

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE de TLEMCEN

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie et Sciences de la Terre et  
de l'Univers



**Département** Sciences de la Terre et de l'Univers

# MEMOIRE

Présenté par

**Khelkhal Fahima et Meddah Aissa**

*En vue de l'obtention du*

**Diplôme de MASTER**

En :HYDROGEOLOGIE

## Thème

ETUDE DE SYNTHESE DE LA MODELISATION « PLUIE-DEBIT » SUR  
QUELQUES  
SOUS BASSINS VERSANTS DE L' ALGERIE.

Soutenu le : 29/09/2022 devant le jury composé de :

Président                      Mme Kerzabi yousfi.S                      Grade MCB    Université TLEMCEN

Encadrant                      Mme djelad Bouanani.r                      Grade MAA    Université TLEMCEN

Examineur                      Mr    Boudjema                      Grade MCA    Université TLEMCEN

**Année universitaire 2021-2022**

## ***Remerciements***

*Je remercie Allah dieu qui m'a donné la force et la sagesse pour achever ce modeste travail.*

*Mon promoteur, Mme.Djelad Bouannani.R, qui m'a beaucoup aidé par ses orientations et ses précieux conseils pour l'élaboration de cette étude.*

*Nos profonds remerciements vont aux membres du jury :*

*M me Yousefi Kerzabi.S et Mr Boudjemaa pour l'honneur qu'ils nous ont fait, afin d'évaluer ce travail.*

*Nos remerciements vont aussi à tous nos enseignants du Département des Sciences de la*

*Terre et de l'Univers de l'Université de Tlemcen.  
En fin, nous adressons notre reconnaissance à nos collègues pour leur aide et soutien moral toutes ces années d'études.*

*Merci à tous.*

***Khelkhal Fahima***

***Meddah Aissa***

## *DEDICACES*

*Je tiens à exprimer mes sentiments à tous ce qui ont contribué de près et de loin, à réaliser ce modeste travail et en particulier :*

- ✓ *mes très chers parents qui ont toujours été là pour moi, qui m'ont toujours poussé et motivé dans mes études. Sans eux,*

*Je n'aurais certainement pas fait tout ce chemin*

- ✓ *A mes très chers amis*
- ✓ *A mes très chers cousins*
- ✓ *A toute ma famille*
  - ✓ *A toute la promotion de l'Hydrogéologie 2021/2022*

*Khelkhal Fahima*

*Meddah Aissa*

## Résumé

Pour une meilleure compréhension du comportement hydrologique des bassins versants, nous avons tenté dans ce travail une synthèse de la modélisation pluie- débit en utilisant un modèle du Génie rural « GR ». Les modèles hydrologiques globaux permettent de simuler la transformation de la pluie en débit sur des bassins naturels, pour de nombreuses applications pratiques dans le domaine de la gestion de la ressource en eau. Ce travail basé sur la modélisation pluie-débit à l'échelle annuelle, mensuelle ; est appliqué au bassin versant algérien.

La synthèse de la modélisation pluie débit du modèle GR (GR1A, GR2M) dont les paramètres d'entrée sont les précipitations et l'ETP et le paramètre de sortie est constituée par les lames d'eau écoulées.

La phase du calage du modèle GR donne des résultats très appréciables. Pour tester la validité de l'ajustement obtenu du calage, il est nécessaire de juger les performances du modèle sur une période différente de celle ayant servi à ajuster les paramètres du modèle. Les résultats obtenus sont très acceptables avec les données des pluies, Les résultats obtenus montrent que ce modèle mensuel 'génie rural' dépend de l'atmosphère - la terre ainsi que la capacité de l'aquifère. Qui lui a donné plus l'efficacité une performance supplémentaire, il est donc conseillé de l'utiliser.

**Mots clés :** Hydrologie, bassin versant, , modèle GR1A, modèle GR2M.

## ملخص

من أجل فهم أفضل للسلوك الهيدرولوجي لمستجمعات المياه حاولنا في هذا العمل نمذجة تدفق الأمطار باستخدام نموذج الهندسة الريفية **GR**. تسمح النماذج الهيدرولوجية العالمية على محاكاة تحول المطر إلى التدفق على الأحواض الطبيعية, للعديد من التطبيقات العلمية في مجال إدارة الموارد المائية. يعتمد هذا العمل على نمذجة تدفق المطر على مقياس السنوي والشهري يتم تطبيقه على مستجمعات المياه الجزائرية. إن تطبيق نموذج **GR (GR1A, GR2M)** الذي تكون معلومات الإدخال الخاص به الترسيب و **ETP** معلومات الإخراج من طبقات مياه الجريان السطحي. تعطي مرحلة المعايرة في نموذج GR نتائج ملموسة للغاية لاختبار صحة التعديل الذي تم الحصول عليه من المعايرة, فمن الضروري الحكم على أداء نموذج على مدى فترات مختلفة عن تلك المستخدمة لضبط معلومات النموذج. النتائج التي تم الحصول عليها مقبولة للغاية مع بيانات هطول الأمطار. تظهر النتائج التي تم الحصول عليها إن هذا النموذج الشهري « الهندسة الريفية » يعتمد على الغلاف الجوي- الأرض وكذلك سعة طبقة المياه الجوفية. مما منحه المزيد من الكفاءة والأداء الإضافي, لذلك ينصح باستخدامه.

**الكلمات المفتاحية: الهيدرولوجيا نموذج مستجمعات المياه, GR1A, GR2M,**

**ABSTRACT**

Watershed hydrology, in this work we tried to synthesize rainfall flow modeling using the rural engineering model « GR ».

Global hydrological models allow simulating the transformation of rain to flow over natural basins, for many practical applications in water resource management. This work is based on modeling of rain flow on an annual, monthly scale applied to the Algerian watershed.

Apply a model,( GR2M,GR1A), whose input parameters are sedimentation, ETP, and output parameter of runoff water layers. The calibration phase of the GR model gives very tangible results. To test the correctness of the modification obtained from the calibration, it is necessary to judge the performance of a model over a period different from that used to adjust the parameters of the model. The results obtained are very acceptable with the precipitation data. The obtained results show that this monthly “rural geometry” model depends on the atmosphere-land as well as aquifer capacity. Which gave it more efficiency and additional performance, so it is recommended to use it?

**Key words:** Hydrology, watershed, model GR1A, model GR2M.

## Sommaire

*Remerciements*

*Dédicace*

*Sommaire*

<i>Introduction Générale</i> .....	2
<i>Chapitre 1 : Modélisation Hydrologique</i> .....	3
<b>I.1 Introduction :</b> .....	4
<b>I.2 C'est quoi un bassin versant ?</b> .....	4
<b>I.3 Le Bilan hydrologique</b> .....	5
<b>I.3.1 Les précipitations</b> .....	8
<b>I.3.2. L'évaporation :</b> .....	8
<b>I.3.4. L'écoulement :</b> .....	9
<b>I.3.5. Le débit :</b> .....	9
<b>I.4. Définition un modèle hydrologique :</b> .....	9
<b>I.5. L'objectif de la modélisation :</b> .....	9
<b>I.6 Les Etapes de la modélisation :</b> .....	10
<b>I.6.1 Modèle conceptuel :</b> .....	10
<b>I.6.2 Modèle mathématique :</b> .....	10
<b>I.6.3 Modèle numérique :</b> .....	10
<b>I.7 Le but de modélisation pluie –débit :</b> .....	10
<b>I.8. Simulation de débits :</b> .....	10
<b>I.9 Prédétermination des débits de crue ou d'étiage :</b> .....	11
<b>I.9.1 Prévision des crues et des étiages :</b> .....	11
<b>I.9.2. Influence d'aménagements sur l'hydrologie :</b> .....	11
<b>I.10. Le concept de modélisation pluie- débit :</b> .....	11
<b>I.11 Classification des modèles hydrologiques :</b> .....	12
<b>I.11.1 Modèles stochastiques :</b> .....	13
<b>I.11.2 Modèles déterministes :</b> .....	13
<b>I.11.3. Modèles à base physique :</b> .....	13
<b>I.11.4. Modèles empiriques :</b> .....	13
<b>I.12 PRESENTATION DE QUELQUES MODELES PLUIE-DEBIT :</b> .....	16
<b>I.12.1 MIKE SHE : la modélisation hydrologique complète :</b> .....	16
<b>I.12.2. CEQUEAU :</b> .....	17

I.12.3. TOP MODEL :	18
I.13 Modèle GR :	22
I.13.1 Historique :	22
I.13.2 Présentation du modèle GR :	23
I.13.3 Les variables d'un modèle hydrologique :	23
I.13.4 Paramètres :	23
I.13.5 Le calage et validation d'un modèle :	23
I.14 Critères de validation des modèles :	24
I.14.1 Le coefficient de détermination (R2) :	24
I.14.2 Le critère de Nash :	24
I.14.3 Le critère RMSE (Root Mean Squared Error) :	25
Conclusion :	25
<i>Chapitre II :Les Modèles Hydrologique du Génie Rurale(GR)</i> :	26
II.1 Introduction.....	27
II.2 La modélisation hydrologique.....	28
II.2.1 Structure du modèle .....	28
II.3 But de la modélisation hydrologique.....	29
II.4 Mode de développement.....	29
II.5 Principales caractéristiques .....	30
II.6 Description du modèle pluie-débit annuel GR1A .....	30
II.6.1 Description mathématique :	31
II.7 Description du modèle pluie-débit mensuel GR2M.....	32
II.7.1Description mathématique .....	32
II.8 Percolation.....	34
II.9 Description du modèle pluie-débit journalier GR4J .....	35
II.9.1 Description mathématique .....	36
II.10 Neutralisation .....	37
II.11 Fonction de rendement.....	37
II.12 Hydro-grammes unitaires :	38
II.11 Réservoir de routage .....	40
II.12 Ecoulement total.....	40
II.13 Applications des modèles.....	41
Conclusions.....	42
<i>Chapitre III :Présentation des Synthèses sur des zones étudié</i> .....	43

<b>III.1 Présentation de la région d'étude :</b>	44
<b>III.2 PRESENTATION GENERALE DU BASSIN VERSANT DE LA TAFNA :</b>	44
<b>III.3 PRESENTATION DU sous BASSIN VERSANT DE 'OUED LAKHDAR :</b>	45
<b>III.3.1 Le climat :</b>	46
<b>III.3.2 Géologie et relief :</b>	46
<b>III.3.4 MODELE ANNUEL GR1A :</b>	46
<b>III.3.5 Validation du modèle :</b>	47
<b>III.4 MODELE MENSUEL GR2M :</b>	47
<b>III.4.1 Validation du modèle :</b>	47
<b>III.5 PRESENTATION DU sous BASSIN VERSANT de Meffrouch :</b>	48
<b>III.5.1 Calage du modèle GR1A :</b>	48
<b>III.5.2 Validation du modèle GR1A:</b>	49
<b>III.6 calage du modèle GR2M:</b>	49
<b>III.6.1 Validation du modèle GR2M :</b>	50
<b>III.7 PRESENTATION DU sous BASSIN VERSANT d'ouedlekhmis :</b>	50
<b>III.7.1APERCU HYDROGEOLOGIQUE</b>	51
<b>III.8 Modèle annuel GR1A :</b>	51
<b>III.8.1 Validation du modèle</b>	51
<b>III.9 Modèle Mensuel GR2M :</b>	51
<b>III.9.1 Validation du modèle</b>	52
<b>III.10 Présentation du bassin versant de l'ISSER :</b>	52
<b>III.10.1Modèle annuel GR1A</b>	53
<b>III.10.2 Calage du modèle GR1A :</b>	53
<b>III.11Validation du modèle GR1A :</b>	54
<b>III.12Modèle mensuel GR2M :</b>	54
<b>III.12.1Calage du modèle GR2M :</b>	54
<b>III.12.2Validation du modèle GR2M :</b>	55
<b>III.13 Présentation du bassin versant Tamenrasset :</b>	55
<b>III.14 Modèle annuel GR1A :</b>	57
<b>III.14.1 Calage du modèle :</b>	57
<b>III.14.2 Validation du modèle :</b>	57
<b>III.14.3 Modèle mensuel GR2M :</b>	58
<b>III.14.4 Calage du modèle GR2M :</b>	58
<b>III.14.5 Validation du modèle GR2M :</b>	58



<b>Discussion :</b> .....	59
<b>Conclusion générale :</b> .....	61

## LISTE DES FIGURE

<b>Figure I.01 :</b> Schéma d'un bassin versant.....	5
<b>Figure I.02 :</b> Cycle de l'eau ( <a href="http://www.cnrs.fr/cw/dossiers/doseau">www.cnrs.fr/cw/dossiers/doseau</a> ).....	6
<b>Figure I.03 :</b> Processus de cycle hydrologique (Laborde, 2009).....	7
<b>Figure I.04:</b> Les composants d'un modèle hydrologique (GNOUMA P. Etat de l'art : Modélisation hydrologique et typologie de modèles, 2006) .....	12
<b>Figure I.05 :</b> Classification des modèles hydrologique Relation entre les modèles pluie-débit (Berthier, 2008).....	12
<b>Figure I.06 :</b> Cycle de l'eau dans le logiciel MIKE SHI.....	16
<b>Figure I.07 :</b> Fonction de production du modèle CEQUEAU.....	17
<b>Figure I.08 :</b> Fonction de transfert du modèle CEQUEAU.....	18
<b>Figure I.09 :</b> Représentation schématique de TOPMODEL.....	19
<b>Figure I.10 :</b> Représentation schématique de TOPMO.....	20
<b>Figure I.11 :</b> Représentation schématique d'IHACRES.....	22
<b>Figure II.01 :</b> structure à réservoirs.....	28
<b>Figure II.02 :</b> Schéma de la structure du modèle GR2M.....	34
<b>Figure II.03 :</b> Schéma de la structure du modèle GR4J.....	37
<b>Figure III.01 :</b> Carte des bassins versants de l'Algérie.....	44
<b>Figure III.02 :</b> Situation géographique du bassin versant de la Tafna.....	45
<b>Figure III.03:</b> Carte de localisation de bassin versant d'oued Chouly.....	46
<b>Figure III.04:</b> Situation géographique du bassin versant de de l'Oued Meffrouch (Ghenim, Megnounif ,2013).....	48
<b>Figure III.05 :</b> Situation du bassin de l'Oued Khemis.....	50
<b>Figure III.06:</b> Carte des situations des stations hydro-climatologique du bassin Versant de l'Isser.....	53
<b>Figure III.07:</b> Délimitation de la zone d'étude (J. Dubief, 1953).....	56
<b>Figure III.08:</b> Sous bassin versant du bassin de Tamanrasset (zone d'étude) Géologie de bassin versant de meffrouch.....	56

## LISTE DES TABLEAUX

<b>Tableau II.1.</b> Valeur des paramètres du modèle GR2M obtenues sur un large échantillon de bassins versants.....	36
<b>Tableau II.2 :</b> Valeur des paramètres du modèle GR4J obtenues sur un large échantillon de bassins versants.....	40
<b>Tableau III.1 :</b> représentation des résultats obtenus par l'utilisation de GR1A.....	46
<b>Tableau III.2 :</b> les variations du coefficient de corrélation.....	47
<b>Tableau III.3 :</b> représentation des résultats obtenus par l'utilisation de GR1A.....	47
<b>Tableau III.4 :</b> Les coefficients de corrélation entre les débits simulés et calculés au cours de la validation.....	48
<b>Tableau III.5 :</b> Résultats du calage du modèle GR1A.....	49
<b>Tableau III.6 :</b> Les variations de coefficients de corrélation de la validation du modèle GR1A.....	49
<b>Tableau III.7 :</b> Résultats du calage du modèle GR2M Meffrouch.....	49
<b>Tableau III.8 :</b> Les variations de coefficients de corrélation de la validation du modèle GR2M (Janv. 2001/Déc. 2009) Meffrouch.....	50
<b>Tableau III. 9:</b> Représentation des résultats obtenus par l'utilisation de GR1A.....	51
<b>Tableau III.10 :</b> Variation des coefficients de corrélation.....	51
<b>Tableau III.11 :</b> Représentation des résultats obtenus par l'utilisation de GR2M.....	52
<b>Tableau III.12:</b> Validation du modèle GR2M selon l'ETP respectivement de Turc et Thornthwaite.....	52
<b>Tableau III.13 :</b> Résultat du calage du modèle GR1A.....	54
<b>Tableau III.14 :</b> Les variations de coefficients de corrélation de la validation du modèle GR1A.....	54
<b>Tableau III.15 :</b> Résultat du calage du modèle GR2M.....	54
<b>Tableau III.16 :</b> résumer des résultats de la validation du modèle GR2M.....	55
<b>Tableau III.17 :</b> Résultats du calage GR1A.....	57
<b>Tableau III.18 :</b> Variations du coefficient de corrélation.....	57
<b>Tableau III.19 :</b> résulta de calage GR2M.....	58
<b>Tableau III.20:</b> Variations des coefficients de corrélation de la validation du modèleGR2M.....	58

# *Introduction Générale*

## *Introduction Générale*

Chaque point d'un cours d'eau permet de définir un bassin versant, et les débits observés ; en ce point sont directement liés aux précipitations tombées sur ce bassin. A partir des observations faites en quantifiant la pluie tombée, on arrive à reproduire la réponse en débit du bassin. La simulation hydrologique du bassin versant, décrite comme la transformation de la pluie en débit passe par l'utilisation d'un modèle hydrologique. Le passage de la pluie au débit reste un problème complexe mais demande pour une utilisation simple un nombre de paramètres limité. La modélisation conceptuelle permet de limiter le nombre de paramètres entrant en jeu dans le modèle mais renonce à une connaissance minutieuse des différents phénomènes.

L'amélioration des outils de modélisation hydrologique est un sujet de recherche très actif. Cette amélioration est évaluée en calculant les performances du modèle pluie-débit, Par conséquent, la capacité du modèle à reproduire le trafic observé, qui est obtenue en utilisant normes de performance. Cependant, l'amélioration du débit observée sur la simulation d'un bassin donné peut ne pas être reproductible dans un autre, soit parce que changements dans les caractéristiques hydrologiques et les conditions climatiques au fil du temps, ou Par exemple, le mauvais choix de modèle.

Le modèle Génie Rurale GR permet de Connaissance des précipitations et de la température passées pour simuler le débit en un point Rivière. Ces outils sont applicables à différents bassins versants et à différentes périodes Différent de généraliser les résultats. Ces modèles hydrologiques comprennent certains paramètres doivent être déterminés par calage, nous appelons donc une fonction dite fonction objectif, qui est le critère numérique que l'on cherche à optimiser, Mesurez la différence entre l'observation et la simulation.

L'objectif principal du présent mémoire est : de synthétiser la modélisation hydrologique pluie-débit sous quelque sous bassin versant de l'Algérie par la détermination des paramètres du modèle **GR**.

Le présent travail s'organise comme suit :

**Chapitre 1** : ce chapitre expose une revue bibliographie sur les modèles hydrologiques pluie-débit.

**Chapitre 2**: ce chapitre présent les différents modèles hydrologique du Génie Rurale

**Chapitre 3** : dans ce chapitre il s'agit de mettre en évidence les résultats obtenus à l'issue de la modélisation pluie-débit.

*Chapitre I : Modélisation  
Hydrologique*

## **I.1 Introduction :**

Parmi les applications hydrologiques sont Déterminer le débit d'un cours d'eau à partir de données physiques telles que : Caractéristiques de la pluie, de la température, du vent et du creux. Ce flux n'est pas Nécessaire non seulement pour prévoir les inondations, mais aussi pour prévoir l'impact d'un Changement de bassin, et en général pour le développement des ressources en eau.

La modélisation hydrologique est devenue un outil indispensable, c'est une représentation mathématique simplifiée de tout ou partie des processus du cycle hydrologique a travers un ensemble de concepts hydrologiques exprimés en langage mathématique et interdépendants les uns des autres dans des séquences temporelles et spatiales correspondant à celles observées dans nature.

## **I.2 C'est quoi un bassin versant ?**

Le bassin versant est une zone géographique de collecte des eaux délimitée en amont par les lignes de partage des eaux, ou lignes de crête, et en aval par l'exutoire (cours d'eau ou plan d'eau). Tous les écoulements obtenus par les précipitations alimentent le même exutoire. L'exutoire le plus en aval d'une rivière est constitué par la confluence avec un autre cours d'eau. Le bassin versant peut être subdivisé en bassins élémentaires, ou sous-bassins versants, correspondant à la surface d'alimentation des affluents se jetant dans le cours d'eau principal.

Différentes caractéristiques physiques influencent la répartition du ruissellement et des infiltrations pour chaque bassin versant. Elles sont d'ordre géométriques (surface, pente), géomorphologiques (relief, réseau hydrographique), pédologiques (nature et capacité d'infiltration des sols, notamment pour prévenir les inondations), biologiques (type et répartition de la couverture végétale) et urbanistiques (Ouvrages hydrauliques). Une bonne compréhension de tous ces paramètres physiques grâce à la mise en place de systèmes d'observation et de cartographie du milieu, d'inventaire de faune et de flore permet une meilleure anticipation des aléas, notamment dans les secteurs urbanisés ou dans les secteurs au comportement complexe (systèmes karstiques). La compréhension de la dynamique des bassins versants peut également être approchée par la modélisation des phénomènes hydrologiques et hydrauliques de transport ou de morpho dynamique.

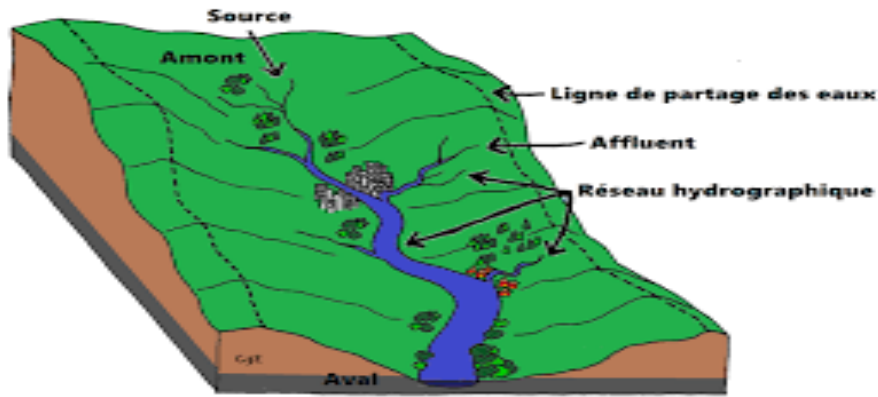


Figure.01 : Schéma d'un bassin versant

### I.3 Le Bilan hydrologique

Le bilan hydrique d'un bassin-versant est un travail qui relève tout particulièrement de la géographie. Son élaboration exige en effet une synthèse parfaite de tous les éléments physiques du milieu: précipitations, évaporation, écoulement, humidité du sol et du sous-sol. Or nous savons que les notions de milieu et de combinaison d'éléments sont précisément à la base de toute recherche géographique.

D'autre part, le sujet convient encore plus particulièrement à la géographie dans sa phase actuelle qui se veut à la fois scientifique et utile. Scientifique, puisque la mesure précise de tous les éléments garantit seule la connaissance exacte du milieu géographique. Utile, puisque cette connaissance chiffrée permet de dire sans équivoque les besoins du milieu: dans le cas présent, le nombre de m<sup>3</sup> d'eau qu'il faut donner à chaque hectare pendant l'été, et le moment le plus opportun de l'arrosage. Etablir le bilan hydrique d'un bassin-versant, c'est donc d'abord rester fidèle à la rigueur d'une discipline aujourd'hui adulte. Et c'est, par là même, intégrer cette discipline à la vie courante, en d'autres termes travailler dans le cadre de la géographie appliquée

Le bilan hydrique est simple dans son principe. Il s'agit de résoudre l'expression:

$$P = (E + D + R) \text{ où}$$

P = les précipitations,

E = l'évaporation,

D = l'eau écoulee par les rivières,

R = l'eau en réserve dans le sol.

Toutes ces valeurs seront exprimées en lame d'eau, c'est-à-dire en mm.

(Pierre Pédelaborde, 1968)

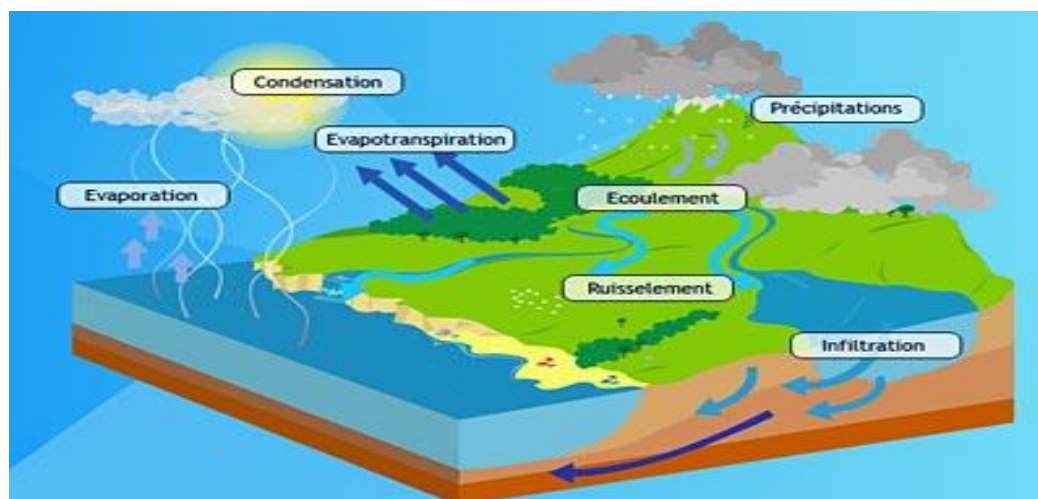


Figure.02 : cycle de l'eau ( [www.cnrs.fr/cw/dossiers/doseau](http://www.cnrs.fr/cw/dossiers/doseau))

Le fonctionnement hydrologique d'un bassin versant se manifeste par 3 grands types de processus:

**Processus destockage /déstockage :**

Dans le bassin, puisque l'eau (sous ses 3 phases vapeur, liquide, solide) peut y être plus ou moins retenue dans différents réservoirs: couche limite de surface atmosphérique, manteau neigeux, couvert végétal (sur et dans les plantes), surface du sol, sol non saturé, nappes, réseau hydrographique.

**Processus de transfert :**

aux limites du bassin, puisque des flux d'eau (sous chacune des 3 phases) peuvent être échangés entre le bassin et son environnement: verticalement, à travers la couche limite atmosphérique (précipitations, évapotranspiration); latéralement, par advection de vapeur d'eau dans la couche limite de surface, ou par des écoulements souterrains entre bassins voisins lorsque les limites hydrogéologiques ne coïncident pas avec les limites hydrographiques; par définition même du bassin versant les échanges latéraux en surface se limitent aux écoulements (essentiellement liquides) à l'exutoire.

**Processus de transformation :**

Interne, puisque l'eau présente dans le bassin peut y subir des changements de phase: condensation liquide ou solide de la vapeur d'eau, vaporisation ou congélation de l'eau liquide, liquéfaction ou sublimation de l'eau solide; et même, mais en quantité le plus souvent négligeable, y être impliquée dans des réactions biogéochimiques (photosynthèse-respiration, hydratation,...).

A ces processus naturels s'ajoutent les activités humaines, aux impacts hydrologiques rapidement croissants: ainsi, la gestion des ressources en eau se traduit par des stockages, exportations ou importations artificiels d'eau.

Les variations correspondantes des réserves hydriques du bassin versant ne peuvent être quelconques: elles doivent respecter le principe de conservation de la matière (ici: l'eau), qui s'exprime par des relations de bilan permettant de relier les effets des différents processus en jeu. L'eau totale étant une grandeur conservative, sa quantité dans le bassin versant ne peut varier que par des échanges avec son environnement - d'où un bilan hydrologique sans termes de transformations. Pour analyser et comprendre le fonctionnement hydrologique d'un bassin, il est cependant souvent nécessaire de prendre en



compte non seulement l'eau totale mais aussi chacune de ses phases, du fait de leurs propriétés et disponibilités très différentes.

*Ainsi, en conditions naturelles, l'absence de crue suite à une précipitation importante ne peut se comprendre que s'il s'agit en fait d'une chute de neige, et l'existence d'une crue ultérieure par beau temps sec, que par la fonte différée de cette neige.* Ceci conduit à établir pour chacune de ces phases non conservatives un bilan où interviennent aussi des termes de changement de phase – transformations internes dont les contributions aux bilans partiels se compensent exactement dans le bilan total

Ce type de bilan extensif qui nécessite de bien préciser au préalable la grandeur extensive concernée, la période de bilan, et les limites spatiales (Verticales, latérales) de l'unité de bilan peut s'appliquer à toute autre unité de bilan: comme par exemple le système hydrologique quasi-fermé qu'est le globe terrestre; ou encore à toute partie (ou réservoir) d'un bassin versant: c'est par exemple le cas du bilan hydrique qui ne concerne que le système sol-plante-atmosphère.

Exprimant seulement une contrainte fondamentale imposée au fonctionnement du système, les relations de bilan ne donnent aucune indication ni explication sur chacun des termes qui les composent ni donc sur les processus qui les génèrent ce que permet l'approche dynamique.

(AMBROISE, BRUNO, 1999)

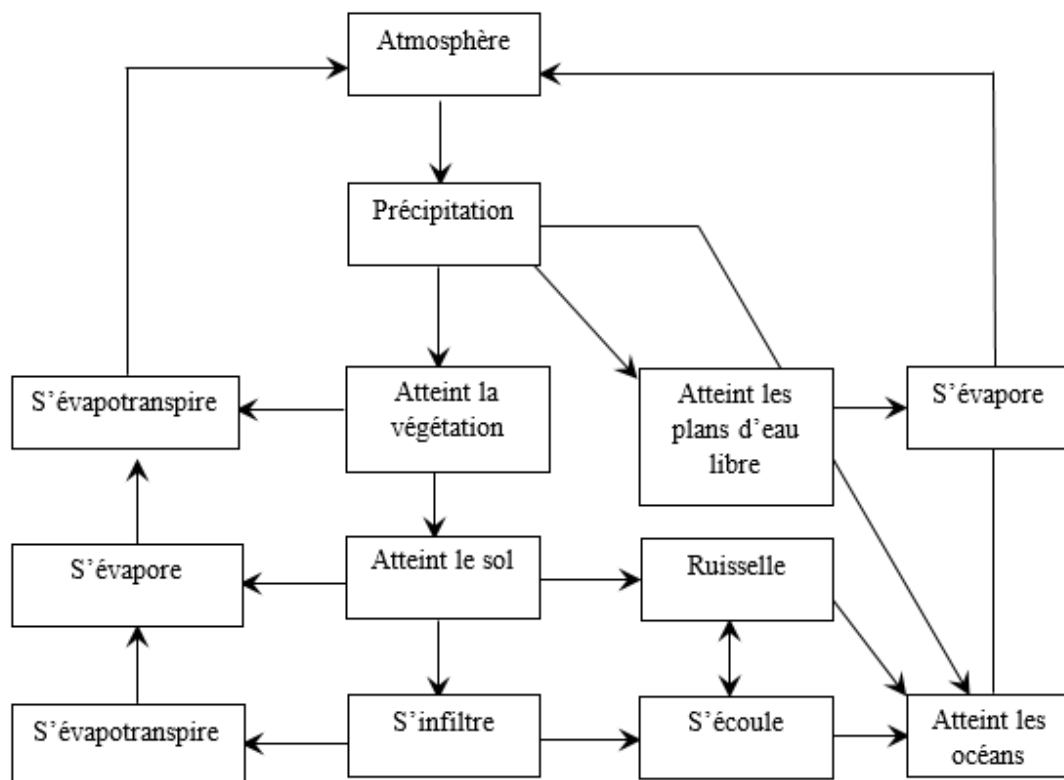


Figure I.03 : Processus de cycle hydrologique (Laborde, 2009)

### I.3.1 Les précipitations

Deux précautions sont à retenir, en dehors des considérations critiques que nous examinerons plus loin.

Le pluviomètre mesure par défaut, particulièrement pendant la saison froide. La plupart des pluies, d'octobre à mars ou avril inclus, sont en effet accompagnées de vents forts. La turbulence chasse donc une partie des gouttes hors de l'entrée du réservoir. Des études précises, conduites par des météorologistes et par les ingénieurs de l'EDF, montrent qu'il faut majorer de 15 à 20% ces pluies de saison froide au lieu de P, qui désigne les précipitations recueillies par le pluviomètre, nous considérons donc  $P_r$ , soit les précipitations réelles. Et nous écrivons, pendant la saison froide:

$P_r = 1.15 P$  (en général, sur toute la France du nord par exemple) ou  $P_r = 1.2 P$  (quand les vents sont très forts, par exemple sur toute la façade maritime nord ouest de la France).

Au cours de l'été, il est inutile de majorer P, d'abord parce que les vents sont moins rapides, mais aussi parce que l'erreur très faible imputable au pluviomètre est du même ordre que celle qu'on commet en calculant l'évaporation.

Il faut mesurer avec soin la lame précipitée sur le bassin-versant. Certains auteurs se contentent parfois de la moyenne des précipitations de quelques stations dites (« représentatives ». En toute rigueur, il faut tracer une carte précise d'isohyètes, à partir d'un réseau dense et bien contrôlé. On évalue ensuite, après avoir délimité le bassin sur une carte oro-hygro (le 1:200,000 français, par exemple), les surfaces respectives comprises entre les isohyètes. Cette mesure planimétrique s'effectue sur papier millimétré (on compte les mm<sup>2</sup>). Il suffit alors d'affecter chaque tranche pluviométrique élémentaire du coefficient correspondant à la surface arrosée, pour obtenir la tranche totale du bassin. L'évaluation pluviométrique est la plus longue et la plus délicate des quatre opérations du bilan. Elle doit se faire séparément pour chaque mois (12 cartes mensuelles). De son exactitude dépend généralement la fidélité du bilan.

### I.3.2. L'évaporation :

C'est la lame d'eau évaporée par les étendues liquides ou le sol humide et transpirée par les plantes. On l'appelle donc aussi évapotranspiration. Mais il faut distinguer l'évapotranspiration réelle (ETR) et l'évapotranspiration potentielle (ETP). L'ETP, que beaucoup d'auteurs appellent EP pour des commodités d'écriture, est la lame liquide évaporée et transpirée lorsque la fourniture d'eau au substratum terrestre est illimitée. Par exemple, sur un océan, un lac, une rivière ou une prairie inondée,  $ETR = ETP$ . Mais pendant l'été, si le sol est partiellement sec et s'il ne pleut pas, les plantes ne peuvent transpirer que la quantité d'eau dont elles disposent, c'est-à-dire une quantité inférieure à ETP. Cette réduction forcée de l'évaporation est évidemment préjudiciable au développement des plantes. Il est donc clair que ETP, et non ETR, représente les besoins en eau de la végétation. En conséquence, c'est bien ETP (que nous désignerons désormais par le symbole EP) qu'il faut introduire dans les bilans, pour connaître les conditions réelles d'abondance ou de disette en eau.

**I.3.4.L'écoulement :**

Les débits des rivières sont généralement bien connus, grâce aux mesurés des Compagnies d'électricité. Notons immédiatement qu'on ne peut pas reconstituer des séries d'écoulement à partir de quelques observations mensuelles isolées et par référence à des cours d'eau voisins de même régime.

**I.3.5.Le débit :**

Le débit est le volume d'eau qui traverse un point donné du cours d'eau dans un laps de temps déterminé. Il dépend des caractéristiques physiques du cours d'eau (sa pente, sa largeur, sa profondeur, etc.) et de la taille de son bassin versant, mais surtout des précipitations et de la fonte des neiges

**I.4.Définition un modèle hydrologique :**

Les modèles hydrologiques sont conçus à partir des connaissances et de l'expérience du modélisateur. Or cette connaissance est limitée à un nombre fini d'événements de crue et donc à une gamme limitée en intensité. En outre, la majorité des modèles hydrologiques doivent être calés avant de pouvoir être employés sur un bassin versant en particulier. On dit qu'un modèle fonctionne en extrapolation quand il est confronté à des événements dont l'intensité n'appartient pas à la gamme des intensités des événements hydrologiques qu'il a « expérimentés » lors de la phase de calage

**Les modèles ne sont pas égaux face à l'extrapolation :**

Quand le modèle n'a pas été calé pour des événements du type de celui qui est en cours, on ne sait pas exactement comment il va réagir. Certains modèles sont, par construction, assez stables et donnent des résultats assez raisonnables en extrapolation « modérée ». D'autres peuvent aboutir à des résultats absurdes.

**En extrapolation, d'autres sources d'incertitude s'amplifient**

De plus, quand le modèle est en extrapolation, de nombreuses autres sources d'incertitude peuvent être nettement plus fortes que sur d'autres gammes de débit. L'incertitude de prévision résultante s'accroît donc considérablement. (Singh, S. K., McMillan, H. et Bárdossy, A. (2012).

**I.5.L'objectif de la modélisation :**

Bear en 1993 avait simplifié les objectifs d'une modélisation hydrogéologique en trois éléments :

- mieux comprendre le fonctionnement du système ;
- fournir des informations nécessaires à la mise en œuvre d'un dispositif de mesures (pompages, traçages, etc.) ;
- réaliser des prédictions sur le comportement du système considéré en réponse à des sollicitations.

## **I.6 Les Etapes de la modélisation :**

Tout modèle doit comporter trois phases de construction (**Bertrandias, 1994, Dassargues, 1995**) :

### **I.6.1 Modèle conceptuel :**

Qui consiste à construire un modèle en adoptant une série d'hypothèses qui visent à simplifier le problème réel (géométrie et conditions des frontières, nature des matériaux géologiques, phases de fluides, mécanismes de transport, échanges, etc.) ;

### **I.6.2 Modèle mathématique :**

Au phénomène étudié est associé un modèle mathématique exprimée par une équation différentielle. Ce sont des équations exprimant les bilans des quantités extensives considérées (masse des fluides, des composés), des équations de flux, des conditions initiales et des conditions aux frontières ;

### **I.6.3 Modèle numérique :**

Souvent la solution analytique n'est pas adaptée (limites irrégulières, hétérogénéité du milieu, non-linéarité des problèmes), le modèle numérique intervient. Il permet d'effectuer un cycle interne d'itérations d'un problème sur la valeur du paramètre non-linéaire. Sa solution est trouvée en des points discrets du domaine spatio-temporel, ses équations aux dérivées partielles sont remplacées par un système d'équations algébriques en fonction des variables d'état comme inconnues et la solution du problème est obtenue pour le set spécifique de valeurs des paramètres. (**Farès Kssasra ; 2017**)

## **I.7 Le but de modélisation pluie –débit :**

Les modèles de ruissellement des pluies sont utilisés pour reproduire les débits, Données relativement rares, provenant de données plus facilement disponibles, telles que les précipitations et certaines caractéristiques du bassin. Il peut également simuler l'écoulement en dehors du domaine d'observation. Les modèles pluie- débits peuvent être utilisés pour :

### **I.8.Simulation de débits :**

Pour combler les lacunes du jeu de données, Reconstitution du débit historique (les données pluviométriques sont généralement période beaucoup plus longue que le trafic) ou permettre un traitement statistique

## **I.9 Prédétermination des débits de crue ou d'étiage :**

On se demande combien de temps Les crues dépassent les seuils de risque ou des étiages sont probables, et combien de temps ça dure. Ici, nous faisons une analyse de fréquence.

Cette la connaissance peut déterminer les dimensions des structures et des réservoirs, ou Aménagement du lit de la rivière.

### **I.9.1 Prévision des crues et des étiages :**

Il s'agit d'un problème d'évaluation précoce (retard heures à jours), connaissant l'état du bassin versant, la crue s'écoulera Peut être à risque (inondation) ou faible débit d'eau, peut nécessiter Gestion spécifique des ressources (par barrage-réservoir Par exemple) assurer l'approvisionnement en eau ou protéger la vie des poissons. Nous Il fait partie du processus d'analyse continue du bassin.

### **I.9.2. Influence d'aménagements sur l'hydrologie :**

Nous voulons être en mesure de prévoir les changements

Réponse du bassin versant après une modification ou un changement humain

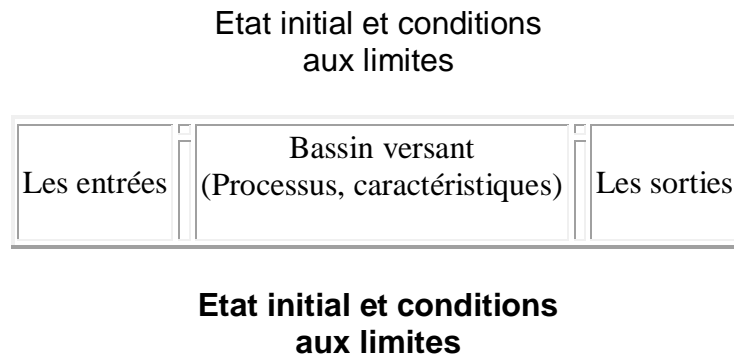
Environnemental. Ces questions mettent en évidence deux aspects importants, à savoir Évaluation des risques et gestion des ressources. Pertinence de la réponse

Les conditions que nous pouvons leur apporter sont les conditions du modèle dans la représentation du bassin en rapport avec les objectifs fixés.

## **I.10. Le concept de modélisation pluie- débit :**

Un modèle hydrologique, ou modèle pluie-débit, est un outil numérique permettant de représenter les relations pluie-débit au sein d'un bassin versant. Il peut convertir une série chronologique décrivant le climat d'un bassin versant donné (telle qu'une série de précipitations et de températures, qui sont entrées dans un modèle hydrologique) en une série de débits (la sortie d'un modèle hydrologique).

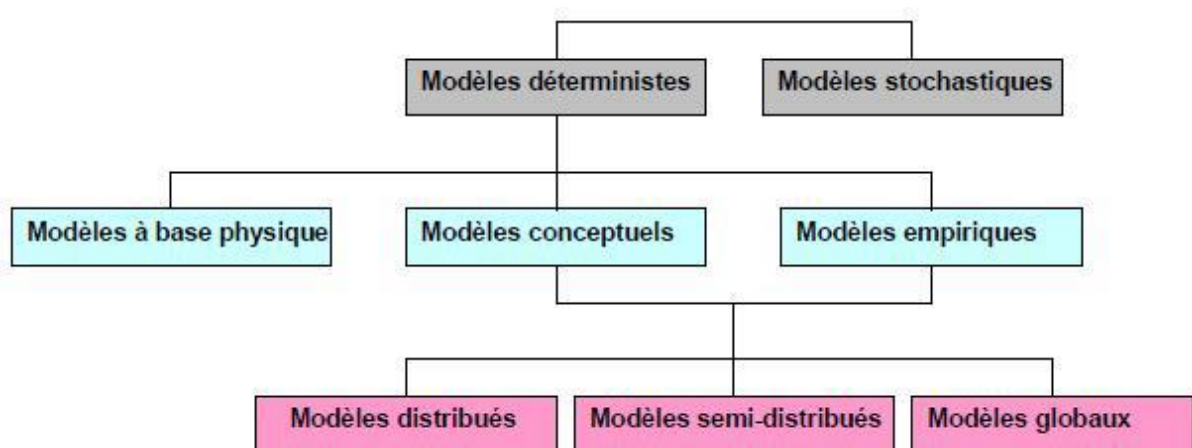
Un modèle hydrologique est caractérisé par cinq éléments qui le composent : la géométrie du bassin versant (système), l'entrée du système, les lois formelles du processus, l'état initial et les conditions aux limites du système, et le modèle de sortie. ( **Singh, 1995**)



**Figure I.4: Les composants d'un modèle hydrologique (GNOUMA P.,  
Etat de l'art : Modélisation hydrologique et typologie de modèles, 2006).**

**I.11 Classification des modèles hydrologiques :**

Depuis l'apparition de la modélisation hydrologique, de nombreux modèles ont été développés en fonction des objectifs recherchés, sur la base de différents choix d'élaboration, menant à une multitude de modèles exploitables, chacun étant doté de champs d'application et de validité restreinte. 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). La figure 04 donne une classification des modèles hydrologiques basée sur ces critères.



**Figure05 : classification des modèles hydrologique Relation entre les modèles  
pluie-débit (Berthier, 2008)**

### **I.11.1 Modèles stochastiques :**

La modélisation stochastique peut être envisagée toutes les fois qu'il y a des incertitudes sur les données ou parfois même sur les processus mis en jeu. On considère que l'approche stochastique est un moyen rationnel de traiter la caractérisation spatiale de la variabilité, et d'établir un lien entre les incertitudes des paramètres et celles des prédictions. Toutefois cette approche, bien qu'elle soit le meilleur moyen de caractériser la variabilité des grandeurs, nécessite la connaissance des lois de probabilité les plus courantes pour la variabilité considérée ou au moins de leurs premiers moments.

### **I.11.2 Modèles déterministes :**

Un modèle est dit déterministe (par opposition à stochastique) si aucune de ses grandeurs n'est considérée comme aléatoire, c'est à dire résultant soit de l'observation soit de grandeurs reconstituées. La plupart des modèles hydrologiques sont déterministes. Ces modèles sont associés à chaque jeu de variables de forçage, de variables d'état et de paramètres, une valeur de réalisation unique des variables de sortie (il s'agit essentiellement des débits simulés à l'exutoire d'un bassin versant).

### **I.11.3. Modèles à base physique :**

Le modèle à base physique est basé uniquement sur des équations de la physique, et ne comportant idéalement aucun paramètre. Il n'existe pas de modèle à base physique au sens strict en hydrologie. L'importance de l'hétérogénéité spatiale dans la réponse hydrologique des bassins versants rend cependant difficile voire impossible l'utilisation de tels modèles. La précision spatiale des données disponibles en particulier concernant les types de sols et leurs profondeurs n'est pas suffisante. Dans la pratique, les profondeurs et les conductivités moyennes des sols représentatifs de sous parties du bassin versant, doivent être évaluées par calage. Modèles paramétriques

### **I.11.4. Modèles empiriques :**

Les modèles paramétriques sont les modèles incluant des paramètres dont la valeur doit être estimée par calage.

#### **Modèles empiriques :**

Les modèles empiriques reposent sur les relations observées entre les entrées et les sorties de l'hydro-système considéré. Ils expriment la relation entre variables d'entrée et de sortie du système (relation pluie débit) à l'aide d'un ensemble d'équations développées et ajustées sur la base des données obtenues sur le système. Un modèle empirique ne cherche pas à décrire les causes du phénomène hydrologique considéré ni à expliquer le fonctionnement du système, le système est considéré comme une boîte noire.

**Modèles analytiques :**

Ce sont des modèles pour lesquels les relations entre les variables de sortie et les variables d'entrée ont été établies par analyse de séries de données mesurées. L'exemple type est celui des modèles linéaires : les paramètres de ces modèles sont liés aux coefficients de corrélation entre les variables. Notons que l'analyse des données peut conduire au choix de relations non linéaires entre les variables.

**Modèles conceptuels :**

Les modèles conceptuels considèrent en général le bassin versant, après quelques simplifications du cycle de l'eau, comme un ensemble de réservoirs interconnectés. Ce type de modèle reproduit donc au mieux le comportement d'un système, plutôt qu'il n'avance d'explications causales sur son comportement. Le modèle CEQUEAU est un parfait exemple de modèle conceptuel que nous présenterons dans la section suivante.

**VII-8 Modèles globaux :**

Dans un modèle global le bassin est considéré comme une entité unique. Des relations empiriques (issues de l'expérience) relient les entrées et les sorties sans chercher à se rapprocher d'une loi physique. Les modèles globaux offrent à l'utilisateur un choix très attractif, car il présente une structure très simplifiée, il ne demande pas trop de données, faciles à utiliser et à calibrer. La représentation du processus hydrologique est très simplifiée. Il peut souvent mener à des résultats satisfaisants, et spécialement si l'objectif majeur est la prévision d'une crue.

**Modèles spatialisés :**

Actuellement plusieurs modèles spatialisés correspondant aux différentes écoles hydrologiques sont en phase avancée de développement. En principe, les modèles spatialisés sont des modèles qui utilisent des entrées et des sorties où les caractéristiques des bassins versants sont distribuées dans l'espace. La spatialisation peut être arbitraire ou basée sur des divisions morphologiques naturelles (découpage en sous bassins) ou hydrologiques (aires contributives)

Nous pouvons classer les modèles spatialisés en trois grands types :

- ♣ Modèles conceptuels spatialisés ou semi-spatialisés ;
- ♣ Modèles physiques spatialisés ;
- ♣ Modèles physiques conceptuels semi-spatialisés.



**Modèles conceptuels spatialisés ou semi-spatialisés :**

Les modèles conceptuels spatialisés ou semi-spatialisés représentent un grand progrès sur les modèles globaux quand il s'agit d'analyser le fonctionnement interne d'un bassin. Le bassin versant est discrétisé en unités spatiales (mailles ou sous-bassins) considérées comme homogènes, qui se vident les unes dans les autres de l'amont en aval. Ainsi, on a la possibilité de tenir compte de la répartition spatiale des facteurs et de suivre la genèse et la propagation des débits à l'intérieur du bassin. C'est le cas du modèle

**Modèles physiques spatialisés :**

Les modèles à base physique spatialisés sont des modèles qui décrivent les mécanismes internes d'un système (bassin versant) ayant comme base les lois de la mécanique, de la physique, de la thermodynamique, etc. Du point de vue théorique, ces modèles sont indépendants de tout calage parce que leurs paramètres sont mesurables. Ils permettent une description théorique unifiée de la plupart des flux observés dans un bassin versant et servent à modéliser les principaux processus hydrologiques comme :

- \*L'écoulement de surface à partir des équations de Saint-Venant.
- \*L'écoulement en milieu saturé à partir des équations de Darcy.
- \*L'écoulement en milieu non saturé à partir des équations de Richards.
- \*L'évapotranspiration à partir des équations de conservation ou de relations entre flux.

A partir d'un découpage de l'espace en mailles de taille adaptée au problème à traiter, ils simulent les diverses composantes du cycle de l'eau sur chaque maille (ruissellement, infiltration, évapotranspiration) et convolent les transferts de maille à maille, jusqu'au réseau hydrographique constitué. Ces modèles sont complexes à mettre en œuvre et exigent d'importantes quantités de données. Ils sont bien adaptés à la simulation de la diversité d'un bassin. Cependant, ces modèles ne peuvent traiter les grands bassins en raison de leur grande hétérogénéité morphologique et météorologique. Parmi ces modèles on peut citer le modèle Mike SHE

**Modèles physiques-conceptuels semi-spatialisés :**

Pour dépasser les limites de chacune des approches précédentes (modèles conceptuels trop peu réalistes, modèles à base physique trop complexes), il est intéressant d'essayer une modélisation hydrologique qui peut être :

- ♣ A base physique, fondée sur les processus réels mais simplifiés ;
- ♣ Semi-spatialisée, fondée sur une discrétisation en unités relativement homogènes, qui permettent de tenir compte de la variabilité spatiale de la structure du bassin versant.

La méthode de discrétisation spatiale varie d'un modèle à l'autre : mailles carrées, sous-bassins versants, éléments de versant, plans versant et canal, unités hydrologiques ou aires contributives (modèle TOPMODEL).

## I.12 PRESENTATION DE QUELQUES MODELES PLUIE-DEBIT :

### I.12.1 MIKE SHE : la modélisation hydrologique complète :

Ce modèle a été conçu en collaboration avec l'INRS EAU Canada et le Laboratoire Hydrologie et Modélisation à Montpellier (Fortin et al. 1995), dans le but de créer un outil Capable à intégrer et gérer la spatialisation des données et des processus physiques. Il D'où l'utilisation des données issues de la télédétection et des systèmes d'information géographique. Il est divisé en 2 modules :

**PHYSITEL** : (pour le traitement des MNT pour déterminer les unités hydrologiques bassin et son réseau de drainage) et **HYDROTEL** (pour la modélisation hydrologique). Cette dernier module intègre le type de sol, la profondeur, en plus des résultats PHYSITEL Croissance des racines, précipitations (sous forme de pluie), utilisation et caractéristiques des terres Végétation (albédo, indice foliaire). Il simule l'ETP, la fonte des neiges, le ruissellement Superficiel (par le mouvement des ondes), la propagation des crues dans les rivières avec des vagues Ondes cinématiques ou diffuses. Le modèle a l'avantage d'intégrer des images satellites, en utilisant des équations physiques pour modéliser les processus d'origine et la Propagation des inondations et présentée dans une interface conviviale. Cependant, le calage initial nécessite beaucoup d'informations. De plus, il ne fait pas Le temps horaire est très limité pour la prévision des crues éclair. (Boursali, 2015)

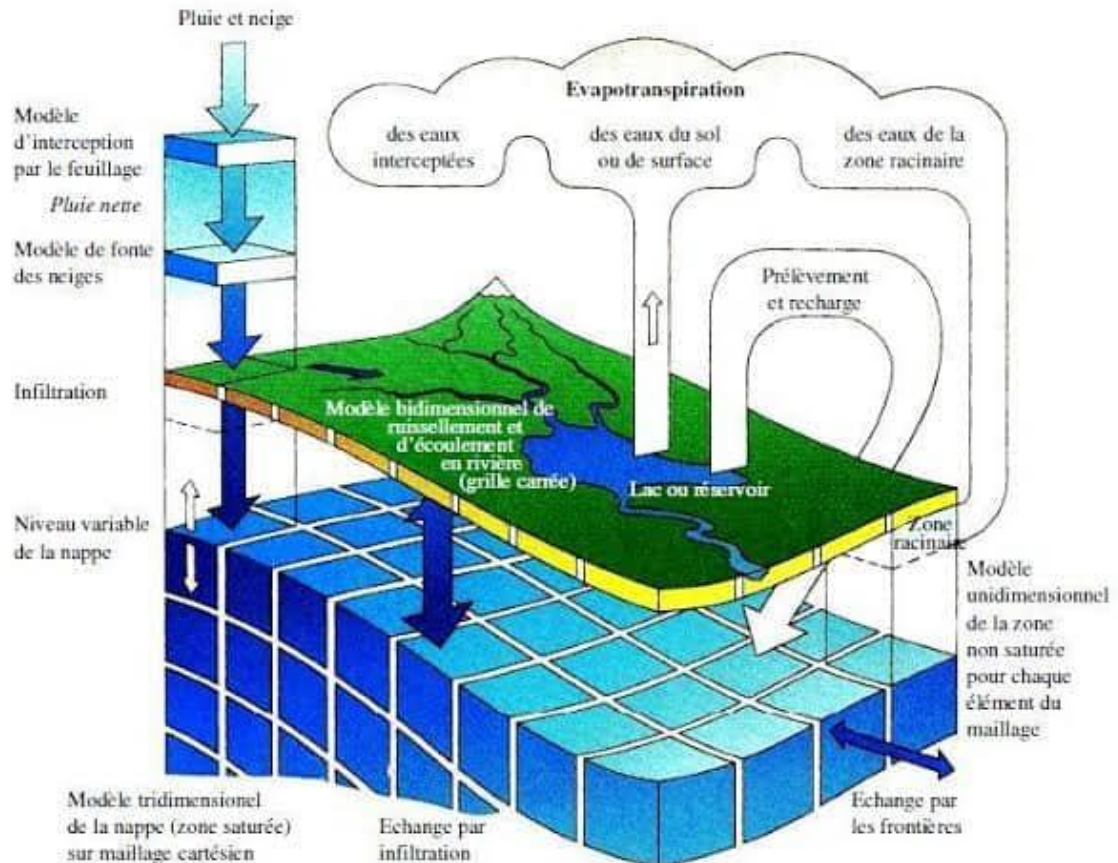


Figure I.6 : Cycle de l'eau dans le logiciel MIKE SHI .

**I.12.2. CEQUEAU :**

CEQUEAU est un modèle hydrologique conceptuel spatialisé, ou comme il le décrit Concepteur, modèle de bilan paramétrique matriciel développé depuis 1971

Recherche canadienne en sciences de l'eau et de l'environnement

Cela signifie trois choses :

- Dans ce modèle, le cycle hydrologique est décomposé en éléments (précipitations, évapotranspiration, fonte des neiges, infiltration...)
- Les bassins sont subdivisés en éléments, et les couches d'eau produites par chaque élément sont transférées au suivant ;
- Le but de ce modèle est de représenter le bilan volumique de la manière la plus réaliste possible de l'eau.

Le bassin versant est à double coupe. La première coupe en un carré entier

Uniforme (Figure 7 ) et la seconde, permettent de tenir compte de la topographie, donc Direction de l'écoulement de l'eau (Figure 8 ). Le transfert est assuré par les fonctions de production, qui transforme les précipitations réelles en précipitations utiles pour le bassin (injectées dans le modèle, après épuración de l'évapotranspiration et répartition en fonction des différentes couches du sol), et par la fonction de transfert qui assure alors le cheminement de l'eau entre les carreaux partiels.

Le modèle nécessite un certain travail en amont, y compris l'acquisition de données ; Il convient de noter que les données météorologiques et topographiques et la formation de ces données ne sont pas Complexité pas insurmontable. Il a surtout été utilisé au Canada où il a été conçu, en Amérique, l'Europe et l'Afrique, ce qui lui a valu une certaine notoriété. De plus, ce modèle est relativement facile à manipuler pour les utilisateurs conceptuels Suffisant pour l'analyse hydrologique.

Cependant CEQUEAU est un modèle très intéressant pour les grandes piscines, du moins Capacité globale importante, mais peu fiable uniquement sur des surfaces plus petites, ce qui Pas son métier. En effet, CEQUEAU utilise les étapes Le temps est trop long pour certains phénomènes qui, à grande échelle, sont difficiles Notable, mais avéré crucial pour une modélisation plus fine.

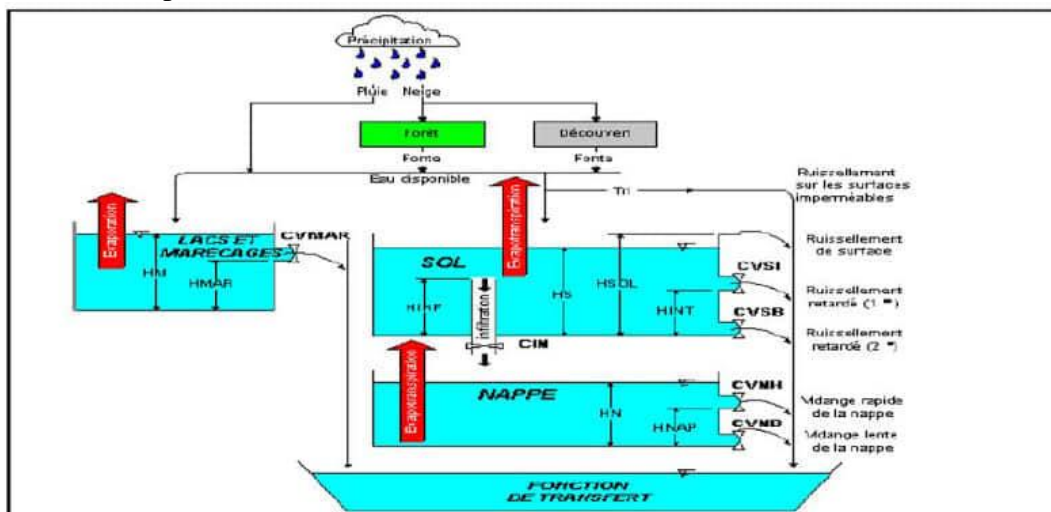


Figure I.7 : Fonction de production du modèle CEQUEAU.

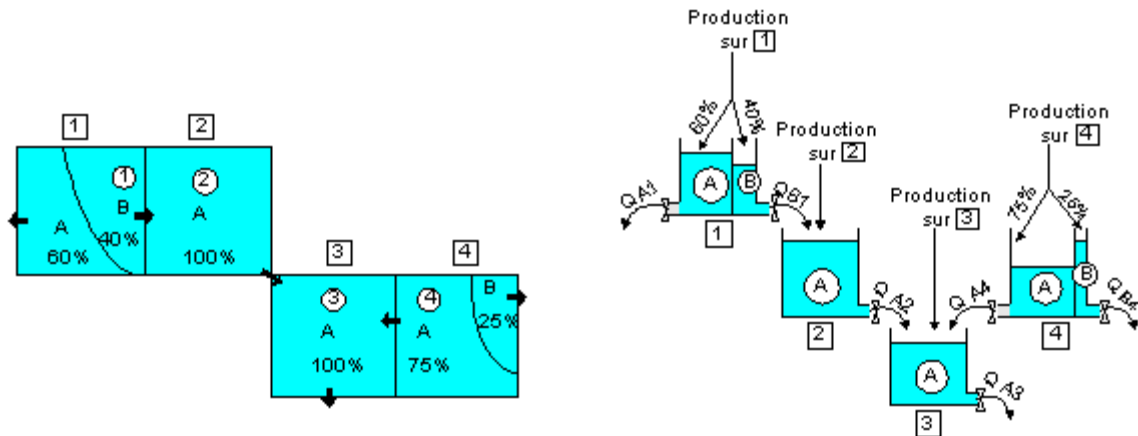


Figure I.8 : Fonction de transfert du modèle CEQUEAU.

### I.12.3. TOP MODEL :

TOPMODEL est un modèle semi-distribué destiné à reproduire le comportement hydro morphologique d'un bassin versant. Ce modèle est encore utilisé et amélioré car sa relative simplicité et les bons résultats qu'il fournit sont autant de motivations à son développement.

Ce modèle prédit, à chaque pas du temps, la distribution spatiale du contenu en eau au sein des différentes mailles du modèle numérique de terrain (MNT) du bassin versant considéré. Il est basé sur les concepts originaux de déficit en eau du sol par rapport à la saturation et à l'index topographique. Cette idée provient du fait que, depuis quelques années, la participation des écoulements souterrains aux variations des débits des rivières, même en période de fortes précipitations a été reconnue comme étant capitale (Maison.2000).

L'index topographique est utilisé pour déterminer, en fonction de la topographie du bassin, la quantité d'eau destinée au ruissellement et celle restant pour l'infiltration. La structure de ce modèle est illustrée sur (figure 9) avec S1, S2, S3 : niveaux dans les réservoirs ; m : un des paramètres du modèle ( Beven et Kirkby, 1979 in Perrin, 2000).

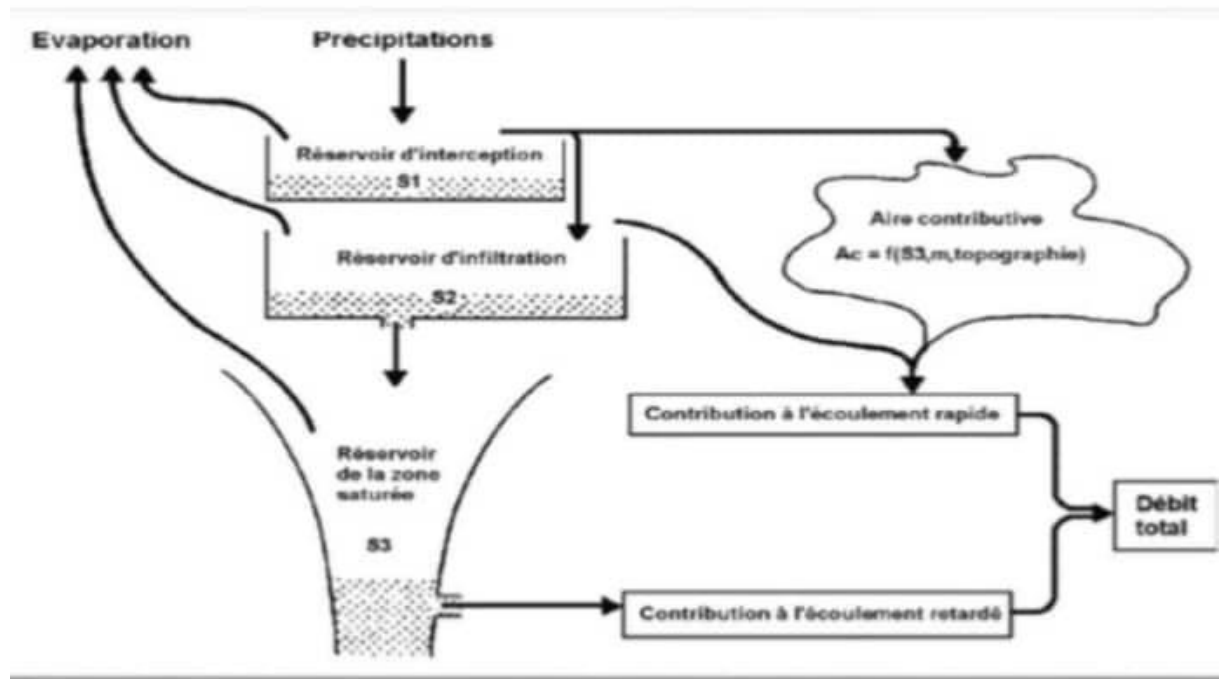


Figure I.9 : Représentation schématique de TOPMODEL.

#### TOPMO :

TOPMO est une variante du modèle TOPMODEL décrit par Beven et Kirkby (1979). TOPMO est un modèle avec pas plus de 8 paramètres libres.

P et E sont reçus par le réservoir intercepteur dont la capacité maximale est le paramètre X3. Si ce réservoir déborde, le flux de Pn s'ensuit. A l'inverse, si le contenu Le réservoir ne satisfait pas la demande potentielle E, la différence En est reportée Sur le réservoir S qui joue un rôle central dans le modèle. Débit Pn selon Le niveau du réservoir S entre celui-ci et le réservoir secondaire R (paramètre X5 et X6). Selon le remplissage de S, l'exigence En ne satisfait que Es (paramètres X7 et X8). S se vidange selon une loi de type exponentiel, dépendant du paramètre X2, pour donner Qs. Le réservoir de routage R se vidange selon une loi quadratique, dépendant du paramètre X1, pour donner Qr. Un retard X4 est appliqué à la somme de Qs et de Qr pour donner le débit de sortie Q. (Berthier, 2005)

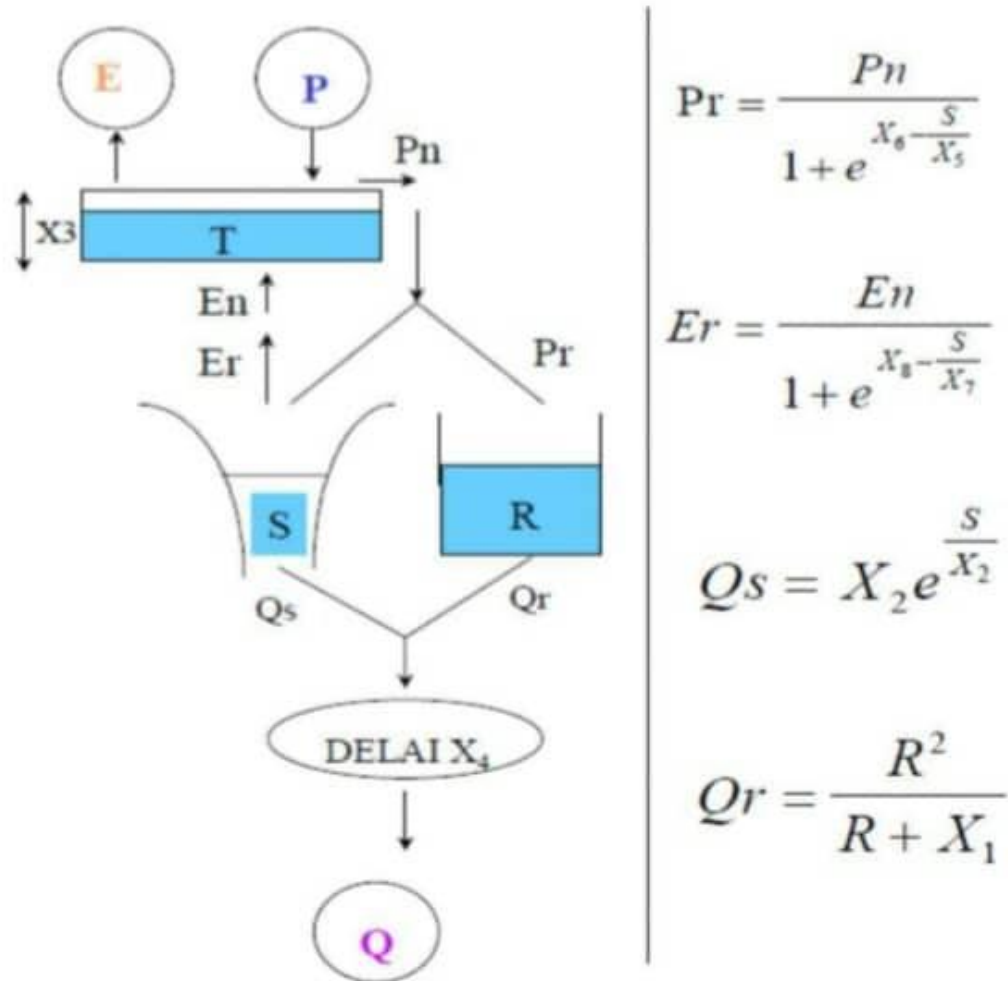


Figure I.10 : Représentation schématique de TOPMO.

**HEC HMS :**

Ce logiciel est développé par l'US Army HEC (Hydrological Engineering Center) ingénieur. La première version de ce logiciel est apparue en 1995. c'est un modèle pluie- débit, constitué d'un ensemble de modèles hydrologiques, peut être décrit La fonction du bassin versant est réalisée de manière spatialisée. géométrie du bassin versant peut être conceptualisé par un ensemble de sous-unités hydrologiques reliées entre elles par Composants hydrauliques. Cette description se fait à l'aide d'outils géométriques prédéfinis. Les précipitations sont décrites en introduisant des observations de pluviomètres ou

Beaucoup de pluie synthétique. chaque unité hydrologique et chacune de ces unités Connectez les éléments avec une variété de modèles de simulation hydrologique et hydraulique. Parmi ces modèles, on trouve :

- Modélisation des pertes par infiltration, rétention ou évapotranspiration, permettant l'Évaluation du ruissellement : modèles de perte initiale et de taux constant, modèles de déficit et un taux de perte constant, le modèle est basé sur le nombre de courbes (CN), le modèle GreenetAmpt
- Modèles de ruissellement direct sur les pentes : modèle dépendant de la méthode Ligne d'eau de l'unité, modèle d'onde de mouvement.

- Modèle d'écoulement des eaux souterraines : modèle constant, modèle de décroissance, Modèle de réservoir linéaire exponentiel.

- un modèle hydrologique fluvial dont les équations de base sont

Écoulement de surface libre : modèle Muskingum, modèle décalé (modèle), modèle d'onde cinématique, modèle de Muskingum- Cunge, ces modèles

Tenir compte de la géométrie de la section (bifurcation, confluence)

### **IHACRES :**

Compte tenu de l'analyse de recherche du modèle et du manque de données la répartition spatiale, la qualité moyenne de certaines mesures météorologiques disponibles, Et comme même les données disponibles ne peuvent donner qu'une idée d'une partie du bassin, alors Emplacement de la station hydrographique 021605. Face à cette pénurie de données, nous avons opté pour une approche conceptuelle globale et Sélection de modèles hydrologiques pour le génie rural (GR). En effet, le modèle GR est un modèle Les débits de pluie qui ont été testés dans les régions arides et semi-arides, avec une attention particulière pour gérer et développer rationnellement les ressources en eau.

Les objectifs de ce modèle sont nombreux citons à titre d'exemple :

- le modèle GR est un modèle complet et simple, donc adapté théoriquement à n'importe quel type de climat et notamment à celui des zones arides et semi arides, en plus il a la capacité de simuler aussi les pertes, l'écoulement de surface et l'écoulement souterrain;

- la fiabilité des résultats obtenus lors de son application à des sous bassins versants méditerranéens (Tafna (Bouanani, 2010), Mekerra, (Bourek, 2010), Bassin de Oued Sikkak (Bouanani et al., 2010) et Algérie septentrionale (Kabouya, 1990) nous a encouragés à appliquer ce modèle.

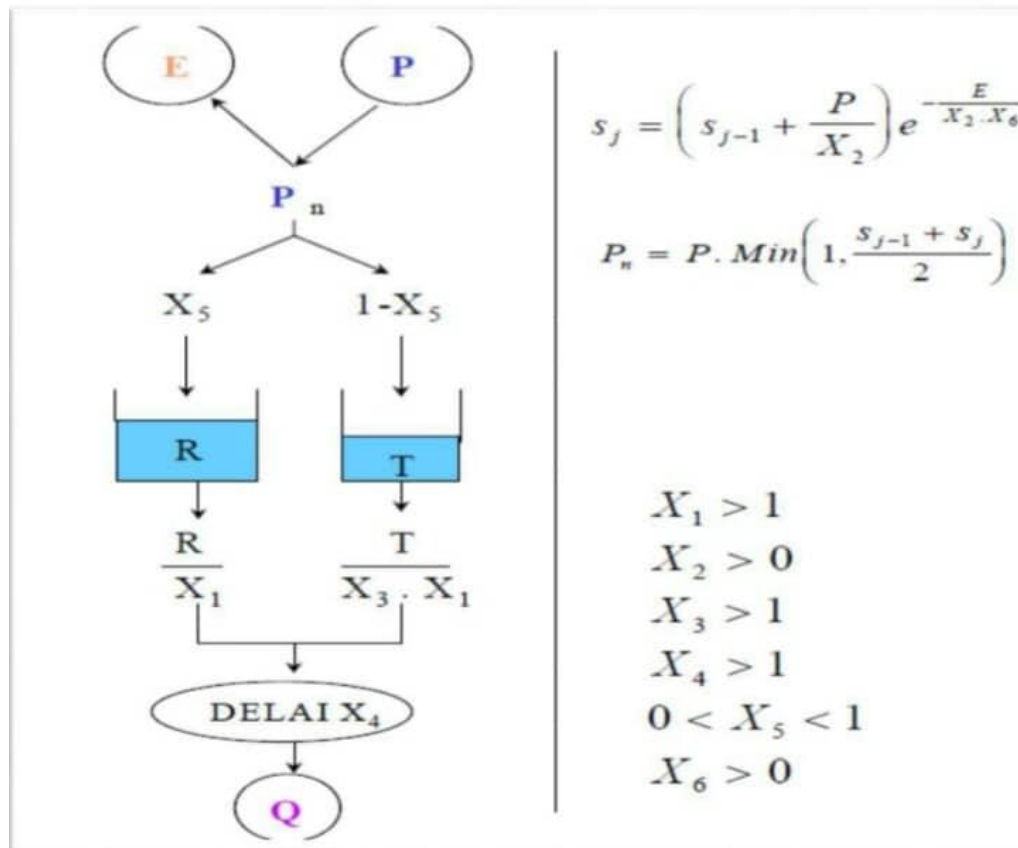


Figure I.11 : Représentation schématique d'IHACRES.

## I.13 Modèle GR :

### I.13.1 Historique :

L'idée de la modélisation 'GR' a été lancée par C. Michel en 1983 après l'analyse d'un modèle conceptuel CREC (Centre de Recherche et d'Etude de Chatou) (Cormary et Guilbot, 1973) à neuf paramètres sur le bassin expérimental de l'Orgeval. Il a été constaté que ce modèle présentait des difficultés au niveau de la mise en œuvre et du calage.

L'idée s'est développée alors, en partant du modèle le plus élémentaire possible (un unique paramètre lié à un unique réservoir). Cette démarche a débouché sur un modèle simple à deux paramètres GR2J (Michel, 1983). De façon plus générale, ce premier modèle était un modèle à deux paramètres, GR2, avec un paramètre pour chaque capacité de réservoir.

La version GR3J (Edijatno, 1987 ; Edijatno et Michel, 1989) a servi, principalement, comme modèle de base pour l'élaboration des autres versions au pas de temps journalier ainsi qu'au pas de temps mensuel. GR2 (Edijatno et Michel, 1989), GR3 (Michel, 1989), GR3M (Kabouya, 1990) et GR2M (Makhlouf, 1994) Les versions qui semblent les plus performantes et la plus robuste est (GR4J) proposée par Perrin (2000), GR5J (Le Moine 2008) et GR6J. (Pushpalatha 2013)

La version GR3J (Edijatno, 1987 ; Edijatno et Michel, 1989) a été principalement utilisée comme modèle de base pour d'autres versions à développer au pas de temps journalier et mensuel. GR2 (Edijatno et Michel, 1989), GR3 (Michel, 1989), GR3M (Kabouya, 1990) et GR2M (Makhlouf, 1994) Les versions les plus performantes et robustes semblent être celles proposées par Perrin (2000) (GR4J), GR5J (Le Moine 2008) et GR6J.



(Pushpalatha 2013)

### **I.13.2 Présentation du modèle GR :**

Le modèle global offre aux utilisateurs une option très intéressante car il offre une Structure très simplifiée, ne nécessite pas beaucoup de données, facile à utiliser et à calibrer. Cette La représentation des processus hydrologiques est très simplifiée. Cela a tendance à conduire à Résultat satisfaisant. Un exemple d'un tel modèle est le modèle GR (Génie Rural). (CEMAGREF), que nous utiliserons dans cette étude. Il s'agit d'un modèle de réservoir pour différents pas de temps GR1A, GR2M mensuel et GR4J journalier, GR5J et GR6J.

A cet effet, nous allons introduire ci-dessous le modèle de génie rural (GR), nous allons Données applicables à notre bassin versant. (Gary West, 2012)

### **I.13.3 Les variables d'un modèle hydrologique :**

Un modèle hydrologique est généralement défini par :

**Variables d'entrée** (variables indépendantes) : il s'agit des entrées du modèle, qui sont essentiellement les chroniques de pluie, d'ETP ou de température ;

**Variables de sortie** (variables dépendantes) : il s'agit des sorties du modèle, qui sont généralement les débits simulés à l'exutoire du bassin versant, mais qui peuvent parfois être aussi l'ETR, des niveaux piézométriques, ...etc.

**Variables d'état** : il s'agit des variables internes au système, qui évolue en fonction du temps et rendent compte de l'état du système à un moment donné. Typiquement, ces variables sont les niveaux de remplissage des différents réservoirs (neige / production / routage).

### **I.13.4 Paramètres :**

Les paramètres des modèles hydrologiques, qu'ils aient une pseudo-signification physique ou qu'ils soient calés, servent à adapter la paramétrisation des lois régissant le fonctionnement du modèle, au bassin versant étudié.

### **I.13.5 Le calage et validation d'un modèle :**

Le calage consiste donc à choisir le jeu de paramètres du modèle tel que

Il modélise au mieux le comportement hydrologique du bassin versant possible.

Le critère utilisé est le critère d'erreur des moindres carrés, présenté sous la forme

Sans dimension pour le critère de Nash borné. Les opérations de calage comprennent la recherche

Valeurs des paramètres du modèle qui minimisent l'erreur de modélisation dans le temps considéré. Généralement, une période de 5 ans est utilisée pour calibrer le modèle. La validation implique l'application d'un modèle sur des données qui n'ont pas été validées Utilisé lors de calage du modèle.

## I.14 Critères de validation des modèles :

### I.14.1 Le coefficient de détermination (R2) :

Il peut évaluer le degré d'association entre deux variables X et Y, et juger la droite de régression ajuste la qualité des points, en expliquant l'échelle La variance de Y change lorsque X change.

Il peut être estimé par l'équation suivante :

$$R2 = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i \text{ Obs} - Q_i \text{ Sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i \text{ Obs} - Q_i \text{ Myn})^2}$$

Où  $Q_{\text{moy}}$  est la moyenne des débits observés. Pour une bonne simulation des débits le coefficient de détermination doit être égal à un.

### I.14.2 Le critère de Nash :

Nash et Sutcliffe (1970) ont proposé un critère sans dimension, qui est considéré comme base des critères de performance des modèles pluie-débit.

Ce critère représente le pourcentage de variance naturelle que nous obtenons

Un modèle de référence qui fera la moyenne du débit calculé en tant que débit calculé observé.

Il est défini comme :

$$\text{Nash (Q)} = 100 \times [1 - \sum_i (Q_{i,\text{obs}} - Q_{i,\text{cal}})^2 / \sum_i (Q_{i,\text{obs}} - Q_{\text{obsmoy}})^2]$$

$Q_{i,\text{obs}}$  et  $Q_{i,\text{cal}}$  sont les débits observés et calculés au pas de temps  $i$ ,  
 $Q_{\text{obs}}$ , est la moyenne des débits observés sur la période considérée.

Le critère de Nash trouve son intérêt dans le fait qu'il est sans dimension, ce qui est Dans la plupart des cas, il est utile de comparer diverses séries hydrologiques. Selon Dans le modèle, le critère de Nash peut prendre des valeurs de  $-\infty$  à 100 %. Dans le dernier cas, L'erreur de modélisation est nulle

Cependant, ces évaluations sont définies pour de petits bassins versants

Homogène, son débit ne fluctue pas de manière significative.

Par conséquent, la validation du modèle pluie-débit reste problématique car

L'évaluation du modèle selon les critères est étroitement liée aux caractéristiques

Statistiques des émissions simulées (en particulier la variance).

En fait, pour la plupart des normes, l'erreur de simulation est

Les conditions de hautes eaux (débit élevé) sont plus probables que les conditions de basses eaux Généralement moins de 1,0 m<sup>3</sup>/s.

Par conséquent, il est important de noter que l'évaluation du modèle repose toujours sur l'expérience chaque hydrologue où la validation du modèle est basée sur les critères de sélection.

Au pas de temps mensuel, la différence entre les données simulées et les données observées ressemble à ceci

La validation du modèle à cette échelle est problématique, notamment en raison de la durée La mise en place est très longue.

Dans ce cas, le modélisateur doit fixer une limite théorique, pour laquelle il doit

Déterminez la valeur du modèle. (BENKACI A. juin 2006).

### I.14.3 Le critère RMSE (Root Mean Squared Error):

Elle est définie comme la racine carrée de l'erreur quadratique, en introduisant

La racine carrée est conçue pour homogénéiser la différence entre les débits simulés et observés

Surtout dans les cas extrêmes (faible ou fort débit) car cette erreur est

Carré dans le cas de critères quadratiques. La norme RMSE exprimée en m<sup>3</sup>/s est définie comme suit :

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_{i\text{obs}} - Q_{i\text{sim}})^2}$$

### XII -4- Le coefficient de corrélation (R) :

Il est défini par :

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n ((Q_{i\text{obs}} - Q_{\text{moy obs}}) * (Q_{i\text{sim}} - Q_{\text{moy sim}}))^2}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{i\text{obs}} - Q_{\text{moy obs}})^2 * \sum_{i=1}^n (Q_{i\text{sim}} - Q_{\text{moy sim}})^2}}$$

Si la valeur du critère est proche de zéro, optimisez le modèle. Cependant Les résultats sont fortement influencés par la valeur significative du biais, correspondant à souvent dans les inondations

### Conclusion :

En hydrologie, la modélisation se concentre généralement sur la relation entre la pluie et le débit, c'est-à-dire que le modèle utilise la pluie comme variable d'entrée pour calculer l'hydro-gramme à l'exutoire du bassin versant. Les modèles hydrologiques sont un outil très important pour comprendre la dynamique des bassins versants.

Les modèles conceptuels ou empiriques de « réservoir » semblent mieux faciliter la compréhension des systèmes réels (bassins versants). Cela dit, à notre avis, le modèle conceptuel global correspond le mieux au niveau actuel de compréhension de la fonction hydrologique du bassin versant.

***Chapitre II : Les Modèles  
Hydrologique du Génie  
Rurale (GR)***

## **II.1 Introduction**

D'après qu'il pleuve, la pluie donne des cours d'eaux et chaque point d'eau peut de définir un bassin versant et des débits observés

Dans ce point les précipitations tombées a liés directement sur ce bassin. D'après l'observation fais en quantifiant sur la précipitation, on arrive à découvrir le répons de quantité de débite du bassin. La simulation hydrologique du bassin versant, qui définit comme la transformation de la pluie en débit passe par l'utilisation d'un modèle hydrologique. Le passage de la pluie vers débit reste un problème compliquait mais demande pour une utilisation simple un nombre de paramètres limité. La modélisation conceptuelle peut de minimiser le nombre de paramètres qui en jeu un rôle important dans le modèle mais abandonner à une connaissance minutieuse des différents phénomènes. Le perfectionnement des attirails de modélisation hydrologique est une thématique de recherche très active.

Ce perfectionnement s'estime grâce au calcul de la performance des modèles pluie-débit, donc la puissance d'un modèle à reproduire des débits observés, qui s'estime à l'aide des critères de performances.

cependant, un perfectionnement de simulation des débits observés sur un bassin donné ne pas toujours même dans un autre bassin, que ce soit à cause des propriétés hydrologiques et des conditions climatiques variable dans le temps, ou bien mal choix de modélisation par exemple.

Les modèles Génie Rurale (GR) sont des modèles qui permettent, à partir les donner des précipitations et températures passées, de simuler des débits en un point d'une rivière. Ces outils sont appliqués sur des bassins versants différents et sur des périodes différentes à des fins de généralisation des résultats. Ces modèles hydrologiques inclus un certain nombre de propriétés, qui doivent être définit par calage, donc on fait appel à une fonction dite fonction objectif qui est un norme numérique qu'on essaye d'optimiser, mesurant l'écart entre les observations et les simulations.

## II.2 La modélisation hydrologique

### II.2.1 Structure du modèle

Le modèle GRP est un modèle hydrologique global, apparenté aux modèles conceptuels, qui fonctionne en continu à pas de temps horaire. Il a été développé pour un objectif spécifique de prévision des crues.

Il a une structure à réservoirs (voir Figure)

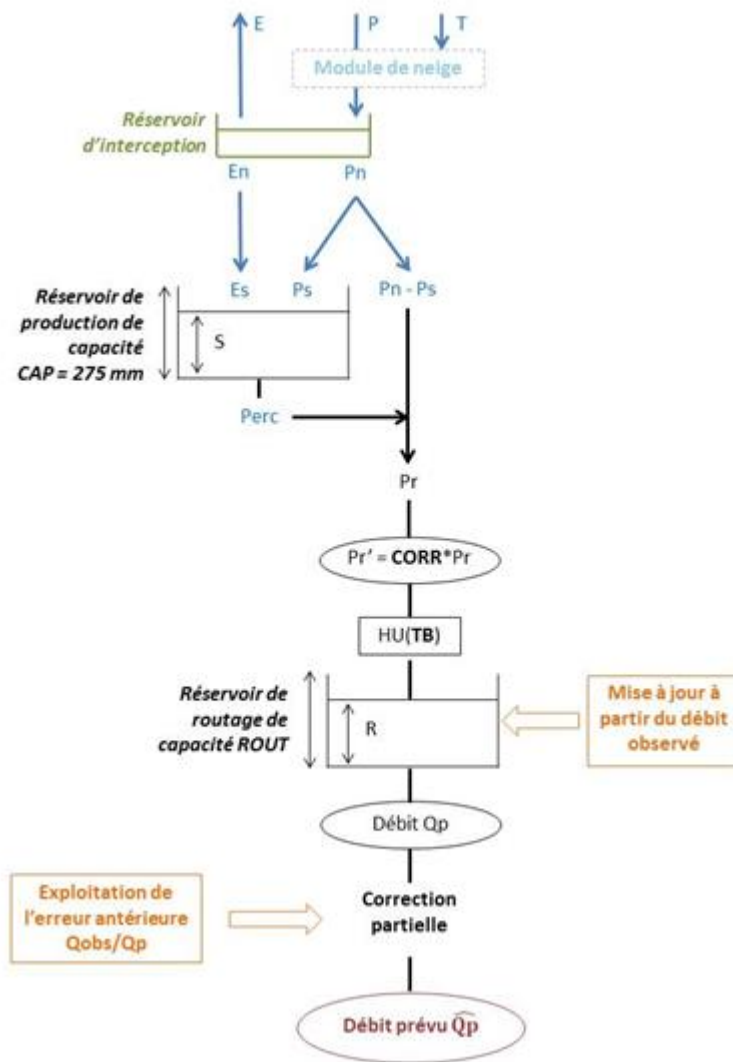


Figure II.1 : structure à réservoirs.

### II.3 But de la modélisation hydrologique

La modélisation pluie-débit a pour but un compte rendu de la transformation pluie tombée dans une zone donnée (le bassin versant) en débit qui en alimente à travers de ce bassin, il s'agit au début d'un exercice de simulation répondant un objectif de l'entendement scientifique, c'est-à-dire expliciter les différents flux et phénomènes associés, La simulation hydrologique peut également être motivée par un objectif pratique : rendre compte des séries temporelles de débits. (Berthet, 2010)

### II.4 Mode de développement

La « grande hydraulique » fut un modèle scientifique et centralisateur d'aménagement par l'irrigation, conçu et géré par des corps d'ingénieurs bâtisseurs depuis la deuxième partie du 19<sup>ème</sup> siècle.

Bien que ces modèles soient parfois apparentés à des modèles conceptuels du fait de leur structure à réservoirs, ce sont en fait des modèles empiriques: leur construction s'est faite sur la base de grands jeux de données et en découvrant progressivement la structure permettant de reproduire au mieux le comportement hydrologique du bassin versant (c'est-à-dire sa réponse aux pluies). Si l'enrôlement de la recherche au service d'États aménageurs, ou de bailleurs de fonds, a été très marquant pour le domaine de l'irrigation, le propos pourrait être sans doute élargi à d'autres domaines (sciences agronomiques, par exemple) et à d'autres acteurs.

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

- Représentation globale du bassin versant,
- Approche empirique de développement sans recours a priori à la physique des écoulements,
- Augmentation progressive de la complexité de la structure du modèle à part de structures simples,
- Justifier la complexité de la structure d'un modèle par ses performances,
- Recherche de structures de modèle générales (applicables à des bassins variés),
- Utilisation de plusieurs échantillons de bassins versants pour tester les performances des modèles (voir par exemple (Andréassian et al., 2006),
- Évaluation d'un modèle par rapport à d'autres structures de modèle.

## II.5 Principales caractéristiques

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

- ❖ **au niveau des processus** : les modèles GR proposent des relations comportementales simples à l'échelle du bassin, mises au point empiriquement et sans liens directs avec la physique des processus à petite échelle et pouvant représenter une moyenne de plusieurs processus;
- ❖ **au niveau de l'espace** : les modèles GR sont globaux, c'est-à-dire que, tout en reconnaissant l'extraordinaire hétérogénéité de tout bassin versant, ils considèrent le bassin versant comme un tout. Les tentatives de distribution progressive n'ont, jusqu'à présent, pas abouti à des résultats intéressants. C'est le comportement de la moyenne spatiale qui est étudié en priorité ;
- ❖ **au niveau du temps** : les modèles GR ont été développés pour des pas de temps de fonctionnement spécifiques : annuel (GR1A), mensuel (GR2M) , journalier (GR4J, GR5J et GR6J) et horaire (GR3H) .

Dans la suite, on désignera par P (mm) la hauteur journalière de pluie, par E (mm) l'évapotranspiration potentielle journalière (ETP) et par Q (mm) le débit simulé (mm).

P est une estimation de la pluie de bassin, calculée à partir de l'information pluviométrique disponible (postes au sol notamment. Toutes les variables internes des modèles sont mesurés en mm.

## II.6 Description du modèle pluie-débit annuel GR1A

Le modèle GR1A (modèle du Génie Rural à 1 paramètre Annuel) est un modèle pluie-débit global avec un seul paramètre. il a développée a été initié au Cemagref à la fin des années 1990, avec pour objectif de mettre au point un modèle de simulation pluie-débit robuste et fiable en vue d'utilisations pour des applications d'évaluation et de gestion de la ressource en eau.

La principale version, que nous présentons ici, est celle proposée par Mouelhi (2003) et Mouelhi et al. (2006a).

Il existe grand nombre de versions du modèle annuel GR. La forme de la dernière version qui développer par Mouelhi (2003) est donnée ici. Un exemple d'application est écria par Mouelhi et al. (2006).



### II.6.1 Description mathématique :

Le modèle GR1A avoir une structure très simple puisqu'elle se traduit à une simple équation,

Le modèle GR1A traduit sous la forme d'une équation

$$Q_k = p_k \left\{ 1 - \frac{1}{\left[ 1 + \left( \frac{0.7P_k + 0.3P_{k-1}}{X.E} \right)^2 \right]^{0.5}} \right\}$$

Où :

$Q_k$  : est le débit simulé de l'année(k)

$P_k$  : est la pluie observée de l'année(k)

$P_{K-1}$  : est la pluie observée de l'année(k-1)

$E_k$  : est l'évapotranspiration potentielle de l'année (k).

$X$  : est le paramètre du modèle à optimiser.

Où  $X$  est l'unique paramètre du modèle :

Cette équation est dérivée à travers la formule de l'équation de Turc (1955), qui donne l'écoulement moyen du chaque année au l'autre. la recherche systématique de la bonne manière de prendre en compte l'état antérieur du système a montré que l'on devait se limiter à prendre en compte la pluie de l'année précédant l'année en cours. Le facteur  $X$  traduit l'influence d'une ouverture du bassin sur l'extérieur non atmosphérique (par exemple échange avec des nappes profondes ou avec des bassins adjacents dans le cas d'une non-superposition des limites topographiques et géologiques)

#### Remarque

Si  $X$  est supérieur à 1 ( $X > 1$ ), le système perd de l'eau.

Si  $X$  est plus petit que ( $X < 1$ ), le système en gagne, le tout exprimé en fraction de l'ETP.

## Paramètre

Le modèle comporte qu'un paramètre optimisable juste, c'est le paramètre  $X$  adimensionnel. Avec l'évapotranspiration qui sembler comme coefficient modulateur potentielle. Sur un étendu échantillon de bassins versants, la médiane de  $X$  vaut 0.7 et un intervalle de confiance à 90% est donné par [0.13 ; 3.5] (Andreassian et al., 2007).

### II.7 Description du modèle pluie-débit mensuel GR2M

Le modèle GR2M (modèle du Génie Rural à 2 paramètres Mensuel) est un modèle pluie-débit global à deux paramètres optimisables :

$X_1$ , quantité de capacité du réservoir de production qui mesuré par (mm)

$X_2$ , coefficient d'échanges souterrains (mm). Le modèle est à pas de temps mensuel. Il fonctionne autours de deux réservoirs, un de production (ou réservoir sol) et l'autre pour routage sur lesquels les ajustements et interception se font différemment sur les entrées.

Le modèle utilise en entrées la précipitation moyenne et l'ETP, et fournit en sortie le débit (Sossou, 2011). Ce modèle a été développé initié au Cemagref à la fin des années 1980, avec des objectifs d'applications dans le domaine des ressources en eau et des étiages.

Sa structure, bien qu'empirique, l'apparente à des modèles conceptuels à réservoirs, avec une procédure de suivi de l'état d'humidité du bassin qui semble être le meilleur moyen de tenir compte des conditions antérieures et d'assurer un fonctionnement en continu du modèle. Sa structure associe un réservoir de production et un réservoir de routage ainsi qu'une ouverture sur l'extérieur autre que le milieu atmosphérique. Ces trois fonctions permettent de simuler le comportement hydrologique du bassin.

#### II.7.1 Description mathématique

Un schéma de la structure est donné à la (Figure !!!).  $P_k$  est la pluie mensuelle du mois  $k$  et  $E$  l'évapotranspiration potentielle moyenne pour le même mois calendaire. Les équations qui régissent le modèle sont les suivantes :

#### Production

La fonction de production du modèle repose sur un réservoir de suivi d'humidité du sol. Une partie  $P_s$  de la pluie  $P_k$  va être ajoutée au contenu  $S_k$  dans le réservoir en début de pas de temps :

$$p_s = \frac{X_1 \left(1 - \left(\frac{S_k}{X_1}\right)^2\right) \cdot \tanh\left(\frac{P_k}{X_1}\right)}{1 + \frac{S}{X_1} \cdot \tanh\left(\frac{P_k}{X_1}\right)}$$

Le paramètre  $X_1$ , capacité du réservoir, est positif et exprimé en mm. La pluie en excès,  $P_1$ , est donnée par :

$$p_1 = P - p_s'$$

Et le contenu du réservoir est actualisé :

$$S' = S_k + p_s'$$

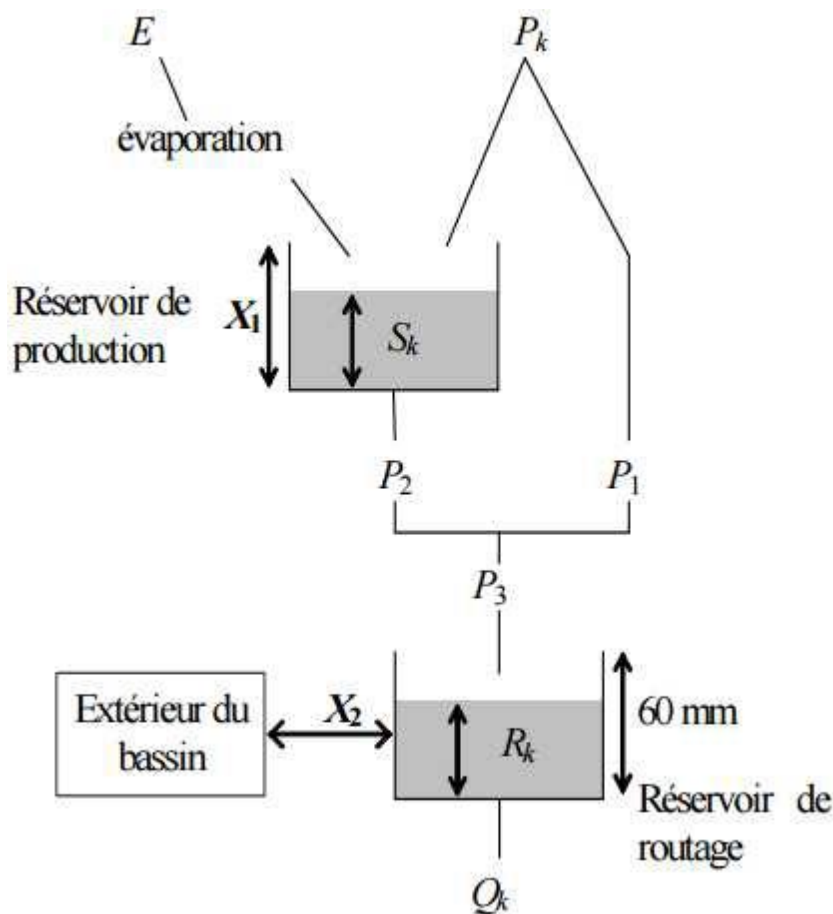


Figure II.2 : Schéma de la structure du modèle GR2M.

Du fait de l'évapotranspiration, une quantité  $E_s$  est prélevée du réservoir :

$$p_s = \frac{S' \cdot \left(2 - \frac{S'}{X_1}\right) \cdot \tanh\left(\frac{E}{X_1}\right)}{1 + \left(1 - \frac{S'}{X_1}\right) \cdot \tanh\left(\frac{E}{X_1}\right)}$$

$E$  est l'évapotranspiration potentielle moyenne du mois calendaire considéré. Le niveau  $S'$  devient  $S''$  :

$$S'' = S' - E_s$$

## II.8 Percolation

Le réservoir de suivi d'humidité du sol se vidange ensuite selon une percolation  $P_2$  :

$$P_2 = S'' \cdot \left\{ 1 - \left[ 1 + \left( \frac{S''}{X_1} \right)^3 \right]^{-1/3} \right\}$$

Et son niveau  $S_{k+1}$ , prêt pour les calculs du mois suivant, est alors donné par :

$$S_{k+1} = S'' - P_2$$

La quantité d'eau totale  $P_3$  qui atteint le réservoir de routage est donnée par :

$$P_3 = P_1 + P_2$$

Le niveau  $R_k$  dans le réservoir devient alors  $R'$  :

$$R = R_k + P_3$$

Un terme d'échange en eau souterrain  $F$  a été imposé par les données des nombreux bassins utilisés. Ignorer cette ouverture sur l'extérieur non atmosphérique conduit à une baisse considérable de l'efficacité du modèle.  $F$  est alors calculé par :

$$F = -(X_2 - 1) \cdot R'$$

Le paramètre  $X_2$  est positif et adimensionnel. Le niveau dans le réservoir devient :

$$R'' = X_2 + R'$$

Le réservoir, de capacité fixe égale à 60 mm, se vidange pour donner le débit  $Q_k$  selon l'équation suivante:

$$Q_k = \frac{R''^2}{R'' + 60}$$

Le contenu du réservoir est enfin actualisé par :

$$R_{k+1} = R'' + Q_k$$

### Paramètres

Le modèle a deux paramètres optimisables :

X1 : capacité du réservoir de production (mm)

X2 : coefficient d'échanges souterrains (-)

Sur un large échantillon de bassins versants, on obtient les valeurs données dans le Tableau suivant :

Paramètre	Médiane	Intervalle de confiance à 90%
X1 (mm)	380	140--2640
X2 (-)	0.92	0.21--1.31

**Tableau II.1. Valeur des paramètres du modèle GR2M obtenues sur un large échantillon de bassins versants.**

## II.9 Description du modèle pluie-débit journalier GR4J

Le modèle GR4J (modèle du Génie Rural à 4 paramètres Journalier) est un modèle pluie-débit global à quatre paramètres. le développement de ce modèle a été par Cemagref au début des années 1980, avec pour objectif obtenir un résultat du modèle de simulation pluie-débit robuste et fiable en vue d'utilisations pour des applications de gestion de la ressource en eau et d'ingénierie (dimensionnement d'ouvrage, prévision des crues et des étiages, gestion de réservoirs, détection d'impact...).

Ces le 4 paramètre peut optimisai ce modèle:

X1, capacité du réservoir de production (mm).

X2 : coefficient d'échanges souterrains (mm).

X3 : capacité à un jour du réservoir de routage (mm).

X4 : temps de base de l'hydro-gramme unitaire HU1 (j).

Le modèle utilise en entrée la hauteur de pluie moyenne sur le bassin versant P (mm) et l'évapotranspiration potentielle E (mm) (Sossou, 2011).

Ce modèle a développée et mis ajourée plusieurs versions, proposées successivement par Edijatno et Michel (1989), Edijatno (1991), Nascimento (1995), Edijatno et al. (1999), Perrin (2000), Perrin (2002) et Perrin et al.

(2003) qui ont permis d'améliorer progressivement les performances du modèle. C'est la version de Perrin et al. (2003) qui est présentée ici.

Bien que GR4J soit un modèle empirique, sa structure l'apparente à des modèles conceptuels à réservoirs, avec une procédure de suivi de l'état d'humidité du bassin qui permet de tenir compte des conditions antérieures et d'en assurer un fonctionnement en continu. Sa structure associe un réservoir de production et un réservoir de routage, des hydro-grammes unitaires ainsi qu'une fonction d'ouverture sur l'extérieur non atmosphérique permettant de simuler le gros du comportement hydrologique du bassin.

Le modèle GR4J a certaines fonctions communes avec le modèle GR2M (par exemple la fonction de production liée au réservoir sol). Son module de routage est cependant plus sophistiqué qu'au pas de temps mensuel.

### **II.9.1 Description mathématique**

Un schéma de la structure est donné à la Figure.  $P_k$  est la pluie journalière du jour  $K$  et  $E$  l'évapotranspiration potentielle moyenne pour le même jour calendaire.

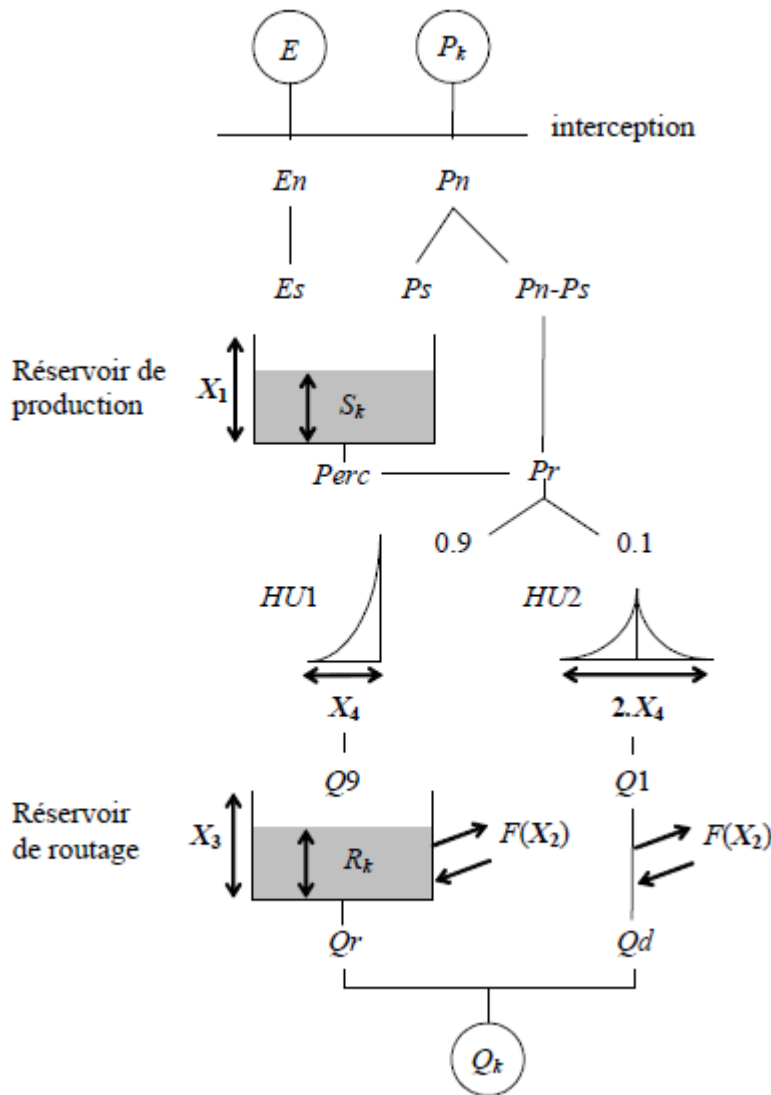


Figure II.3 : Schéma de la structure du modèle GR4J.

### II.10 Neutralisation

La première opération est la neutralisation de  $P_k$  par  $E$  pour déterminer une pluie nette  $P_n$  et une évapotranspiration nette  $E_n$  calculée par :

Si  $P_k \geq E$  alors  $P_n = P_k - E$  et  $E_n = 0$  .....

Si  $P_k \leq E$  alors  $P_n = 0$  et  $E_n = E - P_k$  .....

### II.11 Fonction de rendement

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 :

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

Où  $X_1$  (mm) est la capacité maximum du réservoir de production et  $S_k$  le contenu du réservoir de production au début du jour  $k$ .

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 :

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

Le contenu du réservoir qui résulte de ces opérations est donnée par :

$$S' = S_k + P_s - E_s$$

### Percolation

Une percolation  $P_{erc}$  issue du réservoir de production est alors calculée par l'équation suivante :

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

Par suite, le contenu du réservoir devient :

$$S_{K+1} = S' - P_{erc}$$

Et la quantité d'eau  $P_r$  qui atteint finalement la partie routage du modèle est donnée par :

$$P_r = P_{erc} + (P_n - P_s)$$

### II.12 Hydro-grammes unitaires :

$P_r$  est divisée en deux composantes d'écoulement, 90 % étant routés par un Hydro-gramme unitaire HU1 et un réservoir de routage et 10 % par un hydro-gramme unitaire symétrique HU2. HU1 et HU2 dépendent du même paramètre  $X_4$ , temps de base de HU1 exprimé en jours.

Les ordonnées des hydro-grammes sont calculées à partir des courbes en  $S$  notées respectivement SH1 et SH2, qui correspondent aux fonctions cumulées de l'hydro-gramme. SH1 est définie en fonction du temps par :



- Pour  $t \leq 0$   $SH(t)=0$
- Pour (t)  $0 < t < X_4$   $SH1(t)=\left(\frac{t}{X_4}\right)^{\frac{5}{2}}$
- Pour  $t \geq X_4$   $SH(t)=1$

SH2 est définie de façon similaire par :

- Pour  $t \leq 0$   $SH2(t)=0$
- Pour (t)  $0 < t \leq X_4$   $SH2(t)=\frac{1}{2}\left(\frac{t}{X_4}\right)^{\frac{5}{2}}$
- Pour  $X_4 < t < 2.X_4$   $SH2(t)=1 - \frac{1}{2}\left(2 - \frac{t}{X_4}\right)^{\frac{5}{2}}$
- Pour  $t \geq 2.X_4$   $SH2(t)=1$

Les ordonnées de HU1 et HU2 sont alors calculées par :

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

$$UH2(j)=SH1(j)-SH2(j-1)$$

A chaque pas de temps k, les sorties  $Q_9$  et  $Q_1$  des deux hydrogrammes correspondent à la convolution des pluies antérieures par la clé de répartition donnée par l'hydrogramme discrétisé et sont calculées par :

$$Q_9(k) = 0.9 \cdot \sum_{j=1}^l UH1(j) \cdot P_r(k-j+1)$$

$$Q_1(k) = 0.1 \cdot \sum_{j=1}^l UH2(j) \cdot P_r(k-j+1)$$

Où  $l = \text{int}(X_4) + 1$  et  $m = \text{int}(2.X_4) + 1$ , avec  $\text{int}(\cdot)$  désignant la partie entière.

### Fonction d'échange avec l'extérieur non atmosphérique

Un échange souterrain en eau est calculé par :

$$F = X_2 \cdot \left(\frac{R_k}{X_3}\right)^{7/2}$$

où  $R_k$  est le niveau dans le réservoir en début de pas de temps,  $X_3$  la capacité à un jour du réservoir et  $X_2$  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.

### II.11 Réservoir de routage

Le niveau dans le réservoir de routage est modifié en ajoutant la sortie  $Q_9$  de l'hydro-gramme HU1 et F :

$$R' = \max(0; R_k + Q_9(k) + F)$$

Il se vidange ensuite en une sortie  $Q_r$  donnée par :

$$Q_r = R' \cdot \left\{ 1 - \left[ 1 + \left( \frac{R'}{X_3} \right)^4 \right]^{\frac{1}{4}} \right\}$$

Le niveau dans le réservoir devient :

$$R_{k+1} = R' - Q_r$$

### II.12 Ecoulement total

La sortie  $Q_1$  de l'hydro-gramme HU2 est soumise au même échange pour donner la composante d'écoulement  $Q_d$  :

$$Q_d = \max(0; Q_1(k) + F)$$

Le débit total  $Q$  est alors donné par :

$$Q_k = Q_r + Q_d$$

#### Paramètres

Le modèle GR4J ne comporte que quatre paramètres à caler:

X1: capacité du **réservoir de production** (mm)

X2: coefficient **d'échanges souterrains** (mm)

X3: capacité à un jour du **réservoir de routage** (mm)

X4: temps de base de l'**hydro-gramme unitaire HU1** (j)

Sur un large échantillon de bassins versants, Andreassian et al., 2007 ont obtenu les valeurs données dans le Tableau II.2 suivant.

Paramètre	Médiane	Intervalle de confiance à 80%
$X_1$ (mm)	350	100-1200
$X_2$ (mm)	0	-5à3
$X_3$ (mm)	90	20à300
$X_4$ (mm)	1.7	1.1à2.9

**Tableau II.2 : Valeur des paramètres du modèle GR4J obtenues sur un large échantillon de bassins versants.**

### **II.13 Applications des modèles**

Les modèles présentés précédemment peuvent être utilisés pour un certain nombre d'applications d'ingénierie ou de gestion de l'eau. A titre d'exemples, on peut citer

#### **La reconstitution ou l'extension de séries de débit :**

après calage, le modèle est appliqué en simulation sur une période sur laquelle on dispose de données pluviométriques observées.

#### **La prédétermination :**

les séries de débit observé étant souvent courtes, il peut être intéressant de les étendre à l'aide d'un modèle pluie-débit. On peut pour cela soit utiliser des séries de pluie observée si elles sont suffisamment longues, soit utiliser un générateur stochastique de pluie qui permettra d'obtenir des séries probables de pluie sur le bassin (un tel générateur demandant un calage préalable sur des séries de pluie observée).

**La prévision à court terme (quelques heures à quelques jours):** elle est particulièrement utile pour les phénomènes de crues. Le modèle doit alors intégrer une procédure d'assimilation des débits observés, ce qui permet d'améliorer de façon substantielle les prévisions.

#### **La prévision à moyen ou long terme (de quelques semaines à quelques mois) :**

Elle est intéressante pour les problématiques d'étiage et de gestion de la ressource. Dans ce cas, se pose le problème de l'incertitude sur les pluies futures.

#### **La détection de tendance dans le comportement hydrologique du bassin versant :**

L'utilisation d'un modèle hydrologique permet d'identifier dans la variabilité des séries de débit ce qui vient de la variabilité naturelle des conditions climatiques de ce qui vient de changements de caractéristiques du bassin versant (Andréassian, 2002; Andréassian et al., 2003)

#### **La gestion ou le dimensionnement d'ouvrages :**

Grâce au modèle, on peut dans une étude de dimensionnement simuler en continu des apports au réservoir et ainsi optimiser son dimensionnement pour des objectifs particuliers (soutien 14 d'étiage, écrêtement de crue, etc.) en tenant compte ainsi de la variabilité naturelle de ces apports.

## **Conclusions**

Du fait de leur architecture, les modèles du Génie Rural ne peuvent être que modestes (peu de caractéristiques à ajuster). En conséquence, ils ont des besoins d'information limités, dans un domaine où les modèles sont de plus en plus complexes pour inclure des processus qui sont supposés exister à une échelle ponctuelle.

Cette simplicité, si elle n'est pas un objectif en soit, s'est imposée lors de leur élaboration parce que de plusieurs hypothèses opérationnelles, issues de l'arsenal des modèles conceptuels, ont été rejetées par les données recueillies lorsqu'un grand nombre de bassins ont été considérés et qu'un test rigoureux de calage-contrôle a été utilisé.

C'est ainsi par exemple que les sous modèles classiques d'infiltration n'ont pu être retenus dans les architectures finales. Notons également que les fonctions d'échanges vers l'extérieur non atmosphérique du bassin, absentes de la grande majorité des modèles conceptuels, sont apparues comme indispensables à tous les pas de temps.

Les modèles GR ont été testés sur un large éventail de lacs et de conditions climatiques, en Algérie mais aussi dans d'autres pays (Etats-Unis, Australie, Brésil, Allemagne, Angleterre, Côte d'Ivoire, etc.). Applicables à l'échelle du bassin versant, ils ont été testés sur des bassins versants allant de moins de 10 km<sup>2</sup> à plus de 100 000 km<sup>2</sup>. Ils sont également utilisés pour une large gamme d'applications opérationnelles, telles que :

La prédétermination de la crue,

La prédiction de la crue ou de l'étage,

La détection et la gestion des impacts ou le dimensionnement de l'étage.

Pour lesquelles le Cemagref développe des méthodologies de mise en œuvre spécifiques. Pour des objectifs de simulation simples, les modèles GR peuvent être appliqués rapidement à l'aide d'un tableur.

Malgré les efforts déjà réalisés pour les rendre aussi performants que possible, ces modèles, comme tous les autres modèles hydrologiques actuels, sont encore imparfaits.

C'est pourquoi les recherches se poursuivent afin de les faire progresser et d'améliorer notre compréhension du fonctionnement hydrologique du bassin versant.

La modélisation à pas de temps horaire, les interactions nappes-rivières, la prise en compte de l'hétérogénéité spatiale des pluies ou d'informations hydrométriques amont, une meilleure représentation des fontes nivales, constituent les pistes explorées actuellement.

*Chapitre III : Présentation  
des Synthèses sur des zones  
étudié*

### III.1 Présentation de la région d'étude :

Le réseau hydrologique algérien est divisé en 6 bassins hydrographiques et 17 bassins versants (Figure-1).

Le régime d'écoulement des cours d'eau algériens est généralement permanent, Cependant les affluents secondaires et tertiaires présentent un écoulement faible et temporaire.

Pour nos besoins de modélisation de la relation pluie-débit, nous avons choisis quelques bassins versants. Les données nécessaires pour ces types d'étude sont les chroniques concomitantes de pluie, d'ETP et de débits liquides au mêmes pas de temps.

Les données pluviométriques et hydrométriques utilisées ont été recueillies au niveau de l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques.

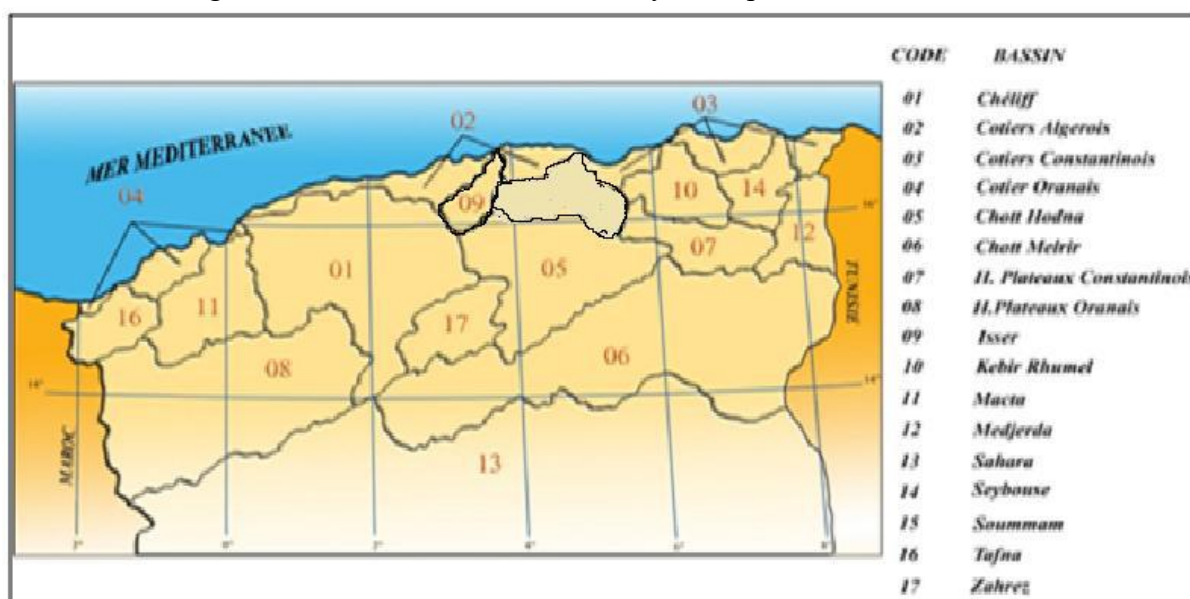


Figure III.1 : Carte des bassins versants de l'Algérie.

### III.2 PRESENTATION GENERALE DU BASSIN VERSANT DE LA TAFNA :

Situé au Nord Ouest du territoire algérien, le bassin versant de la Tafna s'étend sur la totalité de la wilaya de Tlemcen sur une superficie de 7245 km<sup>2</sup> et déborde sur le royaume du Maroc. Selon la nouvelle structuration des unités Hydrogéologiques en Algérie, le bassin versant de la Tafna appartient à l'ensemble de l'Oranie-Chott Chergui.

Globalement, le bassin versant peut être subdivisé en trois grandes parties :

Partie orientale : dont les principaux oueds sont Isser, oued Lakhdar (ex : Chouly) et Sikak ;

Partie occidentale : comprenant les principaux oueds dont : la haute Tafna, Mouilah et Khemis ;

partie septentrionale : elle débute pratiquement du village Tafna et s'étend jusqu'à l'embouchure de la Tafna sur la mer (plage de Rechgoune). Les oueds Boukiou, Boumessaoud et Zitoun sont les principaux affluents de cette partie.

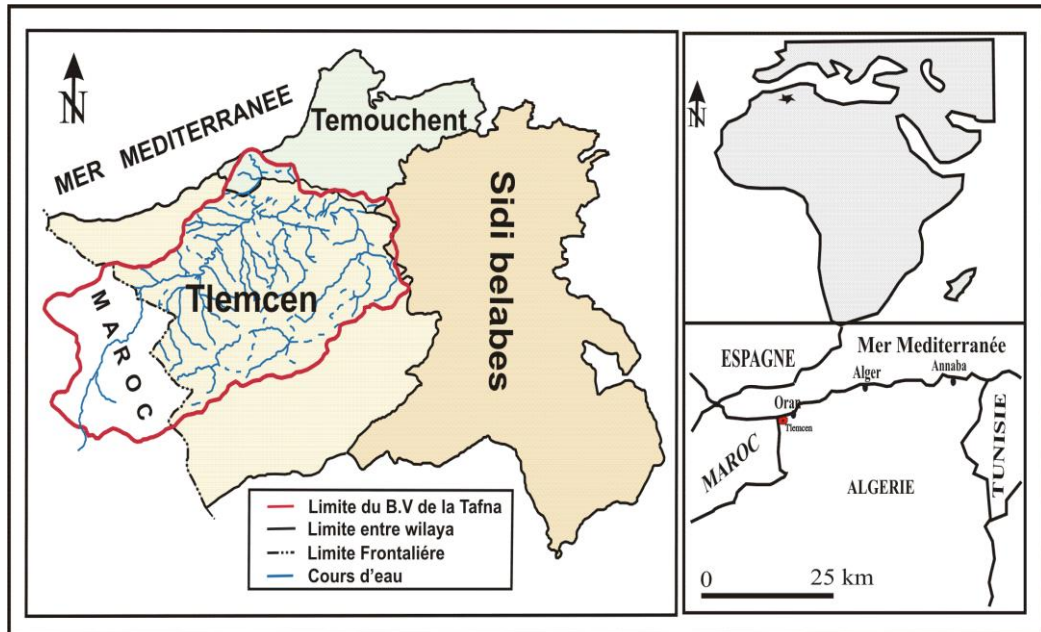


Figure III.2 : Situation géographique du bassin versant de la Tafna.

### III.3 PRESENTATION DU sous BASSIN VERSANT DE 'OUED LAKHDAR :

Le bassin versant de l'Oued Lakhdar est un affluent de la Tafna. Il occupe une superficie de 288.91 km<sup>2</sup> (3.98% de la superficie du bassin de la Tafna), dont la superficie du bassin contrôlé est de 170 Km<sup>2</sup>.

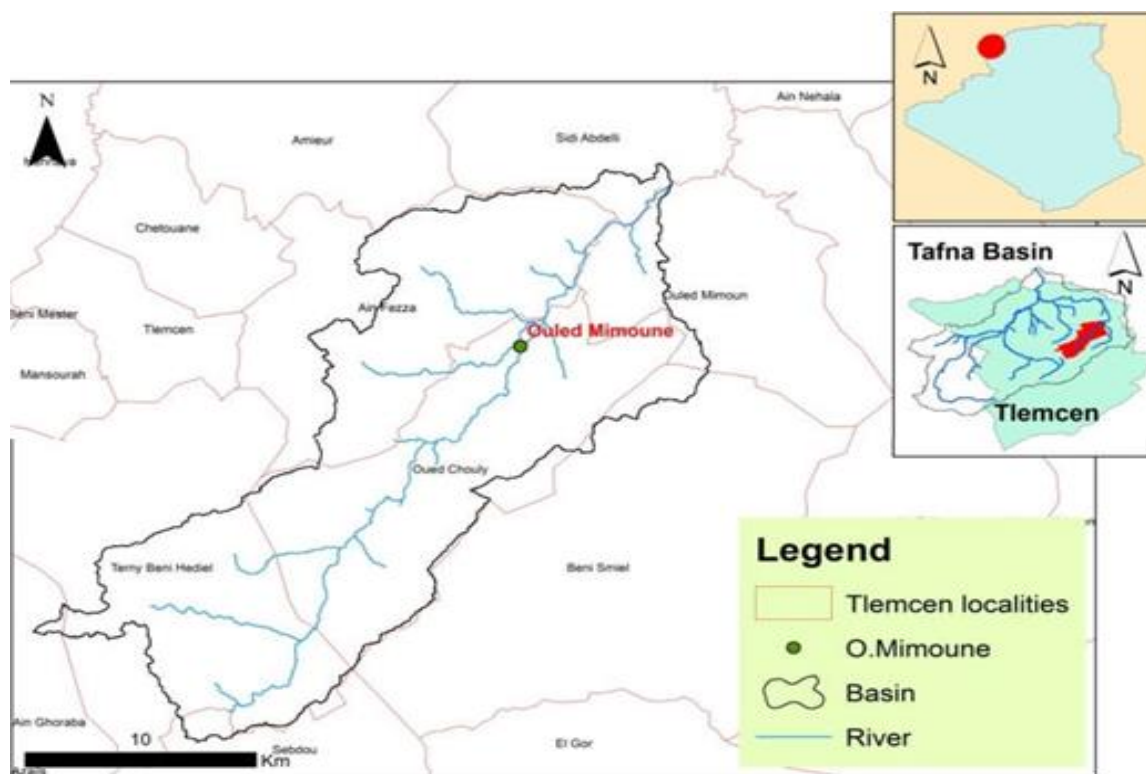


Figure III.3: Carte de localisation de bassin versant d’oued Chouly.

**III.3.1 Le climat :**

Le bassin versant d’oued Chouly jouit d’un climat méditerranéen à un étage bioclimatique semi-aride caractérisé par une saison pluvieuse et un été chaud et sec.

**III.3.2 Géologie et relief :**

Les formations géologiques dominantes dans la commune d’oued Lakhdar sont les dolomies calcaires. Il y a deux formations de marno calcaire qui sont représentées symétriquement par rapport à l’oued dans la partie Nord de la commune : de Djebel El Chaïbet djebel Sidi Hamza, et Djebel dar El Matmar. Il faut noter également la présence d’alluvions dans l’extrême Nord de la commune (Rahmi, 2014). Oued Chouly est caractérisée par son relief montagneux, faisant partie du Massif Tellien, constituant un écran protecteur contre les vents et procurant de nombreuses sémergences,

**III.3.4 MODELE ANNUEL GR1A :**

Données annuelles	ETP(Turc)				ETP (thornthwaite)			
	X	Nash	Bilan	Coefficient de corrélation(R <sup>2</sup> )	X	Nash	bilan	Coefficient de corrélation(R <sup>2</sup> )
O.lakhdar(1970-1995)	1	71.6%	82.4%	0.853	1.05	83.2	97.3	0.838

Tableau III.1 : représentation des résultats obtenus par l’utilisation de GR1A



### III.3.5 Validation du modèle :

La validation porte sur l'application des modèles sur une série de données qui n'ont pas été utilisées lors du calage, elle est relative à la période (1995-2002)

Données annuelles	Coefficient de corrélation	
	ETP (turc)	ETP (thornthwaite)
O.lakhdar	0.7	0.69

**Tableau III.2 : les variations du coefficient de corrélation**

### III.4 MODELE MENSUEL GR2M :

Pour prédire le débit à un mois donné nous avons utilisé à l'entrée du modèle des valeurs des pluies mensuelles observées (mm), des ETP calculées par la méthode de Turc et Thornthwaite (mm) et des débits mensuels observés exprimés en lames d'eau écoulées (mm).

Les données utilisées sont relatives aux périodes (1971-1972 / 2000-2001) mesurés aux niveaux de la station de Oued Chouly.

Critères		Chouly(1971-1982)
ETP turc	X1	196.37
	X2	0.76
	Nash%	84.1
	Bilan%	86.2
	R0	30
	R <sup>2</sup>	0.825
ETP Thornthwaite	X1	639.06
	X2	0.86
	Nash%	82.9
	Bilan	96.9
	R0	30
	R <sup>2</sup>	0.714

**Tableau III.3 : représentation des résultats obtenus par l'utilisation de GR1A**

Avec :

**X<sub>1</sub>** : capacité du réservoir de production (mm) ;

**X<sub>2</sub>** : Paramètre d'échange (mm) ;

**R<sub>0</sub>** : Niveau de remplissage initial (max. : 60mm) ;

**R<sup>2</sup>** : Coefficient de corrélation.

#### III.4.1 Validation du modèle :

Pour la validation nous avons utilisé de nouvelles données des précipitations et d'évapotranspirations correspondant à la période (Janvier 1983/Décembre 2001) et qui n'ont pas été utilisées lors du calage

Données annuelles	Coefficient de corrélation R <sup>2</sup>	
	ETP (turd)	ETP (thornthwaite)
O.lakhdar	0.34	0.287

Tableau III.4 : Les coefficients de corrélation entre les débits simulés et calculés au cours de la validation.

Radia GHERISSI ;2012,( HYDROLOGIE ET MODELISATION PLUIE-DEBIT :CAS DU BASSIN VERSANT DE L’OUED LAKHDAR (EX : CHOULY) TAFNA-NW ALGERIEN)

### III.5 PRESENTATION DU sous BASSIN VERSANT de Meffrouch :

Faisant partie du bassin de la Tafna, le Bassin versant Meffrouch d’une superficie de 90Km<sup>2</sup> Orienté au Nord Est suivant son cours d’eau principal se situe au sud-ouest de la ville de Tlemcen entre les longitudes 1°15’ a 1°25’ ouest et entre les latitudes 34°15’ a 34°52 ’ Nord. Le bassin versant de l’oued Meffrouch est limité par :Au Nord par djebel zarifet et Beni-Moudjesà l’Est par djebel Ben yakoub djebel Tichtouine l’ouest par djebel Gendouza et djebel Elkoudia et au sud par djebel Nador

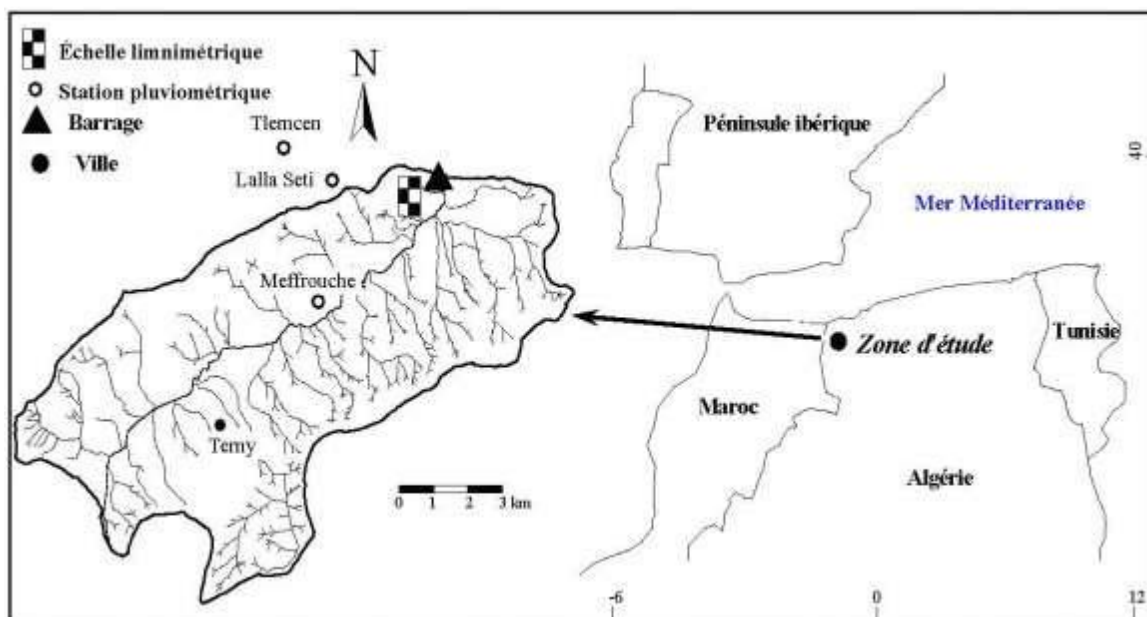


Figure III.4: situation géographique du bassin versant de de l’Oued Meffrouch (Ghenim, Megnounif ,2013).

#### III.5.1 Calage du modèle GR1A :

Pour le calage, on prend 12 ans allant de 1988- 1989 jusqu’à 1999-2000. On procède au changement de la valeur de X1 en commençant par la valeur fixée à 0.13 jusqu’à un des valeurs optimum des de coefficients de détermination et du critère de Nash. Les résultats sont obtenus comme suit :

Données annuelles	ETP (thornthwaite)				ETP (turc)			
	X	Nash	bilan	Coefficient de corrélation( $R^2$ )	X	Nash	bilan	Coefficient de corrélation( $R^2$ )
Stations meffrouch	0.73	78%	98.5%	0.81	0.69	83%	99.6%	0.82

**Tableau III.5 : Résultats du calage du modèle GR1A**

### III.5.2 Validation du modèle GR1A:

La validation porte sur l'application du modèle sur des données qui n'ont pas été utilisées dans le calage (2001-2010) les résultats des variations du coefficient de corrélation Q simulé Q observé relatifs à l'utilisation des ETP de Turc et Thornthwaite sont résumés sur le tableau suivant.

Station	Coefficient de détermination $R^2$	
	ETP (thornthwaite)	ETP (turc)
Meffrouch	0.691	0.716

**Tableau III.6 : Les variations de coefficients de corrélation de la validation du modèle GR1A.**

### III.6 calage du modèle GR2M:

Pour le calage du modèle c'est le même principe utilisé pour le modèle GR1A mais avec le changement sur deux paramètres X1 et X2 à caler jusqu'à un des valeurs optimum des coefficients de détermination et du critère de Nash. La période choisie pour le calage est celle comprise entre janvier 1988 à décembre 2007. Les résultats sont obtenus comme suit :

paramètre	ETP (thornthwaite)	ETP turc
X1	5.16	5.28
X2	0.35	0.42
Nash%	86.5	88.26
$R^2$	0.902	0.915
Bilan%	135.8	133.19

**Tableau III.7 : Résultats du calage du modèle GR2M meffrouch Avec X1 : capacité du réservoir de production (mm) et X2 : Paramètre d'échange (mm).**

**III.6.1 Validation du modèle GR2M :**

Coefficient de détermination R <sup>2</sup>	
ETP (thornthwaite)	ETP (turc)
0.866	0.911

**Tableau III.8 : Les variations de coefficients de corrélation de la validation du modèle GR2M (Janv. 2001/Déc. 2009) Meffrouch. BOUCEBHA Fatima.2018(Etude de la performance du modèle hydrologique HBV appliqué au bassin versant d’oued Meffrouche (Tafna, Algérie)).memoire master**

**III.7 PRESENTATION DU sous BASSIN VERSANT d’oued lekhmis :**

Les monts de Rhar-Roubane sont bordés par la plaine de Maghnia au Nord, la plaine des Angad d’Oujda et le plateau de Djorf-Ouazazen a l’Ouest, la plaine de Magouraa au Sud et en fin la partie occidentale des monts de Tlemcen a l’Est (L.Mekahli, 1988).

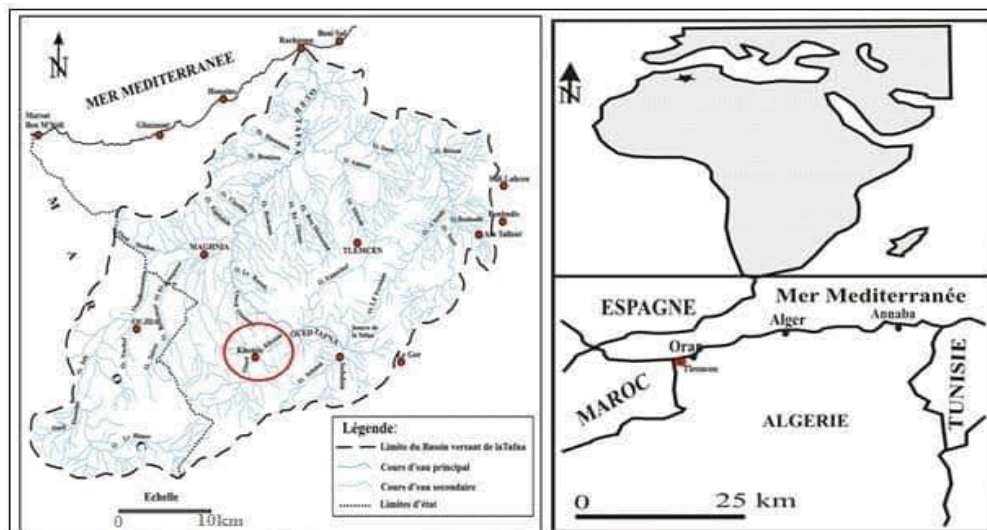
Lucas, 1942 divise les monts de Rhar-Roubane du Nord vers le Sud en 4 unités géographiques Les monts du Kef.

La région de Ras Asfour qui comprend du Nord vers le Sud, le talus des Beni Bousaid, la barrière et le plateau de Ras-Asfour.

La chaîne du Tenouchefi.

Le massif de Raourai.

Nous nous sommes basés sur les travaux réalisés par: Lucas 1952, Benest 1985 et Mekahli, 1988.



**Figure III.5 : Situation du bassin de l’Oued Khemis.**

### III.7.1 APERÇU HYDROGÉOLOGIQUE

Nous donnons un aperçu général sur les principales formations aquifères du bassin de Khemis ; Formations aquifère à perméabilité d'interstices (Grès de Boumediene. Formations aquifère à perméabilité de fissures. Les terrasses alluviales).

**Le climat :** Le climat, par définition est l'ensemble des phénomènes météorologiques (précipitations, Températures, vents ..... ) qui caractérisent l'état moyen de l'atmosphère et son évolution.

Il est déterminé par la situation géographique du lieu (latitude, altitude, éloignement de la mer) et par la circulation atmosphérique.

### III.8 Modèle annuel GR1A :

Dans cette étude, pour prédire le débit à une année donnée, nous utilisons à l'entrée du modèle des valeurs des pluies annuelles observées (mm), des ETP calculées par la méthode de Turc et la méthode de Thornthwaite en mm et des débits annuels (exprimés en lames d'eau écoulées) observés au niveau de la station d'Oued Khemis de 1992 au 2004.

Données annuelles	ETP(Turc)				ETP (thornthwaite)			
	X	Nash	Bilan	Coefficient de corrélation( $R^2$ )	X	Nash	bilan	Coefficient de corrélation( $R^2$ )
O.khemis(1992-2005)	1.14	68.8%	75.4%	0.659	1.14	74.2%	85%	0.682

**Tableau III. 9: Représentation des résultats obtenus par l'utilisation de GR1A.**

#### III.8.1 Validation du modèle

La validation porte sur l'application des modèles sur une série de données qui n'ont pas été utilisées lors du calage, elle est relative à la période (1986-1991).

Le tableau ci-dessous donne les variations du coefficient de corrélation avec l'utilisation des deux méthodes (Turc, Thornthwaite ) pour l'évapotranspiration.

Donnée annuelles	Coefficient de corrélation $R^2$	
	ETP turc	ETP Thornthwaite
Oued khemis	0.75	0.753

**Tableau III.10 : Variation des coefficients de corrélation**

### III.9 Modèle Mensuel GR2M :

Dans cette étude, pour prédire le débit à un mois donné, nous avons utilisé à l'entrée du modèle des valeurs des pluies mensuelles observées (mm), des ETP calculées par la méthode de Turc et Thornthwaite (mm) et des débits mensuels observés exprimés en lames d'eau écoulées (mm) de (1993-1999).

Critères		Oued khemis (1993-1999)
ETP turc	X1	244.69
	X2	0.7
	Nash%	73.2
	Bilan%	64.9
	R0	30
	R <sup>2</sup>	0.684
ETP Thornthwaite	X1	403.43
	X2	0.78
	Nash%	75
	Bilan	84.2
	R0	30
	R <sup>2</sup>	0.648

**Tableau III.11 : Représentation des résultats obtenus par l'utilisation de GR2M.**

X1 : Capacité du réservoir de production (mm),

X2 : Paramètre d'échange (mm),

R0 : Niveau de remplissage initial (max: 60mm),

R2 : Coefficient de corrélation.

### III.9.1 Validation du modèle

Donnée annuelles	Coefficient de corrélation R <sup>2</sup>	
	ETP turc	ETP Thornthwaite
Oued khemis	0.796	0.81

**Tableau III.12: Validation du modèle GR2M selon l'ETP respectivement de Turc et Thornthwaite.**

### III.10 Présentation du bassin versant de l'ISSER :

Les bassins versants ISSER codés par l'ANRH (09) sont situés dans Algérie. La superficie totale de l'Ain BOUCIF à l'estuaire est de 4170 Km<sup>2</sup> bassin. Une partie du bassin est drainée par Oued Mellah et Oued Hammam, ces Deux (2) rivières asséchées forment l'ISSER, se ramifiant en plusieurs affluents (BENKACI,2006). Le bassin de l'ISSER est délimité par le nord et la mer, Région côtière d'Alger, avec le bassin du Cheliff au sud-ouest et le bassin d'Alger au sud-est Chott HODNA, vers l'Est près du Bassin de la SOUMMAM .

Le bassin versant de l'ISSER est allongé sur l'axe sud-ouest (Ain Boucif/Beni Slimane) au Nord-Est (Méditerranée). c'est montagneux Altitude moyenne 750 m, côte maximale 1810 m à Djebel Dira.

## BOURSALI Ilyas ;2016 (Application de la fonction pluie-débit au bassin versant de la TAFNA Cas de l'oued Khemis-TLEMEN (NW Algérien))

### Climat :

Le climat du bassin est méditerranéen, froid et humide en hiver, chaud et sec en été. La pluviométrie moyenne varie entre 600 et 800 mm par an. L'évapotranspiration potentielle annuelle est de l'ordre de 1300 mm calculée d'après la formule de l'ANRH. L'apport moyen interannuel qui arrive à la station de LAKHDARIA est de 338,7 Hm<sup>3</sup>.

### Caractéristiques géomorphologique du bassin versant :

Le bassin de l'Isser est principalement composé de roches tendres (marnes et argile), situé sur les pentes et facilement érodé. nature douce Les matériaux et les régimes hydriques irréguliers contribuent à la formation du réseau Type d'arbre hydrologique dense. Inondations de l'oued pendant les menstruations Pluie, mais devient inactif une fois que la saison sèche commence. en vue de haute densité de drainage de BV obtenue au niveau de la station (Pont de La traille, La khdaria et estuaires), le bassin versant est vulnérable aux fortes inondations. Il se caractérise par un couvert végétal clairsemé au centre, présentant 20% de la superficie totale. Le reste de la surface, 80%, est Principalement des céréales et des cultures fourragères.

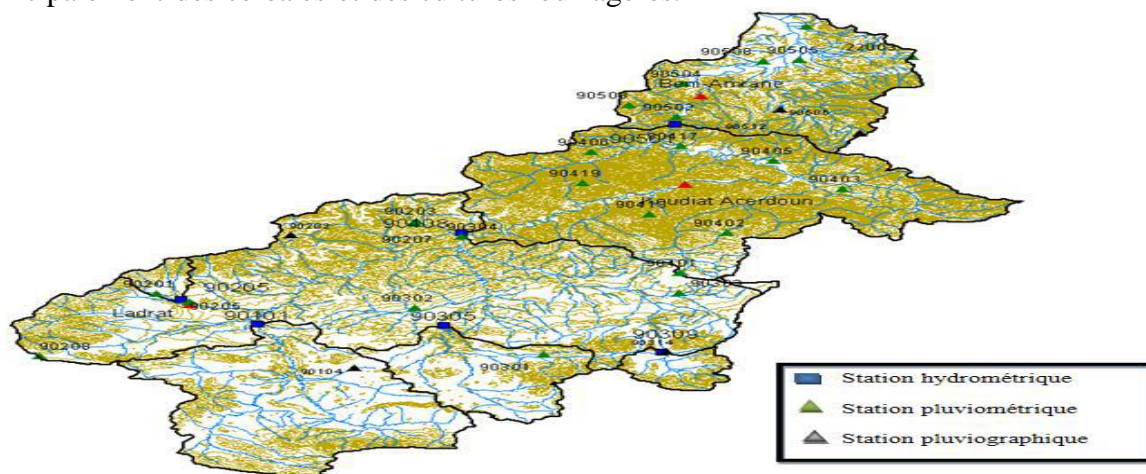


Figure III.6: Carte des situations des stations hydro-climatologique du bassin Versant de l'Isser.

#### III.10.1 Modèle annuel GR1A

Dans cette étude, pour prédire le débit à une année donnée on utilise à l'entrée du modèle des valeurs des pluies annuelles observées (mm), des ETP mm et des débits annuels observés au niveau de la station de la khdaria qui se trouve en aval du bassin versant l'ISSER.

#### III.10.2 Calage du modèle GR1A :

La procédure d'étalonnage consiste en la détermination des paramètres du modèle ; dans ce cas le paramètre X1 constitue la variable. Dans le cas optimal le paramètre de Nsah supérieures a 70%. Pour cela nous avons utilisé deux séries de données afin de trouver le meilleur calage possible. Dans le premier cas nous avons utilisé la seule station de tout ; et dans le

deuxième cas ; nous avons utilise les trois stations(DJEBAHIA, BSIBSA et OULED TOUATI). Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau13

Critères	X	Nash%	Bilan%	Coefficient de corrélation(R <sup>2</sup> )
St-ouled Touati	0.97	71.4	94.9	0.773
St-djebahia+BSIBSA O TOUATI	0.67	-83.9	268.2	0.402

**Tableau III.13 : Résultat du calage du modèle GR1A**

**X : coefficient de correction de l'ETP (mm).**

### III.11 Validation du modèle GR1A :

La validation porte sur l'application du modèle sur une série de données qui n'ont pas été utilisées lors du calage.

Critère	Coefficient de détermination R <sup>2</sup>	Coefficient de corrélation
St-ouled Touati	0.365	0.596
St-djebahia+BSIBSA O TOUATI	0.131	0.362

**Tableau III.14 : Les variations de coefficients de corrélation de la validation du modèle GR1A.**

### III.12 Modèle mensuel GR2M :

#### III.12.1 Calage du modèle GR2M :

Dans ce cas nous avons cherché à caler les deux paramètres X1 et X2 du modèle jusqu'à l'obtention des valeurs optimum des coefficients de détermination et du critère de Nash. La période choisie pour le calage est celle comprise entre Janvier 1973 à Décembre 1989.

Paramètre	X1	X2	Nash%	Bilan%	Coefficient de corrélation(R <sup>2</sup> )
St-ouled Touati	403.43	0.64	67.3	92.2	0.803
St-djebahia, BSIBSA O TOUATI	148.41	0.94	-866	390	0.161

**Tableau III.15 : Résultat du calage du modèle GR2M.**



### III.12.2 Validation du modèle GR2M :

Pour la validation, nous utilisons des séries des données des précipitations et d'évapotranspirations correspondant à la période de Janvier 1990 à Décembre 1996 et qui n'ont pas été déjà introduites dans le modèle.

	Coefficient de détermination R <sup>2</sup>	Coefficient de corrélation R
St-ouled Touati	0.803	0.896
St-djebahia+BSIBSA O TOUATI	0.231	0.48

**Tableau III.16 : résumer des résultats de la validation du modèle GR2M.**

### III.13 Présentation du bassin versant Tamanrasset :

Le réseau hydrologique de Tamanrasset est exceptionnellement dense, presque impossible de compter toutes les rivières asséchées et leurs affluents primaire ou secondaire. La plupart de ces rivières asséchées apparaissent dans certaines régions Le point culminant de l'Atakor, rayonnant dans toutes les directions. Leur itinéraire partant des montagnes, il y a des lits de rivière distincts et des pentes abruptes, finit souvent par traverser la surface plane des regs sur lesquels il se trouve dans son processus en aval deviennent difficiles à identifier. Ce réseau hydrologique draine quatre principaux Bassins à Tamanrasset : Bassin de l'Igarghar, Bassins de la Mekergthane, du Tanezrouft et de l'Azaouak (Figure 3).aussi rare et très Les précipitations sont irrégulières. Vardis a quelques heures de trafic intense Après avoir plu, cela a provoqué de graves inondations.

#### **Géomorphologie et hydrographie :**

Le relief est important au centre du massif cristallin du Hoggar où culminent les hauts sommets tels que Tahat (2908 m), Lamane (2789 m) et Asskrem (2778 m). Ailleurs la topographie varie entre 500 m et 1800m, la ville de Tamanrasset se situe à environ 1400 m d'altitude.

#### **Morphologie de région :**

Le bassin versant de Tamanrasset couvre une superficie d'environ 458,9 km<sup>2</sup>. Les oueds de la région du Hoggar présentent généralement en amont, une zone montagneuse, de fortes pentes et des lits relativement bien creux. Dans les parties basses, occupées par des regs, leurs cours deviennent difficilement identifiables.

**REZZOUG.FARID.2014, MODELISATION DE LA RELATION PLUIE-DEBIT PAR LES MODELES CONCEPTUELS A RESERVOIRS**

**(Application au bassin versant de l'ISSER) mémoire master**

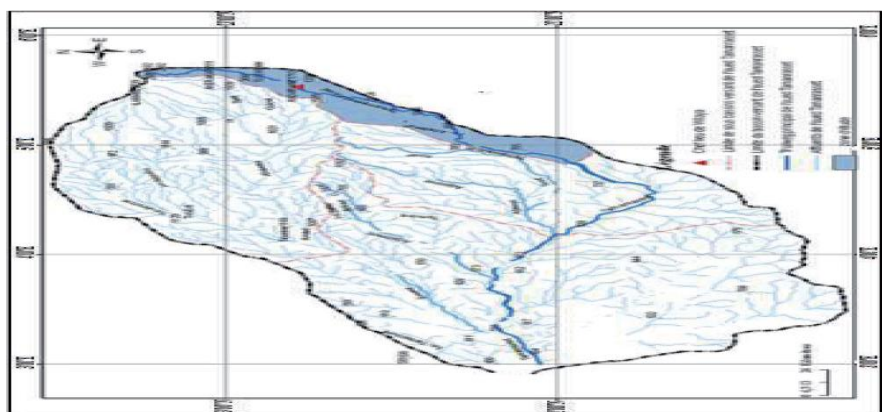


Figure III.7: Délimitation de la zone d'étude (J. Dubief, 1953).

**Aperçu sur l'oued Sersouf :**

Les thalwegs est de direction Nord-Sud. Ils sont lance dans oued Tamanrasset au milieu de la ville. Le cours de l'oued Sersouf n'est pas très étendu puisqu'il ne prend naissance qu'au -delà de la première barrière de dépôts volcaniques du massif d el'Atakor à environ 8 km au Nord de Tamanrasset. Il n'a un fort débit que d'une façon exceptionnelle. Il représente l'axe de colature des eaux de la vaste pénéplaine qui s'étend au Nord de Tamanrasset. La direction de l'écoulement est parallèle au banc du substratum apparu en surface (ENHYD , 2004). La surface du bassin versant est de 458 ,9 km<sup>2</sup>,elle a été déterminée sur la carte d'état majeure Tamanrasset (1/200.000) à l'aide du logiciel Map-info 7.8.

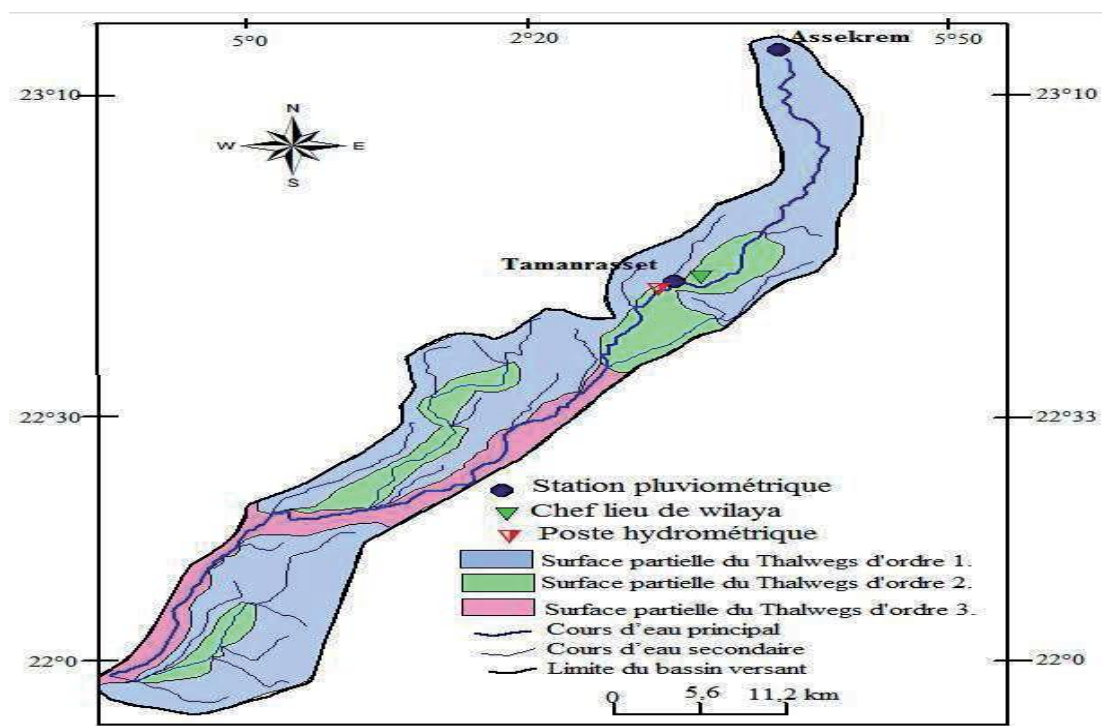


Figure III.8: Sous bassin versant du bassin de Tamanrasset (zone d'étude).

### Géologie de bassin versant de meffrouch.

Le bassin versant de l'oued Nachef (Meffrouch) Peut-être subdivisé en deux grands domaines :

Au nord, domaine marneux du miocène

Au sud, Domaine calcaireux dolomitique du Jurassique

### III.14 Modèle annuel GR1A :

#### III.14.1 Calage du modèle :

Le calage du modèle a été réalisé après le passage par un certain nombre de simulations. Nous avons procédé au calage du paramètre X du modèle en appliquant des changements sur ce dernier en commençant comme point de départ par une valeur fixée à 0,13 et la faisant accroître successivement avec un intervalle de 0,01 jusqu'à la valeur supérieure limite de 3,5 donnée par le modèle jusqu'à l'obtention d'un critère de Nash optimum égale ou supérieur à 70% (sachant qu'un bon critère de Nash-Sutcliffe a une valeur proche de 1) et un coefficient de corrélation acceptable entre les Lame d'eau écoulée simulés et les Lame d'eau écoulée observés. Les résultats du calage sont présentés dans le Tableau17.

Données annuelles	ETP (thornthwaite)				ETP (Turc)			
	X	Nash%	Bilan%	Coefficient de corrélation( $R^2$ )	X	Nash%	Bilan%	Coefficient de corrélation( $R^2$ )
Tamanrasset	1	84.7	71	0.9	1	79	63.9	0.89
Assekram	3.3	71.4	79.9	0.76	3.2	70.2	84.4	0.78
Moyenne des deux stations	1.47	70.1	94.5	0.73	1.63	70.2	90	0.73

Tableau III.17 : Résultats du calage GR1A.

#### III.14.2 Validation du modèle :

Données annuelles	Coefficient de corrélation( $R^2$ )	
	ETP (thornthwaite)	ETP (turc)
St Tamanrasset	0.74	0.73
St assekrem	0.046	0.042
Moyenne	0.015	0.015

Tableau III.18 : Variations du coefficient de corrélation.

**III.14.3 Modèle mensuel GR2M :**

Pour prédire le débit mensuel simulé nous avons utilisé le pluies et les débits exprimés en lames d'eau écoulées mensuelles en mm relatives à la période 1953-1989, plus précisément pour Tamanrasset et Assekrem nous n'avons pris que la période allant de 1980-1989

**III.14.4 Calage du modèle GR2M :**

La période choisie pour le calage est celle comprise entre Janvier 1980 à Décembre 1987 pour les deux stations.

Données annuelles	ETP (thornthwaite)					ETP (Turc)				
	X1	X2	Nash %	Bilan %	(R <sup>2</sup> )	X1	X2	Nash %	Bilan %	(R <sup>2</sup> )
Tamanrasset	76.73	0.66	70.1	60.5	0.82	61.6	0.57	84.9	67.7	0.9
Assekram	164.02	0.47	80.7	64.6	0.8	164.02	0.48	88.4	66.8	0.81
Set+assekrem/2	164.02	0.32	81	61.3	0.95	164.02	0.47	96.9	94.03	0.94

**Tableau III.19 : résultat de calage GR2M.**

**III.14.5 Validation du modèle GR2M :**

Pour la validation, nous utilisons des séries des données des précipitations et d'évapotranspirations correspondant à la période de Janvier 1988 à Décembre 1989 et qui n'ont pas été déjà introduites dans le modèle.

Données annuelles	Coefficient de corrélation(R <sup>2</sup> )	
	ETP (thornthwaite)	ETP (turc)
St Tamanrasset	0.52	0.52
St Assekrem	0.69	0.69
Moyenne entre Tamanrasset et Assekrem	0.69	0.69

**Tableau III.20: Variations des coefficients de corrélation de la validation du modèleGR2M.**

Abdelghani elhoussaoui,2016 (modélisation de la fonction pluie-débit.cas d'el oued tamenrasset)

## Discussion :

L'utilisation du modèle GR pour modéliser la relation pluie-débit nous donne des mises à jour mensuelles et nous permet de suivre les résultats satisfaisants pour les données pluviométriques de notre bassin. Les résultats obtenus tant au calage qu'à la validation sont souvent supérieurs à 62%. Ces résultats démontrent l'efficacité et la robustesse des modèles (GR1A,GR2M ) dans les bassins qui nous avons comparée. L'efficacité et la robustesse de ces modèles ont également été démontrées dans d'autres bassins hydrographiques algériens, indiquant l'adaptabilité des modèles GR aux bassins méditerranéens semi-arides.

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

1- Pour le GR1A, les valeurs du critère de Nash obtenues sont bonnes, elles sont comprises entre (Q)=82.4% (Turc) et 83.2% (Thorntwaite). Le bilan est assez équilibré, il est de 97.3% pour la formule de Thorntwaite. Toutefois, l'évapotranspiration résultante de la formule de Thorntwaite donne de meilleur résultat que celle de Turc.

Pour le coefficient de corrélation  $R^2$ , il vari entre 0.85 pour la méthode Turc et de 0.83 pour la méthode de Thorntwaite.

2- Pour le GR2M, les valeurs du critère de Nash obtenues sont bonnes, elles sont comprises entre (Q)=84.1% (Turc) et 82.9% (Thorntwaite). Le bilan est assez équilibré, il est de 96.6% pour la formule de Thorntwaite. Toutefois, l'évapotranspiration résultante de la formule de Turc donne de meilleur résultat que celle de Thorntwaite.

Le coefficient de corrélation  $R^2$ , vari entre 0.82 pour la méthode Turc et de 0.71 pour la méthode de Thorntwaite.

La validation a donné de bon résultat pour le pas de temps annuel confirmant le bon calage du modèle et l'excellente performance quant à l'utilisation du modèle GR pour un bassin à climat semi-aride méditerranéen. Pour le modèle mensuel, les résultats du calage sont bons, par contre ce n'est pas le cas pour la validation.

# **Conclusion Générale**

## **Conclusion générale :**

Les modèles pluie-débit sont des outils qui permettent de simuler les débits en un point donné d'un cours d'eau à partir de la connaissance des pluies tombées sur le bassin versant correspondant.

Cette modélisation est faite à l'échelle du bassin versant, entité caractéristique de concentration des écoulements, et permet donc de simuler la transformation qu'effectue le bassin sur les pluies pour générer les débits.

Les applications des modèles pluie-débit sont multiples : simulations de crues à court terme, prévision d'étiages, prédétermination des crues et dimensionnement d'ouvrages, mise en évidence du non stationnarité du comportement hydrologique sous l'effet du changement climatique ou de l'évolution de l'occupation du sol.... De plus les modèles pluie-débit permettent d'allonger les délais de prévision par rapport aux modèles débit-débit. Dans le but de simuler un modèle pluie-débit pour une meilleure compréhension du comportement hydrologique des bassins versant (meffrouch, ouedlekhdar, ouedlekhmis, ouedisser, ouedtamenrsset) ; nous avons entamé l'application du modèle génie rural « GR » au pas du temps annuel (GR1A), mensuel (GR2M). Pour le GR2M, le modèle pluie-débit s'ajuste très bien avec les données des Précipitations des bassins versants, le coefficient de corrélation  $R^2$  est de ; 0.83 ; 0.69 ; 0.64 ; 0.91. Ces résultats sont confirmés par le coefficient de Nash et sont très significatifs aussi bien pour la validation.

A la fin de ce travail, nous pouvons dire que l'application des modèles du Génie Rural aux données du bassin versant d'Oued le khmis, meffrouch ; oued lakhder ; oued tamenrasset ; oued isser donne des résultats très satisfaisants et ceci pour les pas de temps (Mensuel GR2M).

Aussi, les modèles GR paraissent très indiqués pour être utilisés dans des bassins Méditerranéens à climat semi-aride.

*Références  
bibliographiques*



## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

**AMBROISE, BRUNO**, 1999 La dynamique du cycle de l'eau dans un bassin versant (Paris) / Cemagref (Antony), 495 pp.

**Andréassian, V., Perrin, C., & Michel, C.** (2007). Modèles hydrologiques du génie rural (GR). Cemagref, UR Hydrosystèmes et Bioprocédés.

**Auteurs : Fabienne Albespy & Christine Pomerantz** - -

MEDDTL/SG/SPSSI/MD/CRDALN (Centre de Ressources Documentaires  
Aménagement Logement Nature)

**DAI, CONCEPTS DE BASE DE LA MODELISATION HYDROLOGIQUE ET HYDRAULIQUE, COMPETITIVITE ECONOMIQUE DU MAROC**  
d'estimation de ses paramètres. Thèse de Doctorat, Université Paris XI Orsay, 426 pp.

**Edijatno et Michel, C.**, 1989. Un modèle pluie-débit journalier à trois paramètres. La Houille Blanche(2), 113-121.  
ENGREF (Paris), France, 319 pp.

**Far`es KESSASRA**, Modélisation en Hydrologie et Hydrogéologie, 4 mars 2017

**Kabouya, M. et Michel, C.**, 1991. Estimation des ressources en eau superficielle aux pas de temps mensuel et annuel, application à un pays semi-aride. Revue des Sciences de l'Eau 4(4), 569-587.

**Kabouya, M.**, 1990. Modélisation pluie-débit aux pas de temps mensuel et annuel en Algérie septentrionale. Thèse de Doctorat, Université Paris Sud Orsay, 347 pp.

**Makhlouf, Z.**, 1994. Compléments sur le modèle pluie-débit GR4J et essai

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

**Oudin, L.**, 2004. Recherche d'un modèle d'évapotranspiration potentielle pertinent comme entrée d'un modèle pluie-débit global. Thèse de Doctorat, ENGREF.

**Pierre Pédelaborde** les bilans hydriques, Cahiers de géographie du Québec, Volume 12, numéro 25, 1968

**R, GHERISSI** « Hydrologie et modélisation pluie-débit : cas du bassin versant de l'oued Lakhdar (ex : choultry) Tafna-NW Algérien », 2012.

**Rojas-Serna, C.**, 2005. Quelle connaissance hydrométrique minimale pour définir les paramètres d'un modèle pluie-débit ? Thèse de Doctorat, Cemagref (Antony),

**Singh, S. K., McMillan, H. et Bárdossy, A.** (2012). Use of the data depth function to differentiate between case of interpolation and extrapolation in hydrological model prediction. Journal of Hydrology, 477, 213 – 228.

## *Références bibliographiques*

### **Site web**

<https://www.eaufrance.fr/le-niveau-deau-et-le-debit-des-rivieres>

<https://webgr.inrae.fr/modeles/bref-historique>

<http://www.cemagref.fr/webgr/>

<https://webgr.inrae.fr/>

<http://www.aix.cemagref.fr/>