



Année Universitaire : 2014-2015



Master Sciences et Techniques : Hydrologie de Surface et Qualité des Eaux

## MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'Obtention du Diplôme de Master Sciences et Techniques

### Etude comparative de deux modèles d'aide à la décision pour la gestion des crues (SWAT et GR4J) au niveau du bassin d'Aguenza (région de Souss)

Présenté par :

Ismail BOUIZROU

Encadré par :

- Hassane Brirhet, DRPE
- Naoual Rais, FST – Fès

Soutenu le 26 JUIN 2015 devant le jury composé de :

- Mme. Rais N.
- Mr. Brirhet H.
- Mr. Benaabidate L.
- Mr. El Garouani A.
- Mr. Jabrane R.

Stage effectué à : Ministère délégué chargé de l'eau





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

**Nom et prénom : BOUIZROU Ismail**

**Année Universitaire : 2014/2015**

**Titre : Etude comparative de deux modèles d'aide à la décision pour la gestion des crues (SWAT et GR4J) au niveau du bassin d'Aguenza (région de Souss)**

### Résumé

La modélisation pluie-débit est une discipline des sciences hydrologiques qui s'intéresse principalement au fonctionnement du cycle hydrologique au niveau d'un bassin versant à différentes échelles spatio-temporelles.

L'objectif de notre travail est de comprendre et de modéliser le fonctionnement hydrologique d'un bassin versant d'Aguenza (région du Souss) en se basant sur deux modèles hydrologiques « SWAT (Soil and Water Assessment Tool) » et « GR4J (Génie Rural 4 paramètres Journaliers) ».

En utilisant les deux modèles, aux pas de temps journalier, on a pu simuler le débit à l'exutoire du bassin versant d'Aguenza pour lequel on dispose de données de débits observés. Cette étude comparative des deux modèles nous a permis de dégager les avantages et les inconvénients de chaque modèle dans un contexte de climat semi-aride (région de Souss).

Selon les critères de performance, les résultats globaux des meilleures simulations issues des deux différents modèles sont très satisfaisants, mais loin d'être exceptionnels, et ce probablement en raison du grand nombre de sources d'incertitude et d'erreurs du débit simulé.

**Mots clés :** modélisation pluie-débit, modèle SWAT, modèle GR4J, semi-aride, pas de temps journalier, simulations, bassin versant Aguenza (région de Souss).

---

## *Table des matières*

---

INTRODUCTION GENERALE .....	8
CHAPITRE I : PRESENTATION DE LA ZONE 'ETUDE .....	9
<b>1) Présentation du Bassin Souss :</b> .....	9
1.1) Situation Géographique .....	9
1.2) Situation administrative.....	10
1.3) Situation et présentation géographique de l'oued ISSEN : .....	10
1.4) Caractérisation géologique : .....	10
1.5) Hydrographie .....	13
1.6) La morphométrie du bassin versant de d'Aguenza : .....	17
1.7) Le régime pluviométrique du bassin versant .....	21
CHAPITRE II : MATERIELS ET METHODES.....	24
<b>1) Modélisation hydrologique :</b> .....	24
<b>2) Le modèle SWAT : Présentation et Application Au bassin d'Aguenza</b> .....	31
2.1) Aspect hydrologique de SWAT .....	32
2.2) Spatialisation des processus .....	33
2.3) Calibration et validation du modèle .....	34
2.4) Paramétrage des données d'entrée et mise en Œuvre du modèle.....	34
2.4.3) la mise en œuvre de SWAT .....	46
<b>3) Mise en œuvre de modèle GR4J dans le bassin d'Aguenza</b> .....	50
3.1) Description du modèle .....	50
3.2) Principe de fonctionnement de modèle GR4J : .....	50
3.3) Paramétrage des données d'entrée et mise en Œuvre du modèle.....	53
CHAPITRE III : RESULTATS ET DISSCUSSIONS.....	55
<b>1) Modèle SWAT :</b> .....	55
1.1) Calage et validation : .....	55
<b>2) Modèle GR4j :</b> .....	60
2.1) Calage et Validation : .....	60
<b>3) Discussions</b> .....	64
CONCLUSION GENERALE .....	65

---

## *REMERCIEMENTS*

---

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

*J'exprime mes profonds remerciements à mon encadrante interne, M. RAIS Naoual sans qui jamais ce projet n'aurait vu le jour. Je lui suis particulièrement reconnaissant pour la disponibilité qu'il a consacrée à l'encadrement de ce projet, pour sa patience, pour ses encouragements et pour les conseils précieux qu'il n'a cessé de me prodiguer tout au long de ce travail.*

*Mes remerciements et ma profonde reconnaissance vont également à, M. BRIRHET Hassane, Chef de service Hydrologie, Ministère chargé de l'Eau pour la qualité d'encadrement et pour m'avoir accompagné tout au long de ce stage. Sa présence, ses conseils, son charisme, son dynamisme et ses observations ont contribué à la réalisation de ce projet de fin d'étude dans des bonnes conditions.*

*Je tiens à remercier ici l'ensemble des personnes sans qui ce travail n'aurait pu arriver à terme. Il faut reconnaître l'apport de tous, et je ne saurais trouver les mots justes pour exprimer mes remerciements à tous ceux qui m'ont assisté de près ou de loin.*

*Je tiens à remercier aussi tout le département de la géologie de la faculté des sciences et techniques pour la qualité de la formation Hydrologie de surface et qualité des eaux.*

*Enfin, j'adresse toute mon affection à ma famille, et plus particulièrement à mes parents sans qui je n'aurai jamais effectué toutes ces années d'études. Leur intelligence, leur confiance, leur patience, leur tendresse, leur amour me portent et me guident tous les jours. Aussi, la liste ne saurait être complète sans adresser mes chaleureuses pensées à mes frères et mes sœurs pour ses encouragements et son aide continue au fil du temps. C'est un grand plaisir pour moi de leur dédier ce travail.*

---

## *Liste des figures*

---

Figure 1 : Situation géographique du bassin de Souss. (Source : SAIDI 1995) .....	9
Figure 2 : Carte géologique du bassin Souss (Combe et El Hebil, 1972) .....	12
Figure 3 : Coupes géologiques à travers la plaine du Sous (Combe et El Hebil, 1972) .....	12
Figure 4 : le réseau hydrographique d'Aguenza (carte établie à l'aide d'Arcgis, 2015).....	13
Figure 5 : profil en long du cours d'eau principale.....	14
Figure 6 : carte de pente d'Aguenza (carte établie à l'aide d'ArcSWAT, 2015) .....	15
Figure 7: courbe hypsométrique du bassin versant d'Aguenza .....	19
Figure 8 : Carte de la position des deux stations (Source : SAIDI).....	21
Figure 9 : Les précipitations mensuelles interannuelles dans les deux stations.....	22
Figure 10 : Les précipitations mensuelles interannuelles dans les deux stations d'Aguenza et Amsoul (1982 à 2010).....	23
Figure 11 : Les variables d'un modèle hydrologique (d'après Gaume, 2002).....	25
Figure 12 : Schéma d'un modèle hydrologique.....	25
Figure 13 : Schéma de description des modèles hydrologiques (Anctil et al. 2005).....	27
Figure 14 : Architecture de l'interface du couplage SWAT et SIG (Bian et al. 1996).....	31
Figure 15 : Fonctionnement schématique de SWAT (d'après DUROS 2001) .....	32
Figure 16 : Structure hydrologique de SWAT (source Eckard et Arnold 2000) .....	33
Figure 17 : Constitution des HRU dans SWAT (adapté de Ruelland et al. 2004).....	34
Figure 18 Les différents thèmes de cartes requis en Entrée de SWAT (Holvoet et al. 2005) et un Schéma méthodologique de mise en œuvre de SWAT (adapté de Ruelland et al.2004) .....	35
Figure 19 : Carte de modèle numérique de terrain du bassin versant d'Aguenza (carte établie à l'aide d'ArcSWAT).....	36
Figure 20 : Carte de type de sol du bassin d'Aguenza (carte établie à l'aide d'ArcSWAT).....	37
Figure 21 : Carte de type de sol du bassin d'Aguenza (carte établie à l'aide d'ArcSWAT).....	39
Figure 22 : Les paramètres de sol.....	41
Figure 23 : Les équations pour le calcul des caractéristiques du sol (Saxton K.E et .all 2006) .....	42
Figure 24 : Définition des symboles des équations de sol (Saxton K.E et .all 2006) .....	43
Figure 25 : Interface du programme pcpSTAT .....	45
Figure 26 : Interface du programme pcpSTAT .....	46

Figure 27 : Carte des HRUs du bassin d'Aguenza (carte établie à l'aide d'ArcSWAT) .....	47
Figure 28 : Période de calage et validation de modèle .....	49
Figure 29 : Schéma de principe du modèle GR4J .....	51
Figure 30: Comparaison entre les débits mensuels simulés et observés (m <sup>3</sup> /s) sur le bassin versant d'Aguenza .....	57
Figure 31: corrélation simple linéaire entre les débits observés et simulés .....	57
Figure 32 : Comparaison entre les débits simulés et observés .....	58
Figure 33 : Comparaison entre les débits simulés et observés .....	58
Figure 34 : Comparaison entre les débits simulés et observés .....	60
Figure 35 : corrélation simple linéaire entre les débits observés et simulés .....	61
Figure 36 : Comparaison entre les débits simulés et observés .....	61
Figure 37 : corrélation simple linéaire entre les débits observés et simulés .....	62
Figure 38 : Comparaison entre les débits simulés et observés .....	62
Figure 39 : corrélation simple linéaire entre les débits observés et simulés .....	63

---

## *Liste des tableaux*

---

Tableau 1 : répartition de la superficie du bassin versant par tranche d'altitude .....	14
Tableau 2 : répartition de la surface du bassin par tranche d'altitude .....	18
Tableau 3 : calcul de l'indice de compacité.....	20
Tableau 4 : Critères d'évaluation de la performance de SWAT (Moriassi et al. 2007) .....	30
Tableau 5: Table de correspondance pour la carte d'occupation de sol .....	40
Tableau 6 : Format de fichiers WGNlocations.....	48
Tableau 7: les paramètres choisis pour le calage.....	55
Tableau 8 : valeurs des critères de performance en fonction de période de simulation .....	58
Tableau 9 : résultats des critères de performance en fonction des périodes de simulation.....	63

---

## *Liste des abréviations*

---

*ASTER: Advanced Spaceborne Thermal Emission*

*EEA: and Reflection Radiometer*

*ESA: European Space Agency portal*

*FAO: Food and Agriculture Organization*

*GR: Genie Rural*

*GDEM: Global Digital Elevation Map*

*HRU: Hydrological Response Unit*

*IGBP: The International Geosphere-Biosphere Programme*

*MNT : Modèle Numérique de Terrain*

*NRCS : Natural Resource Conservation Service*

*NS : Nash–Sutcliffe*

*SIG : Système d'Information Géographique*

*SWAT: Soil Water Assessment Tools*

*HWSD: Harmonized World Soil Database*



---

## *Abstract*

---

The rainfall-runoff modeling is a discipline of Hydrological Sciences witch interested primarily in the operation of the water cycle in a watershed at different spatial and temporal scales.

The goal of our work is to understand and model the hydrological behavior of Aguenza watershed (Souss region) based on two hydrological models "SWAT (Soil and Water Assessment Tool)" and "GR4J (Engineering Rural 4 Daily parameters)".

By using both models, daily time, we could simulate the flow at the outlet of the watershed of Aguenza for which one has observed stream flow data. This comparative study of both models has allowed us to identify the advantages and disadvantages of each model.

Depending on the performance criteria, the overall results of the best simulations from two different models are very satisfactory, but far from being exceptional, and probably because of the large number of sources of uncertainty and errors of the simulated flow.

Keywords: rainfall-runoff modeling, model SWAT model GR4J, semi-arid, daily time, simulations, watershed Aguenza (Souss region).

## INTRODUCTION GENERALE

Les eaux des rivières sont une ressource de plus en plus utilisée à des fins variées. Elles peuvent également présenter une menace pour les populations riveraines ou les ouvrages d'art. Les hydrologues, dont ces eaux sont l'objet d'étude, sont en conséquence sollicités pour la prévision des crues ou des étiages, la prédétermination des débits pour le dimensionnement d'ouvrages d'art, ou le dimensionnement de réservoirs de stockage d'eau ou d'écêtement des crues. Mais pour fournir aux ingénieurs de bons outils pour la Gestion de l'eau, l'hydrologue doit identifier les modèles qui représentent le comportement des bassins versants.

Les problèmes peuvent se poser en tout point d'un réseau hydrographique. Pour y répondre l'hydrologue doit disposer des données permettant la paramétrisation de modèles pertinents. Malheureusement, il ne dispose pas toujours des données d'une Station de mesure des écoulements sur le point hydrographique auquel il s'intéresse. Le plus souvent, cependant, l'hydrologue dispose de données de pluie qui sont généralement beaucoup plus abondantes et mieux distribuées spatialement que les séries de débit. C'est la raison qui nous pousse naturellement à nous intéresser aux modèles pluie-débit : ils nous permettent de reconstituer ou de compléter des séries de débit à partir des séries de Pluie (Claudia Rojas Serna2005).

Les modèles pluie-débit s'adaptent aux particularités du comportement hydrologique d'un bassin versant au travers de leurs paramètres. Pour pouvoir appliquer utilement ces Modèles, l'hydrologue a besoin d'une méthode permettant de déterminer leurs Paramètres, quel que soit le bassin versant.

Le plus simple serait de pouvoir s'appuyer sur des relations régionales obtenues en établissant des liens statistiques entre les valeurs des paramètres et des descripteurs climatiques ou physiques des bassins. Cependant, la nature individuelle des bassins versants et la grande complexité des déterminants hydrologiques rendent délicate toute application directe des formulations régionales pour déterminer la valeur des paramètres.

Les modèles restent, dans ces conditions, à des niveaux de performance souvent incompatibles avec les exigences de fiabilité opérationnelle (Claudia Rojas Serna2005).

Dans le cadre de ce travail, on s'est intéressé à la proche de la modélisation hydrologique du bassin versant d'Aguenza situé au sud-ouest du Maroc sous un climat aride à semi-aride connu par son variabilité spatiotemporelle dans le but de mieux comprendre et de modéliser le fonctionnement hydrologique en s'attachant au réalisme des processus intermédiaires simulés ainsi de tester la performance et l'applicabilité de deux modèles hydrologiques l'un distribué à base semi physique et l'autre conceptuel globale.

Ce rapport est structuré en trois grandes parties :

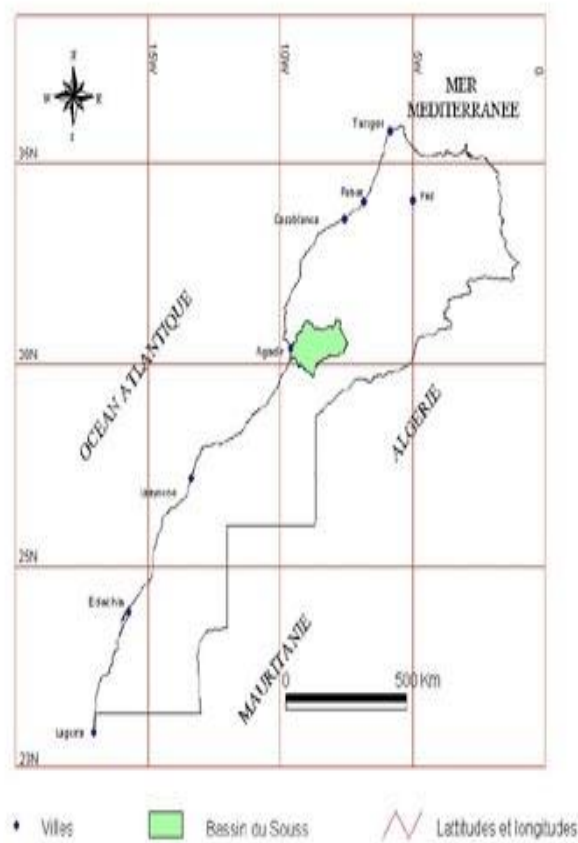
- présentation du contexte spécifique de la zone d'étude
- sous le titre de Matériels et Méthodes, elle commence par un aperçu bibliographique des différents types des modèles hydrologiques et par la suite la présentation des deux modèles d'applications.
- discussions des résultats et faire une comparaison entre SWAT et GR4J.

# CHAPITRE I : PRESENTATION DE LA ZONE 'ETUDE

## 1) *Présentation du Bassin Souss :*

### 1.1) Situation Géographique

Le bassin versant étudié 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 Siroua à l'Est, la chaîne alpine du Haut Atlas au Nord et le bombement anticlinal de l'Anti-Atlas occidental au Sud (figure1).



*Figure 1 : Situation géographique du bassin de Souss. (Source : SAIDI 1995)*

Le territoire ainsi délimité couvre une superficie de 17 986 km<sup>2</sup> soit l'équivalent de 2.5% du territoire National. L'Oued Souss représente l'affluent principal du bassin.

## 1.2) Situation administrative

Sur le plan administratif, le bassin du Souss s'étend principalement sur la région SoussMassaDrâa, dont il occupe 96.9%; Le reste est réparti sur les régions MarrakechTensiftAl Haouz et GuelmimEsSmara. Il regroupe donc la wilaya d'Agadir (les préfectures d'Agadir Ida Outanane, d'Inezgane Aït Melloul et la province de Chtouka Aït Baha) et les provinces de Taroudant, Ouarzazate, Chichaoua, Al Haaouz et Tata; Soit 14 cercles englobant 130 communes (115 communes rurales et 15 Communes urbaines), soit à peu près 7.5% de l'ensemble des communes à l'échelon national.

## 1.3) Situation et présentation géographique de l'oued ISSEN :

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

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

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

Avant son débouché en plaine, l'oued Issen reçoit encore quelque petit influent tel l'oued Taioukht sur la rive gauche, et l'assif Boulbaz qui traverse les grès et argiles salifères permo-triasique sur la rive droite.

L'altitude varie entre 600 m et 3200 m.

## 1.4) Caractérisation géologique :

De nombreux travaux ont été consacrés à l'histoire géologique du Haut Atlas occidental, et de la plaine de Souss. Après environ soixante années de recherche, les connaissances ont été largement approfondies.

En 1930, Roché a présenté une étude détaillée dans laquelle il a apporté les éléments de base concernant la stratigraphie des étages Crétacés. Mais c'est Ambroggi en 1963 qui a fait une étude stratigraphique et paléontologique qui reste jusqu'à nos jours une référence de base pour toutes les études ultérieures dans ce domaine.

L'ensemble du bassin versant de l'oued Issen présente une géologie formée par les successions suivantes :

\*L'étage le plus récent formé de calcaires dolomitiques et grès fins formant les terrains les plus résistants à l'érosion. Cette caractéristique est d'ailleurs illustrée par une jonction brutale souvent sous forme de cascade ou de falaise entre ces calcaires et de terrains sous-jacents très friables.

\*Les argiles du permotrias, de véritables régosols, avec un taux de salinité souvent élevé dans les cuvettes et au niveau des sources. Ces argiles ont un pouvoir de dispersion qui accentue le phénomène d'érosion. Il s'agit de la caractéristique essentielle de ce bassin. Ces argiles imperméables font que des sources apparaissent à leur contact avec les calcaires.

\*A l'étage inférieur, apparaissent bien à l'aval du barrage Abdelmoumen, les roches du secondaire et du primaire (Silurien et Dévonien) grés et schistes et argiles.

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

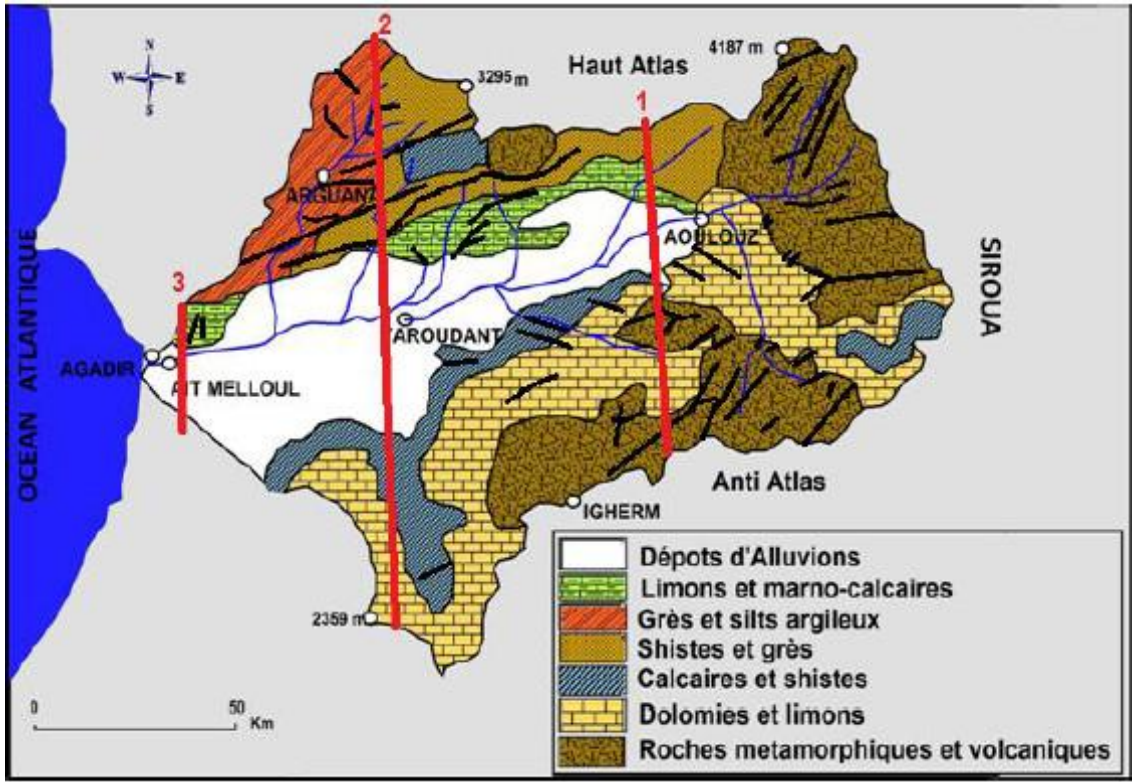


Figure 2 : Carte géologique du bassin Sous (Combe et El Hebil, 1972)

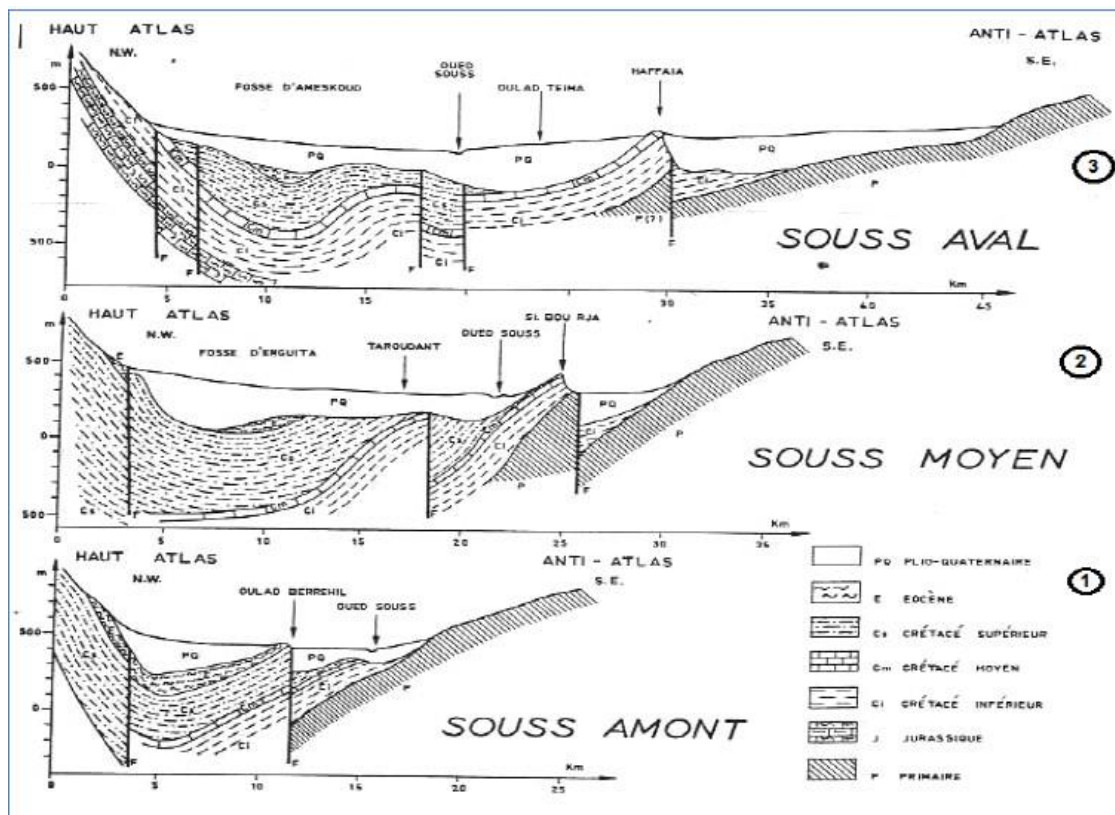


Figure 3 : Coupes géologiques à travers la plaine du Sous (Combe et El Hebil, 1972)

## ✚ La plaine de Souss :

Les formations de remplissage de la plaine du Souss comprennent les sédiments qui sont accumulés dans le sillon subsident, formé au sud du Haut Atlas lors du Néogène et du Quaternaire (ABHSM, 2003).

### 1.5) Hydrographie

Le réseau hydrographique du bassin versant d'Aguenza (fig.4), s'écoule du NE vers le SW, Il 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 800 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.

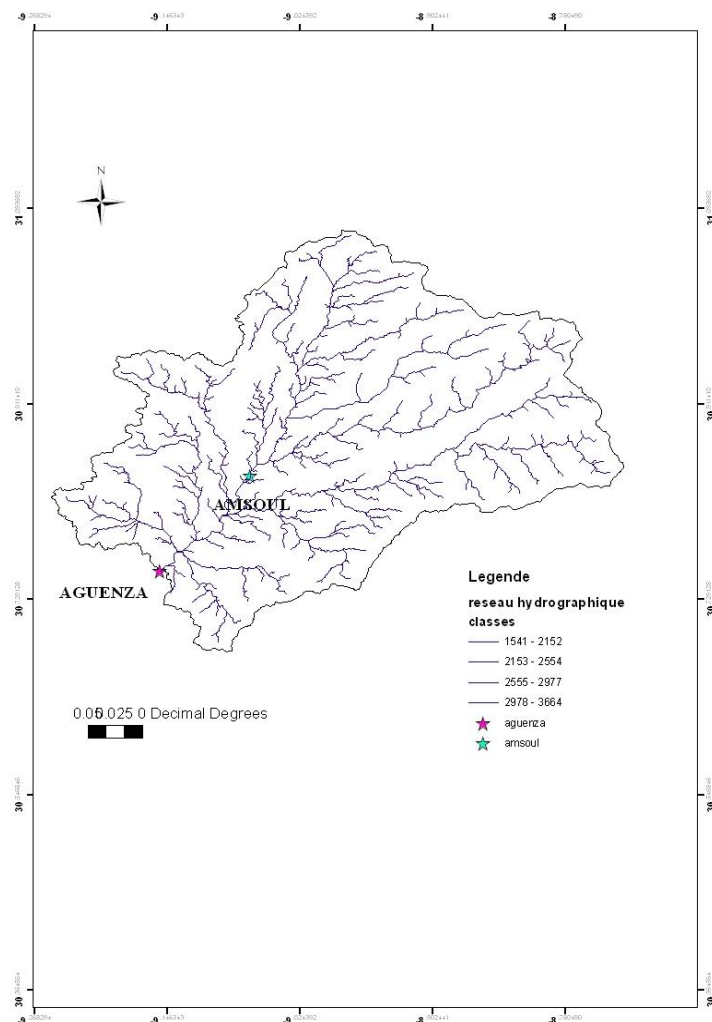


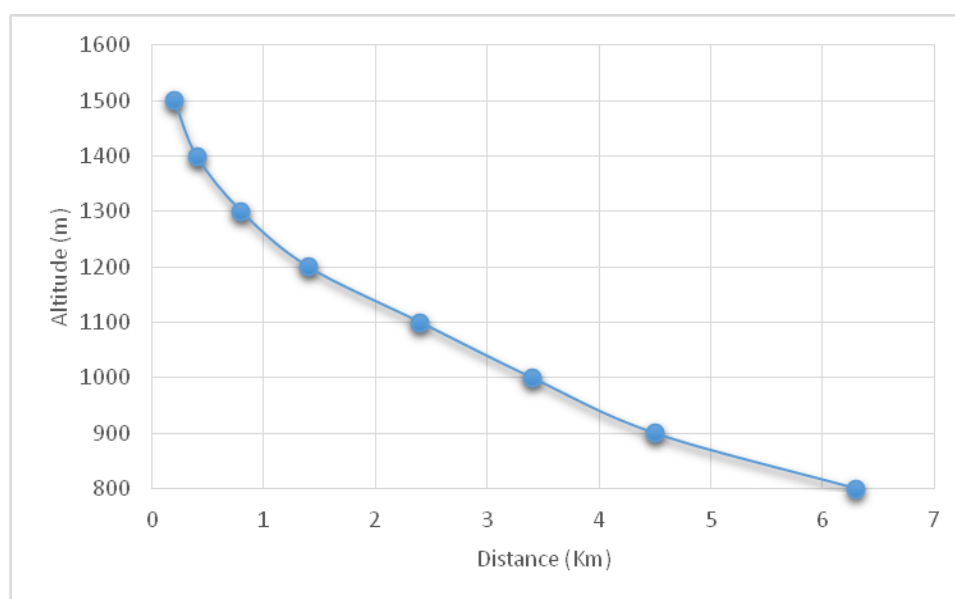
Figure 4 : le réseau hydrographique d'Aguenza (carte établie à l'aide d'Arcgis, 2015)

Le réseau hydrographique est relativement dense avec une longueur totale de 160km et une densité très élevée. Le cours d'eau principal mesure 6.3 km. La figure ci-dessous illustre le profil 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 22.05 % (Tableau ci-dessous)

*Tableau 1 : répartition de la superficie du bassin versant par tranche d'altitude*

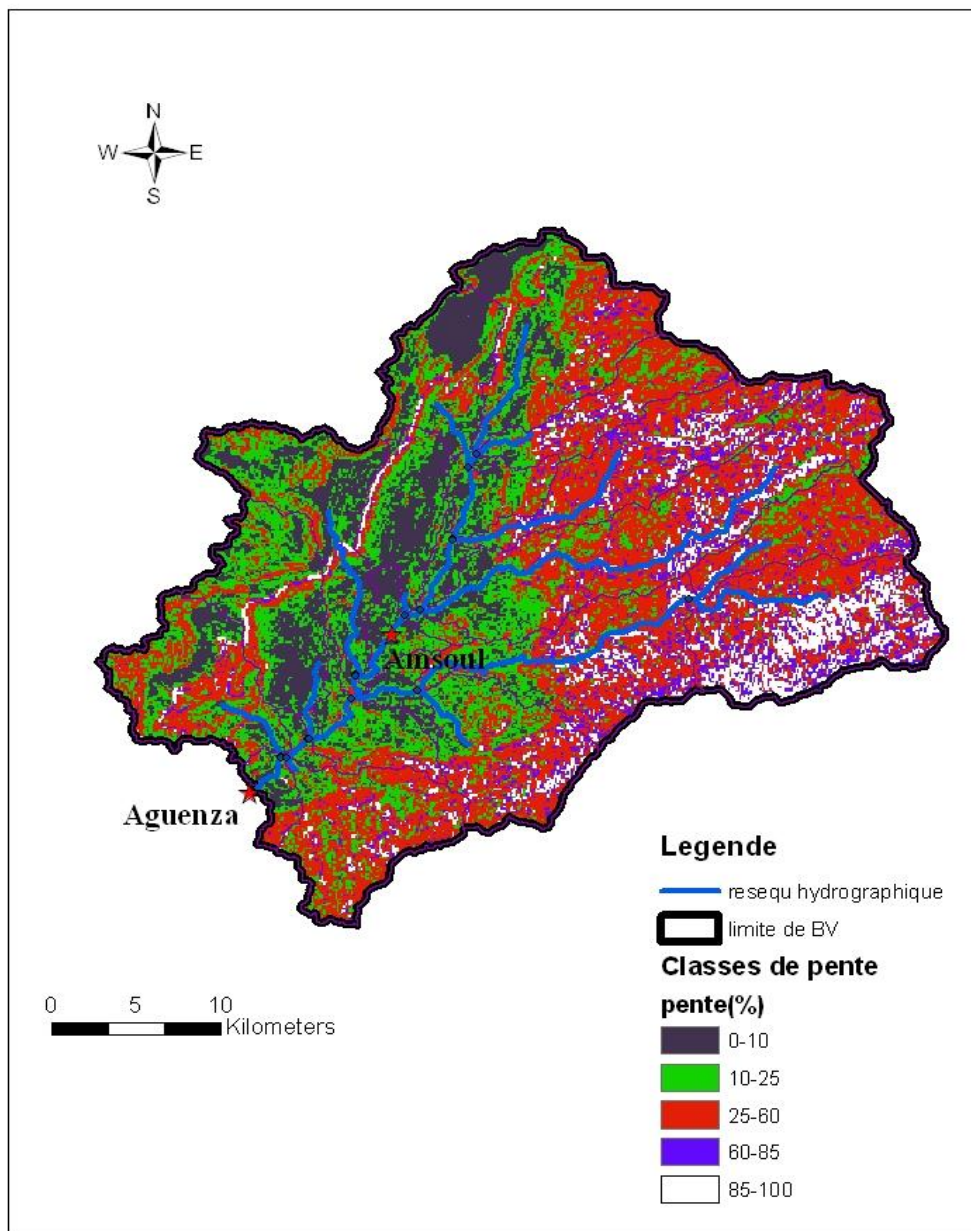
Tranches d'altitude (m)	Longueur du cours d'eau principal (Km)		Pente (%)
	Distance	Distance Cumulée	
<b>1500-1600</b>	0.2	0.2	50.0
<b>1400-1500</b>	0.2	0.4	50.0
<b>1300-1400</b>	0.4	0.8	25.0
<b>1200-1300</b>	0.6	1.4	16.7
<b>1100-1200</b>	1	2.4	10.0
<b>1000-1100</b>	1	3.4	10.0
<b>900-1000</b>	1.1	4.5	9.1
<b>800-900</b>	1.8	6.3	5.6
<b>Total / moyenne</b>		6.3	22.05

Le cours d'eau principal mesure **6.3 km**. Les figures ci-dessous illustrent respectivement le profil en long du cours d'eau principal dont la pente varie entre **50 %** à l'amont et **5.6 %** à l'aval avec une moyenne de **22.05 %** et la carte des pentes.



*Figure 5 : profil en long du cours d'eau principale*





*Figure 6 : carte de pente d'Aguenza (carte établie à l'aide d'ArcSWAT, 2015)*

La figure ci-dessus présente la carte des pentes en pourcentage au niveau du bassin versant d'Aguenza où on a trois classes :

Classe 1 : pente entre 0 et 25%.

Classe 2 : pente entre 25 et 75%.

Classe 3 : pente entre 75 et 100%.



## Le contexte climatologique et hydrologique du bassin :

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

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

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

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

### **E -Ressources en eau de surface :**

Les ressources en eau de surface sont limitées et très irrégulières. Les débits des oueds présentent une forte irrégularité interannuelle. Ils ne sont pérennes que sur leurs cours de montagne et de piémont et ne coulent que pendant de courtes périodes où surviennent des crues, parfois rapides et violentes. L'apport moyen en eau de la région est évalué à 600 Mm<sup>3</sup>/an. Les apports minimum et maximum enregistrés sont respectivement de 35 Mm<sup>3</sup> (1960-61) et 2.160 Mm<sup>3</sup> (1962-63).

### **F -Ressources en eau souterraine**

\*La nappe du Souss

Le bassin hydrogéologique de la nappe du Souss s'étend sur une superficie de 4.150 km<sup>2</sup>. Il est limité au Nord par le Haut Atlas, au Sud par l'Anti-Atlas et débouche à l'Ouest sur l'Océan Atlantique. Constituée par les formations de remplissage de la vallée dont l'âge va de l'Eocène au quaternaire, elle constitue le réservoir phréatique le plus important du pays et joue un rôle primordial dans le développement économique et social de la région du Souss.

## 1.6) La morphométrie du bassin versant de d'Aguenza :

### L'hypsométrie :

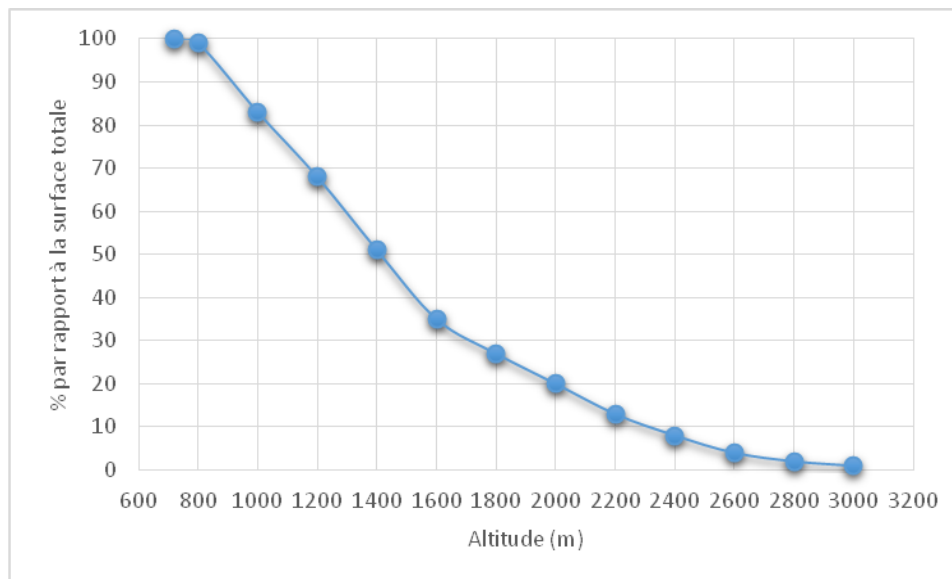
Dans le bassin d'Aguenza la tranche d'altitude la plus représentée est celle comprise entre 1200 et 1400 m avec une superficie de 192 km<sup>2</sup> correspond au 17% de la superficie totale du bassin versant.

Les altitudes les plus dominantes sont les moyennes et les faibles occupants ainsi environ 73 % de la surface.

*Tableau 2 : répartition de la surface du bassin par tranche d'altitude*

Tranches d'altitudes (m)	Superficie		% de la superficie au-dessus de la limite inférieure de la tranche
	(Km <sup>2</sup> )	(%)	
<b>720-800</b>	11,3	1	100
<b>800-1000</b>	180,8	16	99
<b>1000-1200</b>	169,5	15	83
<b>1200-1400</b>	192,1	17	68
<b>1400-1600</b>	180,8	16	51
<b>1600-1800</b>	90,4	8	35
<b>1800-2000</b>	79,1	7	27
<b>2000-2200</b>	79,1	7	20
<b>2200-2400</b>	56,5	5	13
<b>2400-2600</b>	45,2	4	8
<b>2600-2800</b>	22,6	2	4
<b>2800-3000</b>	11,3	1	2
<b>3000-3200</b>	11,3	1	1
<b>Total</b>	1129,9	100	

En général, on ne s'intéresse pas à l'altitude moyenne mais plutôt à la dispersion des altitudes. L'étude statistique permet de tracer la « courbe hypsométrique ». Cette courbe est établie en planimétrant pour les différentes altitudes les surfaces situées au-dessous de la courbe de niveau correspondante



*Figure 7: courbe hypsométrique du bassin versant d'Aguenza*

On a établi la courbe hypsométrique d'Aguenza à partir des données du tableau et les constatations qu'on peut tirer à partir de cette courbe sont :

- Un relief montagneux élevé (plus de 1000 m) qui occupe 83% du bassin alors que les surfaces plus basses (moins de 1000 m) occupent 17%
- L'altitude moyenne est de : 1517 m
- L'altitude médiane : 1490 m
- L'altitude de fréquence maximale : 1200 à 1400 m

\*bien souvent on définit la « dénivelée D » comme étant la différence de cote entre H5% et H95%.

$$D = H5\% - H95\%$$

$$D = 2500 - 950 = 1550 \text{ m.}$$

**✚ L'indice de compacité de Gravelius (1914) KG.**

Défini comme le rapport entre le périmètre du bassin au périmètre de cercle ayant la même surface.

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

$K_G$  : l'indice de compacité de Gravelius.

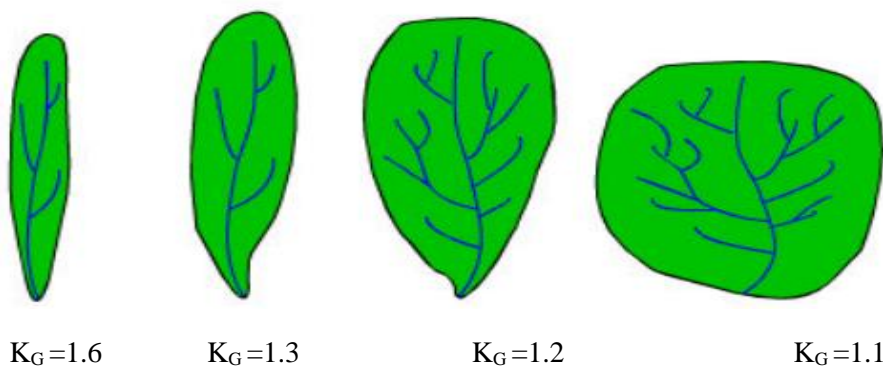
A : surface du bassin versant ( $\text{km}^2$ ).

P : périmètre du bassin (Km).

*Tableau 3 : calcul de l'indice de compacité*

Périmètre	190 Km
Surface	1162 Km <sup>2</sup>
Indice de compacité KG	1,58

Cet indice se détermine à partir d'une carte topographique en mesurant le périmètre du bassin versant et sa surface. il est proche de 1 pour un bassin versant de forme quasiment circulaire et supérieure à 1 lorsque le bassin est de forme allongée.



Dans notre cas l'indice de compacité de gravelius vaut 1.58 c'est-à-dire le bassin d'Aguzenza est allongée et six fois plus longue que large.

✚ *Rectangle équivalent :*

Ce rectangle est appelée aussi le rectangle de Gravelius. Il s'agit d'un rectangle de même superficie et de même périmètre que le bassin versant. De cette façon. Les courbes de niveau deviennent des droites parallèles à petites côtes du rectangle. L'un des petits cotés représente l'exutoire et l'autre représente l'altitude maximale du bassin (amont). Soit L et l respectivement la longueur et la largeur du rectangle et P et A le périmètre et la surface du bassin versant. Ces L et l peuvent être obtenues de la façon suivante :

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

Où, L : la longueur du rectangle en km ;  
 l : la largeur du rectangle en km ;  
 KG : l'indice de Gravelius sans dimensions ;  
 A : la surface du bassin en km<sup>2</sup>.

L'application sur Aguenza donne : L=80.83 km et l=13.96 km.

### 1.7) Le régime pluviométrique du bassin versant

#### Le régime Pluviométrique

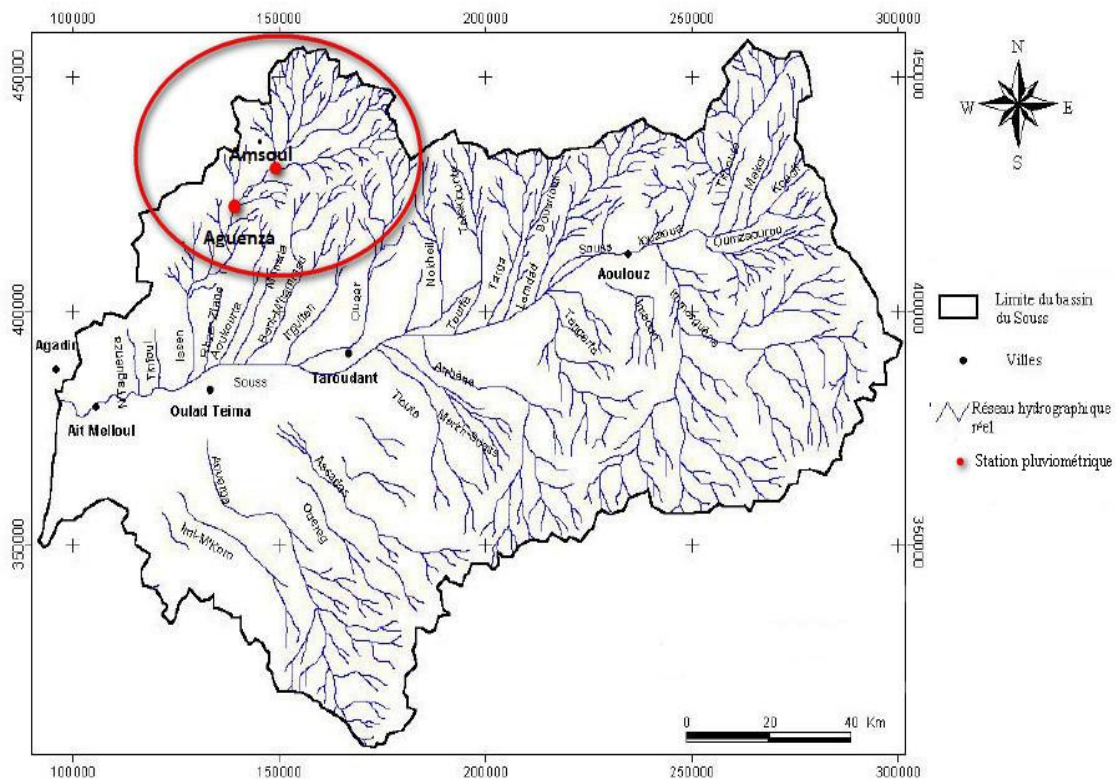


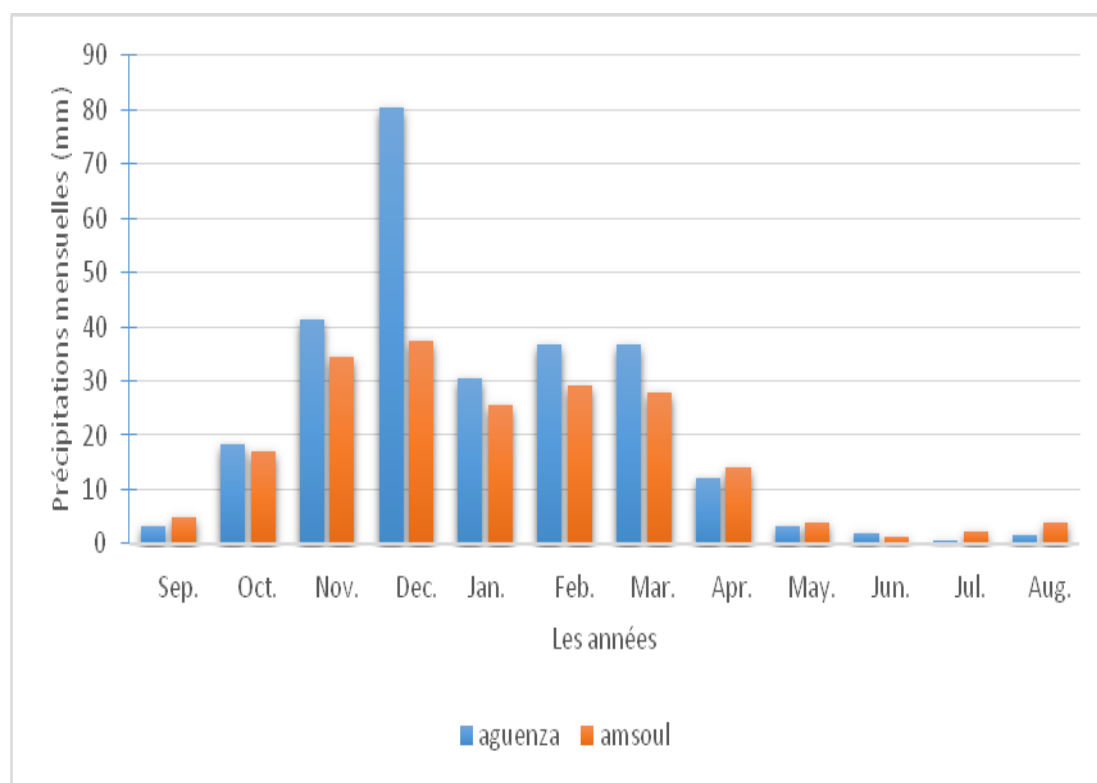
Figure 8 : Carte de la position des deux stations (Source : SAIDI)

## A -Précipitations mensuelles

Pour l'étudier nous disposons deux stations pluviométriques : Aguenza (1982-2014), Amsoul (1978-2012) et suite au petit décalage concernant les périodes couvertes par les mesures dans les deux postes, nous allons se limiter aux données pluviométriques recueillies dans la période entre (1982-2010).

A partir de l'observation de la figure9, nous pouvons remarquer que les mois les plus arrosés de la station d'Aguenza sont Décembre et Novembre et de même pour Amsoul. Les mois les plus secs sont Juillet et Août pour Aguenza, Juin et Juillet pour Amsoul.

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



*Figure 9 : Les précipitations mensuelles interannuelles dans les deux stations*

*D'Aguenza et Amsoul (1982 à 2010).*



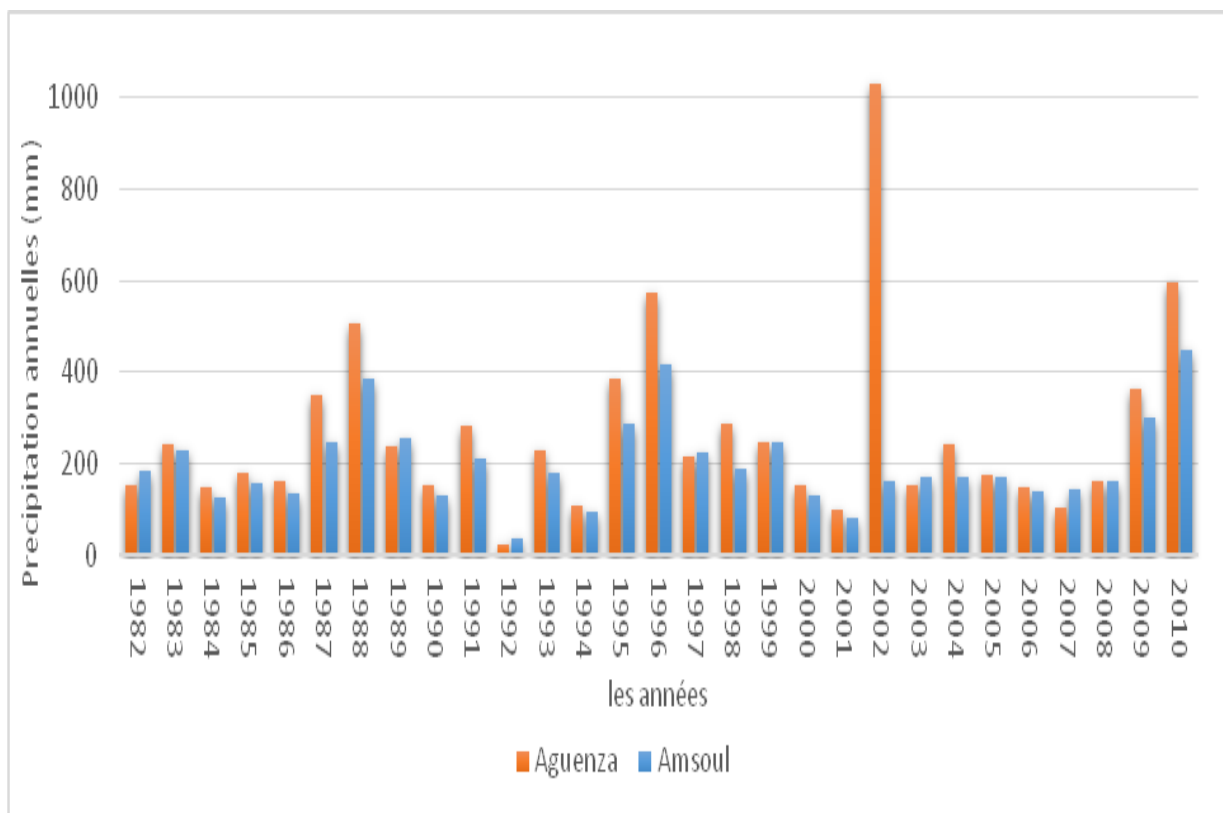
## b-Les précipitations annuelles

La figure illustre les précipitations annuelles dans les deux stations d'Aguenza. En général, celles d'Aguenza sont plus importantes que celles d'Amsoul malgré l'altitude de cette dernière la plus grande.

Les données s'étalent sur une période allant de 1982 à 2010 ou on observe que pour :

**\*Station Aguenza** : présente un maximum des précipitations annuelles de **1031 mm** en **2002** et un minimum de **24 mm** en **1992** et dont le module annuel est **266.45 mm** (Figure 10). Sa pluviométrie montre qu'il ne souffre pas d'effet d'abri, donc elle reçoit des précipitations conformes à son altitude.

**\*Station Amsoul** : Les précipitations varient de façon irrégulière d'une année à l'autre avec une moyenne inter-annuelle de **200.81 mm** Pour une série d'années de **1982 à 2010**, le maximum Pluvieux de **448.7 mm** a été enregistré en **2010** et le minimum de **39 mm** en **1992** (Figure10).



*Figure 10 : Les précipitations mensuelles interannuelles dans les deux stations d'Aguenza et Amsoul (1982 à 2010).*

## CHAPITRE II : MATERIELS ET METHODES

### *1) Modélisation hydrologique :*

La conception d'un schéma théorique dans le but de simuler le comportement hydrologique du bassin versant, en réponse à un évènement pluvieux, est loin d'être simple. En effet l'appréhension des différents processus qui interviennent dans le fonctionnement de système physique est toujours complexe. Mais il est toujours possible d'approcher la réalité autour d'hypothèses assez simplificatrice, et permette d'étudier de plus près le système.

Les études sur la complexité des bassins versants et l'explication des comportements des hydro systèmes ont été nombreuses et diversifiées. Les modèles hydrologiques permettent de répondre relativement aux questions qui se posent au niveau d'un bassin versant. Certains de ces modèles ont fait preuve d'une bonne performance en allant de la prévision et l'annonce de crues jusqu'à l'évaluation et la gestion des ressources en eaux.

Mais la question qu'il reste à résoudre est : quel modèle concevoir ou choisir parmi tous les modèles disponibles sur le marché et comment savoir relier le choix aux objectifs ?

La réponse est certainement liée à l'expérience de l'hydrologue d'une part, et à la disponibilité des données réelles et du modèle convenable, d'autre part.

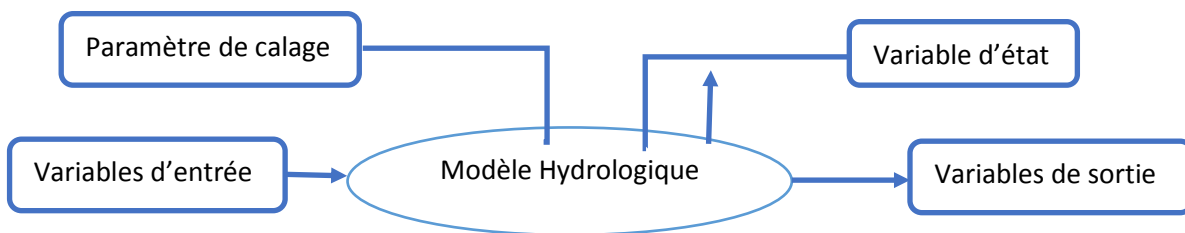
Pour comprendre la notion d'un modèle hydrologique, il est indispensable de connaître l'ensemble d'éléments qui le constituent. Comme il a été présenté par Bonn, 2003, un modèle est une représentation simplifiée, relativement abstraite, d'un processus, d'un système, en vue de le décrire, de l'expliquer ou de le prévoir. Cette représentation ce fait grâce à un ensemble d'équations mathématiques qui sont appelées à reproduire le système. On distingue quatre types de variables qui peuvent exister en totalité ou en partie dans chaque modèle.

\*Variables d'entrées : le modèle fait appel à ces variables qui dépendent du temps et/ou de l'espace (pluie, ETP, caractéristiques physiques et hydrodynamiques du milieu,...).

\*Variables de sorties : le modèle répond par un ensemble de variables (débits, flux ou concentration en polluants...).

\*Variables d'état : elles permettant de caractériser l'état de système modélisé et peuvent en fonction du temps (niveau de remplissage des réservoirs d'eau d'un bassin versant, taux de saturation des sols, profondeur des sols, pentes,...).

\*Paramètres de calage : en plus des variables, la modélisation fait intervenir des variables dont la valeur doit être déterminée par calage.

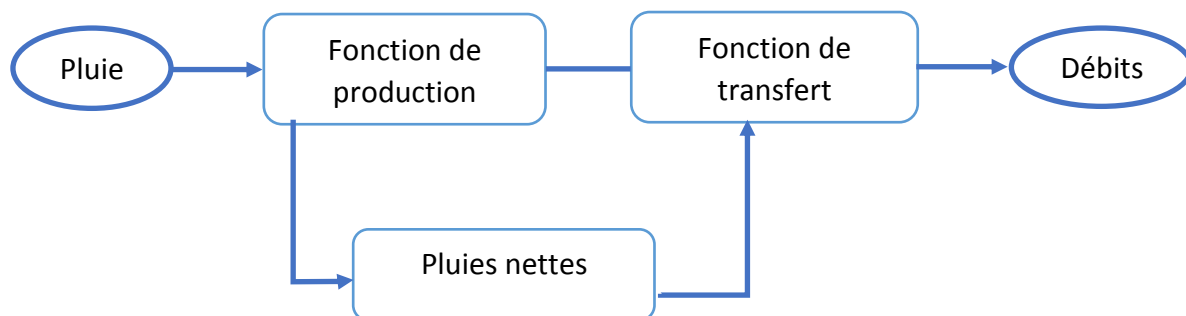


*Figure 11 : Les variables d'un modèle hydrologique (d'après Gaume, 2002).*

Les variables ci-dessus interviennent dans la modélisation hydrologique par l'intermédiaire de deux fonctions : fonction de transfert et fonction de production.

**\*La fonction de production :** c'est une représentation simple mais réaliste, des différentes voies de suivre l'eau de pluie, entre le moment où elle atteint le sol et celui où elle rejoint le cours d'eau (Morin, 1991). Elle exprime la transformation de la pluie brute en pluie nette, définie comme la fraction de la pluie brute qui contribue effectivement au ruissèlement, en d'autres termes, elle permet de calculer la quantité d'eau qui va s'écouler à l'exutoire du bassin ou sous bassin versant.

**\*La fonction de transfert :** c'est la fraction qui permet de transférer, comme son nom l'indique. La quantité d'eau déterminée par la fonction de production. Vers le cours d'eau. Elle permet de la transformation de la pluie nette en un hydrogramme à l'exutoire du bassin versant, donc de donner une forme à la crue dont le volume a été déterminé par la fonction de production, en simulant l'hydrogramme de crue à l'exutoire.



*Figure 12 : Schéma d'un modèle hydrologique*

## 1.1) Objectifs de la modélisation :

La représentation d'un système physique par un modèle mathématique, est une démarche courante qui, en hydrologie, vise à répondre à l'un des objectifs suivants (Wery, 1990, In Elleuch, 1999) :

### 1.1.1) La prévision

Grace à la mesure en temps réel des variables ou signaux d'entrée, il est possible d'évaluer les futurs débits à l'exutoire d'un bassin versant.

### 1.1.2) La simulation

C'est l'analyse du comportement du système pour un signal particulier (par exemple pour une averse exceptionnelle). Dans ce cas, les mesures antérieures des débits ne sont pas disponibles et sont remplacées par les valeurs calculées. En hydrologie, la simulation est utilisée dans le but de compléter des données manquantes, de faire prédétermination des crues (évaluation des débits de pointe) ou, de générer des séries de données utiles à la gestion d'ouvrages des retenues.

### 1.1.3) Le contrôle

Le contrôle, qui consiste à agir sur le signal d'entrée pour obtenir un signal de sortie ayant certaines caractéristiques, n'a trouvé que peu d'application en hydrologie.

## 1.2) La Classification des modèles

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 suivante donne une Classification des modèles hydrologiques en se basant sur ces critères.

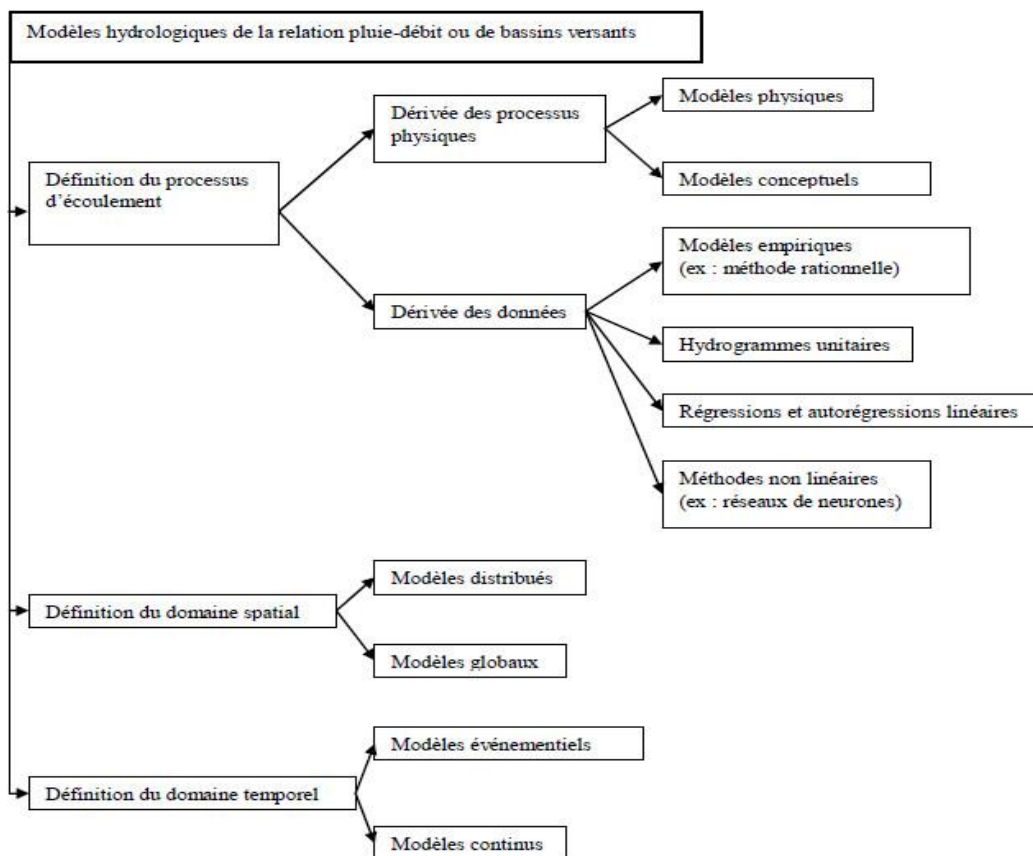


Figure 13 : Schéma de description des modèles hydrologiques (Anctil et al. 2005)

### 1.2.1) Les modèles empiriques, conceptuels et à base physique

#### A-Les modèles empiriques

Utilisent les séries de données chronologiques disponibles pour en déduire la structure du modèle ainsi que les valeurs des paramètres correspondants. Ils sont alors basés sur les informations rapportées des données et n'incluent aucune connaissance a priori sur le comportement du bassin versant et des processus physiques de l'écoulement. Ces modèles portent aussi le nom de boîtes noires (black box). Des exemples de ce type de modèles sont les réseaux de neurones artificiels (Artificial Neural Networks) (Hsu et al, 1995), les modèles GR (Edijando et Michel, 1989, Loumagne, 1988), le modèle SCS. Ces modèles considèrent généralement le bassin versant comme une entité unique. Les réseaux de neurones artificiels nécessitent une phase d'apprentissage et ne peuvent être utilisés sur les bassins non jaugés. Les modèles GR et SCS ont une structure simple et le rôle de leurs paramètres est bien identifié. A partir d'un travail de régionalisation des paramètres, il peut être envisageable de les appliquer à des bassins non gaugés.

## **B -Les modèles conceptuels (conceptual, grey box)**

Utilisent des éléments de stockage Ou réservoirs comme composants principaux. Ces réservoirs se remplissent par des Flux : précipitation, infiltration ou percolation et se vident par évapotranspiration, Ruissellement, drainage etc. Contrairement aux modèles empiriques, la structure des Modèles conceptuels est déterminée avant leur utilisation. Elle est définie par la Compréhension du système hydrologique du modélisateur. Cependant, ces modèles Reposent également sur des séries temporelles de données de la sortie du système Pour la détermination des valeurs des paramètres dans un processus de calibration.

Les paramètres décrivent la taille des réservoirs ou la répartition des écoulements entre eux. Un seul paramètre peut décrire plusieurs processus et ne peut alors pas être directement déduit des mesures de terrain. La plupart de ces modèles Considèrent le bassin comme une unité homogène (modèles globaux). Cependant, L'approche semi distribuée consiste à diviser le bassin versant en plusieurs sous bassins (Boyle et al. 2001) et tient compte de la variabilité spatiale à travers des classes ayant des comportements hydrologiques similaires. La plupart des modèles Utilisés en pratique sont des modèles conceptuels. Le modèle TOPMODEL, modèle Conceptuel distribué (Beven et Kirkby, 1979 ; Obled, 2003) est une illustration de ce Type de modèles. Ils ne sont pas directement applicables à des bassins non gaugés du fait de leur dépendance aux mesures de l'écoulement. Cependant, des méthodes de régionalisation utilisant des relations statistiques entre les paramètres du modèle et les caractéristiques du bassin versant ont été développées pour leur utilisation sur des basins non jaugés (Burn and Boorman, 1992 ; Sefton and Howarth, 1998).

## **C -Les modèles à base physique (physically-based, white box) (Freeze et Harlan, 1969 ; Beven, 1989 ; Beven, 2002) :**

Sont fondés sur les principes mécanistes de Conservation de la masse, du moment et de l'énergie. Concrètement, les équations qui génèrent ces modèles sont issues des lois de la mécanique des fluides ou de la Physique des écoulements d'eau dans les sols (loi de Richards en milieu non saturé, Loi de Darcy en milieu saturé et loi de Barré Saint-Venant pour le ruissellement de Surface). Leur utilisation pratique date des années 1980 grâce aux progrès de L'informatique.

### **1.2.2) Les modèles continus et événementiels**

#### **A-Les modèles continus**

Tournent tout au long de l'année. Ils utilisent une représentation complète des différents composants du cycle de l'eau. Ces modèles ne nécessitent pas d'initialisation, ce qui est avantageux d'un point de vue opérationnel.

## B -Les modèles événementiels

Ne fonctionnent que lorsqu'un événement pluvieux se Produit. Certains phénomènes sont considérés comme prépondérants dans la représentation de ces modèles tandis que d'autres phénomènes peuvent être négligés. Par exemple pour la prévision des crues éclair, seule la génération du Ruissellement de surface et la décrue peuvent être représentées ; les processus plus lents comme l'évapotranspiration et la redistribution des eaux dans les sols sont Généralement négligés. Contrairement aux modèles continus, les modèles événementiels doivent être initialisés

### 1.3) Définition de critères de performance objectifs

Une simple analyse visuelle des résultats d'une simulation n'est pas une évaluation objective du modèle. En effet, l'œil humain n'est pas capable de voir toutes les différences qui peuvent exister entre deux courbes d'allure générale similaire. Ainsi nous avons besoin de nous doter de critères objectifs pour comparer les simulations aux observations et pour hiérarchiser des simulations qui « ont l'air » équivalentes. Plusieurs critères objectifs mathématiques existent pour quantifier la distance entre les observations et la simulation.

La plus répandue de ces fonctions objectives est le critère de Nash-Sutcliffe (Nash et Sutcliffe, ou efficacité  $E$  :

$$\text{Éq. 1} \quad E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n_{obs}} (Y_{imod} - Y_{iobs})^2}{\sum_{i=1}^{n_{obs}} (Y_{imod} - \bar{Y}_{obs})^2}$$

Où  $Y_{imod}$  est la variable simulée,  $Y_{iobs}$  est la variable observée,  $\bar{Y}_{obs}$  est la moyenne des observations et  $n_{obs}$  le nombre d'observations. Ce critère quantifie la fraction de la variance observée qui est prise en compte par le modèle. Il prend des valeurs entre  $-\infty$  et 1. Plus l'efficacité est proche de 1, meilleure est l'accord entre la modélisation et l'observation. Notons qu'une efficacité négative signifie que les valeurs simulées conduisent à de moins bons résultats que si la valeur moyenne des observations était utilisée comme prédicteur.

Ce critère présente tout de même l'inconvénient de donner beaucoup de poids aux valeurs Fortes. Nous pourrions alors utiliser la même formulation sur le logarithme de la variable (si celle-ci ne prend pas de valeur nulle) ou sur la racine de la variable afin d'augmenter le poids des valeurs faibles.

Par exemple, dans le cas d'une application sur le débit, pour représenter correctement les pics de crues, on utilise l'efficacité classique. Dans le cas où on s'intéresse plutôt au débit d'étiage, on utilisera de préférence l'efficacité sur les logarithmes ou sur les racines afin de diminuer le poids des fortes valeurs de débit.

Tableau 4 : Critères d'évaluation de la performance de SWAT (Moriassi et al. 2007)

NS	Evaluation de la performance
très bonne	$0.75 < NS \leq 1.00$
Bonne	$0.65 < NS \leq 0.75$
Satisfaisante	$0.50 < NS \leq 0.65$
Non satisfaisante	$NS \leq 0.50$

La mesure de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) est aussi un critère souvent utilisé pour mesurer l'écart entre la simulation et l'observation, en donnant notamment une idée de la dispersion entre les deux. Plus elle sera faible et plus l'écart entre la simulation et les observations sera faible.

$$\text{Éq. 2} \quad RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_{imod} - Y_{iobs})^2}$$

De la même façon qu'avec l'efficience, ce critère peut être utilisé sur les logarithmes ou les racines des variables puisque ce critère a tendance à donner beaucoup de poids à la bonne représentation des fortes valeurs et donc à biaiser par exemple les simulations des récessions de crues (Boyle et al. 2000).

En s'appuyant sur la **corrélation** entre la série simulée et la série observée, nous pourrions aussi chercher à maximiser le coefficient de détermination  $R^2$  :

$$\text{Éq. 3} \quad R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n ((Y_{iobs} - \overline{Y_{obs}})(Y_{imod} - \overline{Y_{imod}}))^2}{\sum_{i=1}^n (Y_{iobs} - \overline{Y_{obs}})^2 \sum_{i=1}^n (Y_{imod} - \overline{Y_{imod}})^2}$$

Des bonnes valeurs d'efficience ou d'erreur quadratique n'attestent pas de l'absence d'une Erreur systématique. Pour s'affranchir de cela, il est possible d'utiliser le critère de biais **B** qui permet de mesurer la tendance du modèle à sous-estimer ou surestimer les observations :

$$\text{Éq. 4} \quad B = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_{imod} - Y_{iobs})$$

Comme pour l'erreur quadratique ce critère devra être minimisé.



## 1.4) 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 le mieux la réponse hydrologique du bassin versant.

## 2) Le modèle SWAT : Présentation et Application Au bassin d'Aguenza

Le bassin versant est l'unité de gestion du territoire pertinente d'un point de vue hydrologique, écologique et géomorphologique (Chorley, 1969). Il est le cadre analytique à considérer pour toute prise de décision en matière d'aménagement. C'est pourquoi les gestionnaires et les décideurs réclament des outils opérationnels adaptés à cette échelle. Mais le bassin versant est une unité complexe : l'ensemble des composantes du cycle hydrologique y est représenté et des facteurs anthropiques perturbateurs s'y ajoutent souvent. Rares sont les outils qui prennent en compte tous ces aspects de façon spatialisée, répondant ainsi aux attentes des gestionnaires.

Le Soil and Water Assessment Tool (SWAT) a été développé par Jeff Arnold pour l'USDA Agriculture research service en 1993 pour répondre à cette demande. C'est un modèle conceptuel physique semi-empirique distribué permettant de manipuler et d'analyser de nombreuses données hydrologiques et agronomiques.



*Figure 14 : Architecture de l'interface du couplage SWAT et SIG (Bian et al. 1996)*

Le couplage avec le SIG permet de gérer des données de type raster, vecteur et Alphanumériques. Il facilite et automatise la préparation des données d'entrées, il rend plus convivial la phase d'intégration, de manipulation et le paramétrage des données liées à la simulation. Le paramétrage des données numériques par l'utilisateur et la visualisation des résultats s'effectuent par le biais des formats « .Dbase ». Cependant, les fichiers de sorties sont convertis par SWAT en format ASCII possédant leurs propres structures. Plus d'une centaine de fichiers sont requis pour le bon fonctionnement du modèle : modèle numérique de

terrain, pédologie, réseau hydrographique, données climatiques de températures et précipitations, occupation du sol, pratiques agricoles, etc....

## 2.1) Aspect hydrologique de SWAT

Comme tout modèle hydrologique, SWAT reproduit le cycle de l'eau sur le bassin versant de manière simplifiée. On peut schématiser le fonctionnement du modèle par trois gros modules principaux qui communiquent entre eux par la circulation d'eau.

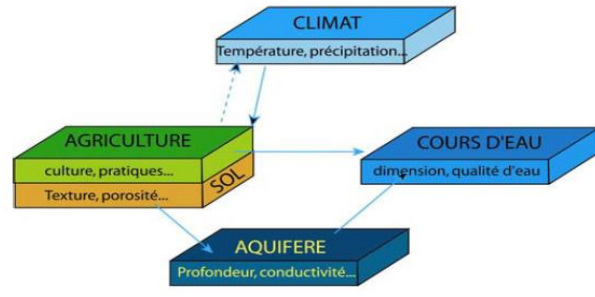


Figure 15 : Fonctionnement schématique de SWAT (d'après DUROS 2001)

Le bilan hydrique contrôle les différents processus hydrologiques se déroulant sur le bassin :

$$SW^t = SW + \sum_{t=1}^t (R_i - Q_i - E_{ti} - P_i - Q_{ri})$$

$SW_t$  = contenu final en eau du sol (mm)

$P_i$  = percolation (mm)

$SW$  = eau disponible pour les plantes (mm)

$Q_{ri}$  = débit d'étiage (mm)

$R_i$  = précipitation (mm)

$E_{ti}$  = évapotranspiration (mm)

$Q_i$  = ruissellement de surface (mm)

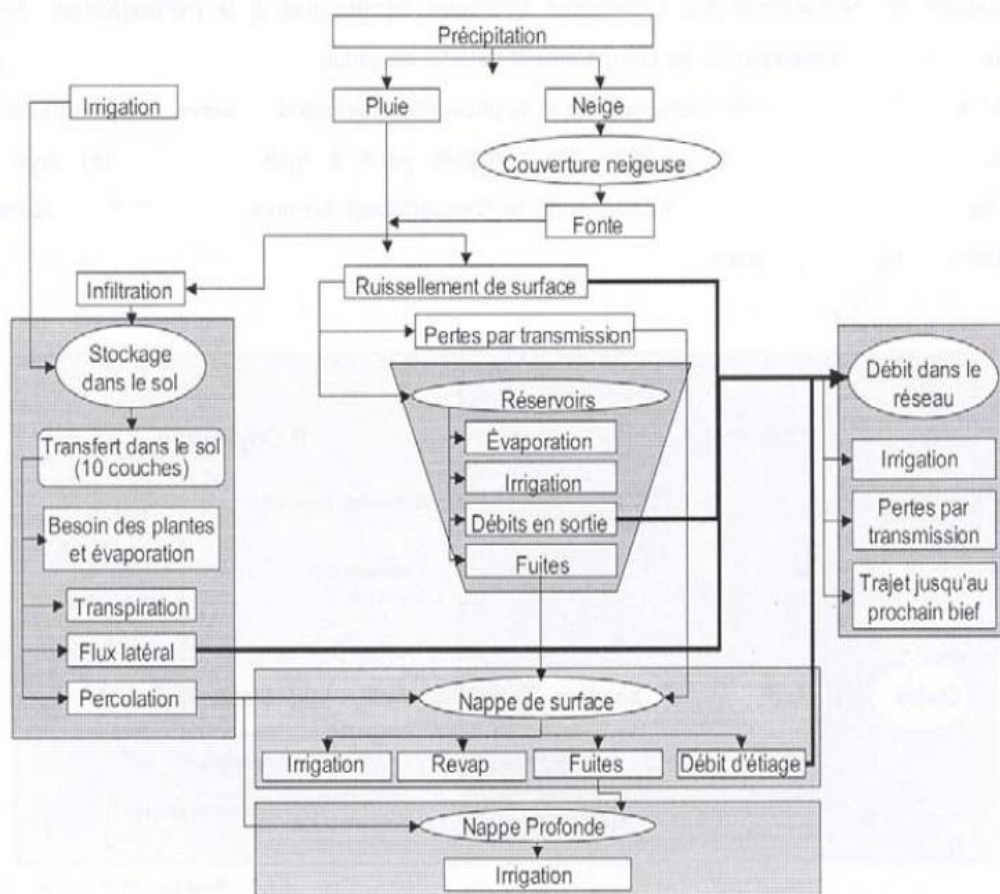


Figure 16 : Structure hydrologique de SWAT (source Eckard et Arnold 2000)

La figure qui présente la structure hydrologique de SWAT montre les différents Processus intrinsèque du bilan hydrique. Ainsi, on peut voir que l'hydrologie est modélisée en deux phases :

\*Une première phase terrestre qui simule le ruissellement, l'infiltration, l'évapotranspiration (plusieurs algorithmes au choix selon les données disponibles) l'exportation et le transport de sédiments et d'éléments nutritifs vers le réseau hydrographique.

\*La seconde phase est une phase de transport en rivière qui caractérise le déplacement de ces éléments depuis leur entrée dans le réseau jusqu'à l'exutoire du bassin.

Certains processus décrits dans la figure 16 sont donc modélisés sur des bases déterministes, ils obéissent à des équations physiques, en revanche d'autres sont caractérisés par des relations empiriques ou des fonctions de transfert.

## 2.2) Spatialisation des processus

Afin de prendre en compte les hétérogénéités du milieu, et mieux modéliser les différents comportements des processus, SWAT va spatialiser les types de réponses, c'est-à-dire que le modèle va calculer la valeur quantitative des différents processus sur chaque unité spatiale.

L'unité de base du calcul est la HRU (Hydrological Response Unit). Cette discrétisation spatiale en sous unités correspond à la combinaison d'un sous bassin versant d'un type de sol

et d'un type d'occupation dont les paramètres vont influencer sur les phases du bilan hydrique (ruissellement, infiltration, évapotranspiration...). Une HRU aura donc un comportement hydrologique propre et homogène. Les différents flux (eaux, sédiments, phosphore) sont donc calculés sur la base de cette unité puis sommés pour fournir une valeur globale à l'exutoire du bassin.

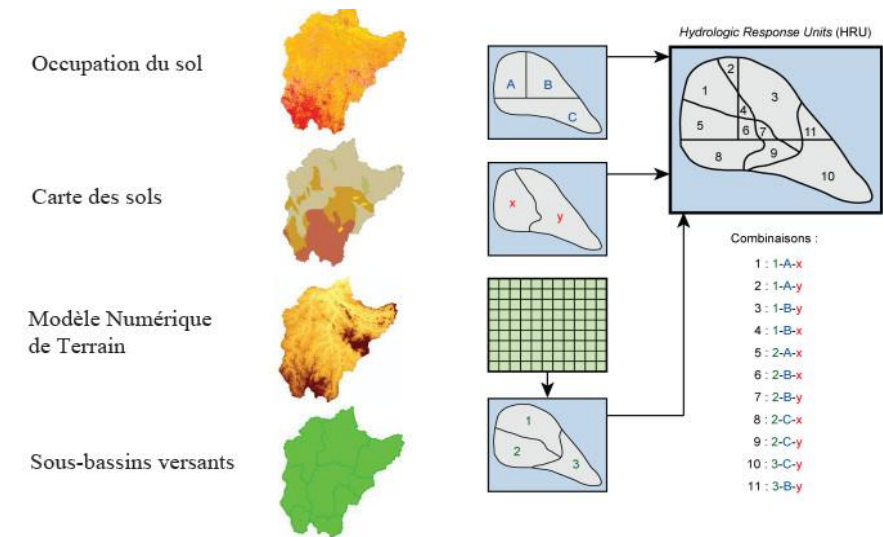


Figure 17 : Constitution des HRU dans SWAT (adapté de Ruelland et al. 2004)

## 2.3) Calibration et validation du modèle

La phase finale de modélisation consiste ensuite à calibrer le modèle, c'est à dire à modifier certains paramètres pour obtenir, dans un premier temps la meilleure corrélation possible entre les débits simulés et les débits observés dans le cas d'un modèle hydrologique, puis selon la problématique tenter de faire concorder les valeurs d'érosion, ou dans le cas du projet les valeurs de phosphore au niveau de l'exutoire du bassin. La détermination des paramètres du modèle s'effectue par itération (tâtonnement par essais et erreurs), bien que les différentes réponses données par le modèle donnent toujours une idée des paramètres sur lesquels il faut influencer.

## 2.4) Paramétrage des données d'entrée et mise en Œuvre du modèle

### 2.4.1) Les données nécessaires au fonctionnement de SWAT

A noter que Toutes les couches possèdent les mêmes systèmes de coordonnées et de projection. Dans notre cas, les systèmes de projection et de coordonnées sont :

- Système de projection : Merichich Degree
- Système de coordonnées : sud Maroc

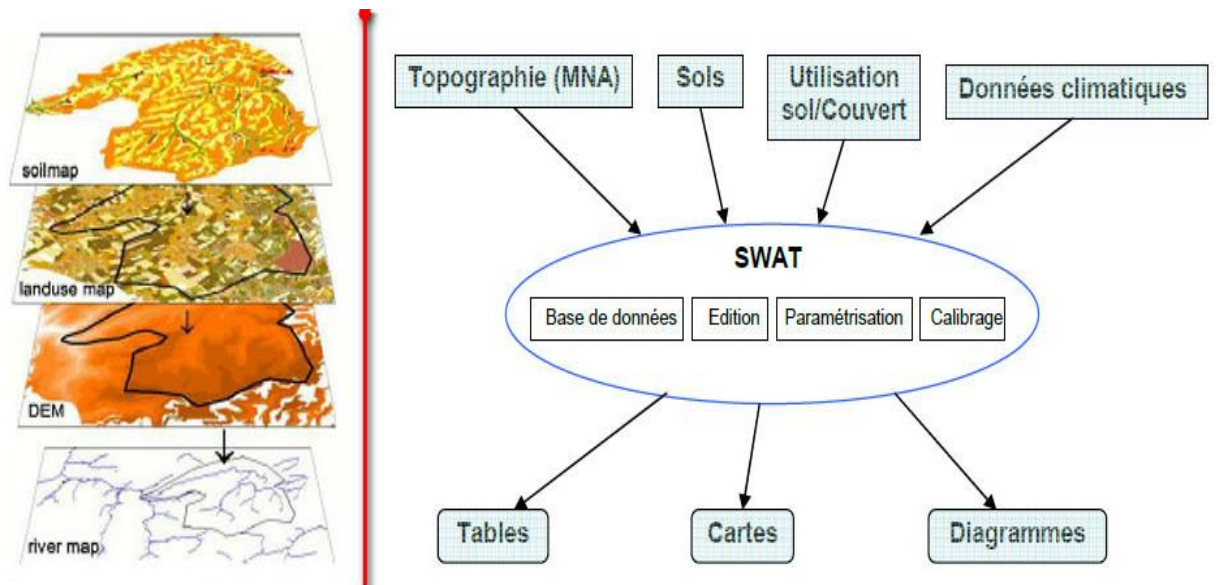
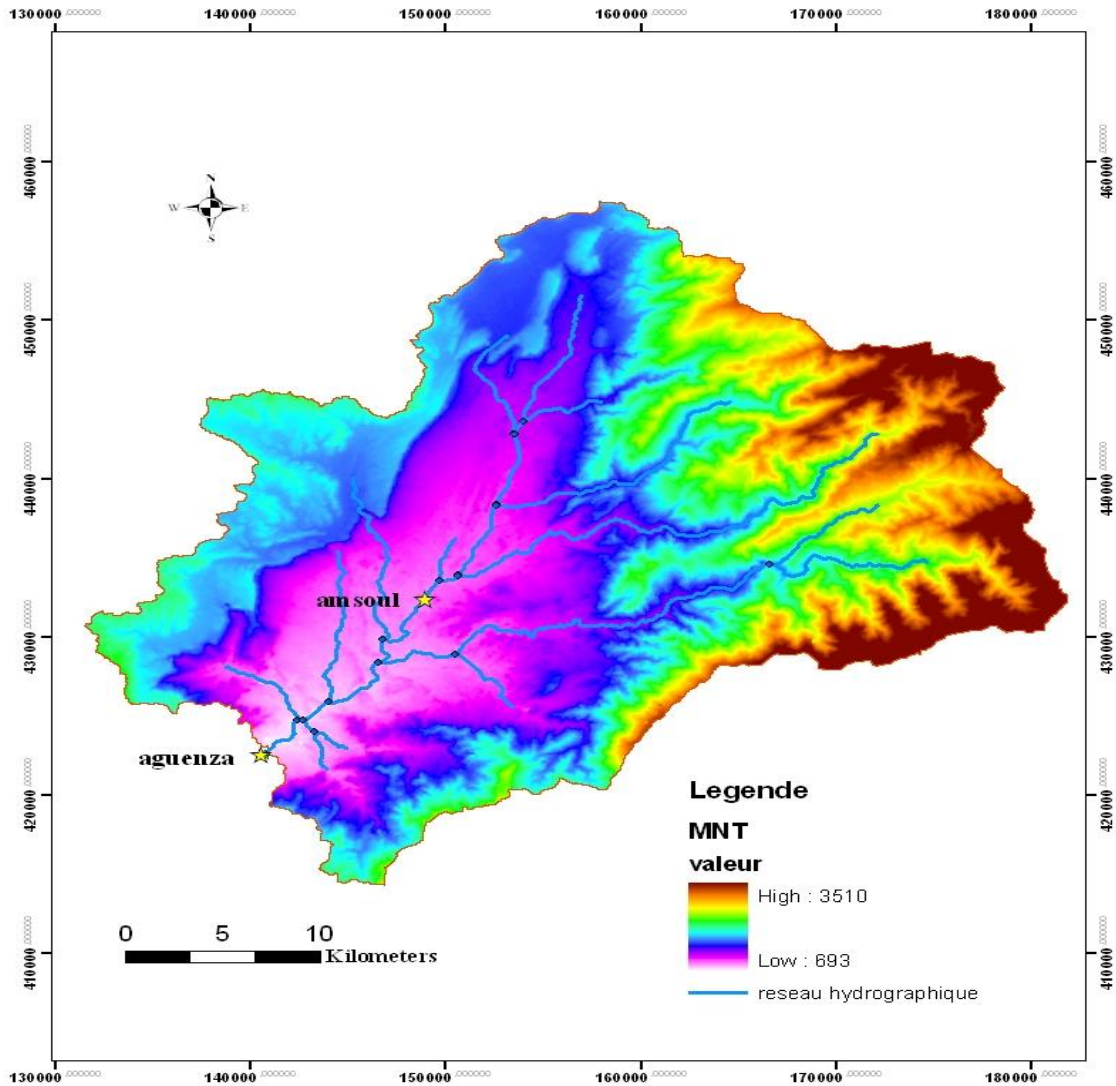


Figure 18 Les différents thèmes de cartes requis en Entrée de SWAT (Holvoet et al. 2005) et un Schéma méthodologique de mise en œuvre de SWAT (adapté de Ruelland et al.2004)

## A -Topographie

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



*Figure 19 : Carte de modèle numérique de terrain du bassin versant d'Aguenza (carte établie à l'aide d'ArcSWAT)*

Caractéristiques :

Source : données ASTER GDEM v2 corrigées et complétées avec le produit PlanetDEM90

Résolution : 30m

Couverture : mondiale

Projection : géographique WGS 84

Format de fichier : Géo Tiff, GTED 2

**B -Carte d'occupation du sol**

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

des cartes mondiale d'occupation du sol à partir des observations en entrée du capteur MERIS à 300m à bord de la mission du satellite ENVISAT. ESA met à la disposition des cartes de la couverture terrestre, qui couvrent 2 périodes : Décembre 2004 - Juin 2006 et de janvier à décembre, 2009

La carte d'occupation du bassin versant d'Aguenza est composée principalement par deux classes :

AGRL : correspond aux terres agricoles génériques.

RNGB : correspond aux gammes graminées.

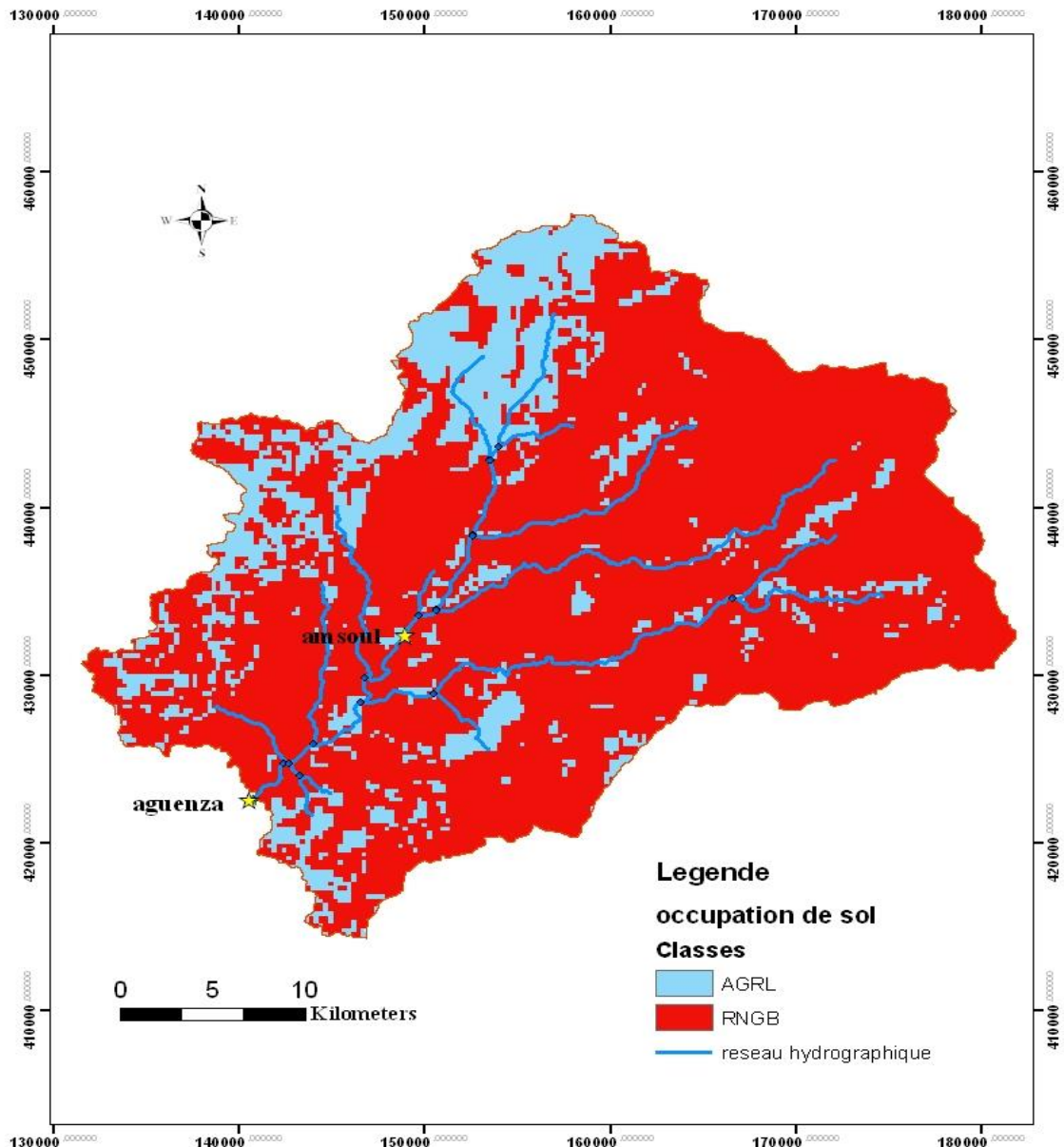


Figure 20 : Carte de type de sol du bassin d'Aguenza (carte établie à l'aide d'ArcSWAT)

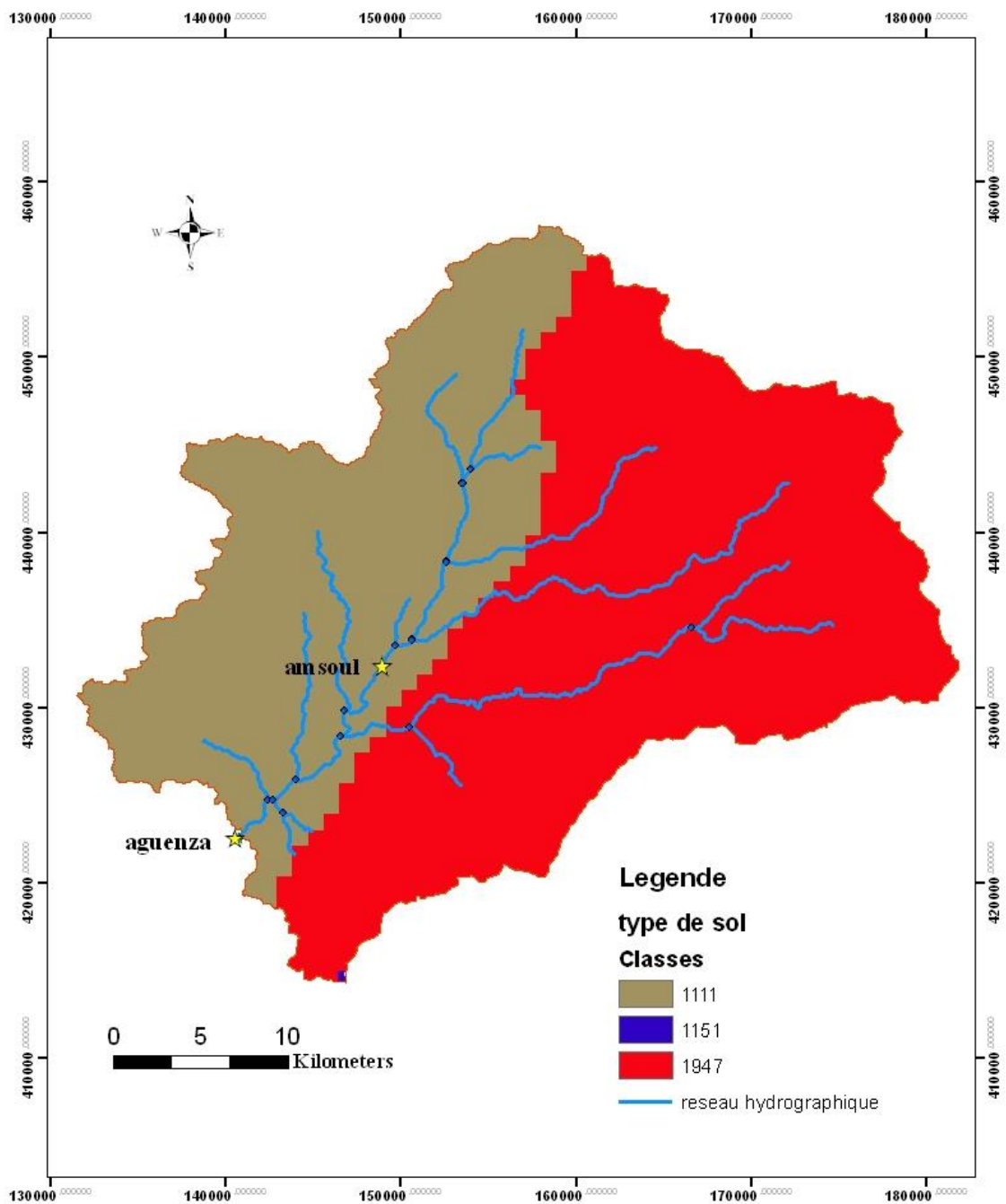
### **C -Carte pédologique**

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

La carte pédologique du bassin versant d'Aguenza est composée principalement par deux types de sols :

- ✓ Les Leptosols (**1151,1947**) : les leptosols de la FAO comprennent « des sols limités en profondeur par une couche cimentée continue située endéans les 30 premiers cm du sol ». C'est-à-dire les couches pétrocalciques, pétrogypsiques, pétroferriques ou un duripan. Les leptosols comprennent également des sols dont la teneur en fragments grossiers est très élevée. (Base de référence mondiale pour les ressources en sols, FAO)
- ✓ Calcisols (**1111**) : les sols à haute teneur en  $\text{CaCO}_3$  appartiennent aux calcisols. Ils sont relativement répandus dans les régions les plus sèches de la terre.





*Figure 21 : Carte de type de sol du bassin d'Aguenza (carte établie à l'aide d'ArcSWAT)*

## D -Données climatiques

L'exécution de SWAT demande diverses données météorologiques :  
Concernant la zone D'étude.

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

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

Dans notre projet les précipitations journalières sur la durée de la simulation sont fournies par les deux stations pluviométriques Aguenza et Amsoul. La température, L'éclairement solaire, la vitesse du vent, les valeurs d'humidité relatives sont téléchargées à partir de NCAR CFSR (Climate Forecast System Reanalysis (<http://climatedataguide.ucar.edu/reanalysis/climate-forecast-system-reanalysis-cfsr>)).

Ces paramètres nous aideront à réaliser un système de génération de données météorologiques Weather Generator Data (WGN)

### 2.4.2) Préparation des bases de données :

#### A -Occupation du sol

Lors de l'étape d'intégration de l'occupation du sol, nous devons fournir au modèle la carte D'occupation des sols que nous venons de préparer ainsi qu'une table reprenant les différentes occupations du sol. ARCSWAT possède sa propre liste d'occupations de sols parmi lesquelles on a choisi celles correspondant aux différentes classes présentes dans notre bassin d'Aguenza. et voilà les classes choisies en accord avec notre carte des sols et son table de correspondance.

*Tableau 5: Table de correspondance pour la carte d'occupation de sol*

OID	Value	SWAT
0	11	AGRL
1	14	AGRL
2	20	AGRL
3	30	RNGB
4	40	FRST
5	50	FRSD
6	60	FRSD
7	70	FRSE
8	90	FRSE
9	100	FRST
10	110	RNGB
11	120	RNGB
12	130	RNGB
13	140	RNGB
14	150	RNGB
15	160	WETL
16	170	WETF
17	180	WETN

<b>18</b>	190	URMD
<b>19</b>	200	RNGB
<b>20</b>	210	WATR
<b>21</b>	220	WATR
<b>22</b>	230	WATR

## B -Caractéristiques du sol

Les différentes données liées aux caractéristiques du sol à fournir au notre Modèle sont :

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

Les paramètres qu'on doit fournir sont présentés dans la figure suivante.

Paramètre	Unités	Signification
SNAM	-	Nom du type de sol
NLAYERS	-	Nombre de couches dans le sol
HYDGRP	-	Groupe hydrologique
SOL_ZMX	mm	Profondeur racinaire maximum du sol
ANION_EXCL	fraction	Fraction de la porosité pour laquelle les anions sont exclus
SOL_CRK	fraction (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	Volume des craquelures (potentiel ou maximum) du sol en fraction du volume total de sol.
TEXTURE	-	Texture du sol
SOL_Z*	mm	Profondeur de la couche (de la surface au fond de la couche)
SOL_BD*	g/cm <sup>3</sup>	Densité apparente humide
SOL_AWC*	mm/mm	Disponibilité en eau de la couche
SOL_CBN*	% en masse	Teneur en carbone organique
SOL_K*	mm/h	Conductivité hydraulique à la saturation
CLAY*	% en masse	Quantité d'argile contenue dans la couche
SILT*	% en masse	Quantité de limon contenue dans la couche
SAND*	% en masse	Quantité de sable contenue dans la couche
ROCK*	% en masse	Quantité de fragments rocheux contenus dans la couche
SOL_ALB*	nombre entre 0 et 1	Albédo du sol humide
USLE_K*	nombre sans dimension	Facteur d'érodibilité du sol
SOL_EC*	dS/m	Conductivité électrique du sol

*Figure 22 : Les paramètres de sol*

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

Les différents Paramètres estimés ou calculées requis pour les caractéristiques des sols sont :

\*Les paramètres ANION\_EXCL et SOL\_CRK, nous constatons qu'ils sont égaux à 0,5 pour tous les types de sol. \*Le paramètre SOL\_EC est, lui, nul pour tous les sols. Nous allons donc attribuer ces valeurs par défaut à nos paramètres.

\*Les paramètres NLAYERS ; HYDGRP ; SOL-Z ; SOL-CBN ; CLAY ; SILT ; SAND ; ROCK; TEXTURE sont extraits à partir de la base de données des sols élaborée par HWSD qui fournit un ensemble d'informations sur le sol.

\*Pour les paramètres SOL\_ALB et USLE\_K, nous voyons que les valeurs sont plus variables. Nous allons donc comparer nos sols à ceux de la base de données d'ARCSWAT et attribuer à ces paramètres les valeurs observées pour les sols ayant une composition proche.

Les paramètres SOL-BD ; SOL-K ; SOL-AWC sont calculés à partir les équations de la figure ci-dessus, SOL-BD = pN SOL-K = Ks SOL-AWC = PAW (Saxton K.E et .all 2006)

Variable	Equation	R <sup>2</sup> /S <sub>e</sub>	Eq.
<b>Moisture Regressions</b>			
$\theta_{1500}$	$\theta_{1500} = \theta_{1500r} + (0.14 \times \theta_{1500r} - 0.02)$ $\theta_{1500r} = -0.024S + 0.487C + 0.006OM$ $+ 0.005(S \times OM) - 0.013(C \times OM)$ $+ 0.068(S \times C) + 0.031$	0.86/0.02	1
$\theta_{33}$	$\theta_{33} = \theta_{33r} + [1.283(\theta_{33r})^2 - 0.374(\theta_{33r}) - 0.015]$ $\theta_{33r} = -0.251S + 0.195C + 0.011OM$ $+ 0.006(S \times OM) - 0.027(C \times OM)$ $+ 0.452(S \times C) + 0.299$	0.63/0.05	2
$\theta_{(S-33)}$	$\theta_{(S-33)} = \theta_{(S-33)r} + (0.636\theta_{(S-33)r} - 0.107)$ $\theta_{(S-33)r} = 0.278S + 0.034C + 0.022OM$ $- 0.018(S \times OM) - 0.027(C \times OM)$ $- 0.584(S \times C) + 0.078$	0.36/0.06	3
$\psi_e$	$\psi_e = \psi_{et} + (0.02\psi_{et}^2 - 0.113\psi_{et} - 0.70)$ $\psi_{et} = -21.67S - 27.93C - 81.97\theta_{(S-33)}$ $+ 71.12(S \times \theta_{(S-33)}) + 8.29(C \times \theta_{(S-33)})$ $+ 14.05(S \times C) + 27.16$	0.78/2.9	4
$\theta_s$	$\theta_s = \theta_{33} + \theta_{(S-33)} - 0.097S + 0.043$	0.29/0.04	5
$\rho_N$	$\rho_N = (1 - \theta_s)2.65$		6
<b>Density Effects</b>			
$\rho_{DF}$	$\rho_{DF} = \rho_N \times DF$		7
$\theta_{S-DF}$	$\theta_{S-DF} = 1 - (\rho_{DF}/2.65)$		8
$\theta_{33-DF}$	$\theta_{33-DF} = \theta_{33} - 0.2(\theta_s - \theta_{S-DF})$		9
$\theta_{(S-33)DF}$	$\theta_{(S-33)DF} = \theta_{S-DF} - \theta_{33-DF}$		10
<b>Moisture-Tension</b>			
$\psi_{(1500-33)}$	$\psi_0 = A(\theta)^{-B}$		11
$\psi_{(33-\psi_e)}$	$\psi_0 = 33.0 - [(0 - \theta_{33})(33.0 - \psi_e)/(\theta_s - \theta_{33})]$		12
$\theta_{(\psi_e-0)}$	$\theta = \theta_s$		13
$A$	$A = \exp(\ln 33 + B \ln \theta_{33})$		14
$B$	$B = [\ln(1500) - \ln(33)]/[\ln(\theta_{33}) - \ln(\theta_{1500})]$		15
<b>Moisture-Conductivity</b>			
$K_S$	$K_S = 1930(\theta_s - \theta_{33})^{(3-\lambda)}$		16
$K_\theta$	$K_\theta = K_S(\theta/\theta_s)^{[3 + (2/\lambda)]}$		17
$\lambda$	$\lambda = 1/B$		18
<b>Gravel Effects</b>			
$R_v$	$R_v = (\alpha R_w)/[1 - R_w(1 - \alpha)]$		19
$\rho_B$	$\rho_B = \rho_N(1 - R_v) + (R_v \times 2.65)$		20
$PAW_B$	$PAW_B = PAW(1 - R_v)$		21
$K_b/K_s$	$K_b/K_s = \frac{1 - R_w}{[1 - R_w(1 - 3\alpha/2)]}$		22
<b>Salinity Effects</b>			
$\Psi_O$	$\Psi_O = 36EC$		23
$\Psi_{O0}$	$\Psi_{O0} = \frac{\theta_s}{\theta} (36EC)$		24

Figure 23 : Les équations pour le calcul des caractéristiques du sol (Saxton K.E et .all 2006)

Symbol	Definition
A, B	Coefficients of moisture-tension, Eq. [11]
C	Clay, %w
DF	Density adjustment Factor (0.9–1.3)
EC	Electrical conductance of a saturated soil extract, $\text{dS m}^{-1}$ ( $\text{dS/m} = \text{mili-mho cm}^{-1}$ )
FC	Field Capacity moisture (33 kPa), %v
OM	Organic Matter, %w
PAW	Plant Avail. moisture (33–1500 kPa, matric soil), %v
PAW <sub>B</sub>	Plant Avail. moisture (33–1500 kPa, bulk soil), %v
S	Sand, %w
SAT	Saturation moisture (0 kPa), %v
WP	Wilting point moisture (1500 kPa), %v
$\theta_\psi$	Moisture at tension $\psi$ , %v
$\theta_{1500t}$	1500 kPa moisture, first solution, %v
$\theta_{1500}$	1500 kPa moisture, %v
$\theta_{33t}$	33 kPa moisture, first solution, %v
$\theta_{33}$	33 kPa moisture, normal density, %v
$\theta_{33\text{-DF}}$	33 kPa moisture, adjusted density, %v
$\theta_{(S\text{-}33)t}$	SAT-33 kPa moisture, first solution, %v
$\theta_{(S\text{-}33)}$	SAT-33 kPa moisture, normal density %v
$\theta_{(S\text{-}33)\text{DF}}$	SAT-33 kPa moisture, adjusted density, %v
$\theta_S$	Saturated moisture (0 kPa), normal density, %v
$\theta_{S\text{-DF}}$	Saturated moisture (0 kPa), adjusted density, %v
$\psi_0$	Tension at moisture $\theta$ , kPa
$\psi_{et}$	Tension at air entry, first solution, kPa
$\psi_e$	Tension at air entry (bubbling pressure), kPa
$K_S$	Saturated conductivity (matric soil), $\text{mm h}^{-1}$
$K_b$	Saturated conductivity (bulk soil), $\text{mm h}^{-1}$
$K_\theta$	Unsaturated conductivity at moisture $\theta$ , $\text{mm h}^{-1}$
$\rho_N$	Normal density, $\text{g cm}^{-3}$
$\rho_B$	Bulk soil density (matric plus gravel), $\text{g cm}^{-3}$
$\rho_{DF}$	Adjusted density, $\text{g cm}^{-3}$
$\lambda$	Slope of logarithmic tension-moisture curve
$\alpha$	Matric soil density/gravel density (2.65) = $\rho/2.65$
Rv	Volume fraction of gravel (decimal), $\text{g cm}^{-3}$
Rw	Weight fraction of gravel (decimal), $\text{g g}^{-1}$
$\Psi_O$	Osmotic potential at $\theta = \theta_S$ , kPa
$\Psi_{O\theta}$	Osmotic potential at $\theta < \theta_S$ , kPa

Figure 24 : Définition des symboles des équations de sol (Saxton K.E et .all 2006)

## C -Système de génération de données météorologiques (Weather Generator data)

Un système de génération de données météorologiques (Weather Generator data) inclus dans le modèle permet également à l'utilisateur de générer des séries temporelles à partir des caractéristiques moyennes (moyenne, écart-type, coefficient d'asymétrie, ...) des différentes variables. Une composante aléatoire est ajoutée grâce à un générateur de nombres aléatoires afin de générer des séries différentes à partir d'un seul set de valeurs moyennes pour chaque Variable. Cette fonctionnalité permet donc d'effectuer des simulations dans le cas où les données météorologiques recueillies ne seraient pas suffisamment abondantes ou de mauvaise qualité. Ceci constitue un avantage certain pour les pays en développement puisque les bases de données météorologiques n'y sont pas toujours très fournies. Ce générateur de données météorologiques permettra également d'effectuer des projections tenant compte de changements climatiques futurs et d'en étudier l'impact sur le bilan hydrologique.

Comme dans le cas des caractéristiques des sols, ces données devront être ajoutées à la base de données d'Arcswat via un éditeur de bases de données ou directement dans le fichier Access.

Edition du fichier « Weather Generator Data »

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

Les variables qu'on a calculés sont (pour chaque mois de l'année) :

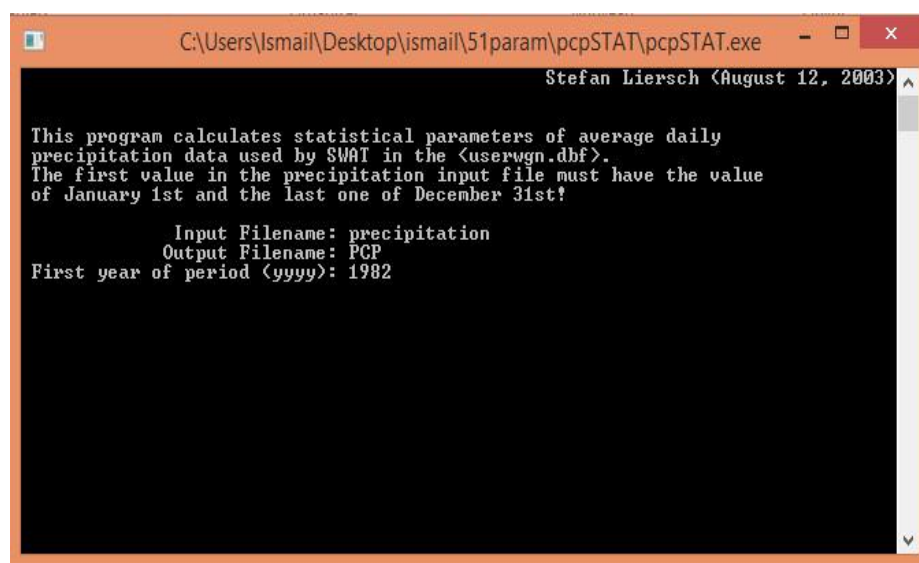
- **TMPMXa** : moyenne mensuelle (mois a) des températures maximales journalières.
- **TMPMNa** : moyenne mensuelle (mois a) des températures minimales journalières.
- **TMPSTDMXa** : déviation standard des températures maximales journalières pour le mois a.
- **TMPSTDMNa** : déviation standard des températures minimales journalières pour le mois a.
- **PCPMMa** : précipitations mensuelles (mois a) moyennes.
- **PCPSTDa** : déviation standard des précipitations journalières pour le mois a.
- **PCPSKWa** : coefficient d'asymétrie pour les précipitations journalières pour le mois a.
- **PR\_W1a** : probabilité qu'un jour humide suive un jour sec durant le mois a.
- **PR\_W2a** : probabilité qu'un jour humide suive un jour humide durant le mois a.
- **PCPDa** : Nombre moyen de jours où des précipitations sont enregistrées durant le mois a.
- **RAINHHMXa** : Précipitations maximum durant 30 minutes sur toutes les années d'enregistrement pour le mois a.
- **SOLARAVa** : éclairage solaire journalier moyen pour le mois a.
- **DEWPTa** : moyenne de la température journalière du point de rosée pour le mois a.
- **WINDAVa** : vitesse moyenne du vent pour le mois a.

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

Les variables de PCPMMa, PCPSTDa, PCPSKWa, PR\_W1a, PR\_W2a et PCPDa sont calculés à l'aide de programme pcpSTAT.

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

Certains de ces paramètres peuvent être calculés sans difficulté, par exemple en utilisant une application tel que MICROSOFT EXCEL, alors que le calcul de PR\_W1 et PR\_W2 peut prendre beaucoup de temps.

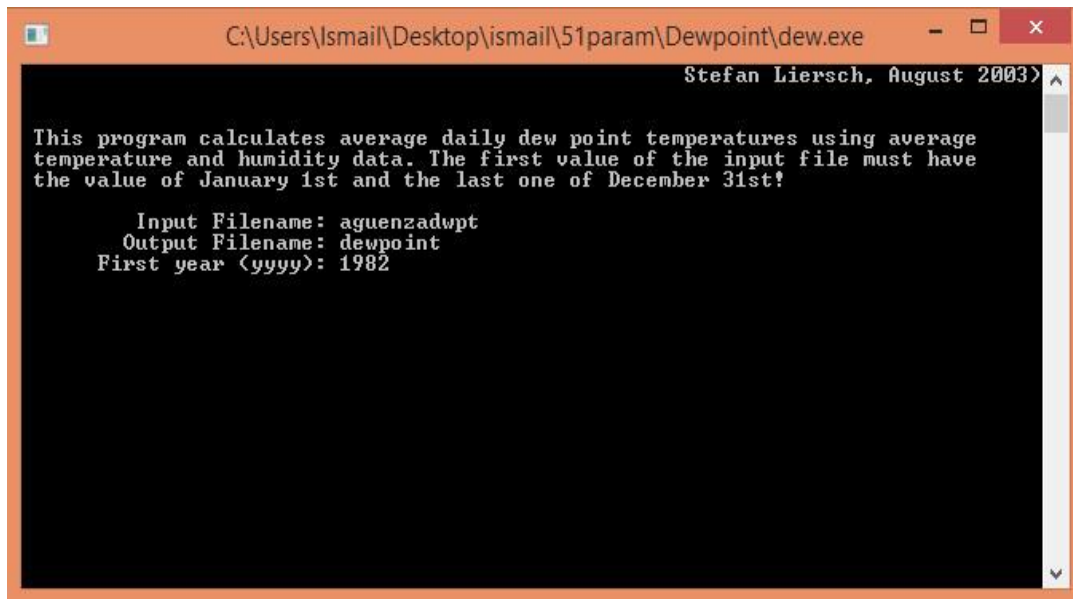


```
C:\Users\Ismail\Desktop\ismail\51param\pcpSTAT\pcpSTAT.exe - [x]
Stefan Liersch <August 12, 2003>
This program calculates statistical parameters of average daily
precipitation data used by SWAT in the <userwgn.dbf>.
The first value in the precipitation input file must have the value
of January 1st and the last one of December 31st!
      Input Filename: precipitation
      Output Filename: PCP
First year of period <yyyy>: 1982
```

*Figure 25 : Interface du programme pcpSTAT*

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

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



*Figure 26 : Interface du programme pcpSTAT*

### 2.4.3) la mise en œuvre de SWAT

#### A -Discrétisation spatiale

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

À noter que L'extraction du réseau hydrographique est d'une importance capitale pour le bon déroulement de la simulation, aussi il est très important de prendre des précautions et d'être attentif lors de cette étape

#### B -Intégration des données sol, occupation du sol, pente

Une fois le réseau hydrographique déterminé et les limites du bassin versant extraites, SWAT nous propose ensuite d'intégrer les données sols, les données d'occupation du sol, la pente et définir les HRUs.

L'intégration de ces données se fait par l'intermédiaire de trois couches d'information.

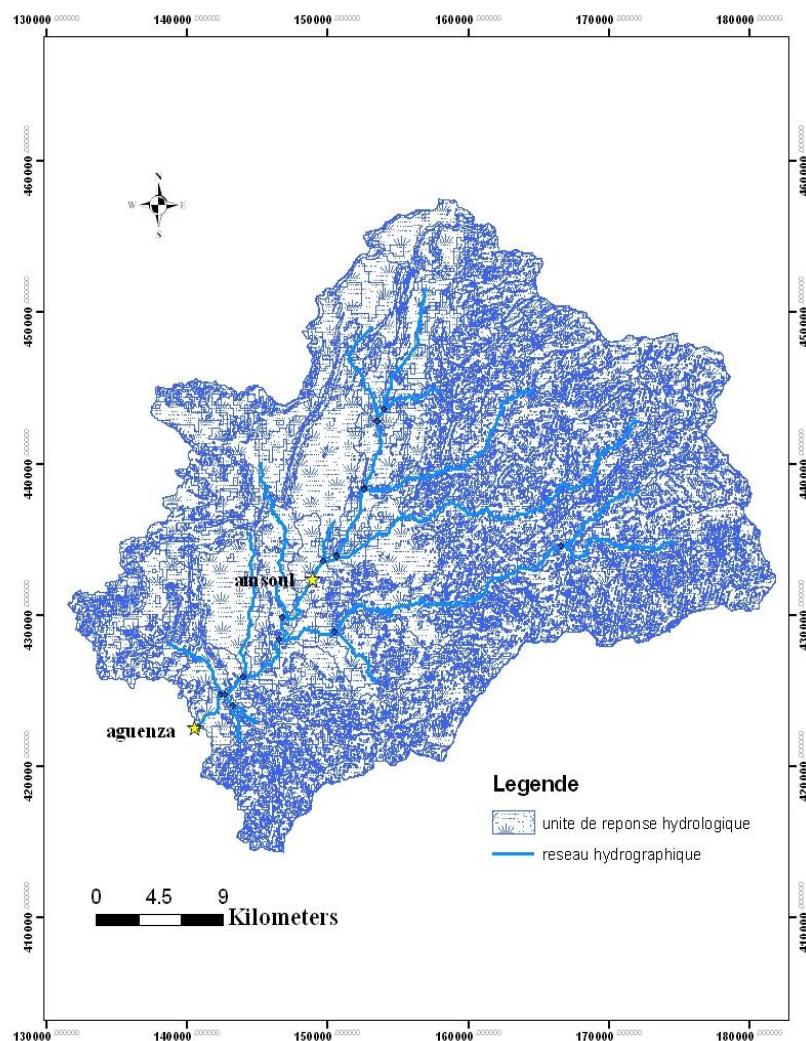
#### C -Définition des HRUs

Une fois que les couches de sol, d'occupation des sols et de pente ont été importées, la distribution des HRU sur le bassin doit être déterminée. La commande de distribution des HRUs (figure27) de SWAT permet à l'utilisateur de spécifier certains critères pour la distribution.

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



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



*Figure 27 : Carte des HRUs du bassin d'Aguenza (carte établie à l'aide d'ArcSWAT)*

## D -Intégration des données climatiques

Les données climatiques qui seront utilisées pour la simulation sur le bassin sont importées une fois que les HRUs ont été distribuées. Une fenêtre spéciale permet l'intégration de l'ensemble des données climatiques. Cette interface nous permet de charger la localisation des deux stations météo Aguenza et Amsoul pour l'étude du bassin. Par la suite on intègre les données des précipitations journalières des deux stations et pour le reste des paramètres climatiques viendraient à faire défaut, SWAT effectue une simulation de ceux-ci à partir des données mensuelles de références de la station.

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

*Tableau 6 : Format de fichiers WGNlocations*

OID	ID	NAME	XPR	YPR
1	2	W34250	140550	422600
2	3	W35000	148975	432400

Puis deux fichiers contenant les valeurs journalières doivent être créés portant les noms de W34250 pour Aguenza et W35000 pour Amsoul et indiquées dans le champ NAME dans la table de localisation du pluviomètre afin que celui-ci soit reconnu et associé au pluviomètre correspondant. Cette dernière table n'apparaît jamais et il n'y donc pas besoin d'indiquer sa direction, le modèle va automatiquement chercher les données dans le fichier du projet où on aura pris soin de placer la table. Ces deux tables sont créées en format DBF.

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

### **E -Préparation des tables d'entrée par le modèle**

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

### **F -Simulation**

#### *Options de simulations*

L'essentiel des données est maintenant intégré au modèle et celui-ci est donc prêt pour la simulation. Plusieurs options s'offrent alors à l'utilisateur. Le choix concernant ces options se fait par le biais de la boîte de dialogue ci-après. La première chose à définir est la période de temps sur laquelle la simulation va être effectuée.

#### *Fichiers de sortie*

Des fichiers de sorties sont générés à chaque nouvelle simulation de SWAT. Le fichier résumant les processus sur le bassin (output.std) permet de voir à chaque pas de temps, les valeurs du ruissellement, de l'infiltration, de l'évapotranspiration, des pertes de sédiments etc...

Le fichier « .sbs » présente les mêmes paramètres que précédemment mais en les détaillant au niveau des HRU.

Le fichier « .bsb » détaille les valeurs des processus à l'échelle du sous bassin versant.

Enfin, le fichier « .rch » montre les valeurs des paramètres concernant l'eau dans le cours d'eau (débit à l'exutoire, matières en suspension, phosphore total...).

Ces fichiers sortent sous la forme de fichiers texte délimités ou fichiers Access (mdb). A certains niveaux et pour certains paramètres, il est possible de les représenter sous forme graphique en important le fichier sous Excel et en délimitant correctement les colonnes

souhaitées. Il est ainsi possible de profiter des capacités d'analyses statistiques du logiciel, et c'est le cas pour nous où l'analyse des résultats de simulation a été effectuée sous Excel en récupérant la table contenant les données de débits sortants notamment.

### G -Calage et validation

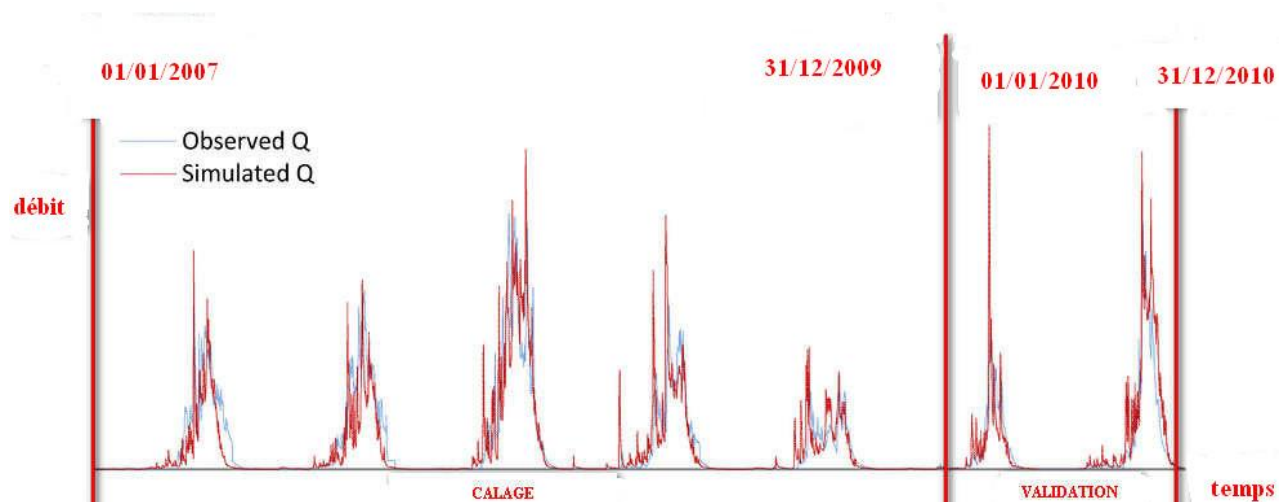
La procédure de calage-validation nécessite le choix d'une période de calage et d'une ou plusieurs périodes de validation.

\*La période de calage dure 3 ans, de 01/01/2007 à 31/12/2009, le calage consiste en l'ajustement des paramètres du modèle permettant de minimiser les écarts entre débits observés et débits simulés. Pour ce faire, nous faisons varier les paramètres les plus prépondérants afin d'obtenir une simulation correcte tant au niveau hydrologique que d'un point de vue physique.

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

En effet, un modèle hydrologique robuste est capable de représenter les processus d'écoulement quelles que soient les conditions météorologiques mises en jeu. Dans notre étude, on a validé avec l'année 2010.

Ce calage manuel consiste à adapter les valeurs de **14** paramètres de nature empirique choisis. Comme étant prépondérants pour le calage jusqu'à obtenir des sorties du modèle les plus proches possibles des données observées. Nous comparons alors les débits journaliers simulés à l'exutoire avec les débits journaliers des cours d'eau mesurés à la station d'Aguenza.



*Figure 28 : Période de calage et validation de modèle*

### **3) Mise en œuvre de modèle GR4J dans le bassin d'Aguenza**

#### **3.1) Description du modèle**

Le modèle GR4J fait partie des modèles GR (Génie Rural) conçus depuis 1983 au Cemagref D'Antony. Il s'agit d'un modèle qui ne possédant que 4 paramètres et fonctionnant au pas de temps journalier. Ce modèle est développé selon une approche que ses concepteurs résument de la façon suivante :

- ✓ Le bassin versant est vu comme une seule entité
- ✓ L'approche adoptée est empirique (pas d'usage a priori d'équations physiques) ;
- ✓ Les structures de modèles sont développées à partir de structures les plus simples, progressivement complexifiées ;
- ✓ La complexité du modèle est conditionnée par la capacité du modèle à reproduire la transformation pluie-débit.
- ✓ On recherche les structures les plus générales possible ;
- ✓ Le test en calage-contrôle, sur de grands échantillons de bassins, est le mode d'évaluation standard des modèles ;
- ✓ Les modèles sont évalués de manière relative (pas de bons modèles, seulement des modèles meilleurs que d'autres).

GR4J est un modèle pluie-débit il simule le débit à l'exutoire d'un bassin versant, en fonction de données (mesures ou prévisions) de pluies et d'évapotranspiration potentielle sur la totalité du bassin.

Plusieurs versions de GR4J ont été mises au point. Ici, nous utiliserons la plus récente, la version améliorée par Perrin et al. (2003). A noter qu'il existe des versions plus récentes du modèle existent : à cinq paramètres (GR5J ; Le Moine, 2008) et à six paramètres (GR6J ; Pushpalatha, 2013) permettant notamment une simulation améliorée des étiages.

Nous avons donc choisi ce modèle pour ses qualités de robustesse et de simplicité, faisant de lui un outil opérationnel performant bien qu'il existe actuellement un grand nombre de modèles pluie-débit conceptuels globaux, correspondant à des agencements très variés de réservoirs et de fonctions mathématiques. Une étude récente (Perrin, 2000 ; Perrin et al. 2001 ; Perrin, 2002) a comparé GR4J à une sélection de ces modèles, et a pu montrer que malgré sa grande parcimonie, GR4J obtenait des résultats égaux aux meilleurs modèles de la littérature au pas de temps journalier. La parcimonie étant un élément essentiel pour assurer la robustesse des prévisions de crue, GR4J nous a paru être un bon outil de recherche.

#### **3.2) Principe de fonctionnement de modèle GR4J :**

La Figure 29 représente le schéma de principe de GR4J : il s'agit d'un modèle à deux réservoirs (un réservoir de production et un réservoir de routage) ;

L'apport pluviométrique  $P$ , après une phase d'interception, se répartit entre écoulement profond et remplissage du réservoir de production  $S$ , qui peut lui-même se vidanger soit par évapotranspiration soit par percolation vers l'écoulement profond. La lame d'eau produite est ensuite divisée en deux parties ; la première (90%) est transformée par un hydrogramme unitaire  $SH1$  et remplit le réservoir de routage, la seconde est transformée par un hydrogramme unitaire  $SH2$  et génère un écoulement rapide  $Q_d$ . Le terme  $F$  représente un terme d'échange avec les bassins voisins. Le réservoir de routage se vidange en générant un flux  $Q_r$  qui s'ajoute au flux  $Q_d$  pour donner l'écoulement final  $Q$ .

Le modèle n'a que 4 paramètres à caler (X1 à X4) :

- X1 : Capacité maximale du réservoir de production
- X2 : coefficient d'échanges souterrains
- X3 : Capacité maximale du réservoir de transfert
- X4 : temps de base de l'hydrogramme

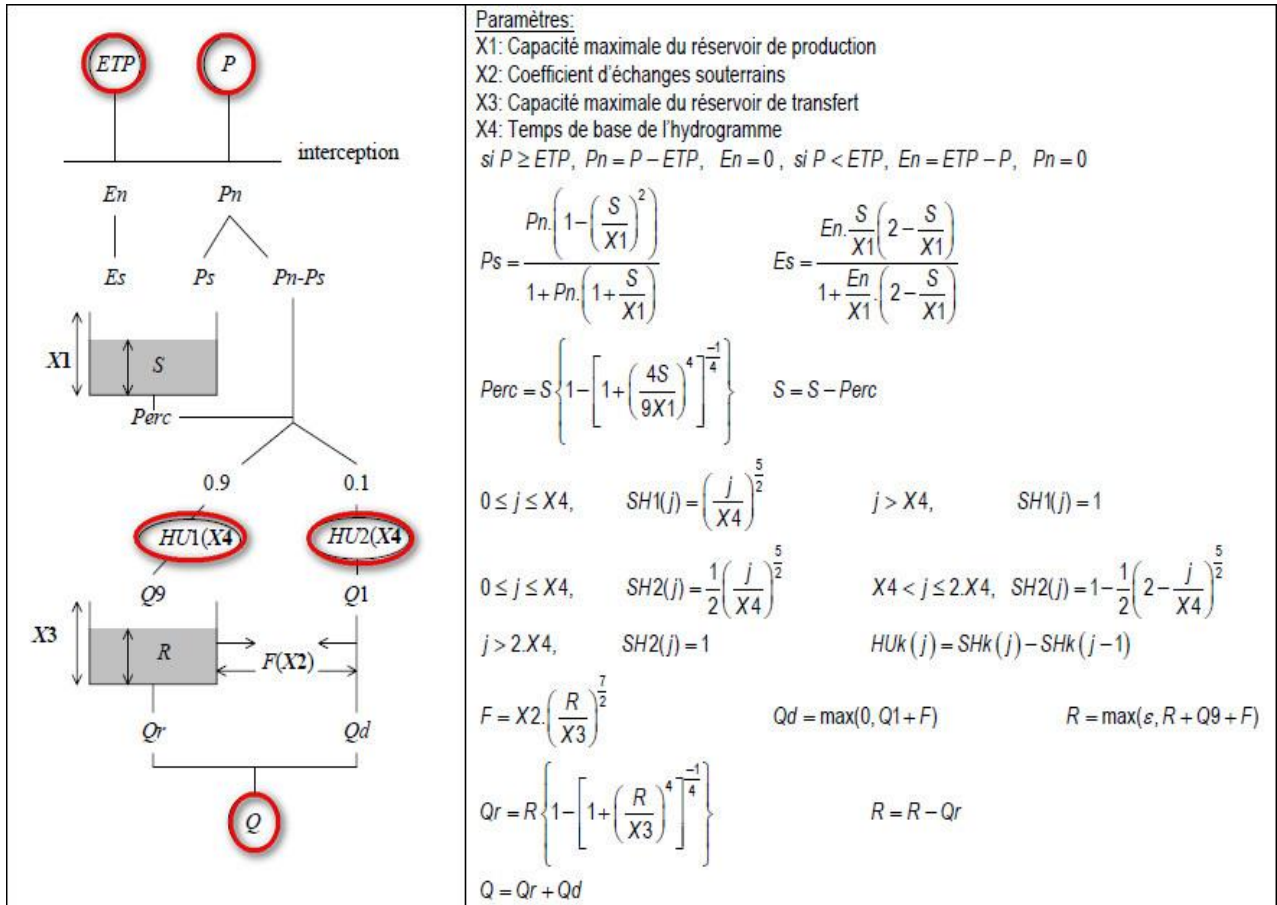


Figure 29 : Schéma de principe du modèle GR4J

Les équations suivantes correspondent aux équations intégrées sur un pas de temps.

La première opération est la neutralisation de P par E pour déterminer une **pluie nette**  $P_n$  et une **évapotranspiration nette**  $E_n$ , calculées par :

Si  $P > E$ , alors  $P_n = P - E$  et  $E_n = 0$

Si  $P < E$ , alors  $P_n = 0$  et  $E_n = E - P$

Dans le cas où  $P_n$  est différente de zéro, une partie  $P_s$  de  $P_n$  alimente le réservoir de production et est calculée par :

$$P_s = \frac{X_1 \left( 1 - \left( \frac{S}{X_1} \right)^2 \right) \cdot \tanh \left( \frac{P_n}{X_1} \right)}{1 + \frac{S}{X_1} \cdot \tanh \left( \frac{P_n}{X_1} \right)}$$

Où  $X_1$  (mm) et  $S$  sont respectivement la capacité maximum et le niveau du **réservoir de production**.

Dans le cas contraire, *lorsque  $E_n$  est différent de zéro*, une quantité d'évaporation  $E_s$  est retirée du réservoir de production. Elle est donnée par :

$$E_s = \frac{S \left( 2 - \frac{S}{X_1} \right) \cdot \tanh \left( \frac{E_n}{X_1} \right)}{1 + \left( 1 - \frac{S}{X_1} \right) \cdot \tanh \left( \frac{E_n}{X_1} \right)}$$

Le contenu du réservoir est mis à jour par :

$$S = S - E_s + P_s$$

Une **percolation**  $Perc$  issue du réservoir de production est alors calculée :

$$Perc = S \cdot \left\{ 1 - \left[ 1 + \left( \frac{4}{9} \frac{S}{X_1} \right)^4 \right]^{\frac{1}{4}} \right\}$$

Le contenu du réservoir est de nouveau mis à jour par :

$$S = S - Perc$$

La quantité d'eau  $P_r$  qui atteint finalement la partie **routage du modèle** est :

$$P_r = Perc + (P_n - P_s)$$

$P_r$  est divisée en deux composantes d'écoulement, 90 % étant routés par un hydrogramme unitaire HU1 et un réservoir de routage et 10 % par un unique hydrogramme unitaire HU2.

HU1 et HU2 dépendent du même paramètre  $X_4$ , temps de base de HU1 exprimé en jours.

Les ordonnées des hydrogrammes sont calculées à partir des courbes en  $S$  (cumul de la proportion de la pluie unitaire traitée par l'hydrogramme en fonction du temps), notées respectivement SH1 et SH2.

SH1 est définie en fonction du temps par :

$$\text{Pour } t = 0 \quad SH1(t) = 0$$

$$\text{Pour } 0 < t < X_4 \quad SH1(t) = \left( \frac{t}{X_4} \right)^{\frac{5}{2}}$$

$$\text{Pour } t > X_4 \quad SH1(t) = 1$$

SH2 est définie en fonction du temps par :

$$\text{Pour } t = 0 \quad SH2(t) = 0$$

$$\text{Pour } 0 < t < X_4$$

$$SH2(t) = \frac{1}{2} \left( \frac{t}{X4} \right)^{\frac{5}{2}}$$

Pour  $X4 < t < 2X4$

$$SH2(t) = 1 - \frac{1}{2} \left( 2 - \frac{t}{X4} \right)^{\frac{5}{2}}$$

Pour  $t > 2X4$

$$SH2(t) = 1$$

Les ordonnées de HU1 et HU2 sont alors calculées par :

$$UH1(j) = SH1(j) - SH1(j-1)$$

$$UH2(j) = SH2(j) - SH2(j-1)$$

Où j est un entier.

A chaque pas de temps i, les sorties Q9 et Q1 des deux hydrogrammes sont calculées par :

$$Q9(i) = 0,9 \sum_{k=1}^i UH1(k) \cdot Pr(i-k+1) \quad Q1(i) = 0,1 \sum_{k=1}^m UH2(k) \cdot Pr(i-k+1)$$

Où  $l = \text{int}(X4) + 1$  et  $m = \text{int}(2.X4) + 1$ , avec  $\text{int}(\cdot)$  désignant la partie entière.

Un échange souterrain en eau (perte ou gain) est calculé par :

$$F = X2 \left( \frac{R}{X3} \right)^{7/2}$$

où R est le niveau dans le réservoir, X3 la capacité à un jour du réservoir et X2 le coefficient d'échange en eau qui peut être positif dans le cas d'apports, négatif dans le cas de pertes vers des nappes profondes ou nul.

Le niveau dans le réservoir de routage est mis à jour en ajoutant la sortie Q9 de l'hydrogramme HU1 et F :

$$R = \max(0 ; R + Q9 + F)$$

Il se vidange ensuite en une sortie Qr donnée par :

$$Qr = R \cdot \left\{ 1 - \left[ 1 + \left( \frac{R}{X3} \right)^4 \right]^{-\frac{1}{4}} \right\}$$

Le niveau dans le réservoir devient :  $R = R - Qr$

La sortie Q1 de l'hydrogramme HU2 est soumise au même échange pour donner la composante d'écoulement Qd :

$$Qd = \max(0 ; Q1 + F)$$

Le **débit total** Q est alors donné par :  $Q = Qr + Qd$

### 3.3) Paramétrage des données d'entrée et mise en Œuvre du modèle

#### 3.3.1) Données hydroclimatologiques

La mise en œuvre de GR4J nécessite un nombre réduit de données hydrométéorologiques et d'informations sur le bassin, dans la mesure où seuls doivent être renseignés :

### **A-Les pluies moyennes journalières :**

Dans notre cas on a travaillé sur les pluies moyennes journalières s'étend sur la période entre 2005 et 2010 correspondent aux pluies moyennes de bassin d'Aguenza issues de deux stations pluviométrique Aguenza et Amsoul.

### **B -l'ETP journalière :**

Les données d'évapotranspiration entrée sont calculées par la méthode de thornthwaite (Obtenues à partir des températures moyennes interannuelles).

### **C -Les débits moyens journaliers à l'exutoire (pour la calibration) :**

Pour pouvoir caler et comparer les débits simulés et ceux observés, nous avons utilisé les débits moyens journaliers enregistrés à l'exutoire issue de la station hydrométrique d'Aguenza

### **D -La superficie du bassin versant :**

Le bassin versant d'Aguenza s'étend sur une superficie de 1162km<sup>2</sup>,

## **3.4) Période de calage et mise en route**

Le modèle permet de restituer les débits calculés à condition de connaître l'état initial au début de la période simulée. Compte tenu du caractère inévitablement arbitraire de cette initialisation, les premières valeurs simulées ne seront pas fiables et par conséquent, on n'en tiendra pas compte dans le calcul de la fonction critère. Cette période doit être assez confortable, et cela d'autant plus que le modèle est plus complexe. Pour simplifier, on utilise systématiquement une année entière pour cette période de routage c'est l'année 2005.

Le calage est alors effectué sur une partie des données, et l'on conserve l'autre partie pour le contrôle du comportement du modèle



## CHAPITRE III : RESULTATS ET DISSCUSSIONS

### 1) *Modèle SWAT* :

#### 1.1) *Calage et validation* :

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

Dans notre cas et pour réduire le nombre des itérations et le temps de calcul, nous avons choisi sept paramètres.

Dans un premier temps on a modifié les paramètres régissent sur la fraction de l'écoulement contribuant le ruissèlement :

Le premier et le plus important est le curve number (CN2 dans la Table « .mgt » des pratiques agricoles). Ce paramètre typiquement américain et qui n'a pas d'équivalence dans le contexte français correspond à un coefficient de ruissèlement attribué à chaque type d'utilisation du sol en fonction du groupe hydrologique du sol. Légèrement trop élevé, ou La diminution de ce paramètre entraîne logiquement une augmentation du ruissèlement de surface.

On a modifié aussi le paramètre ESCO correspond au coefficient de compensation (ESCO) qui modifie la quantité d'eau qui peut être évapotranspirée et la quantité de l'eau disponible pour les plantes (SOL-AWC).

Après que le ruissèlement est plus au moins acceptable, nous avons passé par la suite à l'ajustement de l'écoulement souterrain. La table « .gw » contient tous les paramètres concernant la circulation de l'eau dans l'aquifère. Afin d'obtenir une bonne corrélation entre les débits, la plupart des paramètres sont retouchés.

Le paramètre GWQMN (seuil de profondeur d'eau requis pour recharger la nappe) déclenche la recharge effective de la nappe lorsque ce seuil d'eau est accumulé dans l'aquifère.

Le coefficient de recharge de la nappe (GW\_revap) joue également un rôle important, il détermine la qualité de l'eau à se déplacer vers l'aquifère ou à rester dans la zone racinaire et être disponible pour la plante. Ainsi plus le coefficient sera fort, plus l'eau pourra se déplacer de l'aquifère peu profond vers une zone plus superficielle ou elle sera utilisable par la plante. Ces volumes ne se retrouveront donc pas à l'exutoire.

Le dernier paramètre de grande importance est le Baseflow alpha factor. Cet indice correspond à un facteur de rapidité de recharge du cours d'eau par l'aquifère profond, il permet d'ajuster les temps de réponses du bassin, de limiter les décalages temporels et contrôler les récessions pendant les décrues.

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

*Tableau 7: les paramètres choisis pour le calage*

Paramètre	Nom de paramètre	MIN	MAX	Valeur optimale
CN2	Numéro de courbe de ruissèlement	30	98	84

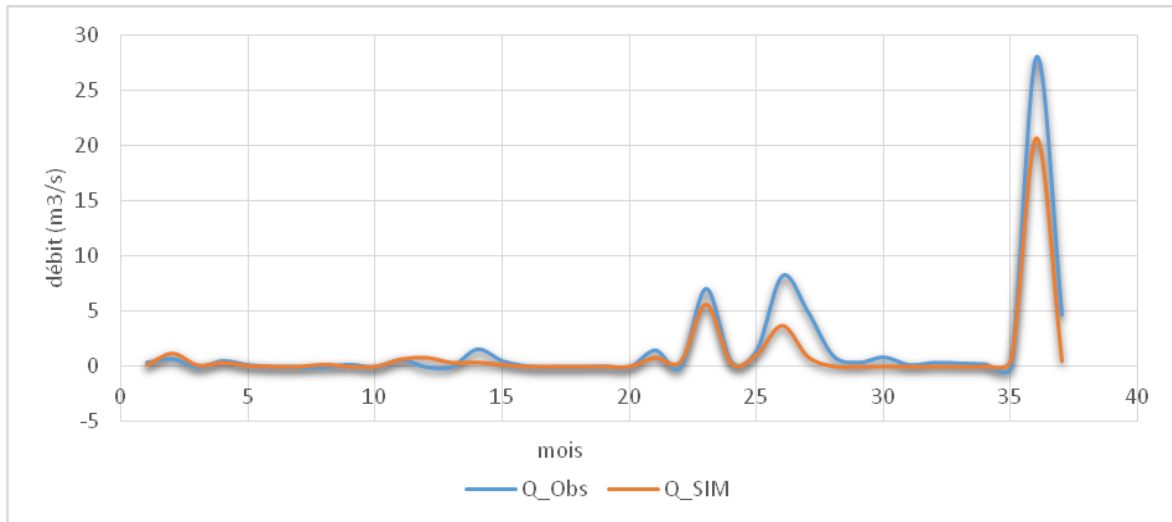
<b>ESCO</b>	Facteur de compensation d'évaporation du sol	0	1	0.84
<b>SOL-AWC</b>	Capacité en eau disponible de la couche de sol considérée (mmH <sub>2</sub> O/mm sol)	0.001	1	0.12
<b>ALPHA-BF</b>	Constante de récession de l'écoulement de base souterrain	0.001	1	0.048
<b>GW-DELAY</b>	Délai de recharge de l'aquifère (j)	0.001	365	31
<b>GW-REVAP</b>	Coefficient d'évaporation à partir de la nappe souterraine	0	0.2	0.02
<b>CH-K2</b>	Perméabilité des berges des chenaux principaux (mm.h <sup>-1</sup> )	-0.01	150	125

La méthode utilisée pour changer les valeurs initiales des paramètres CN2 et SOL\_AWC est de multiplier la valeur initiale par une autre valeur en pourcentage, car chaque URH a une valeur de CN2 et de SOL\_AWC différente aux autres HRUs, pour les autres paramètres (ALPHA\_BF, GW\_DELAY, CW\_REVAP, ESCO, CH\_K2) ils sont les mêmes pour tout le bassin, donc on a juste remplacé les valeurs initiales de ces paramètres par d'autres valeurs optimales.

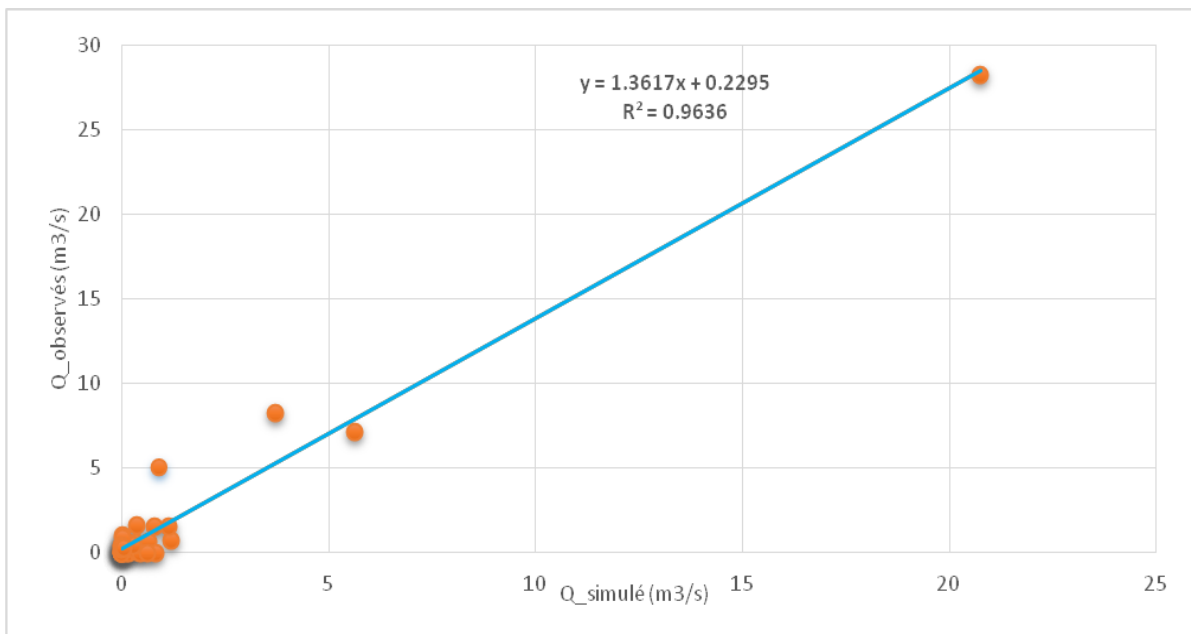
Plusieurs simulations ont été réalisées et plusieurs essais de calibration ont été effectués. Cette procédure est un travail de longue durée et demande beaucoup de temps. Beaucoup de paramètres (seuils, délais) contrôlent l'écoulement de l'eau, et plusieurs combinaisons de facteurs doivent être essayées.

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

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



*Figure 30: Comparaison entre les débits mensuels simulés et observés (m³/s) sur le bassin versant d'Aguenza*



*Figure 31: corrélation simple linéaire entre les débits observés et simulés*

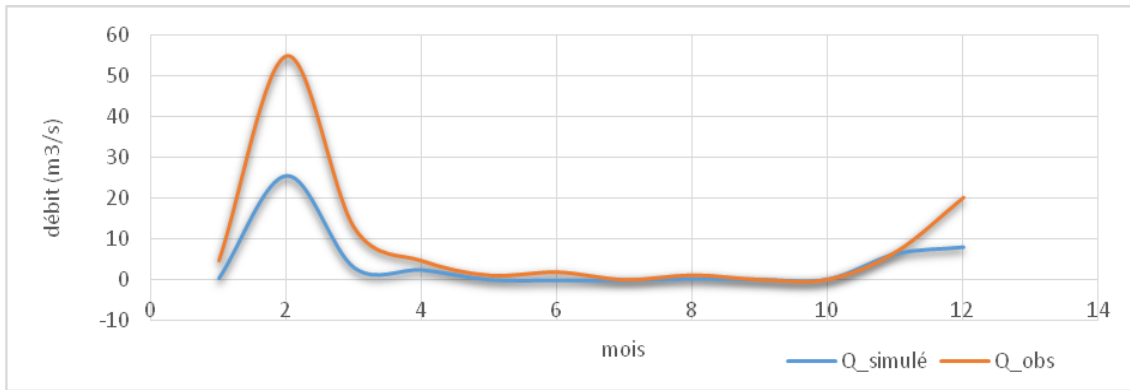


Figure 32 : Comparaison entre les débits simulés et observés

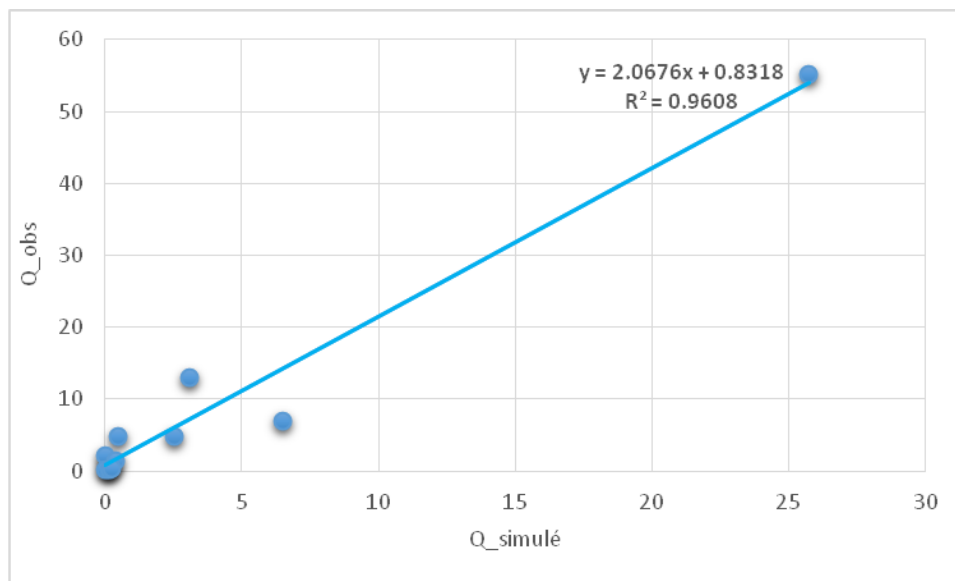


Figure 33 : Comparaison entre les débits simulés et observés

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

Le calage de modèle a abouti à un coefficient de Nash sur la période de calage (2007-2009) de  $NS = 0,63$ .

Pour la période de validation (2009-2010), le coefficient de Nash est de  $NS = 0,80$ .

Tableau 8 : valeurs des critères de performance en fonction de période de simulation

Période de tournage	Coefficient de Nash (journalier)	Coefficient de Nash (mensuel)	R2 mensuel
Période de calage (2007-2009)	0.63	0.88	0.96
Période de validation (2010)	0.80	0.58	0.96

Les résultats au pas de temps mensuels apparaissent satisfaisants, la simulation des débits est fidèle à la réalité. Les coefficients permettant de juger de la qualité de la corrélation sont très bons, le coefficient de corrélation sur l'ensemble des années modélisées s'élève à 0.96 alors que pour le coefficient de Nash s'élève à 0.88 pour la période de calage mais aussi se décroît à 0.58 pour la période de validation.

A partir des résultats de la modélisation par SWAT, on peut tirer une conclusion pour la présente étude, à savoir que le modèle SWAT reproduit de manière satisfaisante les débits mesurés sur Aguenza pour la période 2007-2009, ainsi que pour les débits mesurés pour la période 2009-2010, les critères de performance (coefficients de Nash et corrélation) témoignent d'un bon ajustement des modèles pour la période de calage et validation sur le bassin d'Aguenza (0,63 en calage, et 0,80 en validation).

## 2) Modèle GR4j :

### 2.1) Calage et Validation :

Au contraire que SWAT, GR4J est un modèle global faiblement paramétré, il ne contient que 4 paramètres à modifier dans la phase de calage et afin d'apprécier l'efficacité de ce modèle, nous avons fait tourner GR4J sur une partie des données, et l'on conserve l'autre partie pour le contrôle et la validation du comportement du modèle

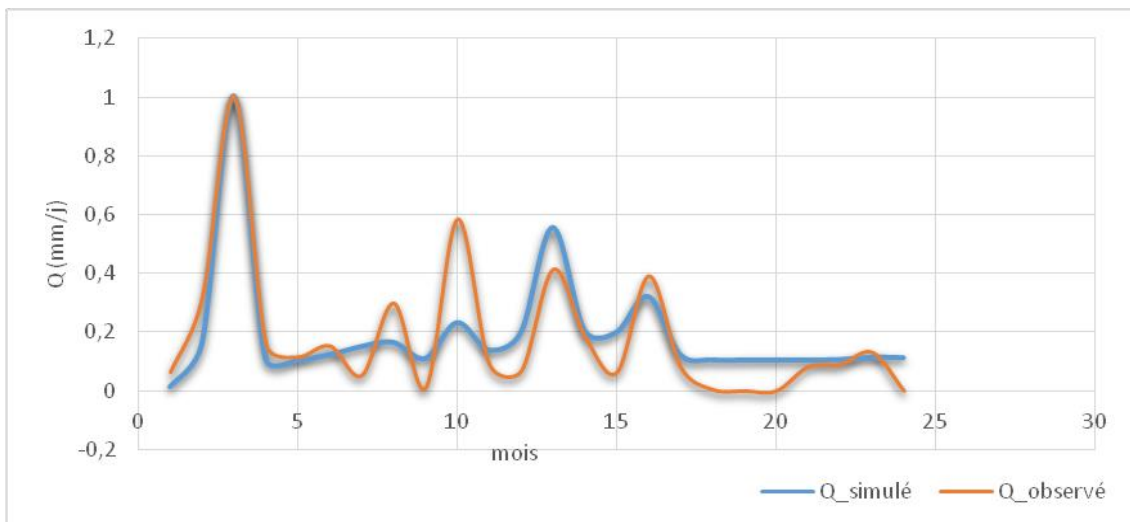
**Calage : 2005-2006 et 2007-2008**

**Validation : 2008-2010**

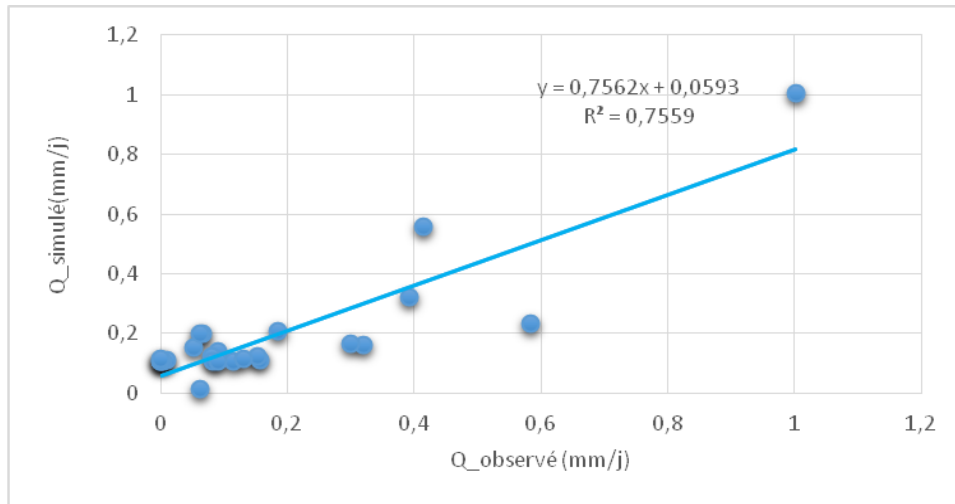
Le raison pour lequel le calage est fait sur deux périodes successives chacune dure 2ans, c'est que GR4J limite le nombre des années à tourner en 2 ans.

La démarche suivie consiste à rechercher le jeu de paramètres Permettant d'obtenir, sur les deux périodes (calage et validation) où l'on dispose des chroniques des débits observés d'Aguenza, la chronique des débits simulés la plus satisfaisante possible, c'est-à-dire la plus proche possible de celle observée et les résultats obtenus sont présentés ci-après.

✚ *Période de calage (2005- 2006)*

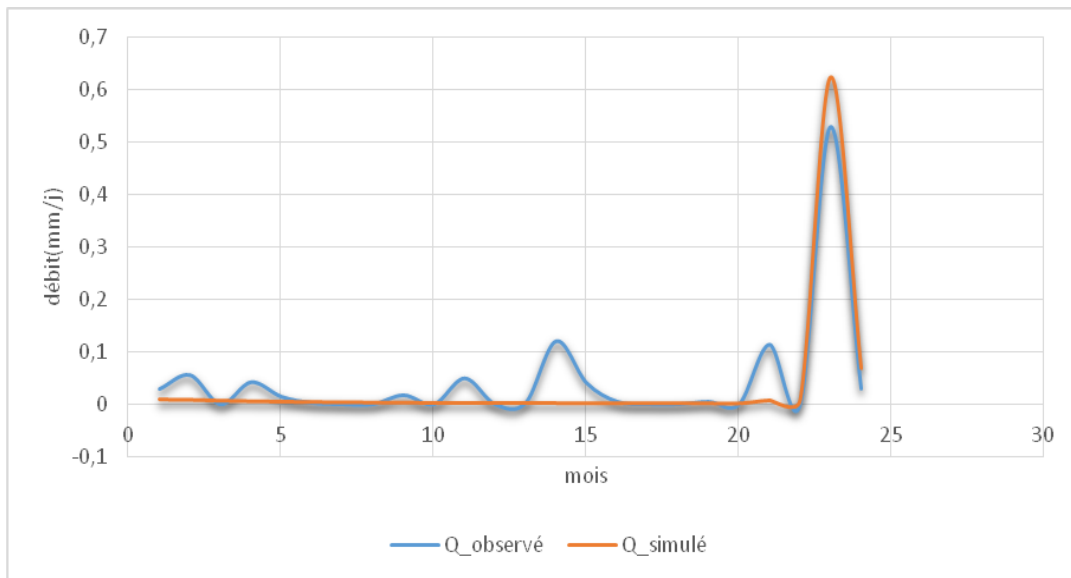


*Figure 34 : Comparaison entre les débits simulés et observés*



*Figure 35 : corrélation simple linéaire entre les débits observés et simulés*

 **Période de calage (2007-2008)**



*Figure 36 : Comparaison entre les débits simulés et observés*

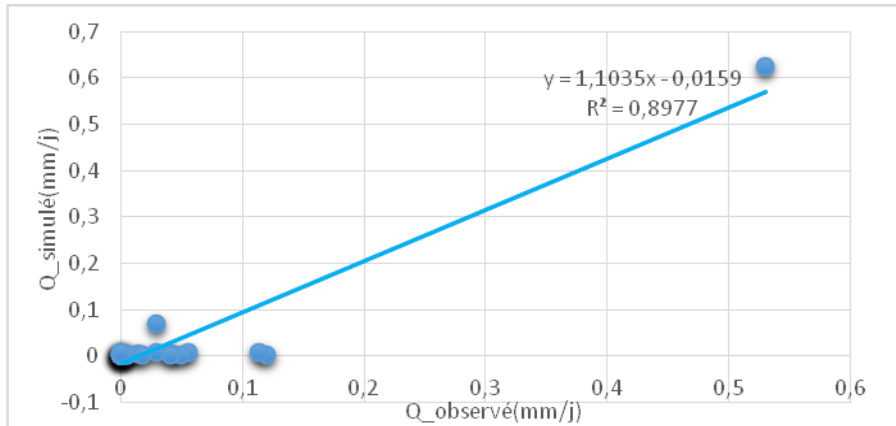


Figure 37 : corrélation simple linéaire entre les débits observés et simulés

✚ Période de validation (2008-2010) :

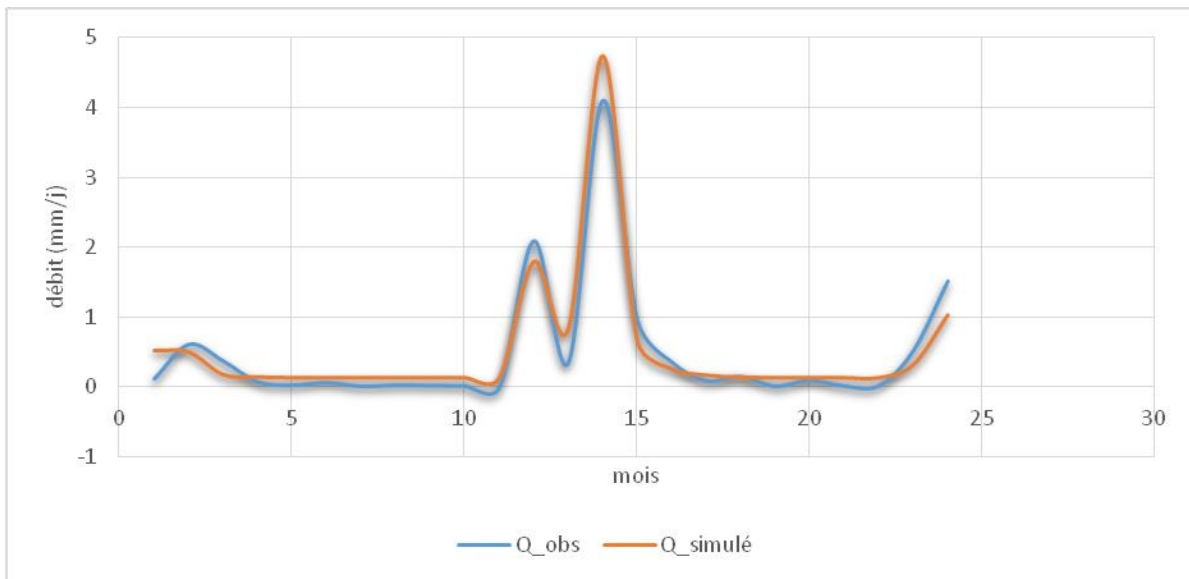
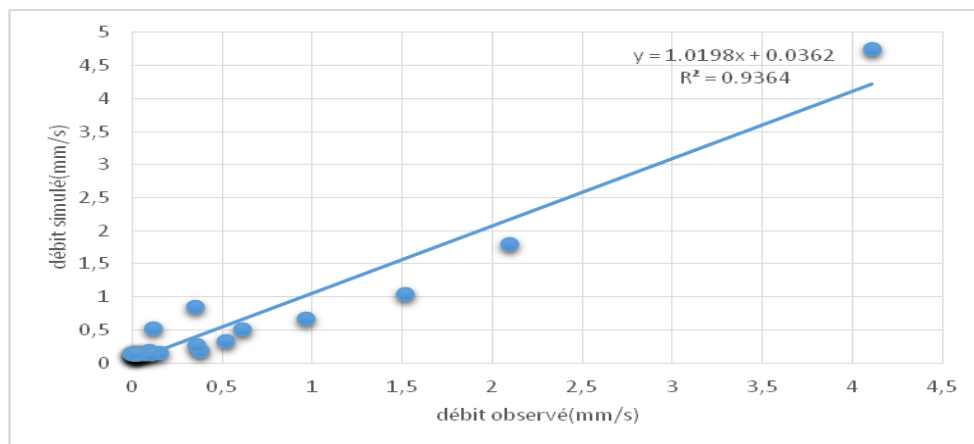


Figure 38 : Comparaison entre les débits simulés et observés



✚ *Les résultats au pas journaliers*



*Figure 39 : corrélation simple linéaire entre les débits observés et simulés*

De manière générale Les résultats au pas de temps journaliers apparaissent très satisfaisants, vu que la simplicité de modèle qui ne demande pas beaucoup de temps pour le calage, Les coefficients permettant de juger de la qualité de modèle sont présenter dans le tableau suivant.

*Tableau 9 : résultats des critères de performance en fonction des périodes de simulation*

Période de tournage	Coefficient de Nash (journalier)	Coefficient de Nash (mensuel)	R <sup>2</sup> mensuel
Période de calage (2005-2006)	0.57	0.75	0.75
Période de calage (2007-2008)	0.88	0.82	0.89
Période de validation (2009-2010)	0.89	0.89	0.93

### 3) Discussions

On a montré les meilleurs résultats que nous avons réussi à obtenir avec chacun des deux modèles utilisés. Les performances du SWAT et celles de GR4J sont proches. Les résultats fournis par le modèle GR4J sur le bassin versant d'Aguzenza dans notre étude confirment la robustesse du modèle.

En lui comparant avec SWAT qui est un modèle distribué fortement paramétrés ont presque la même performance, mais avec plus de données observées, Il est certain que les performances de la simulation de SWAT pourraient encore être améliorées sans oublier toutes les difficultés au niveau de la création de la base des données, car l'obtention d'une bonne performance de simulation est premièrement conditionnée par une bonne qualité des données, permettant de diminuer les sources d'incertitude.

La question qui se pose alors de savoir si le problème est plus facilement soluble avec un modèle proche de la réalité physique, mais ayant nécessairement de nombreux paramètres. Ce qui augmente les incertitudes de calage, ou avec un modèle globalisant les processus à paramètres robustes.

De point de vue critique les deux plateformes (SWAT ET GR4J) choisis comme des modèles d'application ont aussi bien des avantages que des limites et des inconvénients on ne détaillera que les points négatifs des deux modèles :

#### Pour SWAT

- ✓ La structure plus lourde devient un inconvénient notamment lorsque les données sont disponibles en quantité et en qualité insuffisantes et c'est le cas pour nous.
- ✓ La mise en œuvre de SWAT est un travail fastidieux car il nécessite la collecte d'une grande base de données (spatio-temporelle multi-sources et multi-disciplines).
- ✓ SWAT est un modèle fortement paramétré ce qui rend la phase de calibration très complexe et il prend beaucoup de temps.

#### Pour GR4J

- ✓ Le modèle GR4J présente de médiocres performances, qui s'expliquent par le fait que celui-ci ne prend pas en compte la rétention des précipitations sous forme de neige.
- ✓ Il limite le maximum des années pour chaque simulations en deux ans donc on était obligé de travailler sur plusieurs périodes de calage (2005-2006) (2007-2008).
- ✓ Le modèle GR4J semble être un peu limité du fait qu'il ne tienne compte des aspects physiques du bassin dans la simulation des écoulements.

## CONCLUSION GENERALE

L'objectif global de ce travail a été identifié le fonctionnement hydrologique de bassin versant d'Aguenza pour sa modélisation, cet objectif global se décline en trois objectifs :

- ✓ Mieux comprendre le fonctionnement hydrologique de la zone d'étude.
- ✓ Évaluer la pertinence des outils SWAT et GR4J dans le contexte spécifique de l'étude pour la Simulation du débit mais aussi des processus hydrologiques intermédiaires.
- ✓ Comparer entre le modèle SWAT qui est un modèle distribué à base semi physique et GR4J qui est un modèle global.

Les premières étapes du projet qui consistaient à mettre en place les premières couches de données nécessaires au fonctionnement de SWAT et GR4J ont été réalisées avec succès. La DRPE a permis le renseignement de ces données, permettant ainsi son bon fonctionnement.

Pour SWAT Le bassin versant a ainsi été découpé en plus de 70 HRU, chacune possédant une combinaison sol/occupation/pente propre. Chacune d'entre elles possède également un scénario de pratiques agricoles spécifiques.

Une calibration et un ajustement préliminaire du bilan hydrique ont été réalisés, celui-ci, loin d'être parfait va demander quelques efforts supplémentaires de calibration et un temps de travail plus conséquent. De nombreuses combinaisons de valeurs des variables de sol et d'écoulements souterrains doivent encore être testées afin d'approcher au plus près les comportements observés. Les estimations de débit et de ruissellement apparaissent tout de même réalistes et ces premiers résultats sont encourageants. Ceci témoigne de la potentialité du modèle à prédire le comportement du bassin (débit à l'exutoire, charge de sédiments et transferts de phosphore)

En fonctions des conditions climatiques fournies.

Pour GR4J, grâce à son nombre faible de paramètres, il a permis de limiter les problèmes de surparamétrisation et leur confère une bonne robustesse. Ce qui a rendu la phase de calibration moins complexe et n'a pas pris beaucoup de temps pour la minimisation de l'erreur du modèle sur la série de débits observés et d'une manière générale il a estimé les débits à l'exutoire d'Aguenza de manière très satisfaisante.

Une des spécialités de ce travail vient du choix d'une approche comparative de modélisation. Deux conceptualisations du bassin versant ont été mise en œuvre : GR4J model journalier global à réservoirs, développé suivant une démarche empirique, SWAT, version du modèle journalier distribué surparamétré à base semi physique les deux ont montrés leurs capacités à représenter d'une façon globale les débits sur les périodes étudiées notamment pour GR4J, alors pour SWAT les simulations peuvent être améliorées en intégrant plus de données, météorologiques, du sol ...etc.

---

## *Bibliographie*

---

- ANCTIL, F. (2004).** "Description du projet de recherche - Modélisation hydrologique des petits bassins versants en milieu rural." Financement : Fonds Québécois de la Recherche sur la Nature et les Technologies (FQRNT), 19 ,357–368.
- ARNOLD, J. G. et FOHRER, N. (2005).** "SWAT2000: Current capabilities and research opportunities in applied watershed modeling." *Hydrol. Process.* 19, 563-572.
- BONN, F. (2003).** "Ecologie physique des bassins versants, CEMAGREF, <http://www.cemagref.fr/informations/ex-rechr/methodo-modeles/faure/faure-exemple.htm>
- BOUDHRAA H. (2007).** "Modélisation pluie-débit à base géomorphologique en milieu semi-aride rural tunisien" thèse Sci. Agronomie, 5 ,10-17.
- BOULAY E. (2011)** " Etude et modélisation des phénomènes karstiques du bassin versant du rognon" projet de fin d'étude de Master 2 Sciences de l'Univers, Environnement, Ecologie, 49 p.
- BOURAOUI, F., BENABDALLAH, S., JRAD, A. ET BIDOGLIO, G. (2005).** "Application of the SWAT model on the Medjerda River basin (Tunisia)." *Phys. Chem. Earth*, 30(8-10), 497-507.
- CHAPONNIERE A. (2005).**"Fonctionnement hydrologique d'un bassin versant montagneux semi-aride : cas du bassin versant du Rehraya (Haut Atlas marocain)" *Hydrologie et télédétection*, 30-42.
- COMBE M. et EL HEBIL A. (1972)** "Plaine du Souss, des Chtouka et de Tiznit : Vallée du Souss". *Ressources en Eau du Maroc*, Tome 3.Ed. Service géologique du Maroc p35.
- DEUSTSH et al. (2005)** "Soil and Water Assessment Tool –Input/output File Documentation Version 2005" *Arcswat guide* 662p.
- EHEUCH H. et BEN NOSRA Y., (1999)** Application du modèle CEQUEAU pour l'estimation des apports dans le bassin versant de l'oued Merguellil. *Projet de fin d'études du cycle ingénieur à l'Institut Nationale Agronomique de Tunisie*, 81p.
- EL MORJANI Z.** "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) " *Sc. De la terre* 28-50.
- IBIKUNLE A. AFOUDA A. LANHOUSSE A. (2014).** "Etude comparative d'un modèle conceptuel global Et d'un modèle semi-distribué sur le bassin versant de l'OUEME A SAVE" *Revue scientifique et technique LJEE* 7p.
- LE LAY M. (2006).** " Modélisation hydrologique dans un contexte de variabilité hydro-climatique. Une approche comparative pour l'étude du cycle hydrologique au Bénin" *océan, atm. Hydr.* 110-119.
- NASH J.E., SUTCLIFFE J.V. 1970** "River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles, *Journal of Hydrology* 10 (3), 282-290".
- PERRIN C. (2002).** "Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative. *La Houille Blanche*" 84-91.
- PERRIN C, Michel C, Vazken A. (2007)** "Modèles hydrologiques du Génie Rural (GR) " Cemagref, UR Hydrosystèmes et Bioprocédés, <http://www.cemagref.fr/webgr>.
- RASOLOMANANA S. D., LESSARD, P. et VANROLLEGHEM, P. (2012).** "Single objective vs. multi-objective autocalibration in modelling total suspended solids and

phosphorus in a small agricultural watershed with SWAT." *Water Sci. Technol.*, 65(4), 643-652.

**RENAUD J. (2004).** "Mise en place du modèle agri-environnemental SWAT sur le bassin versant du Mercube (Haute-Savoie)" projet de fin d'étude du cycle d'ingénieur à l'école nationale d'ingénieur de Saint-Etienne 75p.

**ROJAS S. (2005).** "Quelle connaissance hydrométrique minimale pour définir les paramètres d'un modèle pluie-débit ? " Thèse de doctorat, ENGREF, Paris 520p.

**SAIDI M. (1995).** "Contribution à l'hydrologie profonde et superficielle du bassin du Souss (Maroc) Climatologie, Hydrogéologie, crues et bilans hydrologiques en milieu sub-aride" *Environnement Global*, 34-60.

**SAXTON K. E. and RAWLS W. J. (2006)** "Soil Water Characteristic Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions". *Soil Science Society of America Journal*, p15.

**ZEKOUDA N. (2011).** "Modélisation des crues de Oued Ouahrane pour la gestion intégrée des risques d'inondation" *SNHYC11 UHB Chlef 23/24*, 9p.