



SOMMAIRE

Introduction Générale.....	01
Chapitre I : Aperçu sur la modélisation hydrologique pluie-débit	
Généralité sur la modélisation.....	04
I. Types de modèles hydrologiques.....	04
II. Les différentes approches de la modélisation.....	05
1. Modèles stochastiques.....	06
2. Modèles déterministes.....	06
a. Modèles à base physique.....	06
b. Modèles paramétriques.....	06
b ₁ .Modèles empiriques	06
B ₂ .Modèles analytiques.....	07
B ₃ .Modèles conceptuels.....	07
 Modèles globaux.....	07
 Modèles spatialisés.....	07
Conclusion.....	08
Chapitre II : caractéristiques du bassin versant de l'oued SARNO	
I. Situation géographique	10
II. Morphométrie.....	11
1. Hydrographie du Bassin Versant SARNO	11
2. Caractéristiques de forme	15
3. Paramètres de relief	16
4. Paramètres de pente	18
5. Profil en long de l'oued SARNO.....	20
Conclusion	21
III. La géologie du bassin versant.....	21
Conclusion.....	25
IV. Climatologie.....	25
1. Etude des précipitations.....	25
a. Les précipitations moyennes annuelles.....	25
b. Les précipitations moyennes mensuelles.....	27
c. Les précipitations saisonnières.....	29
d. Etude statistique des précipitations annuelles.....	30
e. Détermination de la lame d'eau moyenne tombée sur le bassin versant.....	36

2. Etude des températures.....	38
3. Etude du climat.....	40
a. Méthodes graphiques.....	40
b. Indices climatiques.....	42
V. Evapotranspiration et déficit d'écoulement	46
VI. Bilan hydrologique.....	53
Conclusion.....	54

Chapitre III. Hydrologie du Bassin Versant de l'oued SARNO

I. Introduction.....	56
II. Etude des débits moyens.....	56
1. Variation interannuelles des débits (1953-1973).....	56
2. Etude statistique des débits annuels.....	57
3. Débits moyens mensuels (1953-1973).....	60
4. Le coefficient mensuel des débits (1953-1973).....	61
5. Etude de la courbe des débits journaliers (1963-1974).....	62
6. Etude des débits classés.....	62
7. Etude des débits maximum instantanés.....	63
a. Introduction.....	63
b. la répartition des crues pour la période d'étude (1963-1973).....	64
c. volume de chaque crue.....	64
d. volume annuel des crues	67
8. interprétation des résultats.....	67
9. Étude statistique des débits maximum	71
Conclusion.....	73

Chapitre IV : Description du modèle GR (Génie rural)

Introduction.....	75
I. Objectifs de développement.....	75
II. Historique.....	75
III. Mode de développement.....	76
IV. Description du modèle pluie-débit annuel GR1A.....	77
1. Introduction.....	77
2. Représentation mathématique.....	77
3. Paramètre.....	78

V. Description du modèle pluie-débit mensuel GR2M.....	78
1. Introduction.....	78
2. Représentation mathématique.....	78
3. paramètres.....	80
VI. Description du modèle pluie-débit journalier GR4J.....	81
1. Introduction	81
2. Représentation mathématique.....	81
3. Paramètres.....	85
VII. Application des modèles.....	85
Conclusion.....	86
VIII. Application du modèle GR sur le bassin versant SARNO.....	87
1. Modèle annuel GR1A.....	87
a. Résultat du calage.....	87
b. Validation du modèle GR1A.....	90
2. Modèle mensuel GR2M.....	91
a. Résultat du calage.....	91
b. Validation du modèle GR2M.....	94
3. Modèle journalier GR4j.....	95
a. Résultat du calage.....	95
b. Validation du modèle GR4j.....	99
Conclusion générale et perspectives.....	100
Bibliographie.....	103
Liste des figures.....	107
Liste des tableaux.....	110
Annexe.....	113

Introduction générale

L'eau est une ressource naturelle précieuse dont la bonne gestion s'inscrit dans la politique du développement durable tant au niveau d'un pays que d'une région pour ne pas dire mondial.

Une bonne gestion de cette ressource est un défi permanent lié à l'évolution démographique, à l'urbanisation et au développement économique de la société tout en tenant compte des changements du climat mondial et la pollution. L'environnement de cette ressource est caractérisé par son cycle hydrologique, notamment les crues et les sécheresses. La maîtrise des crues constitue un centre d'intérêt vers lequel convergent plusieurs approches : prédiction, simulation stochastique, et surtout, la modélisation mathématique et physique des phénomènes hydrauliques.

Du fait de leur complexité et variabilité, les systèmes naturels ne peuvent être décrits et étudiés dans leur globalité ; on a alors recours à la modélisation pour analyser et prévoir leur dynamique. Dans le domaine des hydrosystèmes, les théories actuellement disponibles ne peuvent tenir compte de tous les processus en jeu et de leurs interactions, notamment à cause de la grande hétérogénéité spatio-temporelle qui existe et de la difficulté à instrumenter l'ensemble des échelles hydrologiques. Tout ceci se traduit par de nombreuses incertitudes : sur les données qui alimentent les modèles, d'abord, sur leur structure et les valeurs des paramètres, ensuite. Cela nous questionne sur la fiabilité et la crédibilité de nos simulations.

Les modèles hydrologiques se révèlent d'une importance majeure dans l'analyse des répercussions des changements climatiques et le bilan des ressources hydriques, principalement dans l'étude des processus essentiels liés à la genèse d'une crue.

En hydrologie, de nombreux travaux s'organisent autour du développement de la modélisation de la relation pluie-débit. Cet outil est essentiel puisqu'il permet de travailler sur des points aussi différents que la prédétermination et la prévision des inondations et des sécheresses, le calcul des ouvrages de type barrage ou usine hydroélectrique, la gestion des réserves, etc.

Le barrage SARNO a été construit en 1954 dans le bassin versant de la MACTA en rive gauche de l'oued MEKKERA dans la wilaya de Sidi Belabes pour dériver une partie du volume des crues de l'oued Mekarra passant par le lac de Sidi Mohamed Benali.

Dans notre bassin versant l'Agence National des Ressources Hydriques a mis en place des stations de mesure pluie/débit/ ETP, malheureusement les mesures du débit se sont arrêtées depuis 1974, les précipitations depuis 2009 et les températures en 2005.

Le modèle pluie-débit est particulièrement intéressant puisqu'il peut permettre d'estimer la ressource disponible en vue d'un aménagement mais aussi prévoir l'évolution de cette ressource dans les années ou décennies à venir.

La modélisation des phénomènes et comportements hydrologique des bassins versants est incontournable dès lors qu'on s'intéresse à des problématiques relatives à la gestion des ressources en eau, à l'aménagement du territoire et aux différents risque hydrologiques (sécheresse, inondation...). Cette modélisation est sensée décrire de manière fidèle et réaliste les différentes étapes liées à la transformation de la pluie en débit. Elle est sensée fournir aussi des informations sur le dimensionnement des ouvrages hydrauliques (Barrages, retenues...) [HENINE 2005]

Pour ce faire, nous allons utiliser le modèle du Génie rural (GR), que nous appliquons aux données disponibles de notre bassin versant de SARNO. Notre étude comporte quatre chapitres :

Le premier chapitre concerne un aperçu sur la modélisation hydrologique pluie-débit et les différents modèles hydrologiques utilisés dans le domaine de la modélisation.

Le deuxième chapitre décrit les caractéristiques du bassin versant, le troisième chapitre est consacré à l'hydrologie du bassin versant SARNO.

Le quatrième chapitre porte sur la description des modèles GR et leurs applications selon trois pas du temps, annuel GR 1A, mensuel GR2M et journalier GR4j.

Enfin nous terminons notre travail par une conclusion générale.

Chapitre I :

Aperçu sur la modélisation hydrologique pluie-débit

Généralité sur la modélisation :

Un modèle est une figuration approchée de systèmes hydrologiques complexes, basée sur la représentation mathématique ou physique des processus du cycle de l'eau aussi proches que possible de la réalité. En modélisation, la recherche de la simplicité est le mot d'ordre, car procéder par des descriptions complexes pour coller au mieux à la réalité peut conduire à une impasse mathématique (calculs irrésolvables, difficulté d'acquisition des données...). Il n'existe donc pas de modèles hydrologiques parfaits, c'est-à-dire applicables à toutes les échelles d'espace et de temps pour le plus grand nombre de bassins versants.

L'intérêt d'un modèle réside dans sa capacité à apporter une réponse <<satisfaisante >> aux questions que l'on se pose à propos de l'objet modélisé, ce qui nous renvoie à l'objet assigné au modèle qui doit bien entendu précéder et orienter la conception et la construction du modèle. Généralement les modèles sont utilisés pour la prévision, la prédétermination (évaluation de données d'un projet), la reconstitution ou l'extrapolation de données, etc.

I. Types de modèles hydrologiques :

Un modèle est une représentation d'un phénomène physique, afin d'en avoir une meilleure compréhension ou d'analyser l'influence qu'il exerce. La représentation peut être physique, analogique ou mathématique [GAUME 2000]. Dans le premier cas, le modèle est une maquette qui reproduit d'une manière adéquate la réalité. Les modèles analogiques utilisent les similitudes qui existent entre le phénomène à étudier et un autre phénomène physique. La modélisation mathématique est un outil essentiel pour la connaissance des phénomènes naturels, elle essaye d'établir un lien entre les variables d'entrée et de sortie par des relations mathématiques.

Au cours de ces dernières années, les efforts de la recherche pour la compréhension du cycle de l'eau dans les milieux naturels (bassin versant, rivières, nappes, etc.), associés aux développements de l'informatique, se sont concrétisés par l'apparition d'une multitude de modèles mathématiques. On peut distinguer trois types d'utilisation des modèles mathématiques en hydrologie.

La modélisation comme outil de recherche :

La modélisation peut être utilisée pour interpréter des données mesurées. Différents scénarios de fonctionnement hydrologique des bassins versants peuvent être confrontés aux mesures.

La modélisation comme outil de prévision :

Elle nous donne une anticipation des évolutions futures du débit d'un cours d'eau. Il s'agit de l'utilisation opérationnelle la plus courante des modèles hydrologique. Dans la plupart des cas cependant, les modèles développés sont basés sur des régressions linéaires entre les variables indépendantes (pluie, débit amont) et les variables dépendantes (débits aval), et font peu appel aux connaissances sur les processus hydrologique.

La modélisation comme outil d'extrapolation :

Reconstitution de séries de débits possibles. Dans certains cas, comme par exemple le dimensionnement de déversoirs de sécurité de barrages hydroélectriques ou encore la délimitation de zones inondables dans le cadre d'un plan de prévention des risques.

L'utilisation de longues séries de pluies éventuellement générées à l'aide d'un modèle stochastique de pluie couplées à un modèle hydrologique permet de reconstituer des scénarios rares.

II. Les différentes approches de la modélisation :

Le terme de modèle recouvre une large variété d'outils, à la philosophie et aux objectifs différents figure I.

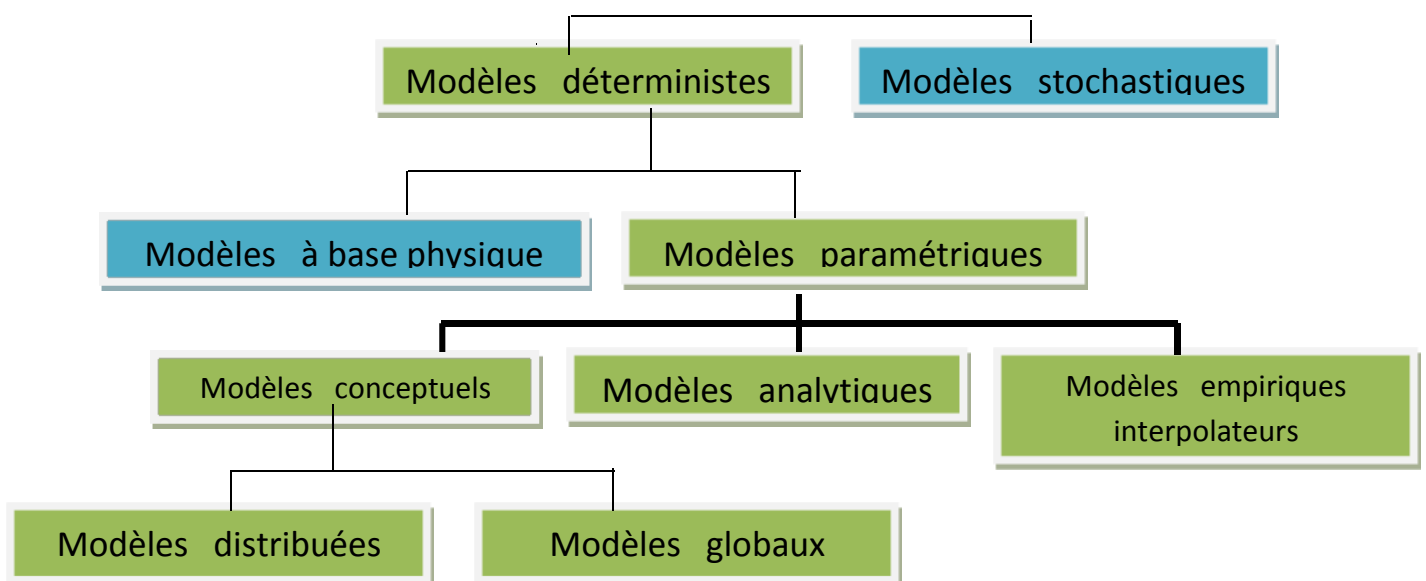


Figure I : les différentes approches de modélisation [GAUME 2002]

1. Modèles stochastiques :

Compte tenu des incertitudes sur les données et quelquefois même sur les processus en jeu, une modélisation stochastique peut sembler appropriée, qu'il s'agisse de l'hydrologie ou de l'environnement. Ainsi Jensen (1992) considère qu'une 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, qui semble par ailleurs 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 [VAUCLIN 1991].

2. Modèles déterministes :

Un modèle est dit déterministe si aucune de ses grandeurs n'est considérée comme aléatoire. La plupart des modèles hydrologiques sont déterministes. Ces modèles associés à chaque jeu de variables de forçage (variables indépendantes d'entrée du modèle, peuvent être essentiellement des mesures de pluie), de variables d'état (variable permettant de caractériser l'état du système modélisé, par exemple : le niveau de remplissage des différents <<réservoirs>> d'eau du bassin versant, taux de saturation des sols, profondeur des sols...etc.), une valeur de réalisation unique des variables de sortie (il s'agit essentiellement des débits simulés à l'exutoire d'un bassin versant)[MAFTAI 2002].

a. 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. Certains modèles comme le SHE (système hydrologique européen) tendent à s'en rapprocher. L'importance de l'hétérogénéité spatiale dans la réponse hydrologique des bassins versants rend cependant difficile voire impossible l'utilisation de tels modèles.

b. Modèles paramétriques :

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

b₁. Modèles empiriques :

Le type de fonction reliant les variables est fixé à priori (fonction polynomiales, fonction sigmoïdes). Le niveau de complexité (nombre de fonctions à utiliser, ordre du polynôme) étant fixé, le calage consiste alors à déterminer la combinaison de fonctions s'ajustant le mieux aux données mesurées. [GAUME 2002].

b₂. Modèles analytiques :

Ce sont des modèles pour lesquels les relations entre 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 variables. [GAUME 2002]

b₃. Modèles conceptuels :

Ce type de modèle repose sur l'analogie remarquée entre le fonctionnement d'un bassin versant et un ensemble de réservoirs interconnectés. Plus précisément, quand la structure du système et des lois le régissant sont inconnues ou lorsque la pauvreté des informations et la complexité des phénomènes en jeu prévalent, le comportement du système en question est simplifié. Ainsi, les modèles conceptuels intègrent des facteurs complexes en essayant de décrire le concept physique du comportement du système par une représentation plus simple. Au travers de ce type de modélisation, sont construites des structures empiriques censées reproduire les sorties du système étudié (débit, concentration,...) à partir des variables d'entrée (pluie, évapotranspiration, fertilisation, pratiques agricoles). 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 [Morin 1991] est un exemple de ce modèle.

Modèles globaux :

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. Deux exemples de ce type de modèle, le modèle IHRACRES. (Identification of unit Hydrographs And Component flows from Rainfall, Evaporation and Steamflow data) et le modèle GR (genie rural) (CEMAGRAF).

Modèles Spatialisés :

Actuellement plusieurs modèles spatialisés correspondant à 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 distribués dans l'espace. La spatialisation peut être arbitraire ou basée sur des divisions morphologiques naturelles (découpage en sous bassins) ou hydrologiques (aires contributives)

Les modèles spatialisés peuvent être classés en trois grands types :

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

Conclusion :

Les progrès informatiques ont permis un développement important de la modélisation en hydrologie. De ce fait, il existe un très grand nombre de modèles variés, simples ou complexes, qui dépendent de l'utilisateur et des questions auxquelles ils cherchent à répondre (prédiction de crues, simulation d'ouvrage, gestion de la ressource en eau, aménagement des bassins versants...).

Les modèles font intervenir un certain nombre de paramètres. Pour les ajuster à un bassin versant donné, il est nécessaire de disposer d'une série de précipitations, d'une série d'évaporation et d'une série de débits à l'exutoire afin de pouvoir utiliser le modèle. Ces trois séries de données doivent impérativement être disponibles sur la même période d'observation.

Un modèle hydrologique peut être défini comme une représentation simplifiée d'une réalité physique.

En hydrologie, la modélisation concerne généralement la relation pluie-débit c'est-à-dire que les modèles utilisent la pluie comme variable d'entrée et calculent un hydrogramme en sortie du bassin.

Après cette étude des modèles, notre choix porte sur un modèle hydrologique qui traite la modélisation des écoulements dans les régions arides et semi-arides, et qui a été testé sur quelques bassins versants algériens : c'est le modèle du Génie rural GR de type conceptuel global conçu et développé au CEMAGREF.

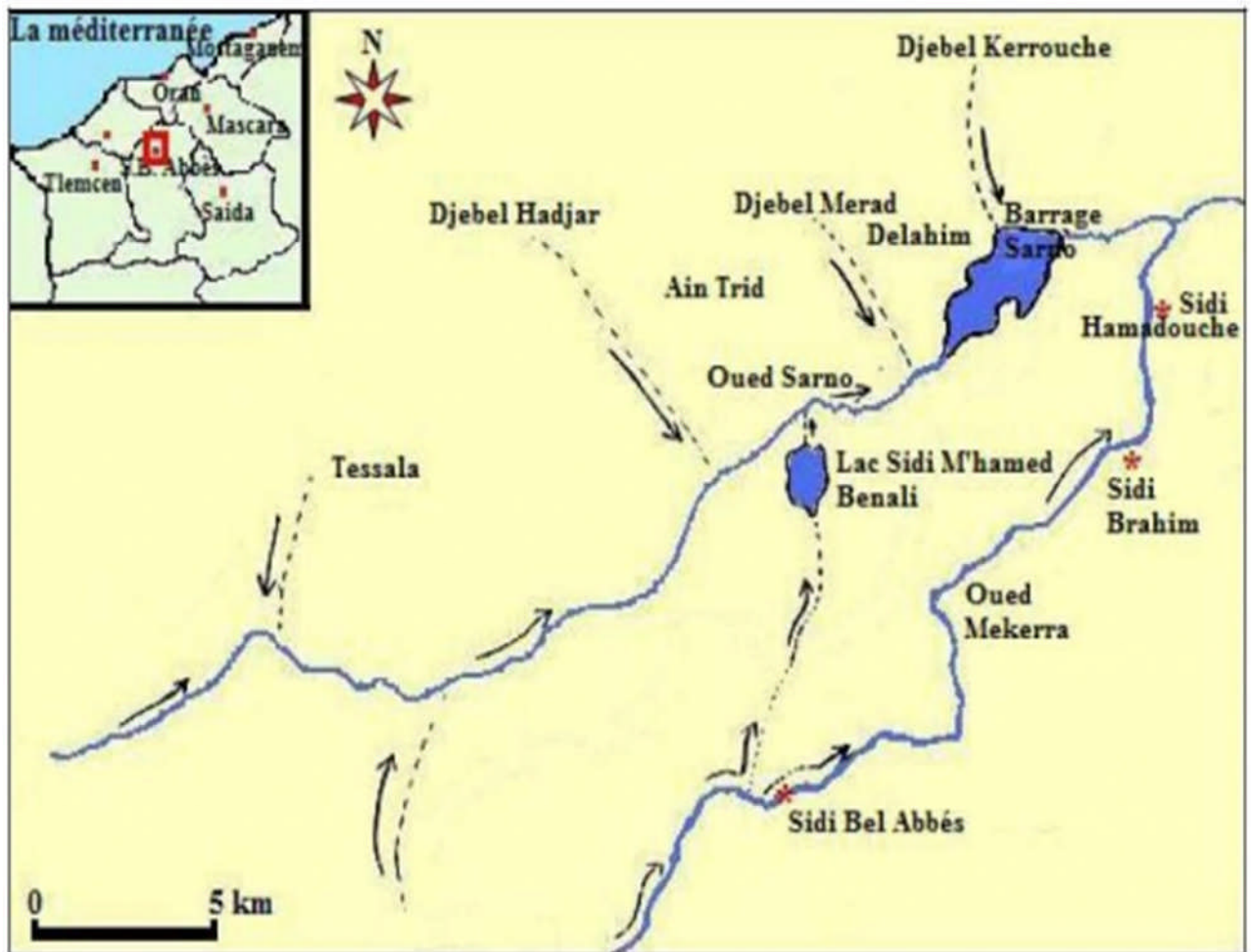
Chapitre II:

Présentation du bassin versant de l'oued SARNO

I. Situation géographique

Le bassin versant de l'oued Sarno est situé entre les premières croupes du TESSALA et les coteaux tertiaires alignés entre Sidi Brahim et Sidi Ali Boussidi. Le bassin versant occupe une superficie de 254 Km² comprise entre les altitudes 410m et 1023 m.

Le bassin versant de l'oued SARNO est limité au NE par djebel Kerrouche, au NO par djebel Merad et djebel Hajar, et au Sud par oued mekkera (fig. 2).



Source : Google Maps

Fig.2: situation géographique du bassin versant de l'oued Sarno

II. Morphométrie :

1. Hydrographie du Bassin Versant d'oued SARNO :

a. Description du réseau

Le réseau hydrographique fig.3 se compose

- ✓ En rive droite par un important affluent l'oued EL KOFFA d'une longueur de 17 Km.
- ✓ En rive gauche par des trois affluents O.AKAHAL, O.TAFERSITT et O. BOUKRIBANE »

b. Classification des talwegs par ordre méthode de « Schum » :

Tout cours d'eau sans affluent est d'ordre 1. Pour A.N STRAHLER et S.A SCHUM, tout tronçon de rivière formé par la réunion de deux cours d'eau d'ordre X est d'ordre X+1.

Les données de la classification du réseau hydrographique de l'oued Sarno sont présentées dans le tableau 1.

Tableau N°1 : classification des talwegs

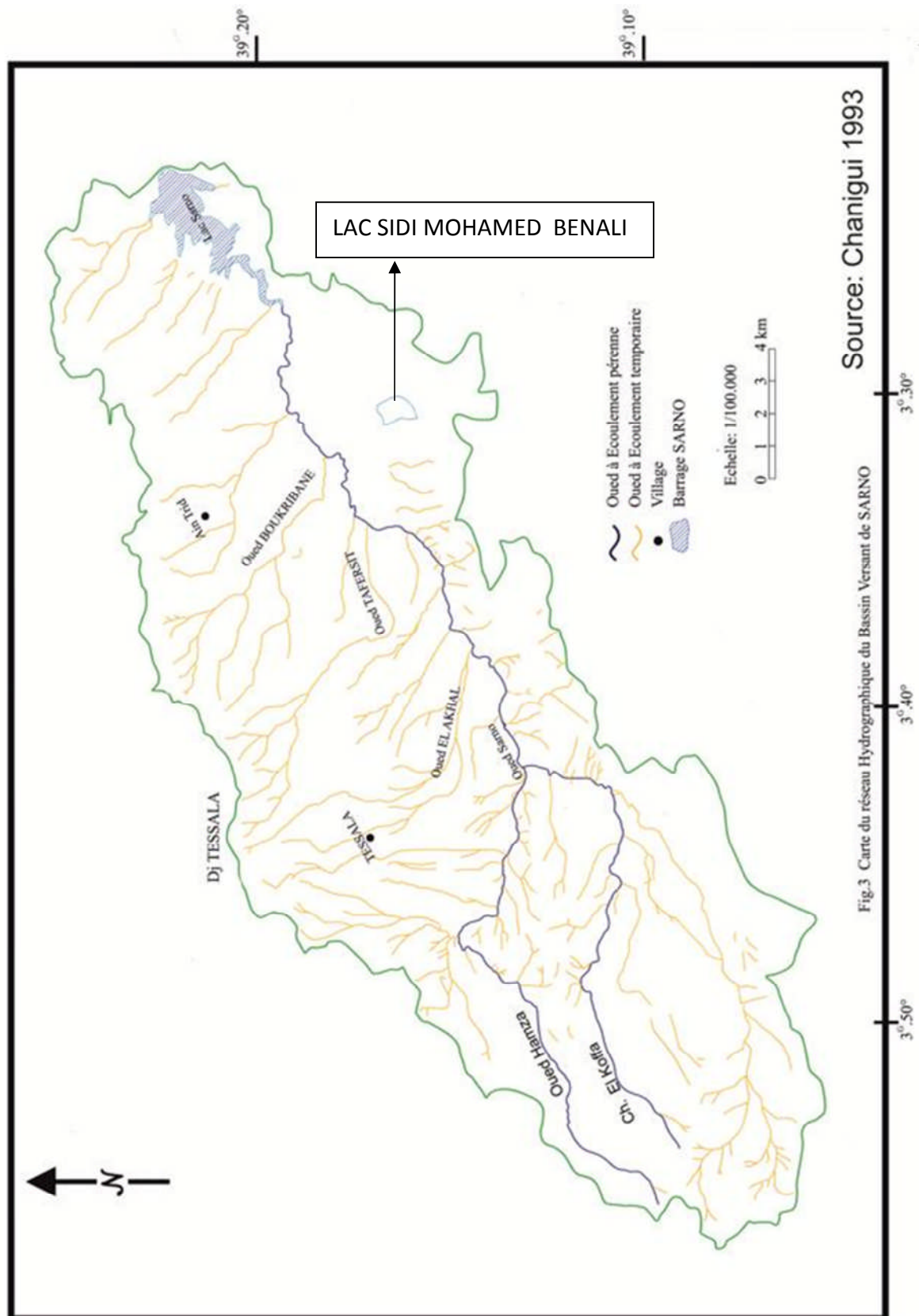
ordre	Nombre de talweg (N)	Longueur cumulée (Km) L_x	Longueur moyenne (Km) L_R	Aire (Km ²)	Aire moyenne (Km ²)
1	310	161	0.52	102.175	0.33
2	79	120.5	1.53	70.375	0.89
3	14	45.5	3.25	26.75	1.91
4	04	20	5.00	14.5	3.625
5	01	26	26	40.575	40.575
total	408	373		254.375	

Référence : CHANIGUI 1993

c. Rapport de longueur : R_L

C'est le quotient de la longueur moyenne des talwegs d'ordre (n+1) par celui des talwegs d'ordre (n).

$$R_L = \frac{L_{n+1}}{L_n}$$



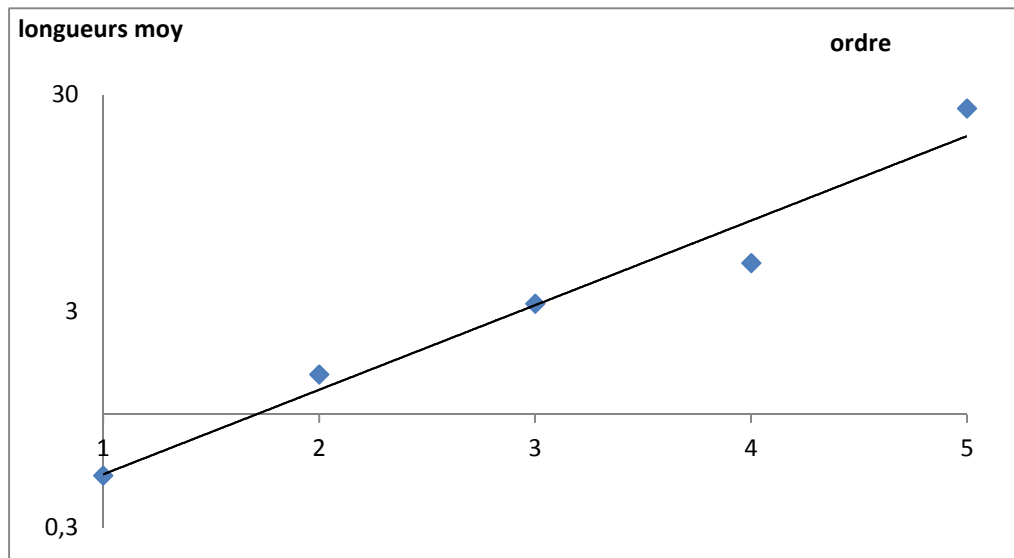


Figure 4 : rapport des longueurs

La pente a représente le logarithme de R_L , $a = \log R_L$, $R_L = 2.45$

d. Rapport de confluence :

Il représente le quotient du nombre de talwegs d'ordre n par celui de talwegs d'ordre $n+1$

$$R_C = \frac{N_n}{N_{n+1}}$$

Tableau N°2 : Rapport de confluence

Ordre	Nombre de talweg (N)	Rapport de confluence
1	310	3.92
2	79	5.64
3	14	3.5
4	04	4
5	01	-

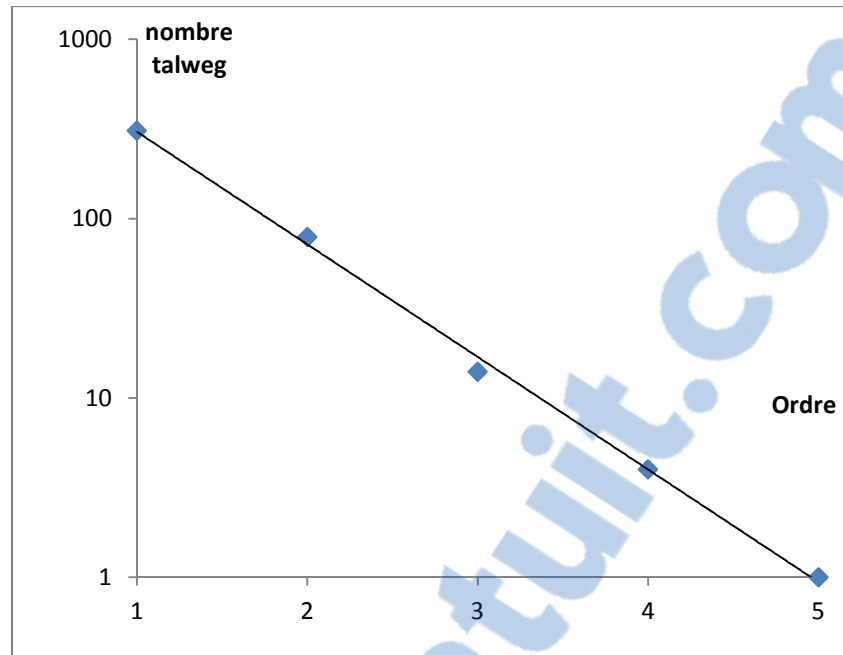


Figure 5 : Rapport de confluence

La pente a de la fig.5 représente le logarithme de R_C , $a = \log R_C$

$R_C = 4.7$

e. Rapport des aires :

C'est le quotient de l'aire moyenne des talwegs d'ordre n par celles des talwegs d'ordre $n-1$

$$R_A = \frac{A_n}{A_{n-1}}$$

La pente a représente le logarithme de R_A , $a = \log R_A = 0.34$ d'où $R_A = 2.19$

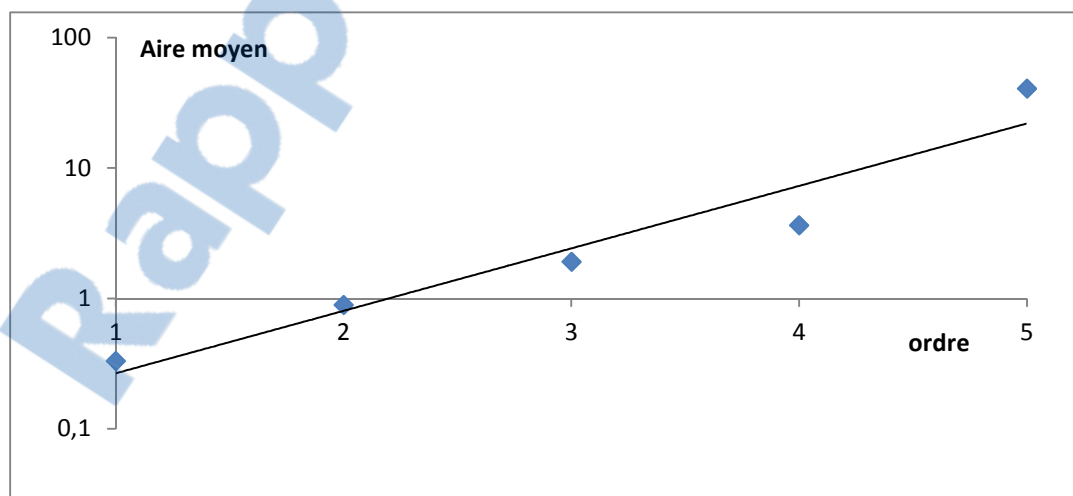


Figure 6: Rapport des aires

f. Densité de drainage :

La densité de drainage, par définition exprime la longueur cumulée du réseau hydrographique (Km) par la surface totale du bassin versant (Km²).

$$D_d = \frac{\sum_1^5 L_x}{A}$$

$$D_d = \frac{\sum_1^5 L_x}{A} = \frac{373}{254.375} = 1.5 \text{ Km/Km}^2$$

Avec $D_d < 2$, le bassin versant de l'oued Sarno est mal drainé.

g. Coefficient d'allongement E : Il est donné par la relation suivante :

$$E = \frac{2 \sqrt{\frac{A}{\pi}}}{L_0}$$

A : la surface total du bassin versant 254.375 en Km²

$$L_0: \frac{\sum_1^5 L}{N} = \frac{36.3}{5} = 7.26 \text{ Km}$$

N : Nombre d'ordre retenu égale à 5.

L : longueur moyenne des cours d'eau

$L_0 = 7.26 \text{ Km}$ Donc $E = 2.47$

h. Fréquence des cours d'eaux :

Elle correspond au nombre de cours d'eau par unité de surface, elle est donnée par la relation suivante :

$$F_s = \frac{N}{A} = \frac{408}{254} = 1.6$$

2. Caractéristiques de forme :

Les caractéristiques de forme nous permettent de connaître la morphologie du bassin versant, la réaction aux phénomènes météorologiques et son comportement hydrologique.

a. Indice de compacité de GRAVELIUS :

Cet indice permet de caractériser la forme du bassin versant, il est donné par la relation suivante :

$$K_c = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

K_c : Indice de compacité de gravelius.

P : Périmètre du bassin versant en Km.

A : Aire du bassin versant en Km².

D'où $K_c=1.87$ le bassin de SARNO est allongé traduisant un temps de concentration élevé et une érosion linéaire et régressive dans le bassin.

b. Rectangle équivalent :

C'est un modèle mis au point par Roche, pour pouvoir comparer facilement deux bassins entre eux du point de vue de l'influence de leurs caractéristiques sur l'écoulement par une simple transformation géométrique.

$$L: longueur = \frac{K_c \sqrt{A}}{1.128} \left[1 + \sqrt{\left(1 - \frac{1.12}{K_c} \right)^2} \right] = 47.95 \text{ Km}$$

$$l: largeur = \frac{A}{L} = 5.3 \text{ Km}$$

3. Paramètre de relief

L'étude du relief repose sur la répartition de la surface en fonction de l'altitude.

a. Répartition altimétrique et analyse hypsométrique:

Les données du tableau 3 permettent d'établir la courbe hypsométrique du bassin versant de l'oued SARNO $H\%=f(\sum A\%)$ et le diagramme des fréquences altimétrique pour le même bassin.

Tableau N°3 Répartition altimétrique du bassin versant de l'oued Sarno

Altitude (m)	% Altitude	Surface partielle		Surface cumulée	
		Km ²	%	Km ²	%
1020	100		0		0
1020-1000	96.72	0.075	0.03	0.075	0.03
1000-950	88.53	0.325	0.13	0.4	0.16
950-900	80.33	0.4	0.16	0.8	0.32
900-850	72.13	0.525	0.21	1.325	0.53
850-800	63.93	0.825	0.32	2.15	0.85
800-750	55.74	2	0.79	4.15	1.64
750-700	47.54	5.2	2.04	9.35	3.68
700-650	39.34	11.425	4.49	20.775	8.17
650-600	31.15	20.775	8.17	41.55	16.34
600-550	22.95	44.775	17.6	86.325	33.94
550-500	14.75	83.15	32.69	169.475	66.63
500-450	6.56	63.875	25.11	233.35	91.74
450-410		21.025	8.26	254.375	100

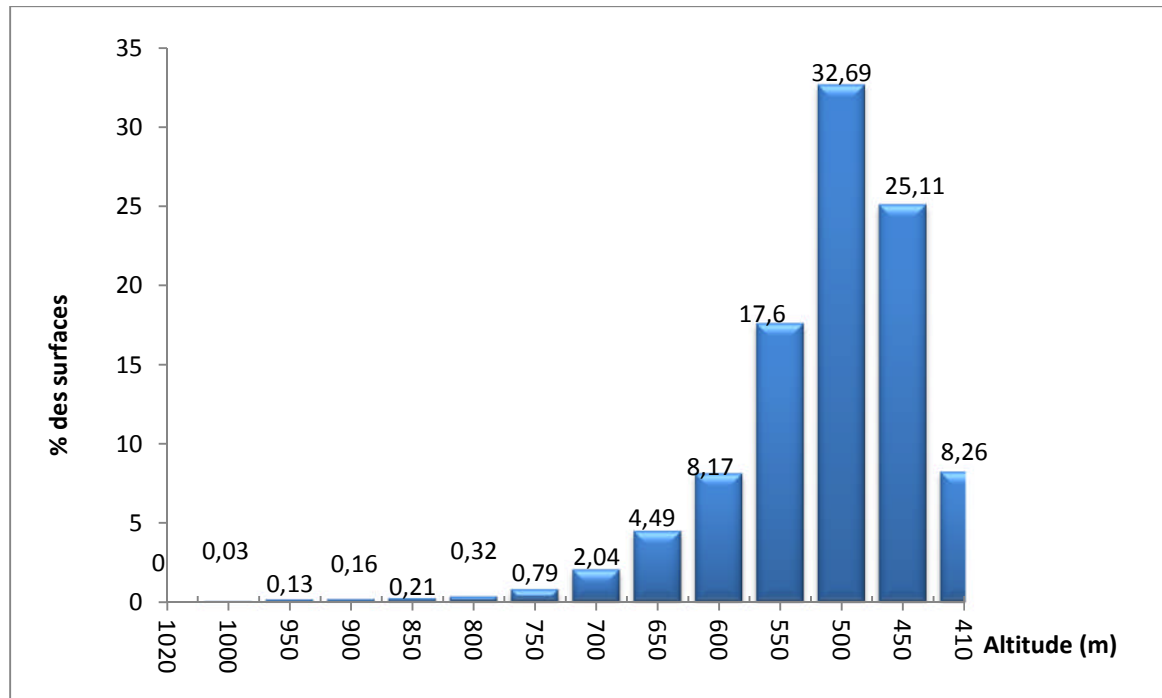


Fig.7 Histogramme des fréquences altimétriques du Bassin versant d'oued Sarno

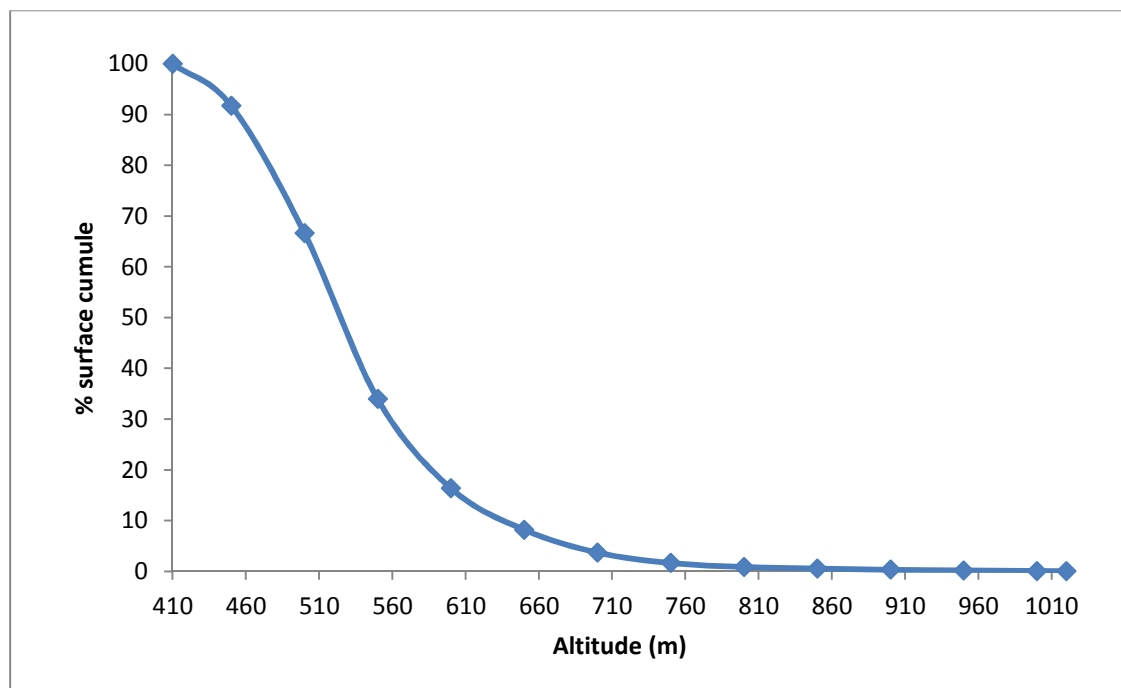


Fig.8 : Courbe Hypsométrique du bassin versant d'oued SARNO

La courbe hypsométrique du bassin versant de SARNO présente une pente très faible vers les hautes altitudes exprimant la présence d'une vallée encaissée et une forte pente aux basses altitudes dans le reste du bassin indiquant la présence d'une vallée ou d'une plaine inondable. Il s'agit d'un bassin en phase de vieillesse –fin d'équilibre, cela indique que notre bassin présente un potentiel érosif faible.

L'histogramme des fréquences altimétriques montre que l'altitude la plus fréquente est comprise entre 500-550 m.

L'altitude de fréquence 1/2 est égale à 526 m.

L'altitude à 5% $H_5=680$ m

L'altitude à 95% $H_{95}=440$ m

4. Paramètres de pente :

a. Indice de pente de ROCHE :

A partir du rectangle équivalent Mr ROCHE a introduit la notion d'indice de pente qui rend compte de l'influence de la pente sur le régime hydrologique.

L'indice de pente est donné par la relation suivante :

$$I_p = \frac{1}{\sqrt{L}} \sum_{i=1}^{13} X_i \sqrt{P}$$

L : longueur du rectangle équivalent : 47.95 Km

X_i : étant la distance qui sépare les deux courbes de niveau (i) et (i-1) sur le rectangle équivalent

Tableau N°4 indice de pente de ROCHE

Altitude (m)	$a_i - a_{i-1}(m)$	X_i (km)	$P = (a_i - a_{i-1})/X_i$	\sqrt{P}
1020 - 1000	20	0.014	1.43	1.2
1000 - 950	50	0.061	0.82	0.91
950 - 900	50	0.076	0.66	0.81
900 - 850	50	0.1	0.5	0.71
850 - 800	50	0.156	0.32	0.57
800 - 750	50	0.38	0.13	0.36
750 - 700	50	0.98	0.05	0.22
700 - 650	50	2.16	0.02	0.14
650 - 600	50	3.92	0.01	0.1
600 - 550	50	8.45	0.006	0.08
550 - 500	50	15.69	0.003	0.06
500 - 450	50	12.05	0.004	0.06
450 - 410	40	3.97	0.005	0.071

$$I_p = \frac{1}{\sqrt{L}} 3.96 = 0.57$$

b. Indice de pente globale I_g :

Il est défini également par ROCHE sur la courbe hypsométrique, on tire les points $H_{5\%}$ et $H_{95\%}$.

$$I_g = \frac{D}{L} \quad \text{Avec } D = H_{5\%} - H_{95\%} = 680 - 440 = 240\text{m}$$

$L = 47.95 \text{ Km}$ longueur du rectangle équivalent

$$\text{D'où } I_g = 0.005 = 5.005\text{m/Km}$$

Selon la classification de L'ORSTOM le relief du bassin versant de l'oued SARNO est plutôt faible.

Tableau 5 : classification du relief selon I_g par L'ORSTOM

Relief		Valeur de I_g		
1	Relief très faible		I_g	< 0.002
2	Relief faible	0.002	I_g	0.005
3	Relief assez faible	0.005	I_g	0.01
4	Relief modéré	0.01	I_g	0.02
5	Relief assez fort	0.02	I_g	0.05
6	Relief fort	0.05	I_g	0.5
7	Relief très fort	0.5	I_g	

c. Dénivelé spécifique D_s :

$$D_s = I_g \sqrt{A}$$

I_g : Indice de pente global (m/Km)

A : aire du bassin versant

$$\text{D'où } D_s = 79.76 \text{ m}$$

Tableau 6 : classification du relief selon D_s

$D_s < 10 \text{ m}$	Relief très faible
$10 < D_s < 25$	Relief faible
$25 < D_s < 50$	Relief assez faible
$50 < D_s < 100$	Relief modéré
$100 < D_s < 250$	Relief assez fort
$250 < D_s < 500$	Relief fort
$500 < D_s$	Relief très fort

D'après le tableau N°6, établie par l'ORSTOM le relief selon D_s est Modéré.

5. Profil en long de l'oued SARNO :

Tableau N°7 : paramètres du profil en long de l'oued Sarno

Altitude (m)	Longueur du talweg (m)	Dénivelée (m)	Pente %
705-700	50	5	10
700-650	500	50	10
650-600	1525	50	3.28
600-550	4025	50	1.24
550-500	8100	50	0.62
500-450	14350	50	0.25
450-410	16750	40	0.24

Le profil en long de l'oued Sarno fig.9 permet de schématiser les ruptures de pente du cours d'eau qui ne correspondent qu'à un changement de facies ou au colmatage par les alluvions quaternaires déposées au niveau des cônes de déjections ou sur les plaines alluviales.

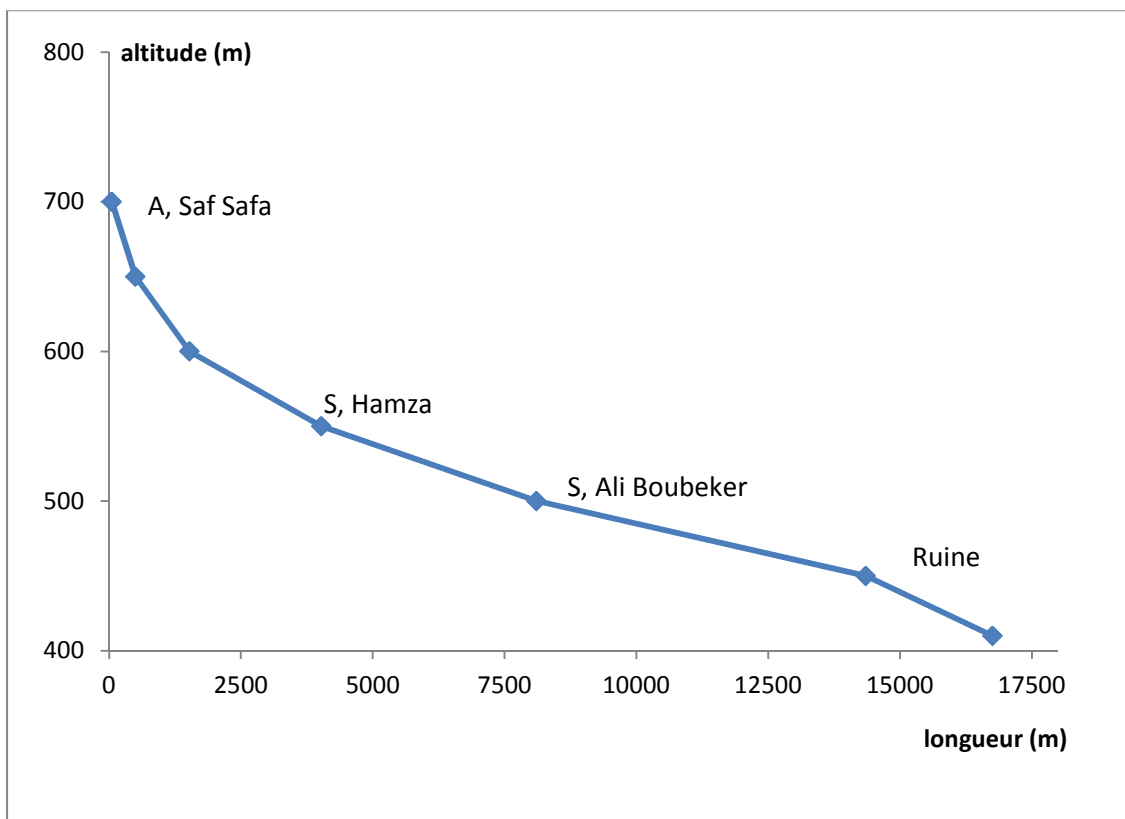


Fig.9 : profil en long de l'oued SARNO

Conclusion :

Le bassin versant de l'oued SARNO présente un périmètre de 106.5 km, une superficie de 254 km², un oued principal de 45.3 km de long et une longueur cumulée de ses affluents de 327.7 km.

L'étude de sa forme témoigne d'un bassin plat et allongé.

Le relief caractérise le début de l'état de Monadnocken fin d'équilibre.

L'altitude du bassin est comprise entre 410m et 1023m.

L'altitude 525m correspond à la fois à l'altitude moyenne et à l'altitude la plus fréquente.

III. Géologie du bassin versant : fig.10

La géologie du bassin versant de Sarno se caractérise par trois unités Allochtones fondamentales (de bas en haut : l'unité, Chouala, Sénoniène ,et oligomiocène) et l'autochtone.

1. Litho-stratigraphie :

A. Allochtone :

a. Unité Chouala :

Dans la zone d'étude, le facies caractéristique du Chouala dans tout l'ouest de l'Algérie septentrionale (marnocalcaire barrémien à patine blanchâtre, riche en Ammonites pyriteuses) est absent ; seuls l'Aptien, l'Albien et l'Oligomiocène y sont représentés en des points dispersés.

• Aptien-Albien :

Il n'est reconnu que grâce à des lombeaux situés au sud du Djebel Mezab, il est constitué par des marnes vertes, presque noires très argileuses, tendres. MAGNE (1978)

Au Djebel Sidi Belabes, apparaissent des calcaires néritiques en gros bancs disloqués. Les facies recristallisés sont variés : calcaires lumachelliques, pseudo-oolitiques, gravéleux à Gastéropodes Bryozoaires et Orbitolines.

• Oligomiocène :

Dans la zone d'étude, l'Oligomiocène affleure dans la région de Djebel Oumata, il est représenté par des marnes vertes, parfois presque noires, accompagnées de grés roux rognoneux, calcaireux peu abondants.

Au Djebel Oumata, l'oligomiocène s'enrichit en grés et en bancs lenticulaires de calcaire grésobioclastique ou à lithothamniées riche en macroforaminifère.

b. Unité Sénonienne :

Elle est représentée par les couches suivantes :

1. Tithonique-Berriasien

Fenet,(1975) décrit dans les marnes sableuses sénonienne au point [x=188.4, y=223.7], un petit lambeau tectonique de calcaires argileux beiges et où la microfaune reconnue est représentée par : **calpionellealpina** (Lorentz).

2. Sénonien supérieur à paléocène

Représenté par trois étages :

- ❖ Le Santonien : rarement présent
- ❖ Le Companien : il est représenté par des marnes sableuses brunes ou noires, tendres et friables au niveau de l'unité sidi EL HADRI.
- ❖ Le Maestrichien : calcaires marneux rares.

3. Paléocène :

Très difficilement séparable des marnes sénoniennes à cause de la similitude du facies.

4. Yprésien :

Dans la zone d'étude au nord du village de Tessala, il affleure des marnocalcaires blancs à silex noirs disposés en lits.

Au niveau de la rive droite du bassin il existe des facies semblable à l'Eocène inférieur.

5. Lutetien moyen-supérieur :

Le Lutetien commence par une succession de bancs peu cohérents de calcaires marneux à Nummulites, de calcaires marneux crème, et de grés glauconieux phosphatés.

6. Priabono-Oligocène :

Ce type de couches composées de marnes sableuses brunes, présentent des bancs grés azoïques.

c. Unité Oligomiocène :

Représentée par:

- ❖ L'Oligo-Aquitaniens : constitué de marnes brunes ou vertes et de grés fins calcaireux.
- ❖ Le Burdigalien : constitué de marnes et grés jaunes souvent sableux.

d. Le complexe triasique :

Il est nommé le facies classique du Trias (argiles rouges, dolomies noires, roche verte et gypses).

B. Autochtone :

On distingue trois types d'autochtone : Un autochtone anté-nappe, synchrone et post-nappe.

Dans le secteur étudié ni l'un ni l'autre des deux premiers types n'y affleurent, le post-nappe quant à lui, y est largement représenté.

a. Miocène post-nappe :

Seul le Méssinien carbonaté est représenté dans le bassin étudié, le Miocène du premier cycle post-nappe et les autres termes du deuxième cycle y sont absents.

b. Pliocène :

Il est faible d'affleurement sur le bassin versant du SARNO, et n'apparaît qu'au voisinage du barrage SARNO et sous le djebel Tessala.

c. Quaternaire :

Il est représenté par :

- ✓ Un glacis ancien polygénique et encroûtement calcaire.
- ✓ Alluvions récents non rubéfiés, mieux représentés relativement à l'amont de l'oued SARNO.
- ✓ Eboulis ou glissement mieux représenté au piémont de Dj. Tessala.
- ✓ Dépôt de pente faiblement représenté.

Fig.10 Carte géologique du Bassin Versant de SARNO

Conclusion

Sur le plan lithologique, le bassin est caractérisé par une relative homogénéité, il s'agit de dépôts marno-sableux à intercalations marno-calcaire ou gréseuse, les dépôts calcaires sont rares et limités dans l'espace et dans le temps.

L'unité Sénonienne recouvre l'essentiel de la rive gauche du bassin, l'autochtone qui est largement représenté sous la forme de la post-nappe.

Le pliocène apparaît au voisinage du barrage et sous le Dj Tessala.

Le quaternaire présente sous forme de glacis, des alluvions, des éboulis et dépôt de pente de l'amont vers l'aval du bassin.

IV. Climatologie

1. Etude des précipitations

a. Les précipitations moyennes annuelles

Pour cette étude nous avons utilisé les données recueillies auprès de l'ANRH et mesurées aux niveaux des deux stations existantes dans le bassin versant (tableau 8):

Tableau N°8 caractéristique des stations pluviométriques du bassin versant de l'oued Sarno.

Station	Années de mesure			Altitude (m)	Moyennes Annuelles (mm)
		Longitude	Latitude		
Tessala	1964-2009	00°.45' w	35°.15' N	600	309.3
Ain trid	1964-2009	00°.39' w	35°.25' N	530	395.3

❖ Station Tessala : (fig 11)

Pour une moyenne de 309 mm, le maximum de 559 mm est enregistré en 1980 et Le minimum de 89mm en 1972.

18 années sur 42 ont enregistré des hauteurs de pluie supérieures à la moyenne.

❖ Station aintrid : (fig 12)

Pour une moyenne de 395 mm le maximum de 613 mm est enregistré en 1984 et le minimum de 127.5 mm en 1966.

21 années sur 48 ont enregistré des hauteurs de pluie supérieures à la moyenne.

Plus de la moitié des précipitations annuelles enregistrées aux deux stations sont inférieures à la moyenne interannuelle. La diminution des totaux annuels est assez prononcée à partir des années 80. (Période de sécheresse en Algérie)

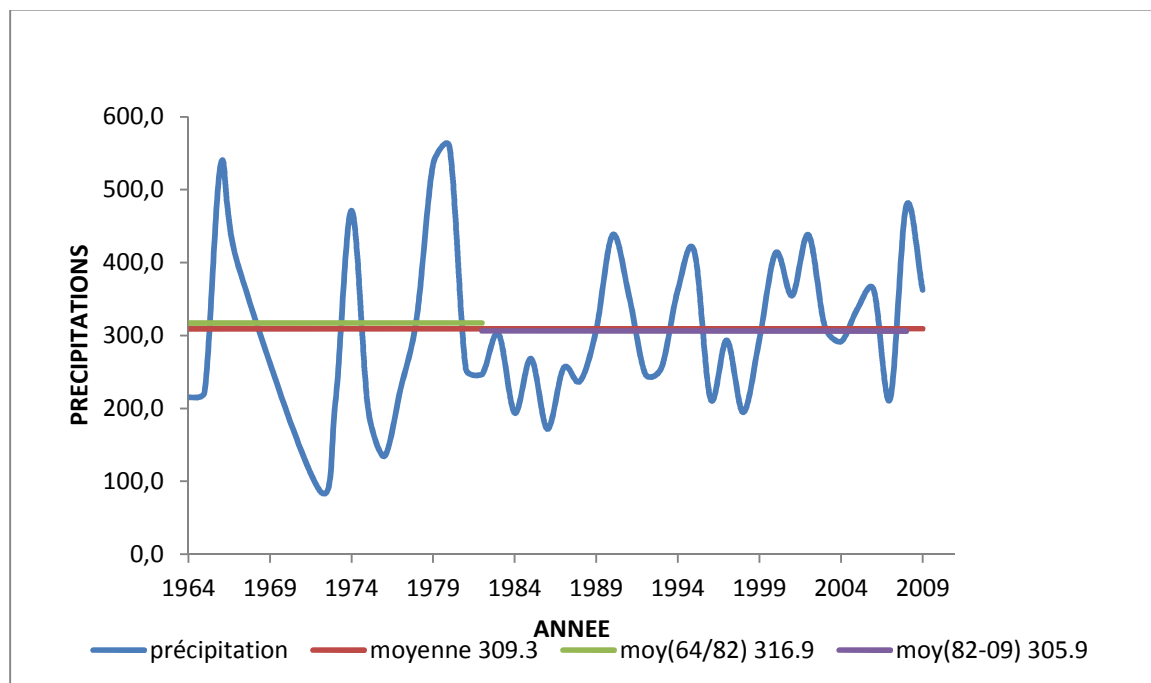


fig.11: variations interannuelles des précipitations de la station de TESSALA (1964-2009)

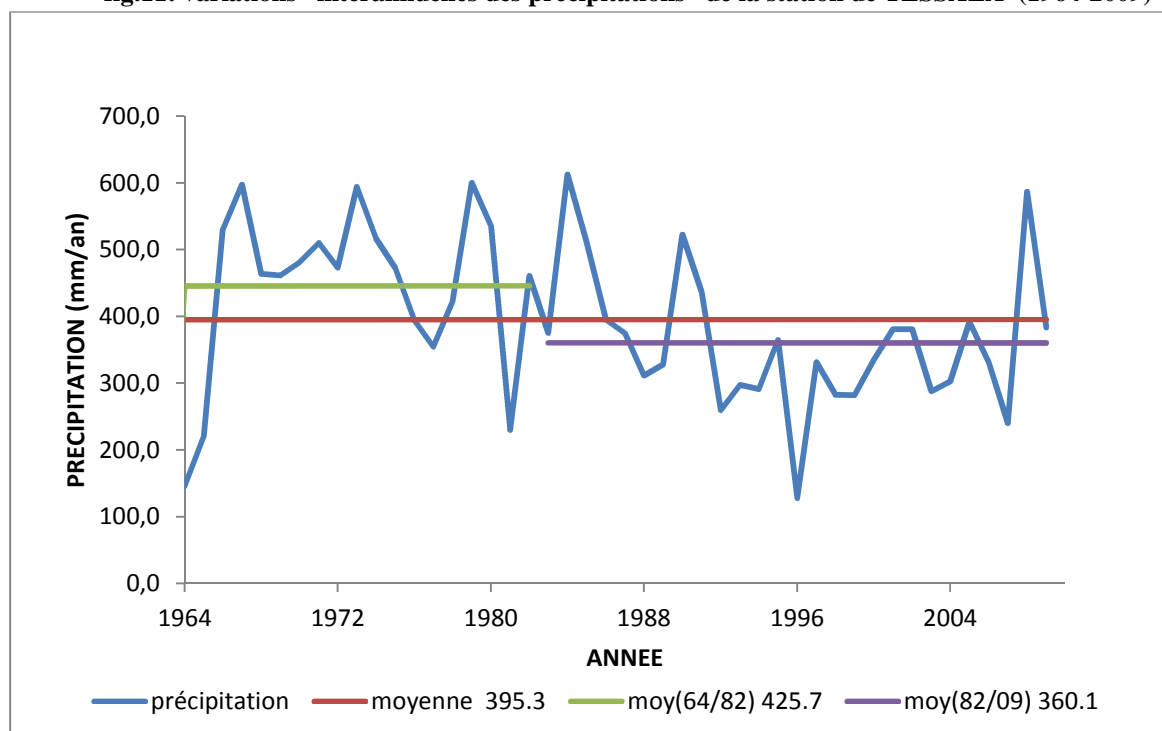


fig.12: variations interannuelles des précipitations de la station d'AIN TRID (1964-2009)

Remarque :



On remarque que les moyennes des précipitations des deux périodes choisies pour les stations TESSALA et AIN TRID (64/82), (82/09) respectivement ne sont pas loin de la moyenne total.

concernant les valeurs des précipitations de la station TESSALA de toute la période sont inférieures que celles de la station AIN TRID bien qu'elle est à une altitude plus élevée (600m), nous pensons que cela est dû probablement à la position de la station (tessala), dans le versant sud les monts de tessala sont moins arrosés.

b. Les précipitations moyennes mensuelles

Les valeurs des précipitations moyennes mensuelles des deux stations sont portées aux tableaux 09 et 10

Tableau N°09 : valeurs moyennes mensuelles des précipitations de la station de TESSALA (1964-2009)

mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Jui	Aout	Total Annuel (mm)
P (mm)	9.99	28.8	45.2	42.11	43.3	44.19	41.28	31	18.69	3.47	0.12	1.09	309.3

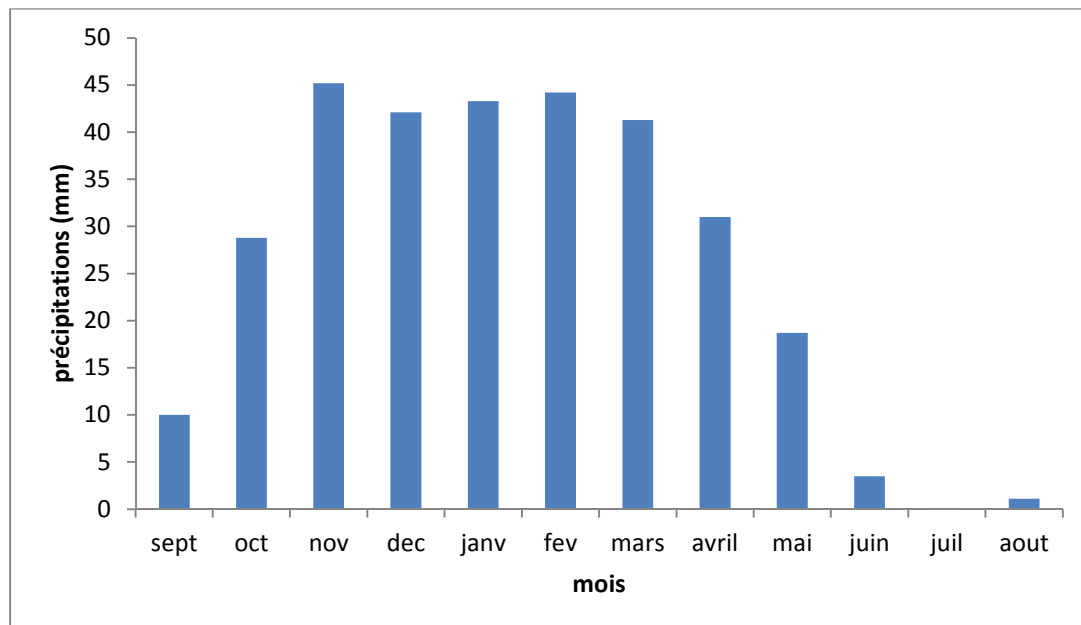


fig. 13: précipitations moyennes mensuelles à la station TESSALA (1964-2009)

L'histogramme des précipitations moyennes mensuelles de la station de TESSALA montre que les mois les plus pluvieux sont ceux allant d'octobre à mai avec un maximum de 45.2 mm en novembre, tandis que les mois les plus secs s'étendent de juin à septembre avec un minimum de 0.12 mm en juillet.

Tableau N°10 : valeurs moyennes mensuelles des précipitations de la station d'AIN TRID (1964-2009)

mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Jui	Aout	Total Annuel (mm)
P (mm)	12.77	36.80	53.95	56.31	50.11	51.69	51.34	40.85	32.61	5.95	1.64	1.8	395.3

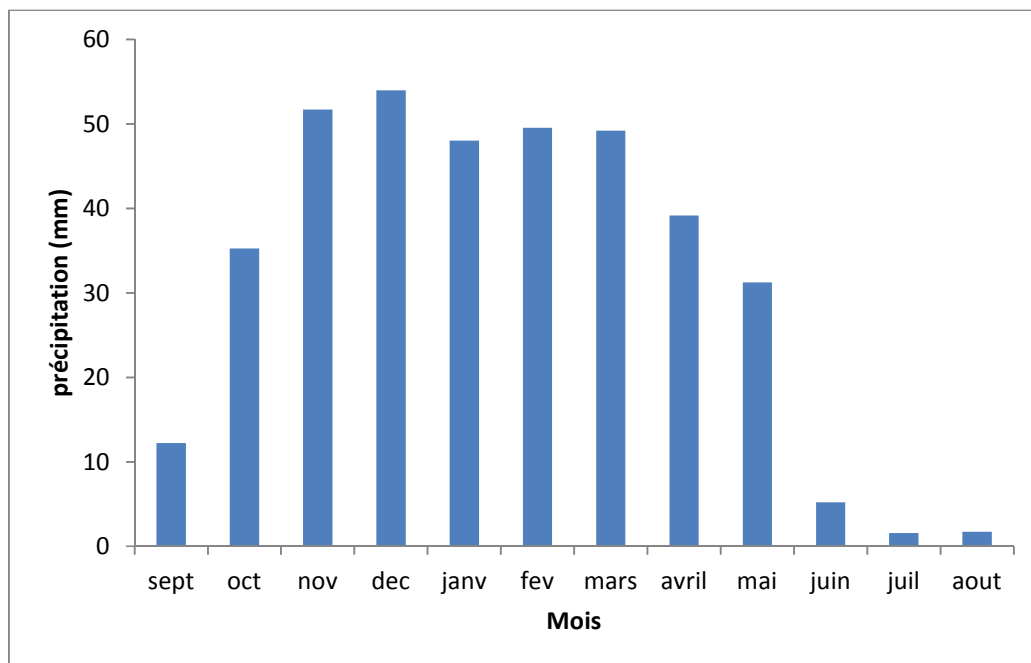


Fig. 14: précipitations moyennes mensuelles à la station AIN TRID (1964-2009)

L'histogramme des précipitations moyennes mensuelles de la station d'AIN TRID montre que les mois les plus pluvieux sont ceux allant d'octobre à mai avec un maximum de 56.31 mm en décembre, tandis que les mois les plus secs s'étendent de juin à septembre avec un minimum de 1.64 mm en juillet.

c. Les précipitations saisonnières :

Tableau N°11 : répartition des précipitations saisonnières station TESSALA

Saisons	Automne	Hiver	Printemps	Eté
P (mm)	83.99	129.6	90.97	4.68

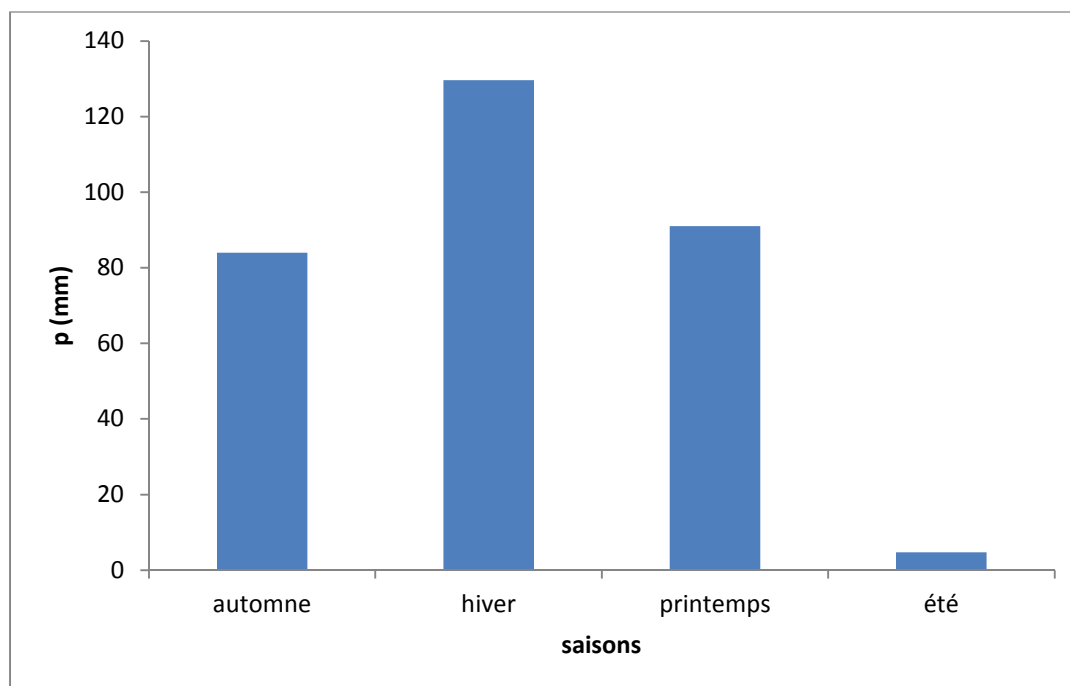


Fig. 15: histogramme des précipitations saisonnières de TASSALA (1964-2009)

Tableau N°12 : répartition des précipitations saisonnières station d'AIN TRID

Saisons	Automne	Hiver	Printemps	Eté
P (mm)	103.51	158.11	124.80	8.89

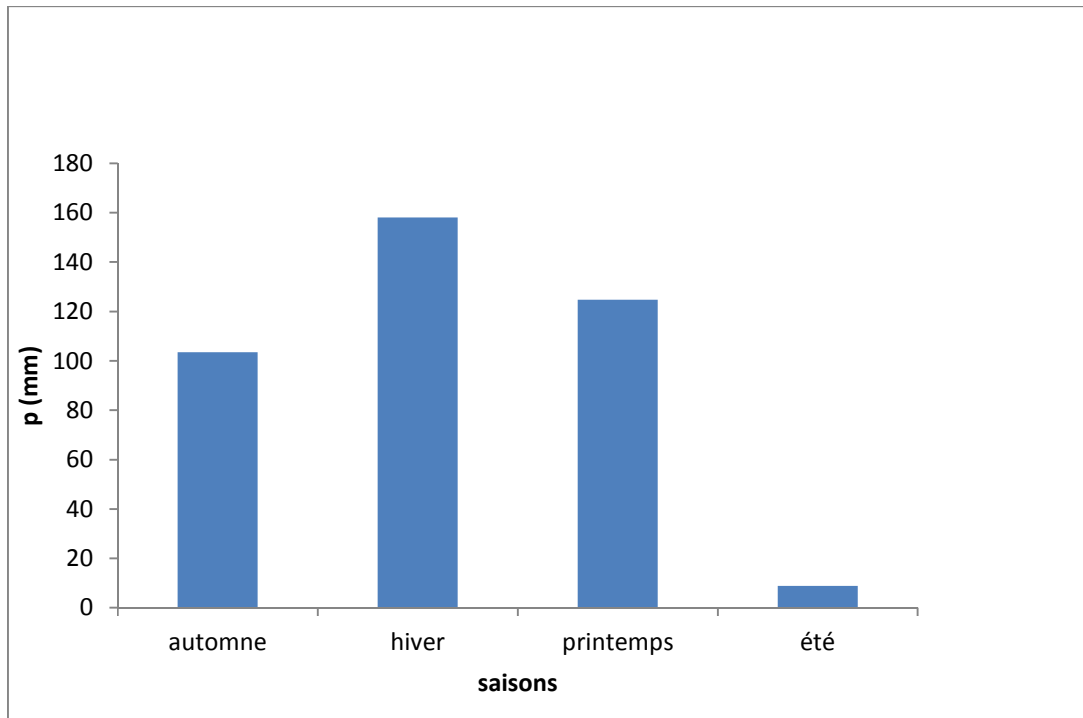


Fig. 16: histogramme des précipitations saisonnières d'AIN TRID (1962-2009)

La distribution saisonnière des deux stations de TESSALA et AIN TRID montrent que l'automne, l'hiver et le printemps sont les saisons les plus humides et l'été est la saison sèche. La notion de saison telle qu'elle est posée n'est pas très convaincante. En effet, on remarque que pour les deux stations de même pour l'ensemble du nord de L'Algérie, la tendance va plutôt pour deux périodes l'une humide et l'autre sèche.

d. Etude statistique des précipitations annuelles :

Les séries obtenues sur les stations d'étude, nous permettent de calculer les paramètres statistiques et de déterminer la loi de distribution statistique des précipitations annuelles.

Tableau N°13 : paramètres de position des précipitations des stations de TESSALA ET AIN TRID

paramètres	Formules	Stations	
		TESSALA	AIN TRID
Moyenne	$\bar{P} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i$	309.3	395.3
Variance	$\delta^2 = \frac{1}{n} (\bar{P}^2 - P^2)$	12439.95	14771.65
Ecart type	$\sigma = \sqrt{\delta^2}$	112.20	121.53
C_v	$C_v = \frac{\sigma}{\bar{P}}$	0.36	0.30

Le coefficient de variation C_v pour les deux stations, étant inférieur à 0.5 un ajustement à une loi Normale est possible.

- **Adéquation des données à une loi statistique.**

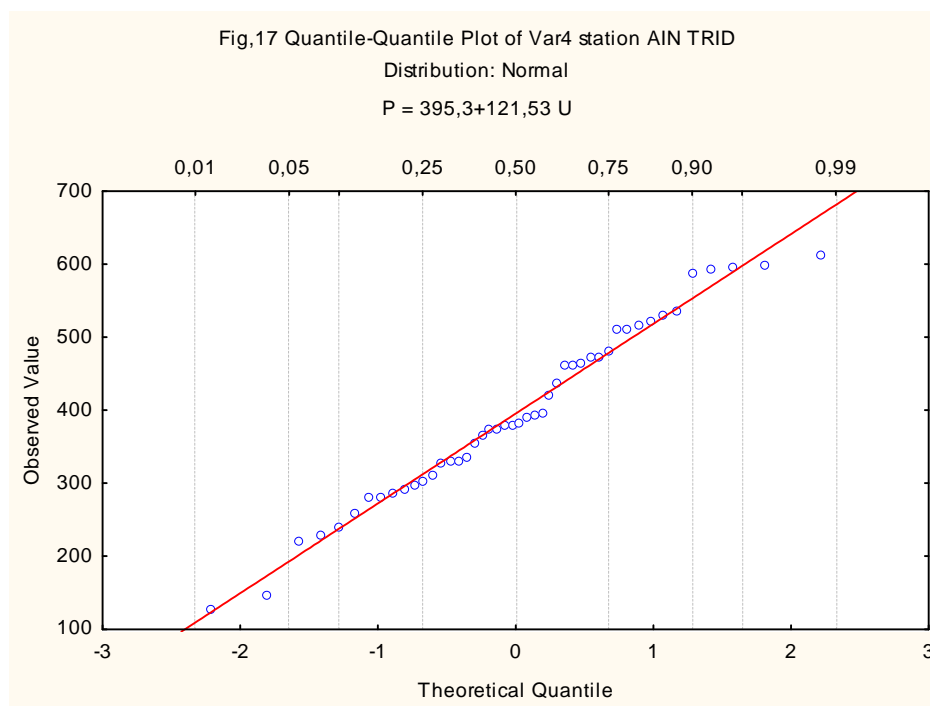
a) Ajustement par la loi normale

❖ Test graphique :

Les données des deux stations (tableau 14 et 15) sont reportées sur papier fonctionnel gaussio-arithmétique permettant de représenter la fonction $P=f(F_i)$, le graphe comporte sur l'axe des abscisses les précipitations en échelle arithmétique et sur l'axe des ordonnées les fréquences F_i en échelle gaussienne (fig. 17,18). On obtient une distribution représentée par une droite d'HENRY d'équation $P = \bar{P} + \sigma U$

**Tableau N°14 : fréquences des données des précipitations de la station
d'AIN TRID**

Rang i	Précipitation (mm)	$F_i = \frac{i}{N+1}$	Rang i	Précipitation (mm)	$F_i = \frac{i}{N+1}$	Rang i	Précipitation (mm)	$F_i = \frac{i}{N+1}$
1	127,5	0,021	17	334,6	0,361	33	472.5	0,702
2	145,9	0,042	18	354,4	0,382	34	472.8	0,723
3	220,5	0,063	19	365,0	0,404	35	481.1	0,744
4	229,7	0,085	20	374,7	0,425	36	510.3	0,765
5	239,6	0,106	21	375,0	0,446	37	510,7	0,787
6	259,5	0,127	22	380,9	0,468	38	516,5	0,808
7	281.9	0,148	23	381	0,489	39	522.7	0,829
8	281.9	0,170	24	383,2	0,510	40	529.6	0,851
9	287,8	0,191	25	392	0,531	41	535.7	0,872
10	291,2	0,212	26	393.5	0,553	42	586.7	0,893
11	297,5	0,234	27	395.1	0,574	43	594.2	0.914
12	302,6	0,255	28	421.9	0,595	44	597.3	0.936
13	311,4	0,276	29	436.7	0,697	45	600.1	0.957
14	328,2	0,297	30	460,8	0,638	46	612.8	0.978
15	331,5	0,319	31	461.2	0,659			
16	331,6	0,340	32	463.7	0,680			



Les précipitations annuelles s'alignent bien autour de la droite d'HENRY, d'équation $P = 395.3 + 121.53 U$, elles sont donc bien distribuées selon une loi Normale.

❖ Test Numérique de χ^2 :

Tableau 15 : calcul du χ^2 station AIN TRID

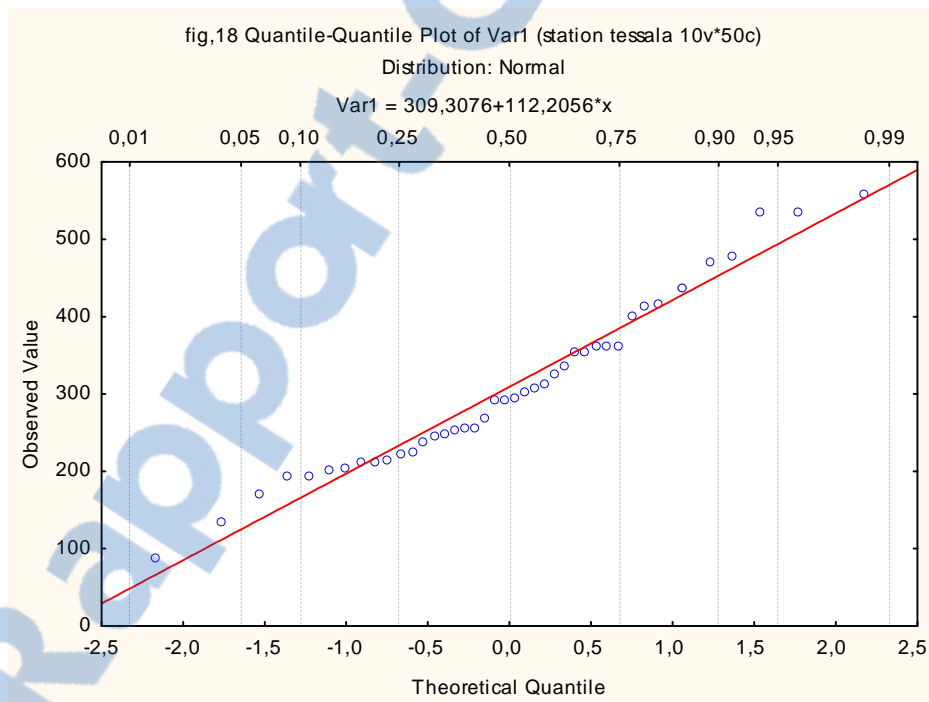
Nombre De classe	Limite De classe	Bornes standardisés	Fréquences Cumulés à la borne supérieure	Fréquences Simple théorique	Effectif Observé (n_i)	Effectif Théorique (np_i)	$\frac{(n_i - np_i)^2}{np_i}$
1	< 287.8	<-0.88	0.12	0.12	9	5.52	2.19
2	[287.8 ; 331.6]	[-0.88 ; -0.52]	0.3015	0.1815	7	8.349	0.21
3	[331.6 ; 381]	[-0.52 ; -0.11]	0.4562	0.1547	7	7.1162	0.0017
4	[381 ; 460.8]	[-0.06 ; 0.53]	0.7019	0.2457	7	11.3022	1.63
5	[460.8 ; 516.5]	[0.53 ; 0.99]	0.8389	0.137	8	6.302	0.45
6	>516.5	>0.99	>1	0.1611	8	7.4106	0.046

Le K_c^2 calculé est de $\chi_c^2 = 4.52$

Pour un seuil de probabilité de 5% et un degré de libertés **ddl**=6-2-1=3 le K_t^2 tabulé est de $\chi_t^2 = 7.815$, Le $\chi_c^2 < \chi_t^2$; l'ajustement à la loi normale des précipitations annuelles de la station de AIN TRID est vérifié.

Tableau N°16 : fréquences des données des précipitations de la station de TESSALA

rang i	Précipitation (mm)	$F_i = \frac{i}{N+1}$	Rang i	Précipitation (mm)	$F_i = \frac{i}{N+1}$	Rang i	Précipitation (mm)	$F_i = \frac{i}{N+1}$
1	88,9	0,023	17	255,6	0,395	33	399,9	0,791
2	134,3	0,047	18	256	0,419	34	413,5	0,814
3	171,7	0,070	19	268,3	0,442	35	415,6	0,837
4	193,7	0,093	20	291,7	0,465	36	438,1	0,860
5	194,6	0,116	21	293,4	0,488	37	438,1	0,884
6	200,9	0,140	22	295,2	0,512	38	471,3	0,907
7	205,1	0,163	23	302,3	0,535	39	477,8	0,930
8	212,1	0,186	24	308,3	0,558	40	535,2	0,953
9	212,8	0,209	25	312,5	0,581	41	536,2	0,977
10	215,3	0,233	26	325,3	0,605	42	558,9	0,791
11	222,9	0,256	27	336,4	0,628			
12	226	0,279	28	354,4	0,651			
13	237,4	0,302	29	354,8	0,674			
14	246,7	0,326	30	362,4	0,698			
15	247,3	0,349	31	362,6	0,721			
16	254,4	0,372	32	362,7	0,744			



Les points sont bien alignés autour de la droite d'équation :

$P = 309.3 + 112.2 U$, les précipitations annuelles à la station tessala sont normalement bien distribuées.

Tableau 17 : calcul du χ^2 station TESSALA

Nombre De Classe	Limite De Classe	Bornes standardisés	Fréquences Cumulés à la borne supérieure	Fréquences Simple théorique	Effectif Observé (n_i)	Effectif Théorique (np_i)	$\frac{(n_i - np_i)^2}{np_i}$
1	< 212.1	<-0.87	0.1922	0.226	8	9.5172	0.241
2	[212.1 ; 247.3]	[-0.87 ; -0.55]	0.2912	0.099	7	4.158	1.94
3	[247.3 ; 295.2]	[-0.55 ; -0.12]	0.4522	0.161	7	6.762	0.0083
4	[295.2 ; 362.6]	[-0.12 ; 0.47]	0.6808	0.2286	9	9.6012	0.037
5	>362.6	>0.47	1	0.3192	11	13.406	0.431

le χ_c^2 Calculé est de $\chi_c^2 = 2.65$

Pour un seuil de probabilité de 5% et un degré de libertés **ddl**=5-2-1=2le χ_t^2 tabulé est de $\chi_t^2 = 5.991$, Le $\chi_c^2 < \chi_t^2$; l'ajustement à la loi normale des précipitations annuelles à la station de TESSALA est vérifié.

b) Calcul des précipitations pour une période de récurrence donnée :

Les équations précédentes de la loi normale sont :

- Station AIN TRID $P = 395.3 + 121.53 U$
- Station TESSALA $P = 309.30 + 112.20 U$

A partir de ces équations, on peut calculer un certain nombre de précipitations types, en remplaçant « U » par sa valeur.

Pour T=10 ans On a $T = \frac{1}{1-F} \rightarrow F_i=0.9$ d'où U=1.28

Pour T=100 ans On a $T = \frac{1}{1-F} \rightarrow F_i=0.99$ d'où U=2.32

Pour T=500 ans On a $T = \frac{1}{1-F} \rightarrow F_i=0.998$ d'où U=2.88

Pour T=1000 ans On a $T = \frac{1}{1-F} \rightarrow F_i=0.999$ d'où U=3.29

Tableau N°18 : calcul des précipitations pour une période de récurrence donnée.

Stations	TESSALA	AIN TRID
Précipitations Décennales (mm) U =1.28	453	550
Précipitations centenaires (mm) U =2.32	570	677
Précipitations cinquantenaire (mm) U =2.88	633	745
Précipitations millénaires (mm) U =3.29	679	795

c) Calcul de la période de retour des valeurs extrêmes :

✚ Période de retour du minimum observé : **Tableau N°19**

Stations	AIN TRID	TESSALA
Minimum observé P_m (mm)	127.5	88.9
Période de retour T (ans)	59	40

✚ Période de retour du maximum observé : **Tableau N°20**

Stations	AIN TRID	TESSALA
Maximum observé P_M (mm)	612.8	558.9
Période de retour T (ans)	28	75

d) Détermination de la lame d'eau moyenne tombée sur le bassin versant d'oued sarno.

- Moyenne arithmétique :

On prend les précipitations moyennes sur les stations d'AIN TRID et TESSALA respectivement période (64-09) et (64-09).

Donc $P_m = \frac{395.3+309.3}{2}$ soit une valeur de 352 mm/an



L'apport moyen annuel des précipitations sur le bassin total serait donc :

$$V = P_m * S \text{ (BV)} = 352 * 10^{-3} * 254 * 10^6 = 89.48 * 10^6 \text{ m}^3/\text{an}$$

- Courbe altimétrique de la pluie : 1913-1938(SELTZER 1946)

En utilisant la courbe altimétrique de la pluie du littoral oranais établie par Seltzer 1946 pour la période 1913-1938 fig.19, ainsi que la répartition altimétrique du bassin versant d'oued sarno nous obtenons les résultats du tableau 21.

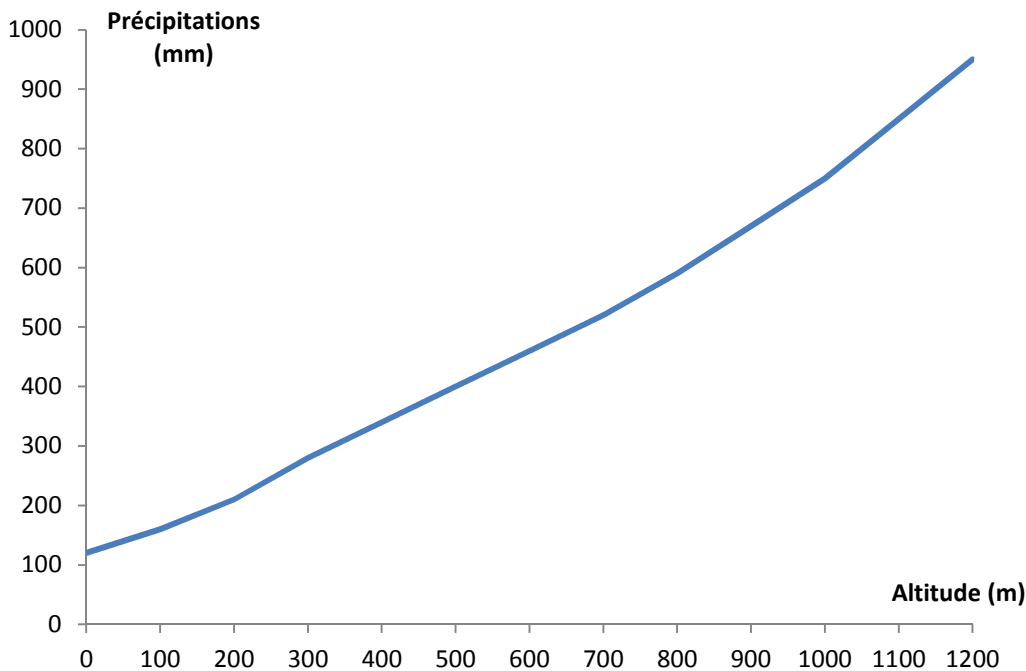


Fig.19 : gradient des précipitations du littoral oranais d'après SELTZER (1946)

Tableau N°21 répartition des précipitations en fonction de l'altitude

Altitude	Surface partielle (m ²)	Précipitation (m)	Volume (m ³)
1020-1000	0.075 10 ⁶	750 10 ⁻³	56.25 10 ³
1000-950	0.325 10 ⁶	710 10 ⁻³	230.75 10 ³
950-900	0.4 10 ⁶	670 10 ⁻³	268 10 ³
900-850	0.525 10 ⁶	630 10 ⁻³	330.75 10 ³
850-800	0.825 10 ⁶	590 10 ⁻³	486.75 10 ³
800-750	2 10 ⁶	560 10 ⁻³	1120 10 ³
750-700	5.2 10 ⁶	520 10 ⁻³	2704 10 ³
700-650	11.425 10 ⁶	490 10 ⁻³	5598.25 10 ³
650-600	20.775 10 ⁶	460 10 ⁻³	9556.5 10 ³
600-550	44.775 10 ⁶	430 10 ⁻³	19253.25 10 ³
550-500	83.15 1 10 ⁶	400 10 ⁻³	33260 10 ³
500-450	63.875 10 ⁶	360 10 ⁻³	22995 10 ³
450-410	61.025 10 ⁶	330 10 ⁻³	20138.25 10 ³

Volume total = $116 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ moyenne pondérée

$$\bar{P}_m = \frac{\sum P_n S_n}{S} = \frac{116 \cdot 10^6}{254 \cdot 10^6} = 0.456 \text{ m} = 456 \text{ mm}$$

On voit que cette valeur est supérieure de celle tombée sur le bassin versant pour la période 1964/2009, ceci due à la sécheresse remarquable qui s'est installée depuis 1980.

2. Etude des températures

La température est un élément important pour la détermination du type de climat, ainsi que le calcul du déficit d'écoulement et de l'évapotranspiration potentielle.

a. Températures annuelles :

La variation des températures annuelles à la station du barrage SARNO (fig.20) présente une augmentation de la température depuis 1995 jusqu'à 2000 où la température reste relativement constante autour de 17°C jusqu'à 2003, à partir de 2004 la température diminue sensiblement pour atteindre 15.5°C

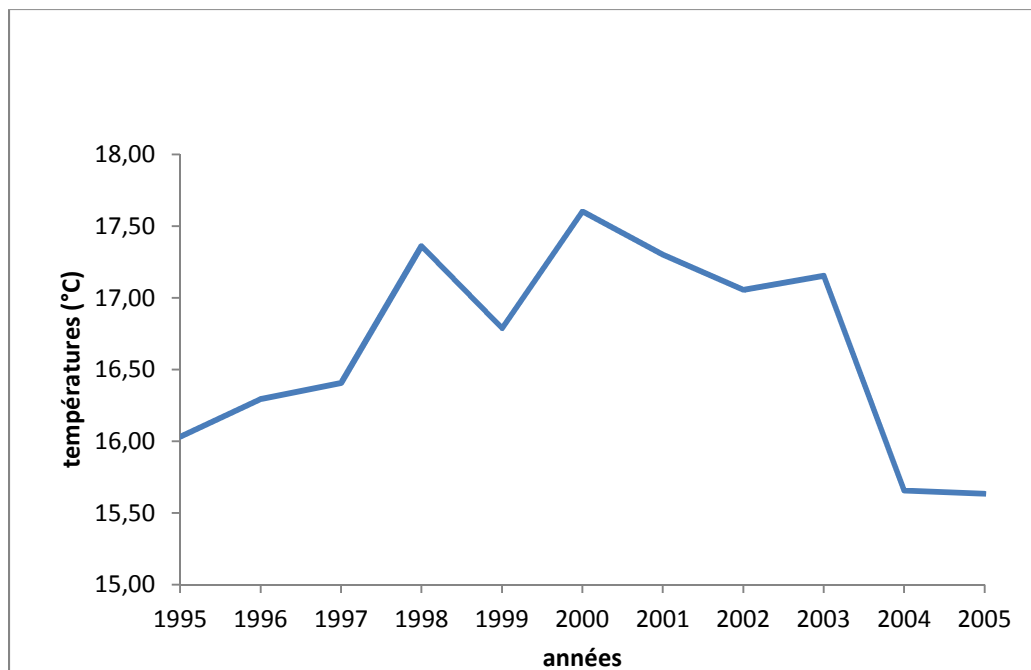


Fig.20: variations interannuelles des températures à la station du barrage SARNO (1995-2005)

b. Températures moyennes, maximales et minimales mensuelles :

Les températures mensuelles et annuelles, maximales, moyennes et minimales de la période (1995 ; 2005) de la station du barrage SARNO sont portées dans le tableau 22.

Tableau N°22 : valeurs moyennes, maximales et minimales mensuelles des températures de la station du barrage SARNO (1995-2005)

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	JU	A	Année
T°max	27,45	23,73	18,63	14,97	15,00	15,33	19,78	19,35	23,13	29,38	31,00	29,83	22.30
T°min	15,24	11,21	7,64	5,48	4,93	5,33	7,66	9,39	12,20	16,63	18,95	18,88	11.13
T°moy	21,50	18,57	12,61	10,07	9,21	10,09	12,54	14,07	17,92	22,94	25,21	25,23	16,66

Les variations des températures moyennes mensuelles au barrage de SARNO (fig.21) indiquent que le mois de janvier est le plus froid avec (9.21°C), et le mois d'août le plus chaud (25.23°C).

La courbe des maximums observés enregistre une valeur maximale de 31°C en juillet et une valeur minimale en décembre de 14.97°C.

La courbe des minima observés enregistre une valeur maximale de 18.95°C en juillet et une valeur minimale en janvier de 4.93°C

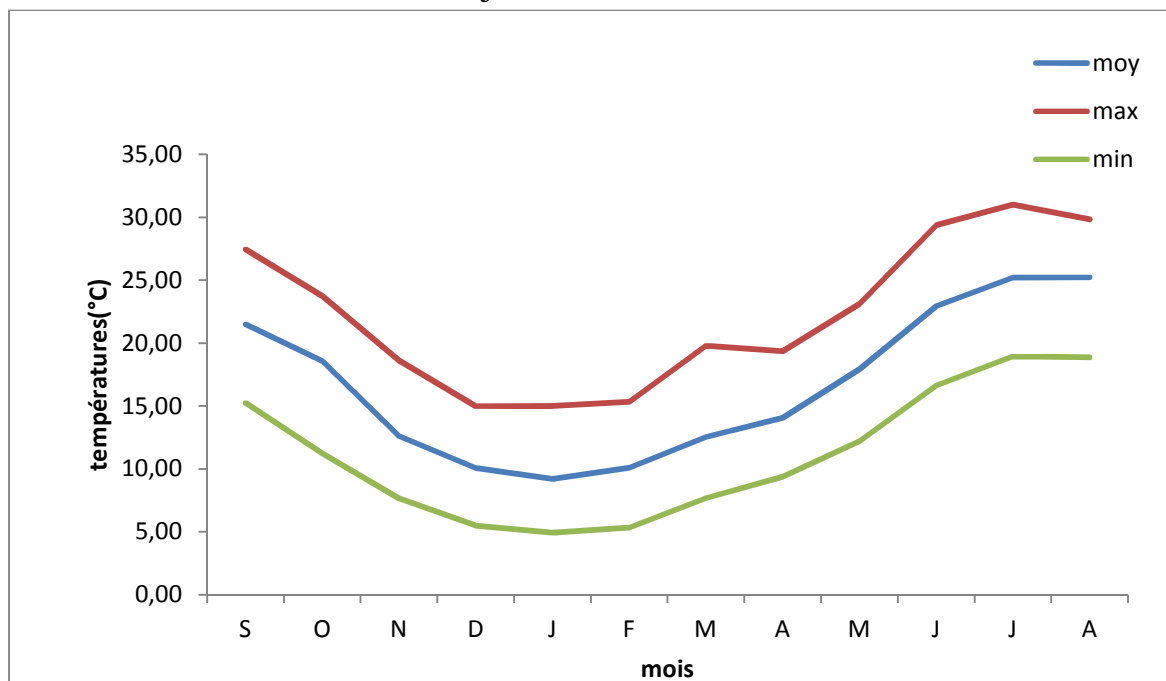


Fig. 21 courbe des températures mensuelles moyennes,maximales et minimales de la station du BARRAGE SARNO (1995-2005)

3. Etude du climat

Le but de cette étude est de déterminer le type de climat à partir soit des méthodes de visualisation des courbes pluviothermique de (Gausсен et bagnouls), et Ombrothermique d'Euvert) soit des indices climatiques de De Martone, Moral, Emberger et Kerner.

a. Méthodes graphiques (méthode de visualisation) :

❖ Courbe pluviothermique :

Tableau N°23 Température et précipitation moyenne mensuelles à la station de AIN TRID(1995-2005)

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	JU	A	année
P (mm)	15.7	23.4	61.2	43.6	51.2	38.4	27.1	26.8	22.7	1	1.7	2.2	315.2
T° C	21,50	18,57	12,61	10,07	9,21	10,09	12,54	14,07	17,92	22,94	25,21	25,23	16.66

Le report des données du tableau 23 dans un même graphique où l'échelle des précipitations est égale à deux fois celles des températures d'après (GAUSSEN et BAGNOULS). fig.22, permet de distinguer deux périodes : une période humide excédentaire s'étalant du mois d'octobre jusqu'à maiet une période sèche déficitaire couvrant le reste de l'année.

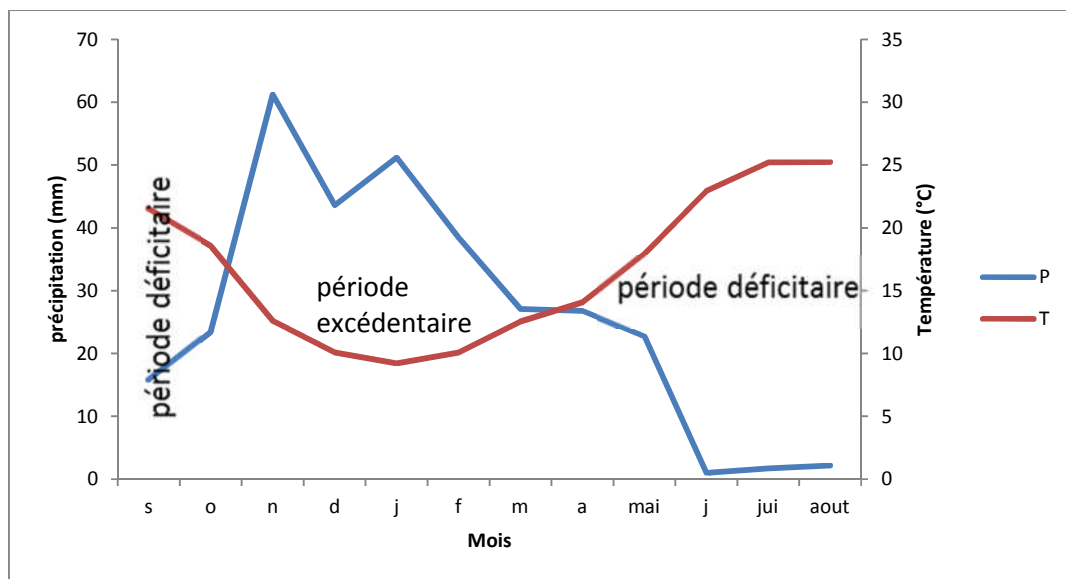


fig.22 Courbe pluviothermique station Ain Trid (1995-2005)

❖ Courbe Ombrothermique :

Le diagramme Ombrothermique de la station d'AinTrid (fig.23) permet de définir une période excédentaire de 5 mois : novembre jusqu'à mi-mai et une période déficitaire sur le reste de l'année.

D'autre part, le rapport P/T mensuel (tableau 24) permet de définir trois types de sous climat

Tableau N°24 rapport P/T mensuel

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	JU	A
P(mm)	15.7	23.4	61.2	43.6	51.2	38.4	27.1	26.8	22.7	1	1.7	2.2
T° c	21.5	18.57	12.61	10.07	9.21	10.09	12.54	14.07	17.92	22.94	25.21	25.23
P/T	0.70	1.24	4.61	4.34	5.73	3.82	2.12	1.90	1.25	0.046	0.067	0.085
	T.S	Sec	H	H	H	H	Sec	Sec	Sec	T.S	T.S	T.S

$P/T < 1$ définit un climat très sec (eu méditerranéen) : il s'agit des mois juin, juillet, août et septembre.

$1 < P/T < 3$ définit un climat sec (subméditerranéen) : il s'agit des mois de mars, avril, mai et octobre.

$P/T > 3$ définit un climat humide de montagne ou à tendance océanique : il s'agit des mois de janvier, février, novembre et décembre.

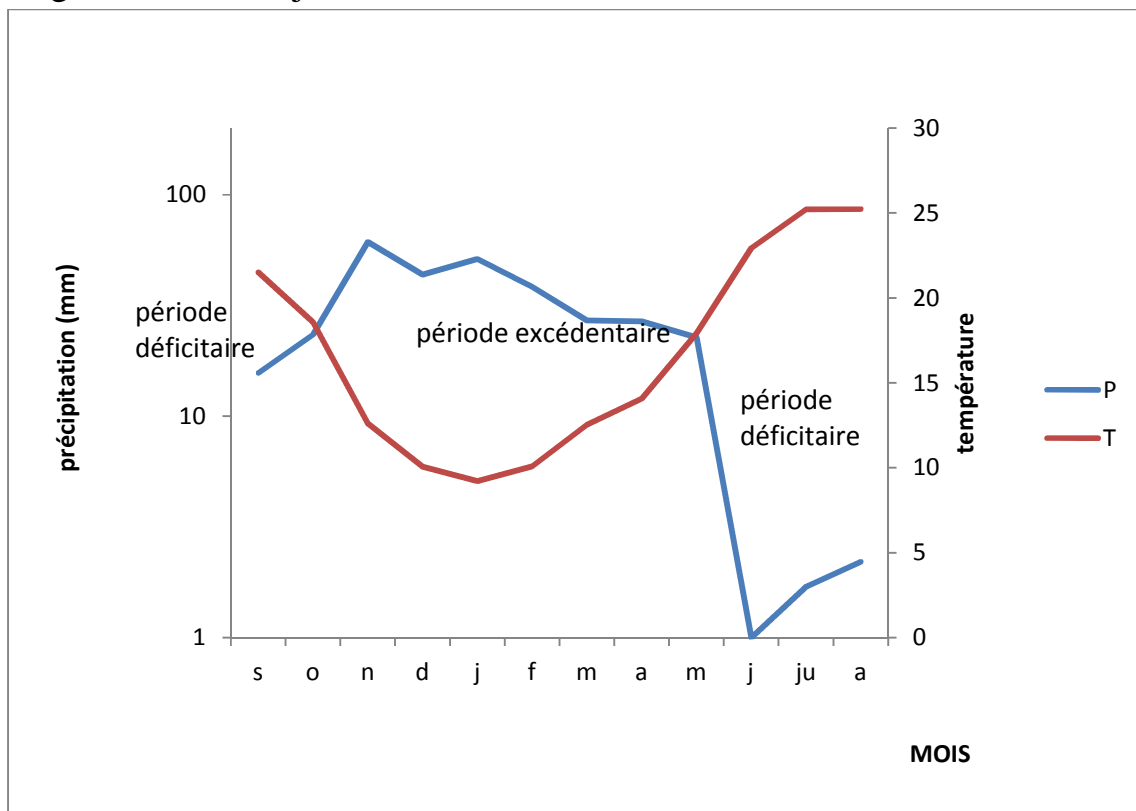


fig.23 Courbe ombrothermique station AIN TRID (1995-2005)

b. Indices climatiques

Le calcul des indices climatiques, nous permet de connaître le type de climat de la région étudiée. Le tableau 26 regroupe tous les indices climatiques de la station D'Ain Trid

Tableau N°25 calcul des indices climatiques

	Indice d'aridité de Demartone annuel	Indice D'ANGSTROM	Indice de Moral
formule	$I = \frac{P}{T + 10}$	$I = \frac{P}{(1.07)^t}$	$I_a = \frac{P}{T^2 - 10 T + 200}$
Calcul	$I = \frac{315.2}{26.66} = 11.82$	$I = \frac{315.2}{(1.07)^{16.66}} = 102.10$	$I_a = \frac{315.2}{16.66^2 - 10 * 16.66 + 200} = 1.01$
Identification Des Paramètres	P: précipitations annuelles T: température moyenne annuelle	P: précipitations annuelles T: température moyenne annuelle	P: précipitations annuelles T: température moyenne annuelle
Classification des indices	10 < I < 20 Semi aride		$I_a > 1$ Semi Aride
Nature du climat	Semi aride	Semi aride	Semi aride

• **Indice d'aridité mensuel de DE.MARTONNE**

Cet indice est donné par la relation :

$$I = \frac{12 P}{T + 10}$$

Ou : P et T représentent respectivement la précipitation et température du mois considéré.

• **Tableau N°26 Indice d'aridité mensuel de DE.MARTONNE**

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	JU	A
P (mm)	15.7	23.4	61.2	43.6	51.2	38.4	27.1	26.8	22.7	1	1.7	2.2
T°C	21,50	18,57	12,61	10,07	9,21	10,09	12,54	14,07	17,92	22,94	25,21	25,23
I	4,66	15,02	28,39	32,26	30,0	29,59	27,52	21,02	14,36	1,90	0,54	0,59
	ha	sa	t	t	t	t	sa	sa	sa	ha	ha	ha

I<5 : les mois de Juin, Juillet, Aout et Septembre sont caractérisés par un régime hyperaride. (ha)

10 < I < 20 un régime semi-aride règne sur la station pendant deux mois Mai et Octobre. (sa)

$20 < I < 30$ un régime tempéré domine la station pendant novembre, janvier, février ; mars et avril. (t)

$I > 30$ on est à la limite de la zone tempérée pendant le mois de décembre.(t)

ABaque INDICE D'ARIDITE

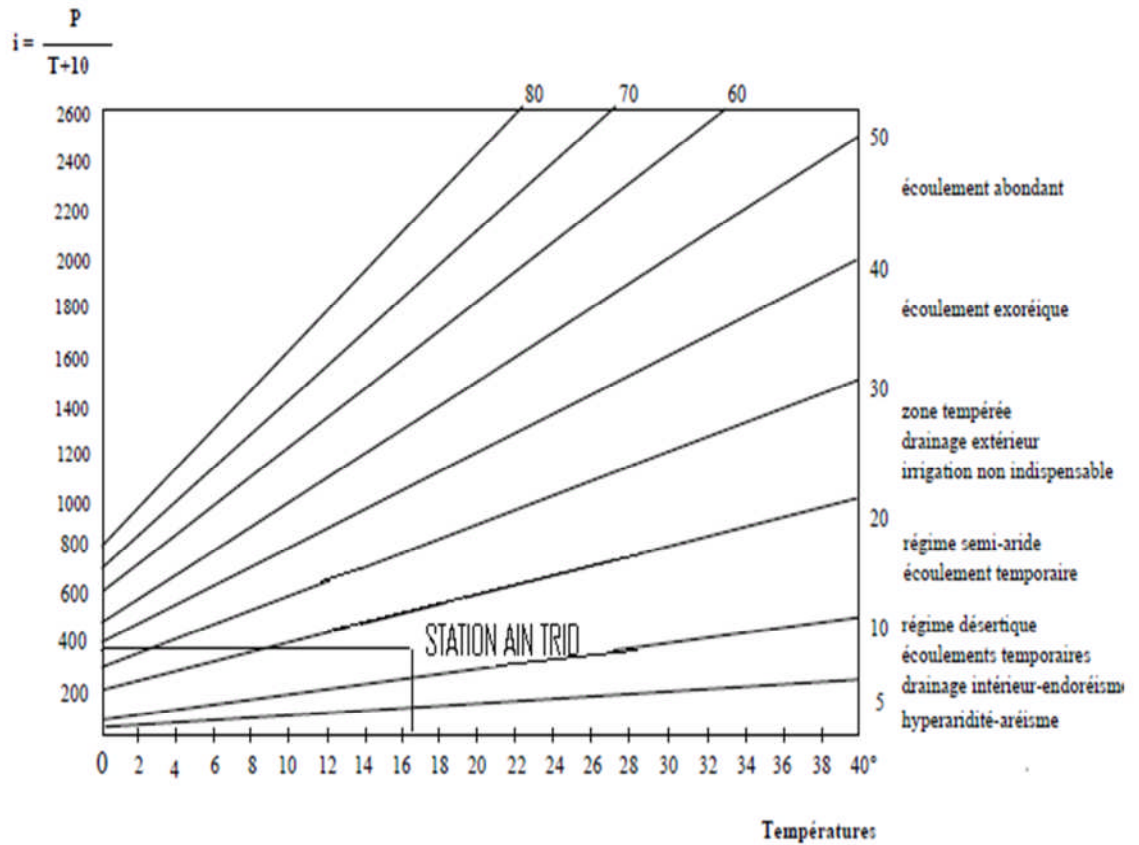


Fig.24 Abaque de DeMartonne

- Indices mensuelles de MORAL :

Il est donné par la formule suivante :

$$I_m = \frac{P_m}{\left[\left(\frac{T^2}{10}\right) - T + 20\right]}$$

MORAL a proposé quatre types de mois : sec, humide, pluvieux et aride (Tableau 27).

Pour $P > 0.1 T^2 + T + 30 \longrightarrow$ mois pluvieux (décembre ; janvier)(p)

Pour $0.1 T^2 + T + 30 > p > 0.1 T^2 - T + 20 \longrightarrow$ mois humide (février, Mars, avril).(h)

Pour $0.1 T^2 - T + 20 > p > 0.05 T^2 - T + 10 \longrightarrow$ mois sec (septembre, octobre, mai)(s)

Pour $P < 0.05 T^2 - T + 10 \longrightarrow$ mois aride (juin, juillet, aout)(a)

Tableau N°27 Indices mensuelles de MORAL

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	JU	A
P (mm)	15.7	23.4	61.2	43.6	51.2	38.4	27.1	26.8	22.7	1	1.7	2.2
T°C	21,50	18,57	12,61	10,07	9,21	10,09	12,54	14,07	17,92	22,94	25,21	25,23
I _m	0,27	1,00	2,30	2,69	2,49	2,47	2,23	1,64	0,98	0,11	0,03	0,03
	S	S	P	H	P	h	h	h	s	a	a	a

c. Climagramme d'Emberger.

$$Q_r = \frac{P}{\frac{M+m}{2}(M-m)} 1000$$

P : les précipitations annuelles moyennes en (mm) 315.2

M : Moyenne des Maxima du mois le plus chaud : $25.23+273.15=298.38 \text{ K}^\circ$

m : Moyenne des minimas du mois le plus froid : $9.21+273.15=282.36 \text{ K}^\circ$

Q_r : Quotient pluviothermique d'EMBERGER.=67.75 (fig.25)

La représentation de cette valeur du Q_r sur l'abaque (fig25) montre que notre bassin versant est situé dans un étage Bioclimatique de végétation **semi-aride à hiver chaud**.

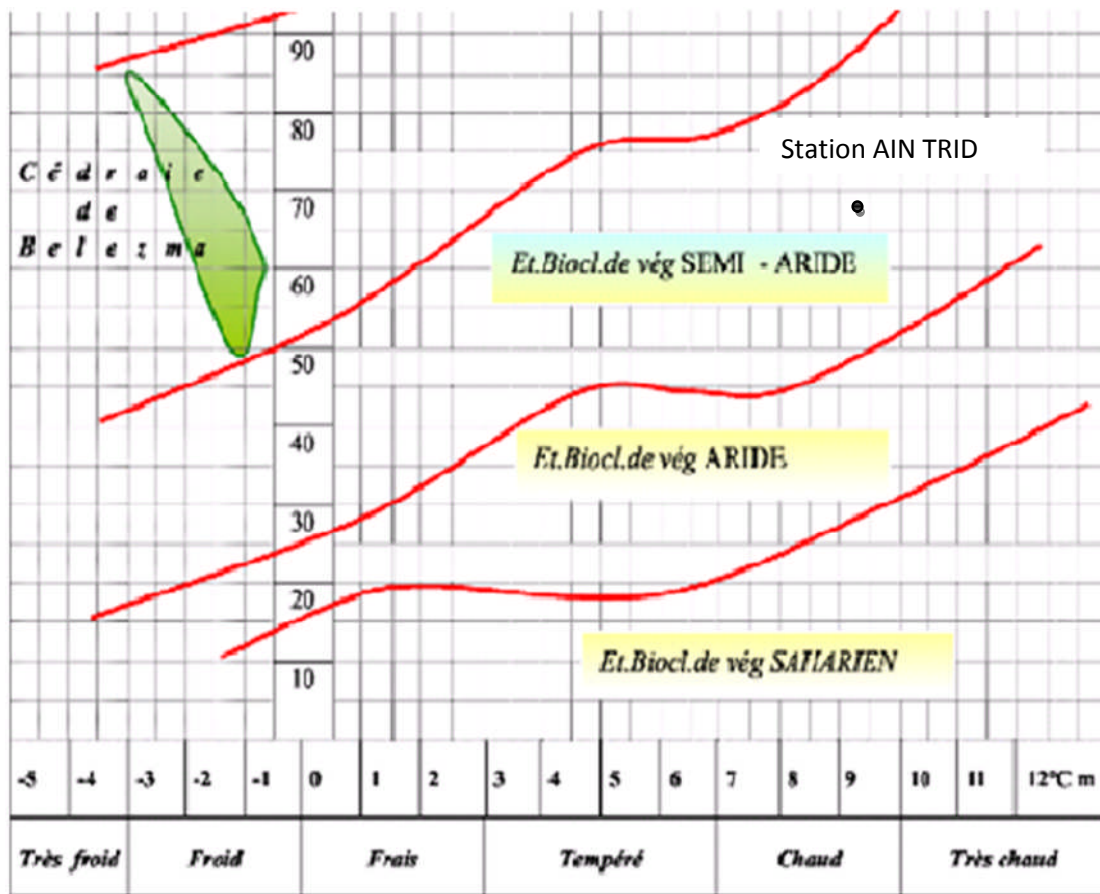


Fig. : 25 Climagramme d'Emberger Station Ain Trid 1995-2005

V. Evapotranspiration et déficit d'écoulement

L'évapotranspiration est l'effet combiné de l'évaporation et de la transpiration. L'évaporation est le passage de l'eau sous forme liquide sur une surface ou de celle-ci dans l'air, transformée en vapeur d'eau. La transpiration est le mouvement de l'eau passant des plantes dans l'air. Pour une culture, l'évapotranspiration est l'eau perdue dans l'air à partir à la fois de la surface du sol et de celle de la culture.

Le déficit d'écoulement représente essentiellement les pertes d'eau dues à l'évaporation, Il peut être estimé à l'aide de mesures ou de méthodes de calcul.

1. Formule de TURC :

Elle est donnée par la formule suivante :

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}}$$

Ou ETR : Evapotranspiration annuelle réelle (mm);

P : Précipitations moyennes annuelles (mm) 315.2 ;

T : Températures moyennes annuelles (°C) 16.66 ;

Avec $L = 300 + 25T + 0.05 T^3 = 947.7$

Donc $ETR = 313.63$ mm/an soit 99.5 % des précipitations annuelles.

2. Formule de M.COUTAGNE

Cette formule donne le déficit d'écoulement en fonction des précipitations et de la température.

$$ETR = D = P - \lambda P^2$$

Avec D : déficit d'écoulement (m/an) ;

P : Précipitations moyennes annuelles (mm) ;

$\lambda = \frac{1}{0.8 + 0.14 T}$ Où T : Température moyenne annuelle (°C)

Cette formule n'est applicable que pour P comprise entre $\frac{1}{8\lambda}$ et $\frac{1}{2\lambda}$

On calcul $\lambda = \frac{1}{0.8 + 0.14 * 16.66} = 0.32$

Ensuite on calcul $\frac{1}{8\lambda} = 0.39$

$$\frac{1}{2\lambda} = 1.56$$

Soit $P=315.2\text{mm}=0.315\text{ m}$ donc la formule n'est pas applicable pour notre station puisque $P < \frac{1}{8\lambda}$ Le déficit est donc égale aux précipitations et l'écoulement sera nul.

3. Méthode de WUNDT

L'abaque de WUNDT fig.26 permet d'estimer un déficit d'écoulement de l'ordre de 310 mm/an, soit 98.35 % des précipitations.

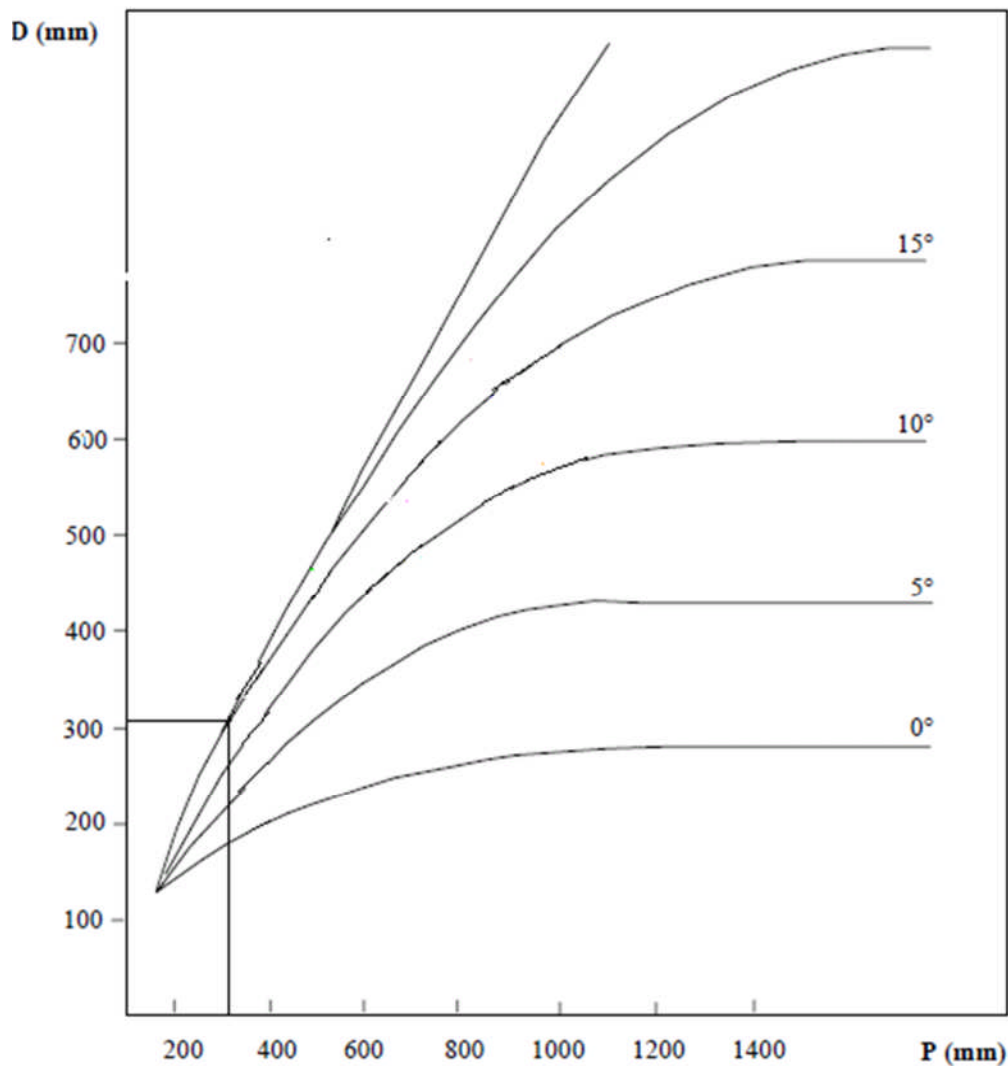


Fig.26 Abaque de Wundt

4. Abaque de P.VERDEIL :

D'après l'abaque fig.27 le déficit d'écoulement est de l'ordre de 300 mm soit 95% des précipitations annuelles totales.

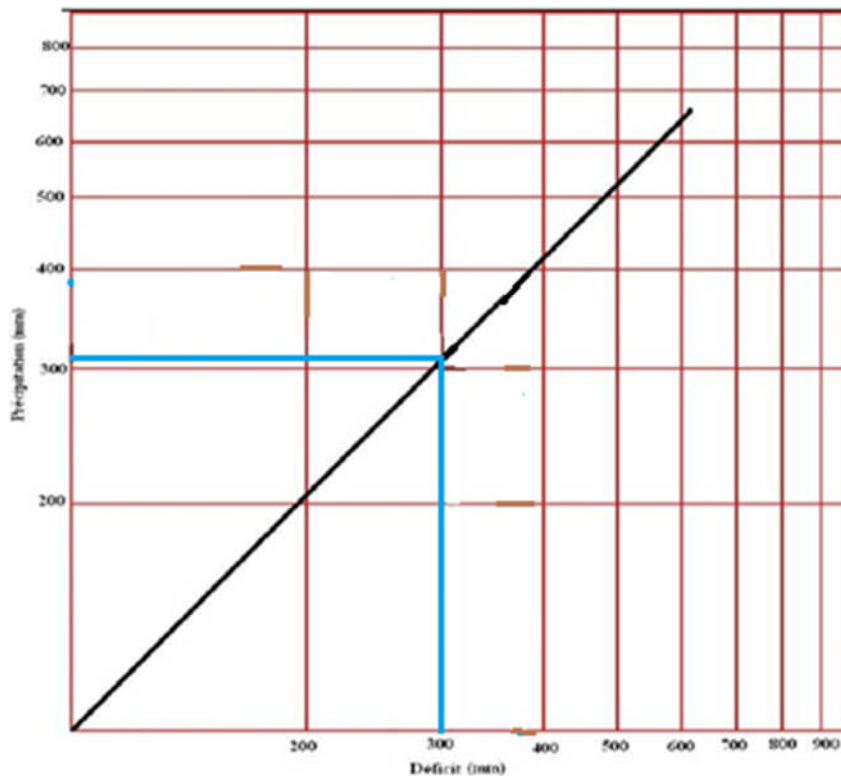


Fig.27 Abaque de VERDEIL

5. Méthode de THORNTHWAITE :

a. Evaporation potentielle :

On calcul L'ETP non corrigée pour chaque mois à l'aide de la formule suivante :

$$ETP_c = 1.6 f \left(\frac{10 * T}{I} \right)^a$$

Avec $a = 675 \cdot 10^{-9} I^3 - 771 \cdot 10^{-7} I^2 + 179 \cdot 10^{-4} I + 0.49$

T : températures moyennes mensuelles (°C) ;

I : somme des indices mensuels $i = \left(\frac{T}{5} \right)^{1.514}$

$$ETP_{NC} = 1.6 \left(\frac{10 * T}{I} \right)^a$$

L'ETP corrigé est donnée par $ETP = f ETP_{NC}$ avec f : coefficient de correction

Tableau N°28 : Evapotranspiration potentielle corrigée mensuelle et annuelle station AIN TRID

<i>Mois</i>	<i>F</i>	<i>T</i>	<i>I</i>	<i>etpNc</i>	<i>Etp (cm)</i>
<i>Jan</i>	0,88	9,20	2,52	1,941	1,708
<i>Feb</i>	0,85	10,09	2,90	2,297	1,952
<i>Mar</i>	1,03	12,53	4,02	3,411	3,514
<i>Apr</i>	1,09	14,06	4,78	4,210	4,589
<i>May</i>	1,21	17,92	6,91	6,557	7,934
<i>Jun</i>	1,21	22,93	10,03	10,286	12,446
<i>Jul</i>	1,23	25,21	11,58	12,230	15,043
<i>Aug</i>	1,16	25,22	11,59	12,239	14,197
<i>Sep</i>	1,03	21,50	9,10	9,145	9,419
<i>Oct</i>	0,97	18,56	7,28	6,991	6,781
<i>Nov</i>	0,86	12,60	4,05	3,446	2,964
<i>Dec</i>	0,85	10,06	2,88	2,285	1,942
		I	77,64		Total
		a	1,73	75,036	82,488

L'ETP corrigée annuelle est de **824.88 mm**

b. Méthode de SERRA :

SERRA propose d'évaluer l'ETP à partir de la formule suivante :

$$ETP = 1.6 \left(\frac{10 * T}{I} \right)^a f$$

Avec $I = \sum_1^{12} i$ ou $i = 0.09 T^{1.5}$

$$a = 1.6 \frac{I}{100} + 0.5$$

ETP : Évapotranspiration potentielle (mm)

T : Température moyenne annuelle en °C

I : Indice thermique annuel

i : Indice thermique mensuel.

f : coefficient de correction

Tableau 29: évapotranspiration de SERRA

<i>Mois</i>	<i>F</i>	<i>T</i>	<i>I</i>	<i>Etp (cm)</i>	<i>Etp_{NC}(cm)</i>
<i>Jan</i>	0,88	9,20	2.51	1.92	2.19
<i>Feb</i>	0,85	10,09	2.88	2.18	2.57
<i>Mar</i>	1,03	12,53	3.99	3.84	3.73
<i>Apr</i>	1,09	14,06	4.74	4.95	4.55
<i>May</i>	1,21	17,92	6.82	8.37	6.92
<i>Jun</i>	1,21	22,93	9.88	12.82	10.60
<i>Jul</i>	1,23	25,21	11.39	15.36	12.49
<i>Aug</i>	1,16	25,22	11.39	14.48	12.49
<i>Sep</i>	1,03	21,50	8.97	9.76	9.48
<i>Oct</i>	0,97	18,56	7.19	7.13	7.36
<i>Nov</i>	0,86	12,60	4.02	3.24	3.77
<i>Dec</i>	0,85	10,06	2.87	2.16	2.55
		I	76.65	Total	
		a	1.726	86.24	78.7

L'ETP corrigée annuelle est de **862.4 mm**

c. Estimation de la réserve utile

On utilise la méthode de HALLAIRE pour estimer la RU à l'aide de la formule suivante :

$$R_u = \frac{C - F}{100} h D + 30 \text{ mm}$$

Avec : R_u : réserve d'eau utile ;

C : capacité au champ ;

F : capacité au point de flétrissement ;

h : profondeur du sol en mm ;

D : densité apparente du sol =1 ;

30 mm : correspond à l'enracinement capillaire.

En prend $C - F = 20\%$ sol argilo limoneux

Dans notre bassin versant $h=300 \text{ mm}$

Donc **$R_u = 90 \text{ mm}$**

d. Evapotranspiration réelle :

La période où se constitue les réserves, c'est le moment où $P > \text{ETP}$. Dans notre bassin la période commence à partir du mois de Novembre.

Tableau N°30 valeurs P et ETP

	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	JU	A	annuel
P (mm)	15.7	23.4	61.2	43.6	51.2	38.4	27.1	26.8	22.7	1	1.7	2.2	315.2
ETP (mm)	94.19	67.81	29.64	19.42	17.08	19.52	35.14	45.89	79.34	124.46	150.43	141.97	824.88

Pour le calcul de l'ETR deux cas peuvent se présenter :

- Si $P > ETP$ donc $ETR = ETP$ l'excédent des précipitations sur l'ETP sera emmagasiné dans l'humidité du sol dont il augmente les réserves jusqu'à saturation.
- Si $P < ETP$
 - ✓ $ETR = ETP$ aussi longtemps que les réserves d'eau seront capables de combler la différence entre ETP et P.
 - ✓ Lorsque la réserve deviendra insuffisante on a $ETR < ETP$ et il y aura apparition du déficit agricole.

Les résultats de calcul de l'ETR sont donnés dans le tableau 31

e. Ruissellement :

Il est donné par la formule de TIXERONT et BERKALOFF :

$$R = \frac{P^3}{3(ETP)^2}$$

Avec P : précipitations moyennes annuelles en (m) ;

ETP : évapotranspiration potentielle en (m).

$$R = \frac{(0.3152)^3}{3(0.8248)^2} = 0.015 \text{ m} = 15 \text{ mm soit } 4.7 \% \text{ des précipitations.}$$

f. Bilan hydrique de THORNTHWAITE :

Tableau N°31 : valeurs du bilan hydrique de Thornthwaite

	N	D	J	F	M	A	M	J	JU	A	S	O	Total
P (mm)	61.2	43,6	51.2	38.4	27.1	26.8	22.7	1	1.7	2.2	15.7	23.4	315.2
ETP (mm) corrigé	29.64	19.42	17.08	19.52	35.14	45.89	79.34	124.46	150.43	141.97	94.19	67.81	824.88
P-ETP (variation de la réserve) (mm)	31.56	24.18	34.12	18.88	-8.04	-19.09	-56.64	-123.46	-148.73	-139.77	-78.49	-44.41	
RFU (mm)	23.85	58.39	90	90	90	86.27	40.35	0	0	0	0	0	
ETR (mm)	29.64	19.42	17.08	19.52	35.14	45.89	79.34	41.35	1,7	2.2	15.7	23.4	330.35
Déficit (mm) agricole [ETP-ETR]								123.46	148.73	139.77	78.49	44.41	534.86
Excédent (mm)	0	0	26.38	18.88									45.26

e. évapotranspiration d'Oudin :

L'évapotranspiration est un phénomène extrêmement complexe, faisant intervenir des paramètres aérodynamiques, énergétiques et biologiques. Ainsi, parmi les termes du cycle de l'eau, c'est sans doute le plus difficile à quantifier. A l'échelle qui nous intéresse, celle du bassin versant, ce phénomène n'est pas directement mesurable et il est donc souvent représenté de manière simplifiée dans les modèles hydrologiques, notamment dans les modèles pluie-débit.

Dans le chapitre IV modélisation pluie-débit par le GR nous avons utilisés l'évapotranspiration potentielle d'ODUN basées sur le rayonnement et la température qui a été développée avec des données lysimétriques à Coshocton, dans l'Ohio (McGuinness et Bordne, 1972) et s'écrit comme suit :

$$ETP = \frac{R_e T_a + K_2}{\lambda \rho K_1}$$

où ETPest le taux d'évapotranspiration potentielle (mm/jour), R_e est un rayonnementextraterrestre(MJ/m²/jour),ne dépendant que dela latitude deJulianjour, λ est leflux de chaleur latente(prise égale à 2,45MJ kg-1), pest la densitéde l'eau(kgm-3)et Test la températuremoyenne quotidienne(° C), qui estdoncune fonction unique de Julianjour pour unendroit donné. K_1 et K_2 sontde

nouvelles constantes pour régler sur l'échantillon pour chaque bassin et modèle pluie-débit.

K_1 compris entre (90 et 115) pour le GR4j ;

K_2 compris entre (5 et 6).

VI. Bilan hydrologique

Les différentes valeurs de l'évapotranspiration obtenues par l'emploi des différentes formules sont rassemblées dans le tableau suivant :

Tableau N°32

Paramètres	Méthode	BASSIN VERSANT
ETP (mm)	THORNTHWAITE	825
	SERRA	862
ETR (mm)	THORNTHWAITE	330
	TURC	313
	WUNDT	310

Le bilan de l'eau global a pour but principal d'établir une équation d'équilibre entre les apports et les pertes qui influent directement sur la variation des réserves. Ainsi, pour déterminer le bilan de la région d'étude il est indispensable d'évaluer ses composantes.

Le calcul du bilan hydrologique relatif à la période 1995-2005 repose sur l'application de l'équation suivante :

$$P = E + R + I$$

Dans le tableau suivant on regroupe les éléments du bilan hydrologique selon les différentes méthodes utilisées dans notre bassin :

Tableau N°33: évapotranspiration des différentes formules utilisées

Méthodes	Déficit	Ecoulement	Ruissellement	Infiltration
TURC	313 mm/an 99.3 % de P	2 mm/an 0.63% de P		
WANDT	310 mm/an 98.41 % de P	5 mm/an 1.58% de P		
VERDEIL	300 mm/an 95.23% de P	15 mm/an 4.76 % de P		
THORNTHWAITE	330 mm/an 104.76 % de P			

Conclusion :

La région d'étude joint d'un climat semi-aride caractérisé par un hiver chaud et sec. La saison humide s'étale depuis la mi-octobre jusqu'à la mi-Mai et la saison sèche s'étend sur le restant de l'année. La lame d'eau précipitée sur l'ensemble du bassin versant a été estimée à 352 mm pour la période 1964/2009 et la température moyenne annuelle est de 16.66 °C et ce pour la période 1995/2005.

L'évapotranspiration réelle a été estimée à 330 mm soit 104.76% des précipitations par la méthode de THORNTHWAITE.

Selon THORNTHWAITE il n'y a pas de d'écoulement, et par conséquence Pas de ruissellement et pas d'infiltration.

Après étude du bilan hydrologique par les différentes méthodes on constate que le déficit d'écoulement est très important ; il varie de 95% à plus de 100% des Précipitations.

Chapitre III

Hydrologie du Bassin Versant de l'oued SARNO

Hydrologie du bassin versant de l'oued SARNO

I. Introduction

Le régime des débits d'un cours d'eau durant une période déterminée est le seul paramètre du bilan hydrologique d'un bassin qui puisse être mesuré dans son ensemble avec une bonne précision ; les autres éléments de ce bilan, tels que les précipitations, l'évaporation, etc..., ne peuvent être qu'estimés à partir d'échantillons prélevés en divers points du bassin ou déduits de formules hydrologiques toujours assez approximatives.

L'écoulement des cours d'eau, dépend essentiellement du régime des précipitations qui dépend du climat de la région.

Pour cette étude on dispose des données de débit mensuel et annuel pour la période (1953/1954-1973/1974) et journalier période (1963-1973) observés au niveau de la station aval de l'oued SARNO.

II. Etude des débits moyens (1953/1954-1973/1974):

1. Variations interannuelles des débits :

Les débits moyens annuels mesurés au niveau de la station hydrométrique de coordonnée 35°17' 43'' N et 0°35'31'' E située au niveau du barrage sarno concernant la période 1953/1954-1973/1974 sont dressées dans le tableau 34 :

Tableau N°34 valeurs des débits moyens annuels

Années	1953	1954	1955	1956	1957	1958	1959	1960	1961	1962	1963	1964
Débit (m ³ /s)	0.86	0.38	0.25	0.07	0.06	0.19	0.15	0.19	0.36	0.29	0.42	0.77
Années	1965	1966	1967	1968	1969	1970	1971	1972	1973			
Débits (m ³ /s)	0.57	0.36	0.41	0.41	0.32	0.16	0.5	0.98	0.96			

Moyenne des Modules interannuels = 0.41 m³/s

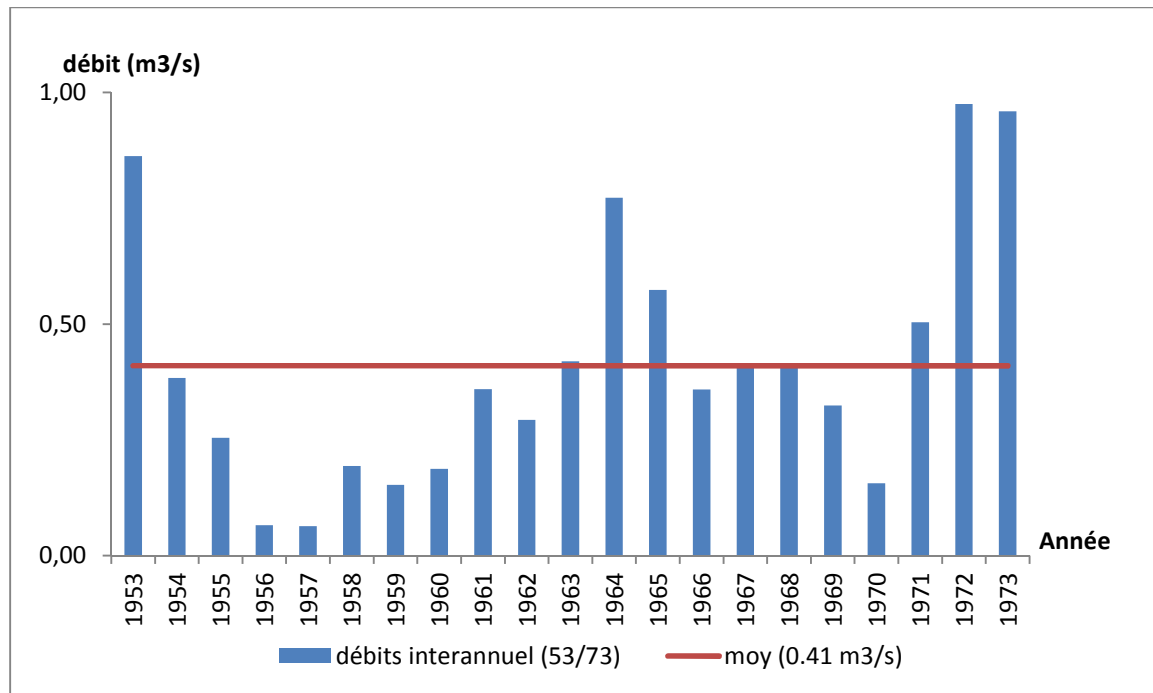


Fig.28 variation interannuel des débits mesurés (1953-1973)

Sur la courbe de variation interannuelle des débits (fig. 28), 5 années sur vingt les modules sont supérieurs à la moyenne, le maximum de $0.98 \text{ m}^3/\text{s}$ est enregistré en 1973, le minimum de $0.07 \text{ m}^3/\text{s}$ en 1957.

2. Etude statistique des débits annuels:

Tableau N°35 : paramètres statistiques de la série des débits moyen annuels de l'oued SARNO

Paramètres	Formules	Oued SARNO
Moyenne (m^3/s)	$\bar{Q} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_i$	0.41
Variance	$\delta^2 = \frac{1}{n} (\bar{Q}^2 - Q^2)$	0.08
Ecart type (m^3/s)	$\sigma = \sqrt{\delta^2}$	0.27
C_v	$C_v = \frac{\sigma}{\bar{Q}}$	0.65

$C_v = 0.65 > 0.5$ on suggère un ajustement à la **loi log Normale**

✚ Ajustement des débits annuels à la loi log Normal

❖ Test graphique :

$\ln Q$: Le débit en fonction logarithmique (népérien);

\bar{Q}_{\ln} : La moyenne des $\ln Q = -1.12$

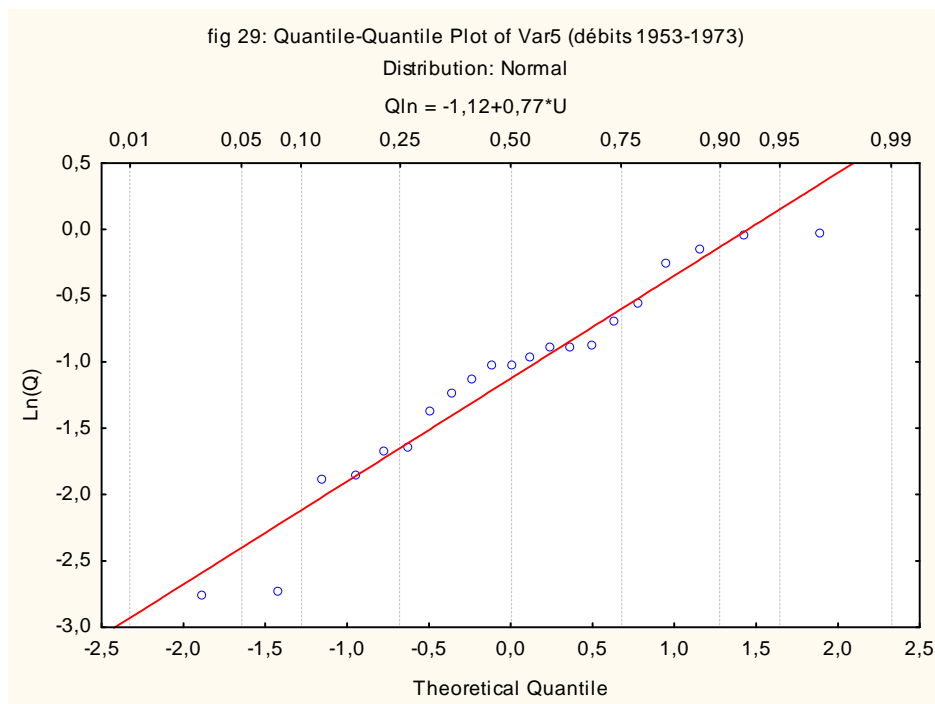
σ_{\ln} : L'écart type de $\ln Q = 0.77$

La droite d'HENRY est donnée par : $Q_{\ln} = -1.12 + 0.77 U$

Pour $F_1=0.5 \rightarrow U=0 \rightarrow \ln Q = -1.12$

$F_2=0.9 \rightarrow U=1.28 \rightarrow \ln Q = -0.13$

Les points de coordonnées (0.5 ; -1.12) ; (0.9 ; -0.13) nous permettent de tracer la droite d'HENRY (fig.29)



Hydrologie du bassin versant de l'oued SARNO

❖ Test numérique de χ^2 :

Tableau 36 : test de χ^2

Nombre De classe	Limite De classe	Bornes standardisés	Fréquences Cumulés à la borne supérieure	Fréquences Simple théorique	Effectif Observé (n _i)	Effectif Théorique (np _i)	$\frac{(n_i - np_i)^2}{np_i}$
1	< 0.19	<-0.81	0.2119	0.2119	6	4.44	0.54
2	[0.19 ; 0.36]	[-0.81 ; - 0.18]	0.4286	0.2167	5	4.55	0.044
3	[0.36 ; 0.50]	[-0.18 ; 0.33]	0.6293	0.6293	5	4.21	0.148
4	>0.50	>0.33	1	0.3707	5	7.78	0.99

$$\chi^2_c = 1.72$$

Pour un seuil de probabilité de 5% et un degré de libertés ddl=4-2-1=1

$\chi^2_t = 3.84$ le $\chi^2_c < \chi^2_t$ donc l'ajustement à une loi log normale est vérifié.

❖ Calcul des débits moyens annuels pour des récurrences données :

$$Q_{ln} = -1.12 + 0.77 U$$

A partir de cette équation, on peut calculer un certain nombre de débit

Pour T=10 ans On a $T = \frac{1}{1-F} \rightarrow F_i = 0.9$ d'où U=1.28

Pour T=100 ans On a $T = \frac{1}{1-F} \rightarrow F_i = 0.99$ d'où U=2.32

Pour T=500 ans On a $T = \frac{1}{1-F} \rightarrow F_i = 0.998$ d'où U=2.88

Pour T=1000 ans On a $T = \frac{1}{1-F} \rightarrow F_i = 0.999$ d'où U=3.29

Tableau 37 : débits moyens annuels pour des récurrences données

Station		Barrage Sarno
Débits décennales (m ³ /s)	U=1.28	0.87
Débits centenaires (m ³ /s)	U=2.32	1.94
Débits cinquantenaires (m ³ /s)	U=2.88	2.99
Débits millénaires (m ³ /s)	U=3.29	4.10

3. Débits moyens mensuels:

**Tableau N°38 : Les valeurs des débits moyens mensuels de l'oued SARNO
(1953-1973)**

Mois	sep	Oct	nov	déc	jan	fév	Mar	Avr	Mai	jun	jul	Août
Q (m³/s)	0.13	0.19	0.25	0.37	0.46	0.68	0.61	1.10	0.45	0.34	0.24	0.10

On observe sur la courbe des débits mensuels (fig.30) une augmentation de débit à partir du mois de septembre jusqu'à avril atteignant leur maximum de 1.1 m³/s, cela correspond à la période des précipitations. Ensuite on remarque une diminution du débit jusqu'au mois d'août où il atteint le minimum de 0.10 m³/s.

Si on regarde l'évolution des précipitations mensuelles fig.13 et 14 on constate que les pluies sont importante depuis novembre alors que les débits augmente au mois de avril cela veut dire qu'il y'a des écoulements souterraines qui apparaissent dans ce mois, ou que les pluies qui engendre ce débit d'avril ne sont pas enregistrés au niveau des deux stations d'Ain Trid et Tessala viennent de plus loin.

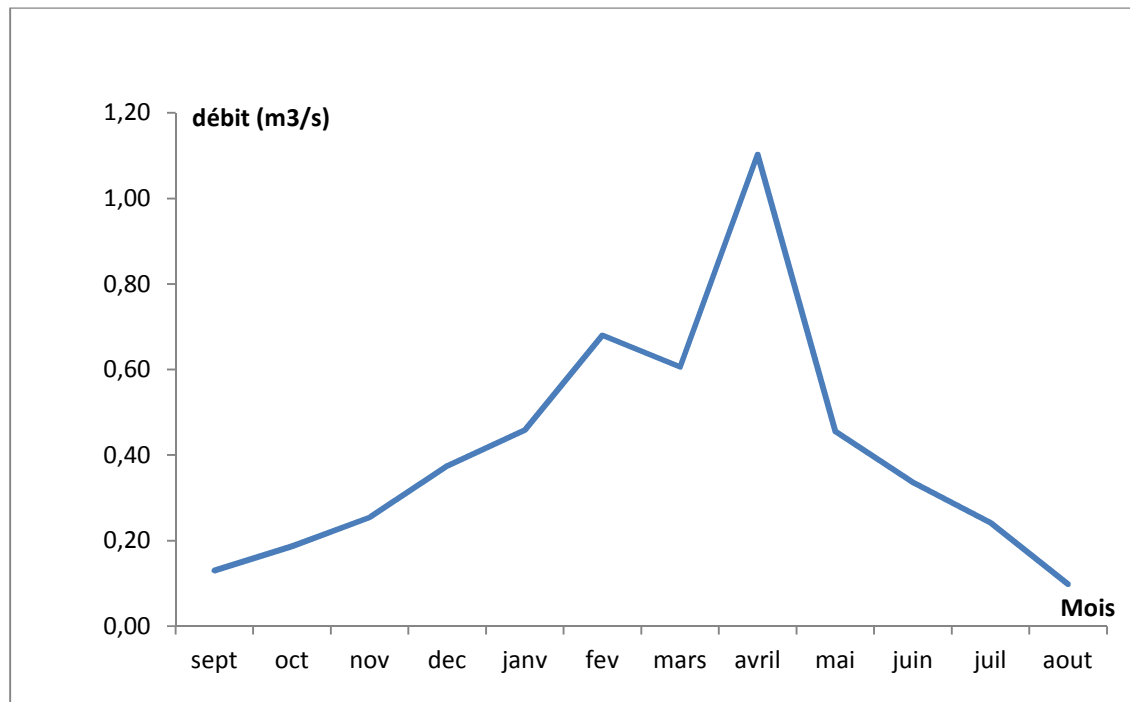


fig.30 Courbe des débits mensuel (1953-1973)

Hydrologie du bassin versant de l'oued SARNO

4. Le coefficient mensuel des débits (1953-1973):

Tableau N°39: valeurs des coefficients mensuels des débits de l'oued SARNO (1953-1973)

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
C.M.D	0.32	0.46	0.62	0.91	1.12	1.66	1.48	2.69	1.11	0.82	0.59	0.24

Module = $0.41 \text{ m}^3/\text{s}$

D'après le calcul du coefficient mensuel, on remarque que pour l'oued SARNO, 8 mois sur 12 le débit mensuel est supérieur au module annuel (fig.31).

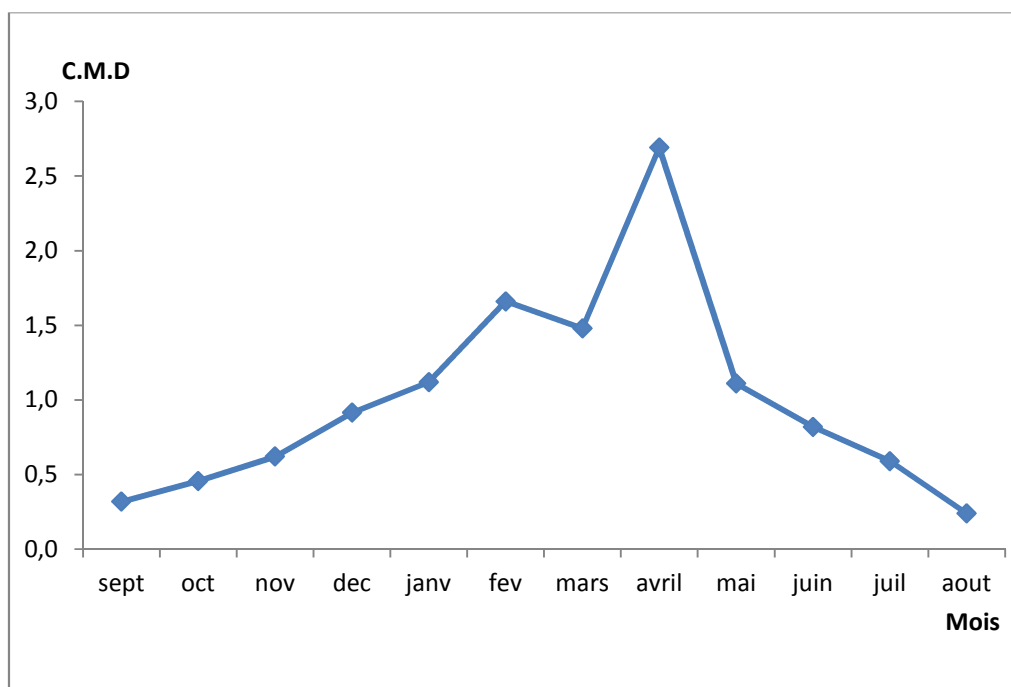


Fig.31 le coefficient mensuel des débits de l'oued SARNO (1953-1973)

5. Etude de la courbe des débits journaliers : (fig. 32).

La courbe des débits moyens journaliers période (1962-1973) (fig.32) montre une augmentation des débits à partir du mois de septembre jusqu'en mai où Les forts débits atteignent leur maximum de $0.735 \text{ m}^3/\text{s}$. Ensuite apparait une diminution des débits à partir de la mi-juin jusqu'à fin août où les précipitations sont très faibles à nulles.

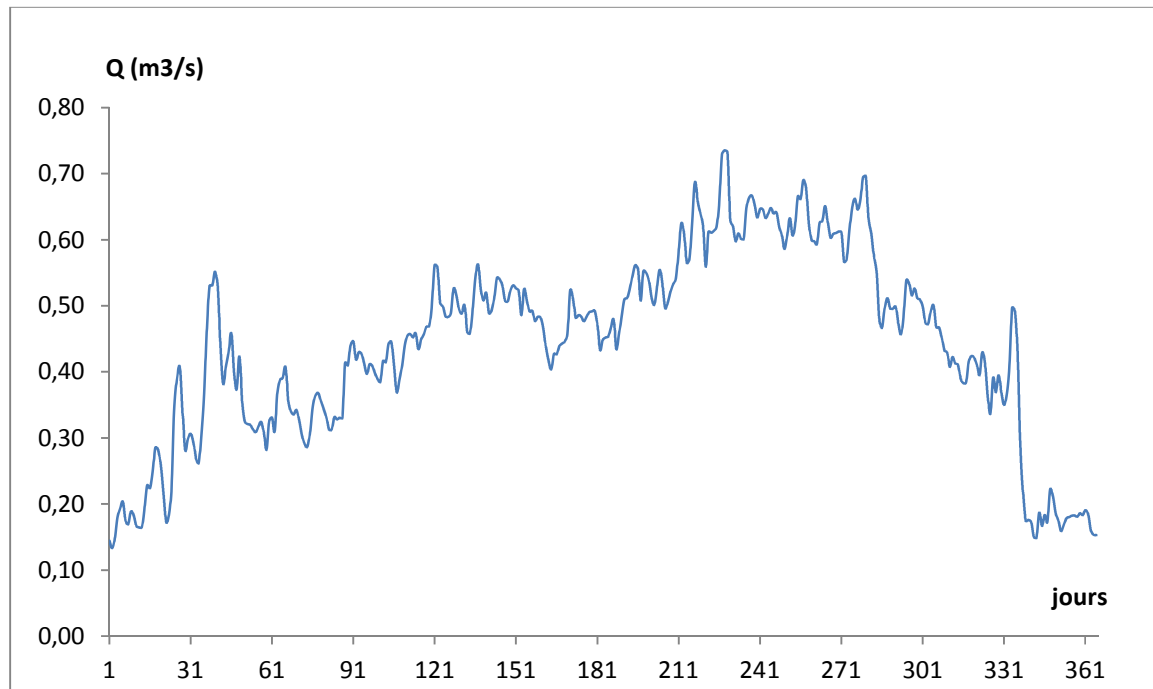


fig.32: Courbe des débits moyens journaliers (1962-1973)

6. Etude des débits classés :

La courbe des débits moyens journaliers classés (fig.33) permet de déduire les débits caractéristiques regroupés dans le tableau 40

Débit caractéristique maximum (DCM) : le débit dépassé 10 jours par an ;

Débit moyen caractéristique ou de 6 mois (DC6) : le débit dépassé 6 mois par an ;

Débit caractéristique de 1,3 ou 9 mois (DC1 ; DC3 ; DC9) : les débits dépassés respectivement 1,3 ou 9 mois par an.

Débit caractéristique d'étiage (DCE) débit dépassé 355 jours par an.

Tableau N° 40 débits caractéristiques de l'oued SARNO (1962-1973)

Débits caractéristiques moyens	DCM	DC1	DC3	DC6	DC9	DCE
Débit m ³ /s	0.666	0.633	0.537	0.461	0.356	0.165

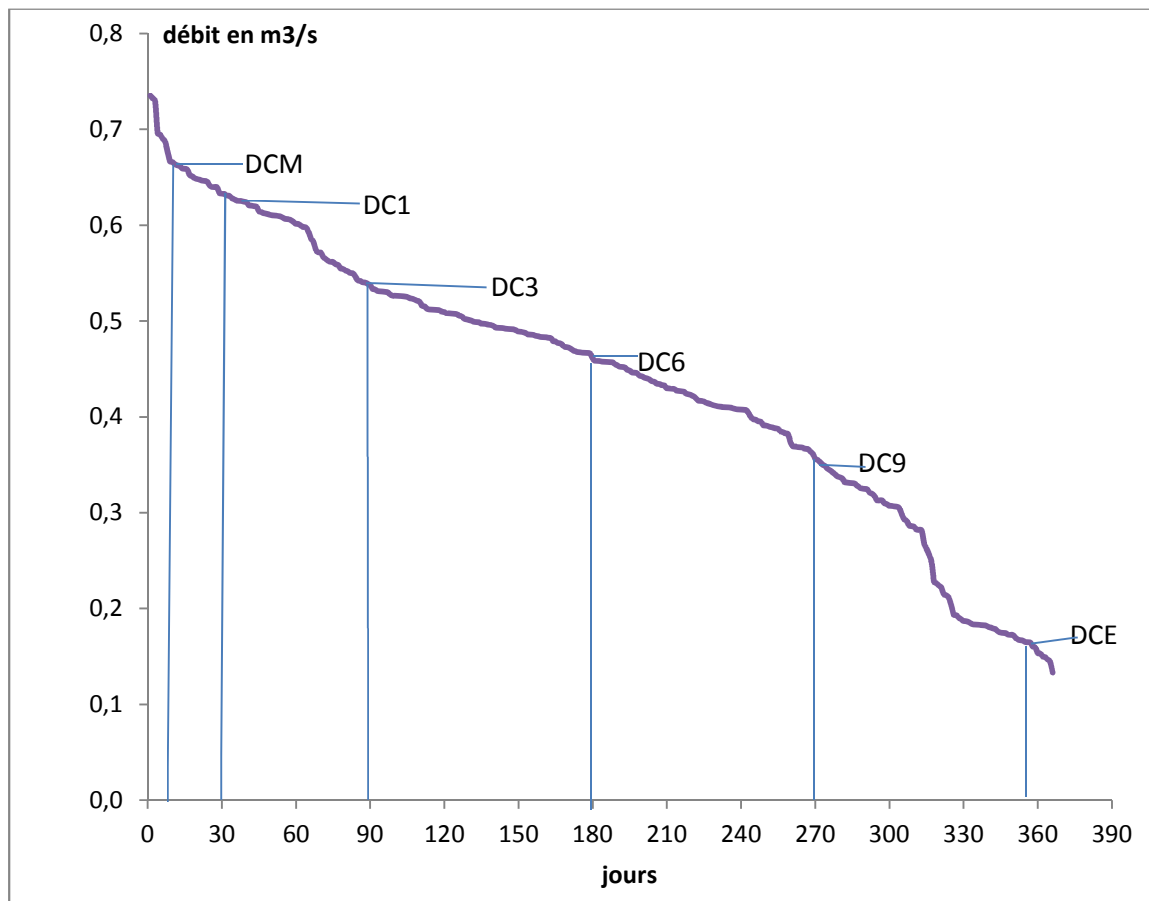


Fig. 33 courbe des débits classés (1962-1973)

7. Etude des débits maximum instantanés :

a. Introduction :

L'intérêt économique de la prédétermination du débit maximum probable des crues d'un cours d'eau, en un point donné, est évident en raison des effets destructifs bien connus de ces événements hydrologiques et de la nécessité de calculer certains ouvrages d'art.

b. La répartition des crues pour la période d'étude (1963-1973)

La représentation des 89 crues enregistrées entre (1963-1973) (tableau annexe) sous forme d'hydro gramme $Q=f(t)$ nous a donné en général des formes d'une courbe en cloche dissymétrique.

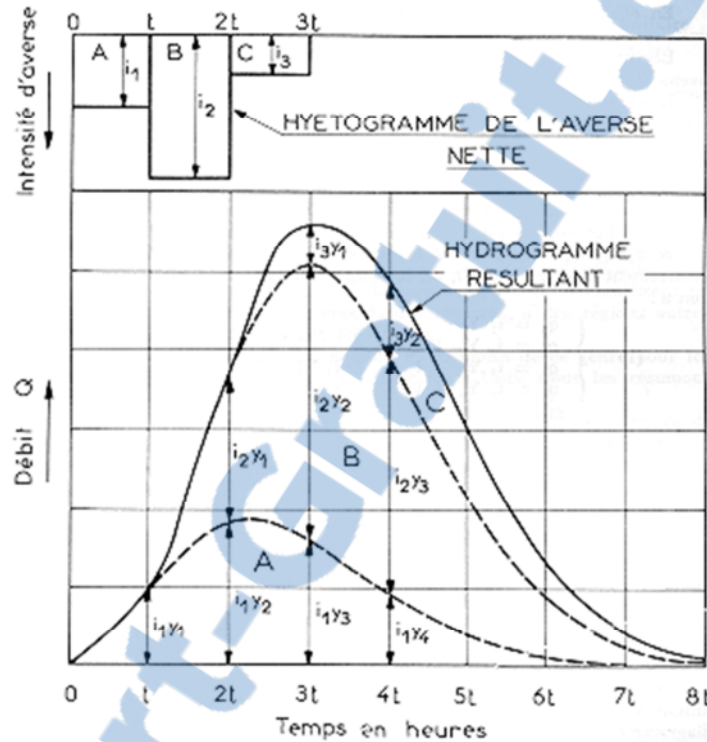


Fig.34 hydro gramme de crue

- ✚ La partie correspondante à la montée de la crue est appelée courbe de concentration.
- ✚ La partie de la diminution progressive du débit est appelée la décrue.
- ✚ La partie décroissante du débit au bout d'un temps assez long pour que le cours d'eau n'est plus alimenté que par les eaux souterraines est appelée la courbe de tarissement.

c. Volume de chaque crue :

Pour chaque crue, on trace l'hydrogramme qu'on décompose en trois parties :

- ✚ La courbe de montée de crue (courbe de concentration) est représentée par une fonction exponentielle de la forme $Q_T = Q_{01} e^{\alpha_1 T}$

Hydrologie du bassin versant de l'oued SARNO

✚ La courbe de décrue est représentée par une fonction exponentielle de la forme $Q_T = Q_{02}e^{-\alpha_2 T}$

✚ La courbe de tarissement est représentée par une fonction exponentielle de la forme $Q_T = Q_{03}e^{-\alpha_3 T}$

Q_T : Débit à l'instant T

Q_0 : Débit initial

T : temps en heures

e : base de log népérien

α_1 : Coefficient de la montée de la crue

α_2 : Coefficient de la décrue

α_3 : Coefficient de tarissement.

Le volume des composantes de chaque crue est donné par l'intégrale de ces fonctions exponentielles :

$$V = \frac{Q_0}{\alpha} * 3600 \text{ T (m}^3\text{)}$$

T : temps en heures

Le volume total de chaque crue est donné par la somme des différentes composantes (tableau 41)

Tableau 41 volumes totaux des crues enregistrées (1963-1973)

Crue N°	Dates des crues	Débits Max (m ³ /s)	Montée de crue Hm ³	Décrue Hm ³	Tarissement Hm ³	Volume total de la crue Hm ³
1	29 ; 30 Mai...1juin 1963	1.036	0,8760	0,1320	0,4360	1,4440
2	24 juin 1963	1.252	0,1240	0,0940	0,0580	0,2760
3	26 ; 27 juin 1963	1.36	0,7670	0,3290	0,0155	1,1115
4	29 ; 30 ; 31 juillet...01 aout 1963	1.36	0,0050	0,2430	0,0233	0,2713
5	15 ; 16 septembre 1963	1.141	0,0010	0,0045	0,0024	0,0079
6	25 ; 26 septembre 1963	0.46	0,0040	0,0300	0,0268	0,0608
7	27 ; 28 ; 29 ; 30 septembre 1963	0.554	0,0234	0,0516	0,1139	0,1889
8	04 Mars 1964	0.718	0,0468	0,3703	0,4257	0,8428
9	26 ; 27 ; 31 mars...1 avr..06 mai 1964	1.782	0,9436	2,7315	1,6801	5,3552
10	01 ; 02 ; 03 juillet 1964	1.252	0,0809	0,3140	0,8120	1,2069
11(1)	22 ; 23 ; 24 juillet 1964	1.36	0,0360	0,1100		0,1460
11(2)	24 ; 25 ; 26 juillet 1964	1.36	0,0640	0,2810		0,3450
11(3)	26 ; 27 juillet 1964	1.072	0,1990	0,0930	0,6000	0,8920
11(4)	27 ; 28 juillet 1964	1.108	0,0310	0,0790		0,1100
11(5)	28 ; 29 ; 30 juillet 1964	1.288	0,0330	0,5100		0,5430
12	01 ; 02 ; 03 aout 1964	1.394	0,2480	0,2320		0,4800
13	03 septembre 1964	1.072	1,4090	1,9054		3,3144
14	25 septembre 1964	0.786	0,0604	0,1201	0,0392	0,2197
15	23.....31 octobre 1964	1	0,0078	0,0890		0,0968
16	04 novembre 1964	0.554	0,0110	0,0240		0,0350
17	07.....08 novembre 1964	0.37	0,0073	0,0630		0,0703
18	14 novembre 1964	0.49	0,0197	0,2590		0,2787

Hydrologie du bassin versant de l'oued SARNO

19(1)	19 décembre 1964	0.37	0,0800	0,0640		0,1440
19(2)	20 décembre 1964	1	0,1610	0,4840		0,6450
20	26 ; 27 décembre 1964	0.86	0,1110	0,6340		0,7450
21(1)	05 ; 08 janvier 1965	0.928	0,0820	0,3560		0,4380
21(2)	08 ; 11 janvier 1965	1.072	0,1240	0,0950		0,2190
21(3)	14 ; 20 janvier 1965	1.288	0,2540	0,4250		0,6790
21(4)	21 janvier ; 11 février 1965	1.496	0,0180	8,5800		8,5980
22(1)	01.....15 mars 1965	1	1,4270	0,1440		1,5710
22(2)	15 ; 16 mars 1965	1.216	0,1190	4,1360		4,2550
23(1)	01...05 avril 1965	1.288	0,8000	0,1040		0,9040
23(2)	05....08 avril 1965	0.928	0,0860	0,0720		0,1580
23(3)	08....11 avril 1965	1.22	0,1030	0,2080		0,3110
23(4)	11....13 avril 1965	1.462	0,0450	0,2480		0,2930
23(5)	13 avril.....07 mai 1965	0.725	0,7380	4,2230		4,9610
24	01.....24 juin 1965	1.43	0,6940	4,4070	9,0900	14,1910
25(1)	29 ; 30 juin 1965	1.324	0,3310	0,1480		0,4790
25(2)	30 juin.....02 juillet 1965	1.288	0,3890	0,1240		0,5130
26	03.....26 juillet 1965	1.602	5,0364	0,9040	11,0952	17,0356
27	07.....11 octobre 1965	1.988	0,6120	0,7730		1,3850
28	14.....25 octobre 1965	1.462	0,2140	0,7460	1,8430	2,8030
29	29 octobre...13 novembre 1965	1.89	0,5904	1,1986	6,0138	7,8028
30	12...31 janvier 1966	1.39	0,2200	10,4100		10,6300
31	02...08 avril 1966	0.892	0,1099	0,1698	0,0573	0,3370
32	13....22 mai 1966	0.964	0,0115	0,6332		0,6447
33(1)	25 ; 26 mai 1966	0.82	0,0570	0,0760		0,1330
33(2)	26....29 mai 1966	0.928	0,0370	0,1800		0,2170
33(3)	29.....31 mai 1966	1	0,0400	1,3960		1,4360
34	02...07 juin 1966	0.856	0,0452	0,1037	0,4071	0,5560
35	08....19 juin 1966	1.324	0,0331	0,2589	0,4809	0,7729
36	21..30 juin 1966	0.718	0,0011	0,0257	0,0058	0,0326
37	08...25 septembre 1966	0.141	0,0044	0,1272	0,0080	0,1396
38	29 septembre...01 octobre 1966	0.55	0,0015	0,0926	0,0608	0,1549
39	06....27 octobre 1966	0.786	0,2000	0,3250	2,8652	3,3902
40	28 oct.....14 novembre 1966	1.71	0,9612	2,4595	0,0653	3,4860
41	15 novembre 1966	0.752	0,2005	0,7910		0,9915
42	13.....21 avril 1967	0.65	0,0461	0,3884	0,5063	0,9408
43	23 avril 1971	0.82	0,0068	0,1170		0,1238
44(1)	26 avril 1971	0.684	0,0680	0,0540		0,1220
44(2)	26....29 avril 1971	0.684	0,4180	0,1120		0,5300
44(3)	01....05 mai 1971	0.786	0,3090	0,5790	0,2970	1,1850
45	08....15 mai 1971	0.82	0,1430	1,0070		1,1500
46	14....17 juillet 1971	0.928	0,0044	0,2010		0,2054
47	29 juillet...08 aout 1971	0.59	0,0007	0,0913	0,0101	0,1021
48	18.....22 septembre 1971	0.65	0,0530	0,0789	0,0177	0,1496
49	23.....29 septembre 1971	0.684	0,0086	0,2618	0,1875	0,4579
50	07 ; 08 octobre 1971	0.786	0,0163	0,0850		0,1013
51	10 octobre 1971	0.49	0,1188	0,0301	0,0395	0,1884
52	31 oct ; 01 novembre 1971	0.34	0,0480	0,0956		0,1436
53(1)	09...11 novembre 1971	0.786	0,0189	0,0445		0,0634
53(2)	11....14 novembre 1971	0.586	0,0266	1,0580		1,0846
53(3)	14....20 novembre 1971	0.586	0,0970	0,5680		0,6650
54	26....30 novembre 1971	0.65	0,0666	0,0669		0,1335
55	04 ; 05 décembre 1971	0.752	0,0483	2,6572	0,1458	2,8513
56	16;17 ;18 janvier....13 fév 1972	0.718	0,7580	1,8750	4,6755	7,3085
57	16 février....02 mars 1972	1	0,1740	0,8964		1,0704
58	04.....11 mars 1972	0.843	0,0620	0,9470		1,0090
59	01....10 mai 1972	0.59	0,5990	0,0099	0,1480	0,7573
60	01....13 juin 1972	0.94	0,3406	0,7880		1,1285

Hydrologie du bassin versant de l'oued SARNO

61	27 juin 1972	0.91	0,5700	1,0270		1,5970
62	12 ;13 ;14 aout 1972	0.622	0,0264	0,2346	0,5338	0,7948
63	04 septembre 1972	0.78	0,5832	0,3699	1,3910	2,3441
64(1)	21.....24 septembre 1972	0.47	0,0710	0,0860		0,1570
64(2)	24 ; 25 septembre 1972	0.47	0,3590	0,4640		0,8230
65(1)	09 ;10 aout 1973	0.72	0,0559	0,0891		0,1450
65(2)	10...13 aout 1973	0.717	0,1390	0,3230		0,4620
65(3)	13 ; 14 aout 1973	0.653	0,2350	0,0519		0,2869
65(4)	14.....23 aout 1973	0.56	0,094	0,623		0,717

On remarque que la crue N°26 du 3 au 26 juillet 1965 a donné le plus important volume total de 17 Hm³ ; alors que le plus faible volume est celui de la crue N°5 du 15 au 16 septembre 1963 de 0.079 Hm³.

Le volume total moyen de ces 89 crues enregistrées durant la période 63-73 est de 1.54 Hm³.

d. Volumes annuels des crues :

Le tableau 42 nous montre les volumes annuels des crues de la période d'étude.

Tableau N°42 : Volumes annuelles des crues (63-73)

Année	Montée de crue Hm ³	Décru Hm ³	Tarissement Hm ³	Volume total des crues Hm ³
1963	1,80045	0,88408	0,67589	3,36042
1964	3,5495	8,36326	3,55702	15,46978
1965	11,6628	26,8916	28,042	66,5964
1966	1,92229	17,04867	3,95043	22,92139
1967	0,0461	0,3884	0,5063	0,9408
1971	1,451919	7,10728	0,69757	9,256769
1972	3,54316	6,69775	6,7483	16,98921
1973	0,5239	1,087	0	1,6109

8. Interprétation des résultats

a. Année 1963 :

Le volume total annuel est de 3.36 Hm³.

Le volume de la montée de crue est plus grand que le volume du tarissement cela veut dire que l'intensité de la pluie étant supérieure à la capacité d'infiltration, l'écoulement de surface est plus important que l'écoulement souterrain.

Le taux d'infiltration est de 20% par rapport au volume total de la crue.

b. Année 1964 :

Le volume total annuel de 15.46 Hm^3 est plus élevé par rapport à l'année 1963.

On remarque que le volume de la décrue est plus grand que le volume du tarissement et le volume de la montée de crue presque égale au volume du tarissement. Cela montre que l'écoulement superficiel est plus important que l'écoulement souterrain.

Le taux des eaux ruisselées est de 54% de la crue.

c. Année 1965

Cette année a enregistré un volume total annuel de 66.59 Hm^3 qui est le plus important de la période 63-73.

Dans cette année, le volume du tarissement est plus grand que le volume de la décrue, cela veut dire que l'écoulement souterrain domine l'écoulement de surface, c'est-à-dire l'intensité des précipitations ne dépasse pas la capacité d'infiltration du sol.

Le taux d'infiltration est de 42.11% par rapport au volume total de la crue.

d. Année 1966

Le volume total annuel est de 22.92 Hm^3 , le volume de la décrue est plus grand que le volume du Tarissement cela veut dire que l'écoulement de surface domine l'écoulement souterrain c'est-à-dire que l'intensité des précipitations est plus forte que la capacité d'infiltration.

Dans cette année une crue au mois de janvier a donné un volume de 10.63 Hm^3 .

e. Année 1971

Cette année est caractérisé par un volume de crue total annuel de 9.25 Hm^3 .

Le taux des eaux ruisselées est de 76.75% de la crue.

f. Année 1972

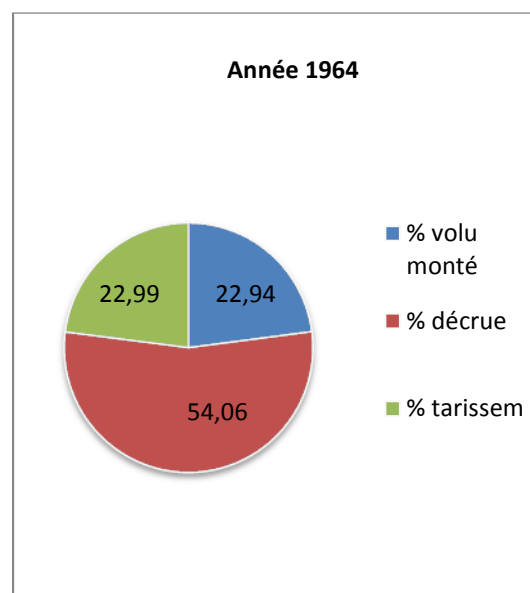
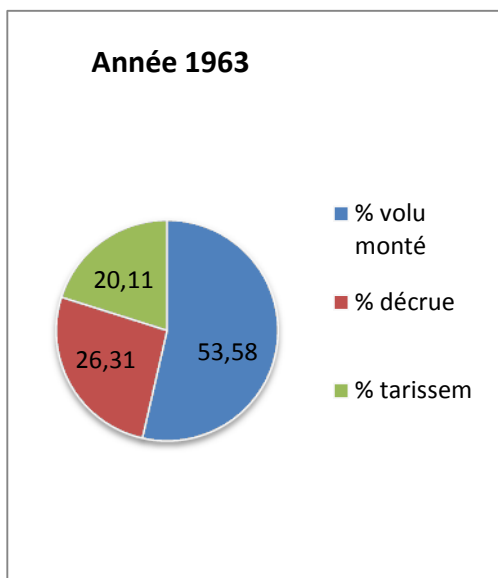
Le volume total annuel est de 16.98 Hm^3 . Le volume de la décrue est presque égal au volume de tarissement. Une seule crue (N°56) a ramené 7.3 Hm^3 soit 43% du volume total des crues.

g. Année 1973

Quatre crues enregistrées au mois d'août ont donné un volume total annuel de 1.61 Hm^3 mais cette valeur est faible.

Remarque :

Les plus importantes crues dans notre étude sont (crue : 9 ; 21 ; 24 ; 26 ; 29 ; 30 ; 56) dont la plus grande est la crue 26 avec un volume de 17 Mm^3 ; ces crues nous ont donné un volume de 72 Mm^3 pour un volume total de 137 Mm^3 .



Hydrologie du bassin versant de l'oued SARNO

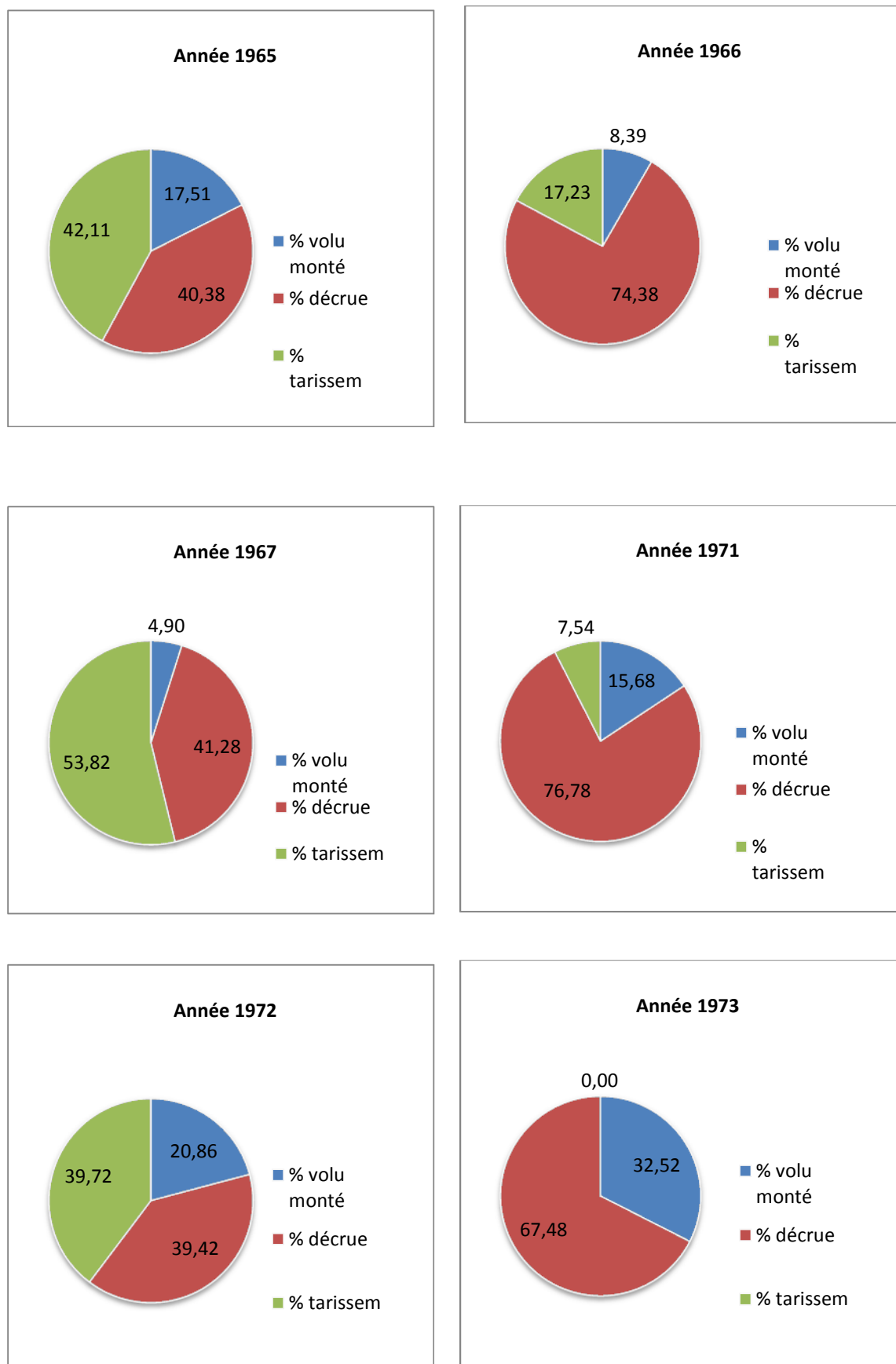


Fig.35 Représentation en % des volumes (monté de crue ; décrue et tarissement)

9. Étude statistique des débits maximum (1963-1973):

Pour cette étude on ne dispose que huit années de mesure des débits maximums, pour cela nous prenons deux débits max par années.

Les paramètres statistiques de l'échantillon sont :

Moyenne $\bar{Q} = 1.18 \text{ m}^3/\text{s}$

Ecart type $\sigma = 0.39 \text{ m}^3/\text{s}$

La fréquence cumulative de la distribution de Gumbel (1958) pour les valeurs extrêmes maximales a la forme de l'exponentielle double suivante :

$$F(Q) = e^{-e^{-\alpha(Q-Q_0)}}$$

Laquelle, par le changement de variable $y = -\alpha(Q - Q_0)$, s'écrit

$$F(y) = e^{-e^{-y}}$$

Ajustement par la méthode des moments :

Tableau 43 : méthode des moments

Débit max (m ³ /s)	Rang	Fréquence empirique F	variable réduite U
0,65	1	0,03333333	-1,22412754
0,717	2	0,1	-0,83403245
0,72	3	0,16666667	-0,58319808
0,82	4	0,23333333	-0,37520329
0,928	5	0,3	-0,18562676
0,94	6	0,36666667	-0,00329667
1	7	0,43333333	0,17883003
1,25	8	0,5	0,36651292
1,324	9	0,56666667	0,56566196
1,36	10	0,63333333	0,78360069
1,37	11	0,7	1,03093043
1,394	12	0,76666667	1,32537551
1,602	13	0,83333333	1,70198336
1,71	14	0,9	2,25036733
1,988	15	0,96666667	3,38429449

Fréquence empirique = (rang-0.5)/15

Variable réduite = $-\text{LN}(-\text{LN}(\text{Fréquence}))$

$$\text{Avec } \alpha = \frac{1}{0.78 \sigma} = \frac{1}{0.3042}$$

$$Q_0 = \bar{Q} - \frac{0.577}{\alpha} = 1.0044$$

Sur un graphique on reporte les 15 valeurs des débits max dans l'axe des abscisses porte les valeurs de la variable réduite U et en ordonnées les valeurs des débits max observées. fig36

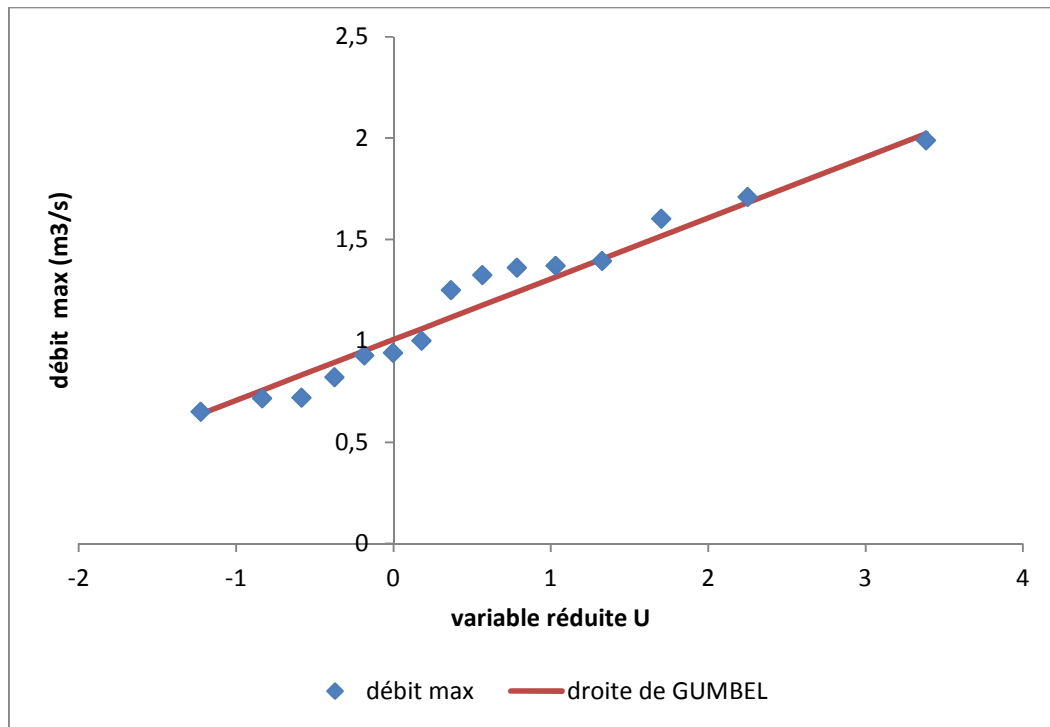


Fig. 36 ajustement de la loi de Gumbel aux débits max observés

La figure 36 montre que l'ajustement est satisfaisant pour l'ensemble des valeurs des débits max observés.

Donc l'équation de la droite de Gumbel est $Y = \frac{1}{0.3042} (Q - 1.0044)$

La droite d'ajustement passe par les points suivants :

$$Y_1=1 \quad Q_1=1.30$$

$$Y_2=2 \quad Q_2=1.614$$

❖ Calcul des débits maximum pour une période de récurrence donnée :

A partir de cette équation $Y = \frac{1}{0.3042} (Q - 1.0044)$ on peut calculer un certain nombre de débit max en remplaçant « Y » par sa valeur.

Tableau 44 : Valeurs des débits max pour des récurrences données

F(Q)	Variable réduite de GUMBEL Y	Période de retour	Débits max (m³/s)
0.9	2.25	10 ans	1.688
0.95	2.97	20 ans	1.907
0.98	3.90	50 ans	2.190
0.99	4.55	100 ans	2.38
0.999	6.90	1000 ans	3.103

Conclusion

L'étude du régime hydrologique nous a permis de calculer le débit moyen annuel de la période 1953-1973 est de 0.41 m³/s.

L'étude des débits mensuels nous a donné que le débit maximum est en avril mais les précipitations importantes sont en novembre cela veut dire qu'il n'y a pas une réponse directe entre les précipitations et les débits. Car à partir du mois février il y a une saturation du sol, par conséquent de forts écoulements.

Les débits journaliers varient entre 0.144 m³/s et 0.735 m³/s se sont des faibles valeurs.

Les valeurs maximales apparaissent à partir du mois janvier jusqu'à mai.

L'étude des débits classés permet de tirer les débits caractéristiques de l'oued sarno.

L'étude de crue (1963/1973) permet de relever 89 crues au niveau de l'oued sarno dans la plus importante c'est du 03 juillet au 26 juillet 1965.

L'étude des débits maximum nous montre que les débits max suivent une distribution de Gumbel et permet de relever quelque débit max pour des récurrences données.

Chapitre IV

Modélisation pluie-débit par le GR dans le bassin de l'oued
SARNO

I. Objectifs de développement

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

II. 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) et en ne compliquant cette architecture que pour faire face aux difficultés à reproduire les débits réels et non pour satisfaire des conceptions a priori sur le cycle hydrologique. Cette démarche a débouché sur un modèle simple à deux paramètres GR2J (Michel, 1983).

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)

La version qui semble la plus performante et la plus robuste est (GR4J) proposée par Perrin (2000).

Au pas de temps annuel, les travaux de Bouabdallah (1997) ont permis de jeter les premières bases d'un modèle pluie-débit annuel, avec deux versions, à un paramètre (GR1A) et deux paramètres (GR2A).

Par la suite, Mouelhi (2003) a repris la chaîne de modélisation à pas de temps mensuel, annuel et pluriannuel, en essayant d'identifier l'adaptation des structures des modèles au pas de temps de fonctionnement, et en recherchant les cohérences de structures entre ces différents pas de temps. Il a ainsi pu proposer un modèle mensuel (GR2M) à deux paramètres, un modèle annuel (GR1A) à un paramètre et un modèle interannuel sans paramètres à caler.

III. Mode de développement :

Bien que ces modèles soient parfois apparentés à des modèles conceptuels du fait de leur structure à réservoirs, ce sont en fait des modèles empiriques: leur construction s'est faite sur la base de grands jeux de données et en découvrant progressivement la structure permettant de reproduire au mieux le comportement hydrologique du bassin versant (c'est-à-dire sa réponse aux pluies). Les idées suivantes se sont progressivement imposées au cours du développement de ces modèles pour permettre d'obtenir des modèles fiables et robustes (Mathevet, 2005):

- Représentation globale du bassin versant,
- Approche empirique de développement sans recours a priori à la physique des écoulements,
- Augmentation progressive de la complexité de la structure du modèle en partant de structures simples,
- Justification de la complexité de la structure d'un modèle par ses performances,
- Recherche de structures de modèle générales (applicables à des bassins variés),
- Utilisation de larges échantillons de bassins versants pour tester les performances des modèles,
- Evaluation d'un modèle par comparaison à d'autres structures de modèle.

IV. Description du modèle pluie-débit annuel GR1A

1. Introduction :

Le modèle GR1A (modèle du Génie Rural à 1 paramètre Annuel) est un modèle pluie-débit global à un seul paramètre. Son développement 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).

2. Représentation mathématique

La structure du modèle est très simple puisqu'elle se résume à une simple équation, le débit Q_k de l'année k étant proportionnelle à la pluie P_k de la même année, avec un coefficient d'écoulement dépendant de P_k , de la pluie P_{k-1} de l'année $k-1$ et de l'évapotranspiration potentielle annuelle moyenne E . Le modèle s'écrit :

$$Q_k = P_k \left\{ 1 - \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{0.7P_k + 0.3P_{k-1}}{XE_k} \right)^2 \right]^{0.5}} \right\} \quad \text{Eq 1}$$

Où X est l'unique paramètre du modèle.

Cette formule dérive de la formule de Turc (1955), qui donne l'écoulement moyen interannuel. Une recherche systématique de la meilleure 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 paramètre 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) : si X est supérieur à 1, le système perd de l'eau et si X est plus petit que 1, le système en gagne, le tout exprimé en fraction de l'ETP.

3. Paramètre

Le modèle ne comporte qu'un paramètre optimisable, le paramètre X adimensionnel, qui apparaît comme un coefficient modulateur de l'évapotranspiration potentielle. Sur un large 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].

V. Description du modèle pluie-débit mensuel GR2M :

1. Introduction :

Le modèle GR2M (modèle du Génie Rural à 2 paramètres Mensuel) est un modèle pluie-débit global à deux paramètres. Son développement a été initié au Cemagref à la fin des années 1980, avec des objectifs d'applications dans le domaine des ressources en eau et des étiages.

Ce modèle a connu plusieurs versions, proposées successivement par Kabouya (1990), Kabouya et Michel (1991), Makhoulf (1994), Makhoulf et Michel (1994), Mouelhi (2003) et Mouelhi *et al.* (2006b), qui a permis d'améliorer progressivement les performances du modèle. La version présentée ici est celle de Mouelhi *et al.* (2006b) qui paraît la plus performante.

2. Représentation mathématique

Un schéma de la structure est donné à la Figure 37. 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 :

$$P_s = \frac{x_1 \left(1 - \left(\frac{S_k}{x_1}\right)^2\right) \tanh\left(\frac{P_k}{x_1}\right)}{1 + \frac{S}{x_1} \tanh\left(\frac{P_k}{x_1}\right)} \quad \text{Eq 2}$$

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

$$P_1 = P_k - P_s \quad \text{Eq 3}$$

Et le contenu du réservoir est actualisé :

$$S' = S_k + P_s \quad \text{Eq 4}$$

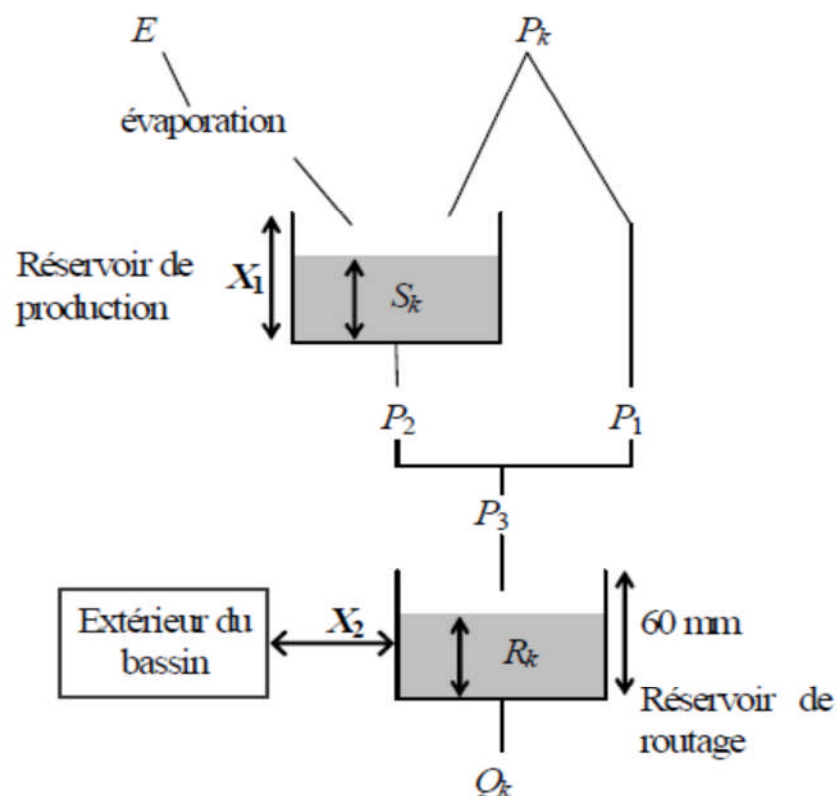


Figure 37 : Schéma de la structure du modèle GR2M

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

$$E_s = \frac{s' \left(2 - \frac{s'}{X_1} \right) \tanh\left(\frac{E}{X_1}\right)}{1 + \left(1 - \frac{s'}{X_1} \right) \tanh\left(\frac{E}{X_1}\right)} \quad \text{Eq 5}$$

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

$$S'' = S' - E_s \quad \text{Eq 6}$$

- Percolation

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

$$P_2 = S'' \left\{ 1 - \left[1 + \left(\frac{S''}{X_1} \right)^3 \right]^{-1/3} \right\} \quad \text{Eq 7}$$

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

$$S_{k+1} = S'' - P_2 \quad \text{Eq 8}$$

- Routage et échange avec l'extérieur non atmosphérique

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

$$P_3 = P_1 + P_2 \quad \text{Eq 9}$$

Le niveau R_k dans le réservoir devient alors R' :

$$R' = R_k + P_3 \quad \text{Eq 10}$$

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 :

$$F = (X_2 - 1) * R' \quad \text{Eq 11}$$

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

$$R'' = X_2 * R' \quad \text{Eq 12}$$

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

$$Q_k = \frac{R''^2}{R'' + 60} \quad \text{Eq 13}$$

Le contenu du réservoir est enfin actualisé par :

$$R_{k+1} = R'' - Q_k \quad \text{Eq 14}$$

3. Paramètres

Le modèle à deux paramètres optimisables :

X_1 : capacité du réservoir de production (mm)

X_2 : coefficient d'échanges souterrains (-)

Sur un large échantillon de bassins versants, on obtient les valeurs données dans le tableau 45

Tableau 45: Valeur des paramètres du modèle GR2M obtenues sur un large échantillon de bassins versants (Perrin, Michel 2003)

Paramètre	Médiane	Intervalle de confiance à 90%
X_1 (mm)	380	140-2640
X_2 (-)	0.92	0.21-1.31

VI. Description du modèle pluie-débit journalier GR4J :

1. Introduction :

Le modèle GR4J (modèle du Génie Rural à 4 paramètres Journalier) est un modèle pluie-débit conceptuel global, très simple qui permet de simuler le débit à l'exutoire d'un bassin versant à partir des données de pluie et d'évaporation moyenne. GR4J qui est une version modifiée de GR3 (Nascimenton, Michel 1992).

Ce modèle a connu 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.

2. Représentation mathématique :

Un schéma de la structure est donné à la Figure 38. P_k est la pluie journalière du jour k et E l'évapotranspiration potentielle moyenne pour le même jour calendaire.

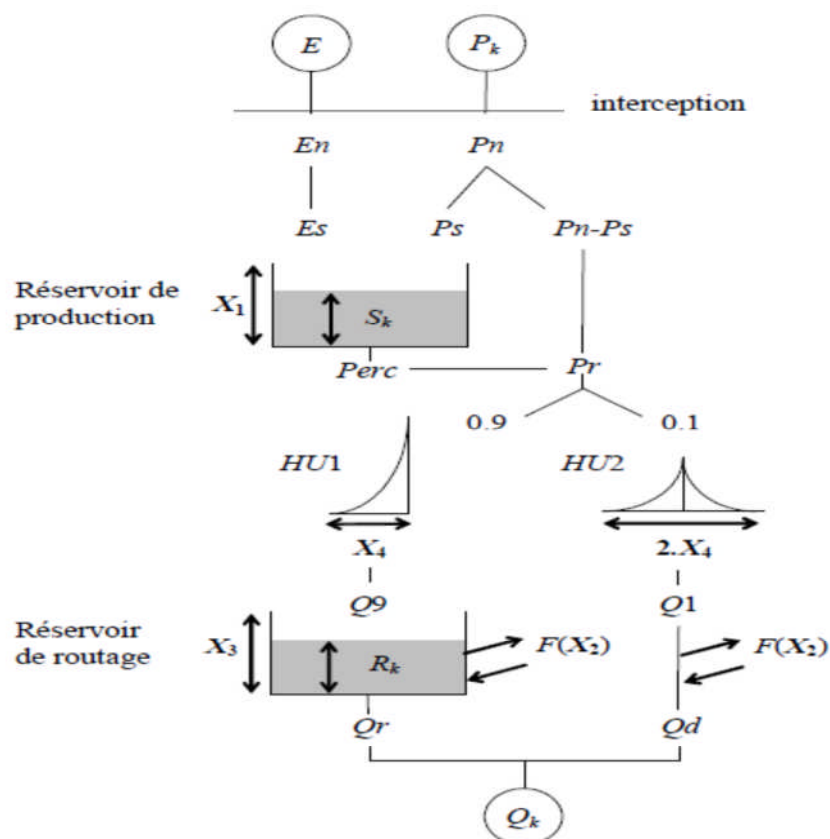


Figure 38 : Schéma de la structure du modèle GR4J

- Neutralisation

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

$$\text{Si } P_k \geq E, \text{ alors } P_n = P_k - E \text{ et } En = 0 \quad \text{Eq 15}$$

$$\text{Si } P_k < E, \text{ alors } P_n = 0 \text{ et } En = E - P_k \quad \text{Eq 16}$$

- 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 :

$$P_s = \frac{X_1 \left(1 - \left(\frac{S_k}{X_1}\right)^2\right) \tanh\left(\frac{P_n}{X_1}\right)}{1 + \frac{S_k}{X_1} \tanh\left(\frac{P_n}{X_1}\right)} \quad \text{Eq 17}$$

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 En est différent de zéro, une quantité d'évaporation E_s est retirée du réservoir de production. Elle est donnée par :

$$E_s = \frac{S_k \left(2 - \frac{S_k}{S_1}\right) \tanh\left(\frac{En}{X_1}\right)}{1 + \left(1 - \frac{S_k}{S_1}\right) \tanh\left(\frac{En}{X_1}\right)} \quad \text{Eq 18}$$

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

$$S' = S_k + P_s - E_s \quad \text{Eq 19}$$

- Percolation

Une percolation $Perc$ issue du réservoir de production est alors calculée par l'équation suivante :

$$Perc = S' \left\{ 1 - \left[1 + \left(\frac{4}{9} \frac{S'}{X_1} \right)^4 \right]^{-\frac{1}{4}} \right\} \quad \text{Eq 20}$$

Par suite, le contenu du réservoir devient :

$$S_{k+1} = S' - Perc \quad \text{Eq 21}$$

Et la quantité d'eau Pr qui atteint finalement la partie routage du modèle est donnée Par :

$$P_r = P_{erc} + (P_n - P_s) \quad \text{Eq 22}$$

- Hydrogrammes unitaires

Pr est divisé en deux composantes d'écoulement, 90 % étant routés par un hydrogramme unitaire $HU1$ et un réservoir de routage et 10 % par un

Modélisation pluie-débit par le GR dans le bassin de l'oued SARNO

hydrogramme unitaire symétrique $HU2$. $HU1$ et $HU2$ dépendent du même paramètre $X4$, temps de base de $HU1$ exprimé en jours.

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

$$\text{Pour } t \leq 0, \quad SH1(t) = 0 \quad \text{Eq 23}$$

$$\text{Pour } 0 < t < X4, \quad SH1(t) = \left(\frac{t}{X4}\right)^{\frac{5}{2}} \quad \text{Eq 24}$$

$$\text{Pour } t \geq X4, \quad SH1(t) = 1 \quad \text{Eq 25}$$

$SH2$ est définie de façon similaire par:

$$\text{Pour } t \leq 0, \quad SH2(t) = 0 \quad \text{Eq 26}$$

$$\text{Pour } 0 < t \leq X4, \quad SH2(t) = \frac{1}{2} \left(\frac{t}{X4}\right)^{\frac{5}{2}} \quad \text{Eq 27}$$

$$\text{Pour } X4 < t < 2.X4, \quad SH2(t) = 1 - \frac{1}{2} \left(2 - \frac{t}{X4}\right)^{\frac{5}{2}} \quad \text{Eq 28}$$

$$\text{Pour } t \geq 2.X4, \quad SH2(t) = 1 \quad \text{Eq 29}$$

Les ordonnées de $HU1$ et $HU2$ sont alors calculées par :

$$UH1(j) = SH1(j) - SH1(j-1) \quad \text{Eq 30}$$

$$UH2(j) = SH2(j) - SH2(j-1) \quad \text{Eq 31}$$

Où j est un entier.

A chaque pas de temps k , les sorties $Q9$ et $Q1$ des deux hydrogrammes correspondent à la convolution des pluies antérieures par la clé de répartition donnée par l'hydrogramme discrétisé et sont calculées par :

$$Q9(k) = 0.9 \sum_{j=1}^l UH1(j) * P_{r(K-j+1)} \quad \text{Eq 32}$$

$$Q1(k) = 0.1 \sum_{j=1}^m UH2(j) * P_{r(K-j+1)} \quad \text{Eq 33}$$

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

- Fonction d'échange avec l'extérieur non atmosphérique

Un échange souterrain en eau est calculé par :

$$F = X_2 \left(\frac{R_k}{X_3}\right)^{\frac{7}{2}} \quad \text{Eq 34}$$

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

Modélisation pluie-débit par le GR dans le bassin de l'oued SARNO

nul. En fait, l'interprétation physique de cette fonction d'échange n'est pas directe.

• Réservoir de routage : Le niveau dans le réservoir de routage est modifié en ajoutant la sortie $Q9$ de l'hydrogramme $HU1$ et F :

$$R' = \max(0 ; R_k + Q9(k) + F) \quad \text{Eq. 35}$$

Il se vidange ensuite en une sortie Qr donnée par :

$$Q_r = R' \left\{ 1 - \left[1 + \left(\frac{R'}{X_3} \right)^4 \right]^{-\frac{1}{4}} \right\} \quad \text{Eq 36}$$

Le niveau dans le réservoir devient :

$$R_{k+1} = R' - Q_r \quad \text{Eq 37}$$

- Ecoulement total

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

$$Qd = \max(0 ; Q1(k) + F) \quad \text{Eq 38}$$

Le débit total Q est alors donné par :

$$Q_k = Q_r + Qd \quad \text{Eq 39}$$

3. Paramètre :

Le modèle GR4J ne comporte que quatre paramètres à caler:

X_1 : capacité du réservoir de production (mm)

X_2 : coefficient d'échanges souterrains

X_3 : capacité à un jour du réservoir de routage (mm)

X_4 : temps de base de l'hydrogramme unitaire $HU1$ (j)

Sur un large échantillon de bassins versants, les valeurs obtenues sont données dans le Tableau 46.

Tableau 46 : Valeur des paramètres du modèle GR4J obtenues sur un large échantillon de bassins versants (Andrésian,2003)

Paramètres	Médiane	Intervalle de confiance à 80%
$X_1(\text{mm})$	350	100 à 1200
X_2	0	-5 à 3
$X_3(\text{mm})$	90	20 à 300
$X_4(\text{jours})$	1.7	1.1 à 2.9

VII. Critère de performance de NASH :

Il existe une bibliographie très riche présentant différentes formes de fonctions critères. Citons à titre d'exemple : le critère de Nash (Nash et Sutcliffe, 1970) ; etc.... Notre choix de la forme de la fonction critère s'est porté sur le critère de Nash pour deux raisons principales: Une étude comparative entre différentes formes de critères a été effectuée par Servat et al.(1989) et a montré que le critère de Nash s'impose comme celui qui, globalement, permet d'accéder au meilleur calage. Lors de ses travaux de recherche au sein du Cemagref, Perrin (2000) a utilisé le même critère, après une étude comparative avec d'autres formes de fonctions critères, en vue d'une amélioration du modèle GR4J. Pour garder encore une fois une certaine cohérence entre les pas de temps (journalier, mensuel, annuel et pluriannuel), ce choix est conservé ici.

En effectuant la transformation choisie (racine de Q), le critère de Nash s'écrit comme suit (Nash et Stuclicffe ,1970)

$$F = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (\sqrt{Q_i} - \sqrt{Q'_i})^2}{\sum_{i=1}^N (\sqrt{Q_i} - \overline{\sqrt{Q}})^2}$$

N : Le nombre total de valeurs calculées et observées ;

Q : Lane d'eau écoulee observée ;

Q' : Lane d'eau écoulee estimée par le modèle ;

$\overline{\sqrt{Q}}$: Moyenne sur N valeurs de la racine carrée des lames d'eau écoulées observées.

Le critère de NASH est le critère le plus fréquemment utilisé.il à l'avantage de donner un poids important à la restitution par le modèle des forts débits.

VIII.applications des modèles :

Les modèles présentés précédemment peuvent être utilisés pour un certain nombre d'application 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 pour laquelle on dispose de données pluviométriques observées ;

- **la prédétermination** : les séries des débits observés étant souvent courte, 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 événements de crues. Le modèle doit alors intégrer une procédure d'assimilation des débits observés, ce qui permet d'améliorer de façon substantielle les prévisions. Les travaux de Tangara (2005) ont permis de mettre au point un modèle continu (GR3P) dérivant du modèle GR4J et spécifiquement adapté à l'exercice de prévision à court terme ; voir également les travaux réalisés en mode événementiel avec le modèle GR3H (Fourmigué et Lavabre, 2005) ;

- **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. Pour en tenir compte, on doit adopter un cadre de prévision probabiliste en utilisant de nombreux scénarios de pluie future à partir de l'instant de prévision, scénarios issus soit de prévisions d'ensemble de modèles météorologiques, soit d'archives météorologiques si elles existent, soit d'un générateur stochastique de pluie ;

- **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 d'étiage, écrêtement de crue, etc.) en tenant compte ainsi de la variabilité naturelle de ces apports. En conditions opérationnelles, la prévision des apports peut permettre en mieux gérer l'ouvrage (Yang *et al.*, 1991).

Conclusion

Les modèles du Génie Rural sont des modèles simples (peu de paramètres à caler). Par suite, ils ont des besoins en données limités, dans un domaine où les modèles tendent à devenir de plus en plus complexes pour intégrer des processus supposés exister à l'échelle ponctuelle.

Les modèles GR ont été testés sur des bassins et des contextes climatiques très variés, en France 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 pour des bassins versants allant de moins de 10 km² à plus de 100 000 km². Ils sont également été utilisés dans des bassins en Algérie et particulièrement au niveau des bassins de l'oued Mouilah

Modélisation pluie-débit par le GR dans le bassin de l'oued SARNO

ZENNAKI.(2009); de l'oued Tafna BOUANANI.(2010); de l'oued Isser BENHAZIL.(2011); au niveau de la Mekkerah BOUREK(2010); l'oued Lakhdar Gherissi (2012) et oued Boumessoud Madani (2012).

Les résultats obtenus dans les différents bassins ci-dessus nous ont encouragés à tester ce modèle sur le bassin du SARNO avec les trois pas du temps. (Annuel, mensuel et journalier)

IX. Application du modèle GR sur le bassin versant SARNO:

L'application du modèle GR a été effectuée sur les débits annuels mesurés pour le GR 1A, les débits reconstitués mensuels pour GR 2M, et les débits mesurés journaliers pour le GR 4J.

1. Modèle annuel GR 1A :

Pour prédire le débit à une année donnée on utilise à l'entrée du modèle des valeurs des pluies annuelles observées (mm), des ETP calculées par la méthode d'LOUDIN (mm), où on utilise les températures T ($^{\circ}\text{C}$) observées au niveau de la station du barrage SARNO pour leurs calculs, et des débits annuels mesurés exprimés en lame d'eau écoulées (mm).

Pour le calage, nous avons utilisé les débits annuels et les pluies annuelles de la série (1954-1974), L'ETP a été calculé à partir des données de températures journalières par la méthode d'LOUDIN

a. Résultat du calage

Le calage du modèle a été réalisé sur les données de la période (1954-1967) après plusieurs passages sur ordinateur où nous avons procédé à des changements sur le paramètre X (coefficient de correction de L'ETP (mm)) en commençant par la valeur de 0.1 jusqu'à la valeur de (-0.20) qui a donné la plus grande valeur du critère de Nash de 0.74 et un coefficient de détermination $R^2 = 0.75$ (tableau 47) (voir tableau annexe)

Tableau N°47 : Application de GR1A au bassin versant d'oued Sarno

Critère	X	Nash	Bilan	Coefficient de détermination R^2
Sarno (1954-1967)	-0.20	74 %	97.3 %	0.753

X : Coefficient de correction de l'ETP (mm)

Au regard de la superposition des courbes des débits mesurés et simulés fig.39 et fig.40, de la valeur du coefficient de Nash et de la corrélation entre les débits calculés et mesurés on peut dire que le calage est acceptable. Toutefois il y'a un décalage remarquable entre la courbe des débits mesurés et celle simulés période 1960-1962, et entre les précipitations mesurées et les débits observés.

La réponse du cours d'eau semble ne pas suivre la valeur des précipitations pour l'année 1961 ceci peut s'expliquer par l'existence de crue importantes au niveau de la Mekarra qui ont influencé sur la valeur du Q_{moy} annuel, ce qui n'est pas le cas pour les précipitations annuelle de cette année.

En plus le paramètre $X = -0.20 < 1$ traduit que notre bassin gagne de l'eau. En effet le système globale « aquifère-Oued » du bassin SARNO est matérialisé par une alimentation de l'oued principal par la nappe tout le long de son parcours. L'alimentation de la nappe est assurée, en plus de son impluvium, par les eaux provenant des bassins versants voisins. [CHANIGUI 1993]

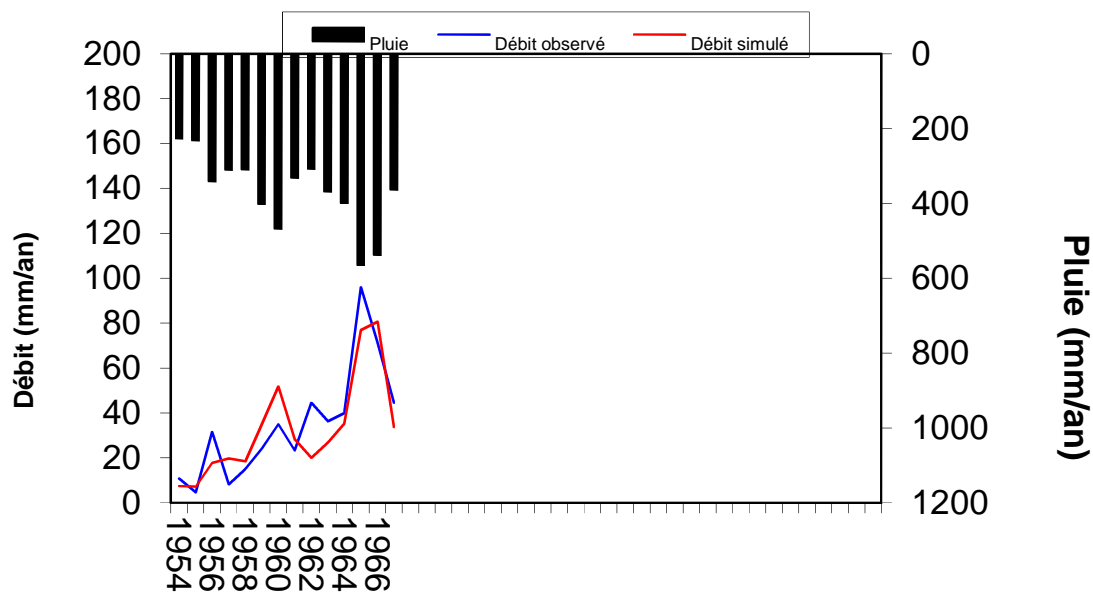


Figure : 39 visualisations de la qualité du calage

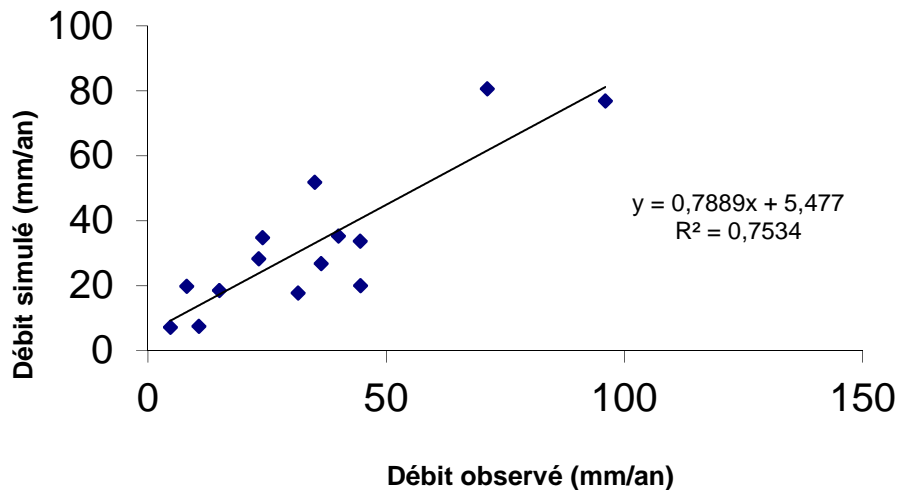


Fig. : 40 Corrélation entre les débits observés et les débits simulés (1954-1967)

b. Validation du modèle annuelle :

La validation porte sur l'application du modèle sur le reste des données de la série qui n'ont pas été utilisées lors du calage (1968-1974).

Les valeurs des débits simulés issues de la validation sont assez loin de ceux mesurés ceci est bien indiqué par la répartition des points par rapport à la droite $y=x$ fig.41 par conséquent la validation n'est pas acceptable. Le modèle GR1A ne peut pas être bien calé à cause de l'incompatibilité des données mesurées des débits et celles des précipitations ou la non intégrité du modèle GR sur notre bassin.

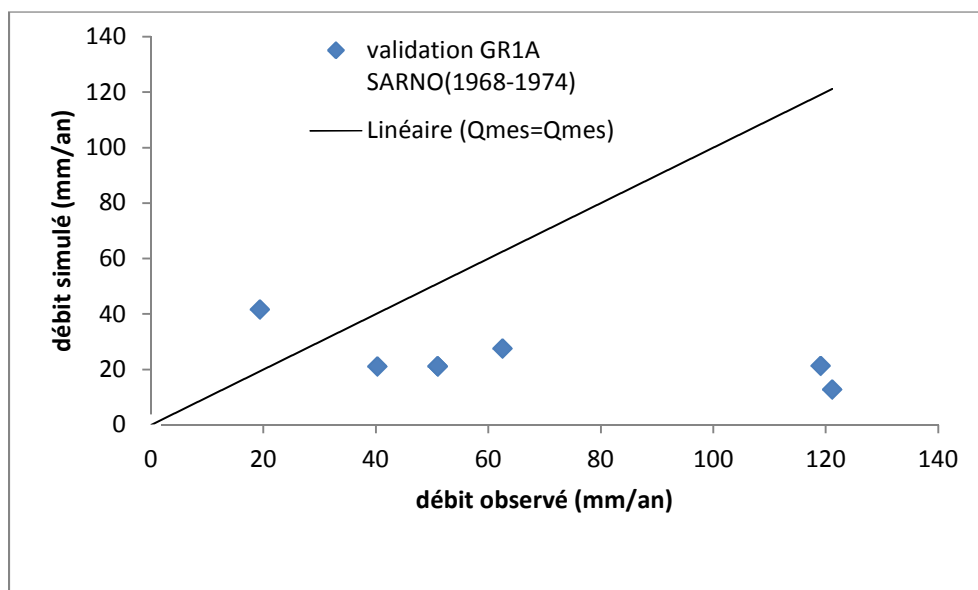


Fig. 41 Validation GR1A SARNO (1968-1974)

Modélisation pluie-débit par le GR dans le bassin de l'oued SARNO

2. Modèle mensuel GR2M :

Pour prédire le débit à un mois donné nous avons utilisé à l'entrée du modèle des valeurs des pluies observées (mm), des ETP calculées par la méthode d'LOUDIN (mm) et les débits mensuels exprimés en lames d'eau écoulées (mm) période (jan 1966—décembre 1970), la superficie du BV (km²), durée de la période test (années), valeurs initiale de la pluie, les paramètres du modèle.

a. Résultat du calage :

Le calage du modèle a été réalisé après plusieurs passages sur ordinateur où on a procédé à un jeu de changement des valeurs des paramètres du modèle X_1 et X_2 entre les valeurs limites comprises entre 140 et 2640 (mm) pour X_1 et 0.21 à 1.31 pour X_2 jusqu'à l'obtention des valeurs optimum de critère de NASH= 0.825 et du coefficient de détermination $R^2=0.72$ (tableau 48).(voir tableau annexe)

D'après les valeurs du coefficient de détermination R^2 et du critère de NASH, on peut considérer que le calage est acceptable.

Le niveau du réservoir de production fig.42 varie entre 276 (mm) au mois de Mars 1969 à 15.65 (mm) au mois d'Aout 1966 ce qui montre qu'il y'a une réponse directe aux précipitations (écoulement superficiel), ce qui se traduit par la variation du réservoir de routage fig.43 entre 25.56 (mm) en jan-66 et 2.56 (mm) en dec-66 indiquant une faible percolation des eaux de surface.

Tableau N°48 : Application de GR2M avec des entrées et des sorties du modèle

Donnée annuelles	ETP OUDIN					
Critère	X_1	X_2	Nash	Bilan	R_0	R^2
SARNO (jan 66- déc 70)	6.47	0.89	82.5	99.4	50	0.716

X_1 : Capacité du réservoir de Production (mm)

X_2 : paramètre d'échange (mm)=0.89 compris dans l'intervalle de confiance

R_0 : Niveau de remplissage initial (max : 60mm)

R^2 : Coefficient de détermination

Modélisation pluie-débit par le GR dans le bassin de l'oued SARNO

Les courbes des débits simulés et débits mesurés fig.44 semblent assez bien superposées sauf pour les faibles débits où on constate un certain décalage. Ceci est traduit aussi par la répartition des points autour de la droite de corrélation $Q_{sim}=f(Q_{mes})$ de la fig.45 et le coefficient de corrélation moyen de 0.72 exprimé par la concentration des faibles valeurs des débits observées près de l'axe des x.

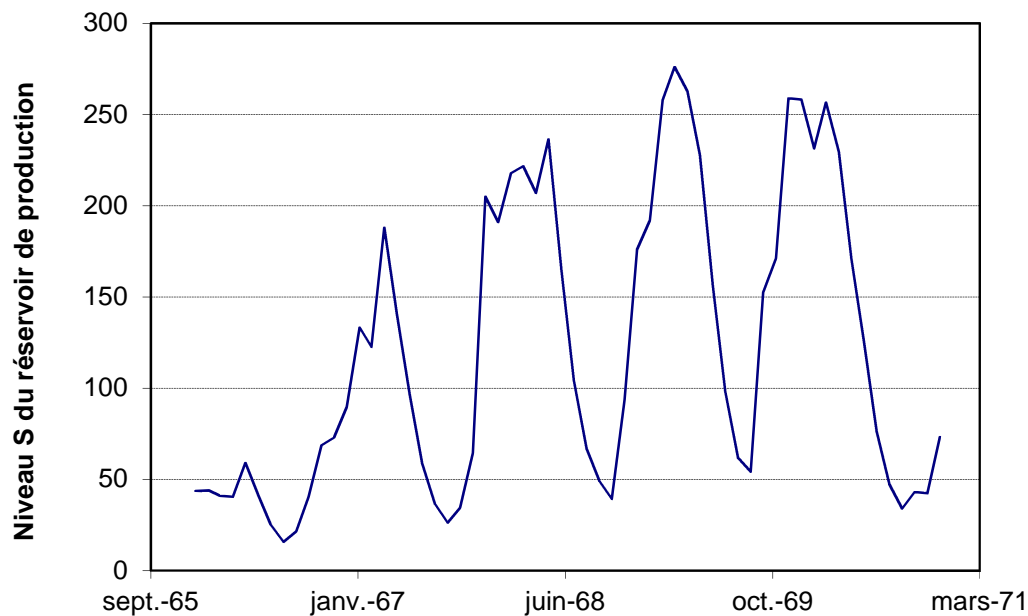


Fig.42 courbe indiquant le niveau S du réservoir de production

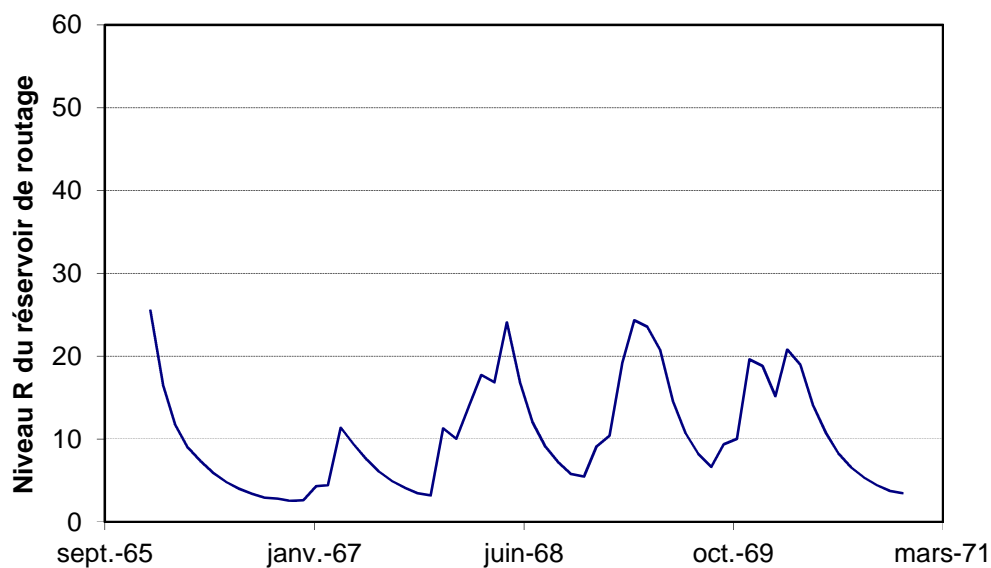


Fig.43 courbe indiquant le niveau R du réservoir de routage

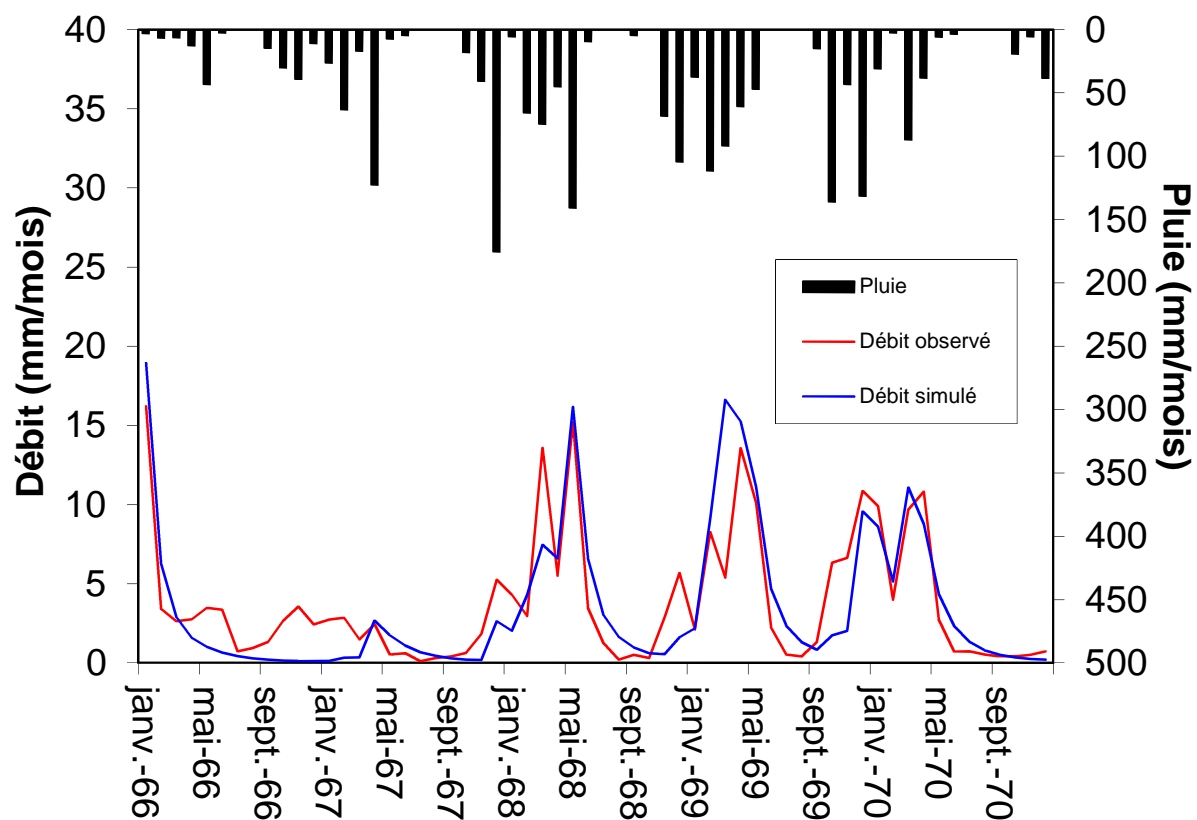


Fig. 44 : visualisation de la qualité du calage

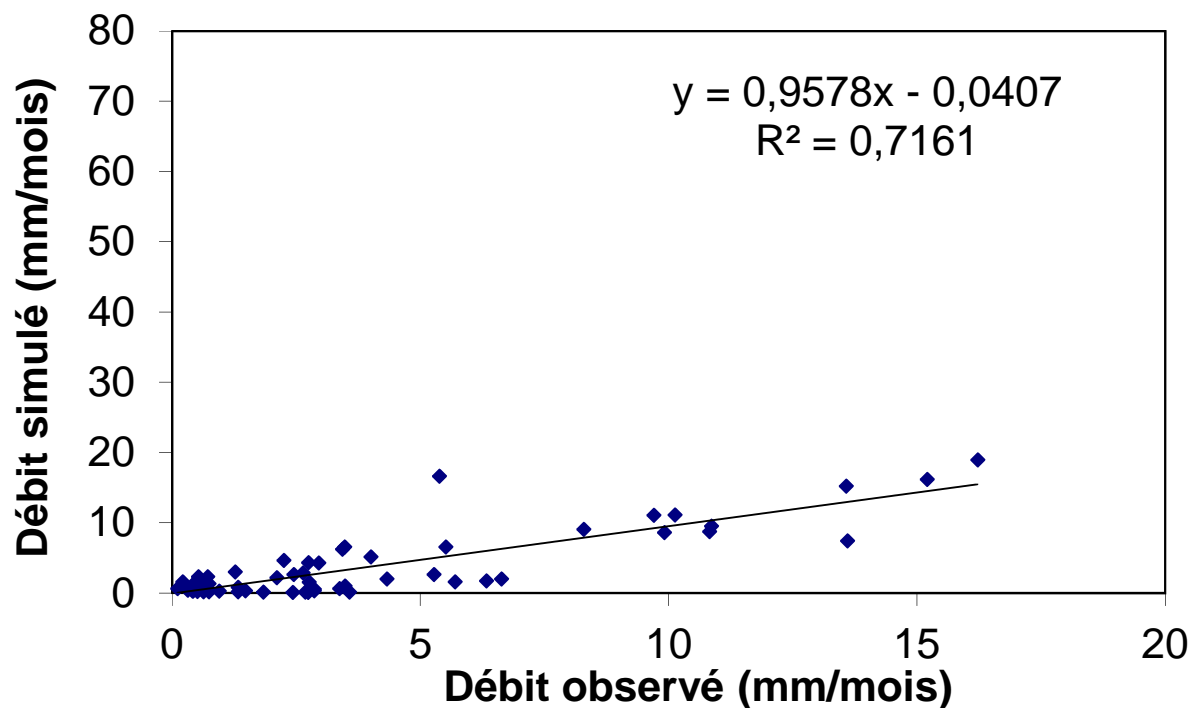


Fig.45 : corrélation entre les débits observés et les débits simulés

b. Validation du modèle GR2M :(jan 1971-déc 1973)

La validation du GR2M figure 46 confirme le calage, sauf pour quelques valeurs qui sont loin de la droite $Q_{mes}=Q_{sim}$

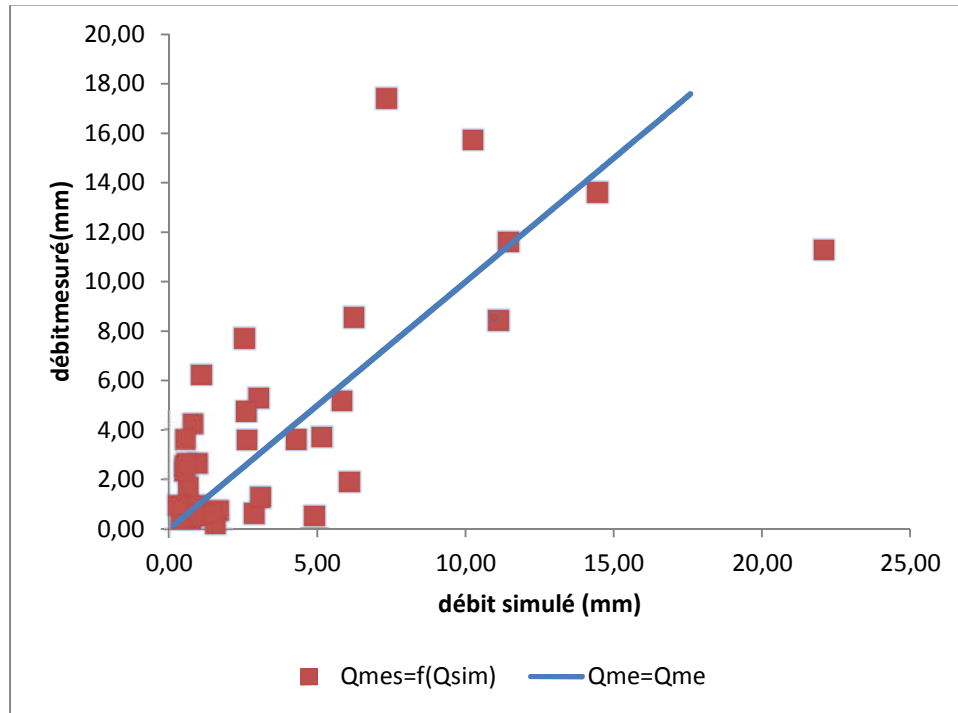


Fig. 46 Validation du GR2M

3. Modèle journalier GR4J :

Dans cette étude, pour prédire le débit journalier on utilise à l'entrée du modèle des valeurs des pluies journalières observées (mm) ; des ETP calculées par la méthode d'LOUDIN en (mm), et des débits journaliers observés en m^3/s .

Pour la phase de calage nous avons pris trois années (01/01/1968 au 31/12/1970)

Tableau N°49 Application de GR4j

Données journaliers	ETP OUDIN							
Critères	X_1	X_2	X_3	X_4	R_0	Nash	Bilan	R^2
SARNO	8.24	0.34	3.72	1.38	0.40	62.63	105.969	0.45

a. Résultats du calage :

Le calage du modèle consiste aux changements successif des valeurs des différentes paramètres (X_1 , X_2 , X_3 et X_4) jusqu'à l'obtention des valeurs optimum du critère de NASH= 0.626 et du coefficient de détermination $R^2=0.45$ (tableau 49). (Voir annexe)

Le niveau des réservoirs de production S (fig.47) et de routage R (fig.48) reste assez stable pour les trois années, les deux réservoirs semblent ne pas être influencés par les précipitations, on pense qu'il y'a une faible infiltration et percolation.

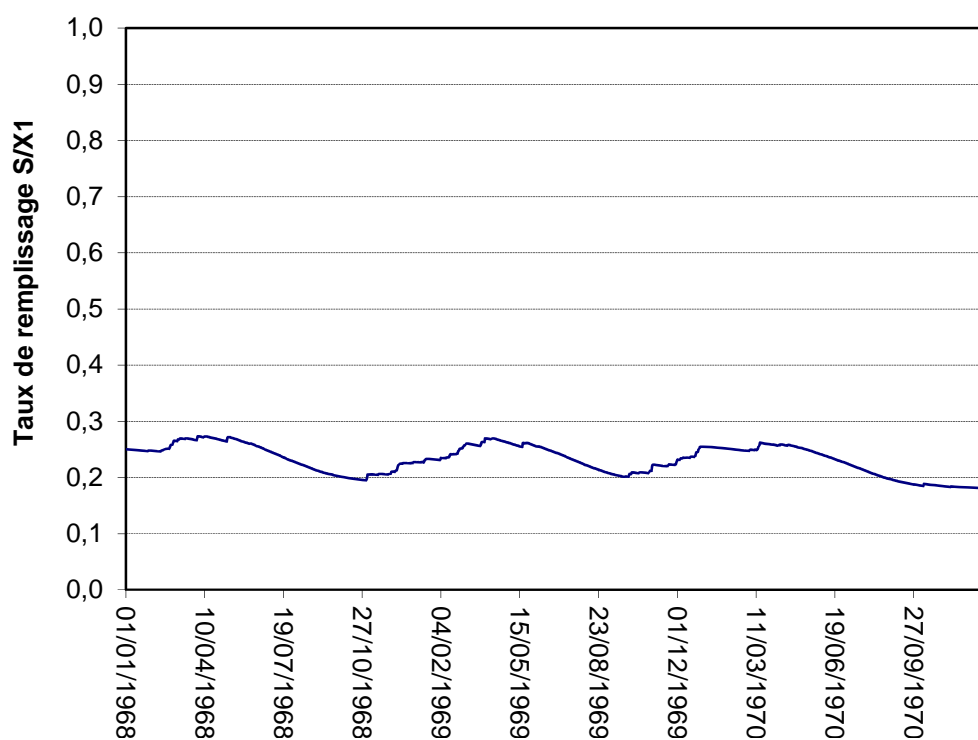


Fig.47 : courbe indique le niveau S du réservoir de production

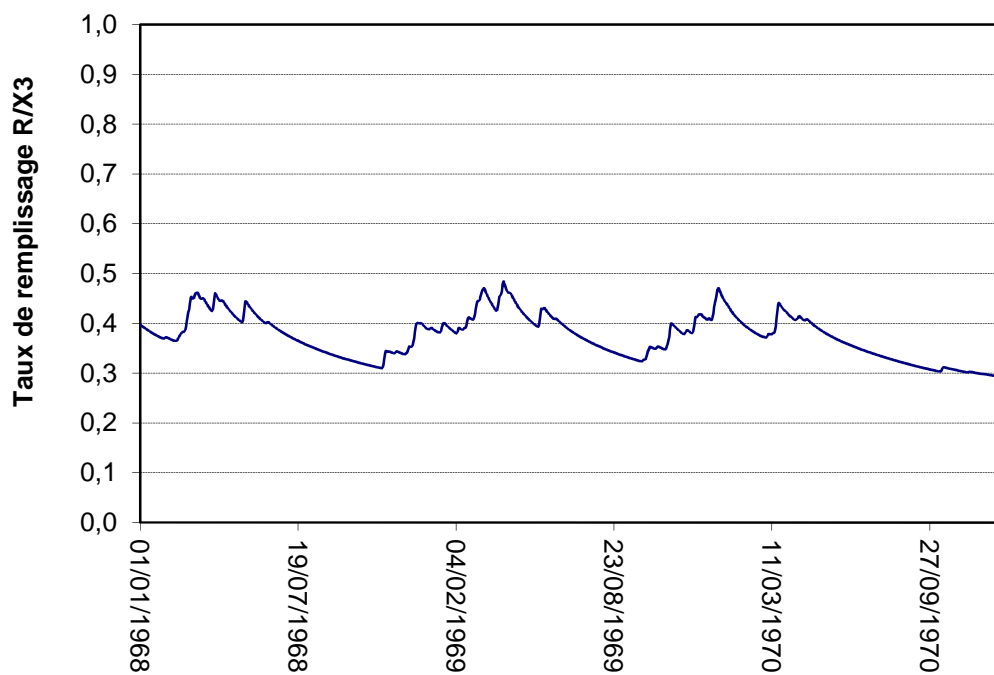


Fig.48 : courbe indique le niveau R du réservoir de routage

Au regard des valeurs du coefficient de Nash et du coefficient de détermination le calage peut être considéré comme médiocre.

Les courbes de la fig.49 présentent un important décalage à partir de Mai 1968 à fév. 1969 l'importance relative des débits mesuré n'est pas justifiée les précipitations en cette période sont nuls. La réponse du modèle semble plus correcte.

Pour les périodes d'Aout 69 et 70 le modèle semble minimiser l'effet de l'absence des précipitations pendant l'été. Les valeurs nulles des débits observés seraient plus réalistes

Pour la fig.50 la corrélation entre les débits simulés et observés est faible, les débits observés nuls ont tendance à réduire la qualité de la corrélation.

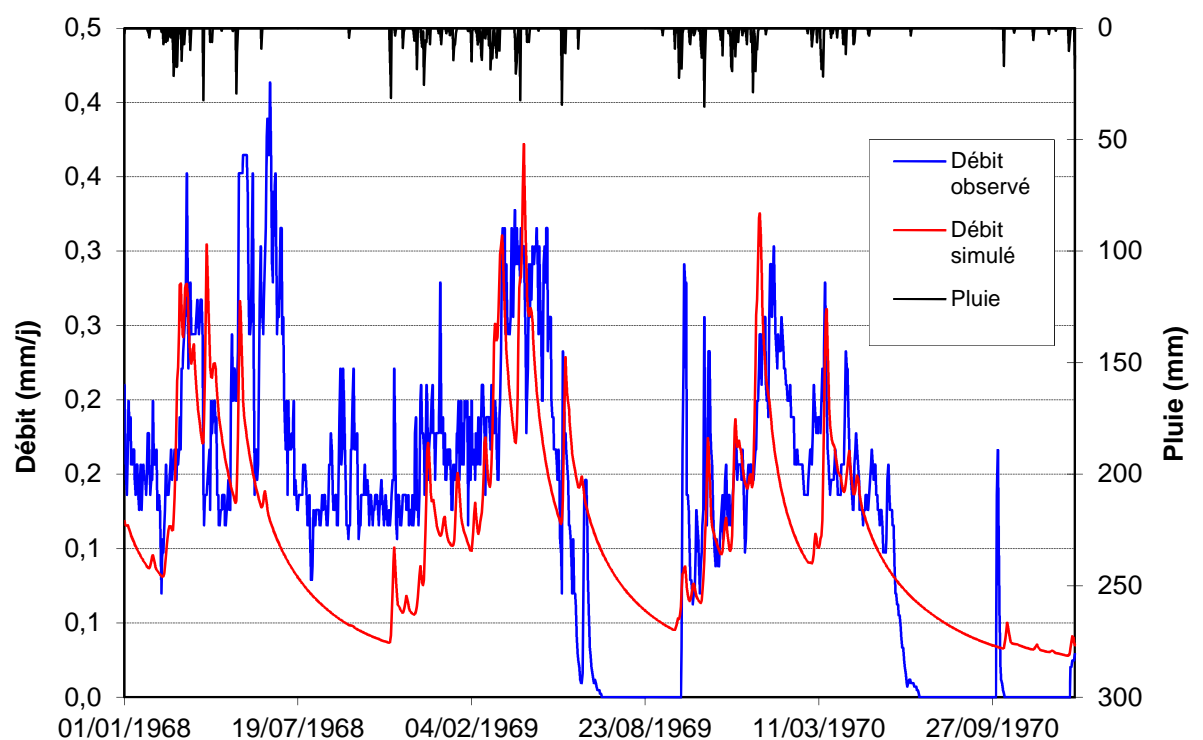


Fig.49 visualisation de la qualité du calage

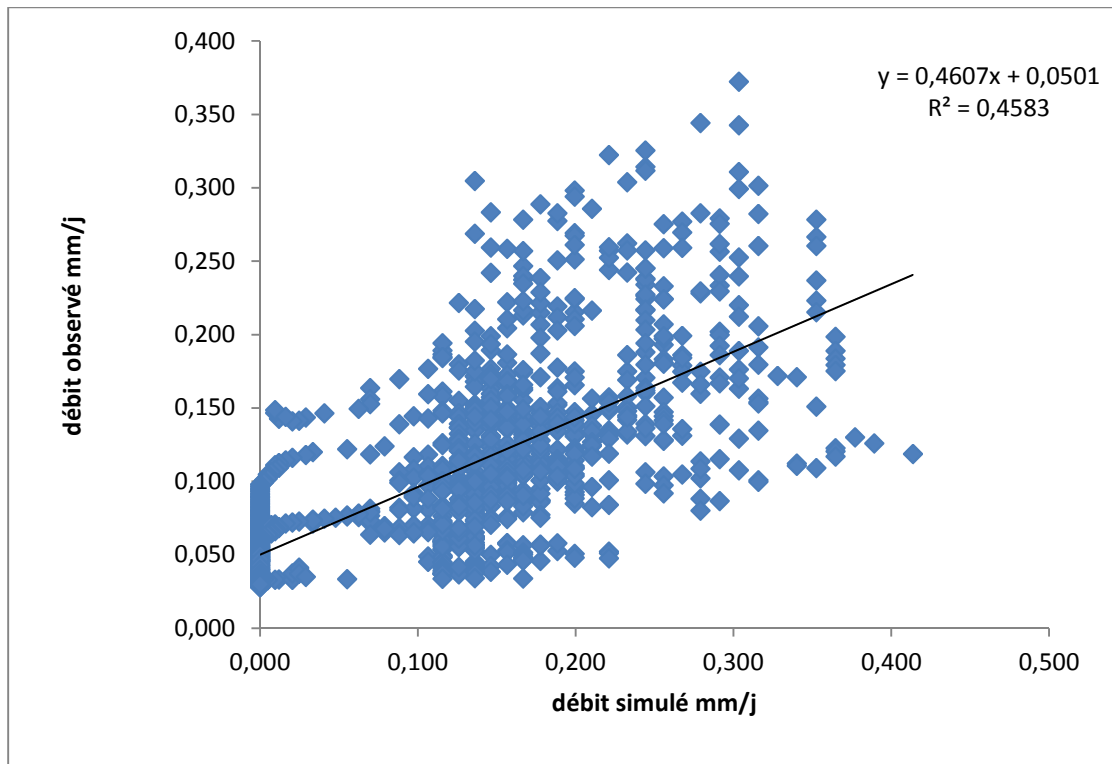


Fig.50 corrélation entre débit observée et simulé

b. Validation de GR4j (01/01/1971-31/12/1972)

Le résultat de la validation fig.51 dans laquelle nous avons utilisé les valeurs des précipitations, débits et ETP qui n'ont pas été utilisés lors du calage confirme que le modèle GR4j est mal validé par ce que certaines périodes montrent des augmentations de débit sans pluie correspondante. Le modèle semble avoir de grosses difficultés sur ce bassin, qui pourraient en partie venir de problèmes liés à la fiabilité des données ou à la présence du lac de sidi M'hamed Benali qui en cas de crues au niveau de l'oued Mekkara une partie des débits est dévié vers le lac et peut rejoindre le Barrage de sarno vis le lac. Pour cela on peut considérer que le GR4j est mal callé.

Le modèle GR4j appliqué aux données journaliers de l'oued Sarno ne s'adapte pas aux faibles valeurs des débits qui ont tendance de réduire aussi la qualité du calage et de la validation.

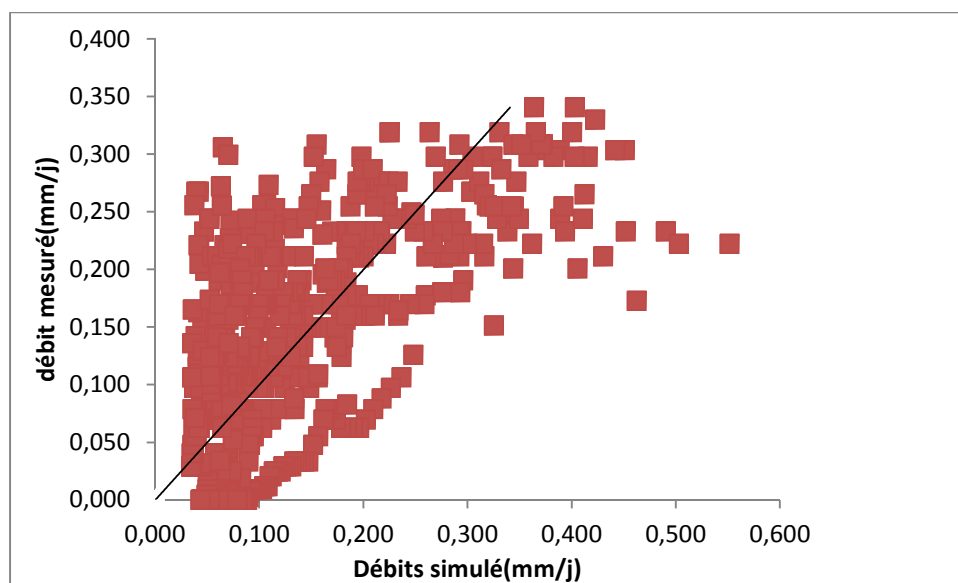


Fig. 51 validation de GR4j

Modélisation pluie-débit par le GR dans le bassin de l'oued SARNO

Conclusion générale et perspective :

Le modèle hydrologique est devenu un outil indispensable pour divers domaines : Aménagement, construction des ouvrages hydrauliques, prévention et prédétermination des crues, études des changements climatiques, impacts anthropiques, impacts des catastrophes naturelles, reconstitution des climats par la paléontologie...

Le but de ce travail est l'application du modèle GR Génie Rural suivant les trois pas du temps Annuel, Mensuel et journalier qui permet d'approcher la modélisation hydrologique à l'aide d'un modèle conceptuel de type global.

Nous avons donné décrit dans un premier temps(chapitre 1) un aperçu sur la modélisation hydrologique ; ensuite nous avons présenté la zone d'étude (bassin versant SARNO)(chapitre2), et l'hydrologie(chapitre 3), et enfin un chapitre 4 consacré aux description et application du modèle GR sur notre bassin versant. Ce modèle dont les paramètres d'entrée sont les précipitations et L'ETP calculées par la méthode D'LOUDIN et le paramètre de sortie le débit mesuré.

Dans l'application du modèle GR sur le bassin versant SARNO nous avons rencontré des difficultés lors du calage et validation suivant les trois pas du temps, à cause des erreurs:

- liées au modèle (structure + paramètres) ;
- liées aux mesures ;
- Erreurs de mesure et faible représentativité spatiale de certaines mesures ponctuelles ;
- Collecte et traitement des données (ex. débit et courbe de tarage) ;
- Représentativité agrégée de certaines variables (ex. pluies) ;
- Imperfection des modèles utilisés pour le calcul des données d'entrée (ex. ETP, ...) ;
- Méconnaissance de certaines perturbations anthropiques ;

La modélisation résulte d'une interaction entre un modèle et un jeu de données, tous deux assortis d'incertitudes: les approximations dans la structure du modèle, la disponibilité, l'adéquation et la précision limitées des informations utilisées, et la faible compatibilité des trois échelles (point de mesure, maille de discrétisation, bassin versant) auxquelles elles sont acquises, rendent difficiles tout à la fois le calage et la validation du modèle, et assortissent les simulations d'une incertitude souvent large mais trop rarement connue. Si bons soient-ils, un modèle n'est pas la réalité, une

Modélisation pluie-débit par le GR dans le bassin de l'oued SARNO

simulation n'est pas une expérience; un modèle ne donne pas de preuves, tout au plus des arguments - mais c'est déjà beaucoup! Interfaces désormais indispensables entre théorie et pratique, les modèles sont utiles et utilisables malgré leurs défauts et limites, sous réserve que puisse être apprécié le degré de confiance à accorder à leurs simulations et prévisions [Morton, 1993]

Comme le souligne Beck [1987], le choix d'un modèle pose un dilemme:

- soit un modèle simple, facile à caler mais à domaine de validité étroit, ayant un faible pouvoir d'extrapolation.
- soit un modèle détaillé, à large domaine de validité mais difficile à caler, fournissant des simulations correctes mais assorties d'une large incertitude.

L'étude des paramètres physique du bassin versant Sarno nous a conduits à avancer que l'on est en présence d'un bassin plat, allongé, à pente faible et évoluant vers un état de vieillesse.

L'étude climatologique nous a donné que La région d'étude jouit d'un climat semi-aride caractérisé par un hiver chaud et sec, avec des précipitations annuelles moyennes de 352mm.

L'étude du régime hydrologique nous a permis de calculer le débit moyen annuel de la période 1963-1973 qui est de 0.41 m³/s.

Ensuite nous avons tenté la modélisation pluie-débit par le GR suivant les trois pas du temps dont les paramètres d'entrée sont les précipitations et l'ETP (calculée par la méthode d'Oudin) et le paramètre de sortie est le débit.

L'application du modèle GR pour le bassin versant Sarno s'avère très difficile et donne les résultats suivants :

Pour les données annuelles un coefficient de Nash de 74% et le coefficient de détermination R^2 de 0.75 (calage acceptable)

Pour les données mensuelles le coefficient de Nash de 82% et le coefficient de détermination R^2 de 0.72 (calage acceptable)

Pour les données journalières le coefficient de Nash de 62% et le coefficient de détermination R^2 est de 0.45 (calage médiocre)

La phase de validation dans laquelle, nous avons introduit de nouvelles données qui n'ont pas été utilisées pour le calage a donné des résultats non satisfaisants suite au calage.

Modélisation pluie-débit par le GR dans le bassin de l'oued SARNO

Ce modeste travail représente un premier essai d'utilisation du modèle globale GR qui n'a pas donné de bons résultats pour notre bassin. Il serait alors souhaitable de tester d'autres modèles qui existent dans la littérature sur la modélisation hydrologique.

Bibliographie

Andréassian, V., 2002. Impact de l'évolution du couvert forestier sur le comportement hydrologique des bassins versants. Thèse de Doctorat, Université Pierre et Marie Curie Paris VI, Cemagref (Antony), 276 pp.

Andréassian, V., Hall, A., Chahinian, N. et Schaake, J., 2006. Introduction and Synthesis: Why should hydrologists work on a large number of basin data sets? In: V. Andréassian, A. Hall, N. Chahinian and J. Schaake (Editors), Large sample basin experiments for hydrological model parameterization: Results of the Model Parameter Experiment - MOPEX. IAHS Publication n°30 7, pp. 1-5.

Andréassian, V., Parent, E. et Michel, C., 2003. A distribution-free test to detect gradual changes in watershed behavior. Water Resources Research 39(9), 1252.

Ambroise, B., 1999. La dynamique du cycle de l'eau dans un bassin versant (processus, facteurs, modèles) Centre d'Études et de Recherches éco-géographique (CEREG, EP 2047 CNRS) Université Louis Pasteur de Strasbourg,

Bouanani, R., 2010. Modélisation de la fonction pluie-débit application au bassin versant de la TAFNA (NW-Algérien).Université Tlemcen.

BENHAZIL, L., 2011.Modélisation de la fonction pluie-débit application au bassin versant de l'oued Isser (NW-Algérien).Université Tlemcen.

BENSLIMANE, SI., 2009. Modélisation de la fonction pluie-débit application au bassin versant de l'oued Meffrouche .Université Tlemcen.

Chanigui M., 1993. Comportement hydrogéologique d'un bassin en milieu semi-perméable exemple : Bassin versant de l'Oued SARNO. Mémoire d'ingénieur d'état option hydrogéologie. Université d'Oran

CHAPPONNIER A., 2005. Fonctionnement hydrologique d'un bassin versant montagneux semi-aride Cas du bassin versant du Rehraya (Haut Atlas marocain) Thèse pour obtenir le grade de Docteur de l'Institut National Agronomique Paris-Grignon

Edijatno, 1991. Mise au point d'un modèle élémentaire pluie-débit au pas de temps journalier. Thèse de Doctorat, Université Louis Pasteur/ENGEE, Strasbourg, 242 pp.

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

Edijatno, Nascimento, N.O., Yang, X., Makhlouf, Z. et Michel, C., 1999. GR3J: a daily watershed model with three free parameters. Hydrological Sciences Journal 44(2), 263-277.

Fourmigué, P. et Lavabre, J., 2005. Prévion de crues avec le modèle conceptuel pluie-débit GR3H. Revue des Sciences de l'Eau 18(1), 87-102.

Fenet , B.,1975. : Recherches sur l'alpinisation de la bordure septentrionale du bouclier africain à partir de l'étude d'un élément de l'Orogène nord-maghrébin les monts du Djebel Tessala et les massifs du littoral oranais thèse du 3 cycles 75.

Gaume E.,2002. Chapitre 2 et 3 ; Hydrologie de bassins versants et modélisation Pluie-débit ; Ecole Nationale des ponts et Chaussées.71 p.

Henine H., 2005. Interfaçage entre un modèle hydrologique/ modèle dynamique au sein d'un système d'information intégré sous web incluent les SIG ; mémoire de magister en hydraulique ; Ecole National polytechnique Alger, 114p.

Izabella Z., 2002. Incertitude et Ambiguïté dans la modélisation hydrologique

Discussion, développements méthodologiques et application à l'hydrologie de crue en Ardèche. Thèse de Doctorat. Institut national polytechnique de GRENOBLE

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.

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.

MAGNE J. (1978) — Etudes microstratigraphiques sur le Néogène de la Méditerranée nord-occidentale. Le Néogène du Languedoc méditerranéen. Trav. du Lab. de Géol. Médit. Thèse, Toulouse, 438 p.

Makhlouf, Z., 1994. Compléments sur le modèle pluie-débit GR4J et essai d'estimation de ses paramètres. Thèse de Doctorat, Université Paris XI Orsay, 426 pp.

Makhlouf, Z. et Michel, C., 1994. A two-parameter monthly water balance model for French watersheds. *Journal of Hydrology* 162, 299-318.

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.

Michel, C., 1983. Que peut-on faire en hydrologie avec un modèle conceptuel à un seul paramètre ? *La Houille Blanche*(1), 39-44.

Mouelhi, S., 2003. Vers une chaîne cohérente de modèles pluie-débit conceptuels globaux aux pas de temps pluriannuel, annuel, mensuel et journalier. thèse de Doctorat, ENGREF, Cemagref Antony, France, 323 pp.

Mouelhi, S., Michel, C., Perrin, C. et Andreassian, V., 2006a. Linking stream flow to rainfall at the annual time step: the Manabe bucket model revisited. *Journal of Hydrology* 328, 283-296.

Mouelhi, S., Michel, C., Perrin, C. et Andréassian, V., 2006b. Stepwise development of a two-parameter monthly water balance model. *Journal of Hydrology* 318(1-4), 200-214.

Nascimento, N.O., 1995. Appréciation à l'aide d'un modèle empirique des effets d'action anthropiques sur la relation pluie-débit à l'échelle du bassin versant. Thèse de Doctorat, CERGRENE/ENPC, Paris, 550 pp.

Oudin, L., 2004. Recherche d'un modèle d'évapotranspiration potentielle pertinent comme entrée d'un modèle pluie-débit global. Thèse de Doctorat, ENGREF (Paris) / Cemagref (Antony), 495 pp.

Oudin, L., Andréassian, V., Perrin, C. et Anctil, F., 2004. Locating the sources of low-pass behaviour within rainfall-runoff models. *Water Resources Research* 40(11), W11101.

Oudin, L., Hervieu, F., Michel, C., Perrin, C., Andréassian, V., Anctil, F. et Loumagne, C., 2005 a. Which potential evapotranspiration input for a rainfall-runoff model? Part 2 - Towards a simple and efficient PE model for rainfall-runoff modelling. *Journal of Hydrology* 303(1-4), 290-306.

Oudin, L., Michel, C. et Anctil, F., 2005b. Which potential evapotranspiration input for a rainfall-runoff model? Part 1 - Can rainfall-runoff models effectively handle detailed potential evapotranspiration inputs? *Journal of Hydrology* 303(1-4), 275-289.

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

Perrin, C., Michel, C. et Andréassian, V., 2001. Does a large number of parameters enhance model performance? Comparative assessment of common catchment model structures on 429 catchments. *Journal of Hydrology* 242(3-4), 275-301.

Perrin C., 2001. Modélisation en Environnement: Introduction à la modélisation hydrologique globale, Cours., Cemagref Unité de Recherche Hydrosystèmes et Bioprocédé parc de Tourvoie, Antony, 48p.

Perrin, C., Michel, C. et Andréassian, V., 2003. Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *Journal of Hydrology* 279(1-4), 275-289.

Rojas-Serna, C., 2005. Quelle connaissance hydrométrique minimale pour définir les paramètres d'un modèle pluie-débit? Thèse de Doctorat, Cemagref (Antony), ENGREF (Paris), France, 319 pp.

Tangara, M., 2005. Nouvelle méthode de prévision de crue utilisant un modèle pluie-débit global. Thèse de Doctorat, EPHE, Paris, 374 pp.

Turc, L., 1955. Le bilan d'eau des sols. Relations entre les précipitations, L'évaporation et l'écoulement. *Ann. Agr.* 6, 5-131.

ZENNAKI, A., 2009. Modélisation de la fonction pluie-débit application au bassin versant de l'oued Mouilah. (NW-Algérien). Université Tlemcen.

Liste des figures

Figure 1 : les différentes approches de modélisation [GAUME.2002].....	5
Figure 2 : Situation géographique du bassin versant SARNO.....	10
Figure 3: Carte du réseau Hydrographique du bassin versant de SARNO....	11
Figure 4 : rapport des longueurs.....	13
Figure 5 : rapport de confluence.....	14
Figure 6 : rapport des aires moyens.....	14
Figure 7 : histogramme des fréquences altimétrique.....	17
Figure 8 : courbe hypsométrique du bassin versant de l'oued SARNO.....	17
Figure 9 : profil en long de l'oued SARNO.....	20
Figure 10 : Carte géologique du bassin versant SARNO	24
Figure 11 : variations interannuelles des précipitations de la station TESSALA (1964-2009).....	26
Figure 12 : variations interannuelles des précipitations de la station AIN TRID (1964-2009).....	26
Figure 13 : Précipitations moyennes mensuelles à la station TESSALA (1964-2009).....	27
Figure 14 : précipitations moyennes mensuelles à la station AIN TRID (1962-2009).....	28
Figure 15 : histogramme des précipitations saisonnières de TASSALA (1964-2009)	29

Figure16: histogramme des précipitations saisonnières d'AIN TRID (1962-2009).....	30
Figure 17 : ajustement des précipitations d'AIN TRID.....	32
Figure 18 : ajustement des précipitations de TESSALA.....	34
Figure 19 : gradient des précipitations du littoral oranais d'après SELTZER (1946).....	37
Figure 20 : variations interannuelles des températures de la station du barrage SARNO (1995-2005).....	38
Figure 21 : courbe des températures moyennes, maximales et minimales mensuelles de la station du BARRAGE SARNO (1995-2005).....	39
Figure 22 : Courbe pluviothermique station AIN TRID (1995-2005).....	40
Figure 23 : Courbe ombrothermique station AIN TRID (1995-2005).....	41
Figure 24 : Abaque de Demartone.....	43
Figure 25 : Climagramme d'Emberger STATION AIN TRID 1995-2005.....	45
Figure 26 : ABAQUE DE WUNDT.....	47
Figure 27 : Abaque de VERDEIL.....	48
Figure 28 : Variation interannuel des débits mesurées (1953-1973).....	57
Figure 29 : Ajustement des débits annuels (1953-1973) à la loi log Normal....	58
Figure 30 : Courbe des débits mensuels (1953-1973).....	60
Figure 31 : courbe du coefficient mensuel de la station SARNO (1953-1973)...	61
Figure 32 : courbe des débits moyens journaliers mesurés (1962-1973).....	62
Figure 33 : courbe des débits classés (1962-1973).....	63
Figure 34 : hydrogramme de crue.....	64
Figure 35 : Représentation en % des volumes (monté de crue ; décrue et tarissement).....	70
Figure 36 : ajustement des débits max (63-73) à la loi de Gumbel.....	72

Figure 37 : Schéma de la structure du modèle GR2M.....	79
Figure 38 : Schéma de la structure du modèle GR4J.....	81
Figure 39 : visualisations de la qualité du calage GR1A.....	88
Figure 40 : Corrélation entre les débits observés et les débits simulés (1954-1967).....	89
Figure 41 : Validation GR1A SARNO (1968-1974).....	89
Figure 42 : courbe indiquant le niveau S du réservoir de production.....	91
Figure 43 : courbe indiquant le niveau R du réservoir de routage.....	91
Figure 44 : visualisation de la qualité du calage GR2M.....	92
Figure 45 : corrélation entre les débits observés et les débits simulés	92
Figure 46 : Validation du GR2M.....	93
Figure 47 : courbe indique le niveau S du réservoir de production GR4j.....	95
Figure 48 : courbe indique le niveau R du réservoir de routage GR4j.....	95
Figure 49 : visualisation de la qualité du calage GR4j.....	96
Figure 50 : corrélation entre débit observée et simulé GR4j.....	97
Figure 51 : Validation du GR4j.....	98

Listes de tableaux

Tableau 1 : classification des talwegs.....	11
Tableau 2 : rapport de confluence.....	13
Tableau 3 : répartition altimétrique du bassin versant de l'oued SARNO.....	16
Tableau 4 : indice de pente de ROCHE.....	18
Tableau 5 : classification du relief selon I_g par L'ORSTOM.....	19
Tableau 6 : classification du relief selon D_s	19
Tableau 7 : Profil en long de l'oued SARNO.....	20
Tableau 8:caractéristiques des stations pluviométrique (TESSALA et AIN TRID)	25
Tableau 9 : valeurs moyennes mensuelles des précipitations de la station de TESSALA (1964-2009).....	27
Tableau 10 : valeurs moyennes mensuelles des précipitations de la station d'AIN TRID (1962-2009).....	28
Tableau 11 : répartition des précipitations saisonnières station TESSALA.....	29
Tableau 12 : répartition des précipitations saisonnières station d'AIN TRID	29
Tableau 13 : paramètres de position des précipitations des stations de TESSALA ET AIN TRID.....	31
Tableau 14 : fréquences des données des précipitations de la station d'AIN TRID.....	32
Tableau 15 : calcul du χ^2 station AIN TRID.....	33
Tableau 16: fréquences des données des précipitations de la station de TESSALA.....	34
Tableau 17 : calcul du χ^2 station TESSALA	35
Tableau 18 : calcul des précipitations pour une période de récurrence donnée.....	36
Tableau 19 : Période de retour du minimum observé	36

Tableau 20 : Période de retour du maximum observé	36
Tableau 21 : répartition des précipitations en fonction de l'altitude (seltzer 1913-1938).....	37
Tableau 22 : valeurs moyennes, maximales et minimales mensuelles des températures de la station du barrage SARNO (1995-2005).....	39
Tableau 23 : Température et précipitation moyenne mensuelles à la station d'AIN TRID.....	40
Tableau 24 : rapport P/T mensuel.....	41
Tableau 25 : calcul des indices climatiques.....	42
Tableau 26 : Indice d'aridité mensuel de DE.MARTONNE.....	42
Tableau 27 : Indices mensuelles de MORAL.....	44
Tableau 28 : Evapotranspiration potentielle corrigée mensuelle et annuelle station AIN TRID.....	49
Tableau 29 : évapotranspiration de SERRA	50
Tableau 30 : valeurs P et ETP.....	50
Tableau 31 : bilan hydrique de THORNTHWAITE.....	52
Tableau 32 : bilan hydrologique.....	53
Tableau 33 : évapotranspiration des différentes formules utilisées.....	53
Tableau 34 valeurs des débits moyens annuels de l'oued SARNO m ³ /s (1953-1973).....	56
Tableau35 Etude statistique des débits annuels (1953-1973).....	57
Tableau36 Test de khi2.....	59
Tableau 37 débits moyens annuels pour des récurrences données.....	59
Tableau 38 :valeurs des débits moyens mensuels de l'oued sarno (1953-1973).....	60

Tableau 39 valeurs des coefficients mensuels des débits de l'oued sarno.....	61
Tableau 40 débits caractéristiques de l'oued sarno (1962-1973).....	63
Tableau 41 : volumes totaux des crues enregistrés (1963-1973).....	65
Tableau 42 : volumes annuelles de crue (1963-1973).....	67
Tableau 43 : étude statistique des débits Max (1963-1973).....	71
Tableau 44: valeurs des débits max pour des récurrences données (1953-1973).....	73
Tableau 45 : Valeur des paramètres du modèle GR2M obtenues sur un large échantillon de bassins versants.....	80
Tableau 46 : Valeur des paramètres du modèle GR4J obtenues sur un large échantillon de bassins versants.....	84
Tableau 47 : Application de GR1A	87
Tableau 48 : Application de GR2M	90
Tableau 49 : Application de GR4j.....	94

ANNEXE :

Valeurs des précipitations moyennes mensuelles et annuelles (mm) de la station D'AIN TRID

	sept	oct	Nov	dec	janv	fev	Mars	avril	mai	juin	juil	aout	annuelle
1964						26,9		87,4		31,6	0,0	0,0	145,9
1965	2,0	51,7	17,8	74,7	2,8	6,2	6,3	12,5	44,1	2,4	0,0	0,0	220,5
1966	14,5	227,1	39,3	10,0	25,6	61,9	16,1	123,1	7,4	4,6	0,0	0,0	529,6
1967	0,0	18,1	45,1	184,2	10,2	65,8	74,8	49,4	140,5	9,2	0,0	0,0	597,3
1968	4,3	0,0	68,2	104,3	37,3	111,3	91,5		46,8	0,0		0,0	463,7
1969	14,8	135,7	43,0	131,2		2,3	86,9	38,1	5,8	3,4	0,0	0,0	461,2
1970	0,0	19,1	5,3	38,2	103,9	10,0	94,0	56,0	146,9	7,7	0,0	0,0	481,1
1971	9,6	10,6	164,2	77,6	134,7	7,9	14,2	20,3	66,2	3,5	1,2	0,3	510,3
1972	16,3	46,0	50,6	24,0	105,8	116,6	43,0	61,1	1,3	6,7	0,0	1,4	472,8
1973	18,9	8,1	27,5	117,6	17,9	109,6	162,8	116,4	5,6	9,8	0,0	0,0	594,2
1974	14,5	63,8	22,4	0,0	16,8	60,8	144,7	158,6	31,4	0,9	0,0	2,6	516,5
1975	2,6	0,5	80,7	29,7	52,7	124,6	15,7	55,0	83,0	5,3	9,4	13,3	472,5
1976	32,2	43,6	28,2	71,0	74,0	25,0	33,4	4,2	51,2	5,7	19,8	5,2	393,5
1977	1,6	45,3	60,6	20,3	70,3	20,7	45,3	59,7	26,2	4,3	0,0	0,1	354,4
1978	2,1	81,4	45,9	48,1	18,3	109,0	51,5	54,7	6,4	1,2	2,9	0,4	421,9
1979	20,1	98,9	45,8	157,6	72,6	30,1	126,3	19,0	27,7	0,8	0,0	1,2	600,1
1980	2,5	31,2	20,0	202,9	29,8	81,8	49,3	50,5	13,5	47,7	0,0	6,5	535,7
1981	3,7	1,2	1,2	32,2	14,4	91,8	6,6	29,0	47,3	1,2	0,7	0,4	229,7
1982	3,4	87,2	118,0	118,0	0,0	72,3	36,4	12,7	8,0	0,0	2,9	1,9	460,8
1983	0,0	0,0	24,7	64,7	30,1	110,9	48,4	13,7	77,3	5,2	0,0	0,0	375,0
1984	4,9	14,6	226,8	33,0	53,0	30,5	122,9	44,8	82,3	0,0	0,0	0,0	612,8
1985	3,7	0,0	78,4	51,7	92,0	133,1	74,5	60,6	10,0	6,7	0,0	0,0	510,7
1986	24,5	43,2	46,4	35,4	66,3	119,2	25,2	2,4	16,2	1,6	9,8	4,9	395,1
1987	11,8	32,0	53,5	38,3	110,1	28,1	22,4	40,1	20,4	18,0	0,0	0,0	374,7
1988	16,2	8,1	43,8	5,9	35,3	27,7	104,9	47,1	8,2	12,8	1,4	0,0	311,4

1989	17,2	9,7	28,3	29,9	119,9	2,4	16,5	66,3	29,0	3,3	4,5	1,2	328,2
1990	8,5	34,5	73,7	76,9	58,8	66,1	161,7	9,0	19,1	8,4	1,4	4,6	522,7
1991	22,7	24,8	63,9	18,7	40,9	30,1	91,5	26,8	79,8	33,5	1,2	2,8	436,7
1992	2,6	13,1	35,6	20,9	3,4	57,5	28,4	53,1	36,6	3,8	0,0	4,5	259,5
1993	10,7	34,1	53,4	42,8	54,9	45,5	5,3	37,0	9,9	0,0	1,2	2,7	297,5
1994	36,0	65,1	46,2	0,0	34,6	24,6	60,4	21,7	0,0	0,0	0,0	2,6	291,2
1995	12,9	17,0	18,9	45,8	51,8	81,4	39,4	53,3	23,7	1,3	19,2	0,3	365,0
1996	18,2	4,4	8,2	17,4	27,1	0,0	0,0	32,3	14,1	0,0	0,0	5,8	127,5
1997	53,6	25,7	55,1	40,2	31,4	38,8	14,0	31,4	28,5	6,5	0,0	6,4	331,6
1998	8,9	6,4	22,7	31,4	61,7	34,2	116,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	281,9
1999	15,4	18,0	85,6	95,5	0,0	0,0	15,9	21,9	28,0	0,0	0,0	1,6	281,9
2000	20,4	64,7	45,3	18,3	96,1	59,4	5,0	17,0	8,4	0,0	0,0	0,0	334,6
2001	10,0	27,7	160,2	37,1	1,7	2,8	29,2	48,1	53,8	0,0	0,0	10,4	381,0
2002	0,0	23,0	80,7	4,0	140,1	83,1	20,3	26,2	0,0	3,5	0,0	0,0	380,9
2003	0,0	25,0	30,0	66,3	38,0	23,2	14,3	29,9	61,1	0,0	0,0	0,0	287,8
2004	21,9	24,3	75,6	96,8	18,1	30,3	28,2	7,4	0,0	0,0	0,0	0,0	302,6
2005	11,5	20,8	91,0	27,2	97,3	69,7	14,7	27,4	32,4	0,0	0,0	0,0	392,0
2006	2,8	0,0	17,9	65,2	34,3	24,0	100,6	65,5	19,9	0,0	0,0	1,3	331,5
2007	7,5	74,5	47,7	10,0	26,0	22,5	6,8	0,5	44,1	0,0	0,0	0,0	239,6
2008	47,4	112,8	66,3	110,8	102,1	31,6	46,8	61,2	7,2	0,0	0,0	0,5	586,7
2009	34,8	0,0	17,8	64,4	93,1	66,5	49,0	26,8	30,8		0,0		383,2
moy mensuelle	12,23	35,76	53,49	53,96	48,03	49,54	51,69	42,16	33,42	5,22	1,58	1,73	395,3

Valeurs des précipitations moyennes mensuelles et annuelles (mm) de la station TESSALA

	sept	oct	nov	dec	janv	fev	mars	Avril	Mai	Juin	Juil	aout	annuelle
1964	0,0	3,0	36,0		15,5	20,5	34,9	73,0	0,0	32,4	0,0	0,0	215,3
1965	3,1	51,2	19,7	76,0	2,9	6,6	6,3	12,5	42,0	2,6	0,0	0,0	222,9
1966	14,3	231,0	39,0	11,5	26,6	64,0	17,3	121,5	6,9	4,1	0,0	0,0	536,2
1967	0,0	17,4	36,1	166,4	0,4	65,3	74,1	40,2					399,9
1972							74,8	0,0	0,0	13,9		0,2	88,9
1973						58,5	146,6						205,1
1974	0,0	65,0	32,9	0,0	101,3	133,3	47,3	85,0	6,5	0,0	0,0	0,0	471,3
1975	0,0	0,0	61,8	22,0	53,2	47,9	1,5	10,0	3,5	0,0	0,0	1,0	200,9
1976	3,5	8,5	6,0	31,0	38,3	21,0	22,0	0,0	4,0				134,3
1977	0,0	8,5	64,5	7,5	35,1	1,5	5,3	77,1	26,5	0,0	0,0	0,0	226,0
1978	0,0	43,0	62,5	25,5	5,0	101,1	44,0	36,5	7,7	0,0	0,0	0,0	325,3
1979	25,0	123,0	114,5	61,5	35,5	28,6	128,3	1,3	17,5	0,0	0,0	0,0	535,2
1980	0,3	36,8	31,5	292,3	17,6	55,9	25,5	59,2	7,9	31,1	0,3	0,5	558,9
1981	2,0	3,1	0,0	21,3	13,1	106,9	8,2	13,9	85,4	0,0	0,5	0,0	254,4
1982	0,3	59,1	78,1	67,1	0,0	37,5	2,3	0,5	0,0	0,0	1,5	0,3	246,7
1983	0,0	0,0	29,6	75,2	40,0	60,6	20,8	0,5	75,6	0,0	0,0	0,0	302,3
1984	0,8	2,7	140,9	17,5	19,3	12,5					0,0	0,0	193,7
1985	0,0	0,0	33,3	15,3	53,3	89,2	50,0	26,7	0,5	0,0	0,0	0,0	268,3
1986	0,0	0,0				83,0	52,7	29,0	0,0	0,0		7,0	171,7
1987	1,5	3,9	31,1	45,9	73,0	15,0	16,8	24,0	28,7	15,7	0,0	0,0	255,6
1988	42,7	6,5	37,9	2,3	2,5	23,7	65,6	44,0	7,9	4,3	0,0	0,0	237,4
1989	24,3	7,9	17,1	23,0	133,6	0,0	23,5	56,3	20,0	0,8	0,0	1,8	308,3
1990	16,0	48,4	60,5	49,7	63,9	48,8	115,7	4,7	24,3	4,3	1,0	0,8	438,1
1991	7,4	44,7	50,0	8,4	30,4	29,7	86,3	38,9	32,1	26,5	0,0	0,0	354,4
1992	0,0	11,4	25,6	9,6	0,0	68,1	15,6	57,7	56,6	2,7	0,0	0,0	247,3
1993	10,0	30,4	60,3	11,9	68,1	29,3	4,7	31,8	9,5	0,0	0,0	0,0	256,0

1994	32,1	30,6	22,5	14,1	16,9	30,6	189,8	16,2	0,0	0,0	0,0	9,8	362,6
1995	5,3	6,8	20,3	41,5	93,9	122,8	41,7	48,0	35,3	0,0	0,0	0,0	415,6
1996	28,1	9,3	12,0	34,7	64,8	0,0	0,0	53,2	10,7	0,0	0,0	0,0	212,8
1997	34,1	25,1	62,9	25,6	22,7	36,0	17,0	40,3	29,7	0,0	0,0	0,0	293,4
1998	0,0	3,5	7,1	8,0	50,4	34,1	91,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	194,6
1999	13,3	13,7	71,2	120,1	0,0	0,0	8,4	30,5	38,0	0,0	0,0	0,0	295,2
2000	20,0	78,9	69,9	21,6	152,5	52,6	0,0	6,0	12,0	0,0	0,0	0,0	413,5
2001	13,1	34,5	179,1	30,8	0,0	0,0	11,4	61,2	17,7	0,0	0,0	7,0	354,8
2002	0,0	12,4	72,6	1,8	180,9	106,2	13,1	28,8	22,3	0,0	0,0	0,0	438,1
2003	38,7	20,4	31,0	109,9	29,3	8,5	12,3	14,5	40,2	7,7	0,0	0,0	312,5
2004	0,0	12,5	56,5	105,5	32,8	47,8	24,6	10,0	0,0	0,0	2,0	0,0	291,7
2005	5,5	6,0	76,0	11,0	104,4	67,9	15,0	23,6	27,0	0,0	0,0	0,0	336,4
2006	18,0	0,0	29,0	57,6	21,4	30,5	131,9	58,3	16,0	0,0	0,0	0,0	362,7
2007	3,8	68,3	47,1	6,5	24,2	16,0	10,0	9,8	26,4	0,0	0,0	0,0	212,1
2008	20,5	82,2	53,6	116,8	99,7	19,1	22,1	44,1	19,7	0,0	0,0	0,0	477,8
2009	36,1	0,0	19,0	22,4	96,3	75,7	55,0	13,3	27,1	0,0	0,0	17,5	362,4
moy mens	9,995	28,802	45,207	42,114	43,305	44,198	41,283	31,002	18,695	3,479	0,126	1,093	309,300

Valeurs des débits mesurés moyennes mensuelles et annuelles (m³/s) de la station Aval du bassin versant SARNO (1953-1973)

	sept	oct.	nov.	déc.	jan	fév.	mars	avril	mai	juin	juil.	aout	annuel
1953	0	0,007	0,023	0,021	0,156	0,648	0,364	8,613	0,428	0,051	0,038	0,001	0,86
1954	0	0	0,06	0,24	0,846	0,96	1,5	0,794	0,143	0,062	0,001	0	0,38
1955	0,029	0,015	0,028	0,056	0,256	1,66	0,559	0,284	0,147	0,015	0	0	0,25
1956	0	0,023	0,14	0,12	0,11	0,082	0,13	0,092	0,08	0,009	0	0	0,07
1957	0,00	0,00	0,21	0,08	0,26	0,16	0,04	0,014	0,00	0,00	0,00	0,00	0,06
1958	0,00	0,009	0,840	0,340	0,240	0,660	0,200	0,035	0,000	0,000	0,000	0,000	0,19
1959	0,00	0,000	0,071	0,990	0,240	0,330	0,150	0,050	0,005	0,000	0,000	0,000	0,15
1960	0,000	0,000	0,000	0,770	1,200	0,200	0,042	0,035	0,000	0,000	0,000	0,000	0,19
1961	0,000	0,000	0,028	0,022	0,004	2,400	0,060						0,36
1962					0,19	0,20	0,22	0,22	0,21	0,71	0,48	0,12	0,29
1963	0,08	0,04	0,02	0,25	0,40	0,33	0,30	1,12	0,73	0,71	0,64	0,41	0,42
1964	0,54	0,26	0,26	0,57	0,86	0,85	0,93	0,93	0,95	1,06	1,29		0,77
1965	0,607	1,02	0,99	0,95	0,84	0,68	0,50	0,35	0,49	0,35	0,03	0,08	0,57
1966	0,12	0,70	0,52	0,38	0,39	0,34	0,16	0,27					0,36
1967	0,045	0,062	0,12	0,23	0,46	0,41	0,69	0,43	0,79	0,86	0,47	0,37	0,41
1968	0,45	0,38	0,39	0,52	0,48	0,52	0,74	0,80	0,51	0,14	0,00	0,00	0,41
1969	0,00	0,35	0,39	0,44	0,71	0,49	0,53	0,46	0,38	0,14	0,00	0,00	0,32
1970	0,000	0,050	0,000	0,014	0,241	0,192	0,152	0,381	0,546	0,108	0,134	0,055	0,16
1971	0,208	0,185	0,463	0,482	0,639	0,543	0,719	0,712	0,761	0,599	0,416	0,317	0,50
1972	0,407	0,488	0,333	0,550	0,725	1,890	2,320	2,690	0,873	0,938	0,370	0,127	0,98
1973	0,112	0,162	0,197	0,487	0,376	0,740	2,420	3,790	1,590	0,636	0,722	0,280	0,96
moy	0,13	0,19	0,25	0,37	0,46	0,68	0,61	1,10	0,45	0,34	0,24	0,10	0,41

Valeurs des températures moyennes mensuelles (°C) de la station barrage SARNO (1995-2005)

	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	moyenne annuel
1995	19,60	17,87	12,76	8,97	8,50	10,89	11,66	13,43	18,95	20,77	24,29	24,70	16,03
1996	19,14	18,54	14,02	11,49	10,98	9,56	11,40	13,56	15,82	22,25	24,55	24,25	16,30
1997	20,30	15,45	13,17	11,38	10,31	10,65	12,29	15,66	18,13	21,69	23,07	24,78	16,41
1998	22,94	20,05	14,09	10,84	10,02	11,84	12,52	14,19	16,66	22,95	26,23	26,00	17,36
1999	22,83	16,39	12,62	8,45	9,41	7,98	12,41	14,62	20,56	23,31	26,27	26,62	16,79
2000	22,63	25,62	11,35	9,55	7,71	10,84	12,78	14,39	19,46	23,28	26,63	26,97	17,60
2001	22,28	16,47	12,57	11,55	10,02	10,20	14,79	14,19	17,35	24,46	26,29	27,46	17,30
2002	23,12	21,17	12,33	9,43	9,41	10,45	12,65	14,08	17,95	24,54	24,65	24,89	17,06
2003	22,09	18,69	13,82	11,90	7,73	9,43	13,70	14,32	17,93	24,58	27,14	24,53	17,15
2004	21,19	17,15	12,27	8,91	9,22	11,42	11,40	12,91	15,24	22,23	23,02	22,91	15,66
2005	20,42	16,83	9,67	8,28	7,98	7,79	12,32	13,40	19,09	22,25	25,19	24,39	15,63
moy	21,50	18,57	12,61	10,07	9,21	10,09	12,54	14,07	17,92	22,94	25,21	25,23	16,66

Valeurs utilisées aux calages de GR1A (1954-1967)

GR 1A	P (mm)	ETP (mm)	débit mesuré (mm)	Débits simulé (mm)
1954	226,5	1078,229	10.70	7.53
1955	231,5	1099,759	4.76	7.20
1956	341,05	1120,377	31,55	17.76
1957	310,2	1039,129	8,13	19.80
1958	309,25	1043,41	15.00	18.50
1959	401,2	1022,295	24,05	34.84
1960	467,5	1061,731	35.00	51.87
1961	331,05	1027,133	23,25	28.30
1962	307,7	1012,178	44,59	20.04
1963	368,15	1057,03	36,35	26.86
1964	399,05	1054,661	40.00	35.34
1965	564,7	1078,756	95,98	76.88
1966	537,7	1075,47	71,20	80.68
1967	363,45	1094,749	44,53	33.74

valeurs utilisées aux validations GR1A (1968-1974)

GR 1A	P (mm)	ETP (mm)	débit (mm)	Débits simulé (mm)
1968	320,1	1065,123	51,0496512	21.072
1969	328,35	1055,938	50,9916699	21.10
1970	307,8	982,671	40,2759732	21.06
1971	434,2	1024,026	19,3600113	41.64
1972	353,7	1101,968	62,5433747	27.45
1973	242,65	999,52	121,167331	12.72
1974	349,1	1056,89	119,109055	21.32

Modèle pluie-débit annuel GR1A (version Mouelhi et al., 2006)

(Rq: seules les cellules en jaune sont à modifier, les autres sont issues de calculs;
les formules des cellules F38 à u38 sont à recopier sur les lignes suivantes pour les
calculs des pas de temps suivants)

Nom du bassin	oued sarno
---------------	------------

Superficie du bassin (km²)	254
----------------------------	-----

Paramètres modèle	Transf.	Réels
x: Coefficient de correction de l'ETP (mm)	-0,20	0,82

Valeur initiale de la pluie	
Pk-1	250,00

Période	
Durée de la période test (années)	12
Date de départ	1954
Date de fin	1967

Moyenne des pluies observées (mm/an)	380,8
Moyenne des ETP observées (mm/an)	1057,7
Moyenne des débits observés (mm/an)	35,8
Moyenne des racines des débits observés	5,6
Moyenne des log des débits observés	3,3

Critères d'efficacité (%)	
Nash(Q)	74,0
Nash(VQ)	70,8
Nash(ln(Q))	68,8
Bilan	97,3

Valeurs utilisées au calage de GR2M (jan66-dec70)

	Q mes (mm)	P mens (mm)	ETP (mm)	Q simulé (mm)
janv-66	6,22	2,85	37,39	18.96
févr-66	3,43	6,4	43,071	6.27
mars-66	2,64	6,3	68,572	2.90
avr-66	2,76	12,5	92,249	1.59
mai-66	3,48	43,05	116,632	1.03
juin-66	3,37	2,5	133,743	0.65
juil-66	0,74	0	162,974	0.43
août-66	0,95	0	156,951	0.29
sept-66	1,33	14,4	109,137	0.20
oct-66	26,89	229,05	79,286	0.15
nov-66	3,57	39,15	49,79	0.14
déc-66	2,43	10,75	28,427	0.11
janv-67	2,74	26,1	32,439	0.12
févr-67	2,86	62,95	42,84	0.34
mars-67	1,48	16,7	69,95	0.36
avr-67	2,45	122,3	82,89	2.68
mai-67	0,53	7,15	118,738	1.75
juin-67	0,61	4,35	143,329	1.09
juil-67	0,11	0	170,443	0.68
août-67	0,32	0	158,44	0.45
sept-67	0,41	0	109,502	0.30
oct-67	0,63	17,75	80,404	0.22
nov-67	1,84	40,6	50,987	0.18
déc-67	5,27	175,3	39,445	2.64
janv-68	4,32	5,3	32,801	2.02

Valeurs utilisées aux validations de GR2M (jan71-dec73)

	Q mes (mm)	P (mm)	ETP (mm)	Q simulé (mm)
janv-71	4,22	103,9	29,257	0,81
févr-71	0,42	10	36,705	0,74
mars-71	5,27	94	66,532	3,03
avr-71	3,59	56	86,532	4,30
mai-71	13,60	146,9	116,848	14,46
juin-71	1,90	7,7	135,885	6,10
juil-71	0,63	0	160,301	2,88
août-71	0,21	0	150,155	1,57
sept-71	2,64	9,6	97,89	0,96
oct-71	0,74	10,6	67,932	0,63
nov-71	4,75	164,2	42,935	2,62
déc-71	5,17	77,6	31,323	5,83
janv-72	11,28	134,7	30,933	22,10
févr-72	11,60	7,9	37,846	11,46
mars-72	17,40	14,2	69,763	7,34
avr-72	3,69	20,3	84,775	5,15
mai-72	8,54	66,2	124,936	6,23
juin-72	1,27	3,5	139,88	3,09
juil-72	0,74	1,2	171,232	1,68
août-72	0,95	0,3	156,963	0,99
sept-72	1,69	16,3	98,125	0,65
oct-72	2,32	46	73,989	0,52
nov-72	3,59	50,6	43,06	0,56
déc-72	2,53	24	30,229	0,54

févr-68	2,95	65,55	47,281	4.29
mars-68	13,60	74,45	89,507	7.46
avr-68	5,51	44,8	85,898	6.59
mai-68	25,20	140,5	122,027	16.17
juin-68	3,47	9,2	147,879	6.57
juil-68	1,27	0	164,705	3.04
août-68	0,21	0	153,68	1.64
sept-68	0,51	4,3	125,26	0.98
oct-68	0,32	0	75,265	0.62
nov-68	2,86	68,2	44,699	0.56
déc-68	5,69	104,3	31,029	1.64
janv-69	2,11	37,3	31,027	2.19
févr-69	8,29	111,3	35,521	9.10
mars-69	5,38	91,5	64,516	16.63
avr-69	13,57	60,5	77,235	15.26
mai-69	10,12	46,8	106,637	11.12
juin-69	2,25	0	139,969	4.67
juil-69	0,53	0	165,72	2.34
août-69	0,42	0	159,526	1.32
sept-69	1,33	14,8	116,945	0.83
oct-69	6,33	135,7	69,228	1.75
nov-69	6,63	43	41,934	2.02
déc-69	10,86	131,2	30,869	9.56
janv-70	9,91	30,7	30,102	8.62
févr-70	0,29	2,3	40,73	5.15
mars-70	9,70	86,9	59,78	11.08
avr-70	10,82	38,1	85,502	8.77
mai-70	2,74	5,8	118,274	4.36
juin-70	0,71	3,4	120,782	2.34

janv-73	7,70	105,8	31,68	2,55
févr-73	8,54	116,6	42,392	10,98
mars-73	15,71	43	63,395	10,25
avr-73	8,44	61,1	81,875	11,12
mai-73	0,53	1,3	123,118	4,91
juin-73	3,59	6,7	133,613	2,64
juil-73	0,63	0	153,622	1,47
août-73	0,53	1,4	143,074	0,89
sept-73	2,64	18,9	96,301	0,60
oct-73	0,42	8,1	76,238	0,40
nov-73	0,95	27,5	46,131	0,31
déc-73	6,22	117,6	35,691	1,10

juil-70	0,74	0	171,347	1.32
août-70	0,53	0	162,995	0.81
sept-70	0,41	0	110,606	0.52
oct-70	0,42	19,1	69,004	0.36
nov-70	0,51	5,3	43,256	0.25
déc-70	0,74	38,2	31,033	0.21

Modèle pluie-débit mensuel GR2M (version Mouelhi et al., 2006)

(Rq: seules les cellules en jaune sont à modifier, les autres sont issues de calculs; les formules des cellules F41 à AE41 sont à recopier sur les lignes suivantes pour les calculs des pas de temps suivants)

Nom du bassin	oued sarno
---------------	------------

Superficie du bassin (km ²)	254
---	-----

Paramètres modèle	Transf.	Réels
x1: Capacité rés. production (mm)	6,47	645,48
x2: Paramètre d'échange (mm)	0,89	0,89

Valeurs initiales	
Niveau de remplissage initial S0 (max.: x1 mm)	46,00
Niveau de remplissage initial R0 (max.: 60 mm)	50

Période	
Longueur de la période de mise en route (mois)	39
Durée de la période test (mois)	60
Date de départ	04/1969
Date de fin	12/1970

Moyenne des pluies observées (mm/mois)	31,5
Moyenne des ETP observées (mm/mois)	92,9
Moyenne des débits observés (mm/mois)	4,4
Moyenne des racines des débits observés	1,8
Moyenne des log des débits observés	0,9

Critères d'efficacité (%)	
Nash(Q)	82,5
Nash(VQ)	78,2
Nash(ln(Q))	70,0
Bilan	99,4

Modélisation pluie-débit à l'aide du modèle journalier GR4J (Version Perrin et al., 2003)

(Rq: seules les cellules en jaune sont à modifier, les autres sont issues de calculs; les formules des cellules G41 à BQ41 sont à recopier sur les lignes suivantes pour les calculs des pas de temps suivants)

Nom du bassin	oued sarno
---------------	------------

Superficie du bassin (km²)	254
----------------------------	-----

Paramètres modèle	Transf.	Réels
x1: Capacité rés. production (mm)	8,24	3789,54
x2: Paramètre d'échange (mm)	0,34	0,35
x3: Capacité rés. routage (mm)	3,72	41,26
x4: Délai (jours)	1,38	4,47

Valeurs initiales	
Taux de remplissage initial S0/x1	0,25
Taux de remplissage initial R0/x3	0,40

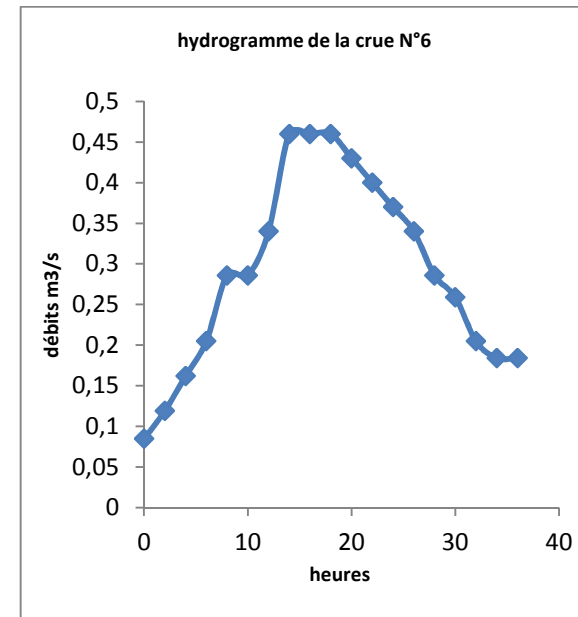
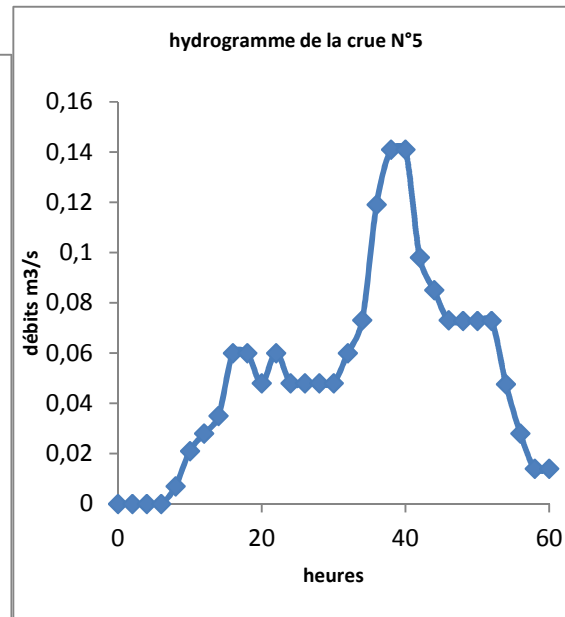
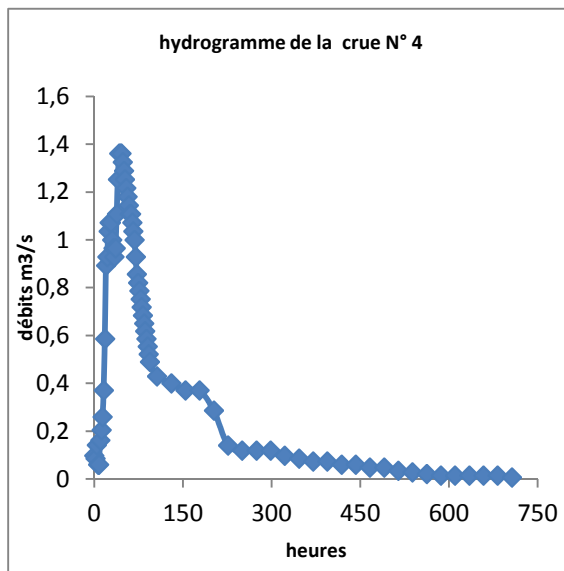
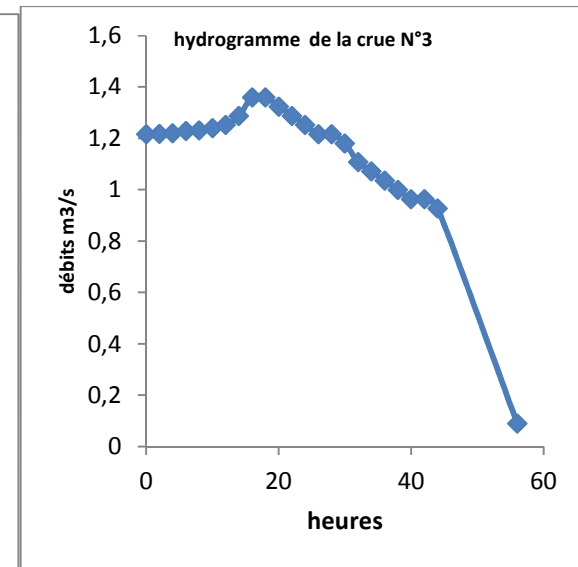
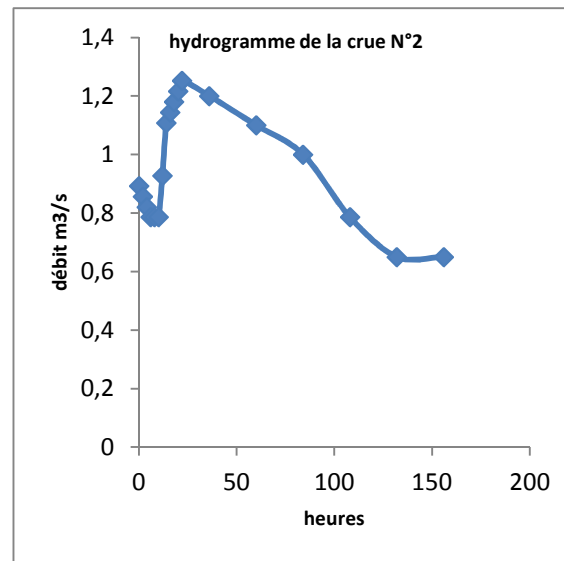
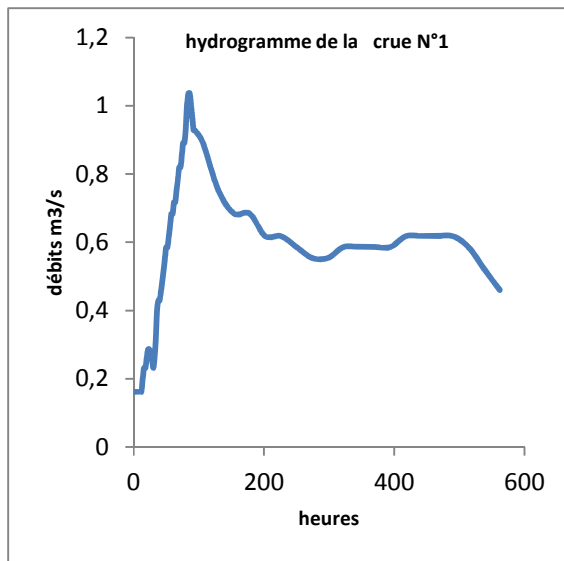
Période	
Longueur de la période de mise en route (j)	366
Durée de la période test (j)	729
Date de départ	01/01/1969
Date de fin	31/12/1970

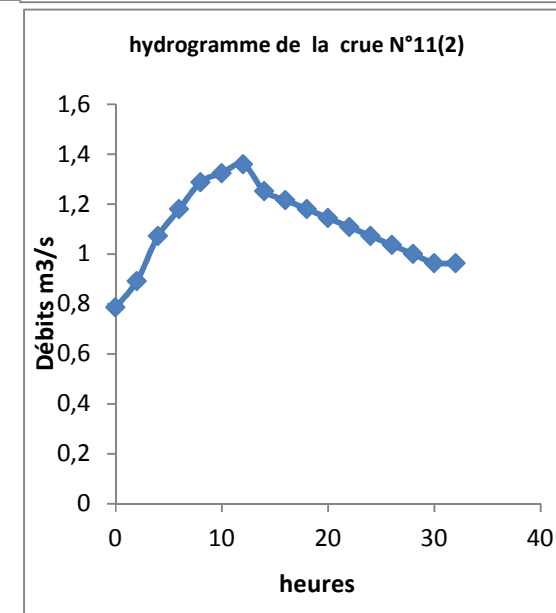
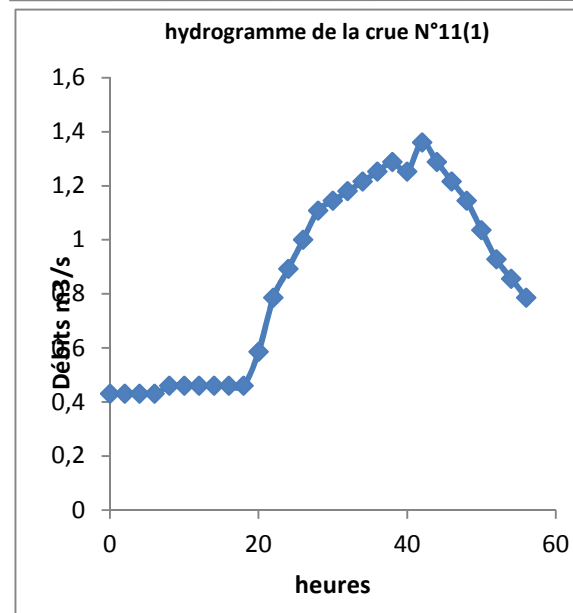
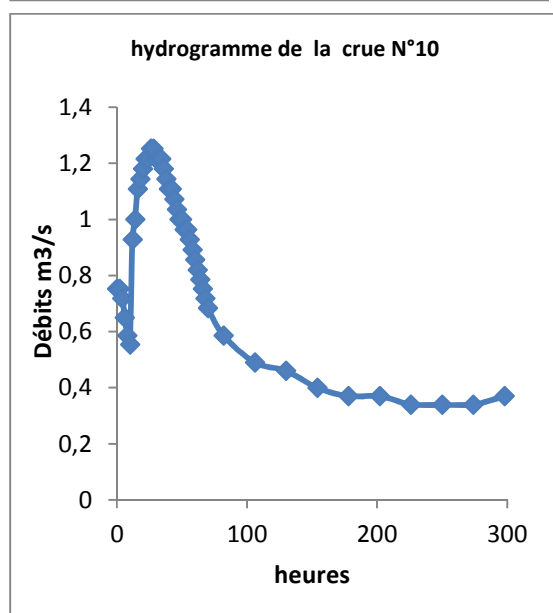
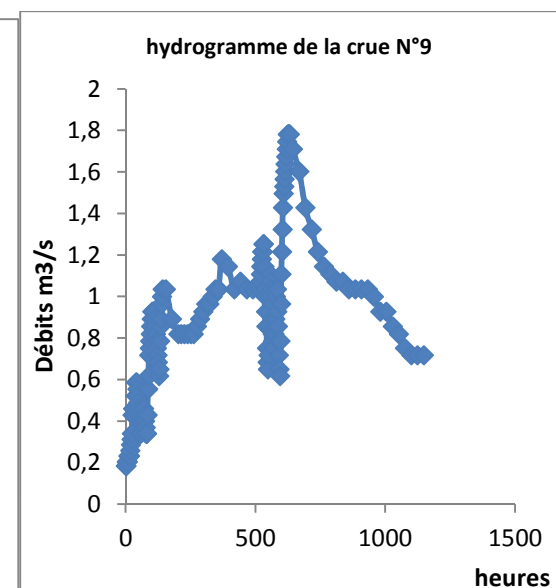
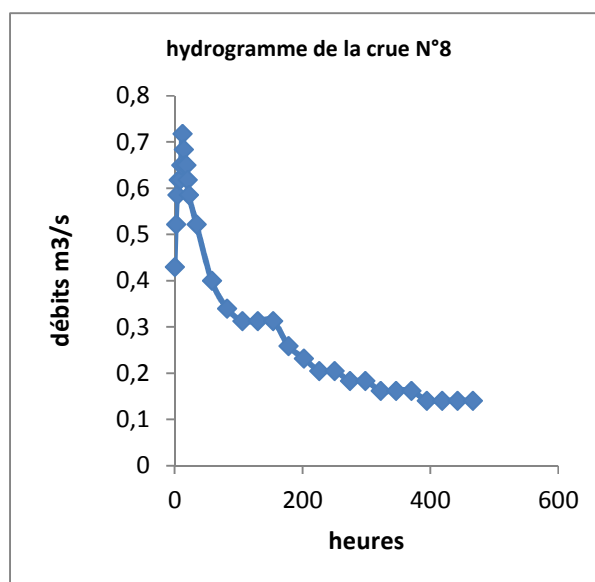
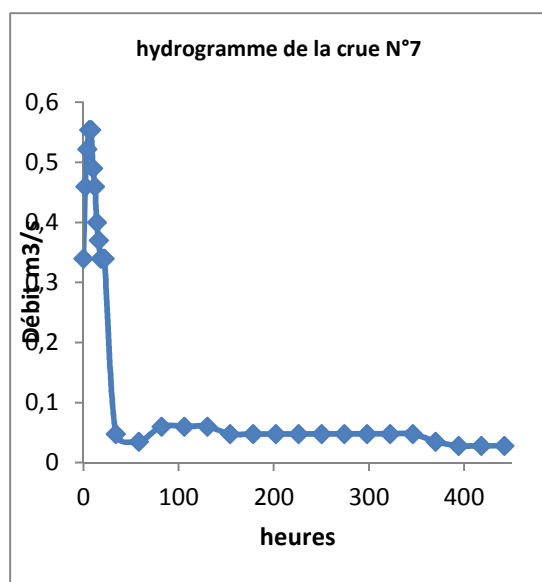
Moyenne des pluies observées (mm/j)	1,17133
Moyenne des ETP observées (mm/j)	2,87853
Moyenne des débits observés (mm/j)	0,10100
Moyenne des racines des débits observés	0,24412
Moyenne des log des débits observés	-3,45044

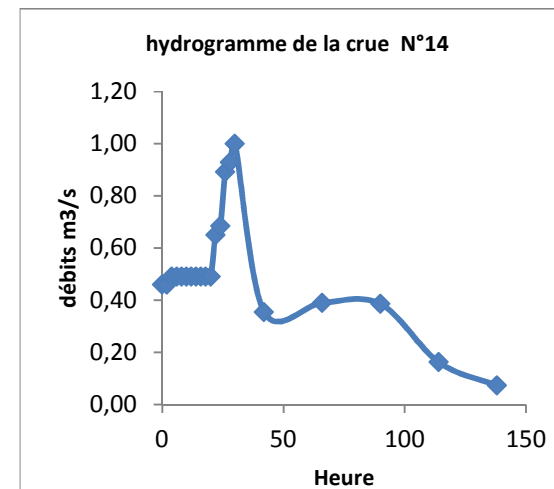
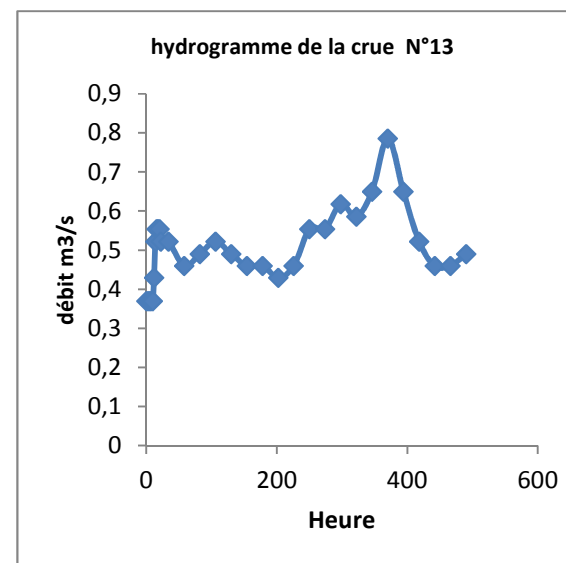
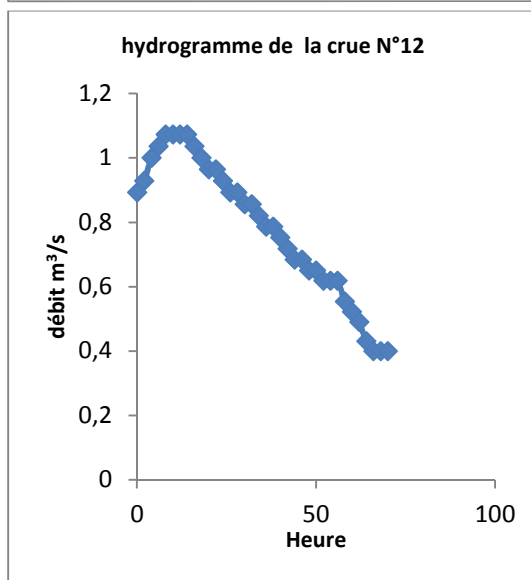
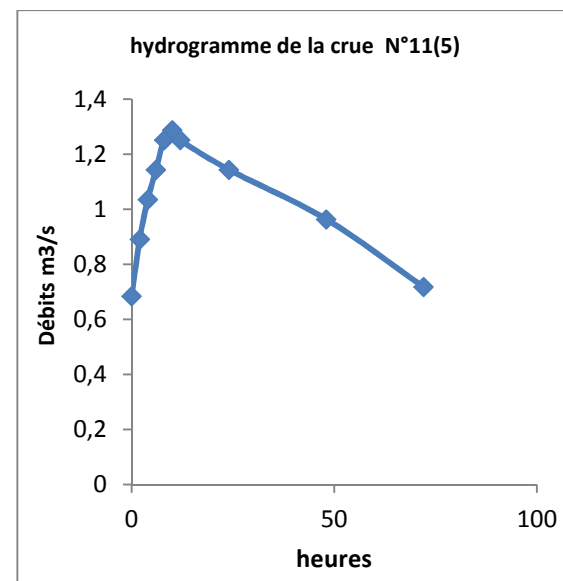
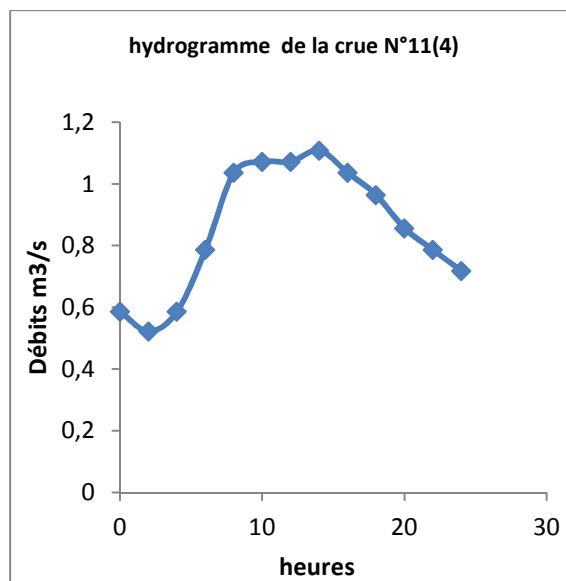
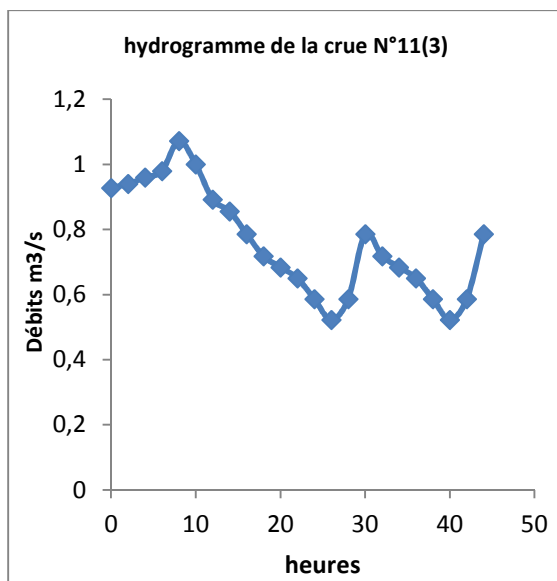
Critères d'efficacité (%)	
Nash(Q)	62,633

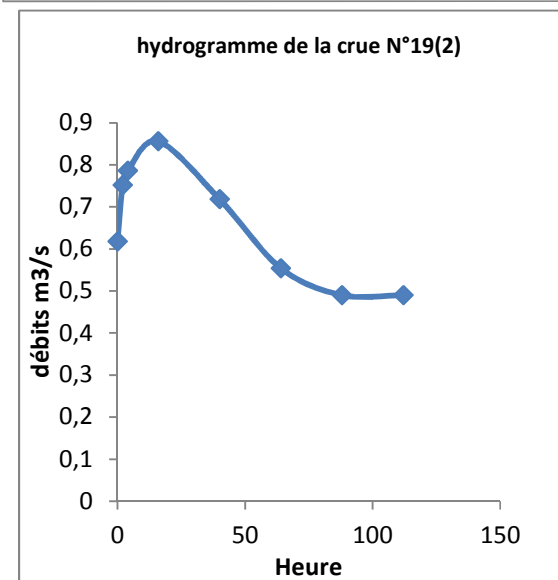
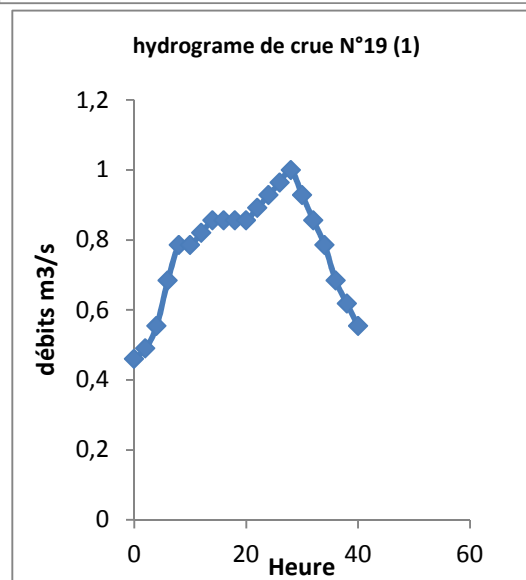
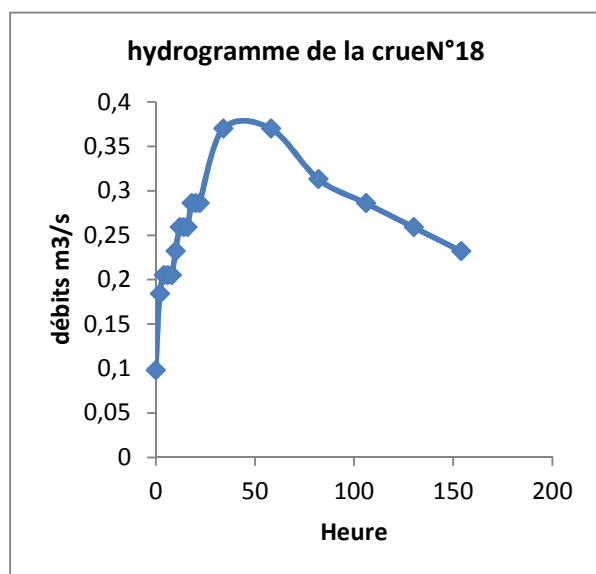
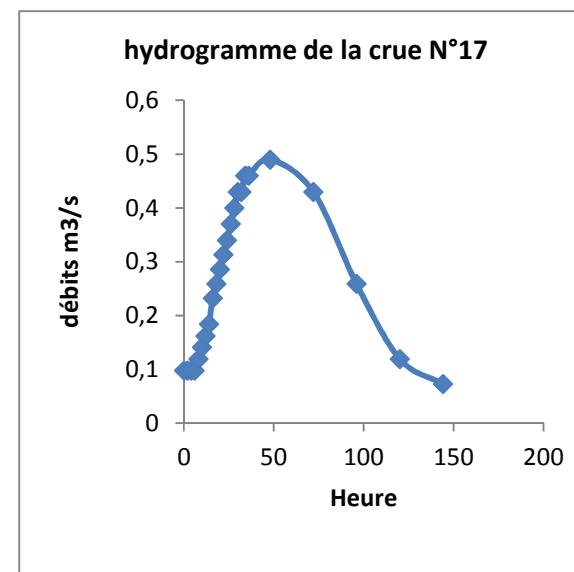
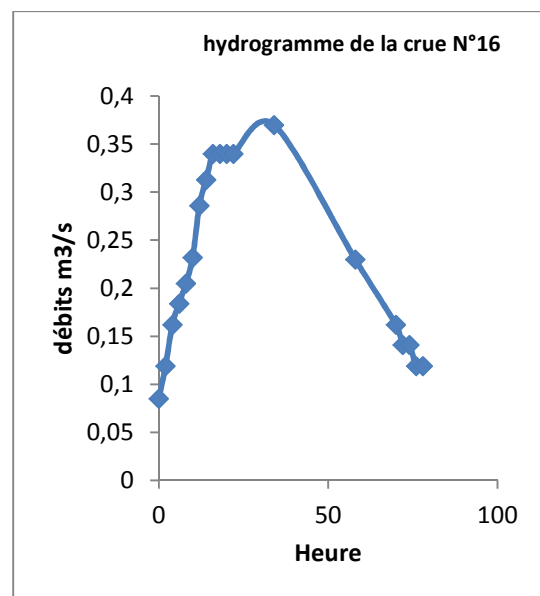
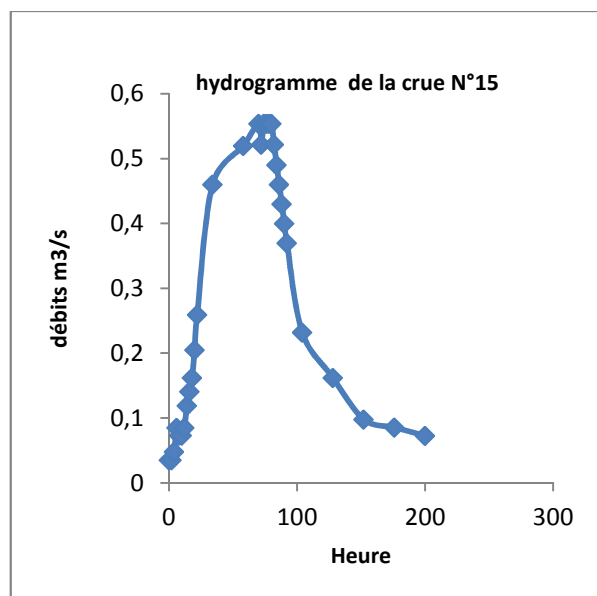
Nash(VQ)	44,760
Nash(ln(Q))	12,918
Bilan	105,969

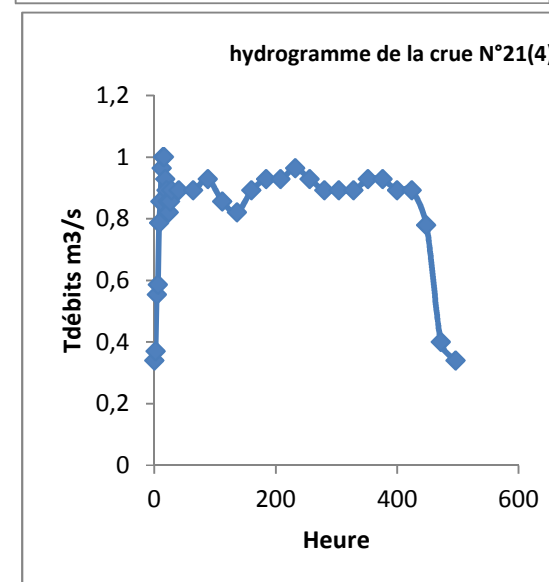
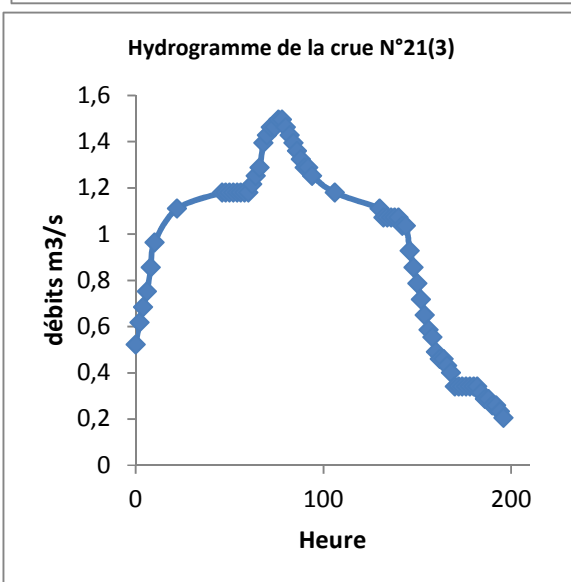
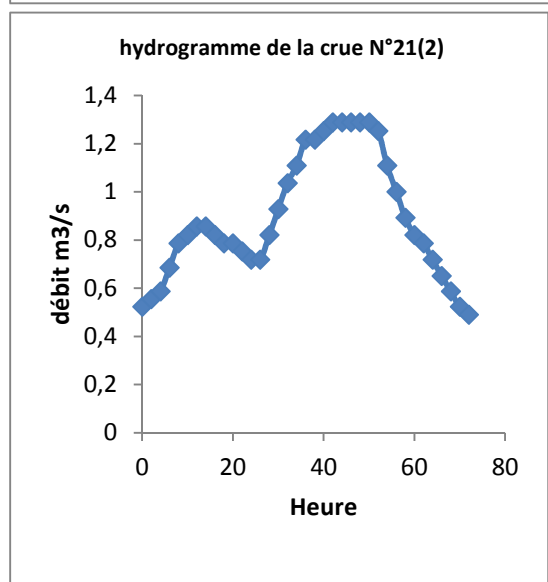
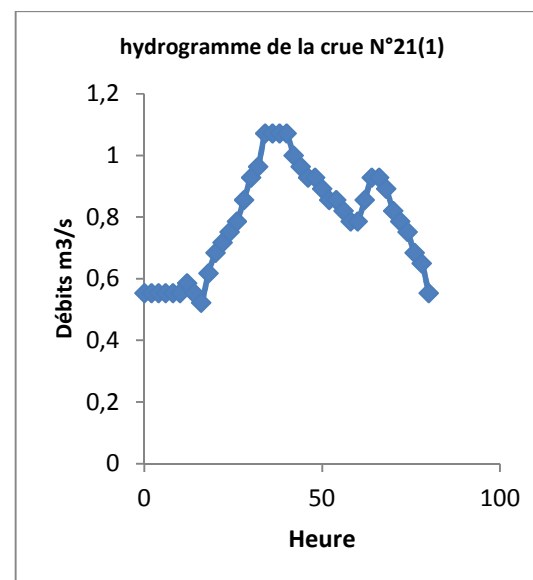
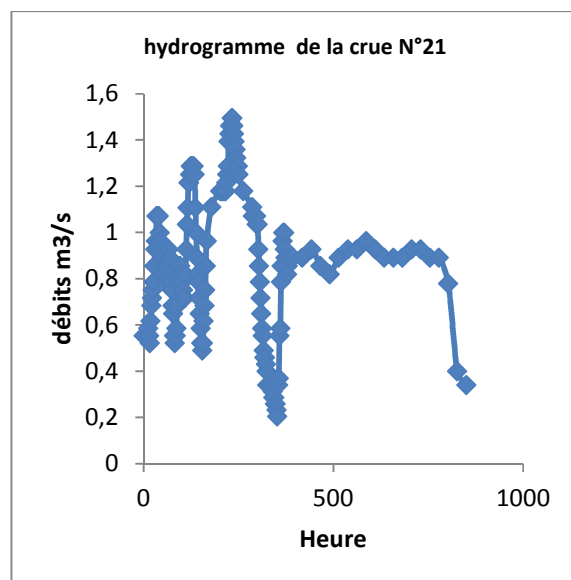
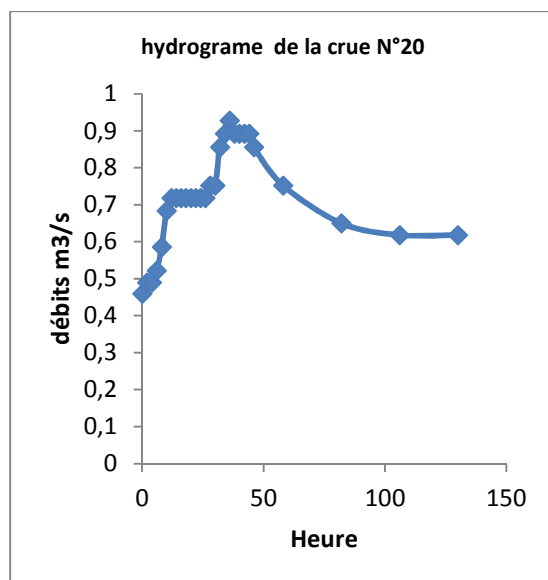
Les hydro grammes des crues observées au niveau de OUED SARNO période (1963 / 1973)

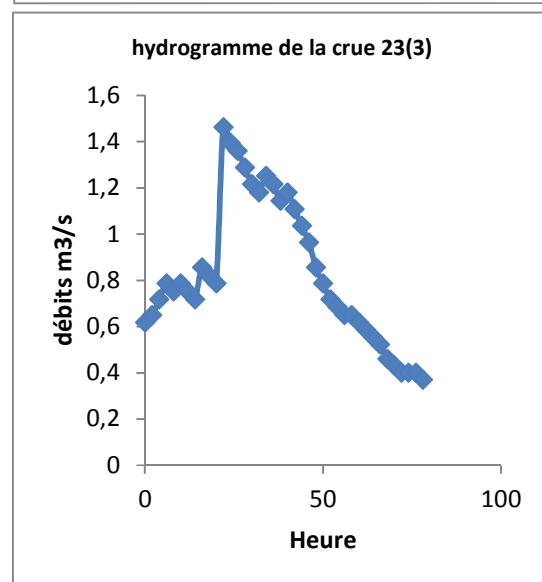
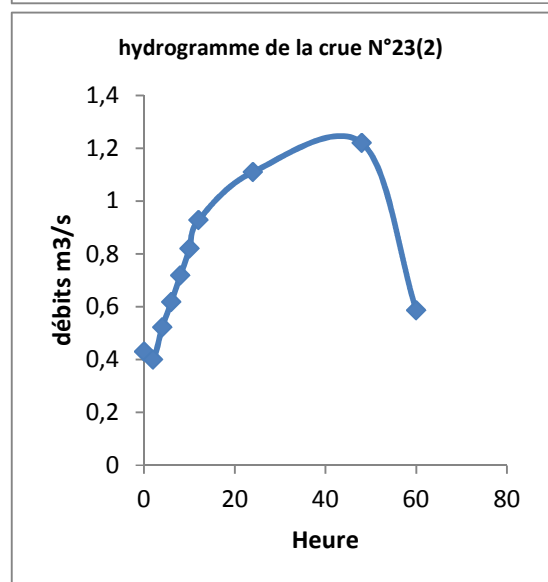
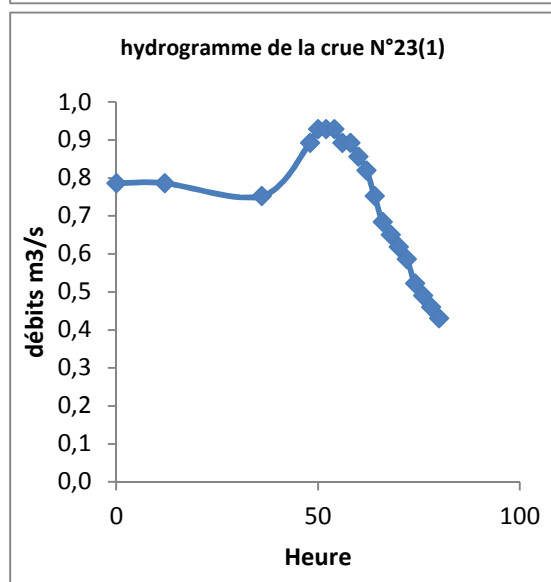
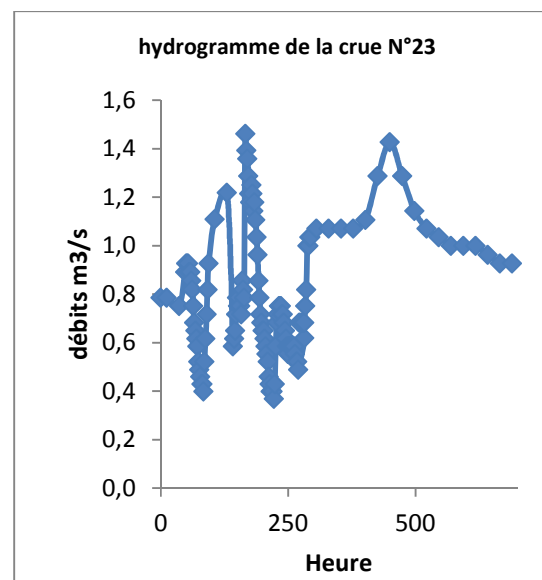
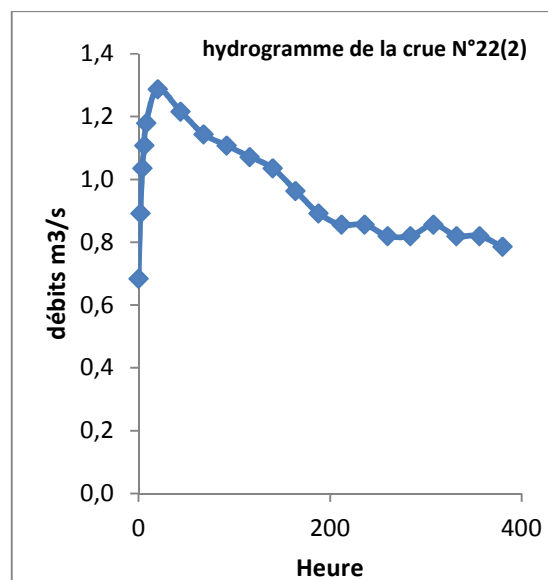
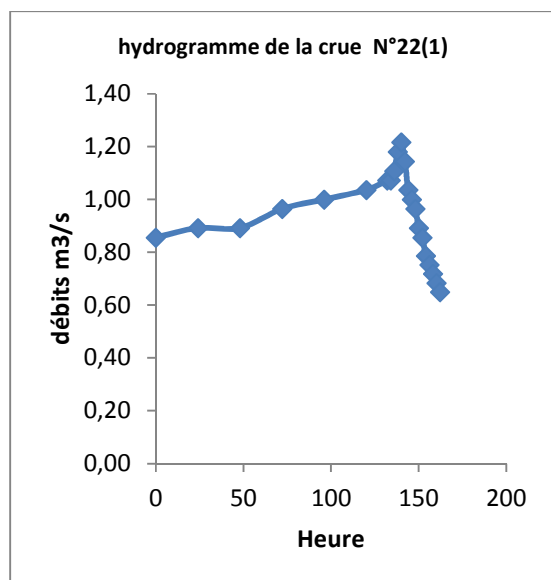


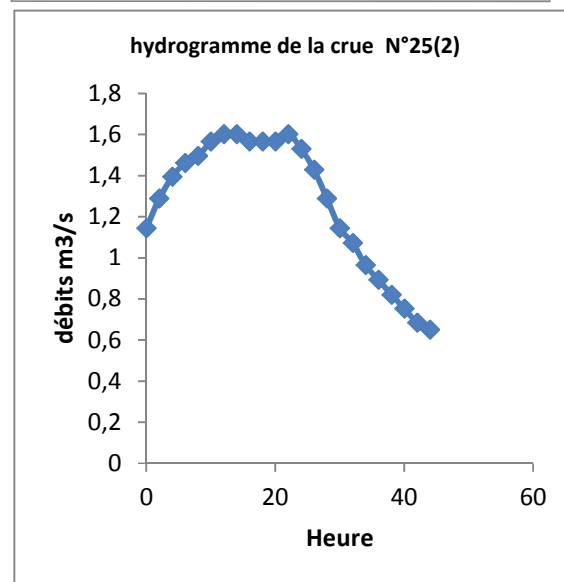
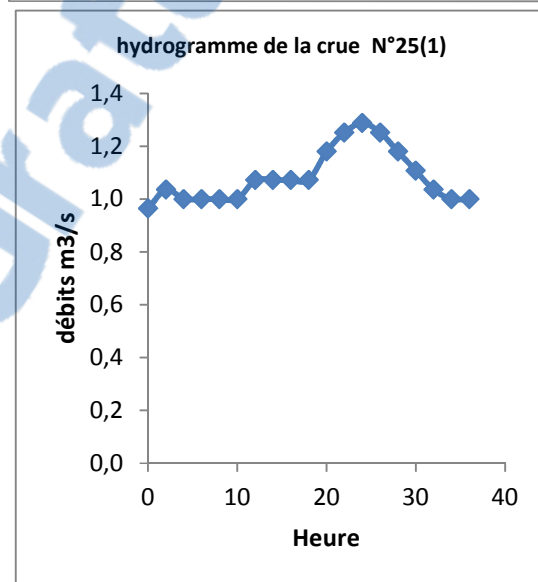
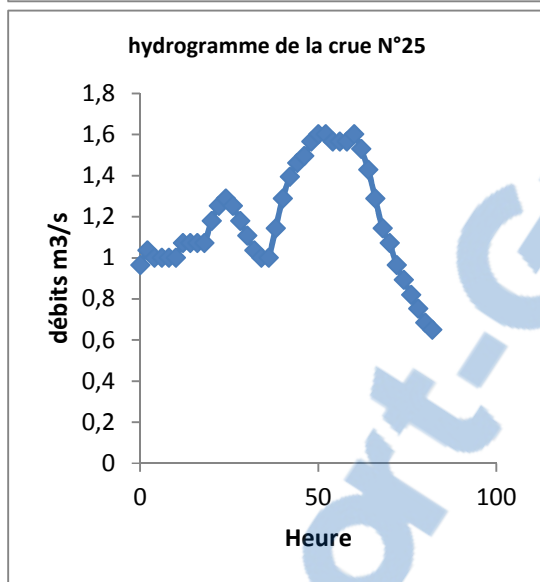
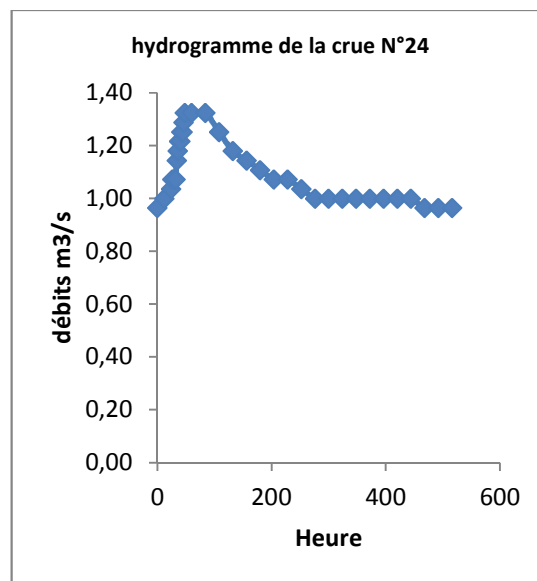
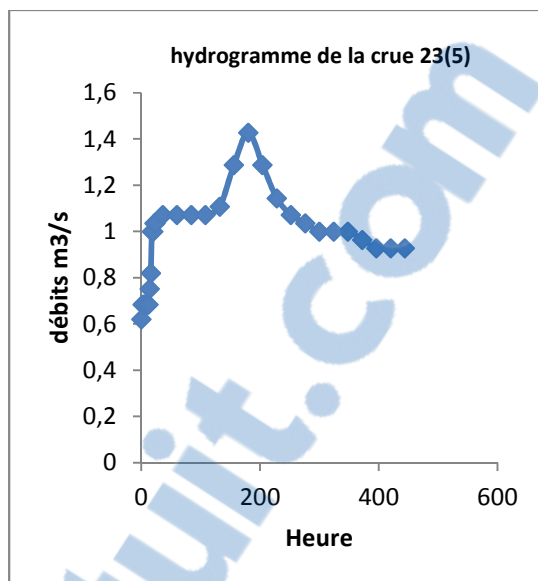
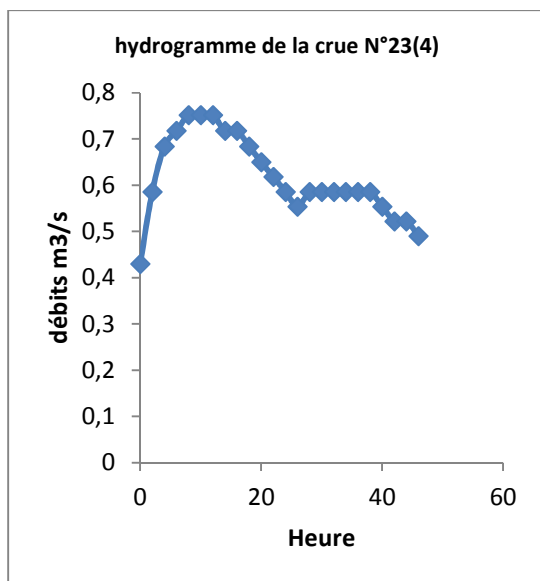


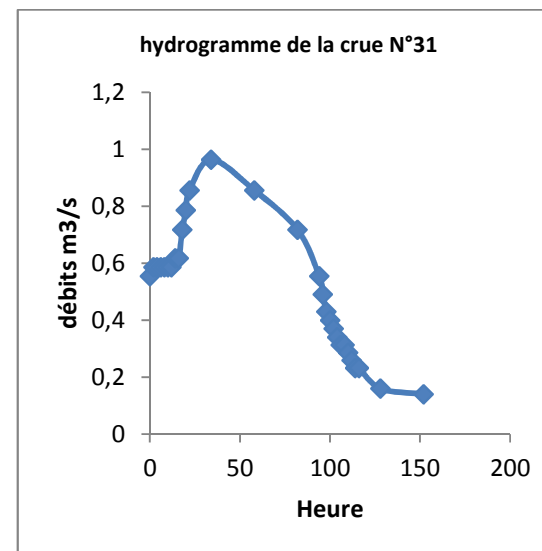
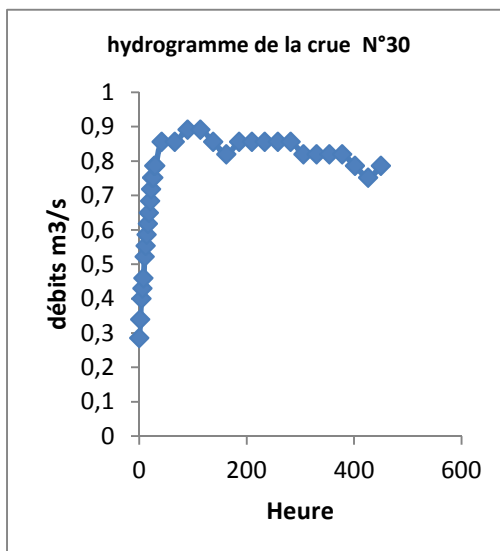
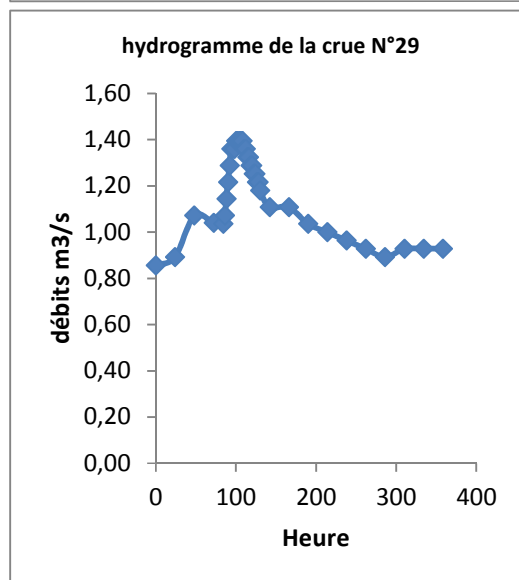
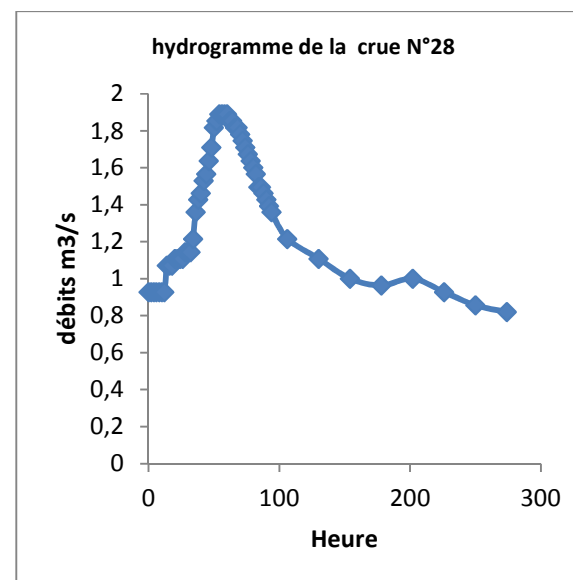
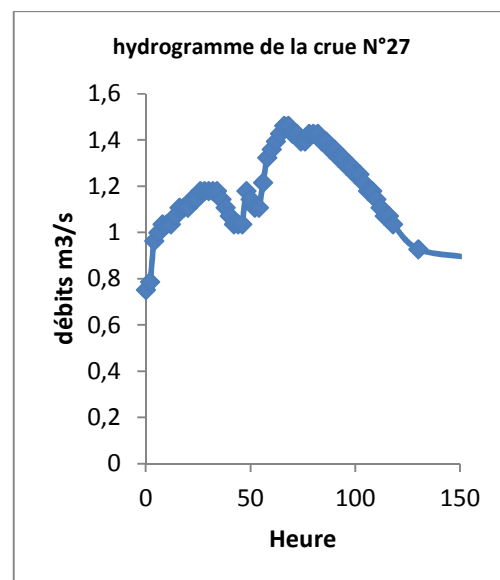
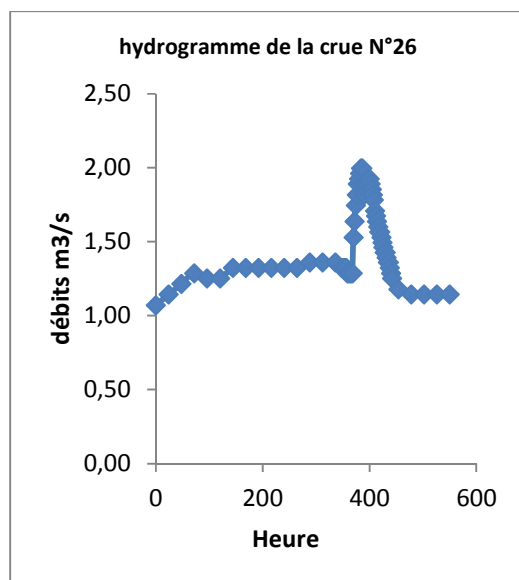


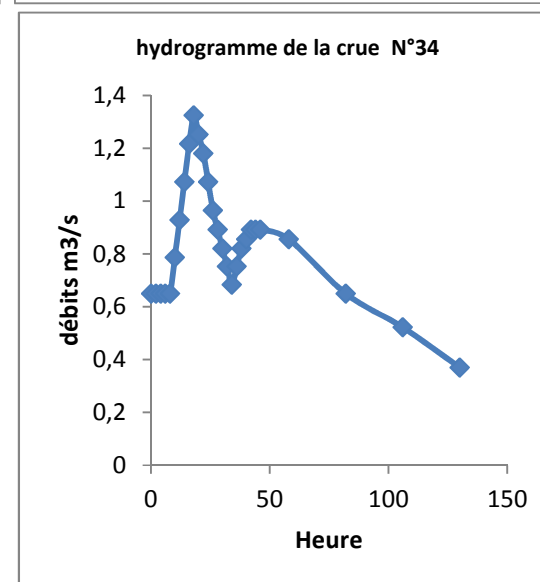
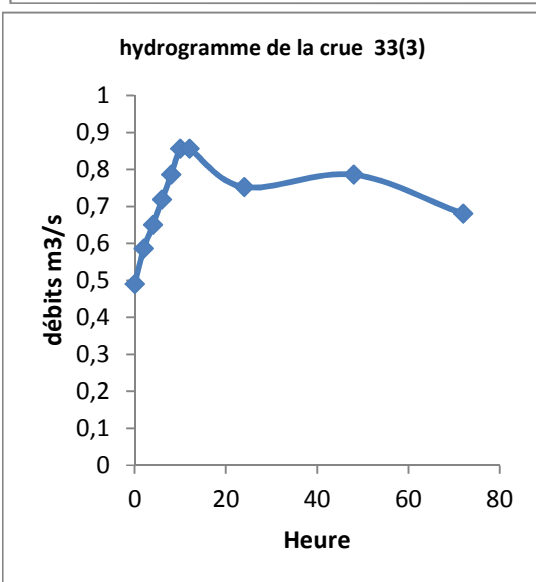
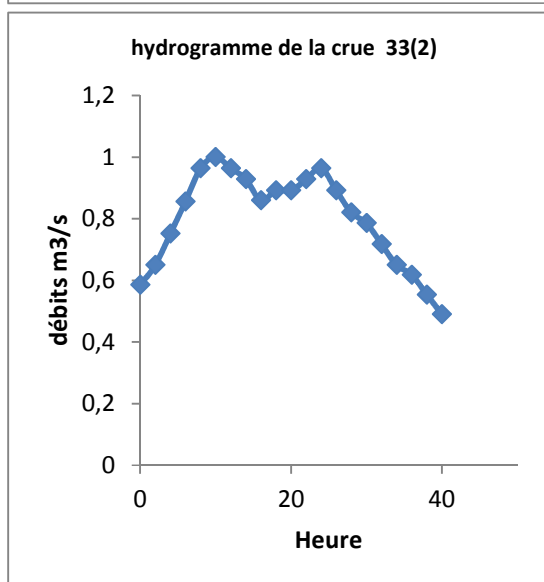
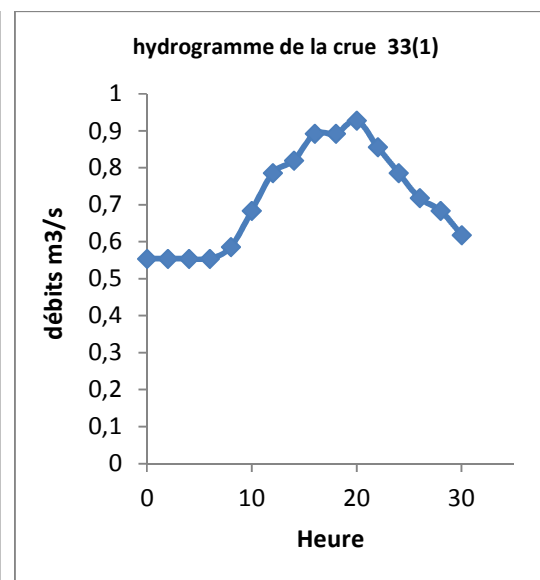
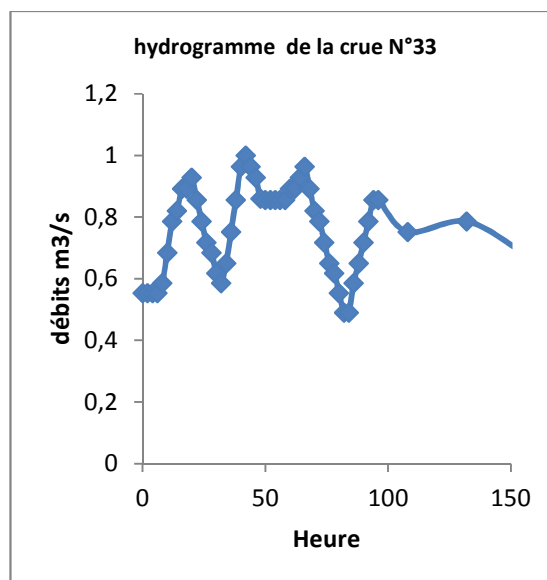
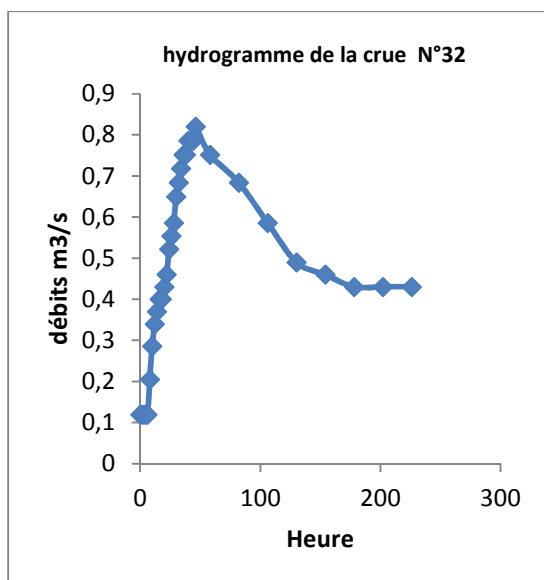


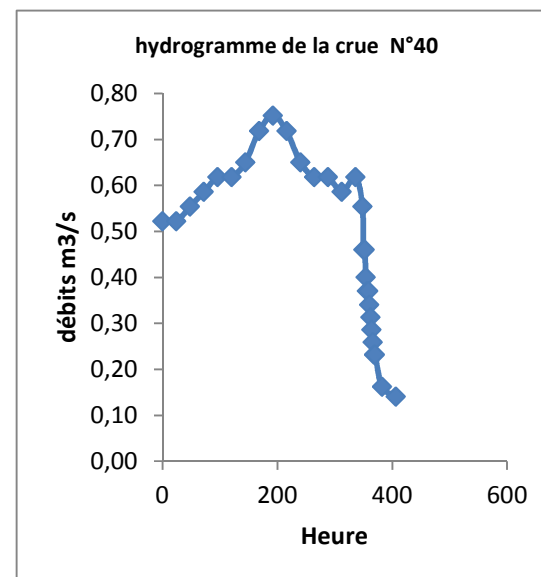
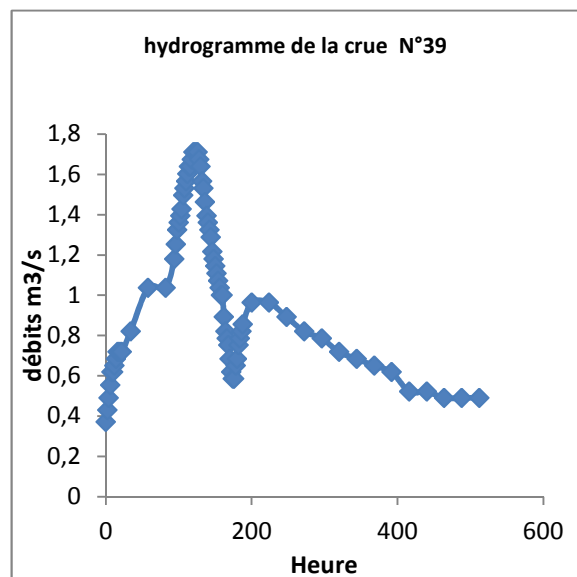
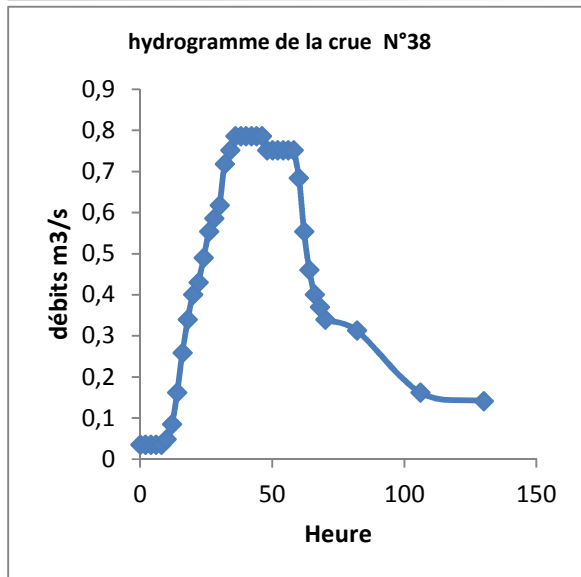
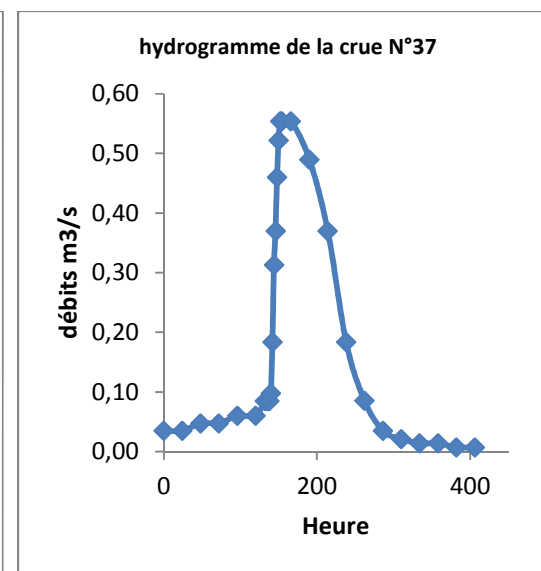
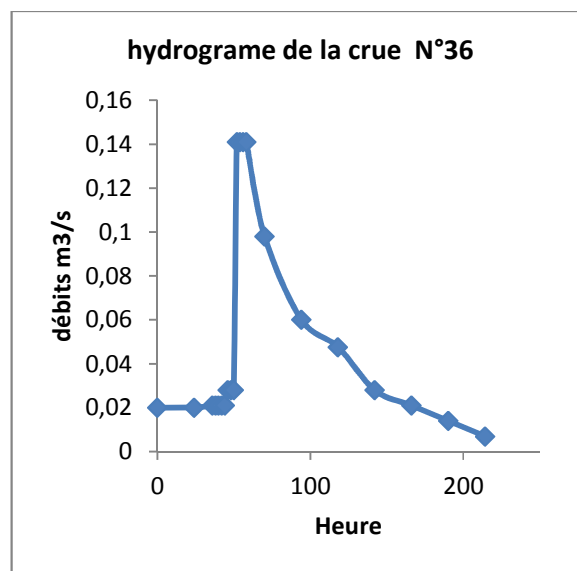
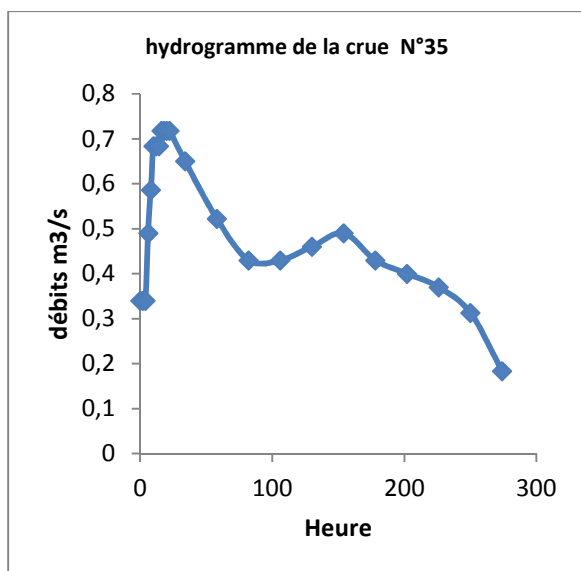


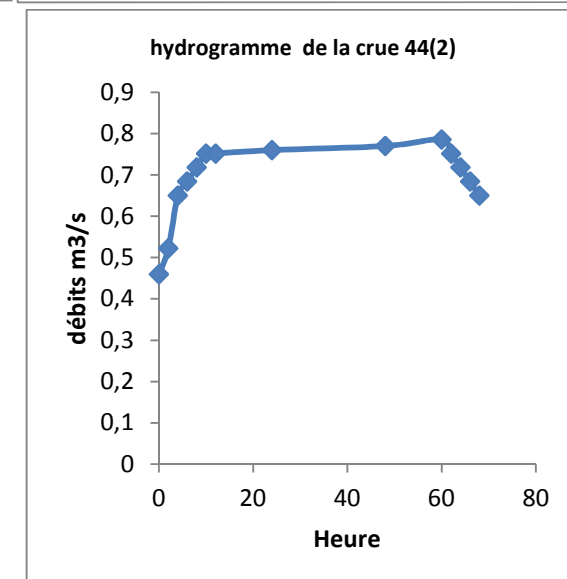
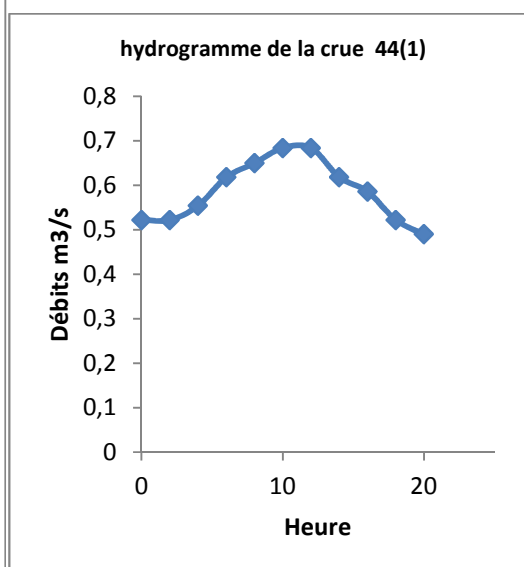
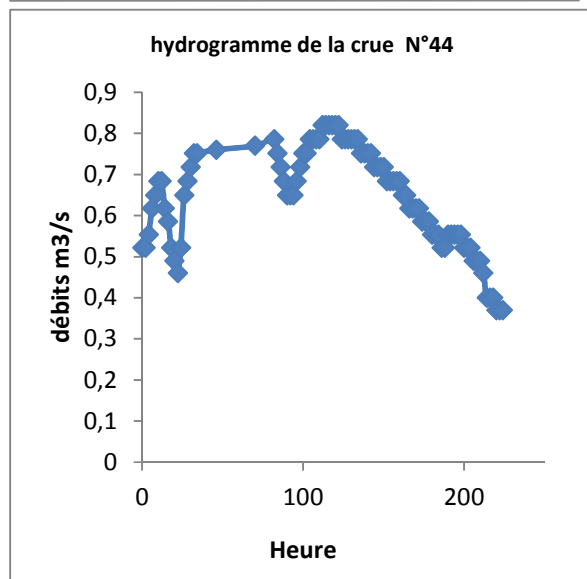
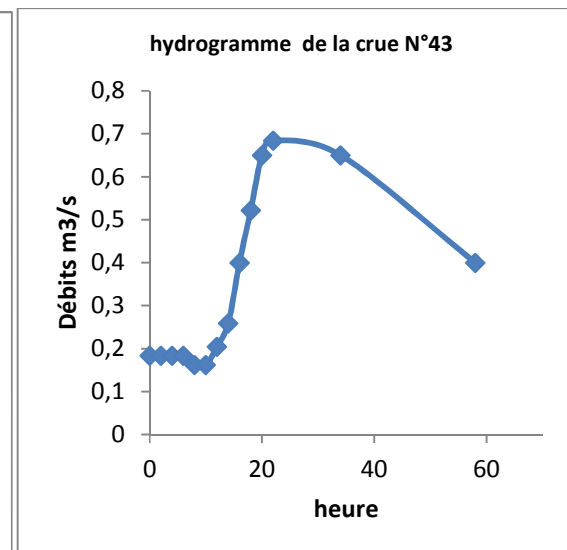
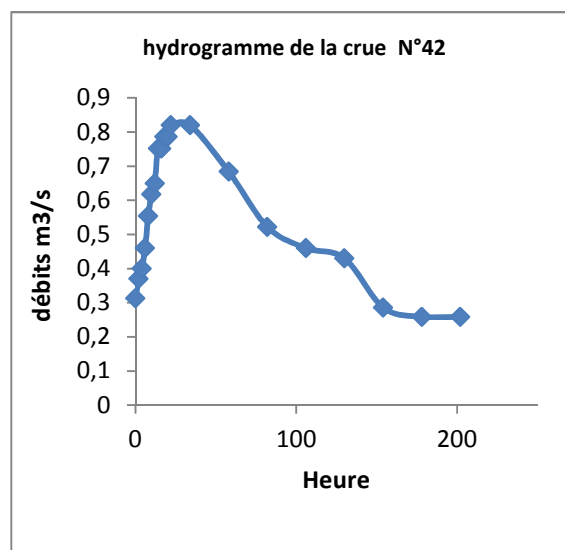
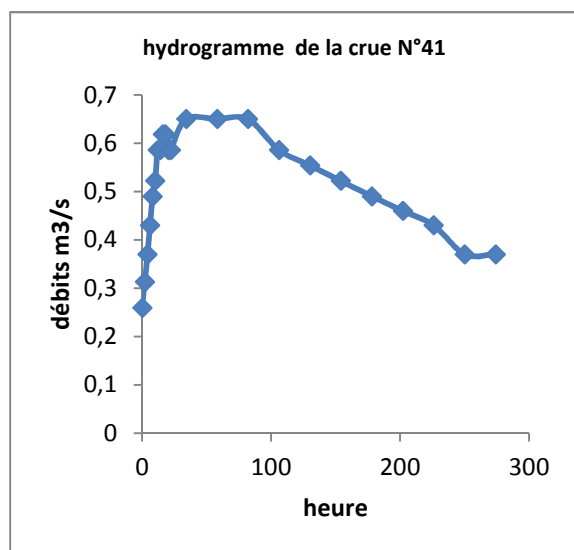


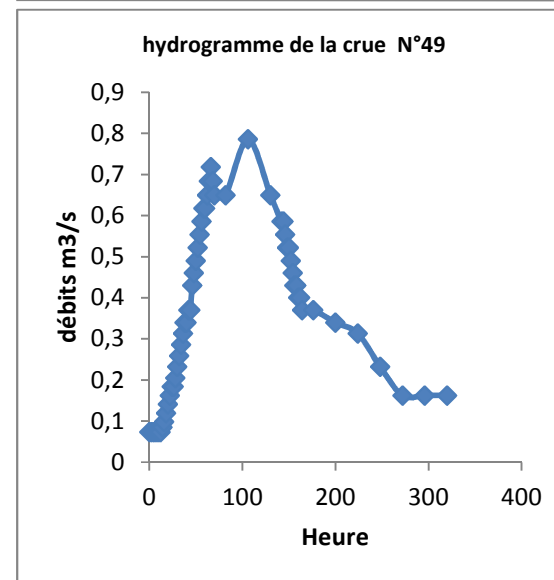
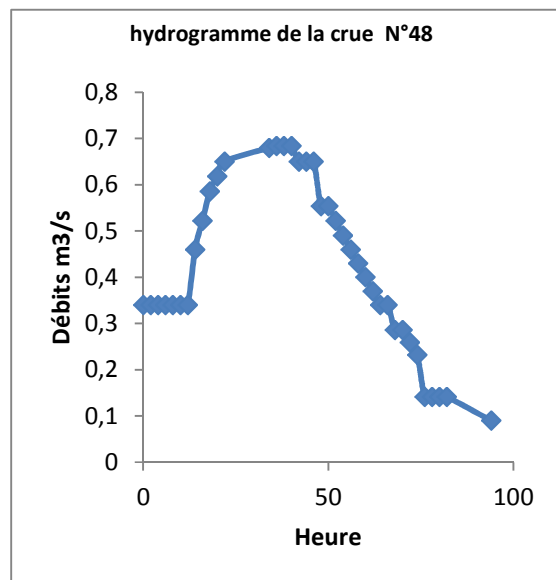
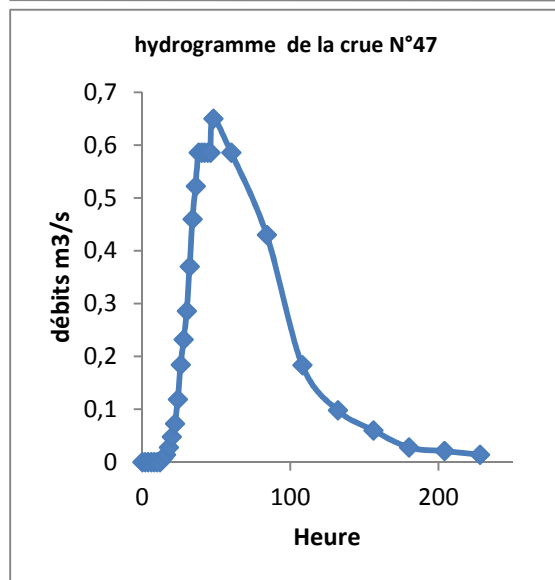
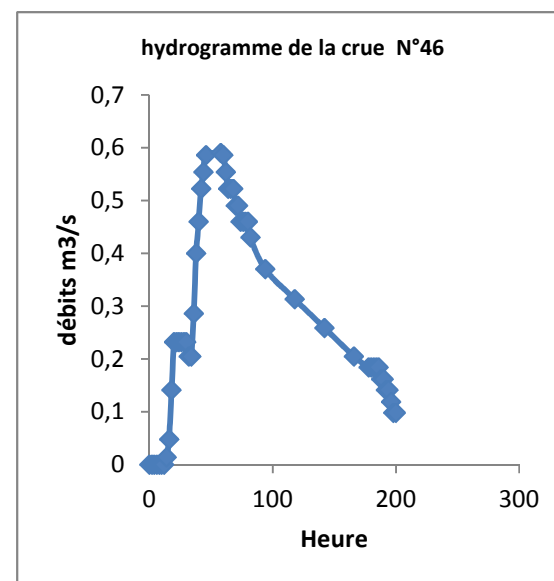
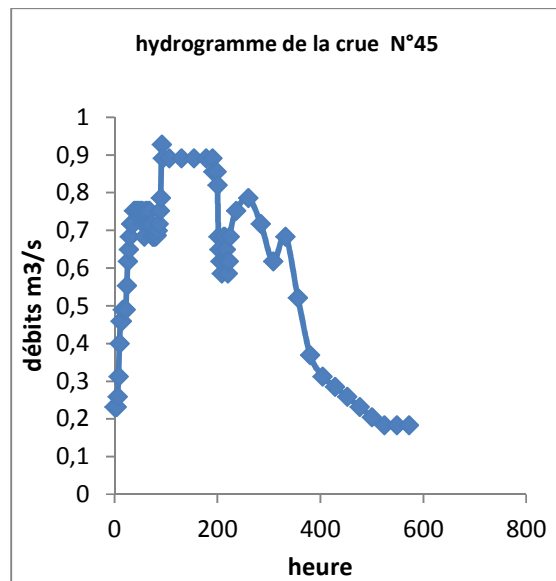
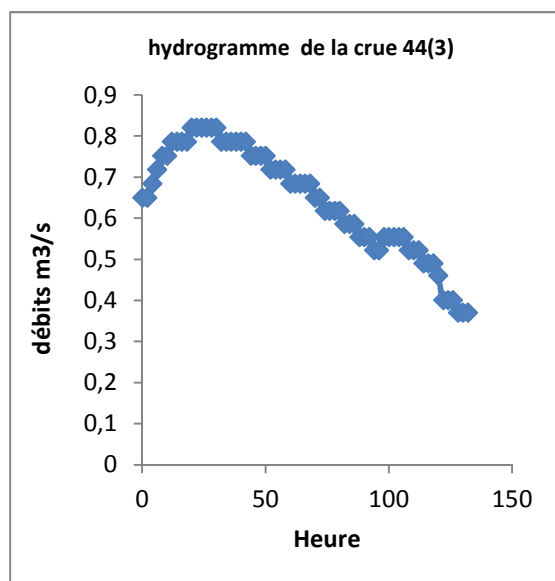


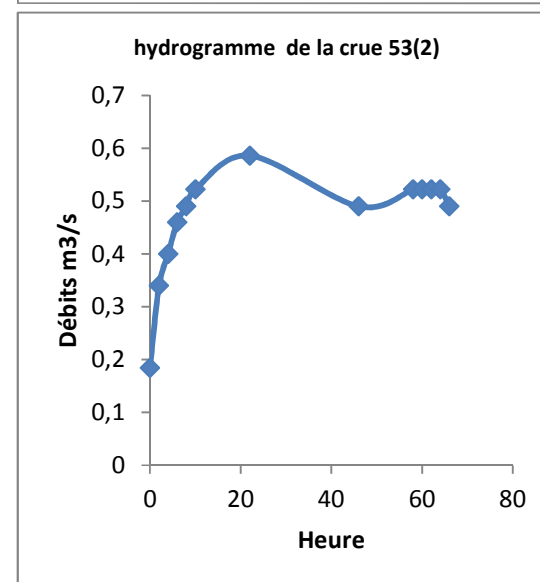
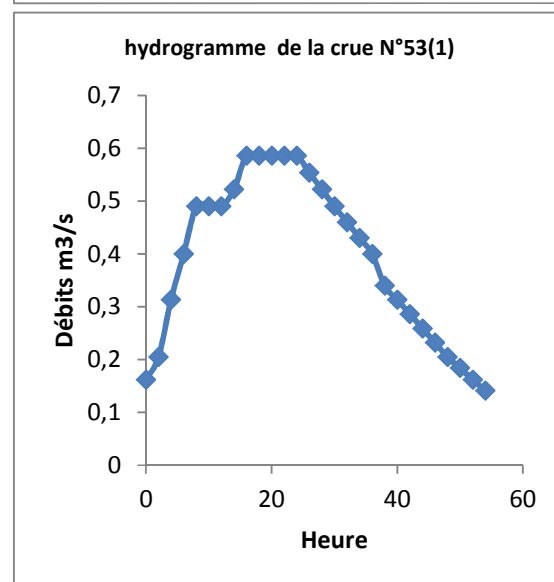
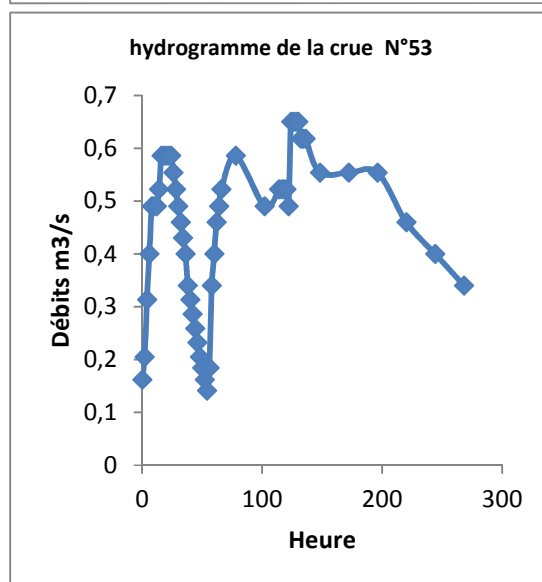
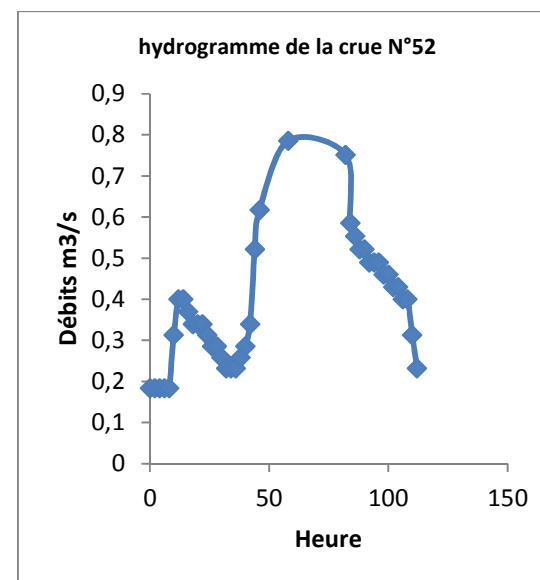
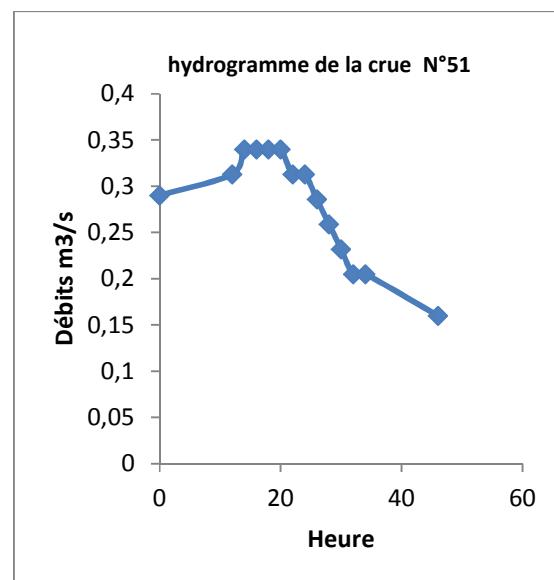
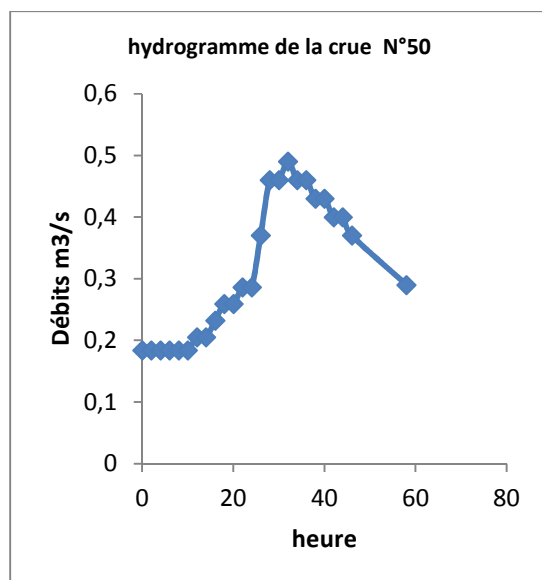


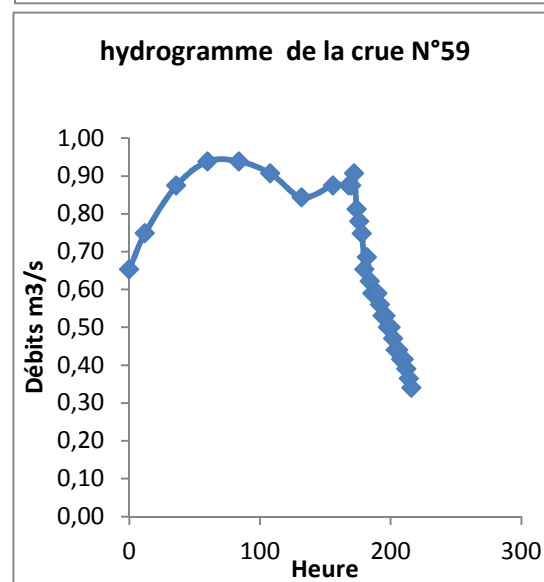
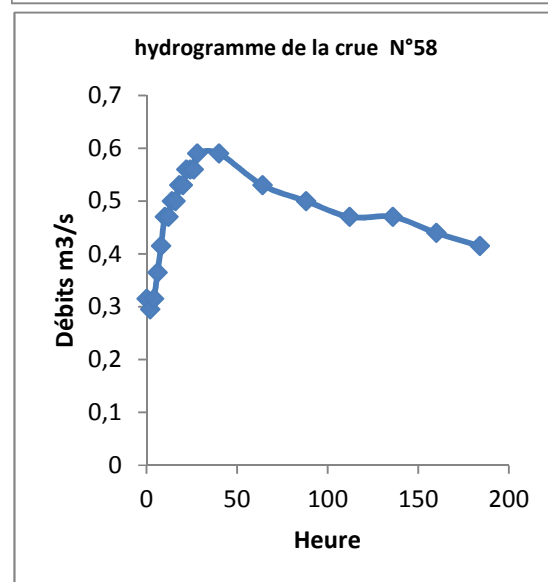
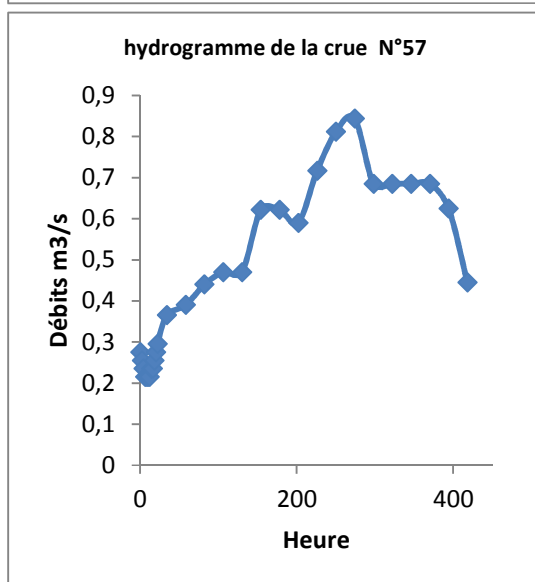
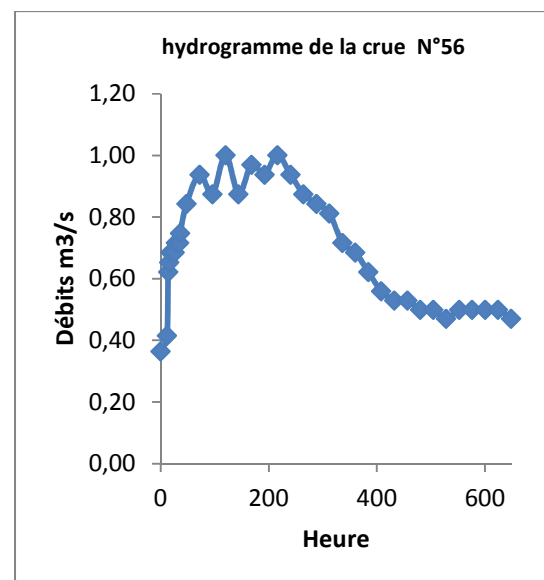
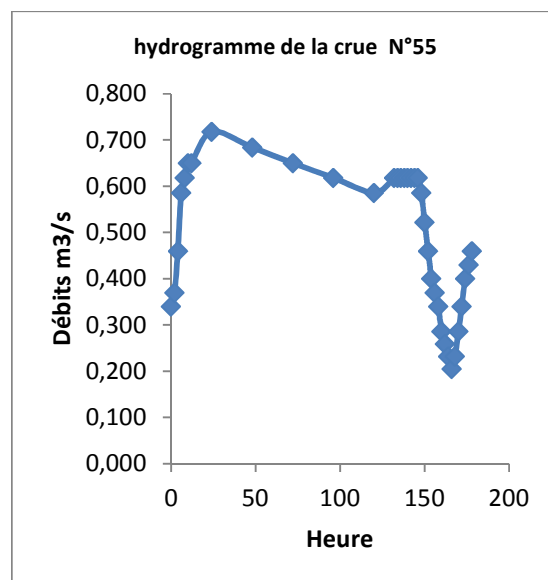
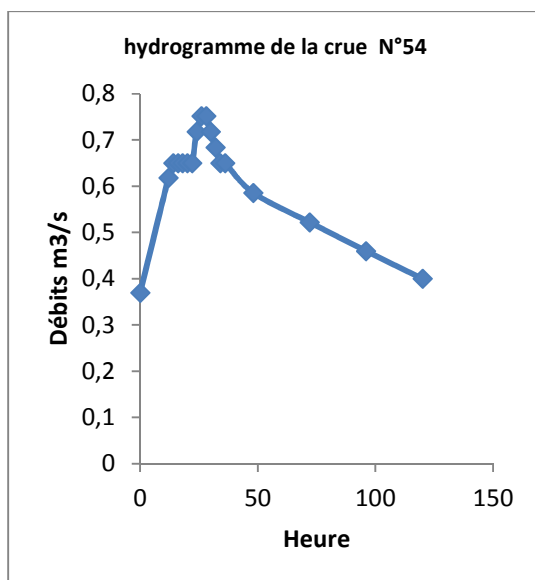


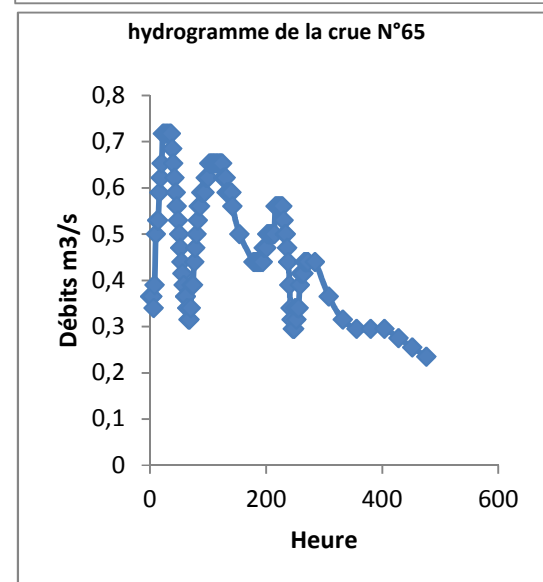
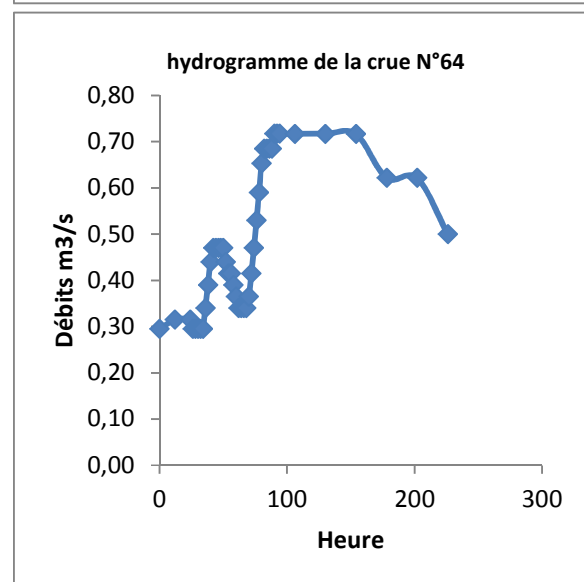
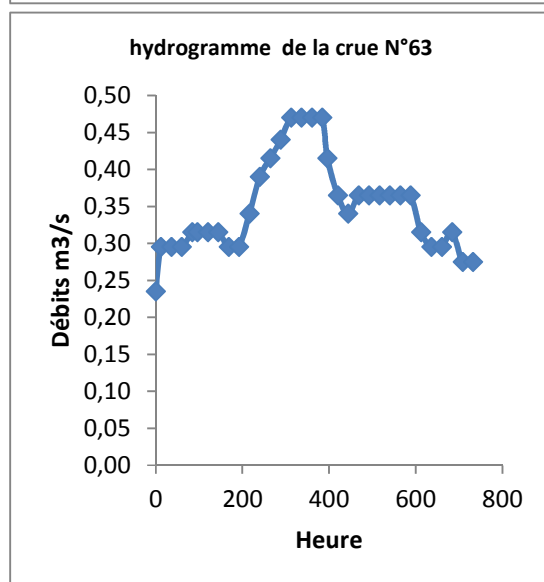
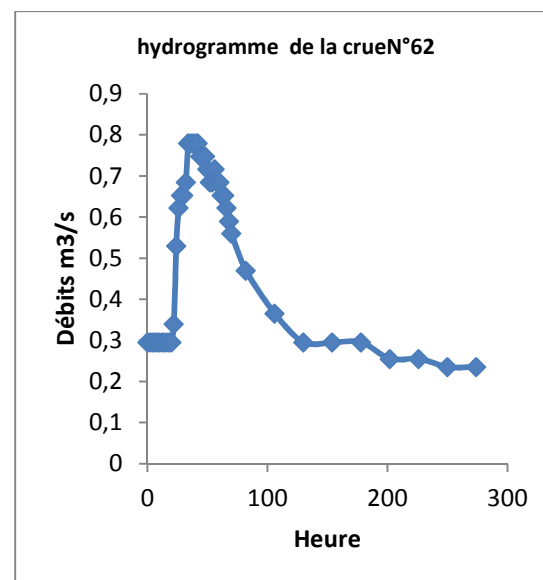
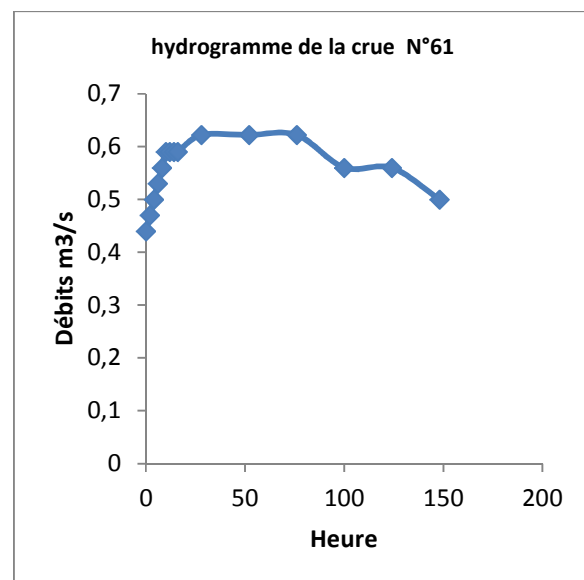
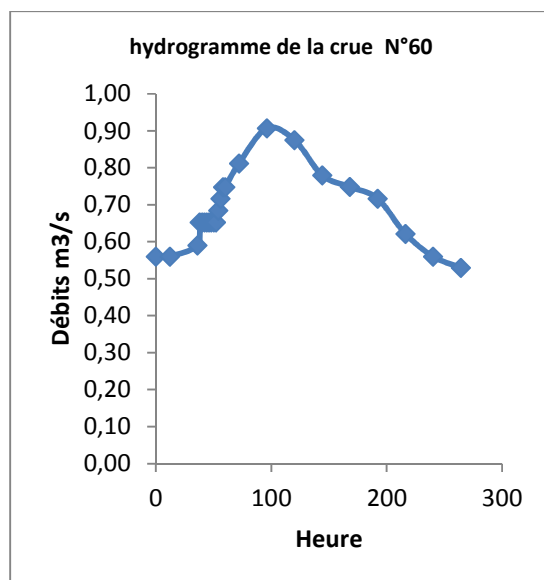


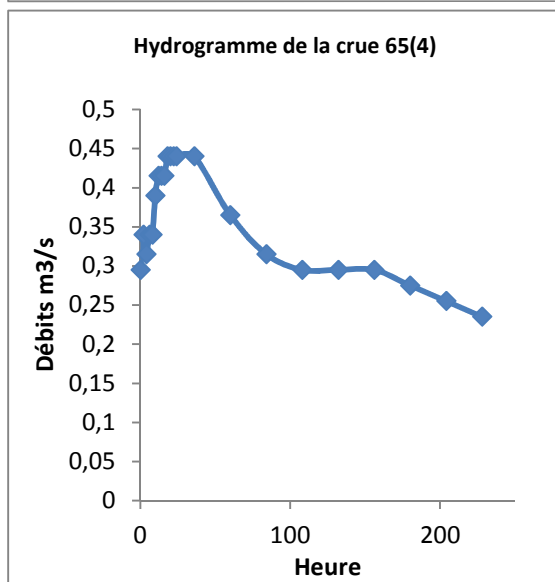
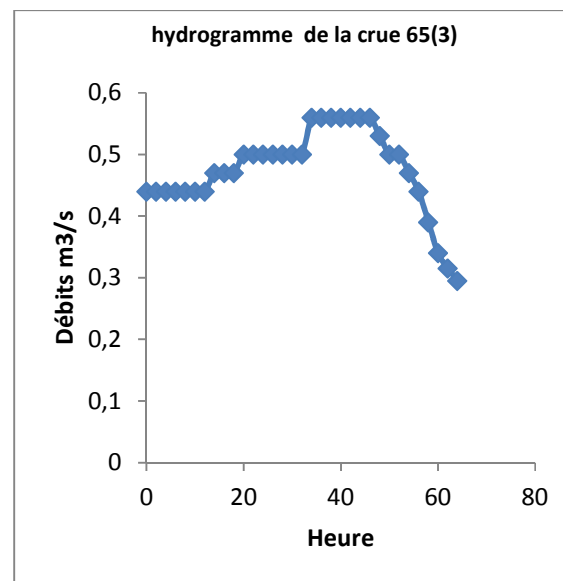
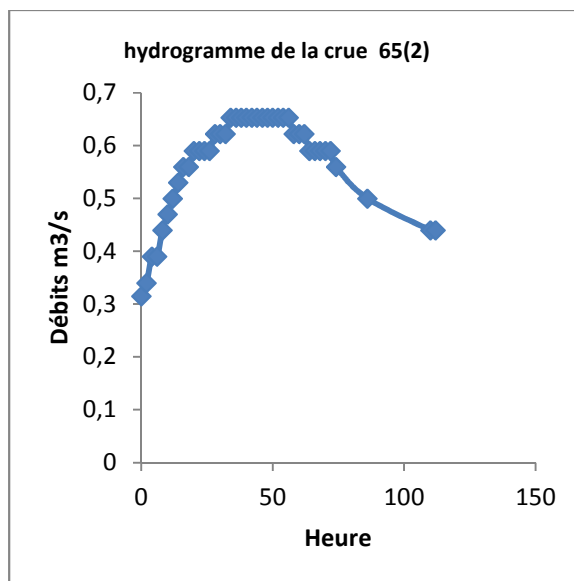
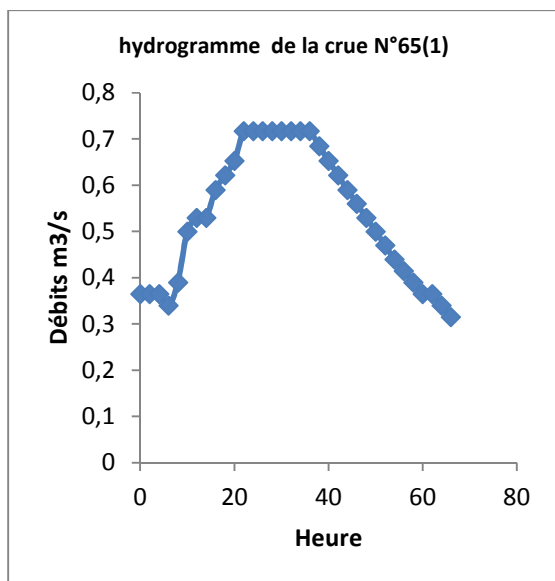












Répartition des 89 crues enregistrées durant la période (1963-1973) SARNO AVAL

Année	Nombre de crues enregistrées	N°	Dates des crues
1963	7	1 2 3 4 5 6 7	29 ; 30 mai.....01 juin 1963 24 juin 1963 26 ; 27 juin 1963 29 ; 30 ; 31 juillet....01 aout 1963 15 ; 16 septembre 1963 25 ; 26 septembre 1963 27 ; 28 ; 29 ; 30 septembre 1963
1964	18	8 9 10 11(1) 11(2) 11(3) 11(4) 11(5) 12 13 14 15 16 17 18 19(1) 19(2) 20	04 mars 1964 26 ; 27... ; 31 mars.....1 avril...06 mai 1964 01 ; 02 ; 03 juillet 1964 22 ; 23 ; 24 juillet 1964 24 ; 25 ; 26 juillet 1964 26 ; 27 juillet 1964 27 ; 28 juillet 1964 28 ; 29 ; 30 juillet 1964 01 ; 02 ; 03 aout 1964 03 septembre 1964 25 septembre 1964 23 ... 31 octobre 1964 04 novembre 1964 07...08 novembre 1964 14 novembre 1964 19 décembre 1964 20 décembre 1964 26 ; 27 décembre 1964
		21(1)	05 ; 08 janvier 1965

1965	07	21(2) 21(3) 21(4) 22(1) 22(2) 23(1) 23(2) 23(3) 23(4) 23(5)	08 ; 11 janvier 1965 14 ; 20 janvier 1965 21 janvier ; 11 février 1965 01...15 mars 1965 15 ; 16 mars 1965 01....05 avril 1965 05.....08 avril 1965 08.... 11 avril 1965 11.... 13 avril 1965 13..... 07 mai 1965
1965	11	24 25(1) 25(2) 26 27 28 29	01..... 24 juin 1965 29 ; 30 juin 1965 30 juin.....02 juillet 1965 03.....26 juillet 1965 07.... 11 octobre 1965 14..... 25 octobre 1965 29 octobre 13 novembre 1965
1966	14	30 31 32 33(1) 33(2) 33(3) 34 35 36 37 38 39	12....31 janvier 1966 (possible neige) 02...08 avril 1966 13.... 22 mai 1966 25 ; 26 mai 1966 26....29 mai 1966 29.... 31 mai 1966 02....07 juin 1966 08....19 juin 1966 21.... 30 juin 1966 08....25 septembre 1966 29 septembre... 01 octobre 1966 06..... 27 octobre 1966

		40 41	28 octobre.....14 novembre 1966 15 novembre 1966
1967	1	42	13.....21 avril 1967
1971	17	43 44(1) 44(2) 44(3) 45 46 47 48 49 50 51 52 53(1) 53(2) 53(3) 54 55	23 avril 1971 26 avril 1971 26.....29 avril 1971 01.....05 mai 1971 08.....15 mai 1971 14.....17 juillet 1971 29 juillet.... 08 aout 1971 18..... 22 septembre 1971 23..... 29 septembre 1971 07 ; 08 octobre 1971 10 octobre 1971 31 octobre ; 01 novembre 1971 09...11 novembre 1971 11....14 novembre 1971 14....20 novembre 1971 26....30 novembre 1971 04 ; 05 décembre 1971
1972	10	56 57 58 59 60 61 62 63	16 ; 17 ; 18 janvier.....13 février 1972 16 février 02 mars 1972 04..... 11 mars 1972 01.... 10 mai 1972 (possible neige) 01.... 13 juin 1972 27 juin 1972 12 ; 13 ; 14 aout 1972 04 septembre 1972

		64(1) 64(2)	21..... 24 septembre 1972 24 ; 25 septembre 1972
1973	4	65(1) 65(2) 65(3) 65(4)	09 ; 10 aout 1973 10...13 aout 1973 13 ; 14 aout 1973 14.... 23 aout 1973

Résumé

Le modèle hydrologique est devenu un outil indispensable pour divers domaines : Aménagement, construction des ouvrages hydrauliques, prévention et prédétermination des crues, études des changements climatiques, impacts anthropiques, impacts des catastrophes naturelles, reconstitution des climats par la paléontologie...

Ce travail représente la modélisation pluie-débit par le modèle GR de type global appliquée au bassin versant de l'oued SARNO (MEKKARA NW ALGERIE) suivant les trois pas de temps (GR1A pour le pas temps annuel ; GR2M pour le pas temps mensuel et le GR4J pour le pas journalier).

Nous avons donné dans un premier temps un aperçu sur la modélisation hydrologique ; ensuite nous avons présenté la zone d'étude (bassin versant SARNO), et son cadre hydrologique, et enfin une description et application du modèle GR sur notre bassin versant. Ce modèle dont les paramètres d'entrée sont les précipitations et L'ETP calculées par la méthode D'LOUDIN et le paramètre de sortie le débit mesuré.

Mots clés : Modélisation, pluie-débit, Sarno modèle GR

لقد أصبح النموذج الهيدرولوجي أداة لا غنى عنها لمختلف المجالات : التنمية، وبناء هياكل الري، والوقاية من الفيضانات والتنبؤ، ودراسات تغير المناخ، والآثار من صنع الإنسان، آثار الكوارث الطبيعية، وإعادة بناء المناخ في علم المتحجرات ...

هذا العمل يمثل نموذج هطول الأمطار والسيول من نوع G و هو نموذج عالمي يطبق على حوض المياه لواء صارنو (مكة شمال غرب الجزائر) من خلال ثلاث خطوات لا GR1A للمرة السنوية؛ GR2M لا وقت للشهرية ل GR4J لم يكن يوميا).

قدمنا الأول ينظر إليه على النمذجة الهيدرولوجية، ومن ثم قدمنا منطقة الدراسة (مستجمعات SARNO)، وهي جزء الهيدرولوجية، وأخيرا وصفا وتطبيق النموذج على مستجمعات المياه GR لدينا. هذا النموذج هي معلمات الإدخال هطول الأمطار و ETP وتحسب على أساس أودين الأسلوب على معلمة إخراج وقياس معدل التدفق.

Summary

Our work on rainfall-runoff modeling applied to watershed SARNO (MEKKARA NW Algeria) following three steps time (not GR1A for annual time; GR2M not time for the monthly and daily not to GR4J) global type.

We tried the rainfall-runoff modeling by GR whose input parameters are precipitation and ETP (calculated by the method of Oudin) and the output parameter is the flow.

The application of our model GR basin has experienced difficulties in phase timing and hit the validation phase we gave unsatisfactory results. That's why we try spurs in the future another type of modeling that adapts to our pond.

Key words: Modelisation, rainfall-discharge, Sarno, genie rural model