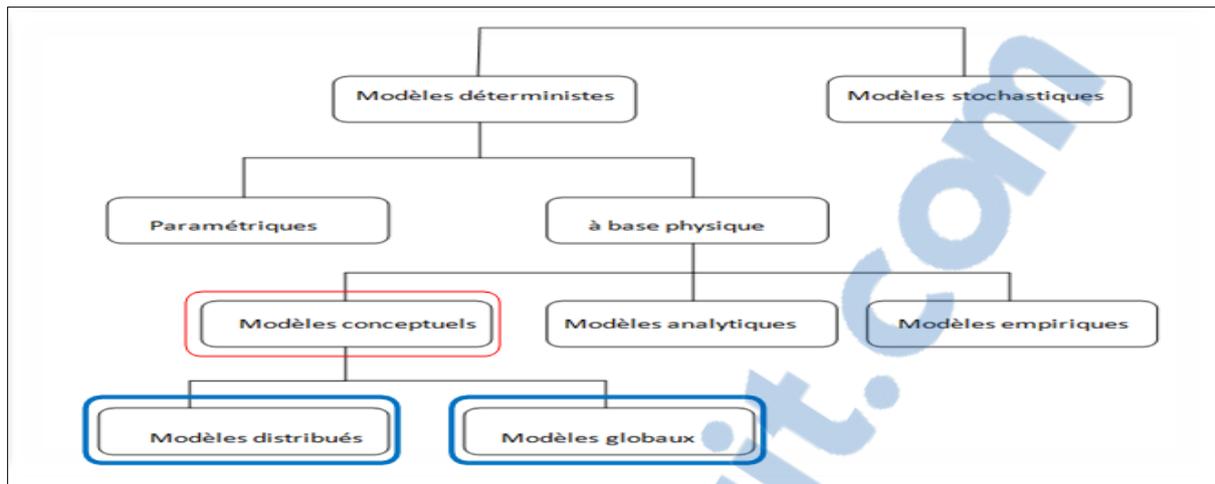


Figure 15 : Les différentes approches de modélisation (Gaume, 2002).

5.1. Selon le degré d'abstraction :

- **Modèles physiques** : Dont les équations ont été déduites à partir des principes de base de la physique (conservation de masse, quantité de mouvement, quantité d'énergie, ...), et dont la forme finale simplifiée contient des paramètres qui ont un sens physique. Ils représentent le système à une échelle réduite.
- **Modèles mathématiques** : Ils décrivent le processus hydrologique à l'aide des équations mathématiques qui relient les variables d'entrée et de sortie.

5.2. Selon la nature des variables:

- **Modèles déterministes** : Dans lesquels la relation entre variables d'entrée et de sortie est phénoménologique et ne considère pas le caractère aléatoire de variable, la même entrée produit toujours la même sortie.
- **Modèles stochastiques (probabilistes)** : Le terme stochastique est lié à la statistique et traduit le caractère aléatoire du modèle. Il permet de générer, aléatoirement, des données par des lois de distributions particulières.

5.3. Selon la discrétisation spatiale:

- **Modèles globaux** : Le modèle global s'applique globalement sur l'ensemble d'un bassin versant (approche par bilan) qui est considéré comme entité homogène. On utilise dans ce type de modèles des valeurs représentatives moyennes. Un exemple de ce type de modèle est le modèle GR (génie rural) (CEMAGRAF) que nous allons utiliser dans notre étude. C'est un modèle à deux réservoirs, il fonctionne pour un pas de temps journalier « GR4J »
- **Modèles spatialisés (distribués)** : Ils tiennent en compte la variabilité spatiale de processus et de variables d'entrée, ils sont plus avantageux que les modèles globaux. Un exemple de ce type de modèle que nous allons utiliser dans notre étude c'est un modèle à seul réservoir, il fonctionne pour un pas de temps horaire et journalière « Athys ». Dans le cas où les

composants du système ne sont pas complètement spatialisés, on parle de modèles semi spatialisés.

5.4. Selon la discrétisation spatiale:

Le processus hydrologique de transformation pluie-débit est composé d'autres sousprocessus : précipitations, interception, infiltration, ... etc. Les modèles hydrologiques peuvent se classer selon la manière de décrire ces processus :

- **Modèles conceptuels** : le modèle conceptuel considère le bassin versant comme un assemblage de réservoirs d'humidité, interconnectés et qui sont censés de représenter plusieurs niveaux de stockages, suivant une dimension verticale. Ce modèle est basé sur la connaissance des phénomènes physiques qui agissent sur les entrées pour obtenir les sorties.
- **Modèles empiriques** : Ils sont utilisés pour reproduire le comportement global du système sans décrire les processus élémentaires. Ils sont généralement de type boîte noire.

6. 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 paramètre. 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 III : MODELISATION DE BASSIN AGUENZA SOUS LE PLATEFORME ATHYS ET GR4J :

La modélisation hydrologique est la représentation simplifiée partielle ou totale du cycle hydrologique. Cette représentation se fait grâce à un ensemble d'équations mathématiques qui sont appelées à reproduire le système. Le modélisateur introduit généralement les facteurs qui lui semblent pertinents pour minimiser l'inexactitude liée aux hypothèses simplificatrices de la modélisation. On distingue quatre types de variables qui existent en totalité ou en partie dans chaque modèle (Fig.16):

- **Variables d'entrées** : Le modèle fait appel à ces variables qui dépendent du temps et/ou de l'espace (pluie, ETP, caractéristiques et hydrodynamiques du milieu, ...).
- **Variables de sorties** : Le modèle répond par un ensemble de variables (débits, ...).
- **Variables d'état** : Elles permettent de caractériser l'état du système modélisé et peuvent évoluer en fonction du temps (niveau de remplissage des réservoirs d'eau d'un bassin versant, taux de saturation des sols, profondeurs des sols, pentes, ...).
- **Paramètres de calage** : En plus des variables, la modélisation fait intervenir des variables dont la valeur doit être déterminée par calage.

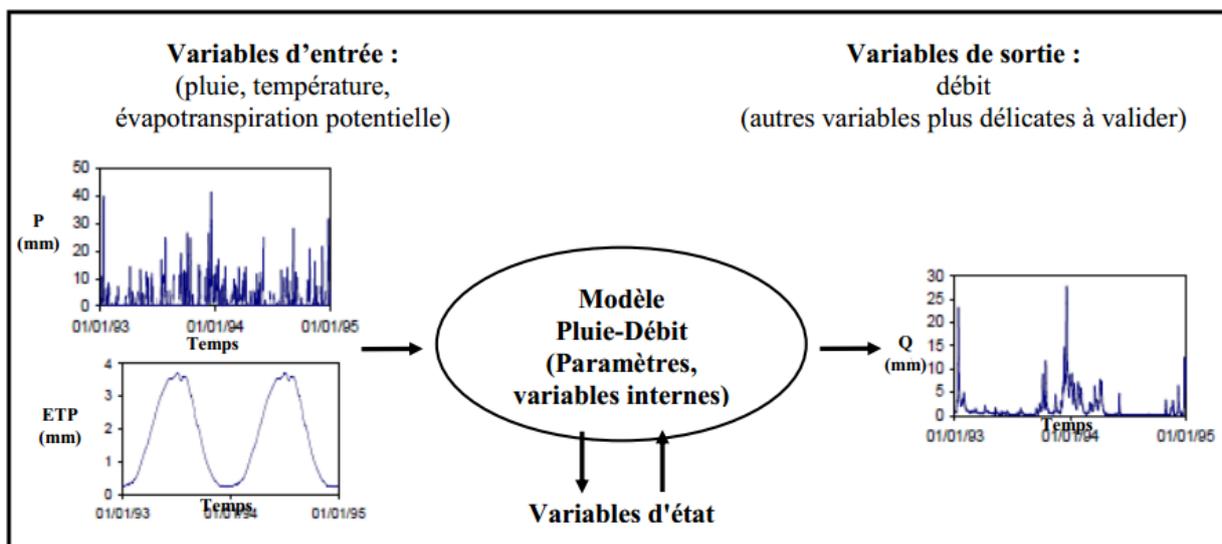


Figure 16 : Représentation schématique d'un modèle hydrologique (Perrin et al., 2009).

Pour une meilleure gestion des ressources en eau et des quantités d'eau disponible, il est nécessaire de transformer les données pluviométriques en données hydrométriques. D'où l'intérêt de la modélisation pluie-débit basée sur l'utilisation de modèles simulant la réalité.

En hydrologie, la simulation de la transformation de la pluie en débit dans les rivières constitue un axe de recherche dynamique. Dans notre cas, nous avons utilisés les modèles « Athys » et « GR4J (Génie Rural) ».

1. Modélisation pluie-débit « ATHYS » :

1.1. Présentation du modèle hydrologique « ATHYS » :

1.1.1 Généralité :

ATHYS (Atelier Hydrologique Spatialisé) est un logiciel de transformation pluie-débit développé par l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD) à Montpellier.

Il se compose de **quatre modules** (figure17) :

- **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. Le module MERCEDES est composé de 6 menus permettant d'implémenter une session de calcul qui sont les suivants:
 - a. **Basin versant** : description du bassin versant à traiter ;
 - b. **Pluies et débits** : caractéristiques hydro-pluviométriques des événements à simuler ;
 - c. **Paramètres modèles** : définition des modèles à utiliser ;
 - d. **Optimisation** : calcul automatique des paramètres des modèles ;
 - e. **Analyse sensibilité** : analyse globale des fonctions critères ;
 - f. **Fichiers en sortie** : déclaration des fichiers de résultats.
- **VISHYR** (Visualisation des données Hydrologiques) : traitement des données hydroclimatiques stationnelles 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.



Figure 17 : Interface principale d'ATHYS et de ses 4 modules (source : IRD).

L'intérêt principal de ce logiciel en libre accès 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 (généralement les mailles couvrent 10 000 m²). 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.

2.2.2. Modèles de calcul :

Le débit généré pour un événement pluvieux (transformation pluie-débit) est calculé en trois étapes :

- 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.

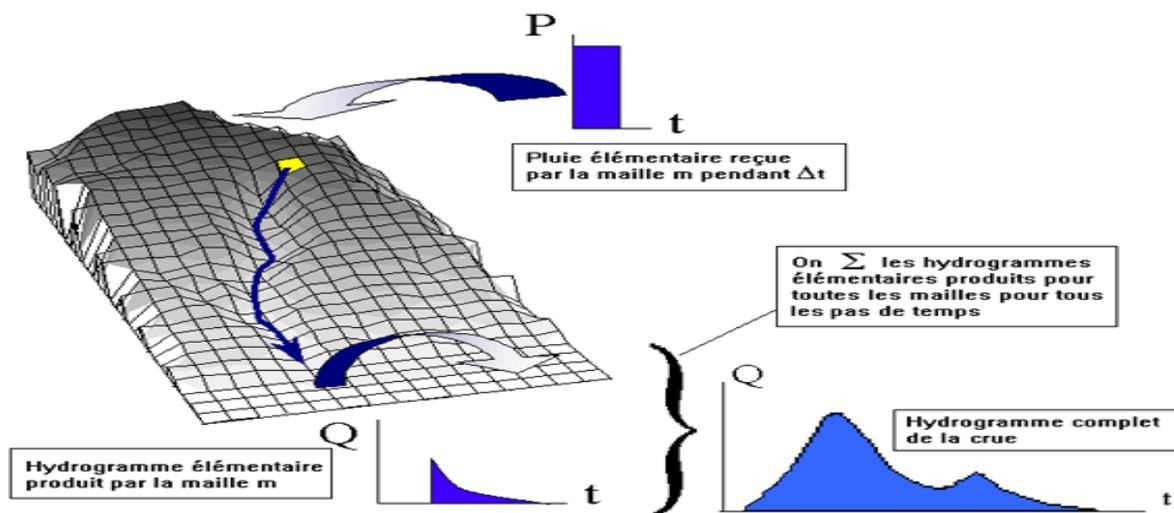


Figure 18 : Fonctionnement du modèle ATHYS (source : IRD).

2.2.3. Présentation détaillé du modèle SCS –LR :

Le schéma ci-après 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 définie la lame ruisselée, qui représente la proportion des précipitations qui va ruisseler, puis la fonction de transfert (Lag and Route) calcule les débits à l'exutoire des bassins versants identifiés comme des nœuds de calcul.

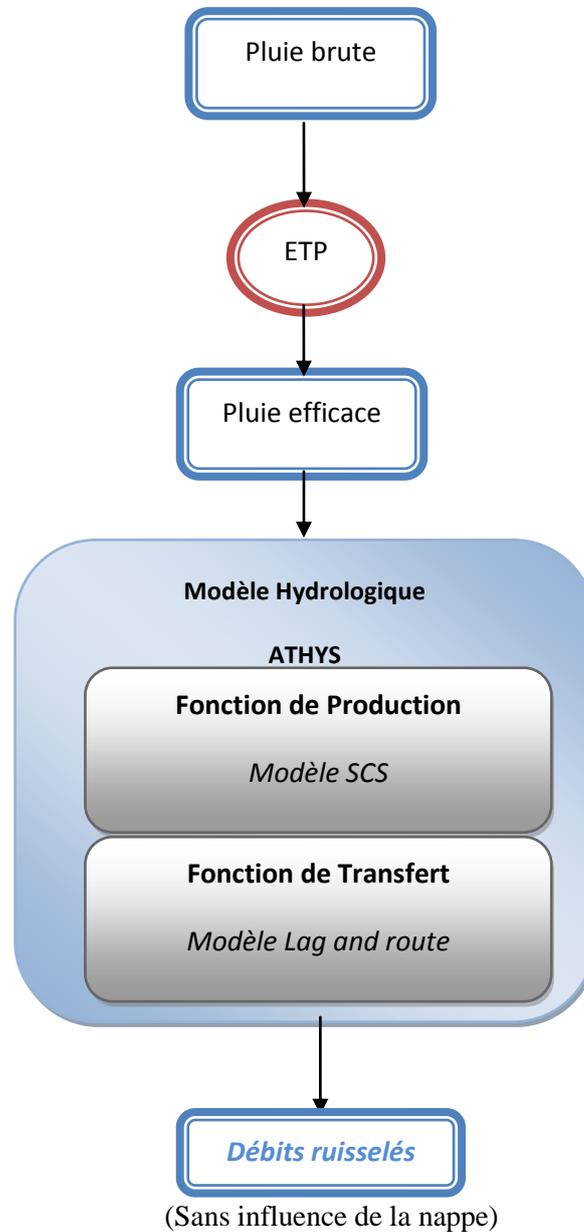


Figure 19 : Détails de la chaîne de calcul du modèle hydrologique ATHYS.

ATHYS se caractérise par une structure « mono-réservoir », ne permettrait pas de modéliser les échanges surface/souterrain dans ce bassin versant.

A partir de données d'entrées (MNT, fichier de drainage et précipitations), le modèle hydrologique ATHYS permet de définir les débits ruisselés au pas de temps journalier et horaires en divers points du bassin versant. Ces débits ne prennent pas en compte l'influence de la nappe et les éventuels échanges entre les eaux superficielles et souterraines.

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

a – Fonction de production type SCS :

Le modèle développé par le **Soil Conservation Service (SCS)** est le plus couramment utilisé. Le choix de ce modèle s'explique par sa prise en compte de l'occupation du sol, ce qui est censé

permettre de s'affranchir de l'optimisation du paramètre capacité de stockage du sol.

La fonction de production SCS est un modèle de production très souple, capable de s'adapter à différents types de processus de formations de crues. La version utilisée dans le modèle est caractérisée par :

- un coefficient de ruissellement instantané, fonction du cumul de pluie depuis le début de l'épisode ;
- un réservoir sol, alimenté par une fraction de la pluie, et soumis à une vidange ;
- un écoulement retardé, correspondant à une fraction de la vidange du réservoir sol.

Le cumul de pluie correspond à la somme des précipitations depuis le début de l'épisode, diminué d'une vidange appliquée à chaque pas de temps. Cette vidange a pour objectif de simuler le ressuyage des sols au cours des périodes sans pluie, et la diminution conséquente du coefficient de ruissellement potentiel.

Le modèle SCS est composé de trois paramètres : S (ou CN), dS, ω :

- **S** (en mm) : représente la **capacité totale du réservoir sol**. Cette capacité dépend de nombreuses caractéristiques du sol (profondeur, hétérogénéité, porosité, conductivité hydraulique, pendage du sous-sol...).
- **CN** ou **curve number** : Comme pour S, des abaques donnent sa valeur suivant la nature et l'utilisation du sol. Ces deux paramètres sont reliés par la relation suivante :

$$S \text{ (mm)} = 25.4 * ((1000/\text{CN}) - 10)$$

- **ds**: est la **vidange proportionnelle au niveau du réservoir** par percolation profonde, évaporation, écoulement de sub-surface..., exprimé en $j - 1$.
- ω : représente la **fraction de vidange qui participe au ruissellement** sous forme d'exfiltration.

NB : pour les pointes de crue, le paramètre le plus sensible du modèle est la capacité du réservoir S, les autres paramètres sont assez peu variables, et peuvent être estimés régionalement : $ds = 1 - j - 1$, $w = 0.2$

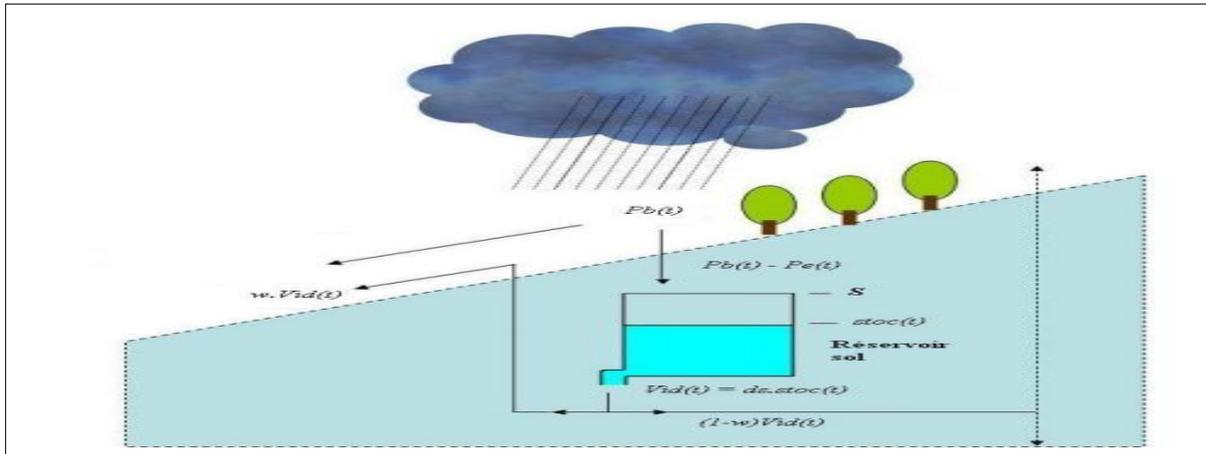


Figure 20 : principe de la fonction de production SCS (source : IRD)..

b – Fonction de transfert Lag and route :

On distingue dans MERCEDES deux modes différents de fonctions de transferts :

- le transfert en mode **mailles indépendantes** : la contribution de chaque maille est **transférée intégralement** à l'exutoire sans prendre en compte ni les apports des mailles voisines, ni les pertes possibles dans le lit de la rivière. Le modèle utilisé est le **modèle Lag & Route**,
- le transfert en mode **mailles interactives** : le transfert est réalisé maille à maille, de l'amont vers l'aval, en prenant en compte les apports des mailles amont et les pertes possibles. Ce modèle est le **modèle de l'onde cinématique**.

Le choix du modèle **Lag & Route** s'explique par la volonté d'obtenir à la fois une modélisation globale dans la contribution des différents paramètres (pertes, ruissellement,...) et précise en choisissant de connaître cette contribution pour chaque maille indépendamment des autres. De plus, dans ce modèle tous les paramètres sont constants au cours du temps. Nous avons choisi d'utiliser le modèle Lag & Route Simple par soucis de simplicité.

La fonction de transfert lag and route achemine les volumes produits par chaque maille à l'exutoire. Les temps de transfert sont calculés en fonction de :

- la vitesse de transfert sur chaque maille, V_m
- la diffusion de l'onde de crue, réalisée à l'aide d'un réservoir linéaire, de capacité K_m ; la diffusion est d'autant plus importante que la maille est éloignée de l'exutoire.

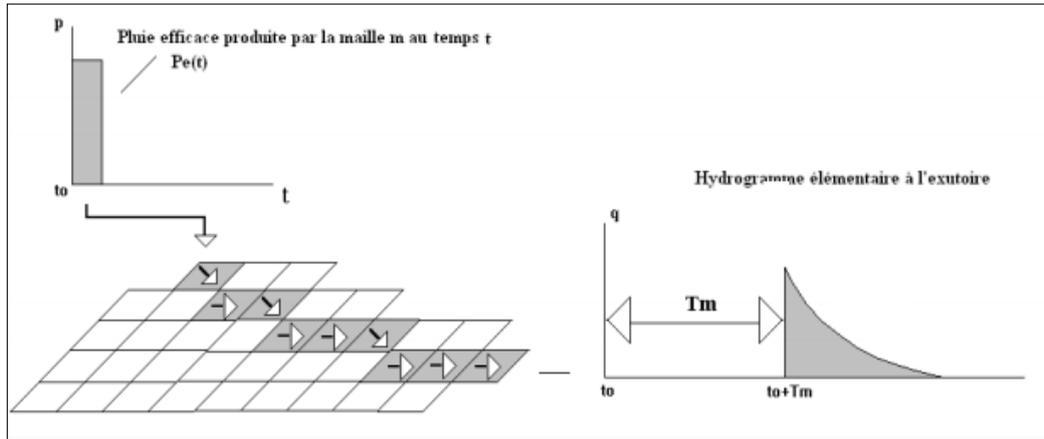


Figure 21 : principe de la fonction de transfert Lag and route (source : IRD)..

Cette fonction est composée de **deux paramètres** : V_0 et K_0

- **V_0** (en m/s) : est la **vitesse maximale atteinte à l'exutoire lors de l'évènement**. Ce modèle calcule un temps de transfert T_m qui désigne le temps écoulé entre la pluie tombée sur la maille m et le début du passage de l'évènement à l'exutoire.
Il est calculé à partir de la position de la maille et de l'exutoire (longueur L_m entre maille et exutoire), du modèle de drainage et de la vitesse V_0
- **K_0** : est appelé **paramètre d'amortissement**. Il est relié au temps d'amortissement K_m par la relation suivante :

$$K_m = K_0 * T_m$$

1.2. Traitement des données :

1.2.1. Traitement des données géographiques :

Le MNT est un ensemble de points altimétriques (trois coordonnées, x , y et z). L'assemblage des 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. et pour avoir des résultats correcte il faut apporter des corrections à la main surtout pour les fichiers des drainages (Figure ci-dessous pour quelques traitements) :

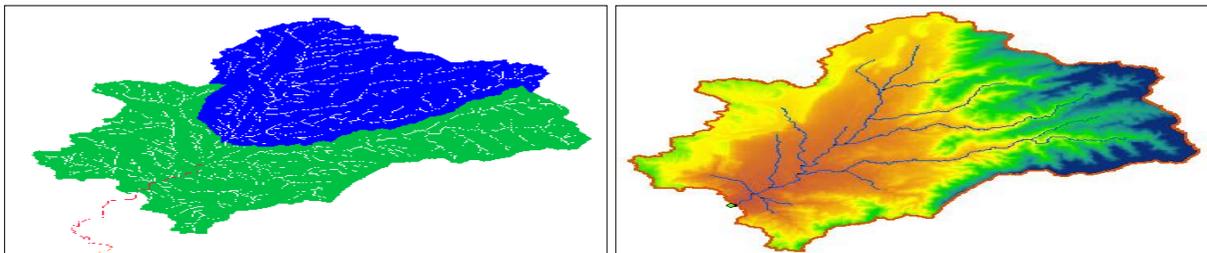


Figure 22 : la carte des altitudes d'Aguenza (à droite) et la carte du réseau hydrographique avec les sous bassins (à gauche).

1.2.2. Traitement des données météorologiques :

Les fichiers épisodes peuvent être constitués à partir d'un fichier ascii, de type csv, formé par exemple dans Excel. Ces opérations sont réalisées dans le module Vishyr. Une fois formés, les fichiers épisodes peuvent également être visualisés et modifiés dans le module Vishyr.

Les fichiers .csv peuvent être constitués sous Excel. Ils contiennent les données de pluie des deux stations et de débit observé au niveau de la station hydrométrique d'Aguenza chaque épisode correspondant à des pas de temps fixes consécutifs, compris entre une date début et une date de fin.

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 2 postes pluviométriques : Aguenza , Amsoul.

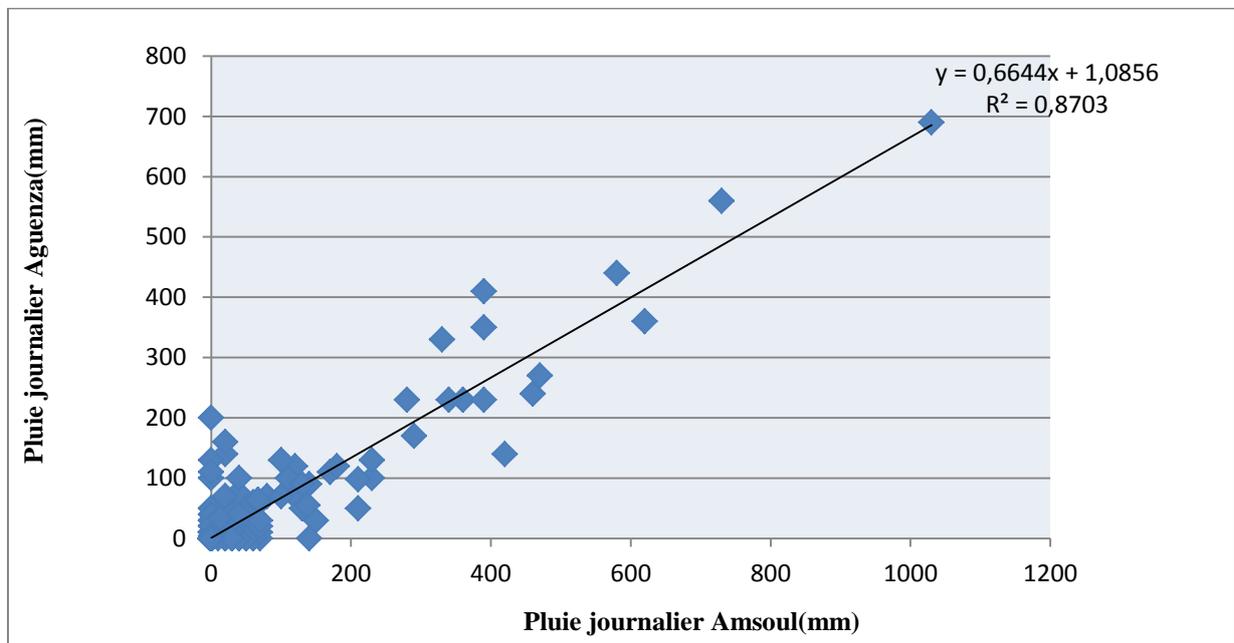


Figure 23 : La corrélation linéaire entre la précipitation d' Aguenza et d'Amsoul.

La corrélation linéaire entre les pluies d'Aguenza et celle d'Amsoul donne une relation significative avec un coefficient de corrélation supérieure à 0.8. Ceci peut s'expliquer par le fait que la précipitation à Aguenza s'attache forcément aux pluies tombées aux mêmes jours dans Amsoul.

.

1.3. Modélisation en mode événementiel des crues:

1.3.1. Calage et discussion des résultats :

Le calage consiste à attribuer aux paramètres les valeurs numériques conduisant à minimiser l'écart entre réponses calculées et réponses observées. Les deux éléments les plus importants de cette procédure sont:

- l'évaluation de la qualité des simulations par l'adoption d'une mesure de performance et ;
- la méthode de modification des paramètres si la proximité entre les valeurs observées et calculées est insuffisante.

Le logiciel est utilisé pour simuler les débits à partir des données pluviométriques de 1984 jusqu'au 2014 aux stations d'Aguenza et d'Amsoul. La sortie du modèle est un débit horaire discrétisé sur 7 épisodes entre 1984 et 1998. Le tableau suivant montre ces épisodes :

Tableau 10 : : Numérotation des événements, relatives au stations d'Aguenza.

N° d'événement	Episodes	Evénements	Fonction
1	04/11/1984	04/11/1984 15:00 - 12/11/1984 13:00	calage
2	15/10/1988	15/10/1988 01:00 - 20/10/1988 22:00	calage
3	05/11/1988	05/11/1988 16:00 - 09/11/1988 08:00	calage
4	09/11/1988	09/11/1988 09:00 - 13/11/1988 23:00	calage
5	17/02/1991	17/02/1991 00:00 - 23-02-1991 00:00	calage
6	01/01/1997	01/01/1997 00:00 - 08-01-1997 00:00	calage
7	01/02/1998	01/02/1998 00:00 - 07/02/1998 00:00	Calage

Les informations climatologiques sont connues ponctuellement au droit de chaque station. Ces informations doivent être spatialisées de façon à être étendues à l'ensemble de la surface du bassin versant. La méthode des polygones de Thiessen a été utilisée pour définir la zone d'influence de chaque station.

Le plus petit pas de temps disponible pour les épisodes de crue est de 60 minutes.

Dans la modélisation nous avons choisis le modèle SCS comme fonction de production et Lag and Route comme fonction de transfert.

Les hydrogrammes de crue obtenus par le modèle pour les 7 événements sont représentés comme suite :

➤ Événement 1 « 04/11/1984 - 12/11/1984 »:

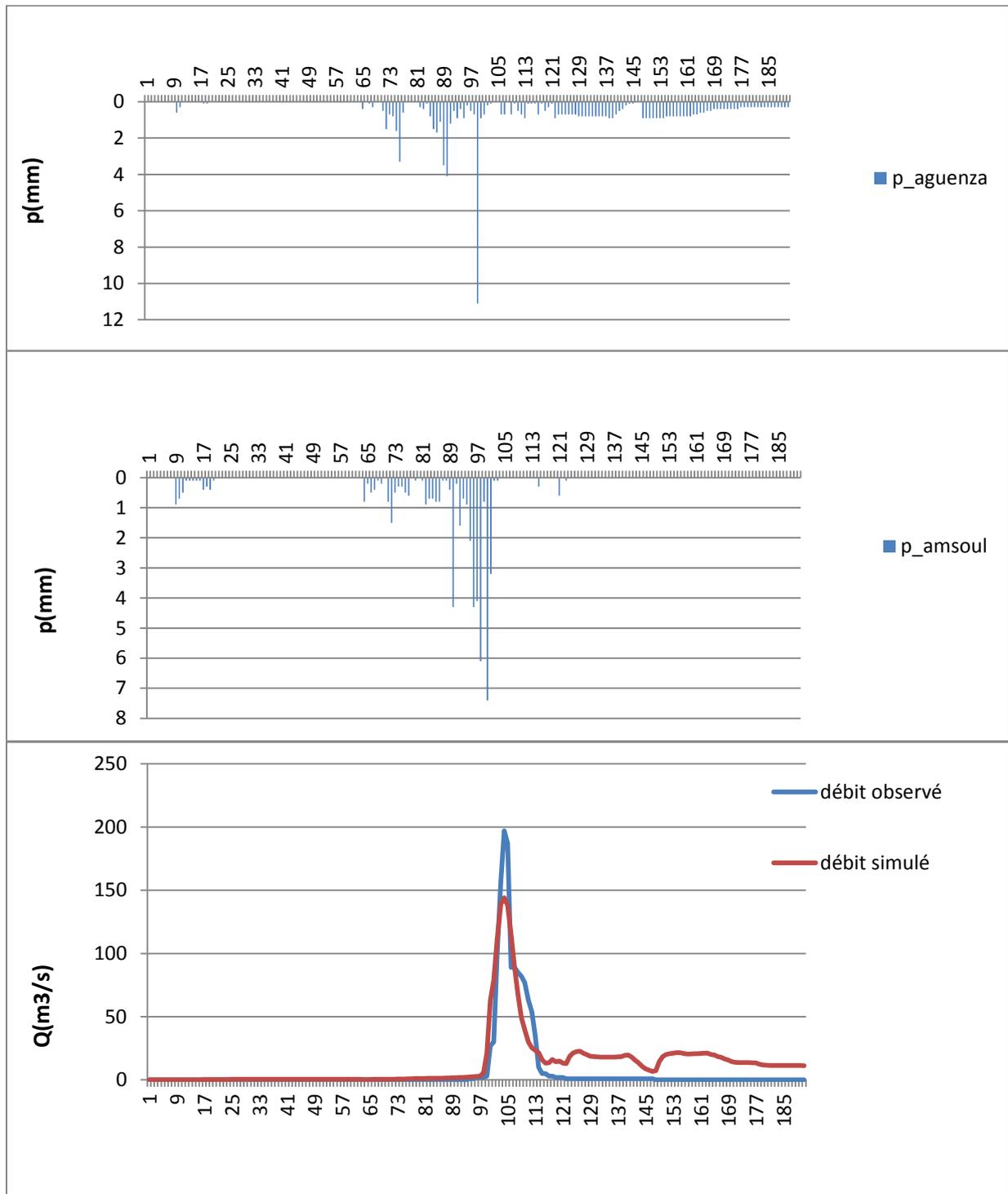


Figure 24 : hydrogramme de crue du première événement « 04/11/1984 - 12/11/1984 » à la station d'Aguenza.

➤ Événement 2 « 15/10/1988 - 20/10/1988 » :

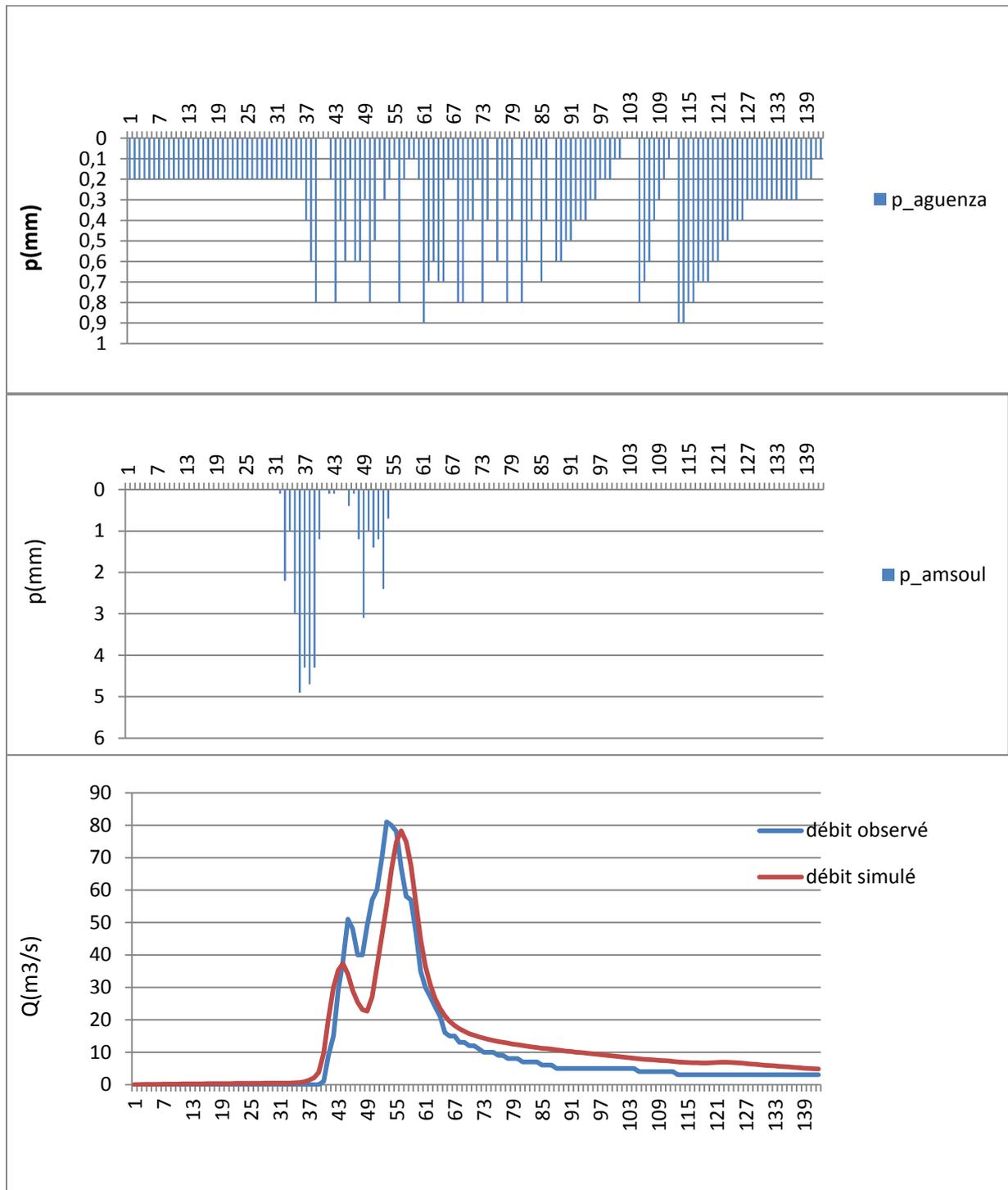


Figure 25 : les hydrogrammes de crue et la variation des précipitations des stations d'Amsoul et d'Aguenza en octobre 1988.

➤ Événement 3 « 05/11/1988 - 09/11/1988 »:

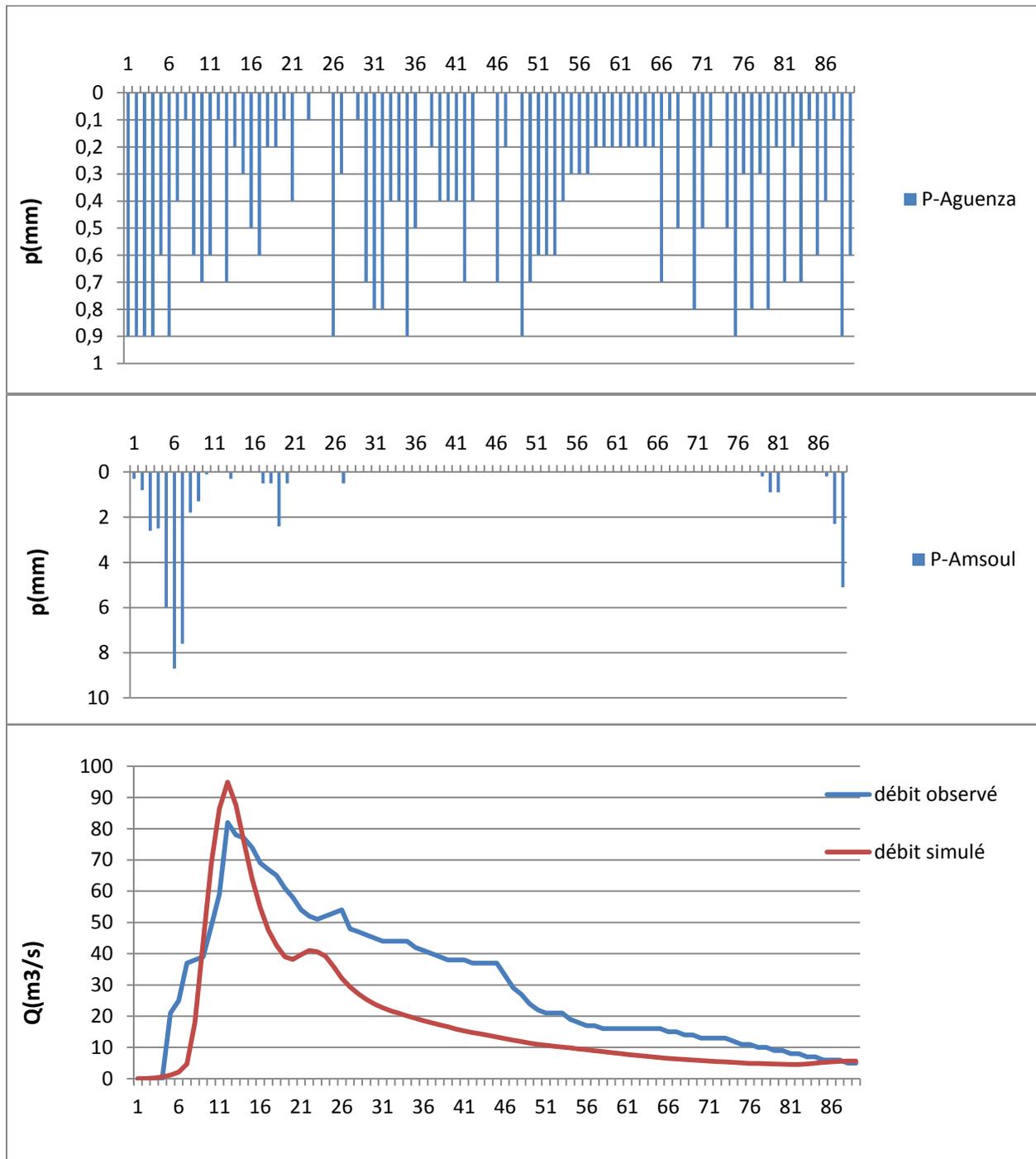


Figure 26 : Hydrogrammes de crue et la variation des précipitations dans les stations d'Amsoul et d'Aguenza en novembre 1988.

➤ **Événement 4 « 09/11/1988 - 13/11/1988 »:**

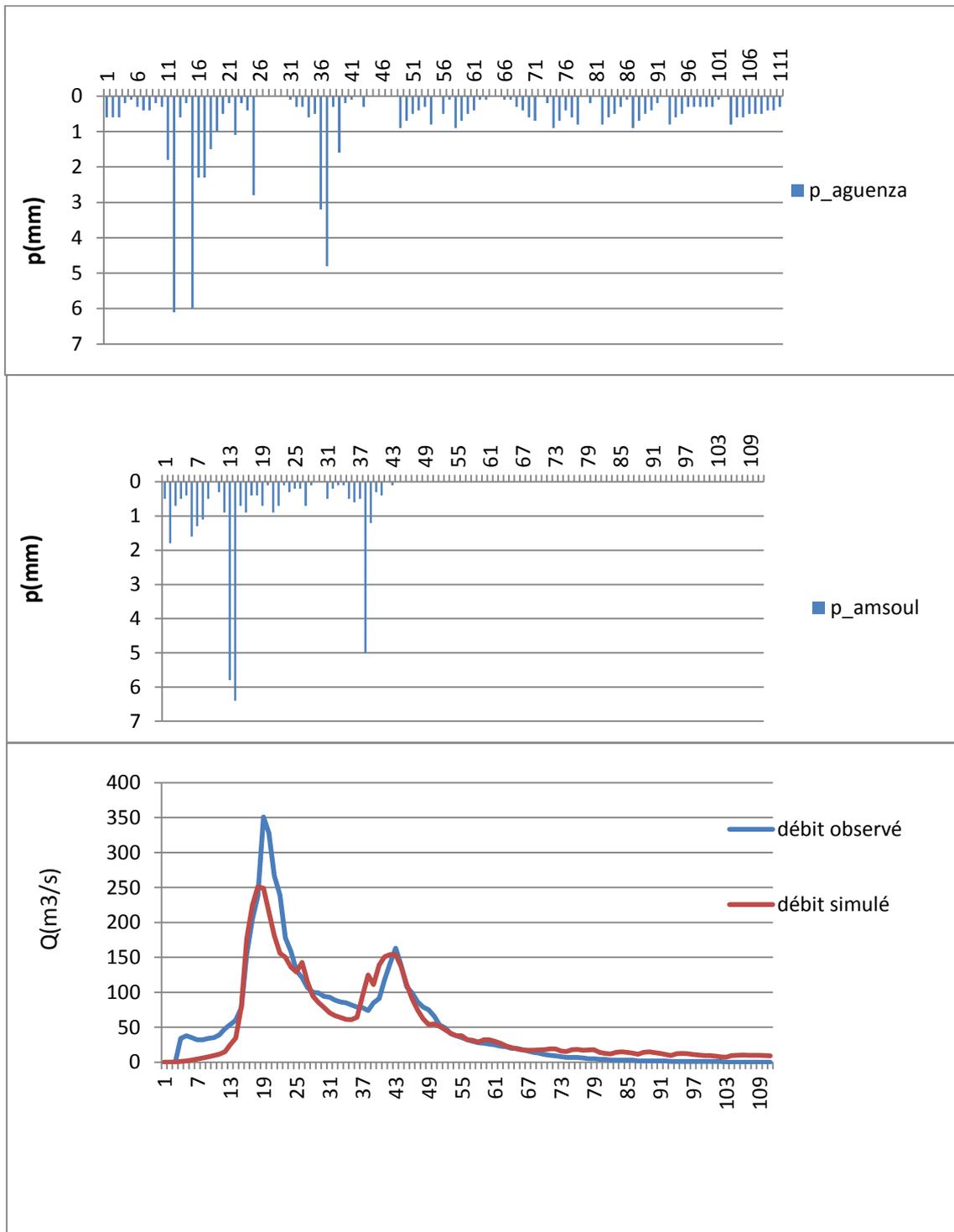


Figure 27 : hydrogramme de crue du quatrieme événement « 09/11/1988 - 13/11/1988 1984 » à la station d'Aguenza.

➤ **Événement 5 « 17/02/1991 - 23-02-1991 »:**

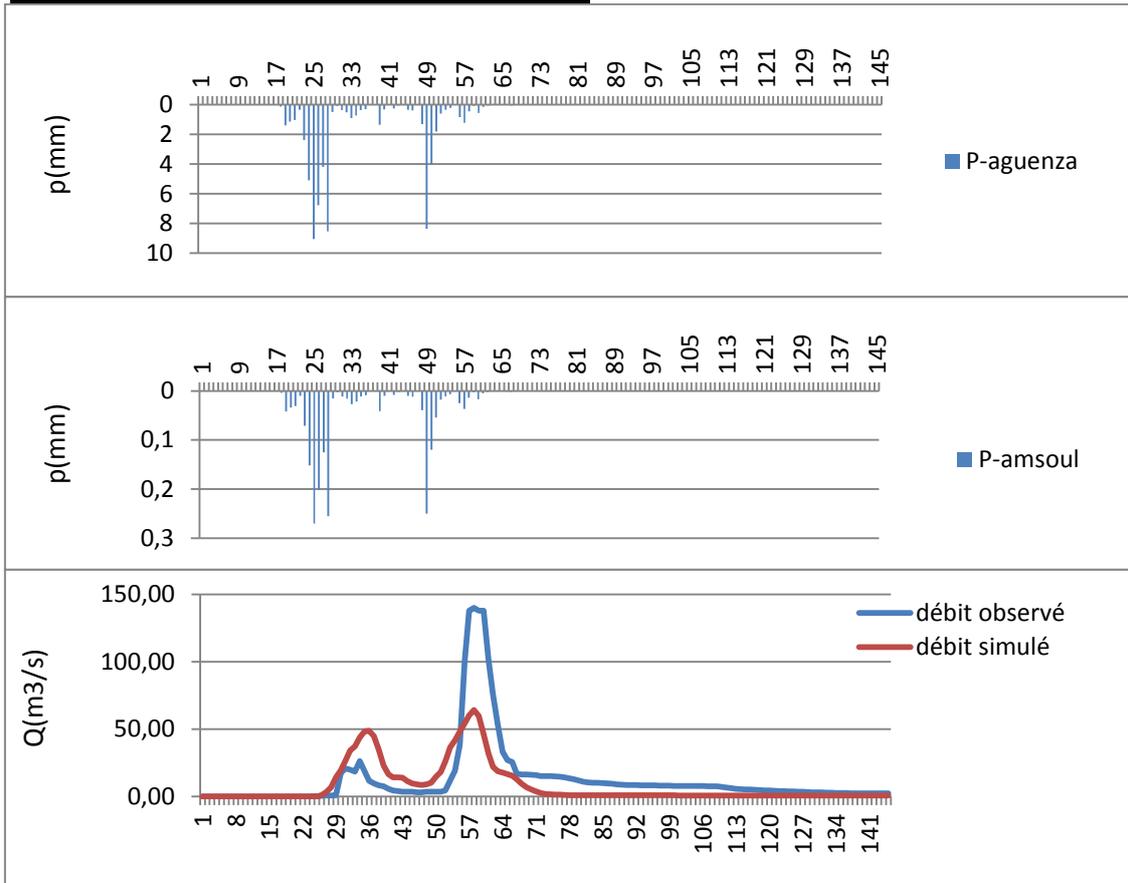


Figure 28 : hydrogramme de crue du cinquieme événement « 17/02/1991 - 23-02-1991 » à la station d'Aguenza.

➤ **Événement 6 « 01/01/1997 - 08-01-1997 »:**

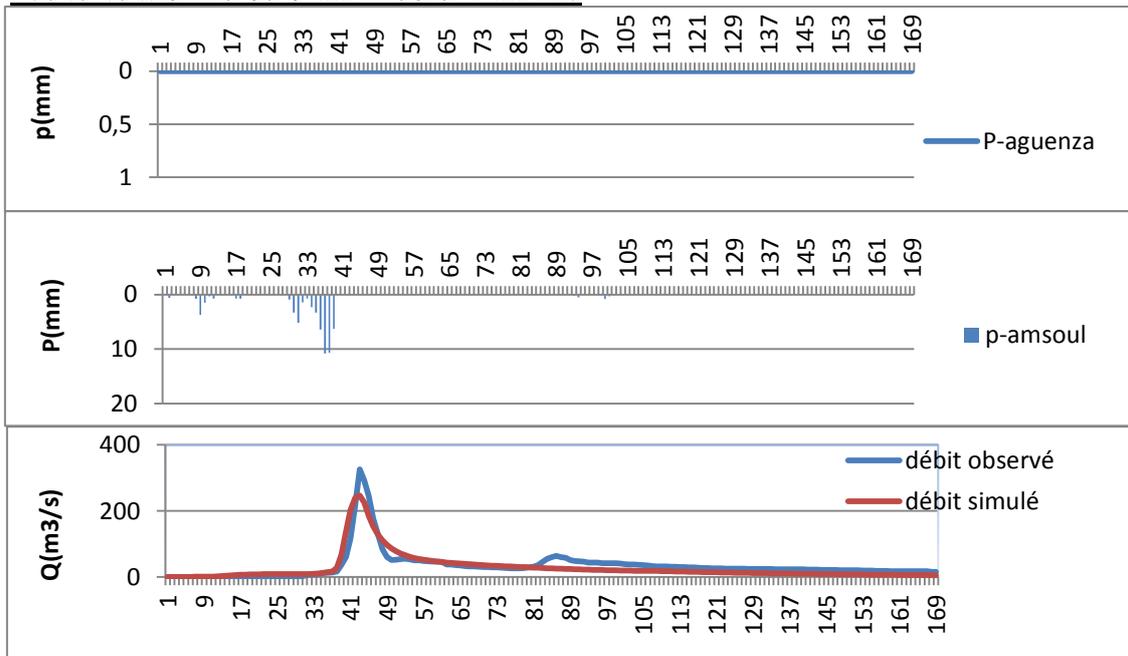


Figure 29 : Hydrogramme de crue du 6ème événement « 01/02/1998 - 07/02/1998 » à la station d'Aguenza.

➤ Événement 7 « 01/02/1998 - 07/02/1998 »:

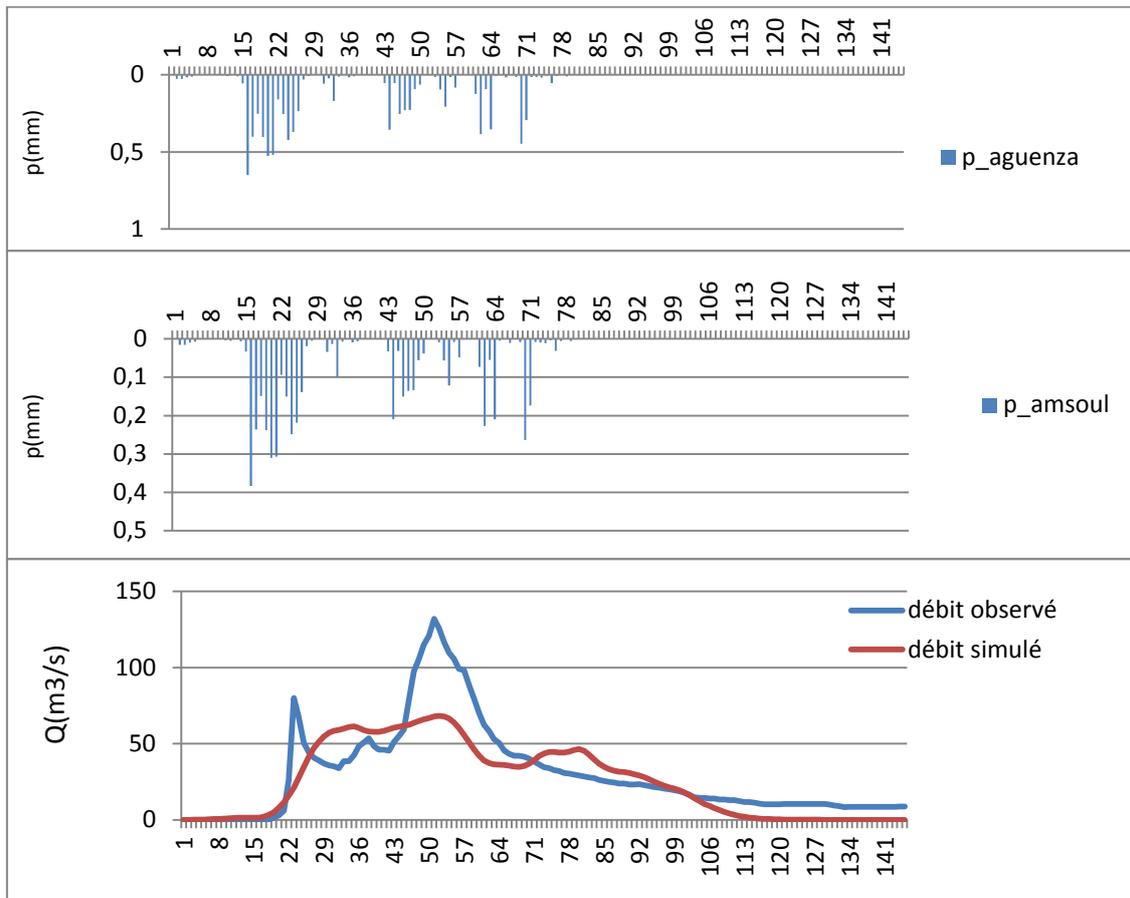


Figure 30 : Hydrogramme de crue du 7ème événement « 01/02/1998 - 07/02/1998 » à la station d'Aguenza.

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 trois paramètres de la fonction de production et par la suite pour la fonction de transfert.

Le modèle ATHYS a été utilisé sur la période 1984 à 2014 pour réaliser un calage essentiellement pour les stations d'Aguenza et Amsoul.

Dans cette étude, les fonctions utilisées sont celles du SCS pour la fonction de production et Lag and route pour la fonction de transfert.

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 pointe.
- La décrue de l'hydrogramme expliqué par le temps de vidange est généralement influencée par le paramètre DS qui permet d'avoir une meilleure allure entre le simulé et l'observé en terme de tarissement.

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 (K_0), et la vitesse de transfert (V_0) et pour la fonction de production (ω) qui représente la fraction de vidange qui participe au ruissellement.

Les paramètres retenus sont indiqués dans le tableau ci-dessous :

Tableau 11 : les paramètres retenus pour le calage des événements.

Episode	Paramètres				
	S	W	Ds	V0	k0
04/11/1984	130	0.1	0.1	3	0.7
15/10/1988	87	0.1	0.5	3	0.7
05/11/1988	87	0.1	1	3	0.7
09/11/1988	35	0.2	1	3	0.7
17/02/1991	70	0.1	0.1	0.5	0.1
01/01/1997	130	0.2	0.5	3	0.9
01/02/1998	100	0.2	20	0.5	0.1
Moyenne	91.3	0.1	3.3	2.3	0.6

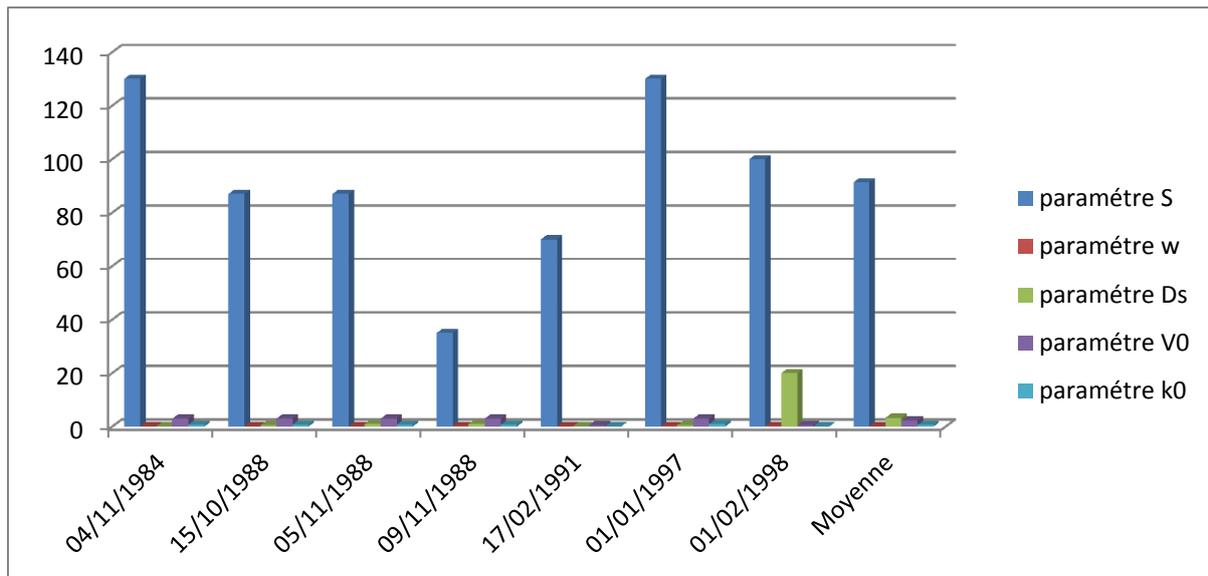


Figure 31 : Variations des paramètres de calage pour chaque événement.

Le graphe montre que la variabilité des paramètres S « **hauteur d'eau stockable en début d'événement** » et Ds « **vidange proportionnelle au niveau du réservoir** » est très importante ce qui signifie leurs influences remarquables sur l'hydrogramme.

Le graphe montre également que le coefficient de diffusion (K_0), et la vitesse de transfert (V_0) et pour la fonction de production (ω) qui représente la fraction de vidange qui participe au ruissellement se varient légèrement ce qui signifie leur faible influence sur l'allure générale de l'hydrogramme.

1.3.2. Evaluation du modèle :

Notre modèle possède cinq paramètres non directement mesurables sur le terrain. Le but de la calibration est alors de trouver les valeurs de ces paramètres pour permettre de simuler au mieux le comportement hydrologique du bassin versant.

L'identification de la valeur des paramètres du modèle hydrologique va donc dépendre de la fonction objectif utilisée qui quantifie l'écart entre la variable observée et la variable simulée par le modèle.

La fonction objectif la plus utilisée en hydrologie est celle du critère de Nash :

$$Nash = 1 - \frac{\sum (Q_{obs} - Q_{calc})^2}{\sum (Q_{obs} - Q_m)^2}$$

Où Q_{obs} , Q_{calc} , Q_m sont respectivement les débits observés et simulés sur un pas de temps et la moyenne des débits observés.

Cette fonction compare la simulation du modèle sur n pas de temps à la moyenne des observations prise comme modèle de référence. Plus le Nash est proche de 1, plus la simulation est proche de l'observation.

Le tableau suivant présente les fourchettes de la fonction Nash et leur signification sur la simulation :

Tableau 12 : Critères d'évaluation des simulations.

Evaluation de la performance	Nash
Très bonne	$0.75 < \text{Nash} < 1.00$
Bonne	$0.65 < \text{Nash} < 0.75$
Satisfaisante	$0.50 < \text{Nash} < 0.65$
Non Satisfaisante	$\text{Nash} < 0.50$

La plateforme Athys présente un avantage très important puisque faire des calculs automatique du critère NASH et trois autres fonctions qui sont les suivants :

- **Ecart arithmétique moyen (EAM) :**

$$EAM = \frac{\sum |X_i - Y_i|}{\sum Y_i}$$

- **Ecart Quadratique Moyen (EQM) :**

$$EQM = \frac{\sqrt{\sum (X_i - Y_i)^2}}{\sum Y_i} \times \sqrt{N}$$

- **Critère CREC :**

$$Crec = \sum \left(1 - \frac{X}{Y_i}\right) \times \sum \left(1 - \frac{Y_i}{\bar{Y}}\right) \times \frac{1}{N}$$

Où les X_i désignent les N valeurs calculées et Y_i les N valeurs observées. \bar{Y} est la valeur moyenne des N valeurs observées.

N.B. Plus Les critères EAM, EQM et Crec sont proche de zéro, plus le modèle simulé est proche de l'observé.

Le tableau ci-dessous représente les critères de performance retenus après le calage de modèle :

Tableau 13 : critères de performance pour chaque événement.

Episode	critères			
	Nash	EAM	EQM	Crec
04/11/1984	0.81	0.7	0.84	8.28
15/10/1988	0.83	0.41	0.56	0.66
05/11/1988	0.44	0.42	0.49	0.22
09/11/1988	0.87	0.28	0.43	1.74
17/02/1991	0.46	0.79	1.36	0.96
01/01/1997	0.8	0.38	0.51	0.21
01/02/1998	0.6	0.4	0.55	0.38
Moyenne	0.69	0.48	0.68	1.78

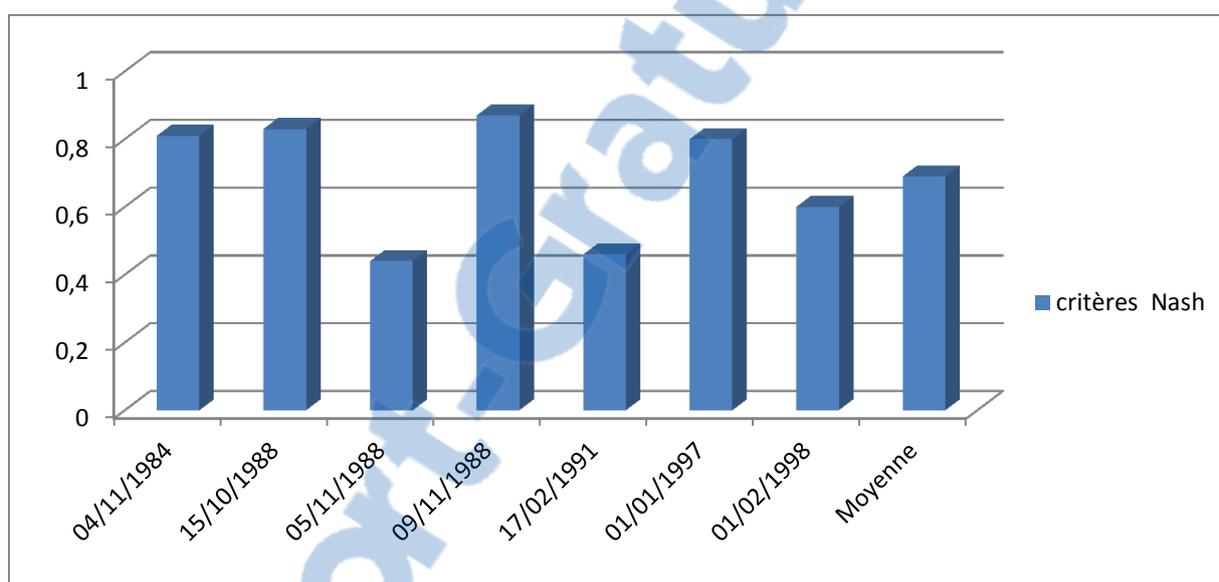


Figure 32 : Variation de critère Nash d'un événement à une autre.

Le graphe montre la variation de critère Nash dans nos événements, Le Nash est compris entre 0.44 et 0.87 comme valeurs maximale. Le tableau suivant détermine la qualité de la simulation de chaque événement selon les valeurs du critère Nash :

Tableau 14 : Qualité de la simulation des événements.

Episode	Nash	Evaluation de la performance
04/11/1984	0.81	Très bonne
15/10/1988	0.83	Très bonne
05/11/1988	0.44	Non Satisfaisante
09/11/1988	0.87	Très bonne
17/02/1991	0.46	Non Satisfaisante
01/01/1997	0.8	Très bonne
01/02/1998	0.6	Satisfaisante

Le tableau ci-dessous représente certaines caractéristiques qui sont extraites à partir de l'hydrogramme après le calage et également après des calculs sur les fichiers de sortie, ces caractéristiques sont les suivantes :

Tableau 15 : les caractéristiques extraites par l'hydrogramme après le calage.

Episode	Caractéristiques							
	Observé				Simulé			
	Qp (m3/s)	volume ruisselé (km3)	Temps de monté (mn)	Temps de base (h)	Qp simulé (m3/s)	volume ruisselé (km3)	Temps de monté (mn)	Temps de base (h)
04/11/1984	200	5.01	480	24	145	8.86	5160	23
15/10/1988	81	5.74	660	40	78	6.33	3180	42
05/11/1988	81	15.68	660	65	95	6.06	1260	63
09/11/1988	350	30.74	1080	55	250	20.10	2640	54
17/02/1991	140	6.69	1380	50	64.2	4.36	1620	48
01/01/1997	326	3.13	1440	45	247	16.39	2220	43
01/02/1998	140	20.19	2220	85	70	13.40	3300	84
Moyenne	188.29	12.45	1131.43	52.00	135.60	10.79	2768.57	51.00

Le tableau détermine certaines caractéristiques retenues par les hydrogrammes observé et calculé et après l'analyse de ces caractéristiques on constate que sont presque égaux se qui montre que le calage de modèle est bien réalisé.

1.3.3. Validation du modèle :

Une fois le modèle calibré, il convient d'évaluer son réalisme sur des données qui n'ont pas servi à la calibration. Il s'agit de la phase d'évaluation ou de validation du modèle. Klemes (1986) propose une procédure de validation des modèles comprenant plusieurs types de tests :

- **Le split sample test (SS)** : Pour ce test, on sépare la période d'observations disponibles en deux parties. La première partie servira à la calibration alors que la seconde servira à la validation puis inversement.
- **Le differential split-sample test (DSS)** : Le principe est le même que le test SS, mais la période d'observation est découpée en deux périodes aux conditions climatiques différentes (e.g. une période sèche et une période humide).
- **Le proxy-basin test (PB)** : On dispose de données sur deux bassins différents. Le modèle est alors calibré sur le bassin A et validé sur le bassin B et inversement.
- **Le proxy-basin differential split-sample test (PB DSS)** : Le test PB est appliqué dans des conditions climatiques différentes.

Ces tests ont pour but d'évaluer les capacités du modèle à simuler de nouveaux événements sur un même bassin versant (SS et DSS) ou le comportement de nouveaux bassins versants

(PB et PB DSS) pour des conditions climatiques stationnaires ou non. Néanmoins, la validation se limite généralement au split-sample test.

Dans notre étude nous avons utilisé le test de **split sampl (SS)**, le tableau suivant montre les événements utilisés pour la validation :

Tableau 16 : Numérotation des événements de validation.

N° d'événement	Episodes	Evénements	Fonction
1	06/12/1999	06/12/1999 10:00 - 11/12/1999 15:00	Validation
2	21/12/2000	21/12/2000 14:00 - 23-12-2000 13:00	Validation
3	28/11/2014	28/11/2014 05:00 - 28/11/2014 22:00	Validation

Les paramètres retenus pour le calage de ces événements sont indiqués dans le tableau ci-dessous :

Tableau 17 : Paramètres retenus pour le calage des événements.

Evénements	Paramètres				
	S	W	Ds	V0	k0
06/12/1999	20	0.1	2.5	1	0.7
21/12/2000	50	0.1	0.5	3	3
28/11/2014	62	0.2	4	4	0.7
Moyenne	44	0.13	2.33	2.67	1.47

Le paramètre qui représente les valeurs les plus importants est celle de capacité totale de réservoir (S), et les autres paramètres ont des valeurs très faibles.

➤ **Événement 1 « 06/12/1999 - 11/12/1999 »:**

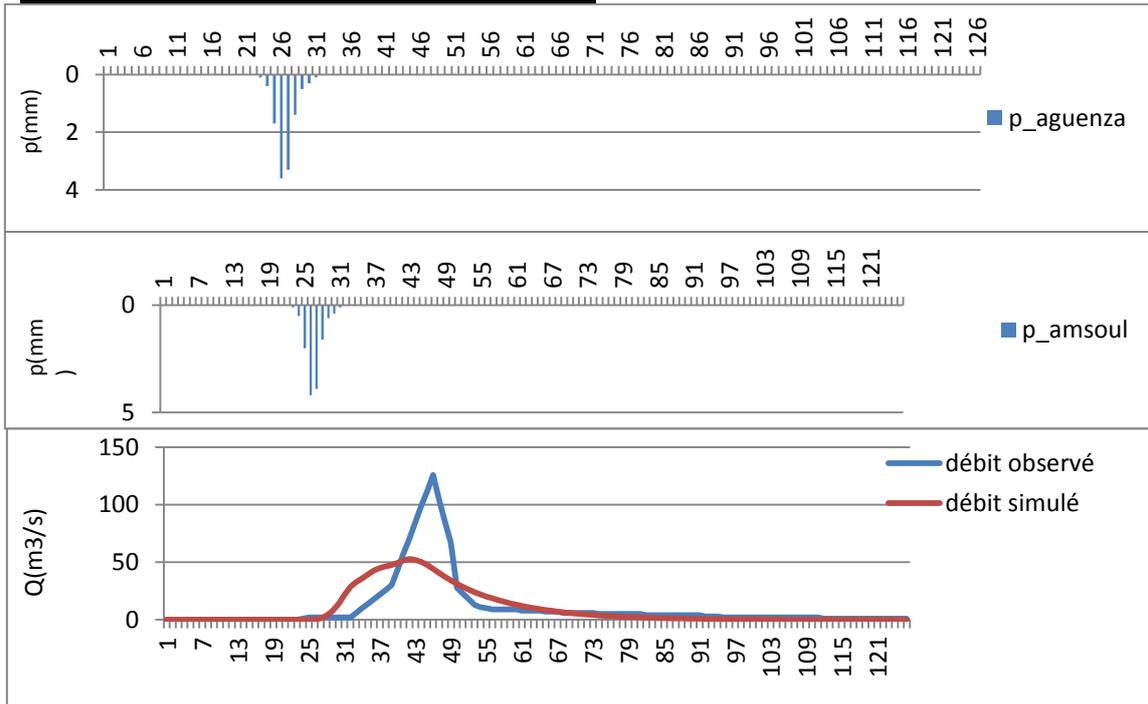


Figure 33 : Hydrogrammes de crue et la variation des précipitations des stations d'Amsoul et d'Aguenza en décembre 1999.

➤ **Événement 2 « 21/12/2000 - 23-12-2000 »:**

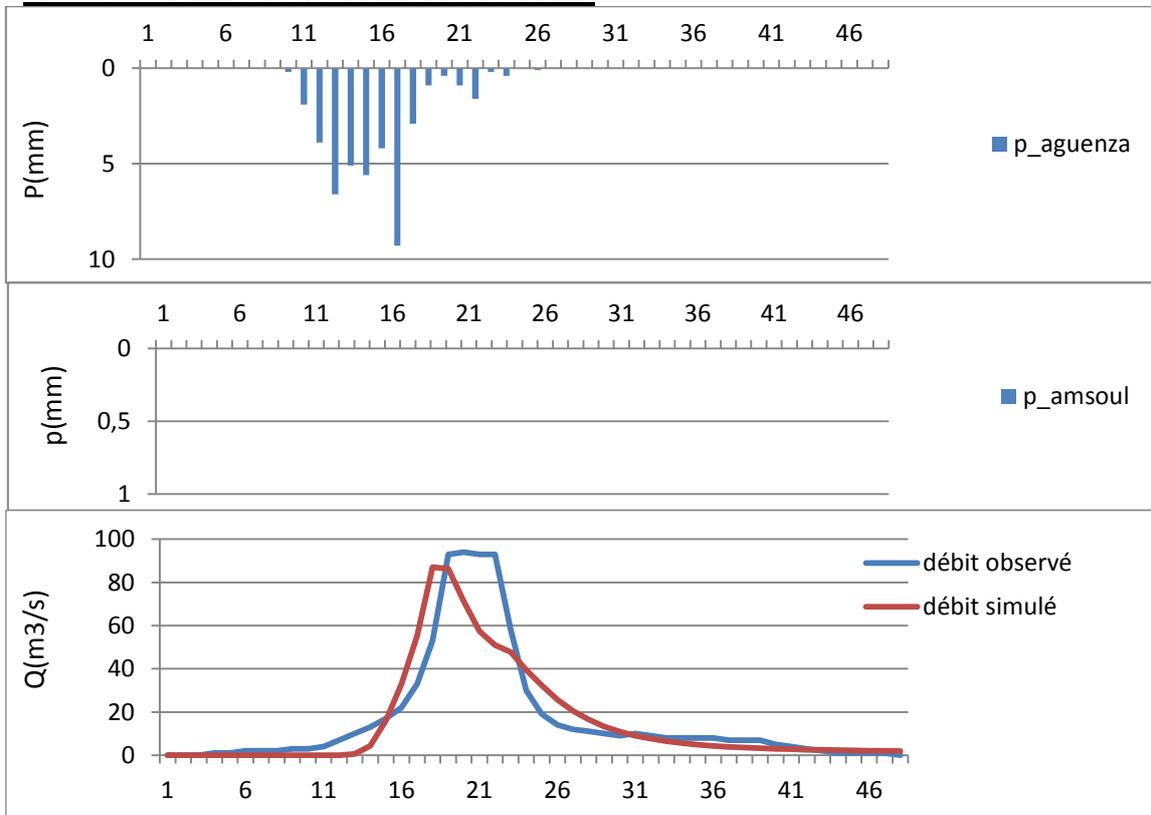


Figure 34 : Hydrogrammes de crue et la variation des précipitations des stations d'Amsoul et d'Aguenza en décembre 2000.

➤ **Événement 3 « 28/11/2014 - 28/11/2014 »:**

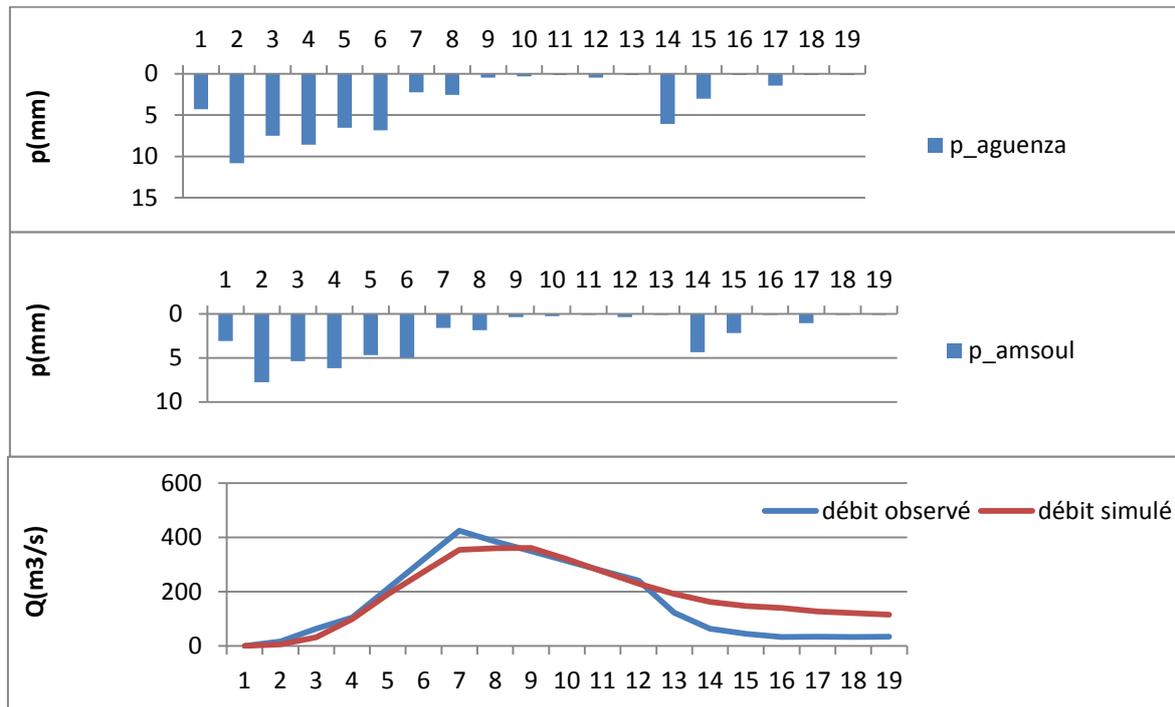


Figure 35 : Hydrogrammes de crue et la variation des précipitations des stations d'Amsoul et d'Aguenza en novembre 2014.

Tableau 18 : critères de performance pour chaque événement.

Episode	critère			
	Nash	EAM	EQM	Crec
06/12/1999	0.58	0.61	1.24	0.96
21/12/2000	0.8	0.39	0.66	0.53
28/11/2014	0.8	0.29	0.37	0.7
Moyenne	0.73	0.43	0.76	0.73

Selon le tableau les événements qui ont les critères EAM, EQM et Crec plus proche de zéro sont ceux qui représentent le Nash le plus proche de 1.

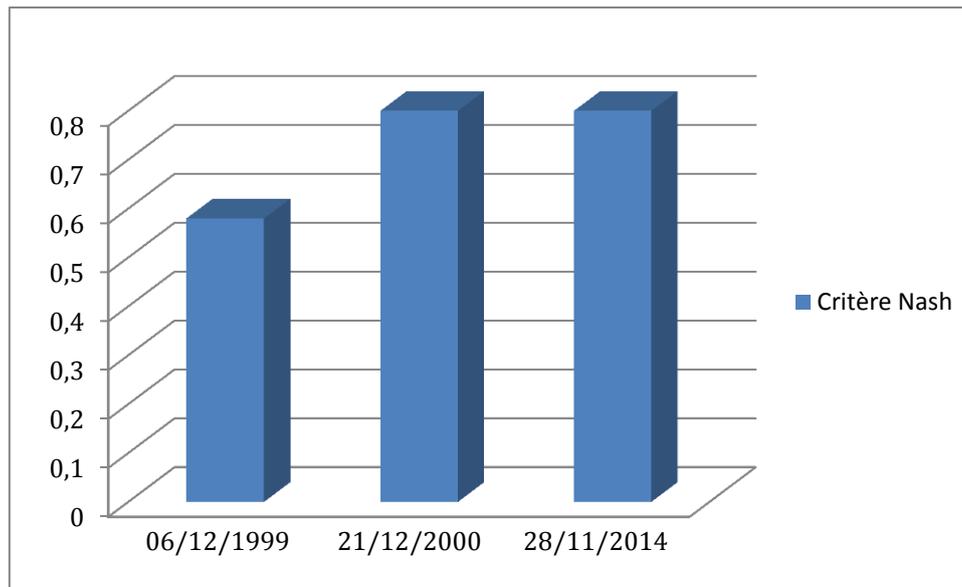


Figure 36 : Variation de critère Nash pour les trois événements.

Le graphe montre la variation de critère Nash d'un événement à un autre, la valeur minimale est de 0.58 dans le premier événement et les deux autres événements présentent des valeurs maximales de Nash « 0.8 ».

Le tableau suivant détermine la qualité de modélisation selon les valeurs de critère Nash dans nos événements :

Tableau 19 : Qualité de la simulation des événements.

Événement	Nash	Évaluation de la performance
06/12/1999	0.58	Satisfaisante
21/12/2000	0.8	Très bonne
28/11/2014	0.8	Très bonne

Le tableau ci-dessous représente une comparaison entre certaines caractéristiques extraites par les hydrogrammes observés et modélisés après le calage de nos événements :

Tableau 20 : les caractéristiques extraites par l'hydrogramme après le calage.

Événements	Caractéristiques							
	Observé				Simulé			
	Qp (m3/s)	volume ruisselé (km3)	Temps de monté (mn)	Temps de base (h)	Qp simulé (m3/s)	volume ruisselé (km3)	Temps de monté (mn)	Temps de base (h)
06/12/1999	126	8.99	960	22	52.8	4.49	1140	26
21/12/2000	94	2.88	840	18	87	2.66	480	19
28/11/2014	425	11.07	480	15	362	12.65	480	16

1.4. Modélisation en mode continu :

1.4.1. Calibration et calage de modèle :

Le logiciel est utilisé pour simuler les débits de 2008 à 2010 avec un calage par calcul du débit à la station d'Aguenza. La sortie du modèle est un débit journalier entre 2008 et 2010, le tableau suivant montre la période de simulation :

Tableau 21 : période de simulation en mode continu.

N° de période	période de simulation	Fonction
1	01/01/2008 - 31/12/2010	Calage

Pour les modélisations réalisées sur le bassin versant d'Aguenza le **mode continu** semble le plus approprié puisqu'il prend en compte, pour chaque évènement, les pluies précédentes (des 10 jours précédents) dans la détermination des paramètres.

➤ Période de simulation « 01/01/2008 - 31/12/2010 »:

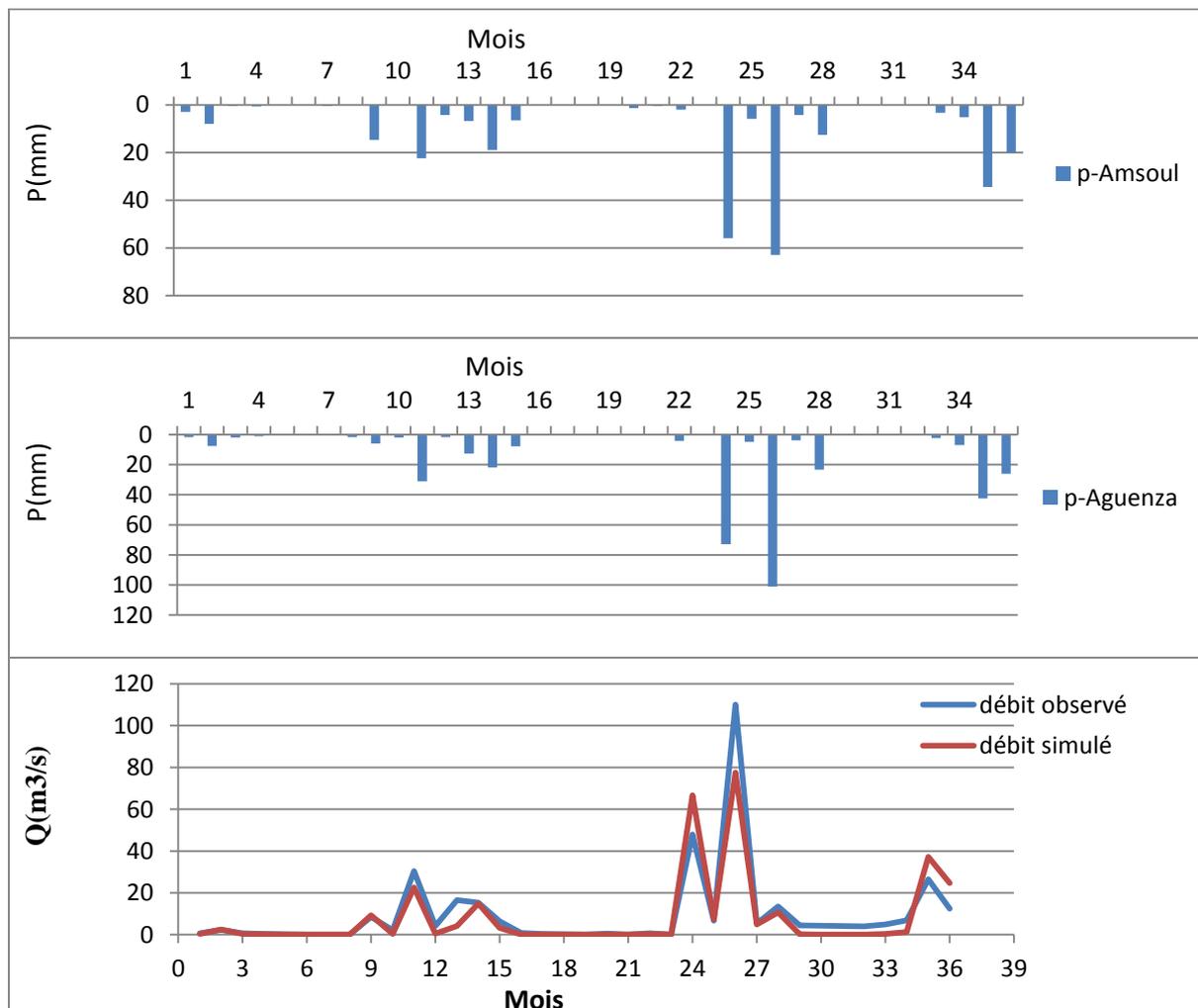


Figure 37 : Hydrogrammes simulé et la variation des précipitations des stations d'Amsoul et d'Aguenza le long des trois ans.

Les hydrogrammes calculés par le modèle sont au pas de temps journalier. Ce pas de temps est particulièrement intéressant pour les problématiques de préservation du milieu aquatique : une non-satisfaction des besoins durant une seule journée suffit pour affecter la vie biologique.

Le **pas de temps de la modélisation est journalier** afin de mieux appréhender le comportement hydrologique du bassin versant notamment les évolutions rapides des débits suite à des orages estivaux. L'utilisation du pas de temps journalier permet également de comparer les débits modélisés avec les jaugeages ponctuels sur les cours d'eau.

En comparant les débits moyens mensuels (fig.37), les valeurs observés et simulés sont proches essentiellement pour les mois où les débits sont faibles.

Le modèle calé présente les avantages/inconvénients suivants :

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

Les paramètres optimaux obtenus pour le calage de notre période sont représenté dans le tableau ci-dessous :

Tableau 22 : paramètres optimaux pou le calage du modèle.

Période	Paramètres				
	S	W	Ds	V0	k0
01/01/2008 - 31/12/2010	30	0.1	0.1	3	0.7

Dans le tableau nous avons les valeurs numériques attribuées aux paramètres du modèle pour reproduire au mieux la réponse observée.

1.4.2. Evaluation de qualité du modèle:

Dans notre étude, nous évaluons notre simulation par les critères EAM, EQM, Crec et de Nash, le tableau suivant montre les résultats obtenus après le calage de notre période de simulation :

Tableau 23 : critères d'évaluation de la période de simulation.

Période	critère			
	Nash	EAM	EQM	Crec
01/01/2008 - 31/12/2010	0.68	0.6	2.84	1.22

Le tableau montre que le critère d'évaluation le plus important Nash est compris entre 0.65 et 0.75, cette valeur signifie que le calage est bonne selon le tableau suivant

Tableau 24 : Evaluation de la qualité de calage.

Evaluation de la performance	Intervalle de Nash	Nash de modèle
Très bonne	$0.75 < \text{Nash} < 1.00$	–
Bonne	$0.65 < \text{Nash} < 0.75$	0.68
Satisfaisante	$0.50 < \text{Nash} < 0.65$	–
Non Satisfaisante	$\text{Nash} < 0.50$	–

1.4.3. Validation du modèle:

La validation du modèle ou la vérification des paramètres est une suite et un complément indispensable à l'étape de calage. Elle consiste à tester si le modèle est capable de simuler le comportement du système en utilisant une série de données d'entrées autre que celle avec laquelle il a été identifié.

Le modèle ATHYS a été utilisé pour réaliser une validation du modèle pour la station d'Aguenza sur la période 2010 à 2011 :

Tableau 25 : période utilisé pour la fonction de validation.

N° de période	période de simulation	Fonction
1	01/01/2011 - 31/12/2011	Validation

➤ Période de simulation « 01/01/2011 - 31/12/2011 » :

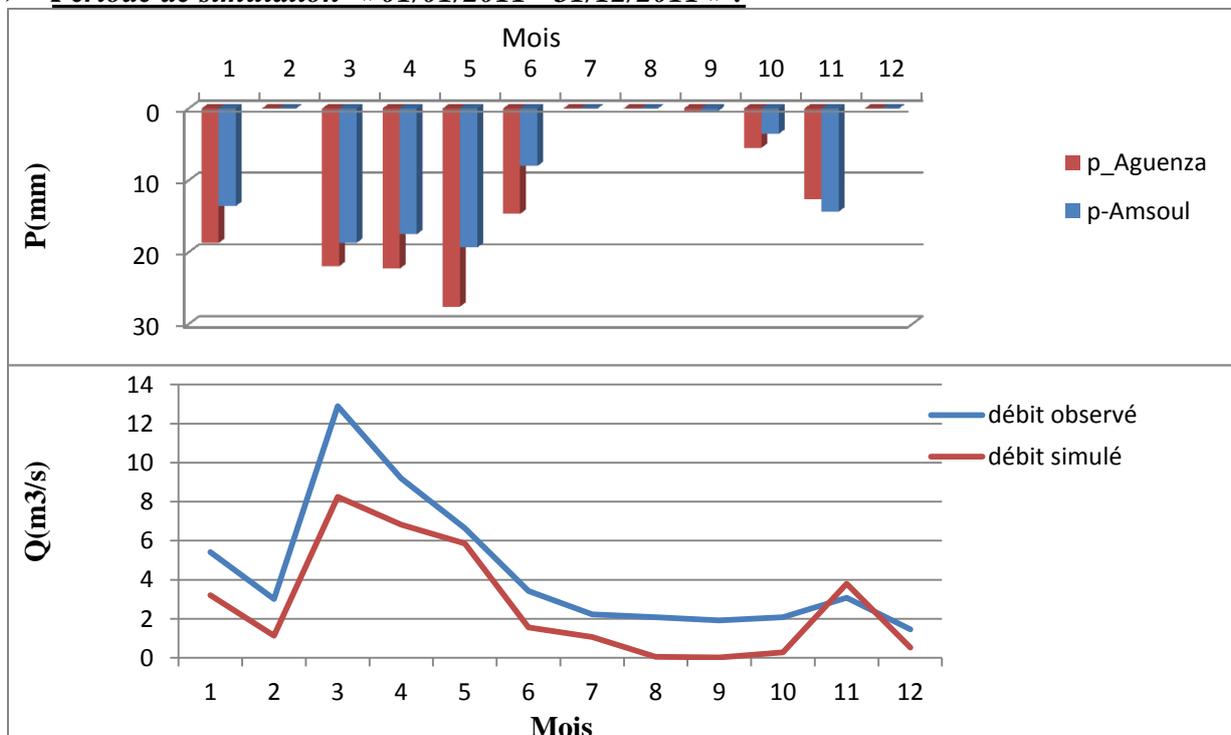


Figure 38 : Hydrogrammes de cure simulé et la variation des précipitations des stations d'Amsoul et d'Aguenza en 2011.

En comparant les débits moyens mensuels simulé a celle observé (Fig.38) on constate que sont proche essentiellement sur la période estivale.

La description du modèle calé montre les critères suivants :

- La période d'étiage est mal reproduit par le modèle ;
- Les débits de pointe sont sous estimés ;
- Le module annuel simulé est très proche de l'observé.

Nous avons utilisés un calage manuel pour sélectionner le jeu des paramètres de modèle de façon à ce que celui-ci simule le comportement hydrologique du bassin versant de la meilleure façon possible, le tableau suivant montre les paramètre sélectionnés :

Tableau 26 : paramètres sélectionnés pour le calage.

période	Paramètres				
	S	W	Ds	V0	k0
01/01/2011 - 31/12/2011	80	0.1	0.1	3	0.7

Le tableau montre les paramètres optimaux qui donnent un faible écart entre l'allure générale de l'hydrogramme observé et celle modélisé.

Après le calage de modèle il faut nécessairement l'évaluer pour déterminé leur qualité, l'évaluation de la qualité d'une simulation peut être parfois utilisé comme fonction objectif lors du calage du modèle, ou comme mesure d'évaluation de ses performances en validation. Il n'existe pas de critère d'évaluation universel, le tableau suivant donne les critères retenus après le calage de modèle :

Tableau 27 : critère retenus après le calage de modèle.

Période	critère			
	Nash	EAM	EQM	Crec
01/01/2011 - 31/12/2011	0.56	0.65	1.82	0.59

Selon le tableau les critères EAM, EQM, Crec sont proche de zéro, et la valeur de Nash est compris entre 0.65 et 0.75 se qui signifie que la qualité de performance est **satisfaisante** suivant la classification (Moriasi et al. 2007).

2. Modélisation hydrologique « GR4J » :

2.1. Généralité sur les modèles GR :

Les modèles de simulation du Génie Rural fonctionnent aux pas de temps annuel, mensuel et journalier.

L'idée de la modélisation 'GR' a été lancée par C. 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 un résumé des travaux de modélisation, dont un schéma récapitulatif apparaît sur la Figure suivante :

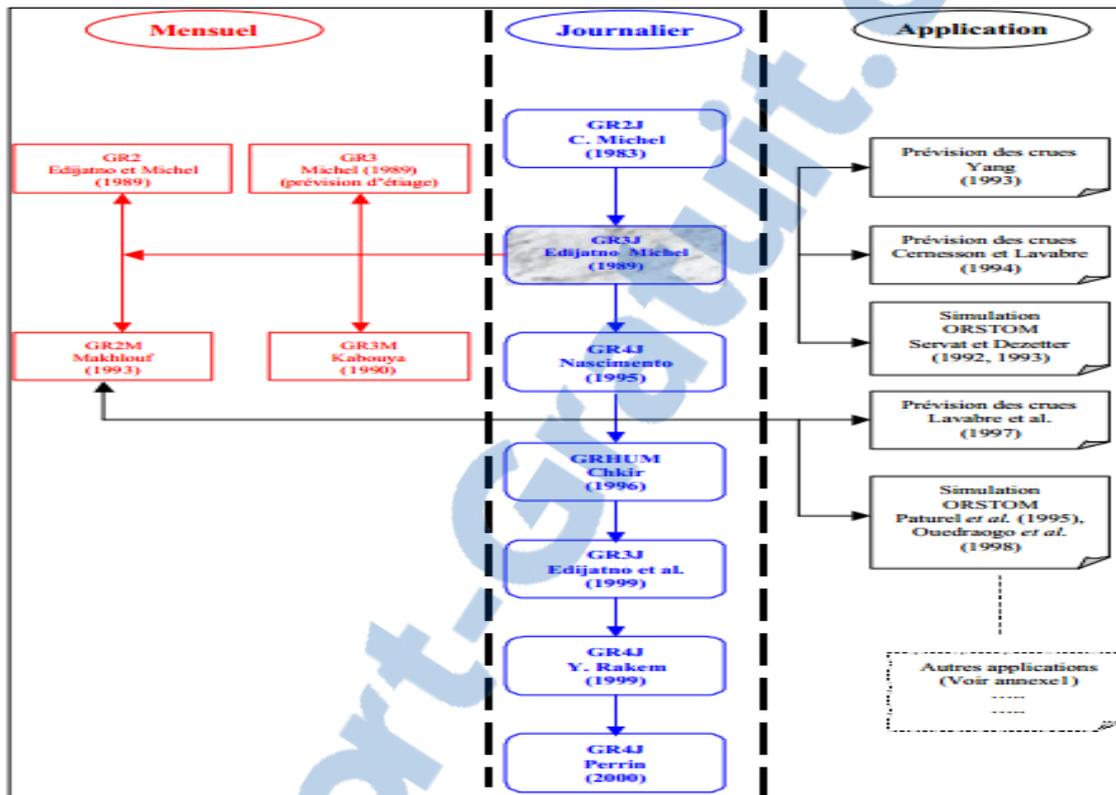


Figure 39 : Evolution des travaux des modèles 'GR'

2.1.1. Objectifs de développement:

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

2.1.2. Mode de développement:

Bien que ces modèles soient parfois apparentés à des modèles conceptuels du fait de leur structure à réservoirs, ce sont en fait des modèles empiriques: leur construction s'est faite sur

la base de grands jeux de données et en découvrant progressivement la structure permettant de reproduire au mieux le comportement hydrologique du bassin versant (c'est-à-dire sa réponse aux pluies).

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

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

2.1.3. Principales caractéristiques:

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

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

Dans la suite, on désignera par P (mm) la hauteur journalière de pluie, par E (mm) l'évapotranspiration potentielle journalière (ETP) et par Q (mm) le débit simulé (mm). P est une estimation de la pluie de bassin, calculée à partir de l'information pluviométrique disponible (postes au sol notamment). E n'est pas nécessairement une donnée datée mais peut être issue d'une courbe de régime d'ETP moyenne interannuelle. Toutes les variables internes des modèles sont exprimées en mm.

2.2. Description du modèle pluie-débit journalière GR4J:

2.2.1. Généralité :

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

Architecture du modèle :

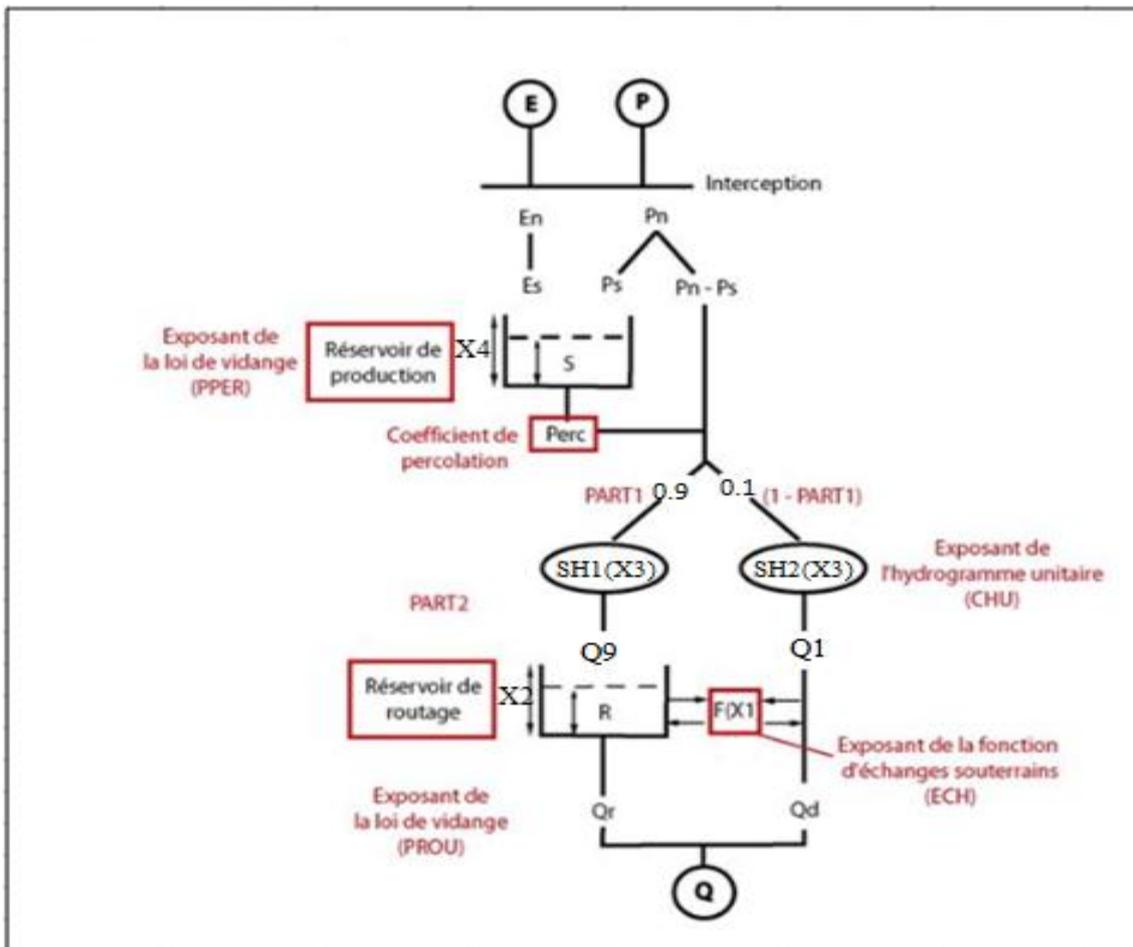


Figure 40 : Schéma de la structure du modèle GR4J (Perrin et al, 2003).

- 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).

2.2.2. 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.

➤ Interactions pluie-évapotranspiration :

La pluie brute P du jour j est soumise à l'évapotranspiration 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 $E_n = E - P$

➤ 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'évapotranspiration.

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

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

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

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

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

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

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

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

$$\frac{S}{X_4} \left[2 - \left(\frac{S}{X_4} \right) \right] dEn$$

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

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

Après intégration :

$$Es = \frac{En \frac{S}{X_4} \left(2 - \frac{S}{X_4} \right)}{1 + \frac{En}{X_4} \left(2 - \frac{S}{X_4} \right)}$$

Si les précipitations et évapotranspiration 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 $S = S + P_s - E_s$:

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

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

➤ **Les hydrogrammes unitaires :**

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

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

- $0 \leq j \leq X_3$:

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

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

====> **Q9 est le débit sortant de SH1**

La **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 X3 et i la partie entière de 2X3, si :

- $0 = j = k$:

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

- $k < j = i$:

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

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

====> **Q1 est le débit issu de SH2**

➤ **Le réservoir d'eau gravitaire :**

Ce réservoir reçoit le débit Q9 et est caractérisé par le paramètre X2, 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 X1. Si X1 est positif F est un apport sinon F est une sortie (Safouane Mouelhi 2003). Le flux F est égal à :

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

Cet échange concerne non seulement R mais aussi Q1 qui deviennent :

$$Qd = \max(0, Q1 + F) \text{ et } R = \max(e, R + Q9 + F)$$

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

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

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 $Q_{ex} = Q_r + Qd$.

2.2.3. Calage du modèle et discussion des résultats :

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

Dans notre étude nous avons utilisé un calage manuel pour trouver les paramètres optimaux qui donnent moins d'écart entre le modèle simulé et celle observé.

Les périodes modélisés sont présenté dans le tableau suivant :

Tableau 28 : périodes de simulation.

N° de période	période de simulation	Fonction
1	01/01/2006 - 31/12/2007	calage
2	01/01/2008 - 31/12/2009	calage

➤ Période de simulation 1 « 01/01/2006 - 31/12/2007 »:

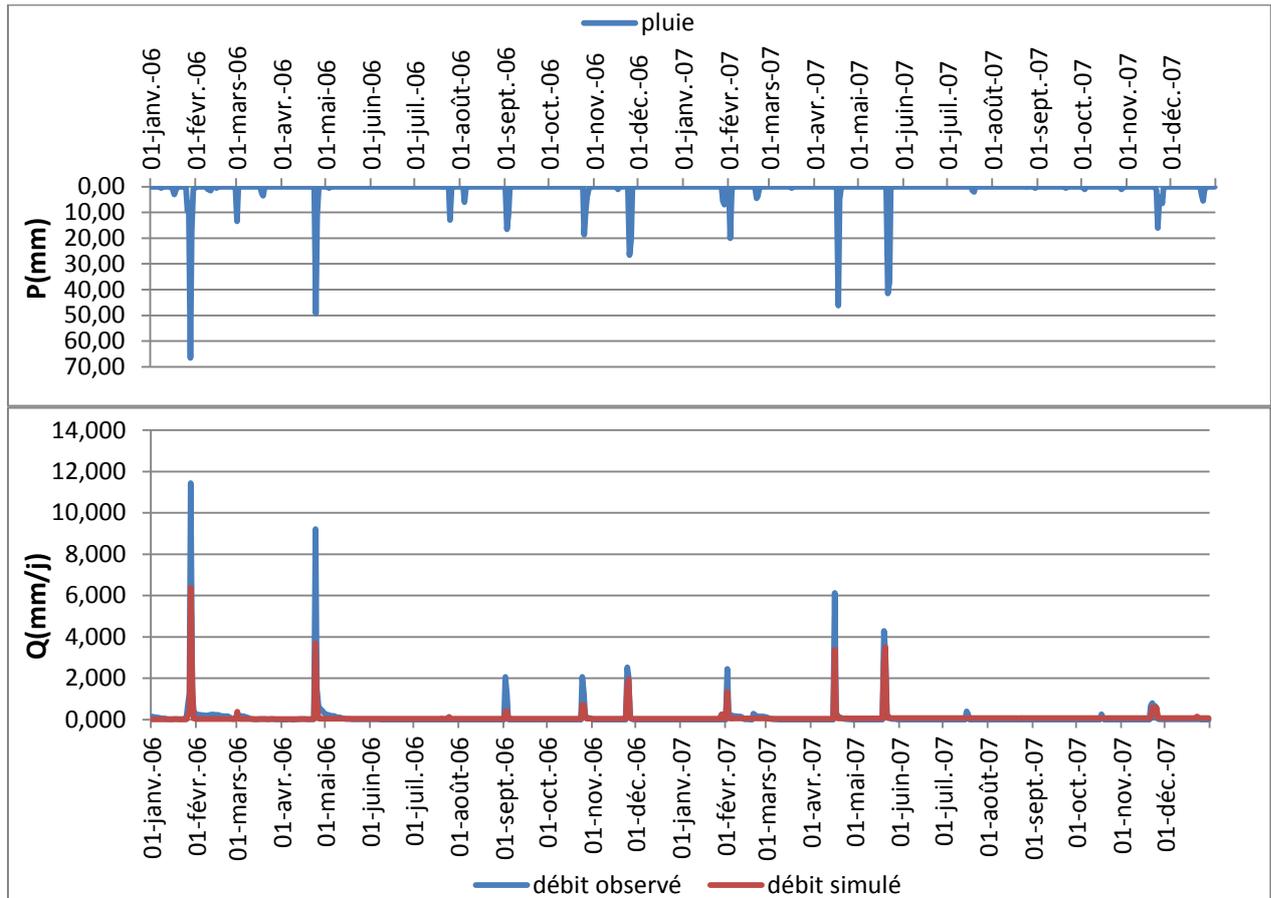


Figure 41 : Visualisation de la qualité du calage de deux ans « 2006-2007 ».

D'après ces résultats, on peut dire que l'hydrogramme observé est très proche de celui modélisé, également on peut remarquer que les débits de pointes sont sous estimés par le modèle et les périodes des étiages sont bien reproduites.

Selon le coefficient de corrélation de la fonction débit observée et débit simulée une représentation de la répartition des points selon la droite $y = x$ est importante pour déceler l'alignement des points de ces débits :

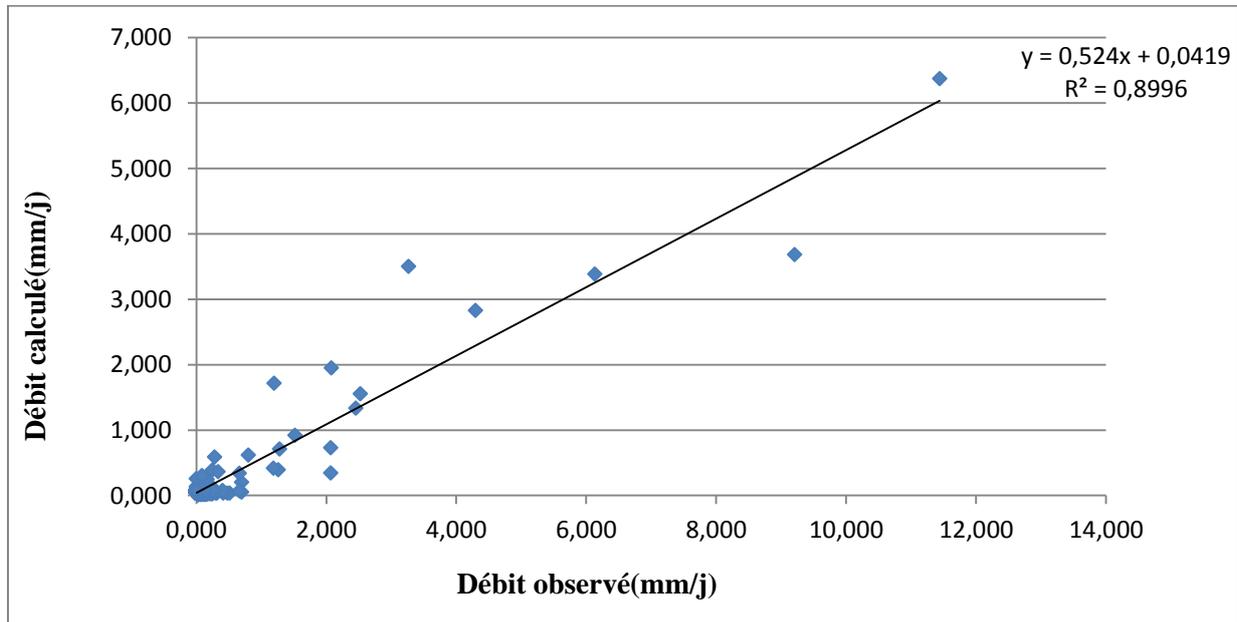


Figure 42 : Corrélation entre les débits observés et les débits simulés.

L'analyse, graphique (Fig. 42), montre que les nuages de points sont alignés harmonieusement autour de la droite d'équation $y=x$ à l'exception de quelques points.

La variabilité journalière de l'écoulement est remarquable dans la période de simulation. Cette variabilité des débits journaliers se traduit dans le modèle par le niveau de réservoir de production qui varie entre 0 mm et 1 mm et la capacité du réservoir de routage qui varie entre 0.10 mm et 0.132 mm.

➤ **Période de simulation 1 « 01/01/2008 - 31/12/2009 »:**

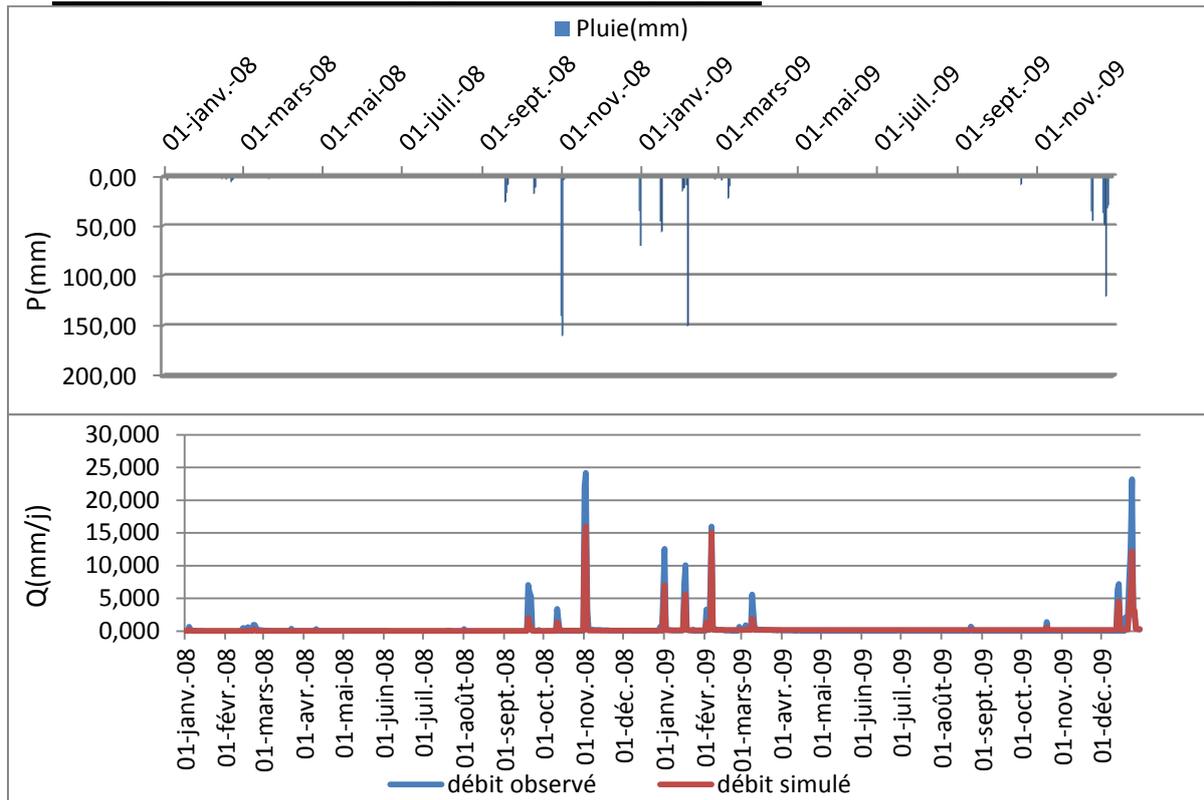


Figure 43 : Visualisation de la qualité du calage de deux ans « 2008-2009 ».

D'après l'analyse de graphe (fig.43) on constate la coïncidence des deux courbes, celle des débits simulés et calculés, en effet nous pouvons dire que le modèle est assez bien calé.

Nous avons jugé utile de représenter la répartition des points selon la droite $y = x$ pour mieux apprécier la qualité des résultats de la validation.

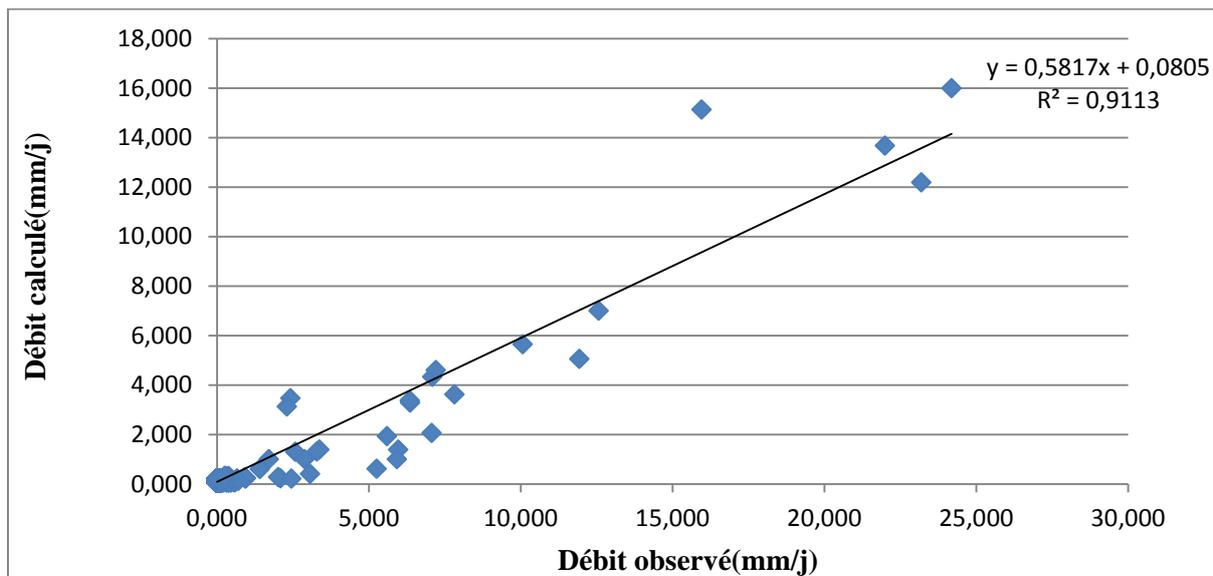


Figure 44 : Corrélation entre les débits observés et les débits simulés.

La corrélation linéaire entre le débit observé et celle calculé donne une relation significative avec un coefficient de corrélation supérieure à 0.9, ceci peut s'expliquer par le fait que les débits observé et celle simulé sont très proche.

La variabilité journalière de l'écoulement est plus importante, cette irrégularité des débits journalière se traduit dans le modèle par le niveau de réservoir de production qui varie entre 0.10 mm et 0.141 mm et la capacité du réservoir de routage qui varie entre 0 mm et 0.990 mm.

Nous avons procédé aux changements des valeurs des paramètres X1, X2, X3 et X4 du modèle. Les paramètres optimaux résultant du calage et le Nash sont présentés dans le Tableau suivant :

Tableau 29 : Résultats retenus pour le calage de modèle.

période de simulation	Critère						
	X1	X2	X3	X4	Nash %	Bilan %	R ²
01/01/2006-31/12/2007	2.3	0.1	9	-2.6	81.4	147.9	0.90
01/01/2008-01/01/2009	1	0.5	10	-4.12	77.1	99.1	0.91
Moyenne	1.7	0.3	9.5	-3.4	79.3	123.5	0.9

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 sorti pour des valeurs de Nash compris entre 77.1% et 81.4% (Tab.29). Le bilan est assez équilibré, il est de 97.3%.

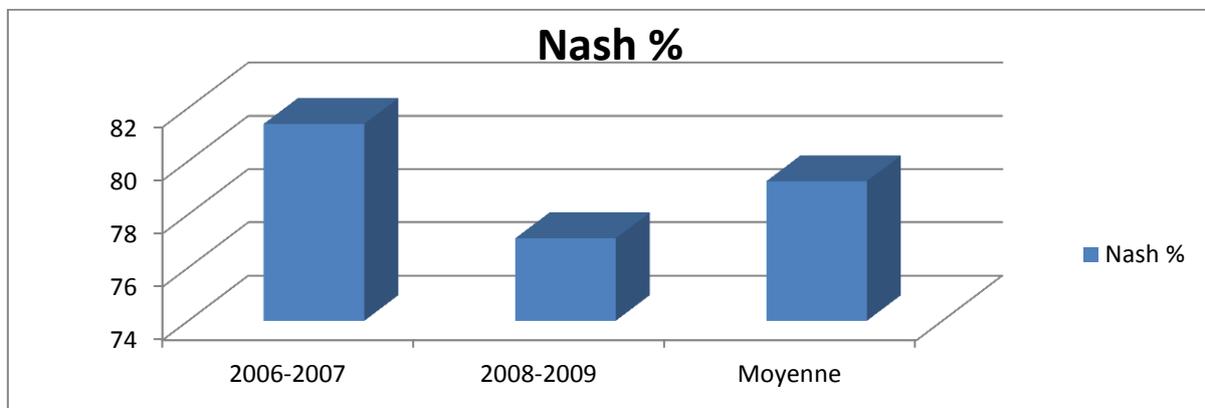


Figure 45 : Variation de critère Nash des périodes de simulation.

2.2.4. Validation du modèle :

Pour la validation nous avons utilisé de nouvelles données des précipitations et d'évapotranspirations correspondant à la période (01/01/2010 – 01/01/2011) et qui n'ont pas été utilisées lors du calage.

Le Tableau suivant montre la période utilisé pour la validation :

Tableau 30 : périodes de validation.

N° de période	période de simulation	Fonction
1	01/01/2010 - 31/12/2011	Validation

➤ Période de validation « 01/01/2010-31/12/2011 » :

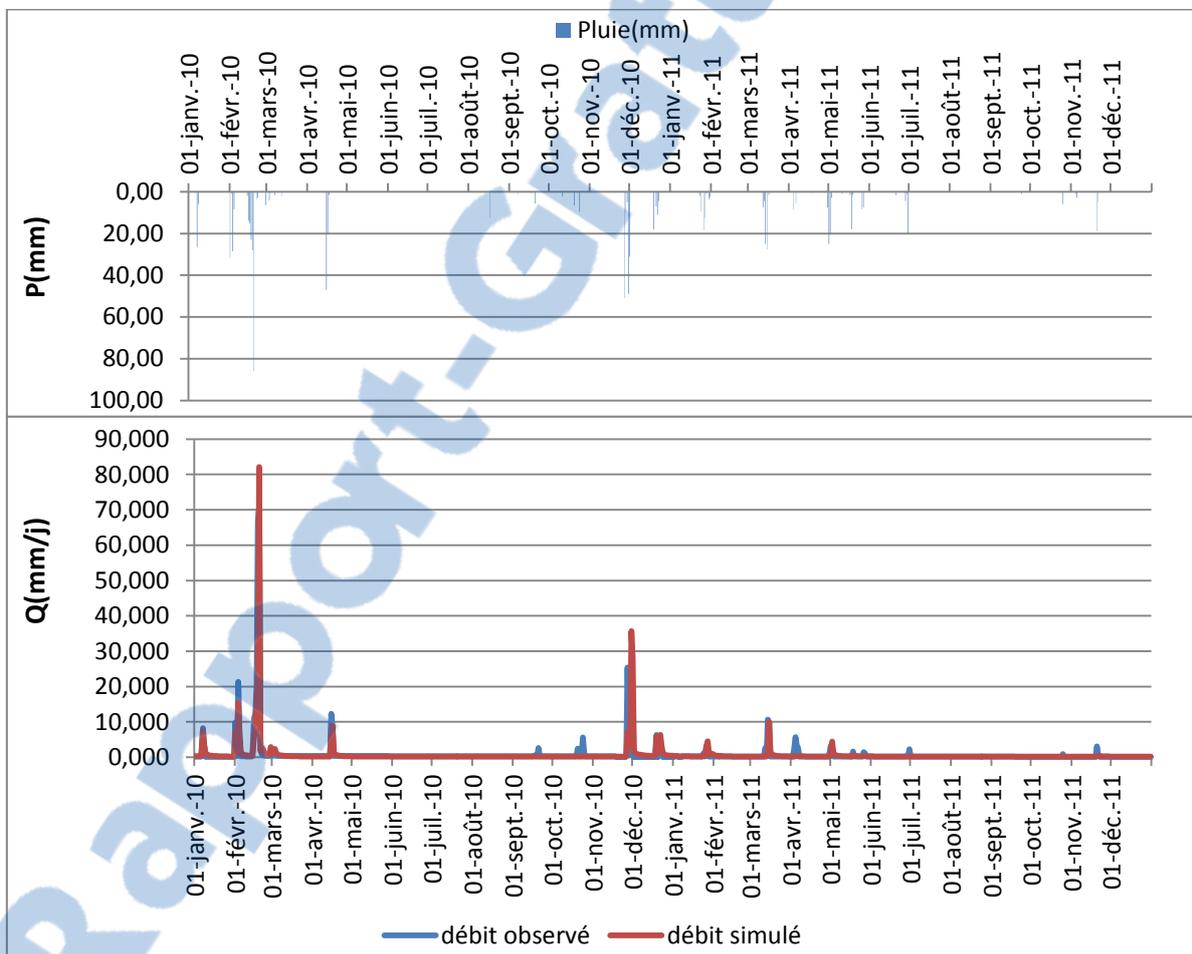


Figure 46 : Visualisation de la qualité du calage de la période de validation « 2010-2011 ».

D'après l'analyse de graphe nous pouvons dire que le débit observé est proche de débit modélisé, mais une représentation de la répartition des points selon la droite $y = x$ est importante pour vérifier si le calage est bien fait.

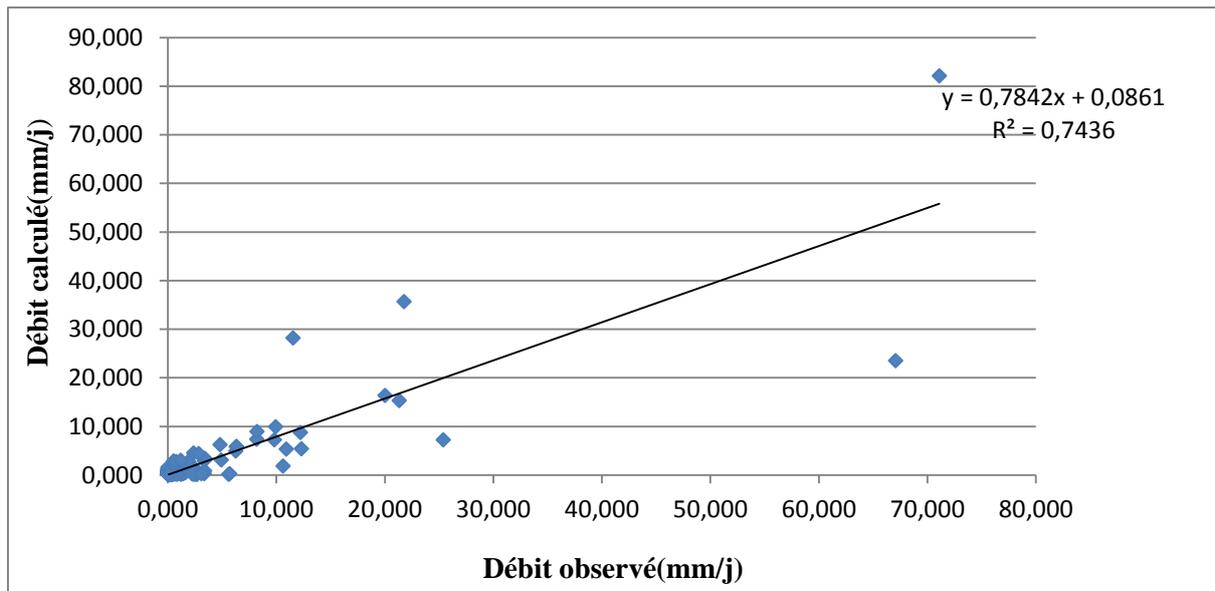


Figure 47 : Validation du modèle par corrélation entre les débits observés et les débits simulés.

Selon le coefficient de corrélation de la fonction débit observée et débit simulée (fig.47), la modélisation pluie-débit réalisée par l'utilisation du GR4J donne des bons résultats.

La variabilité journalière des débits est très importante. Cette variabilité d'écoulement se traduit dans le modèle par le niveau de réservoir de production qui varie entre 0 mm et 1 mm et la capacité du réservoir de routage qui varie entre 0.625 mm et 1 mm.

Pour améliorer le calage nous avons procédé au calage manuel qui consiste à définir les paramètres optimaux du modèle afin que les débits observés soient plus proches de ceux modélisés, le tableau suivant représente les paramètres du modèle et certains critères de performance :

Tableau 31 : Résultats retenus pour le calage de modèle.

période de simulation	Critère						
	X1	X2	X3	X4	Nash %	Bilan %	R ²
01/01/2010-31/12/2011	4.2	0.4	1.1	-2.59	44.5	147.9	89

3. Conclusion :

Le principal objectif de ce projet était de tester l'application d'un modèle hydrologique (ATHYS) utilisé pour simuler et prévoir les crues de bassin versant d'Aguenza .

Dans le cas où ce modèle est calibré et validé, l'objectif suivant était de discuter de la phase d'initialisation du paramètre S (capacité maximale du réservoir d'eau dans le sol qui devrait traduire un déficit hydrique initial de l'hydrosystème avant la crue), soit à partir d'un modèle GR(continu).

La modélisation pluie-débit à l'aide du logiciel GR donne des résultats plus performants et représentatifs que celle donnée par Athys en mode continu.

Les résultats de la validation entre débits observés et débits simulés sont très bons à moyen, ils varient en fonction du pas de temps utilisé.

Les périodes de mises en routes et périodes de tests du modèle journalier sont plus longues et de ce fait, on a une réponse plus précise des débits simulés.

CONCLUSION GENERALE

Ce travail a porté sur la définition et la modélisation pluie-débit par l'utilisation de deux plateformes déférents, l'une global « GR4J » et l'autre discrétisé « Athys ».

Nous nous sommes efforcés tout d'abord de caractériser les principaux facteurs physico-géographiques agissant sur l'écoulement.

L'étude morphométrique : Nous a permis de caractériser la forme, les altitudes moyennes et les altitudes les plus fréquentes de notre bassin. La superficie et le périmètre stylisé, a permis de quantifier des paramètres tels que : le coefficient de compacité, la densité de drainage.

Le bassin d'Aguenza à une forme allongée favorisant une érosion linéaire et régressive avec un chevelu assez dense.

L'étude géologique et structurale : Permet La description lithologique qui montre que la série est un complexe détritique (conglomérat, grès rouge, argile ...).

L'étude climatologique : Il ressort de cette étude que le bassin est caractérisé par une saison pluvieuse et un été chaud et sec avec une moyenne de 271.34 mm/an (1984-2011). Deux saisons sont à distinguer :

- Saison humide : Qui va s'étendre d'Octobre à mars, avec des pluies irrégulières ;
- Saison sèche : De Juin à Septembre, où la pluviométrie est relativement faible.

Le régime thermique est caractérisé par des amplitudes annuelles assez fortes qui permettent d'accentuer le phénomène de l'évapotranspiration. L'évaporation mensuelle est mesurée sur bacs enterrés du type Colorado. L'évaporation annuelle est de 2279 mm. L'évaporation est maximale en Juillet (360mm) et minimale en Décembre et Janvier (46mm).

L'étude hydrologique : Qui montre que le réseau hydrographique est relativement dense avec une longueur totale de **163.6** km.

La modélisation : Nous avons tenté une modélisation pluie-débit par deux plateformes « Athys » et « GR4J » :

Plateforme Athys : Est un modèle distribué permet la modélisation en mode événementiel et continu, pour le premier type nous avons utiles un pas de temps horaire dans le but de prévoir les crues par l'utilisation des données historique des crues de la région d'Aguenza, pour la deuxième type de modélisation le pas de temps utilisé est journalière pour prévoir également les cures et l'étude des apports.

Les résultats obtenus par l'application du modèle Athys s'avèrent intéressantes et donnent des résultats appréciables à savoir :

- les valeurs du critère de Nash obtenues pour les deux fonctions calibration et validation sont très bonnes à moyen, ils varient en fonction du pas de temps utilisé.

Plateforme GR4J : Est un modèle est de type global, dont les paramètres d'entrées sont les précipitations et l'ETP et le paramètre de sortie est constitué par les lames d'eau écoulées.

Les résultats obtenus par l'application du modèle GR s'avèrent intéressantes et donnent des résultats appréciables à savoir :

- la valeur du critère de Nash pour la calibration est acceptable, elle est de 79.3% comme valeur moyenne des périodes de simulation, le bilan est équilibré, avec une valeur moyenne de 123.5%. De même, le coefficient de corrélation entre les lames écoulées mesurées et calculées, est moyen d'une valeur de 0.9
- La validation a donné un moyen résultat pour le pas de temps journalier confirmant un calage du modèle satisfaisante. L'excellente performance du modèle quant à l'utilisation du modèle GR pour un bassin à climat semi-aride méditerranéen. Pour le modèle journalier, les résultats du calage sont bons, par contre ce n'est pas le cas pour la validation. Ceci peut être due probablement à des faibles précipitations dans la région d'Aguenza à partir de 2010 et qui a considérablement affecté les écoulements de surface et l'apport des sources.

Références bibliographiques

ANDRERSSIAN et al. 2006. modèles hydrologiques du Génie Rural (GR)-Cemagref, UR Hydrosystèmes et Bioprocédés, 16 p.

BERTHIER Ch. 2004. Quantification des incertitudes des débits calculés par un modèle pluie-débit empirique. Mémoire de Master 2ème année, Paris ; 54 p.

BOULAY E. 2011. Etudes et modélisation des phénomènes karstique du bassin versant Gognon. Master, Paris ; 49 p.

COUSTAU M. 2011. Contribution à la prévision des crues sur le bassin du Lez : modélisation de la relation pluie-débit en zone karstique et impact de l'assimilation de débits. Thèse pour obtenir le grade de docteur, Montpellier ; 234 p.

EL MORJANI Z. 2002. Conception d'un système d'information à référence spatiale pour la gestion environnementale; application à la sélection de sites potentiels de stockage de déchets ménagers et industriels en région semi-aride (Souss, Maroc). Thèse de Doctorat, GENÈVE ; 343 p.

MATHEVET T. 2005. Quels modèles pluie-débit globaux pour le pas de temps horaire ? Développement empirique et comparaison de modèles sur un large échantillon de bassins versants. Thèse de Doctorat, ENGREF (Paris), Cemagref (Antony), France, 463 p.

Moriasi et al. 2007. Vers une modélisation adaptée à la prévision opérationnelle des crues éclair. Application à de petits bassins versants du sud de la France. Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 254 p.

MOUELHI S. 2003. Vers une chaîne cohérente de modèles pluie-débit conceptuels globaux aux pas de temps pluriannuel, annuel, mensuel et journalier. Thèse de Doctorat, *ENGREF*, Cemagref (Antony), France ; 323 p.

ODDOS A. 2002. Intérêt d'une approche semi-distribuée par rapport à une approche globale en modélisation pluie-débit. Mémoire pour l'obtention du diplôme d'ingénieur, Strasbourg ; 99 p.

PDAIRE. Plan Directeur D'aménagement Intégré des Ressources en Eau.

PERRIN C. 2000. Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative. Thèse de Doctorat, INPG (Grenoble) / Cemagref (Antony), 530 p.



Mémoire de fin d'études pour l'obtention du Diplôme de Master Sciences et Techniques

Nom et prénom: Abdelmounim BOUADILA

Année Universitaire : 2014/2015

Titre: ELABORATION D'UN MODELE HYDROMETEOROLOGIQUE SOUS LES PLATEFORME ATHYS ET GR4J.

Résumé

Le bassin versant d'Aguenza (1162 Km²) - souss - a fait l'objet d'une modélisation pluie-débit, par l'utilisation d'un modèle GR (Génie Rural) à pas de temps Journalier et un modèle pluie-débit « ATHYS ». Dans un premier temps, nous avons cherché à caractériser quelques facteurs en particulier physiques, géologiques et climatiques régissant l'écoulement. Ensuite une étude hydrologique basée sur le traitement des données hydrométriques relatives à une période de 27 ans a été utilisée.

La deuxième phase de notre travail s'intéresse essentiellement à la description de la modélisation hydrologique par la détermination de leur objectif et les intérêts de la modélisation ainsi son typologie.

La troisième phase de ce travail consiste en l'élaboration des modèles pouvant rendre compte de la relation pluie-débit. A cet effet, nous avons essayé deux approches assez différentes : Une conceptuelle globale représentée par le modèle du Génie Rural « GR4j », et l'autre conceptuelle distribuée représentée par la plateforme « ATHYS » est déterminée par une régression effectuée sur les chroniques pluies-débits.

Les résultats obtenus par la simulation de la transformation de la pluie en débit en mode continu par l'utilisation du modèle du Génie Rural « GR4J » sont plus satisfaisants que la modélisation par approche discrétisée « Athys ». En effet le modèle GR prend en compte la succession chronologique des phénomènes d'une part et l'influence des paramètres aussi bien climatiques (évapotranspiration) que celle physico-hydrogéologiques du bassin versant (humidité du sol et échanges externes). Mais le modèle distribué donne des résultats moyens à très bonne en mode événementiel.

Mots clés: Modélisation pluie-débit, Aguenza (souss) ATHYS, GR4J.