

République algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'enseignement Supérieur et de la recherche Scientifique

Université Badji Mokhtar – Annaba



جامعة باجي مختار –  
عنابة

Faculté des Sciences de l'Ingénierat

كلية علوم الهندسة

Département d'hydraulique

قسم الري

## Thèse

Présentée pour obtenir le diplôme de

**Doctorat LMD**

Spécialité : Hydraulique

Filière : Hydraulique

Par :

**DAHAK Asma**

Thème :

**Contribution à la modélisation hydrologique des  
bassins versants Algériens : cas du bassin versant de  
Madjez Ressoul**

Thèse soutenue le 11 / 04 / 2021 devant le jury composé de :

N°	Nom et prénom	Grade	Etablissement	Qualité
01	Djemili Lakhdar	Prof.	Université Badji Mokhtar -Annaba	Président
02	Boutaghane Hamouda	MCA	Université Badji Mokhtar -Annaba	Rapporteur
03	Hasbaia Mahmoud	Prof.	Université de M'sila	Examineur
04	Abdelbaki Chérifa	MCA	Université de Tlemcen	Examinatrice
05	Lakehal Moussa	MCA	Université Badji Mokhtar -Annaba	Examineur

## المساهمة في النمذجة الهيدرولوجية للأحواض المائية الجزائرية "دراسة حالة مجاز الغسول"

### الملخص

إن فهم العمليات الهيدرولوجية هو المفتاح لتحسين القدرة التنبؤية للنماذج الهيدرولوجية. منذ الستينيات، أظهرت العديد من الدراسات التجريبية أن التفاعل بين العوامل الزمنية والمكانية للأحواض المائية (النهرية) يؤدي إلى مجموعة متنوعة من العمليات الجديدة. لتحديد ديناميكيات العمليات الهيدرولوجية، تم إجراء العديد من الدراسات البحثية، فيما تعلق الأمر بتمثيل آليات تبادل تدفقات المياه السطحية والجوفية، من خلال التنبؤ بعناصر التدفق الكلي للنهر. وعلى نفس النطاق، فقد ثبت أن رطوبة التربة يمكن أن تؤثر بشكل كبير على توزيع العمليات الهيدرولوجية: حيث تساهم البيانات تحت المراقبة الطويلة في تطوير مهارات التنبؤ. يناقش هذا البحث موضوع آني، مدرج في إطار تحسين النماذج الهيدرولوجية لأنماط التساقط الاستمرارية، إذ يسمى الحوض المائي قيد الدراسة: مجاز الغسول (المساحة: 103.4 كم<sup>2</sup>)، وهو حوض جزائري يقع بعين الباردة، منطقة عنابة. بعد دراسة المصادر العلمية والمراجع حول: الجريان السطحي، العمليات الهيدرولوجية المسؤولة على تقنيات تحديد الجريان، والمعادلة المسؤولة على آلية رشح الماء في التربة، تم إجراء عدة تطبيقات لهدف جمع أكبر عدد من البيانات عن المنطقة المشمولة بالدراسة. سمح تقييم النتائج المتحصل عليها من كل فصل بالحصول على إجابات وثيقة، إذ أدى التقييم الهيدروغرافي لتحديد عناصر جريان كل تساقط. في حين تم أيضا تحضير ادوات تفسير رشح المياه على مستوى مجاز الغسول. كانت نتائج عوامل معادلة الرشح المتحصل عليها دقيقة وموافقة للأرقام المرجعية كما كان متوقع، إذ تم اختيار نموذج هورتن كأفضل معادلة لحوض مياه مجاز الغسول. من جهة أخرى، عكست القياسات المخبرية لمحتوى التربة للماء العلاقة بين الرطوبة والتباين في نسبة الرشح المرصود ميدانيا. وتم الحصول على نتيجة ذات دلالة إحصائية مرضية بعد مقارنة نسبة التسلسل المحسوبة بالمقاسة، والتي أكدت صلاحية البيانات التجريبية.

كلمات مفتاحية: نموذج استمراري، نموذج رشح، عوامل، هيدروغراف الفيضان، فصل عناصر الجريان.

# **Contribution to the hydrological modeling in Algerian watersheds**

## **« case study from Madjez Ressoul watershed »**

### **Abstract**

Understanding of hydrological processes is the key to improve the predictive capacity of hydrological models. Since the 1960s, several experimental studies have shown that the combination of temporal and spatial factors, at the watershed scale leads to a variety of new processes. To identify processes dynamics, many research studies have been carried out in hydrology. It is about representing the mechanisms of surface and groundwater exchange fluxes, by predicting components of total flow. At the same scale, it has been shown that soil moisture availability can affect substantially the distribution of hydrological processes: the data with long-records can contribute to the development of flood forecasting skills. This topical research falls within the context of improving the continuous simulation of hydrological models. The case study is named Madjez Ressoul (Area = 103,4 km<sup>2</sup>), it's an Algerian watershed, located in Ain Berda, in the Annaba region. Following the state-of-the-art review concerning the: flood genesis processes, process identification, and the infiltration equation which generates all these processes, several applications were tested. The assessed results from each chapter allowed us to answer relevant questions. The hydrograph separation led us to determine the flow components for each flood event, as well, bring explicatory infiltration tools within Madjez Ressoul. The obtained values of infiltration parameters are accurate as expected and Horton model is selected as the best equation for Madjez Ressoul watershed. The water content measured in the laboratory has clearly reflected the relationship between soil moisture and the variation in the infiltration rate monitored in the field. A statistically significant result is obtained after adjusting the calculated and measured infiltration rates, which validates the reliability of experimental data.

**Keywords:** Continuous model, Infiltration Model, parameters, flood hydrograph, flow component separation.

# **Contribution à la modélisation hydrologique des bassins versants Algériens : cas du bassin versant de Madjez Ressoul**

## **Résumé**

L'amélioration de la capacité prédictive des modèles hydrologiques passe par la compréhension des processus hydrologiques. Depuis les années soixante, plusieurs études expérimentales ont montré que la combinaison des facteurs spatio-temporels à l'échelle des bassins versants, conduit à une variété de nouveaux processus. Pour cerner les dynamiques des différents processus, plusieurs recherches ont jusqu'alors été menées en hydrologie. Il s'agit d'arriver à une meilleure représentation des mécanismes d'échange de flux superficiels et souterrains, en prédisant les composantes du débit total mesuré. D'autre part, il est prouvé qu'à la même échelle, la disponibilité de l'humidité du sol a une influence substantielle sur la distribution des processus hydrologiques : les données à longs enregistrements peuvent servir au développement des compétences de prévision des crues. Cette recherche d'actualité s'inscrit dans le cadre de l'amélioration de la performance d'un modèle hydrologique, par la conception et la collecte d'un ensemble suffisant de données relatives aux processus hydrologiques. Le bassin versant étudié, est nommé Madjez Ressoul, c'est un bassin algérien (Surface = 103, 4 km<sup>2</sup>) situé à Ain Berda, la région d'Annaba. Après des études bibliographiques sur : les processus de genèse des crues, les techniques d'identification de ces processus, et l'équation d'infiltration génératrice de tout ça, plusieurs applications ont été testées.

L'évaluation des résultats issus de chaque chapitre a permis la réponse à des questions pertinentes. La séparation des hydrogrammes de crue nous a amené à déterminer les composantes d'écoulement pour chaque événement pluvieux, également, quelques éléments de compréhension sur l'infiltration au sein de Madjez Ressoul ont été apportés. Les valeurs des paramètres d'infiltration s'accordent avec ceux obtenues dans la littérature et le modèle à base de l'équation d'Horton est désormais le meilleur choix pour le bassin versant de Madjez Ressoul. La teneur en eau mesurée en laboratoire a bien reflété la relation entre l'humidité du sol et la variation du taux d'infiltration surveillé sur le terrain. Un résultat statistiquement significatif est obtenu après l'ajustement des taux d'infiltration calculés et mesurés, ce qui valide la fiabilité des données collectées expérimentalement.

**Mots clés :** Modèle continu, Modèle d'infiltration, paramètres, hydrogramme de crue, séparation des composantes d'écoulement.

## **Remerciements**

*Au terme de ce travail, j'aimerais rendre hommage à tous ce qui de loin ou de près m'a apporté son encouragement.*

*Tout d'abord, je me ferais un agréable devoir de remercier mon encadrant, le Dr. BOUTAGHANE Hamouda à l'université de Badji-Mokhtar, Annaba, pour l'encadrement, et tous les conseils dont j'ai pu bénéficier au cours des quatre années de recherches. Sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux critiques ont fortement alimenté ma réflexion. Qu'il trouve ici l'expression de mes sentiments les plus distingués.*

*Je tiens à exprimer mes vifs remerciements envers les examinateurs : Pr. HASBAIA Mahmoud, Dr. ABDELBAKI Chérifa, Dr. LAKEHAL Moussa. Également, le Pr. DJEMILI Lakhdar d'avoir accepté de présider le jury de soutenance.*

*Un grand merci au Dr. MERABTENE Tarek de l'université de Sharjah, c'est grâce à lui que j'ai pu concilier avec bonheur la partie théorique sur le potentiel d'infiltration, il m'a fourni également les outils nécessaires à la vérification de l'application de cette partie de thèse.*

*Je suis particulièrement heureuse de remercier le Pr. ABIDA Habib, et Dr. Manel ELLOUZ à l'université de Sfax, Tunisie, de m'avoir accueilli au sein de la faculté des sciences de la terre pendant (15 jours) de stage.*

*Je remercie également le MESRS pour le programme de bourse PNE. Cette thèse a été réalisée en partie pendant un stage de longue durée (7 mois) à l'université de Sharjah, aux Émirats Arabes Unis, dans le cadre d'une bourse PNE (Programme National Exceptionnel 2019/2020).*

## **Dédicaces**

*Je dédie cette thèse à mes très chers parents*

*À mes deux frères*

*Tout particulièrement à mon mari*

# Table des matières

المُلخَص _____	
ABSTRACT _____	
RESUME _____	
REMERCIEMENTS _____	
TABLE DES MATIERES _____	
LISTE DES FIGURES _____	
LISTE DES TABLEAUX _____	
LISTE DES NOTATIONS _____	
INTRODUCTION GENERALE _____	1
CHAPITRE I : INTERACTION DES PROCESSUS HYDROLOGIQUES ET FACTEURS DE CONTROLE _____	5
1.1 INTRODUCTION _____	5
1.2 PROCESSUS DE SURFACE A L'ECHELLE DU BASSIN VERSANT _____	6
1.3 PROCESSUS SOUTERRAINS _____	7
1.4 FACTEURS DE CONTROLE DES PROCESSUS HYDROLOGIQUES _____	10
1.5 SYNTHESE _____	11
CHAPITRE II : PRESENTATION DU BASSIN VERSANT DE MADJEZ RESSOUL _____	13
2.1 INTRODUCTION _____	13
2.2 CARACTERISTIQUES PHYSIQUES ET METEOROLOGIQUES _____	14
2.2.1 Morphologie _____	14
2.2.2 Hydrologie _____	15
2.2.3 Topographie _____	20
2.2.4 Occupation et texture du sol _____	22
2.2.5 Données pluviométriques et climatologiques _____	24
2.2.5.1 Lame d'eau écoulée, pluie et ETP mensuelles moyennes _____	27
2.2.5.2 Relation pluie-débit _____	29
2.3 CONCLUSION _____	30
CHAPITRE III : TECHNIQUES D'IDENTIFICATION DES COMPOSANTES DE L'ECOULEMENT _____	32
3.1 INTRODUCTION _____	32
3.2 TECHNIQUE DE SEPARATION DES PROCESSUS HYDROLOGIQUES _____	34
3.2.1 TECHNIQUES BASEES SUR LES TRACEURS _____	35
3.2.1.1 Traçage chimique _____	36
3.2.1.2 Traçage isotopique _____	37
3.2.2 TECHNIQUES SANS TRACEURS _____	37

---

DAHAK Asma

Thèse de Doctorat en Hydraulique/ 2021

Contribution à la modélisation hydrologique

des bassins versants Algériens : Cas du bassin versant de Madjez Ressoul

3.2.2.1	Techniques graphiques	38
3.2.2.2	Techniques analytiques (paramétriques)	40
3.2.2.2.1	Filtre récursif	40
3.2.2.2.2	Minima lissés	42
3.2.2.3	Techniques empiriques	43
3.2.2.3.1	Analyse de la courbe de récession	45
3.2.2.3.1.1	Approche mathématique	46
3.2.2.3.1.2	Approche graphique	47
3.2.2.3.1.3	Approche statistique	47
<b>3.3</b>	<b>APPLICATION DES TECHNIQUES DE SEPARATION SUR MADJEZ RESSOUL</b>	<b>49</b>
3.3.1	OBJECTIF	49
3.3.2	BASE DE DONNEES	49
3.3.3	METHODE DES SEGMENTS DE RECESSION INDIVIDUELS	50
3.3.3.1	<i>Construction et séparation des MRCs</i>	51
3.3.4	METHODE DU FILTRE RECURSIF	56
3.3.5	METHODE DES ALGORITHMES GENETIQUES (AGs)	61
3.3.6	DISCUSSIONS ET CONCLUSIONS	68
<b>CHAPITRE IV</b>	<b>: ESTIMATION DU TAUX D'INFILTRATION ET CHOIX DU MODELE ADEQUAT</b>	<b>73</b>
<b>4.1</b>	<b>INTRODUCTION</b>	<b>73</b>
<b>4.2</b>	<b>DEFINITIONS ET PARAMETRES DE L'INFILTRATION</b>	<b>73</b>
<b>4.3</b>	<b>ETAT DE L'ART DE L'ETUDE DU TAUX D'INFILTRATION</b>	<b>75</b>
4.3.1	OBJECTIFS DES MESURES DU TAUX D'INFILTRATION AU SEIN DE MADJEZ RESSOUL	79
4.3.2	DIFFICULTES RENCONTREES	80
4.3.3	PROTOCOLE EXPERIMENTAL	80
4.3.3.1	<i>Intégration de la cartographie</i>	81
4.3.3.2	<i>Description de l'infiltromètre à double anneau</i>	83
4.3.3.3	<i>Equipement et déroulement de l'essai</i>	85
4.3.3.4	<i>Méthodes de calcul et modélisation du processus d'infiltration</i>	89
4.3.3.5	<i>Acquisition des mesures et paramétrisation des modèles d'infiltration</i>	94
4.3.3.6	<i>Validation des modèles d'infiltration</i>	97
<b>4.4</b>	<b>MESURE DE LA TENEUR EN EAU ET VARIATION DU TAUX D'INFILTRATION DANS LE SOL</b>	<b>99</b>
4.4.1	GENERALITE ET NOTIONS FONDAMENTALES	100
4.4.2	PRECAUTION DE L'ESSAI	101
4.4.3	MATERIEL UTILISE	101
4.4.4	DEROULEMENT DE L'ESSAI	102
4.4.5	CALCUL DE LA TENEUR EN EAU	102
<b>4.5</b>	<b>RESULTATS ET DISCUSSION</b>	<b>103</b>
<b>4.6</b>	<b>CONCLUSION</b>	<b>119</b>
<b>CHAPITRE V</b>	<b>: PLAQUETTE HYDRO-INFORMATIQUE DU MODELE HYDROLOGIQUE</b>	<b>122</b>
5.1	INTRODUCTION, BUT DE LA MODELISATION ET DOMAINE D'APPLICATION	122
5.2	CONCEPT DU MODELE	123
5.3	STRUCTURE DU MODELE	124
5.4	DIFFERENTES EQUATIONS DU MODELE	125
5.4.1	<i>Processus d'infiltration</i>	125

**DAHAK Asma**

Thèse de Doctorat en Hydraulique/ 2021

Contribution à la modélisation hydrologique

des bassins versants Algériens : Cas du bassin versant de Madjez Ressoul

5.4.2	Processus d'évapotranspiration	129
5.4.3	Pertes initiales	129
5.5	ÉQUATION DE TRANSFERT	130
5.6	DEBIT DE BASE	130
5.7	SYNTHESE	131
<b>CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES</b>		<b>132</b>
<b>RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES</b>		<b>134</b>
<b>ANNEXES</b>		<b>157</b>

# Liste des figures

Figure 1:Schématisation des principaux processus de genèse des crues, inspirée de (Jordan 1992; Gnouma 2006).	6
Figure 2 : Localisation du bassin versant de Madjez Ressoul	14
Figure 3 : Vue en plan de la situation et du seuil jaugeur de la station d'Ain Berda	16
Figure 4 : Situation du bassin versant de Madjez Ressoul par rapport au grand bassin de la Seybouse et stations hydro-pluviométriques	17
Figure 5 : Bassins versants des retenues collinaires destinées à l'agriculture du bassin versant de Madjez Ressoul	18
Figure 6 : Lithologie et géologie de Madjez Ressoul	20
Figure 7 : Variation de la pente du bassin versant de Madjez Ressoul	22
Figure 8 : Occupation du sol du bassin versant de Madjez Ressoul	23
Figure 9 : Pourcentage des surfaces d'occupation du sol de Madjez Ressoul	24
Figure 10 : Débits moyens journaliers et pluies journalières au niveau du bassin versant de	25
Figure 11 : Répartition mensuelles et annuelles de la variabilité temporelle des pluies et des lames d'eau écoulées au niveau de Madjez Ressoul sur la période 1973-2003	26
Figure 12 : Evapotranspiration potentielle estimée par la méthode d'Oudin du bassin versant Madjez Ressoul sur la période 1973-2003	27
Figure 13 : Lame écoulée, pluie et ETP moyennes du bassin versant de Madjez Ressoul sur la période 1973-2003	28
Figure 14 : Déficients d'écoulement mensuels moyens au niveau de Madjez Ressoul sur 1973-2003	28
Figure 15 : Relation entre les lames écoulées et les précipitations mensuelles sur la période	30
Figure 16 : Techniques de séparation de l'hydrogramme de crue	34
Figure 17 : Méthodes conventionnelles de la séparation graphique de l'hydrogramme de crue.	38
Figure 18 : Aspect de la courbe de récession sous une échelle normale et logarithmique	45
Figure 19 : Débit journalier observé et sélection des événements de crue étudiés dans le bassin versant de Madjez Ressoul durant la période de 1973-2003	50
Figure 20 : Exemple d'une courbe durée-débit pour un événement : montre le pourcentage du temps pendant lequel le débit dans un cours d'eau est susceptible d'égaliser ou de dépasser une valeur d'intérêt spécifié	52
Figure 21 : Aspect des récessions individuelles et leur organisation	53
Figure 22 : Construction de la MRC pour l'évènement du 24/09/1973	53
Figure 23 : Séparation automatisée des MRCs construites sous différentes formes	55
Figure 24 : Inspection visuelle et calage des composantes d'écoulement par rapport à la pente de récession	59

Figure 25 : Séparation de l'évènement du 24/09/1973 en trois sous écoulements par la méthode du filtre récurrente .....	60
Figure 26 : Description de la méthode de croisement par moyenne utilisée pour créer une nouvelle solution. Inspirée de (Gregor and Malik 2012) .....	63
Figure 27 : Sélection des récessions individuelles et leur division en segments de N jours (Gregor and Malik 2012) .....	65
Figure 28 : Définition de la structure des segments pour chaque solution individuelle dans la population de solution .....	66
Figure 29 : Séparation de la MRC par la méthode des algorithmes génétiques pour l'évènement du 24/09/1973 .....	68
Figure 30 : Sélection des sites expérimentaux par rapport à la lithologie pour le bassin versant de Madjez Ressoul .....	82
Figure 31 : Dispersion des sites sélectionnés pour les essais par rapport à l'occupation du sol au niveau de Madjez Ressoul .....	83
Figure 32 : Infiltromètre à double anneau .....	84
Figure 33 : Préparation du matériel supplémentaire à l'implémentation de l'infiltromètre à double anneau .....	86
Figure 34 : Aspect de la courbe d'infiltration résultante des mesures du taux d'infiltration à l'aide de l'infiltromètre à double anneau .....	87
Figure 35 : Dépendance du taux d'infiltration $f(t)$ et la pluie, avec $f_a(t)$ : taux d'infiltration actuel .....	90
Figure 36 : Ajustement des données observées après traitement par l'équation de Kostiakov .....	96
Figure 37 : Ajustement des données observées après traitement par l'équation de Philip .....	96
Figure 38 : Caractéristiques du profil hydrique au cours d'une infiltration avec $\theta_0$ et $\theta_f$ sont respectivement la teneur en eau initiale et finale. Inspirée de (Musy and Soutter 1991) .....	100
Figure 39 : Intercomparaison des taux d'infiltration observés in situ et estimés de divers modèles pour le bassin versant de Madjez Ressoul .....	108
Figure 40 : Variation des paramètres d'infiltration pour le bassin versant de Madjez Ressoul .....	109
Figure 41 : Intercomparaison des taux d'infiltration observés in situ et estimés de divers modèles pour le bassin versant de Madjez Ressoul .....	115
Figure 42 : Taux d'infiltration observés et simulés pour le modèle d'Horton, Kostiakov et Philip .....	116
Figure 43 : Variation du coefficient de Nash des 25 sites pour le modèle d'Horton, Kostiakov, et Philip .....	118
Figure 44 : Variation du coefficient de corrélation des 25 sites pour le modèle d'Horton, Kostiakov, et Philip .....	118
Figure 45 : Variation de l'erreur quadratique des 25 sites pour le modèle d'Horton, Kostiakov, et Philip .....	119
Figure 46 : Variation du Biais des 25 sites pour le modèle d'Horton, Kostiakov, et Philip .....	119
Figure 47 : Etapes de construction d'un modèle hydrologique .....	122
Figure 48 : Principe de simulation d'un modèle pluie-débit dédié aux zones rurales .....	123
Figure 49 : Schéma structurel du modèle à deux réservoirs .....	124
Figure 50 : Processus de transformation de la pluie en ruissèlement .....	125



## Liste des tableaux

Tableau 1: Paramètres morphologiques du bassin versant de Madjez Ressoul .....	15
Tableau 2 : Récapitulatif des données collectées dans Madjez Ressoul .....	17
Tableau 3 : Description des retenues collinaires existantes dans Madjez Ressoul .....	18
Tableau 4 : Type de production animale à la commune d'Ain Berda .....	19
Tableau 5 : Classes d'altitude du bassin de Madjez Ressoul .....	21
Tableau 6 : Surfaces d'occupation du sol de Madjez Ressoul .....	23
Tableau 7 : Surfaces et périmètres des communes appartenant à Madjez Ressoul .....	24
Tableau 8 : Coefficient de ruissèlement mensuel moyen du bassin de Madjez Ressoul .....	29
Tableau 9 : Modélisation hydrologique de différentes composantes d'écoulement. ....	35
Tableau 10 : Outils puissants pour la séparation de l'hydrogramme de crue .....	44
Tableau 11:Caractéristiques statistiques de Madjez Ressoul, entre 1973-2003. ....	50
Tableau 12 : Valeurs des coefficients de récession calculés par la méthode des segments individuels et classification des types d'écoulement contribuant à chaque évènement de crue continue .....	56
Tableau 13 : Valeurs des coefficients calibrés par la méthode du filtre récursif et classification des types d'écoulement contribuant à chaque évènement de crue continue.....	60
Tableau 14 : Principaux domaines d'application des algorithmes génétiques .....	61
Tableau 15 : Paramètres de construction de la MRC avec les algorithmes génétiques .....	64
Tableau 16 : Coefficient de récession estimé par la méthode des Algorithmes génétiques .....	67
Tableau 17 : Paramètres descriptifs de l'infiltration .....	75
Tableau 18 : Système de coordonnées UTM des sites de mesure .....	81
Tableau 19 : Caractéristique de l'infiltromètre à double anneau .....	85
Tableau 20:Taux d'infiltration initial et final du bassin versant de Madjez Ressoul .....	87
Tableau 21 : Classification des modèles d'infiltration .....	89
Tableau 22 : Modèles d'infiltration empiriques basés sur le temps .....	92
Tableau 23 : Etapes de calcul de la capacité d'infiltration pour le modèle d'Horton .....	94
Tableau 24 : Résultats préliminaires des paramètres de l'équation d'Horton.....	95
Tableau 25 : Calcul de la teneur en eau en pourcentage (%).....	103
Tableau 26 : Paramètres d'infiltration calculés après optimisation .....	109
Tableau 27 : Valeurs du Curve Number du bassin versant de Madjez Ressoul .....	127

## Liste des Notations

Symbole	Description
<b>ETP</b>	Evapotranspiration potentielle journalière, [mm]
<b>H<sub>max</sub></b>	Profondeur maximale de la retenue collinaire, [m]
<b>H<sub>min</sub></b>	Profondeur minimale de la retenue collinaire, [m]
<b>LER</b>	Lame d'eau ruisselée, [mm]
<b>Vol</b>	Volume d'eau ruisselé, [m <sup>3</sup> ]
<b>BFI</b>	Indice du débit de base
<b>MRC</b>	Courbe de récession moyenne (Master recession curve)
<b>n, α</b>	Constantes
<b>S(t)</b>	Volume dans le reservoir de subsurface à temps t, [m <sup>3</sup> ]
<b>I(t)</b>	Débit entrant, [m <sup>3</sup> /s]
<b>Q(t)</b>	Débit sortant, [m <sup>3</sup> /s]
<b>Q<sub>0</sub></b>	Débit initial à t=0, [m <sup>3</sup> /s]
<b>Q<sub>t</sub></b>	Débit à temps suivant, [m <sup>3</sup> /s]
<b>A</b>	Surface du bassin versant, [km <sup>2</sup> ]
<b>P</b>	Précipitation, [mm]
<b>Q<sub>r</sub></b>	Débit de l'eau de pluie nouvelle, [m <sup>3</sup> /s]
<b>Q<sub>s</sub></b>	Débit de l'eau de pluie ancienne, [m <sup>3</sup> /s]
<b>Q</b>	Débit total, [m <sup>3</sup> /s]
<b>δ<sub>s</sub></b>	Concentration de l'eau de la nouvelle pluie
<b>δ<sub>r</sub></b>	Concentration de l'eau de l'ancienne pluie
<b>δ<sub>Q</sub></b>	Concentration du débit total présent dans le cours d'eau
<b>R</b>	Ruissèlement total, [m <sup>3</sup> /s]
<b>K</b>	Coefficient de récession, traduit la réactivité du bassin versant, [Jour <sup>-1</sup> ]
<b>B</b>	Exposant adimensionnel
<b>B(T)</b>	Composante d'écoulement filtrée par routage de la constante de récession
<b>F(T)</b>	Composante à haute fréquence
<b>S</b>	Pente visuelle du coefficient de récession
<b>W</b>	Moyenne de la fraction des volumes des sous-écoulements sur les volumes totaux
<b>f(t)</b>	Taux d'infiltration en fonction du temps, [cm/h]
<b>F(t)</b>	Infiltration cumulative, [cm/h]
<b>f<sub>i</sub></b>	Capacité d'infiltration, [cm/h]
<b>K<sub>s</sub></b>	Conductivité hydraulique à la saturation, [cm/h]

<b>f<sub>0</sub></b>	Taux d'infiltration initial, [cm/h]
<b>F<sub>c</sub></b>	Taux d'infiltration final, [cm/h]
<b>A, b</b>	Paramètres du modèle de kostiakov
<b>S</b>	Paramètre de sorptivité en fonction de la teneur en eau aux conditions de limite, [cm h <sup>-0.5</sup> ]
<b>K<sub>p</sub></b>	Fonction gravitaire, fonction de la conductivité hydraulique à la saturation, [cm h <sup>-1</sup> ]
<b>W</b>	Teneur en eau d'un échantillon en %
<b>Me</b>	Masse d'eau évaporée, [g]
<b>Ms</b>	Masse de l'échantillon sec, [g]
<b>M<sub>1</sub></b>	Masse du récipient, [g]
<b>M<sub>2</sub></b>	Masse du (récipient + l'échantillon du sol), [g]
<b>M<sub>3</sub></b>	Masse du (récipient + sol sec), [g]
<b>PI</b>	Pertes initiales, [mm]
<b>K<sub>1</sub></b>	Coefficient de récession du reservoir de surface, [jour <sup>-1</sup> ]
<b>K<sub>2</sub></b>	Coefficient de récession du reservoir de subsurface, [jour <sup>-1</sup> ]
<b>K<sub>3</sub></b>	Coefficient de récession du reservoir de sous-sol, [jour <sup>-1</sup> ]
<b>Q<sub>1</sub></b>	Débit de l'écoulement de surface, [m <sup>3</sup> /s]
<b>Q<sub>2</sub></b>	Débit de l'écoulement de subsurface, [m <sup>3</sup> /s]
<b>Q<sub>3</sub></b>	Débit de l'écoulement de base, [m <sup>3</sup> /s]
<b>V<sub>R</sub></b>	Volume ruisselé, [m <sup>3</sup> ]
<b>V<sub>P</sub></b>	Volume de la pluie précipitée, [m <sup>3</sup> ]
<b>S<sub>h</sub></b>	Potentiel hydrique maximal, [mm]
<b>I<sub>a</sub></b>	Volume d'eau dans le sol avant le ruissèlement (Infiltration + pluie interceptée par la végétation), [mm]
<b>K<sub>c</sub></b>	Coefficient cultural, fonction de type de culture et de son état végétatif
<b>K<sub>s</sub></b>	Coefficient d'humidité du sol dans le réservoir
<b>S<sub>s</sub></b>	Stockage dans les dépressions du sol à l'instant t, [mm]
<b>S<sub>m</sub></b>	Stockage maximum dans les dépressions du sol, [mm]
<b>H</b>	Hauteur de pluie tombée jusqu'à l'instant t, [mm]
<b>N<sub>s</sub></b>	Constante de stockage, [mm <sup>-1</sup> ]
<b>H<sub>f</sub>(t)</b>	Eau infiltrée à l'instant t, [mm]
<b>V(t)</b>	Volume de stockage à l'instant t, [m <sup>3</sup> ]
<b>Q<sub>e</sub>(t)</b>	Débit entrant à l'instant t déduit de la pluie nette, [m <sup>3</sup> /s]
<b>Q<sub>s</sub>(t)</b>	Débit sortant à l'instant t déduit de l'hydrogramme de crue, [m <sup>3</sup> /s]
<b>K</b>	Coefficient unique de linéarité de la temporisation (lag time), [m <sup>3</sup> /s]
<b>V<sub>si</sub>(t)</b>	Volume stocké au réservoir i à l'instant t, [m <sup>3</sup> ]

## Introduction générale

La modélisation pluie-débit fait appel de plus en plus à l'intégration d'un maximum de données associées aux processus hydrologiques. Néanmoins, ces données ne sont pas toujours disponibles ou le sont parfois de façon incomplète (Hingray et al. 2009). Tel est le cas des bassins versants algériens, où les pluies sont généralement périodiques à torrentielles, désignées par l'absence des stations de mesure pluviométriques et hydrométriques (Messak 2012).

Dans l'objectif est la simulation sur de longues périodes de temps, ce problème a mené à bien initié de nouveaux modèles hydrologiques, qui se basent principalement sur le calage (Sakaa et al. 2015). et les hypothèses simplificatrices (Baahmed 2015). Mais, malgré que la majorité d'entre eux fonctionnent parfaitement avec peu d'entrées, ils présentent l'inconvénient de ne pas simuler les débits extrêmes en leurs intégralités, alors qu'ils doivent être typiques pour la considération des conditions initiales (Thibault 2005; Messak 2012).

La prise en compte de la variabilité spatiale des caractéristiques physiques a donné lieu à d'autres principaux travaux de modélisation (Bouanani et al. 2011; Medane 2012; Hallouz 2013; Mrad et al. 2014; Yles 2014; Ytoui 2014; Baahmed 2015; Djellouli et al. 2015; Sakaa et al. 2015; Boulmaiz 2016; ketrouci and Meddi 2016; Mrad et al. 2016; Skhakhfa and Ouerdachi 2016; Touazi and Laborde 2017; Abdelghani et al. 2018; Belaroui et al. 2019; Hadour et al. 2020). Ces derniers ont révélé que la combinaison empirique entre les modèles conceptuels basés sur le bilan hydrique et d'autres modèles est un concept concluant pour les prévisions des crues.

L'objectif principal de ce travail de thèse est de contribuer au développement de ces recherches, par valoriser les informations hydrologiques nécessaires à la modélisation pluie-débit, en incorporant des approches d'analyse quantitative et expérimentale à la base de données d'un modèle conceptuel.

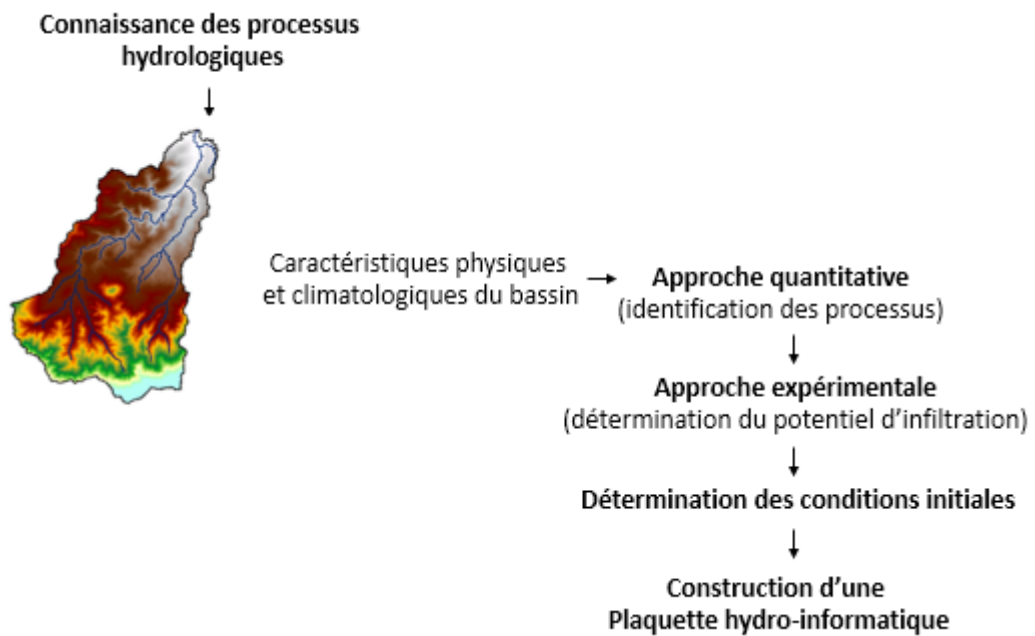
La démarche proposée consiste principalement à apporter quelques éléments de compréhension et d'observation sur terrain qui visent à améliorer la phase de calage d'un modèle dédié à un bassin versant algérien.

Cette thèse est structurée en cinq chapitres : Le premier est constitué d'une revue bibliographique sur les processus hydrologiques de genèse des crues, et les facteurs contrôlant les mécanismes mis en jeu. L'explication résume spécifiquement les types des processus hydrologiques que nous puissions rencontrer au niveau d'un bassin versant et les enquêtes de recherche mises à la disposition des hydrologues.

Le deuxième chapitre est consacré à la présentation du site d'étude (le bassin versant de Madjez Ressoul), les données pluviométriques et climatologiques et physiques sont alors collectées.

Le troisième chapitre n'a pas uniquement pour but de faire une revue bibliographique sur les techniques d'analyse classique ou moderne des débits, mais aussi pour fournir une information extrêmement précieuse sur le régime d'écoulement et les relevés des instants auxquels les débits commencent et finissent, pendant une longue série d'années.

À ce stade, il s'agit d'incorporer l'approche expérimentale dans la modélisation hydrologique, on accorde une certaine attention à la réponse hydrologique du bassin en question par la définition des différentes équations d'infiltration qui peuvent être utilisées dans le modèle hydrologique, ainsi les conditions d'humidité initiales, et une conclusion qui résume la structure finale du modèle adéquat, dans les autres chapitres.



## Résumé graphique de la démarche adoptée dans la thèse

---

**INTERACTION DES PROCESSUS ET  
FACTEURS DE CONTROLE**

# Chapitre I: Interaction des processus hydrologiques et facteurs de contrôle

## 1.1 Introduction

L'intégration des processus hydrologiques dans la modélisation a été théoriquement beaucoup discutée dans les études des mécanismes de formation des crues. Pratiquement, (Hingray et al. 2009; Roche et al. 2012) ont expliqué que c'est la combinaison des deux facteurs temps et espace à l'échelle du bassin versant qui rend la provenance des processus hydrologiques mal comprise.

Les hydrologues et les hydrogéologues ont tenté notamment de simplifier la représentation de ces processus par maîtriser du moins partiellement : Quel est le devenir de l'eau de pluie ? Comment elle circule ? Et quels facteurs surtout permettent de contrôler tout ça ?

L'objectif de ce chapitre est de donner un bref aperçu sur les processus de genèse des crues à long terme, avant de s'entamer à l'identification de leurs composantes de flux dans les réseaux naturels de Madjez Ressoul.

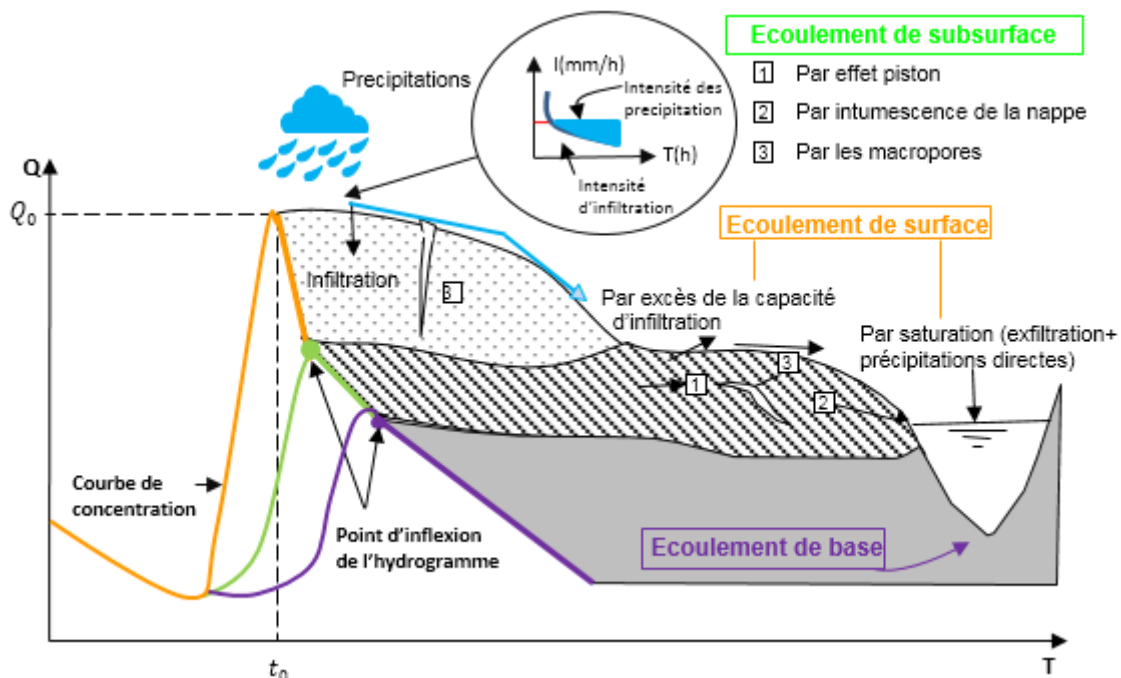
La classification discutée ici concerne la schématisation de (Jordan 1992). Il explique bien que l'histoire primordiale des processus hydrologiques commence du cycle naturel de l'eau : d'où le débit à l'exutoire collecte simultanément, ou successivement trois écoulements majeurs (figure 1).

-Le premier : circule rapidement à la surface du sol grâce à l'absence des obstacles est nommé de ce fait écoulement de surface. Il dépend des caractéristiques de la pluie tombante sur des superficies relativement petites ainsi que de la percolation dans la rivière.

-L'écoulement de subsurface : c'est l'écoulement latéral dû à l'infiltration de l'eau de pluie dans la zone non saturée du sol. Il dépend de la structure du sol à

la surface et passant généralement à quelques dizaines de centimètres de profondeur.

-L'écoulement de base est représenté par la percolation des eaux aux couches du sol les plus profondes qui rejoignent la zone saturée de l'aquifère. Pendant la période sans précipitation c'est l'écoulement qui vient du tarissement de la nappe. Quoique ce dernier ait été toujours rencontré en saison estivale, certains ont montré que l'écoulement de base peut exclusivement représenter l'écoulement retardé et constitue la partie majeure de l'hydrogramme de crue (écoulement par intumescence de la nappe).



**Figure 1:** Schématisation des principaux processus de genèse des crues, inspirée de (Jordan 1992; Gnouma 2006).

### 1.2 Processus de surface à l'échelle du bassin versant

L'explication principale de la genèse des crues revient à Horton en 1933 qui a bien introduit une théorie physique, basée sur la notion de la limite d'infiltrabilité des sols. En effet, il considère que le ruissèlement de surface naît lorsque la capacité de la pluie dépasse celle d'infiltration limite.

Plusieurs études ont été avancées concernant le développement de l'écoulement Hortonien (Horton Overland Flow). La majorité d'elles confirment que ce type d'écoulement concerne particulièrement les zones semi-arides et urbaines, où les sols sont dépourvus de végétation, le climat est moins tempéré et les sols ont des capacités d'infiltration généralement faibles.

Bien que le modèle Hortonien se soit très vite répondu grâce à sa simplicité, d'autres modèles ont été proposés aux forêts, aux zones à climat tempéré ou même équatorial après avoir découvert que ce dernier n'est apparemment pas un mécanisme majeur de la génération des crues. (Cappus 1960) est certainement le premier qui précède des concepts de ruissellement par saturation (Saturation Overland Flow), en supposant que l'écoulement sur des surfaces épuisées oblige l'eau à s'exfiltrer pour rejoindre l'écoulement rapide. C'est donc la variabilité de la zone de ruissellement qui détermine le type d'écoulement par rapport à d'autres variables maitresses (Dunne et Black, 1970) à savoir : la position topographique, et la profondeur de la nappe avant l'averse (Cerda and GarciaFayos 1997; Léonard et al. 2004; Fang et al. 2014; Masselink et al. 2016; Dunkerley 2018).

### 1.3 Processus souterrains

Au moment que la majeure partie de l'eau infiltrée rejoint lentement la nappe phréatique sous l'effet de la gravité, l'existence « des zones contributives » donne lieu à des écoulements latéraux (Cosandey 1994). Ce type d'écoulement se produit selon les conditions d'humidité du sol (état initial + volume stocké) est nommé également écoulement de subsurface ou (hypodermique).

En littérature, les progrès accomplis dans le domaine de l'écoulement de subsurface sont étroitement liés à la façon de définir la source de la réponse hydrologique. Ceci est dû probablement à l'ambiguïté de concevoir et distinguer les mécanismes en jeu qui permettent de comprendre le rapide transfert de l'eau à travers le sol : en se basant sur la relation entre le mouvement et l'humidité du sol,

(Buckingham 1907) a documenté l'écoulement de subsurface comme étant non saturé, tandis que des études de (Weiler et al. 2005; Huziy and Sushama 2017; Pirastru et al. 2017) ont été menées pour montrer qu'il est lié directement à la conductivité hydraulique. Cette explication qui semble par ailleurs juste, demeure la plus utilisée après l'étude expérimentale de (Darcy 1934).

Dans ce même contexte, (Rooij 2016) a expliqué que la couche en contact avec la nappe phréatique est toujours saturée. Mais juste au-dessus de cette couche, où les racines pénètrent et absorbent l'eau, le sol peut facilement s'assécher à tel point que l'eau ne se trouve que dans les pellicules entourant les grains et dans les petites poches des points de contact des grains.

### **-Écoulement par effet piston**

L'explication de la forte proportion de l'eau ancienne dans l'hydrogramme de crue est justifiée par l'existence de l'écoulement par effet piston (translatory flow) (Musy 1998; Essalaffer 2003; Vasconcelos 2016). Dans ce cas, la transmission quasi instantanée d'une onde de pression de l'eau ancienne vers l'aval est conditionnée par une nouvelle eau prévenant directement des précipitations sur un sol de très faible capacité de stockage.

Plusieurs auteurs suscitent certaines questions permettant de bien comprendre comment un écoulement lent peut arriver suffisamment à temps et rejoindre la rivière. C'est en fait, la liaison entre la distance des zones contributives et le mode de transfert entre deux conduites de sol qui contrôlent la vitesse de sa réponse (Jordan 1992; Anderson et al. 1997).

### **-Intemuscence de la nappe**

Bien que les études expérimentales à l'aide des traceurs chimiques soient envisagées pour le but de prouver la domination de l'écoulement de surface dans l'hydrogramme de crue (Barthold et al. 2016), peu de résultats ont fourni des preuves de cette préconception (Barthold et al. 2017; Iwasaki et al. 2019). C'est

plutôt, un nouveau terme « intumescence de la nappe (Groundwater ridging) » est ajouté.

D'une manière générale, l'augmentation rapide du gradient de charge hydraulique de l'aquifère durant la crue favorise le soulèvement de la nappe en bas du versant (Sklash and Farvolden 1979; Waswa and Lorentz 2015). (Zang et al. 2017) ont analysé le doublement du débit de base d'un cours d'eau sous différentes conditions, y compris l'intensité de la pluie, la perméabilité du sol, la hauteur de la nappe aux limites et le niveau initial de l'eau. Les résultats apportés à cette étude confirment que la réaction de la nappe phréatique est proportionnelle à une vitesse de développement, et un gradient de charge non saturé.

### **-Écoulement par les macropores**

L'écoulement par les macropores (Macropores flow) a été observé par (Beasley 1976) à l'aide d'une relation rapprochée entre l'intensité maximale de l'averse et la pointe de l'hydrogramme subsuperficiel. Selon (Jiří et al. 2016; Sasal et al. 2017; Bonito et al. 2018), on lui attribue principalement le rôle d'accélérer la recharge de la nappe tout en favorisant le déclenchement de l'effet piston par l'accroissement des vitesses de percolation. Au vu de l'importance de comprendre leurs rôles dans les processus d'écoulement de subsurface, des études basées sur l'expérience prise sur le terrain et la subjectivité du chercheur ont été envisagées pour déterminer les caractéristiques des macropores (Hollis et al. 2017). Brièvement, les résultats fournis avaient unanimement jugé les critères de classification d'un macropore comme suit :

- Macropores classés par diamètres équivalents : selon la proposition de (Beven and Germann 1982; Jordan 1992), qui considère que l'écoulement dans les macropores est turbulent, et géré seulement par la gravité.
- Macropores classés par la texture du sol et la conductivité hydraulique (Larsbo et al. 2014).

### 1.4 Facteurs de contrôle des processus hydrologiques

Ce qui met en évidence la nécessité d'une modélisation approfondie du système hydrologique c'est l'effet combiné des processus superficiels et souterrains, cet effet dépend fortement des conditions locales, dont la végétation est souvent le facteur le plus important. Son rôle est lié à l'interception de la quantité précipitée et la réduction du ruissèlement (Živković et al. 2015; Wang et al. 2017; Jianbo et al. 2018). En zones tempérées, les feuilles et les tiges de la plante peuvent capturer la pluie et l'obliger à atteindre le sol, il finira donc par l'infiltration de l'eau vers les couches du sol au lieu qu'elle ruisselle en surface. Néanmoins, ce concept peut être totalement bouleversé dans le cas d'une végétation dense, où le volume de l'eau absorbée par la plante devient énorme, et les pores du sol ont plutôt domination à l'exfiltrer.

Inexorablement, l'intensité, la durée, et la période de retour des précipitations ont aussi une incidence considérable sur les changements du système d'écoulement sous la surface. La façon dont les précipitations agissent physiquement sur les écoulements peut être décrite par le changement de débit du ruissèlement lors de l'évènement pluvieux et la recharge de la nappe en période de sécheresse (Park et al. 2011). A ceci s'ajoute la surface de la terre sur laquelle la pluie tombe, (Niemczynowicz 1999) s'accorde avec (Sajikumar and Remya 2014) sur le fait que le sens de l'utilisation des sols agricoles par rapport à la topographie dégradent leurs états structuraux. En effet, les machines d'agriculture et l'évolution des terrains vierges en surfaces imperméables compactent le sol, et limitent sa capacité à infiltrer l'eau, au fur et à mesure de la construction des surfaces bâties.

L'augmentation de l'interaction de ces processus par rapport à la couverture végétale, le sol, la géologie, la topographie et le type de l'aquifère s'explique par l'impact projeté du changement climatique (Menzel and Burger 2002). Son effet ne s'arrête pas à la favorisation du ruissèlement et la diminution de l'infiltration pour

les zones humides, mais perturbe aussi le fonctionnement du système souterrain, et rend la pénurie de l'eau de plus en plus critique. Quoique cela ne soit pas toujours le cas, l'étude menée par (Engelenburg et al. 2017) a montré paradoxalement que l'augmentation de la température en zones arides et semi-arides peut entraîner une élévation des eaux souterraines (car seules les pluies de fortes intensités sont capables de s'infiltrer assez vite avant de s'évaporer, et les aquifères alluviaux seront rechargés par les inondations lors des crues).

### 1.5 Synthèse

On a bien compris par cette synthèse bibliographique que les processus hydrologiques se diffèrent d'un bassin à un autre et qu'il est très nécessaire de proposer un modèle hydrologique adaptatif à chaque endroit. Nous devons de cet effet investir des techniques permettant de caractériser la dynamique de chaque processus face aux conditions agissantes.

Si théoriquement l'origine spatiale et temporelle de l'eau était détecté par les hydrologues à l'aide de différentes approches, les modèles hydrologiques basés sur l'identification des processus de l'hydrogramme de crue ainsi que les études expérimentales sont concrètement les plus adoptés. Ces informations de valeur nous encouragent de plus en plus à chercher à les comprendre et les tester.

---

**PRESENTATION DU BASSIN  
VERSANT DE MADJEZ RESSOUL**

## Chapitre II: Présentation du bassin versant de Madjez Ressoul

### 2.1 Introduction

Le bassin versant sur lequel s'applique la problématique de cette thèse est nommé Madjez Ressoul (figure 2). Il a été choisi vu sa position stratégique et ses caractéristiques non changées. Certains aspects de ce bassin versant ont été traités par de nombreux chercheurs à savoir : (Badra 2010; Louamri 2013), pour de multiples objectifs. Dont le but est la prise en compte de la variabilité spatiale des caractéristiques physiques à la modélisation, le présent chapitre est consacré à une description générale de l'état du bassin versant de Madjez Ressoul et des différentes données disponibles.

Il s'agit donc d'un sous-bassin du grand bassin de la Seybousse recouvert topographiquement par les deux cartes de : Azzaba-Est (NJ-32-II-3) et Drean-Ouest (NJ-32-II-4) à une échelle de 1/50.000<sup>e</sup>, et situé dans la région d'Annaba, à l'est de l'Algérie entre : (7 ° 27'40.81 " à 7 ° 36'56.24 ") de longitude, et (36 ° 32'55.13 " à 36 ° 41'19.4 ") de latitude, il couvre une superficie de forme et de réponse moyenne le long de son principal cours d'eau 'Oued Ressoul'. Ce bassin est caractérisé par un climat semi-aride généralement chaud en été et froid en hiver avec une pluviométrie annuelle totale de 635,87 mm en moyenne. Les précipitations quotidiennes sont intermittentes et peuvent atteindre plus de 105 mm / jour, tandis que l'évapotranspiration peut atteindre 7 mm / jour.

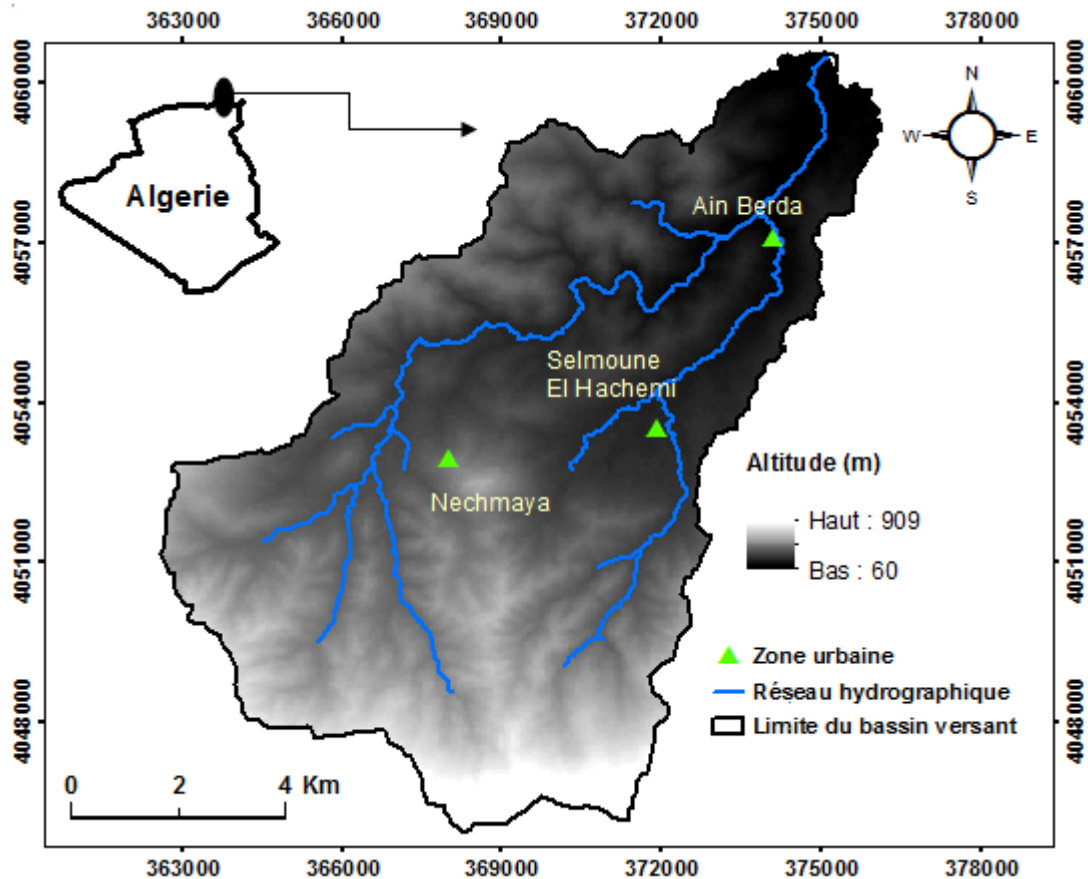


Figure 2 : Localisation du bassin versant de Madjez Ressoul

## 2.2 Caractéristiques physiques et météorologiques

### 2.2.1 Morphologie

La superficie du bassin versant ( $S$ ), son périmètre ( $P$ ), son indice de compacité ( $Kc$ ) et le rectangle équivalent avec ses différentes cotes sont les paramètres géométriques d'un bassin versant (Tableau 1). La détermination de ces paramètres repose sur le tracé précis du bassin versant sur une carte d'état-major. Dans notre cas, nous avons choisi un outil de SIG pour mesurer la superficie et le périmètre ( $S=103,4 \text{ Km}^2$ ,  $P= 52,77 \text{ Km}$ ) de Madjez Ressoul.

Tableau 1: Paramètres morphologiques du bassin versant de Madjez Ressoul

Paramètre	Formule	Valeur
Indice de compacité	$k_c = 0.28 \times \frac{P}{\sqrt{S}}$	1.45
Longueur du rectangle équivalent	$L = \frac{K_C}{1.12} \times \sqrt{S \left( 1 + \sqrt{1 - \left( \frac{1.12}{K_C} \right)^2} \right)}$	21.60 [km]
Largeur du rectangle équivalent	$l = \frac{K_C}{1.12} \times \sqrt{S \left( 1 - \sqrt{1 - \left( \frac{1.12}{K_C} \right)^2} \right)}$	4.79 [km]
Altitude moyenne	$H_{moy} = \frac{1}{S_T} \sum S_l \times \frac{H_{i-1} + H_i}{2}$	307.96 [m]
Dénivelée spécifique	$D = H_{5\%} - H_{95\%}$	500 [m]
Indice de pente de roche	$I_p = \frac{1}{\sqrt{L}} \sum \sqrt{S_i \times d_i}$	3.41
Indice de pente global	$I_g = \frac{D}{L}$	23.15
Densité de drainage	$D_d = \frac{\sum L_i}{S}$	0.63 [km/km <sup>2</sup> ]

## 2.2.2 Hydrologie

Madjez Ressoul dont les processus hydrologiques s’intersectent relativement d’une façon naturelle a intéressé beaucoup de chercheurs depuis (Gilbert.Jaccon 1986) et jusqu’à maintenant (Boulmaiz 2016; Skhakhfa and Ouerdachi 2016; Bouguerra 2018). C’est un milieu demeure rural d’espaces généralement agricoles, de faible agglomération.

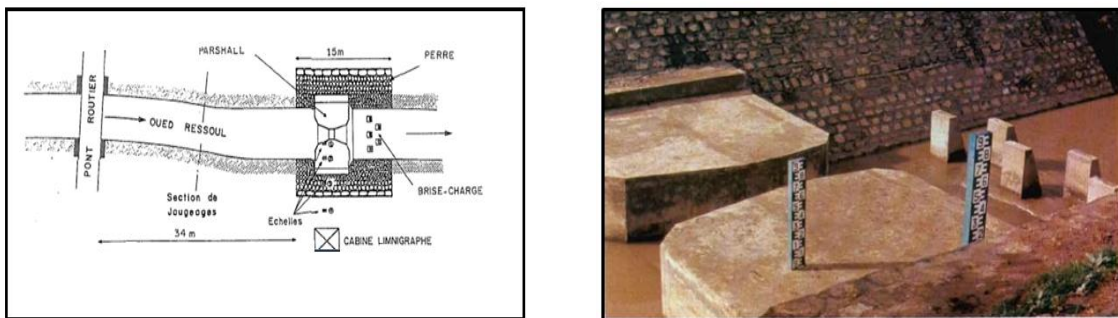
Dernièrement, la transformation des campagnes en zone urbaine dans la plupart des bassins versants a entraîné des conséquences visibles sur l’augmentation du ruissèlement par le facteur de l’imperméabilité, ce qui a rendu la modélisation des processus hydrologiques compliquée de plus en plus. En outre, le choix d’un

## Chapitre II : Présentation du bassin versant de Madjez Ressoul

---

bassin tel Madjez Ressoul est idéal pour mettre le point sur tous les processus hydrologiques. Cependant, si l'objectif de la modélisation détaillée est l'intégration des écoulements qui varient spatialement et temporellement, la simplification de choisir un bassin versant de ce même type reste le bon choix.

L'hydrologie dans le bassin versant de Madjez Ressoul est bien connue par les données hydro-pluviométriques. Deux stations pluviométriques ont été construites au niveau du bassin et une autre hydrométrique se trouve au niveau de l'aval. Les observations de cette dernière montre qu'elle est équipée d'un seuil jaugeur de type parshall qui sert précisément à détecter les périodes d'étiage (figure 3). Un limnimètre et un limnigraphe caractérisent également la station d'Ain Berda et mesurent le régime d'écoulement modifié par le rétrécissement de la section transversale du jaugeur et par le brusque changement de sa pente.



**Figure 3 :** Vue en plan de la situation et du seuil jaugeur de la station d'Ain Berda

Le réseau hydrographique de Madjez Ressoul est lié au grand bassin de la Seybouse (figure 4) par le cours d'eau de Meboudja et formé par deux principaux affluents d'Oued Guis à la direction de la wilaya de Guelma, à l'ouest d'Ain Berda. Les données pluviométriques (pluie, débit) enregistrées sont choisies pour un pas de temps journalier (tableau 2).

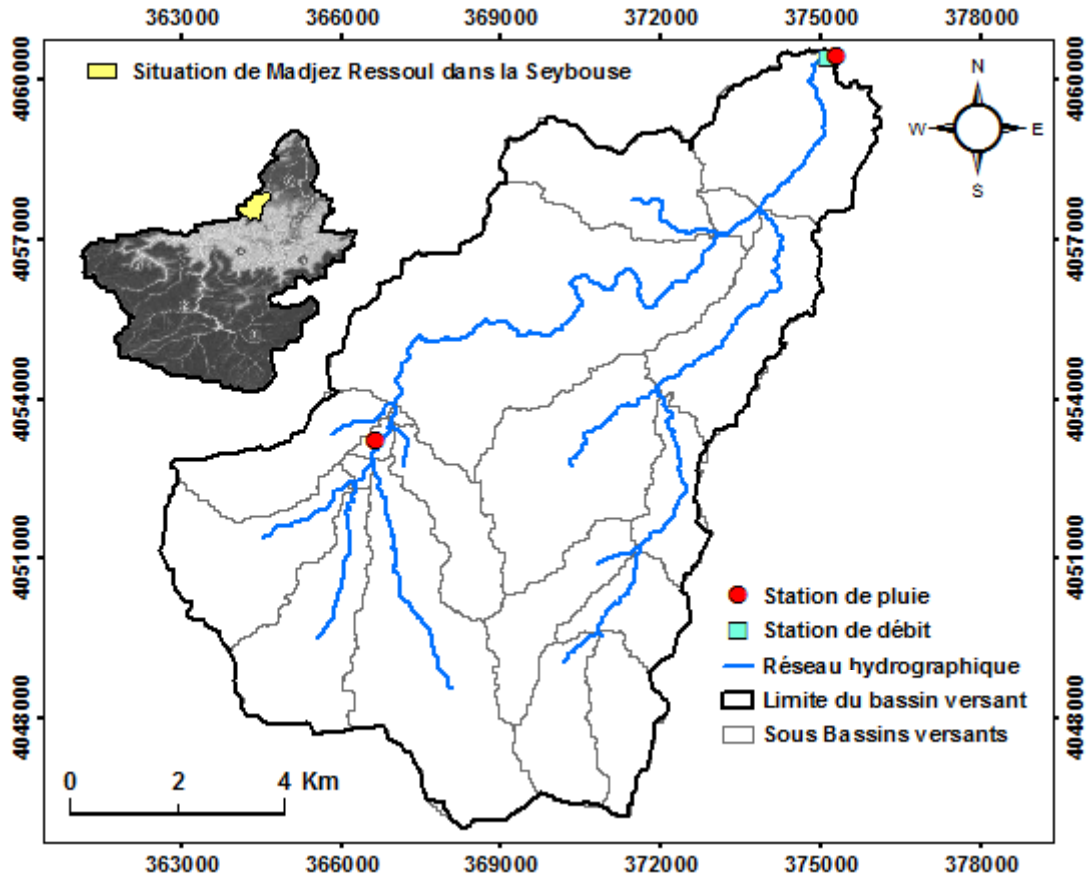


Figure 4 : Situation du bassin versant de Madjez Ressoul par rapport au grand bassin de la Seybouse et stations hydro-pluviométriques

Tableau 2 : Récapitulatif des données collectées dans Madjez Ressoul

Donnée	Type	Unité
Pluie	Journalière totale	(mm)
Débit	Moyen journalier	(m <sup>3</sup> /s)
ETP	Journalière	(mm)

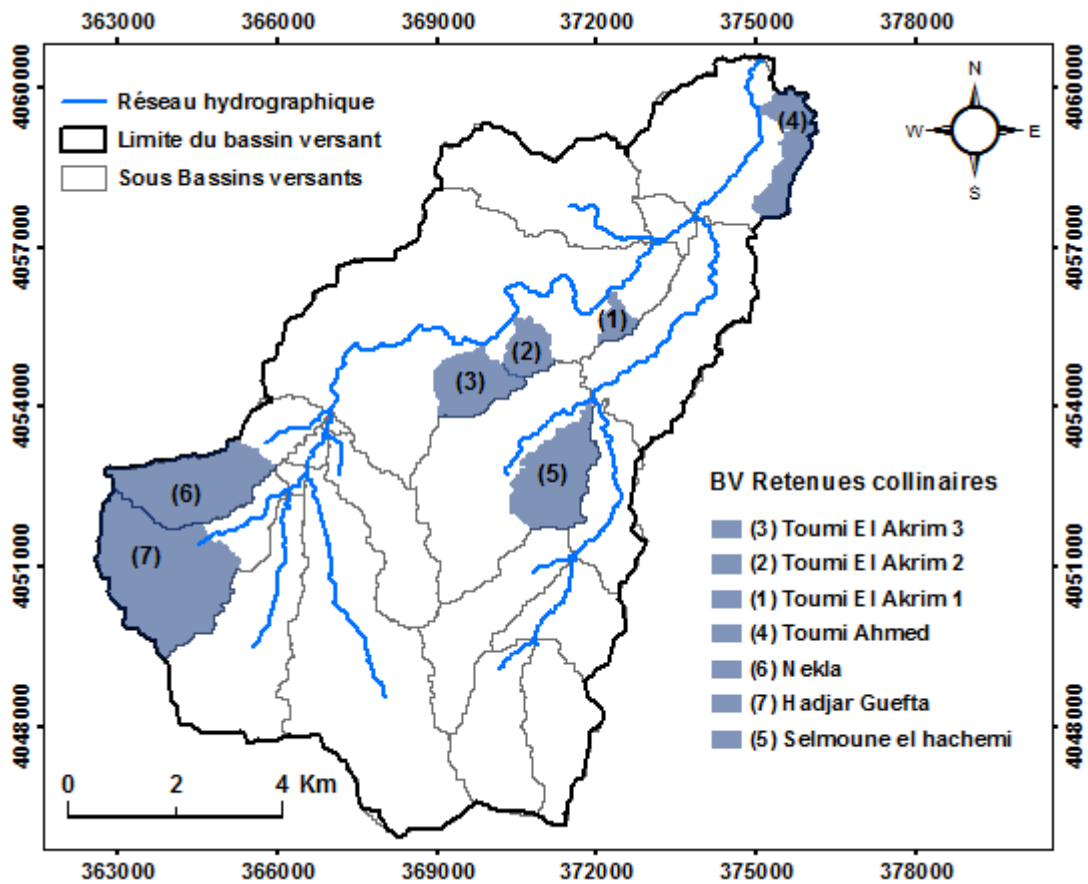
L'agriculture dans le bassin versant de Madjez Ressoul est restée pendant des générations l'activité sociale et économique la plus vitale pour la communauté du bassin et au-delà. Les terres agricoles représentent 95% de la zone de chalandise totale. Sept retenues collinaires (tableau 3) réparties au niveau du bassin versant

## Chapitre II : Présentation du bassin versant de Madjez Ressoul

(figure 5) et dédiées aux aménagements agricoles ont été construites par les agriculteurs pour satisfaire le besoin en eau pour l'irrigation.

**Tableau 3 :** Description des retenues collinaires existantes dans Madjez Ressoul

BV de la Retenue	Surface (km <sup>2</sup> )	Périmètre (km)	H <sub>max</sub> (m)	H <sub>min</sub> (m)
Toumi Ahmed	1,324	9,749	171	69
Toumilaakrim 1	0,363	3,642	218	110
Toumilaakrim 2	0,740	4,707	238	161
Toumilaakrim 3	1,435	6,668	275	169
Selmoune alhechmi	2,304	9,301	323	158
Nekla	3,161	10,702	558	240
Hadjarguefta	5,001	13,055	59	297



**Figure 5 :** Bassins versants des retenues collinaires destinées à l'agriculture

## Chapitre II : Présentation du bassin versant de Madjez Ressoul

---

Concernant la production animale, tous les animaux sont conduits à la corde et leur alimentation est principalement assurée par les résidus de récoltes (tableau 4).

**Tableau 4 :** Type de production animale à la commune d'Ain Berda

<b>Produit animal</b>	<b>Nombre</b>
<b>Poulet de chair</b>	44
<b>Poules pondeuses</b>	05 Poulailier
<b>Elevage bovin</b>	29 Etables
<b>Elevage apicole</b>	300 Ruches
<b>Ruches</b>	50 Ruches traditionnelles

Les observations des couches géologiques (figure 6) montrent une composition en aquifère confiné recouvert d'une couche de roches sédimentaires globalement perméables (d'argilo-calcaire et grès) et naturellement réparties sur la couverture de l'étude.

Les grès numidiens et les grès argilo-calcaires et argilo-schisteux et le Crétacé supérieur se rencontrent surtout dans la partie Nord du bassin versant, alors que les formations superficielles ont été observées dans la plaine Ain Berda et aussi au niveau des vallées des principaux affluents.

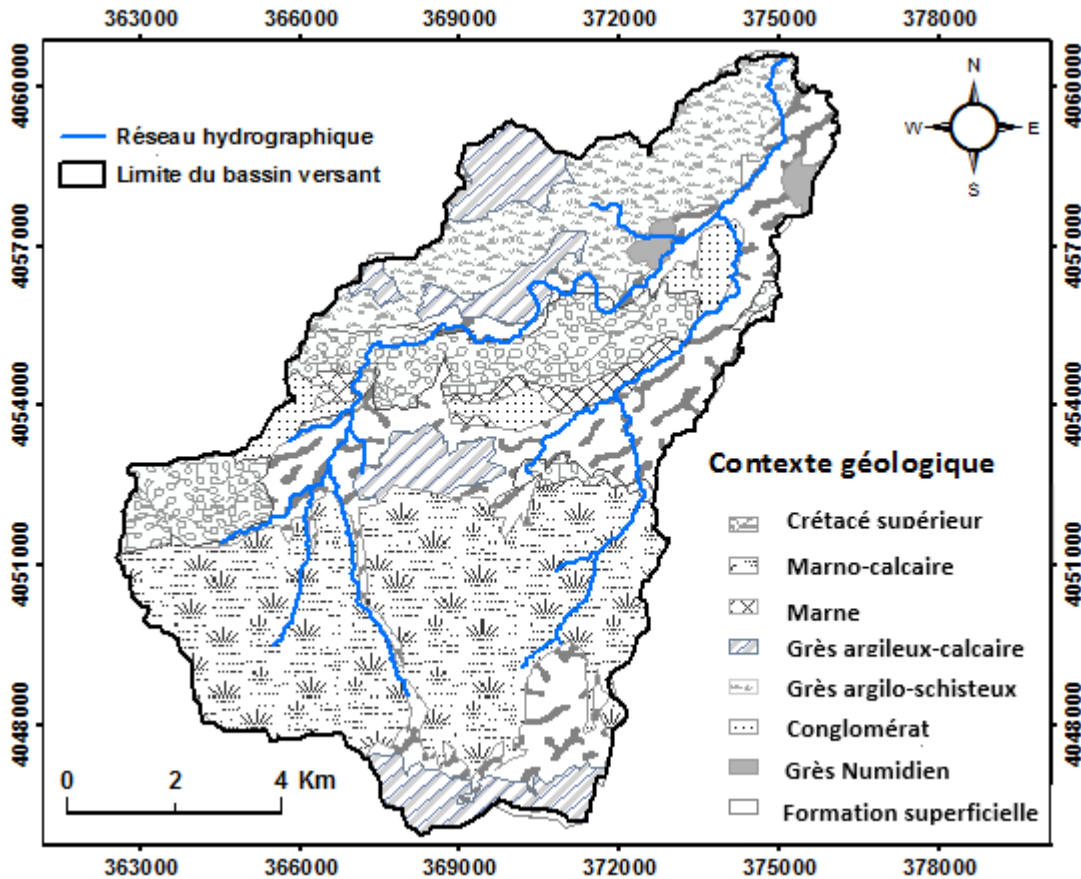


Figure 6 : Lithologie et géologie de Madjez Ressoul

### 2.2.3 Topographie

Il est bien évidemment clair que le rôle du relief est indispensable dans l'étude hydrologique des bassins versants. L'étude cartographique du bassin versant (à partir d'un modèle d'élévation ASTER de 30 m sous ArcGIS) a permis d'observer une forte variation topographique des altitudes variant entre 60 et 909 m créant une texture du sol étendue et une formation géologique hétérogène. Nous avons obtenu une répartition d'altitude de 4 classes (tableau 5).

**Tableau 5** : Classes d'altitude du bassin de Madjez Ressoul

Altitude en (m)	Surface en (km <sup>2</sup> )
60 - 227	24,72
227 - 365	49,24
365 - 544	17,08
544 - 909	12,35

D'après le calcul des paramètres de relief, l'altitude moyenne et la dénivelée spécifique sont respectivement 307,6 (m) et 0,63 (km/km<sup>2</sup>). La présence d'un plateau qui se termine par une falaise est confirmée par l'indication d'une forte pente aux altitudes les plus fortes (figure 7). Alors que la présence d'une pénéplaine est désignée par la forte pente vers les autres altitudes basses (Bouguerra 2018).

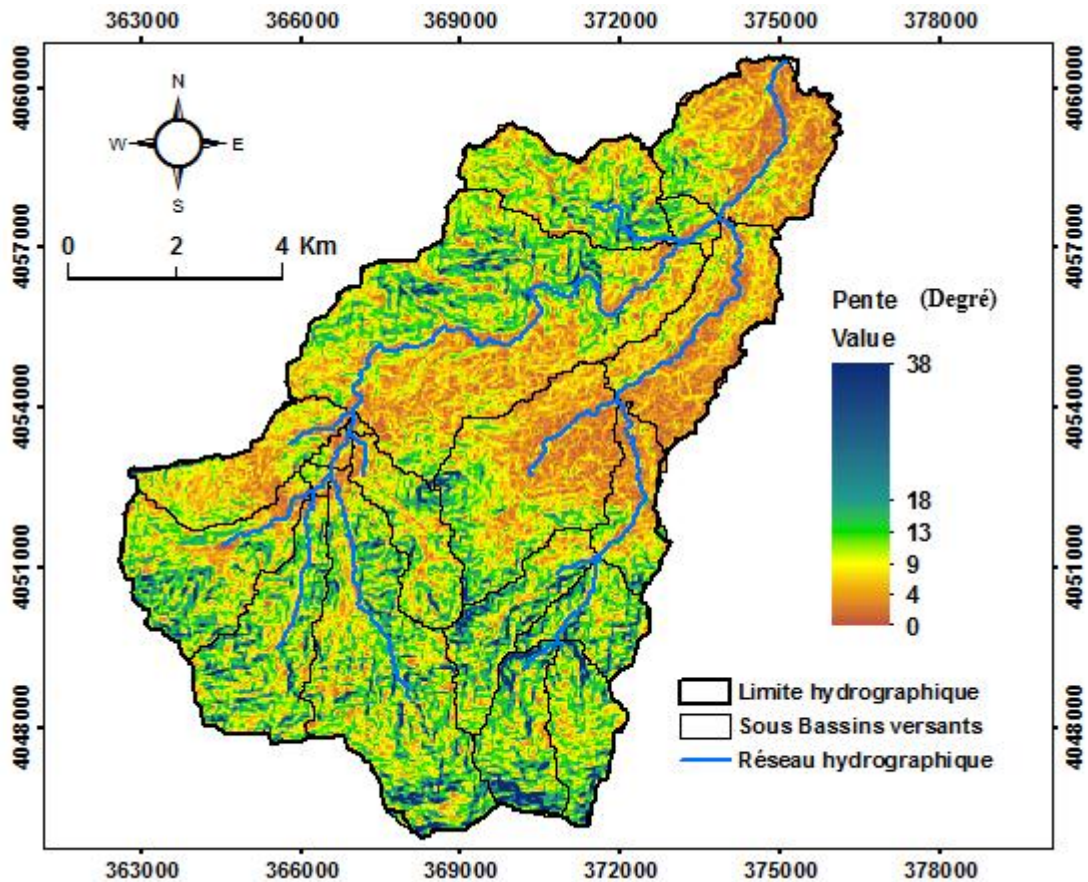


Figure 7 : Variation de la pente du bassin versant de Madjez Ressoul

### 2.2.4 Occupation et texture du sol

La carte d'occupations des sols (figure 8) est déjà établie par le ministère de l'agriculture et du développement rural national (MADR) en 2011, à partir du traitement des images satellitaires à une échelle de 1/50 000 avec une précision de 1/25 000.

La numérisation de cette carte a permis d'extraire les informations des répartitions spatiales des sols au niveau de Madjez Ressoul. Selon le (tableau 6) et la (figure 9), nous constatons que la couverture est restée l'une des catégories les plus englobantes à savoir :

- ✓ La culture en sec qui occupe 32.40% de la surface totale du bassin versant.
- ✓ La forêt soit 29.41%.

- ✓ La zone de parcours avec 16.92%.
- ✓ Le reste (55.594 km<sup>2</sup>) est occupé par le sol nu, l'arboriculture, la polyculture, le cours d'eau, la zone maraîchère, et l'environnement urbain.

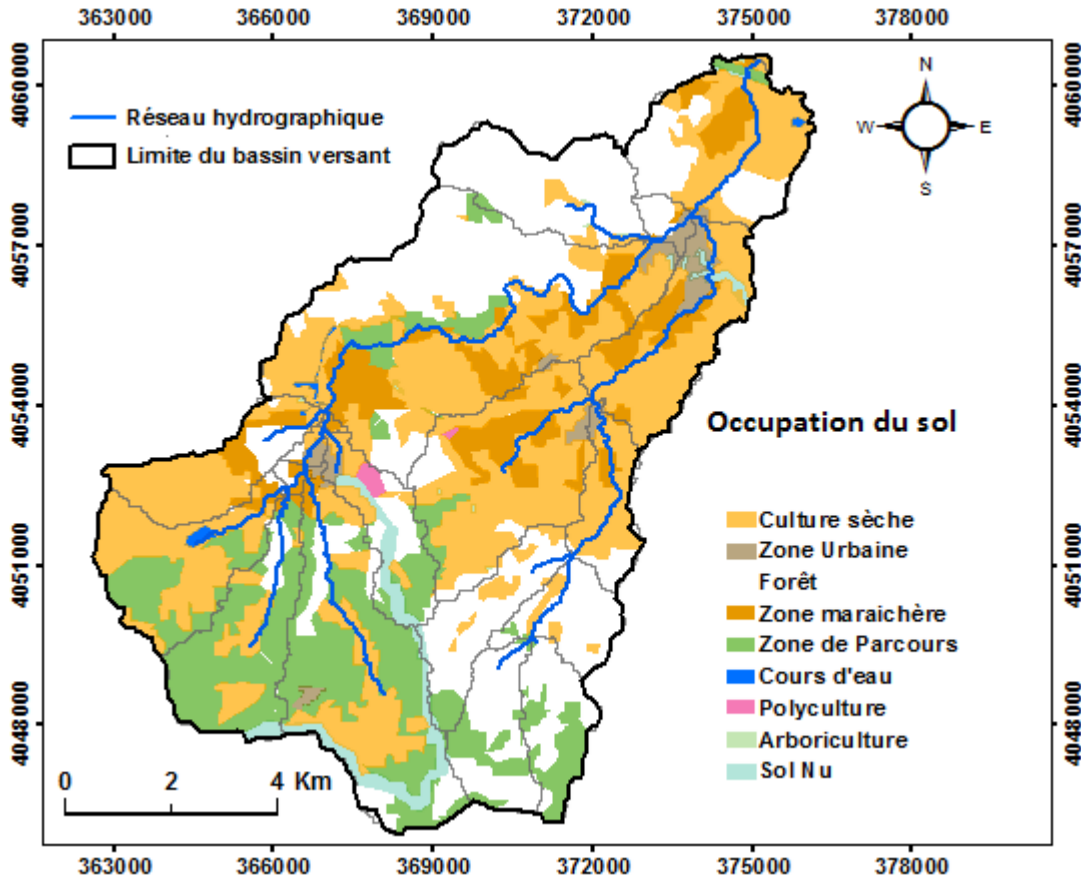
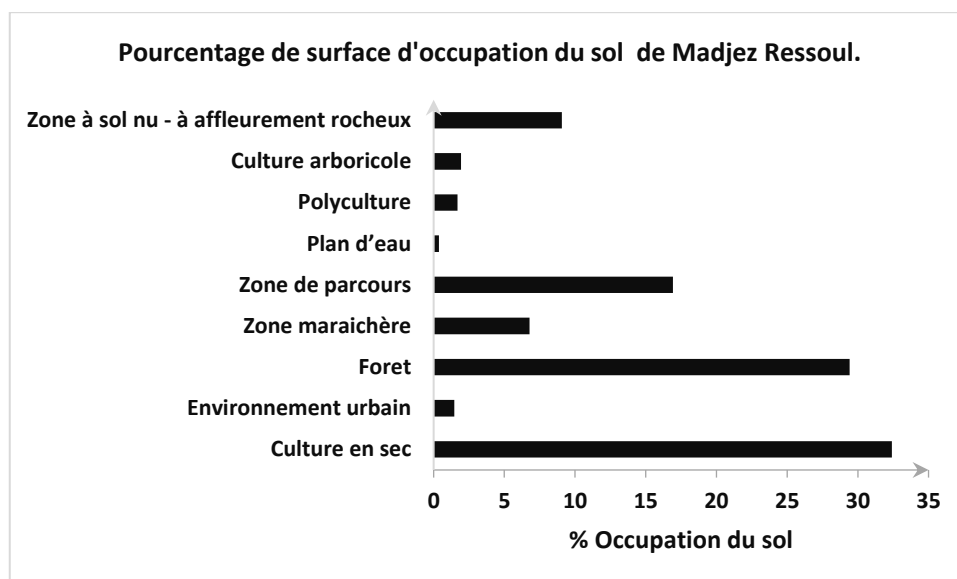


Figure 8 : Occupation du sol du bassin versant de Madjez Ressoul

Tableau 6 : Surfaces d'occupation du sol de Madjez Ressoul

Type d'occupation	Madjez Ressoul (103,4 Km <sup>2</sup> )
Culture en sec	33.5
Environnement urbain	1.5
Foret	30.41
Zone maraîchère	7
Zone de parcours	17.5
Cours d'eau	0.38
Polyculture	1.74
Culture arboricole	2
Zone à sol nu - à affleurement rocheux	9.37



**Figure 9 :** Pourcentage des surfaces d'occupation du sol de Madjez Ressoul

La faible contribution urbaine dans le bassin versant de Madjez Ressoul est reflétée par les petites surfaces de ses communes (tableau 7).

**Tableau 7 :** Surfaces et périmètres des communes appartenant à Madjez Ressoul

Zone bâtie	Surface (Km <sup>2</sup> )	Périmètre (Km)
Ain Berda	1,391	7,062
Nechmaya	0,927	5,122
Selmoune al Hachemi	0,183	2,864

### 2.2.5 Données pluviométriques et climatologiques

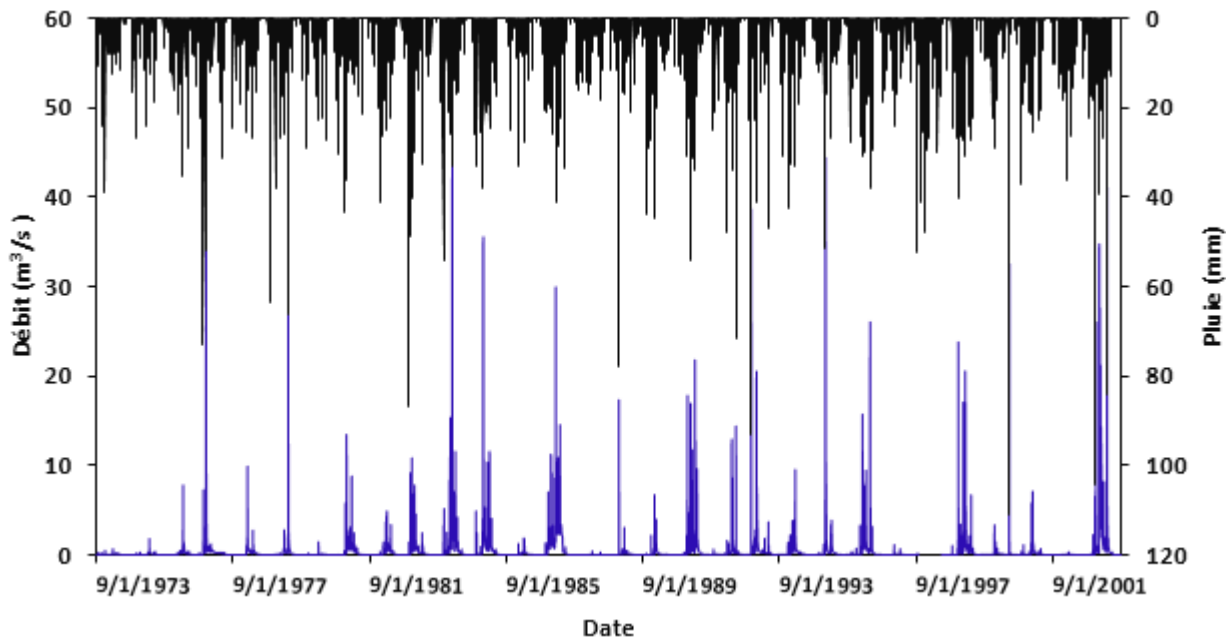
La variabilité des processus hydrologiques à l'échelle des bassins versants est déterminée d'habitude par apporter les informations précises sur le changement des paramètres pluviométriques et climatologiques. En revanche, les modèles pluie/débit n'utilisent en entrée que trois données au pas de temps journalier : le débit, l'évapotranspiration potentielle et la précipitation. Ces données sont toutes disponibles et enregistrées par des courbes de tarage univoques de type discontinu au niveau de la station d'Ain Berda, dont le code ANRH est 140602.

La (figure 10) montre l'évolution des débits moyens journaliers au cours des années 1973-2003. Nous remarquons l'augmentation des débits en fonction de la

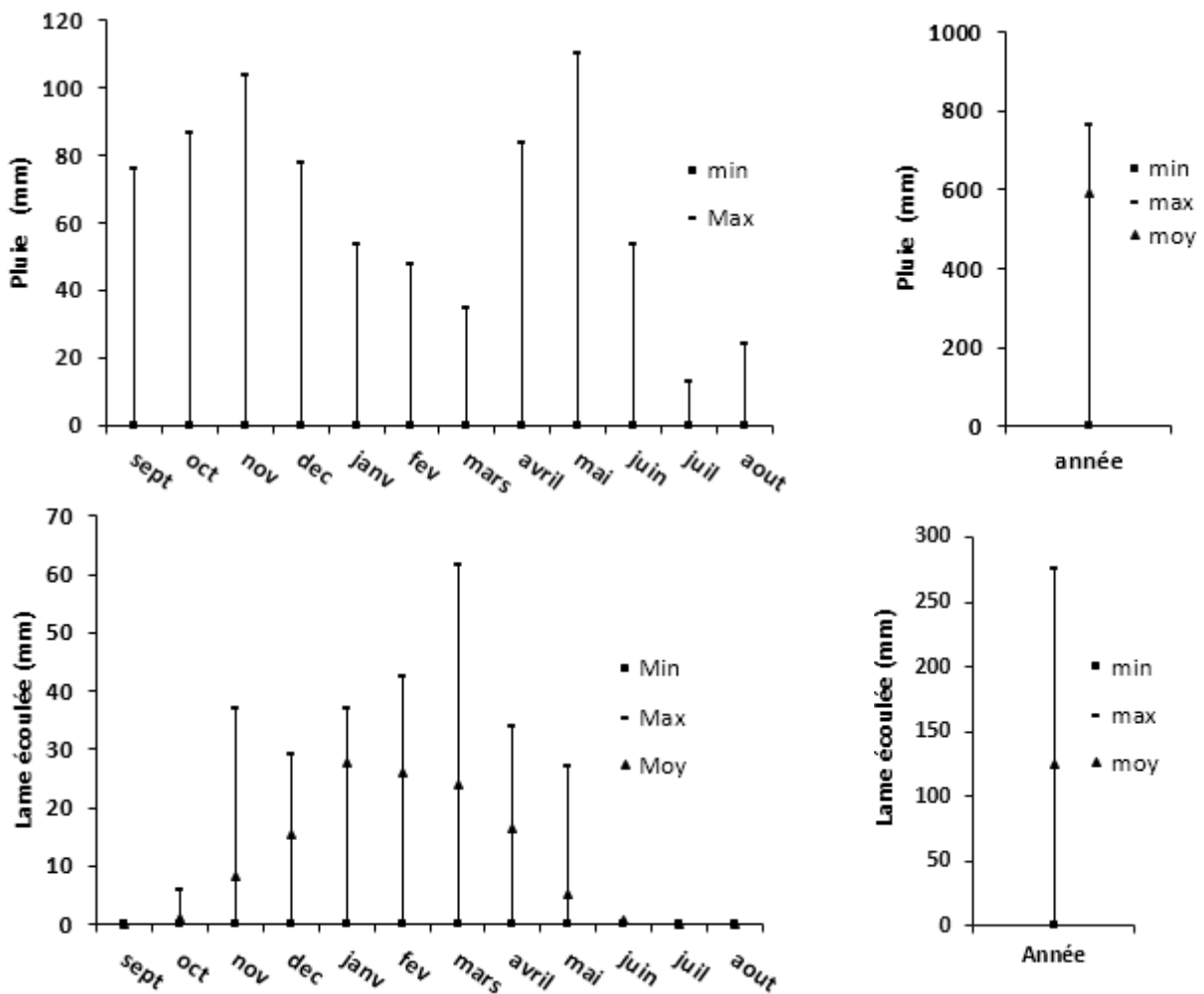
## Chapitre II : Présentation du bassin versant de Madjez Ressoul

---

pluie, et nous constatons que l'écoulement est directement lié aux précipitations, ce qui donne un régime d'écoulement caractérisé par des périodes d'étiages en été. D'autre part, la (figure 11) ne fait qu'office d'illustration de la variation significative des pluies et des lames d'écoulement mensuelles et annuelles.

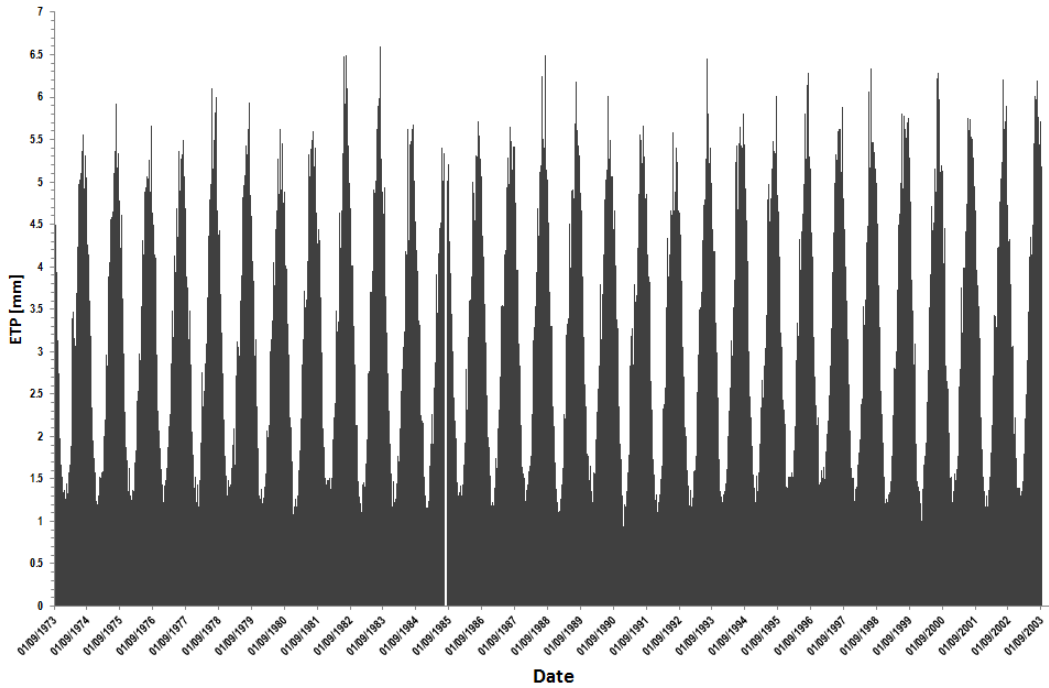


**Figure 10 :** Débits moyens journaliers et pluies journalières au niveau du bassin versant de Madjez Ressoul sur la période 1973-2003



**Figure 11 :** Répartition mensuelles et annuelles de la variabilité temporelle des pluies et des lames d'eau écoulées au niveau de Madjez Ressoul sur la période 1973-2003

Concernant l'évapotranspiration, les données journalières sont très variables et alternativement influencées par la climatologie méditerranéenne : tempérée en été et humide en hiver. Une série d'estimations par la méthode d'(Oudin et al. 2005) a été recueillie à partir des données de la température mesurée par météo Annaba. Les résultats de l'évapotranspiration montrés par la (figure 12) dénotent qu'elle augmente d'une façon extrusive. Aussi, on remarque qu'elle reflète la succession des saisons en observant les minima durant la période hivernale (Décembre-Février), et les maxima en saison estivale.



**Figure 12 :** Evapotranspiration potentielle estimée par la méthode d'Oudin du bassin versant Madjez Ressoul sur la période 1973-2003

### 2.2.5.1Lame d'eau écoulee, pluie et ETP mensuelles moyennes

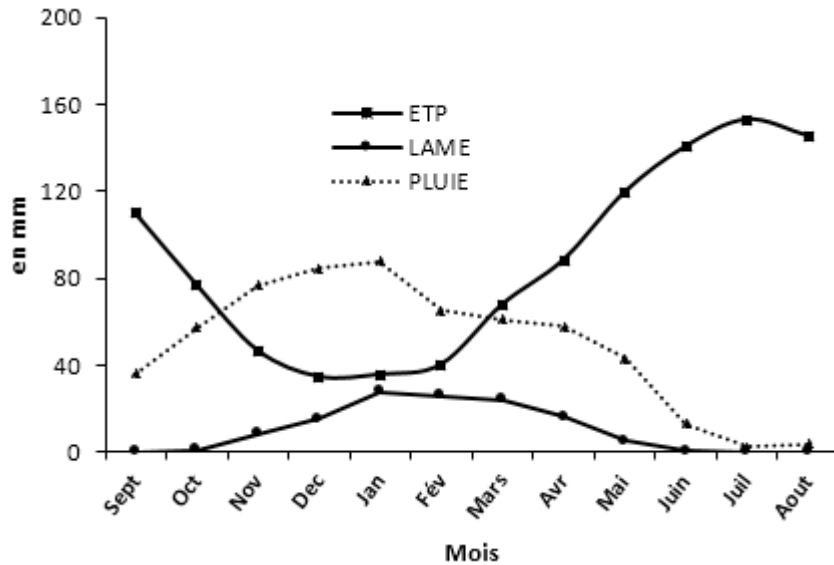
La présence des lacunes de débit et de pluie estimées par 2,14% et 0,04 % respectivement réduit légèrement la précision du calcul de la lame de ruissèlement écoulee (mesurée par le rapport entre le volume et la surface du bassin) (Eq.1) (Gnouma 2006).

$$LER = \frac{Vol}{A} \text{ (mm)} \quad \text{Eq. 1}$$

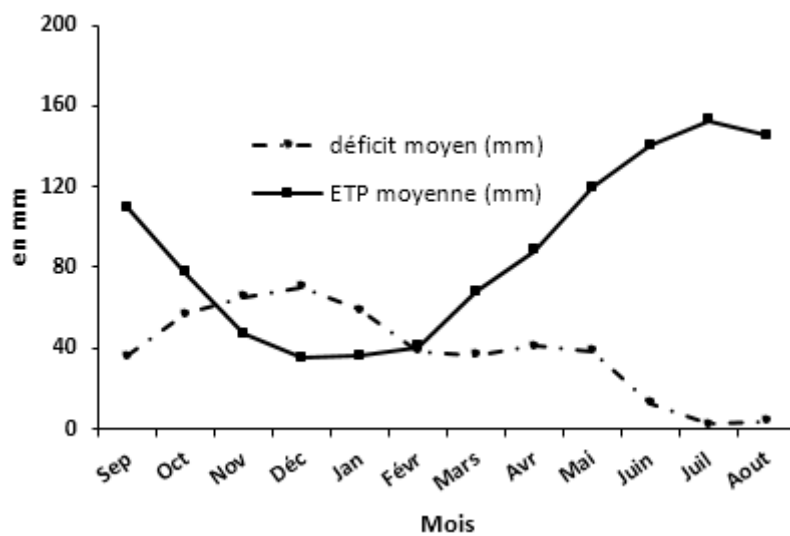
Les précipitations mensuelles maximales (figure 13) se situent en Janvier avec environ 87,8 mm en moyenne. Par conséquent, le même mois reçoit un déficit faible, et des lames abondantes. Ceci est justifié par la relation entre les écoulements et les précipitations.

L'évapotranspiration moyenne demeure toutefois augmentée de Février à Août par les déficits d'écoulement. Noter que le déficit montré dans la (figure 14) représente

la différence entre la lame d'eau et la pluie moyenne du bassin versant de Madjez Ressoul.



**Figure 13 :** Lame écoulee, pluie et ETP moyennes du bassin versant de Madjez Ressoul sur la période 1973-2003



**Figure 14 :** Déficits d'écoulement mensuels moyens au niveau de Madjez Ressoul sur 1973-2003

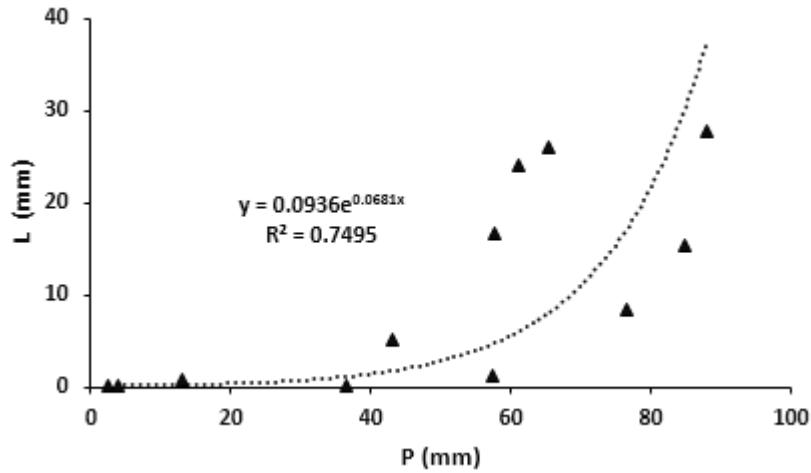
Le coefficient d'écoulement mensuel calculé en % par le rapport entre la lame écoulee et la hauteur d'eau précipitée, est trouvé maximal en Février et faible en Juillet, Août et Septembre (tableau 8).

**Tableau 8 :** Coefficient de ruissèlement mensuel moyen du bassin de Madjez Ressoul

Mois	Coef de ruissèlement en %
Septembre	3.91
Octobre	10.12
Novembre	29.49
Décembre	45.38
Janvier	36.58
Février	79.65
Mars	59.28
Avril	55.55
Mai	27.3
Juin	45.52
Juillet	1.19
Août	3.06

### 2.2.5.2 Relation pluie-débit

Une vue globale sur la relation entre les pluies et les lames ruisselées est logiquement importante vu l'intervention des autres facteurs de formation superficielle et souterraine. La courbe de régression des lames ruisselées en fonction des pluies totales a montré un coefficient de corrélation élevé sous forme exponentielle (figure 15) que linéaire pour la période d'analyse 1973-2003.



**Figure 15 :** Relation entre les lames écoulées et les précipitations mensuelles sur la période 1973-2003

### 2.3 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons pu exploiter les différentes caractéristiques cartographiques, hydrologiques et pluviométriques pour le bassin versant de Madjez Ressoul. Cela a permis de soustraire les grands aspects de la réponse hydrologique au niveau du bassin en question. Pour résumer, les principales remarques sont récapitulées dans ces lignes :

- Il a été observé principalement que l'évapotranspiration joue un grand rôle dans les processus d'écoulement.
- Les pluies relativement élevées au début de l'année hydrologique jusqu'à Janvier, en relation inverse avec les déficits d'écoulement mensuels.
- À partir du mois de Février nous observons une diminution proportionnelle de la pluie et de la lame écoulée.
- L'évapotranspiration est très élevée en période d'été.
- Le coefficient d'écoulement est important en : Février, Mars et Avril.

---

**TECHNIQUES D'IDENTIFICATION  
DES COMPOSANTES DE  
L'ÉCOULEMENT**

## Chapitre III: Techniques d'identification des composantes de l'écoulement

### 3.1 Introduction

Dans le premier chapitre nous avons décrit les principaux processus intervenant dans la génération de l'écoulement au niveau d'un bassin versant. Cependant, et du point de vue de la modélisation, le but principal ne s'arrête pas ici, car il faut comprendre la réaction dont le bassin versant réagit, lorsqu'il reçoit les précipitations. Notre rôle en tant qu'hydrologue ou hydrogéologue dans ce cas est d'identifier les processus de la transformation des précipitations en hydrogramme. Parmi les méthodes de l'identification des processus, la séparation de l'hydrogramme de crue est la plus utilisée (Stewart 2014). Elle permet globalement la quantification du débit de base (Keefe et al. 2019) pour des raisons extrêmes incluent : La gestion des ressources en eau (Huang et al. 2019), l'érosion terrestre (Zhang et al. 2019), le changement climatique (Cuthbert et al. 2019), la pollution de l'eau (Fu et al. 2019; Pressla et al. 2019), et le développement agricole (Jafary and Bradley 2018).

Actuellement, de véritables recherches ont montré que malgré la diversité des méthodes de séparation de l'hydrogramme de crue, il existe en fait une seule technique justifiable : consiste à essayer d'estimer le débit qui aurait pu se produire si la précipitation ne s'était pas produite. Cependant, une telle procédure a tendance à conduire à des hydrogrammes de très longues queues dans le cas de plusieurs événements en succession rapide.

De ce fait, les chercheurs pensent que ces applications ont nécessité à des expressions mathématiques pour améliorer la qualité de la séparation. La première application numérique revient à l'analyse de la récession dans les régions

tempérées. Depuis (Boussinesq 1904), cette théorie formelle reste l'une des techniques analytiques les plus utilisées pour déterminer les paramètres de l'aquifère dans un sol en pente. En 1968, Hall a initié une longue histoire de la prévision des périodes de sécheresse en traçant  $(-dq / dt)$  en fonction de  $Q$  sur une échelle semi-logarithmique et a donc éliminé le temps en tant qu'élément dépendant. (Brutsaert 1977) a intégré des équations ordinaires de la teneur en eau distribuée dans le sol, en se concentrant sur la paramétrisation de l'écoulement des eaux souterraines dans les aquifères non confinés.

Au fil du temps, d'autres techniques ont été étudiées pour répondre aux besoins du développement de la séparation, de nombreux auteurs ont supposé que la méthode de l'analyse des récessions était un cas de base pour développer d'autres méthodes (figure 16), soient: graphiques (Killian et al. 2019), statistiques (Longobardi et al. 2018), hydrochimiques (Ogunkoya and Jenkins 1993; Hugenschmidt et al. 2014; Bansah et al. 2019; Penna and Meerveld 2019), automatisées (Voutchkova et al. 2019), basées sur des filtres (Ichwana et al. 2018) ou même sur l'intelligence artificielle (Tikhmarine et al. 2019) et la programmation génétique (Tian et al. 2018). Malheureusement, la plupart d'entre eux continuent de poser le problème de la précision. Ainsi, le manque de la combinaison entre la signification physique et la structure du modèle. Cette indéniable limitation entraîne des représentations différentes du débit de base pour une même série d'enregistrement.

(Sanford et al. 2012; Johst et al. 2013; Hugenschmidt et al. 2014; Miller et al. 2016; Jingwen et al. 2019; Karlsen et al. 2019; Voutchkova et al. 2019; Yang et al. 2019; Yeh and Huang 2019).(Carlotto and Chaffe 2019; Xue et al. 2019) confirment que l'optimisation est devenue de plus en plus nécessaire, d'autant plus que le calage est une stratégie particulièrement utile pour quantifier les composantes de l'écoulement.

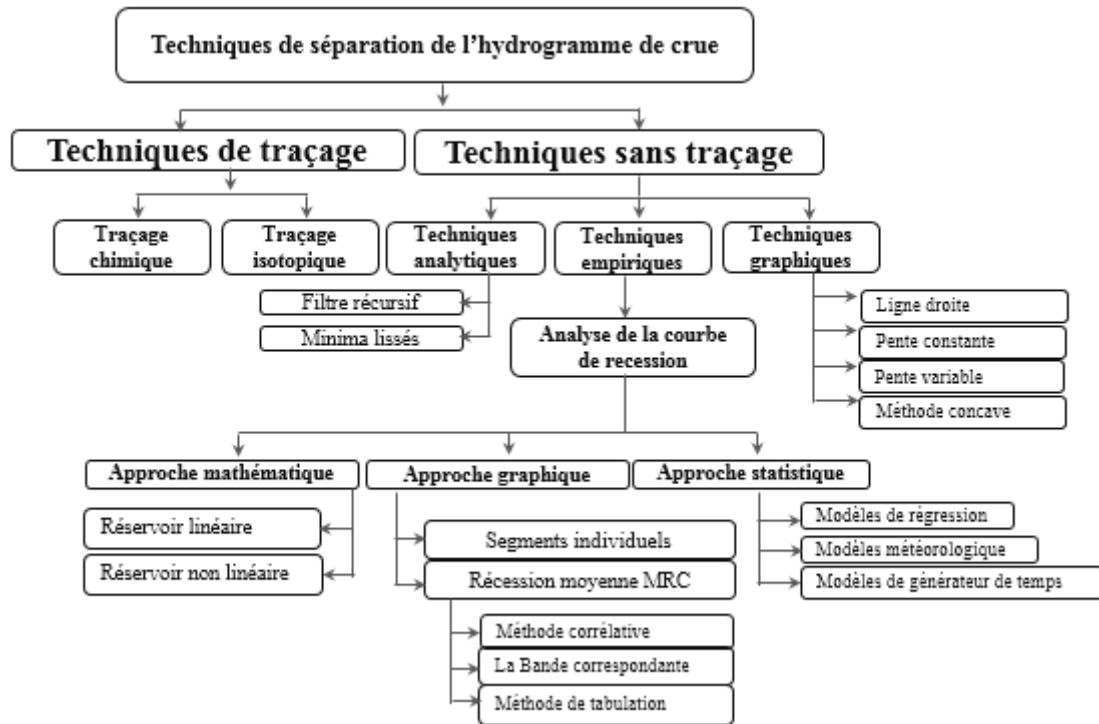


Figure 16 : Techniques de séparation de l'hydrogramme de crue

### 3.2 Technique de séparation des processus hydrologiques

Depuis les années soixante, les problèmes hydrologiques ont pu être résolus par une approche globale, où le débit des eaux est le facteur le plus important à connaître. Depuis lors, d'autres problématiques notamment celles relatives à l'hydrogéologie ont donné lieu à deux catégories de techniques : basées sur des traceurs ou sans traceurs (Gonzales et al. 2009). Néanmoins, il convient certainement d'en limiter les objectifs selon leurs applications (Gnouma 2006) car aucune méthode n'est garantie à toutes les échelles (Wood and Beven 2013).

Globalement, toutes ces techniques séparent l'hydrogramme de crue en deux ou trois composantes d'écoulement (tableau 9), mais quand les techniques de traçage se sont avérées expérimentalement coûteuses (Jason et al. 2018), les techniques sans traceurs sont clairement avancées par rapport aux autres : (Singh et al. 2000; Rupp and Selker 2005; Hammond and Han 2006; Kienzle 2006; Raffensperger et al. 2017).

## Chapitre III : Techniques d'identification des composantes de l'écoulement

Cette hypothèse a donné lieu à un certain nombre de revues par (Tallaksen 1995; Smakhtin 2001; Brodie and Hostetler 2005) sur la façon d'optimiser les paramètres numériques associés à la représentation graphique en parallèle avec des outils informatiques, et contrairement à (Pelletier and Andreassian 2019) qui a appliqué un nouvel algorithme pour identifier la contribution souterraine au ruissèlement, (Wang et al. 2019) a incorporé des échantillons supplémentaires de flux étant la clé pour améliorer d'une manière significative les performances du calage d'un modèle. (Brighenti et al. 2019), en utilisant son analyse d'incertitude a donné la priorité aux améliorations dans la simulation de débit en comparant les méthodes de calage séquentiel et simultané. Les résultats suggérés ont montré une précision relativement meilleure avec moins de paramètres.

**Tableau 9 :** Modélisation hydrologique de différentes composantes d'écoulement.

Séparation à deux composantes		Séparation à trois composantes	
Méthode	Références	Méthode	Référence
Hydrogramme unitaire	(Jakeman et al. 1990; Ninghu 1995; Pradhan and Ioney 2018).	Modèle stochastique	(Aksoy et al. 2001)
Traçage Isotopique	(Gremillion et al. 2000)	Modèle de traçage	(Hugenschmidt et al. 2014)
Modèle de filtrage	(Arnold et al. 1994; Eckhardt 2005; Raffensperger et al. 2017; Okello et al. 2018)	Algorithmes génétiques	(Gregor and Malik 2012)
Modèle numérique	(Bako and Owoade 1988)	Analyse de la récession	(Posavec et al. 2010)
Modèle analytique	(Wittenberg 1999; Azeez et al. 2015)		(Berhail et al. 2012)

### 3.2.1 Techniques basées sur les traceurs

Les méthodes de séparation basées sur les traceurs peuvent fournir des informations précises avec différentes signatures chimiques spatio-temporelles. Dans le domaine de l'hydrogéologie, ils permettent aussi de détecter la recharge de

la nappe phréatique (Bouchaou et al. 2017), localiser les différents isotopes dans les réservoirs du sol, sélectionner les données de contamination des nappes, et leurs risques de salinité et parfois la résistance du bassin versant (Blavoux et al. 2014; Back et al. 2018).

Le principe du traçage consiste à l'injection en faible quantité des produits aisément détectables dans le cours d'eau, pour marquer leurs évolutions et suivre leurs concentrations à l'aval (Eq.3) (Iorgulescu and Musy 1997). La courbe de récession qui résulte de cette mesure est utilisée pour obtenir l'écoulement de surface et l'écoulement souterrain par le calcul de la différence de débit entre deux échantillons, proviennent de deux sources différentes. Les traceurs ordinaires utilisés depuis longtemps sont : des colorations de la rhodamine, la chlorure, le bromure, et le lithium. Ces traceurs sont de type chimique, isotopique, naturel ou artificiel, injectés à des débits connus et constants pendant l'expérience. Plusieurs auteurs ont simulé la forme de débit de base montré par les traceurs et confirmé la fiabilité de cette méthode dans la séparation des processus de genèse des crues avec ses propres conditions d'application (Stewart 2015; Gao et al. 2017; Junlong et al. 2017).

$$Q = Q_r + Q_s \quad \text{Eq. 2}$$

$$\delta_Q = \delta_s Q_s + \delta_r Q_r \quad \text{Eq. 3}$$

### 3.2.1.1 Traçage chimique

Les traceurs chimiques sont apparus avant même le développement des traceurs isotopiques sous certaines conditions (un milieu non poreux par agrégation, ou adhérent aux surfaces minérales), et pour d'autres objectifs de diagnostiquer les réseaux des écoulements souterrains et mesurer la conductivité des éléments (Yan Li et al. 2014). Ils donnent des informations sur le nombre de réservoirs et leurs compositions chimiques dans le bassin versant.

L'interprétation des débits obtenus repose sur la signature uniforme distincte du traceur dans différents compartiments ou les sources ayant la même concentration ne peuvent pas être identifiées, elles sont donc regroupées (Wels et al. 1991).

D'après (clerc 2004), le processus d'infiltration des eaux de pluie vers l'exutoire peut diminuer l'efficacité des traceurs chimiques.

### 3.2.1.2 Traçage isotopique

La séparation des hydrogrammes de crue à l'aide de traceurs isotopiques stables a entraîné des avancées majeures en hydrologie des bassins versants au cours des 40 dernières années (Klaus and McDonnell 2013). Elle a consacré principalement un changement de paradigme dans la manière dont la genèse de ruissellement a été conceptualisée avant, une fois que la séparation hydrographique à l'aide des isotopes montrait : l'écoulement hortonien et la livraison rapide de «nouvelles» eaux d'événement aux cours d'eau pendant les précipitations n'étaient pas aussi largement applicables qu'on le pensait auparavant (Sklash and Farvolden 1979). Cette considération a été confirmée par (Chevallier and Pouyaud 1996) qui explique que les isotopes stables sont des traceurs idéaux et conservateurs pour la séparation des événements grâce à l'existence d'une relation entre la teneur en isotopes lourds dans l'eau et son débit (Ala-aho et al. 2016; Claudio et al. 2018). Le principal inconvénient de l'utilisation des isotopes à la séparation c'est leur état non conservatif à l'échelle spatiale et temporelle, du principalement à la variabilité de l'évaporation d'un épisode à un autre (Larkins et al. 2018).

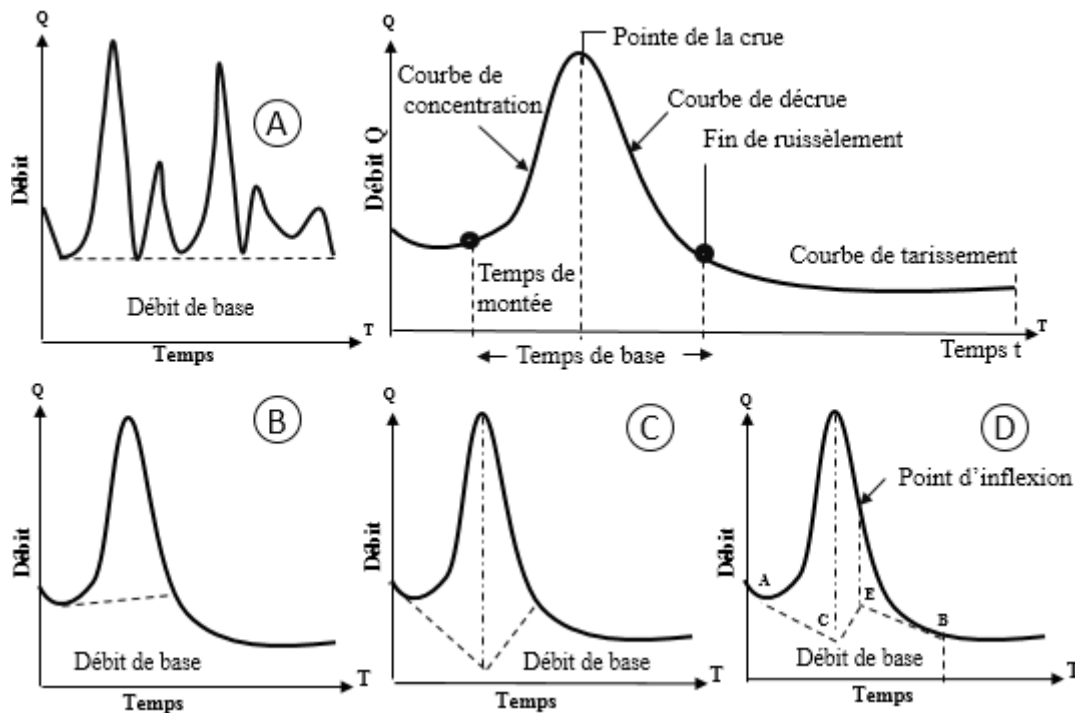
### 3.2.2 Techniques sans traceurs

Les méthodes sans traceur ne sont pas dédiées uniquement aux bassins versants dont les séries chronologiques de débit sont observées : ce sont également prévues pour surmonter la difficulté d'avoir des données suffisantes pour les bassins versants non jaugés par des modèles hydrologiques et des approches de régression

qui peuvent séparer le débit de base du débit total. La précision de ces modèles peut être évaluée par rapport aux estimations d'ensemble des méthodes non traceuses dans les bassins versants jaugés (Zhang et al. 2017).

#### 3.2.2.1 Techniques graphiques

Bien qu'il soit très difficile de mettre clairement une ligne de démarcation entre l'écoulement de subsurface et l'écoulement de base, toutes les méthodes classiques qui visent à la séparation graphique sont acceptables. Il existe quatre méthodes (figure 17), couramment utilisées pour la séparation de l'hydrogramme de crue en deux composantes (Méthode de la ligne droite, méthode de la pente constante, la méthode concave, et la méthode de la pente variable).



**Figure 17 :** Méthodes conventionnelles de la séparation graphique de l'hydrogramme de crue

### •Méthode de la ligne droite (A)

La faible variation du débit de base en fonction du temps amène les hydrologues à le considérer comme constant quelle que soit sa hauteur. L'hydrogramme de crue est séparé par une droite dessinée en partant de la valeur minimale de l'hydrogramme de crue jusqu'à la fin de la décroissance. La ligne droite de la figure (A) sépare la partie supérieure de la partie située au-dessous en un écoulement direct et un écoulement de base. La simplicité de cette méthode facilite la séparation des processus hydrologiques dans le cas des évènements complexes.

### •Méthode de la pente constante (B)

Cette méthode est fortement utilisée dans le cas d'un évènement simple, avec une seule pointe. Différemment à la méthode précédente, la méthode de la pente constante suppose que le débit de base commence avant l'évènement pluvieux. En suivant les étapes proposées par (Linsley et al. 1982), une interpolation reliant la fin de l'hydrogramme précédent au point d'inflexion est possible :

- Identifier le début de ruissellement direct.
- Estimer la durée de la période de ruissellement direct  $N$  après le pic par la relation  $N=A^{0.2}$  (ou  $A$  est la superficie du bassin versant,  $N$  est le nombre de jours après le pic).
- Tracer une ligne reliant le début de ruissellement au point d'inflexion.

### •Méthode concave (C)

La méthode concave est considérée comme la plus réaliste, puisqu'elle suppose que le débit de base se décroît avec la croissance de débit dans le cours d'eau (Verschuren 1973). Comme son nom l'indique, elle consiste à projeter le point de début de l'hydrogramme sur la ligne inférieure tracée à partir du pic (Nwakpuda 2017), et le connecter par la suite avec le point d'inflexion (Subramanya 1994).

### •Méthode de la pente variable (D)

Elle a été discutée dans le travail de (Chow et al. 1988) avec deux techniques de séparation différentes :

A) Une méthode consiste premièrement à transporter la ligne de débit de base du précédent hydrogramme vers le pic du débit de base pour la lier avec une autre ligne à l'hydrogramme courant réuni avec le point d'inflexion.

B) L'extrémité inférieure de l'hydrogramme s'étend le long d'une ligne droite et s'incline vers le haut (vers l'arrière), puis elle trace une ligne verticale vers le bas à partir du point de rotation du bras abaissant en coupant la ligne en E. S'il s'étend du point de départ de l'hydrogramme (A) et du point final de l'hydrogramme (B) à ce point (E). Une partie de l'hydrogramme au-dessus de la ligne ABE est l'hydrogramme de ruissèlement, et ce qui se trouve au fond du ruisseau est le débit de base de la rivière.

### 3.2.2.2 Techniques analytiques (paramétriques)

Bien qu'il y ait un effort pour réduire la subjectivité associée aux méthodes précédentes, l'application des méthodes graphiques est limitée à une définition bien précise : un hydrogramme simple et isolé. Cependant, les hydrogrammes enregistrés en zones humides sont généralement en mode continu et se composent de plusieurs pics. Les filtres numériques ont été développés pour satisfaire ce besoin.

#### 3.2.2.2.1 Filtre récursif

Les filtres récursifs sont principalement basés sur le traitement des signaux de : hautes et basses fréquences. La particularité de ces filtres et qu'ils pourraient être facilement automatisés et couplés alternativement avec d'autres méthodes graphiques (Pelletier and Andréassian 2020).

### Chapitre III : Techniques d'identification des composantes de l'écoulement

---

Le cadre général de la séparation analytique est appliqué par des filtres programmables avec une équation mathématique de récurrence, construite sous l'hypothèse suivante : le débit sortant d'un aquifère est linéairement proportionnel à son stockage. Une formulation est fournie pour faciliter leurs constructions mais révèle d'autres problèmes pendant les applications (Raffensperger et al. 2017).

L'un des problèmes majeurs est le choix du nombre de paramètres associés à l'équation de récurrence. (Boughton and Pulay 1993; Jakeman and Hornberger 1993; Chapman 1999; Bosch et al. 2017; Kim and Yang 2017) ont tenté de mettre une décision en comparant la fiabilité de trois modèles à un seul paramètre, à deux paramètres, ou à trois paramètres. Quand l'algorithme à paramètre unique, initié par (Nathan and McMahon 1990) a fourni une valeur de l'indice de débit de base BFI irréaliste, l'algorithme à trois paramètres a produit des hydrogrammes avec des pics rapides (Tan et al. 2009).

Au total, l'algorithme à deux paramètres s'est avéré être le meilleur pour fournir des résultats de séparation plausibles (Chapman 1999). L'équation suivante constitue un exemple vif du modèle de séparation à deux paramètres d'ajustement  $\alpha$  et  $BFI_{max}$  (Boughton and Pulay 1993; Eckhardt 2005).

$$B_{k+1} = Q_{k+1} - R_{k+1} \quad \text{Eq. 4}$$

$$R_{k+1} = \alpha R_k + \frac{1 + \alpha}{2} (Q_{k+1} - Q_k) \quad \text{Eq. 5}$$

Avec des conditions initiales :

Si  $R_{k+1} < 0$  donc  $R_{k+1} = 0$ .

Si  $R_{k+1} > 0$  donc  $R_{k+1} > 0$

$$B_{k+1} = \frac{(1 - BFI_{max}) \cdot \alpha \cdot B_x + BFI_{max} \cdot Q_{k+1}}{1 - \alpha \cdot BFI_{max}} \quad \text{Eq. 6}$$

$$BFI_{max} = (\text{débit de base} / \text{Débit total}) \quad \text{Eq. 7}$$

Si  $B_{k+1} > Q_{k+1}$  donc  $B_{k+1} = Q_{k+1}$  alors calculer :

$$B_{k+1} = Q_{k+1} - R_{k+1}$$

Eq. 8

$\alpha$  : Paramètre du filtre égal à 0.98.

$\alpha = 0.8$  aquifère poreux à long terme.

$\alpha = 0.5$  aquifère poreux à court terme.

$\alpha = 0.25$  aquifère rocheux à long terme.

Le paramètre  $BFI_{max}$  est déterminé par différentes méthodes : il peut être facilement trouvé par une analyse de la récession ou d'autres méthodes expliquées par (Rutledge 1998; Sujono et al. 2004).

#### 3.2.2.2 Minima lissés

Plusieurs études à faible débit ont montré l'importance de déterminer les paramètres de récession dans la prédiction. Les recherches de l'institut d'hydrologie du Royaume-Uni (UKIH) (Institute of Hydrology 1980) ont accompli une procédure de la détermination de l'indice d'écoulement du débit de base pour deux bassins versants. Les résultats de l'application de cette étude en différents pays montrent que le BFI est influencé par la géologie et le stockage de la nappe phréatique du bassin étudié. Les règles de la méthode des minima lissés s'initialisent par la division de la série chronologique des débits journaliers  $Q_1, Q_2, Q_3 \dots Q_{i+1}$ , en plusieurs blocs non superposés de telle façon de marquer les valeurs minimales du débit de base, et calculer le volume de base et le volume de base total par la somme des débits de base moyens, sous ces deux conditions (Tallaksen 1995; Aksoy et al. 2009) :

0.9  $Q_i < \min(Q_{i-1}, Q_{i+1})$  Cours d'eau permanent

0.9  $Q_i \leq \min(Q_{i-1}, Q_{i+1})$  Cours d'eau non permanent

D'un point de vue comparatif, il semble que la méthode des minima lissés donne des débits de base plus élevés par rapport à la méthode du filtre récursif. Cette dernière a été trouvée conformément similaire à la séparation graphique des bandes

correspondantes par (Nathan and McMahon 1990), Lui et son équipe ont décidé de filtrer davantage la séquence du débit total obtenu par des minima lissés avec le filtre récursif. Le débit de base obtenu de cette manière ressemble à celui résultant du filtre récursif. Cela est justifié par l'avantage du filtre récursif de lisser la série temporelle des débits de base. Tandis que, la méthode des minima lissés consiste tout simplement à relier les points d'inflexion par interpolation linéaire, d'où les pics à décroissances rapides et les creux sont bien observés.

### 3.2.2.3 Techniques empiriques

(Boussinesq 1904; Maillet 1905; Singh 1968; Aksoy and Wittenberg 2011) déclarent qu'il est préférable de s'orienter vers l'aspect empirique de la séparation. Depuis leurs travaux il a été recommandé qu'une analyse alternative de la récession serait plus efficace pour séparer les processus hydrologiques. Était expliqué que son cas unique nécessite le modèle à réservoir linéaire ou non linéaire. Cependant, sur la base des études de sensibilité appliquées par (Holland 1975; Chapman 1987; Bako and Owoade 1988), il est surtout nécessaire de rappeler que les progiciels de hautes performances développés actuellement permettent la diminution des erreurs de mesure dans les entrants, et la distinction des composantes d'écoulement (tableau 10).

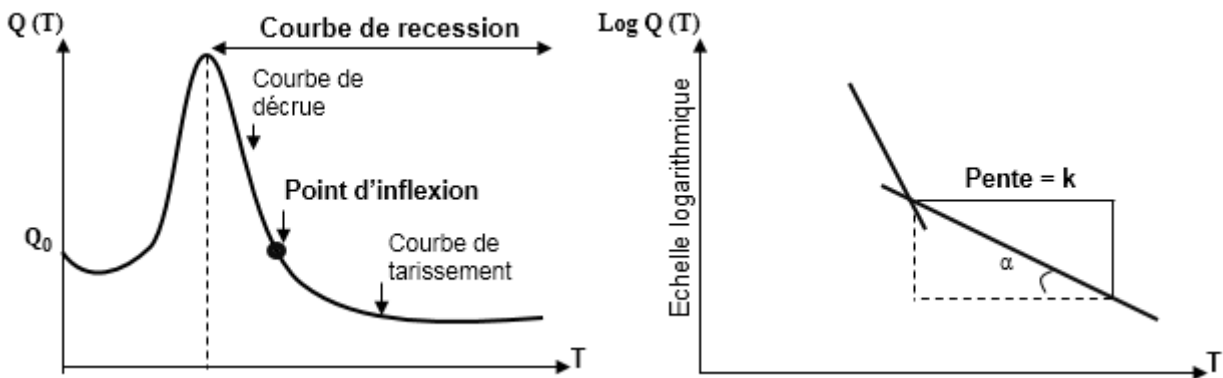
## Chapitre III : Techniques d'identification des composantes de l'écoulement

**Tableau 10** : Outils puissants pour la séparation de l'hydrogramme de crue

Outils	Auteur/Année	Techniques
<b>Hydro office Tool</b> (logiciel d'hydrologie et d'hydrogéologie)	(Gregor and Malik 2012)	Filtre récursif
<b>Visual Basic Spreadsheet Macro</b>	(Posavec et al. 2006)	Analyse de la récession (méthode de la bande correspondante)
<b>Excel Visual Basic Algorithm</b>	(Posavec et al. 2017)	Analyse de la récession (Approche trigonométrique)
<b>Lfstat</b> (Calcul statistique des débits d'étiage journaliers))	(Koffler and Laaha 2013)	Analyse de la récession (Méthode de corrélation)
<b>IHA</b> (Indicateurs d'altération hydrologique)	(Richter et al. 1996)	Approche statistique
<b>Hydro TSM</b> (Gestion, analyse et interpolation des séries chronologiques pour la modélisation hydrologique)	(Turner and Galelli 2016)	Analyse de la récession
<b>RHydro</b> (Mise en œuvre du TOPMODEL hydrologique en R)	(Wouter et al. 2015)	Hydrogramme unitaire
<b>FlowScreen</b>	(Dierauer et al. 2017)	Approche statistique
<b>Ecohydrology</b>	(Archibald et al. 2014)	Analyse de la récession
<b>Groundwater (GW)</b>	(Barlow et al. 2015)	Filtre récursif et analyse de la récession
<b>RORA</b> (Programme des recharges souterraines)	(Rutledge 1998)	Méthode de déplacement de la récession
<b>PART</b> (Programme des débits de bases)		Analyse de la récession
<b>RECESS</b> (Programme d'analyse de la recession)		
<b>Pulse</b> (Modèle des hydrogrammes de base et des recharges souterraines)	(Rutledge 2013)	Méthode analytique
<b>Hysep</b> (Programme pour la séparation et l'analyse d'hydrogrammes de flux)	(Slotoand and Crouse 1996)	Intervalle fixe Changement d'intervalle Minimum local (relatif)

### 3.2.2.3.1 Analyse de la courbe de récession

La courbe de récession est la courbe décroissante de l'hydrogramme de crue, assimilée à des vidanges des réservoirs du sol dans le cours d'eau. Elle est composée de deux parties : la courbe de décrue qui traduit l'influence de l'infiltration sur le réservoir, et la courbe de tarissement : débute uniquement lorsque l'infiltration est égale à zéro (Dörfliger et al. 2010). L'effet de combiner plusieurs sources en différentes échelles donne une courbe de récession graduée, débute avec une pente rapide vers une autre plus faible (figure 18).



**Figure 18 :** Aspect de la courbe de récession sous une échelle normale et logarithmique

L'analyse des récessions est une technique indirecte utilisée afin de caractériser le fonctionnement hydrologique des bassins versants qui ont un comportement des débits d'enregistrement approximatif. Que ce soit pour prévoir les étiages ou spécifier les processus hydrologiques, l'intégration des courbes de récession à la modélisation continue d'être complexe. Néanmoins, les approches de calage proposées actuellement permettent de bien évaluer la performance des modèles et leurs précisions lors de l'estimation des points d'inflexion (Fiorotto and Caroni 2013; Chen and Krajewski 2016).

### Chapitre III : Techniques d'identification des composantes de l'écoulement

---

Communément, dans la plupart des cas l'algorithme à réservoir linéaire est le plus privilégié (Barnes 1939; Bako and Hunt 1988). Il se base sur la combinaison de l'équation de continuité et celle de drainage à un seul paramètre de récession  $K$  :

$$\frac{DS}{Dt} = I(t) - Q(t) \quad \text{Équation de continuité} \quad \text{Eq. 9}$$

$$S(t) = K \times Q(t) \quad \text{Équation de drainage} \quad \text{Eq. 10}$$

#### 3.2.2.3.1.1 Approche mathématique

Trois solutions habituelles sont utilisées pour l'analyse des récessions, l'(Eq.11) et (Eq.13) deviennent similaires lorsqu'on remplace  $k$  par  $e^{-\alpha}$ .

La première équation est d'une forme exponentielle simple. Son tracé sur un papier semi-logarithmique, donne une ligne droite avec une pente égale à  $(-\alpha)$ . La deuxième est une fonction exponentielle double, se trace sur un papier logarithmique uniquement si  $n=1$  (Horton 1933; Bako and Hunt 1988). Une fois le tracé logarithmique est fait, le coefficient  $k$  peut être graphiquement déterminé à partir de la pente de la courbe  $\ln Q$  en fonction de  $t$ . Le traitement de cette solution peut se faire à partir des séries chronologiques de débit : on considère que le débit de l'aquifère et son stockage sont directement proportionnels d'où la décroissance de la courbe de récession s'écrit sous trois formes.

$$Q_t = Q_0 K^t \quad \text{Eq. 11}$$

$$Q_t = Q_0 K^{tn} \quad \text{Eq. 12}$$

$$Q_t = Q_0 e^{-\alpha t} \quad \text{Eq. 13}$$

$$\alpha = \frac{\log Q - \log Q_0}{t} \quad \text{Eq. 14}$$

L'algorithme à réservoir linéaire est un cas particulier du réservoir non linéaire ( $b = 1$ ) (Coutagne 1948). Pour permettre le transfert de l'équation linéaire vers l'équation non linéaire, un exposant sans dimension  $b$  est ajouté, ainsi :

$$S(t) = k \times Q(t)^b \quad \text{Eq. 15}$$

Avec  $K$  et  $b$  sont des coefficients à calibrer avec la méthode itérative des moindres carrés. (Brutsaert and Nieber 1977) ont dérivé une formule complètement équivalente sans remettre en cause la non-linéarité de l'équation de transfert. Tandis que la dérivation détaillée de l'(Eq.15) est donnée par (Wittenberg 1999) sur des données pérennes.

### 3.2.2.3.1.2 Approche graphique

Un problème majeur dans la détermination de  $K$  est la grande variabilité rencontrée autour des récessions individuelles. Pour surmonter ce problème, une proposition veut que l'intégration des informations de récession en longues périodes exige une récession moyenne (MRC).

La MRC est définie comme étant une enveloppe construite de diverses courbes de récession individuelles. Le groupement de telles données se fait soigneusement, sinon, les points se disperseront largement et il serait difficile de les organiser. Étant donné également que le développement de la MRC est d'une subjectivité importante, il convient d'être prudent dans l'inspection de la courbe (Eslamian 2014). Trois méthodes données par (Bako and Owoade 1988; Sujono et al. 2004; Berhail et al. 2012) peuvent être appliquées dans ce cas : la méthode corrélative, la méthode de la bande correspondante et la méthode de tabulation.

### 3.2.2.3.1.3 Approche statistique

Dans le cadre de l'estimation des faibles débits par les modèles statistiques, et à l'issue de l'élimination des erreurs de mesure, (Vogel 1992; Zhiying and Haiyan 2016) ont conclu que les techniques manuelles telles que le meilleur ajustement subjectif, commencent à être abandonnées au profit des procédures. Cela a été remplacé par des modèles de régression ou autres :

- ✓ Les modèles de régression (linéaire, et non linéaire).

- ✓ Les modèles de types météorologiques (les règles floues, l'analyse en grappes, les méthodes analogiques).
- ✓ Les modèles de générateurs de temps (inclut les processus markoviens, ponctuels et de cascade multiplicative).

Une régression linéaire apparente consiste à ajuster à chaque segment de récession les méthodes de régression simple. Les lignes individuelles, de pentes différentes et les lignes parallèles, avec une pente moyenne peuvent être considérées. Ces méthodes permettent ainsi d'obtenir une estimation non biaisée de la pente moyenne à condition que les segments soient de longueur égale, sinon une moyenne pondérée doit être calculée (Brownlee 1965).

La régression linéaire semble avoir une limitation qui se voit dans le calcul des paramètres constants de l'écoulement de base. Notamment les interactions croisées à différentes échelles entraînent d'énormes erreurs pour les bassins versants situés dans un large éventail de régimes climatiques. Cette limitation peut être maîtrisée par l'approche de régression à plusieurs niveaux. L'idée de base de cette approche est que les variables de niveau supérieur varient au sein d'un niveau inférieur (Berk 2016) avec différentes solutions, en utilisant des effets aléatoires (Dudaniec et al. 2013).

Dans ce contexte, certains auteurs ont commencé d'appliquer les algorithmes d'optimisation dans l'analyse des courbes de récession. En se basant sur le concept des réseaux de neurones artificiels, (Gerald and Dimitri 2007) ont employé de différents schémas et classifications automatiques de segmentation temporelle, et regroupements de l'hydrogramme de crue basé sur des techniques d'analyse bien adaptées à la séparation des écoulements et au filtre optimisé. Ces modifications sont révélées avoir plus de précision que les modèles traditionnels à base des réseaux de neurones. Néanmoins, quelles qu'en soient les avantages de l'utilisation

des réseaux de neurones, la saisonnalité qui s'accompagne de la surévaluation et de la fausse représentation du bruit crée d'autres problèmes (Corzo and Solomatine 2007).

### 3.3 Application des techniques de séparation sur Madjez Ressoul

#### 3.3.1 Objectif

L'hypothèse clé de l'analyse des récessions est qu'une fonction ne dépend que des valeurs de débit, peut spécifier la relation de la réponse dans l'aquifère : l'avantage inhérent dans ce cas est qu'en absence d'autres entrées du système, la réponse diminuera à un coefficient  $k$  qui ne dépend que de son ampleur.

L'objectif de cette partie est d'évaluer la performance de trois techniques basées sur l'analyse de la récession (segments individuels, filtre récursif, algorithmes génétiques) dans l'identification des composantes d'écoulement.

La classification directe des types d'écoulement était basée sur les fourchettes de (Nathan et McMahon 1990):

- Ecoulement de surface ( $K = 0,2-0,8$ )
- Ecoulement de subsurface ( $K = 0,8-0,93$ )
- Ecoulement de base ( $K = 0,93-0,995$ )

Des interfaces graphiques de la MRC sont construites, et des séparations en composantes d'écoulement sont également proposées. L'adéquation des paramètres de chaque modèle a été vérifiée à base des tests statistiques.

#### 3.3.2 Base de données

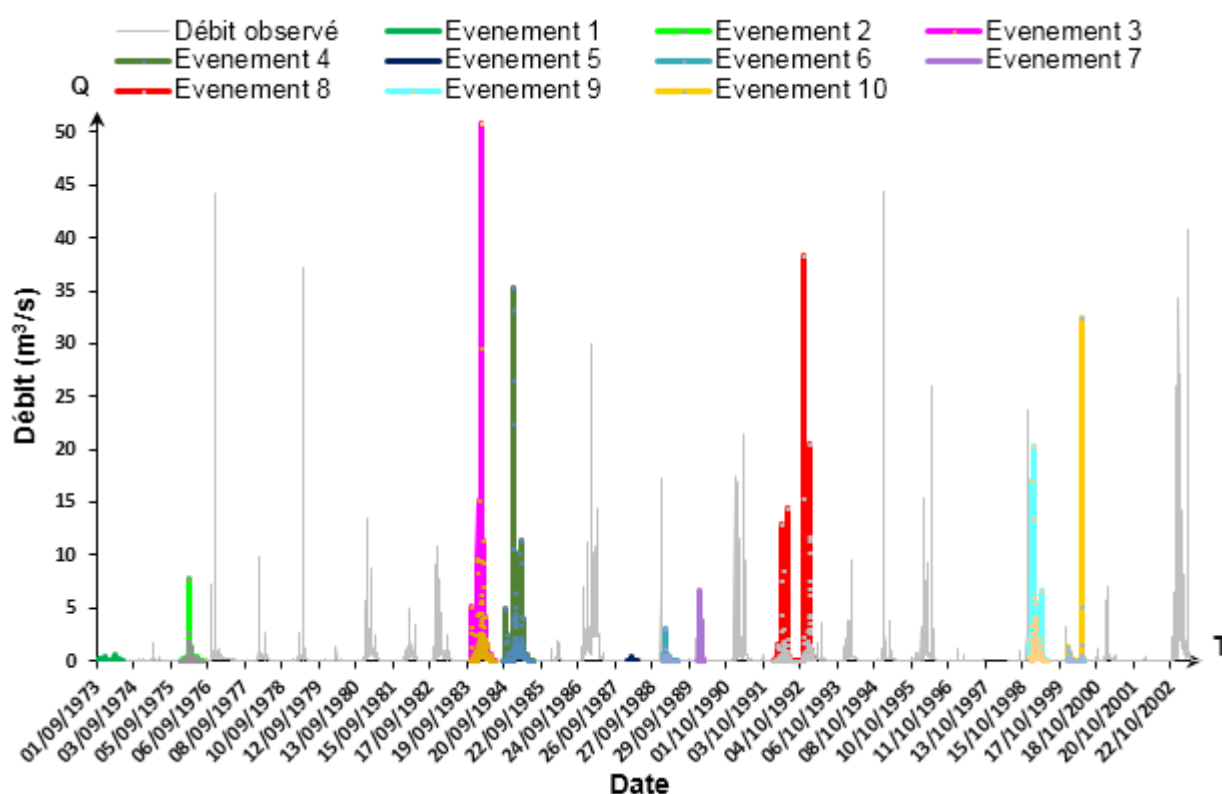
Si nous nous rapportons aux statistiques des indices de débits à l'échelle annuelle dans le (tableau 11), nous remarquons que l'écart-type est supérieur à la moyenne, nous pouvons donc supposer l'existence d'une grande variation interannuelle et

## Chapitre III : Techniques d'identification des composantes de l'écoulement

inégal de débit de 1973-2003. La (figure 19) montre les dix crues à considérer pour le traitement des courbes de récession.

**Tableau 11:**Caractéristiques statistiques de Madjez Ressoul, entre 1973-2003.

Débit moy (m <sup>3</sup> /s)	Débit min (m <sup>3</sup> /s)	Débit Max (m <sup>3</sup> /s)	Ecart type	Coef de variation	Asymétrie	Aplatissement
0.382	0	50.764	1.89	4,94	11.91	202.07



**Figure 19 :** Débit journalier observé et sélection des événements de crue étudiés dans le bassin versant de Madjez Ressoul durant la période de 1973-2003

### 3.3.3 Méthode des segments de récession individuels

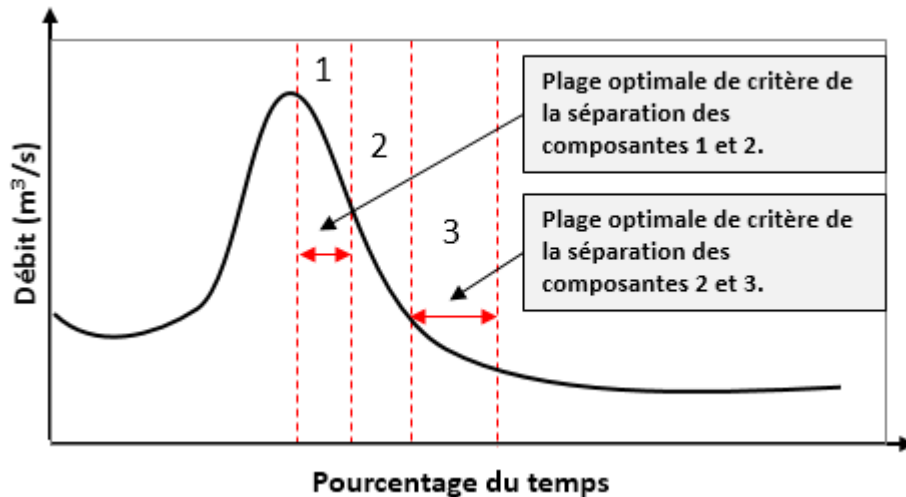
En pratique, la forme que prend la récession est fréquemment représentée par une fonction analytique simple, avec un certain degré de soutien empirique ou

théorique. Chaque récession est composée des segments de pentes, enregistrés entre deux pas de temps.

Localiser les points d'inflexion entre les segments individuels est d'une difficulté redoutable. Il est plutôt préférable d'opter pour une méthode automatisée pour éviter les obstacles liés à leur chevauchement. Cette explication nous a amené à adapter la méthode développée par (Posavec et al. 2010) pour la construction typique des MRCs. Ce choix consiste, à partir de ce type de simplicité, à juger l'adéquation du modèle à réservoir linéaire dans la séparation et les éventuels besoins d'amélioration.

### 3.3.3.1 Construction et séparation des MRCs

Dans tous les cas, la construction de la MRC paramétrique, doit être traitée comme une propriété paysagère représentant un comportement caractéristique, et non pas comme une condition hydraulique qui varie avec le temps : les traitements à partir des récessions individuelles enregistrées représentent la récession la plus probable du scénario dans une situation donnée (Nathan et McMahon 1990). En tant que tels, ils fournissent les paramètres moyens de l'aquifère par l'analyse de la courbe durée-débit. Cette dernière, spécifie le pourcentage des débits requis. Le choix d'une plage optimale de critères procède à une séparation automatique en deux ou trois types d'écoulement (figure 20).



**Figure 20 :** Exemple d'une courbe durée-débit pour un évènement : montre le pourcentage du temps pendant lequel le débit dans un cours d'eau est susceptible d'égaliser ou de dépasser une valeur d'intérêt spécifié

L'application du modèle à régression a commencé tout d'abord par une étape de segmentation (figure 21) des séries chronologiques, dans laquelle toutes les récessions sont divisées en des segments courts. Ces segments passent par une deuxième étape d'organisation, consiste à leur superposition par la méthode de la bande correspondante, en passant par deux étapes : la conversion du temps relatif en absolu et la mise du premier segment à la valeur la plus élevée au début de la MRC (figure 22).

A ce stade le décalage temporel nécessaire pour placer le point initial du deuxième segment de récession est calculé sur la première courbe de régression, en même temps que le décalage temporel aux temps relatifs des valeurs restantes est estimé. Ce décodage du deuxième segment entraîne un chevauchement entre le premier et le deuxième segment de récession. De la même manière, les récessions restantes ont été analysées en boucle jusqu'à ce que toutes les récessions soient traitées.

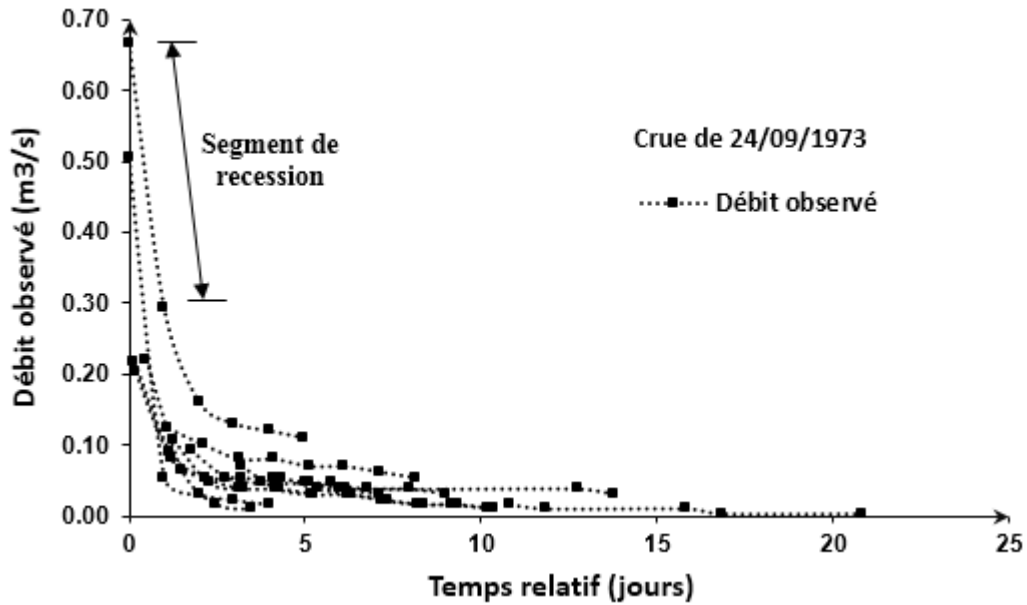


Figure 21 : Aspect des récessions individuelles et leur organisation du plus haute à la plus basse de l'évènement du 24/09/1973

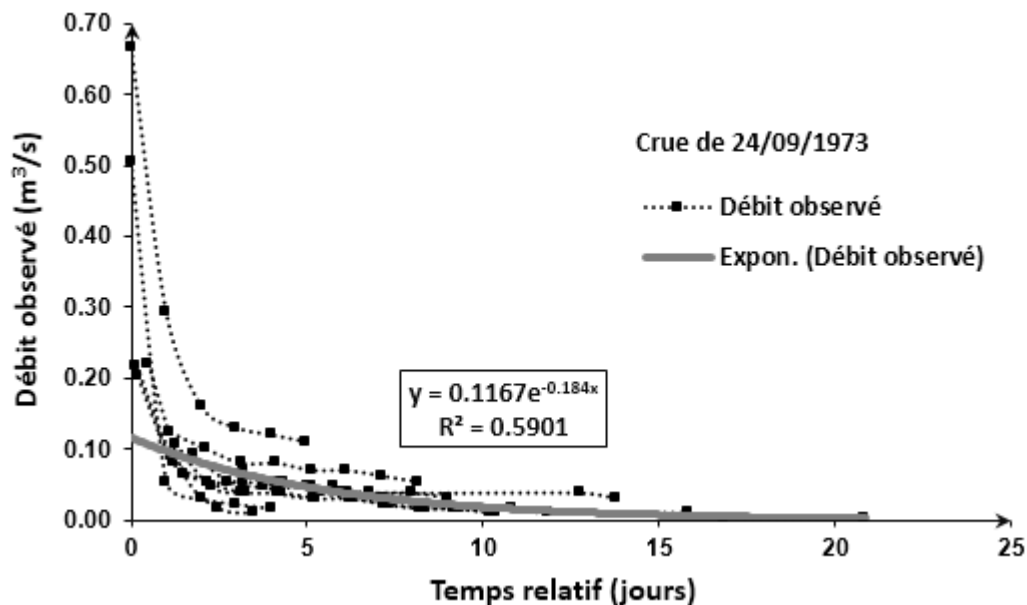


Figure 22 : Construction de la MRC pour l'évènement du 24/09/1973

À cette fin, une représentation des segments de récession se produit sous plusieurs formes de régressions linéaires et non linéaires, tout dépend des paramètres incorporés lors du calage. La moyenne numérique des coefficients  $R^2$  est calculée, suivant le nombre de type d'écoulement, et mise en évidence dans chaque forme de séparation (figure 23).

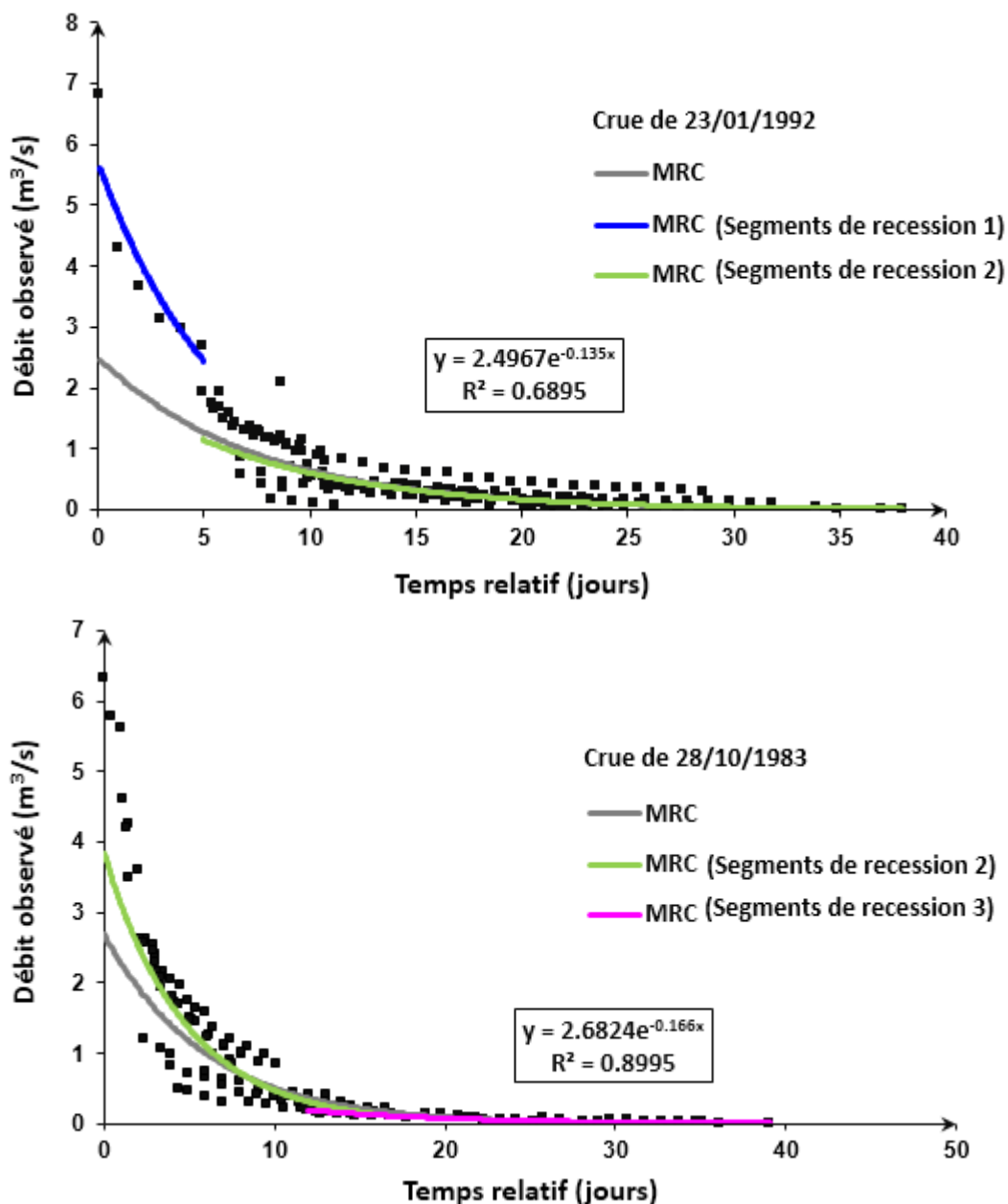


Figure 23 : Séparation automatisée des MRCs construites sous différentes formes

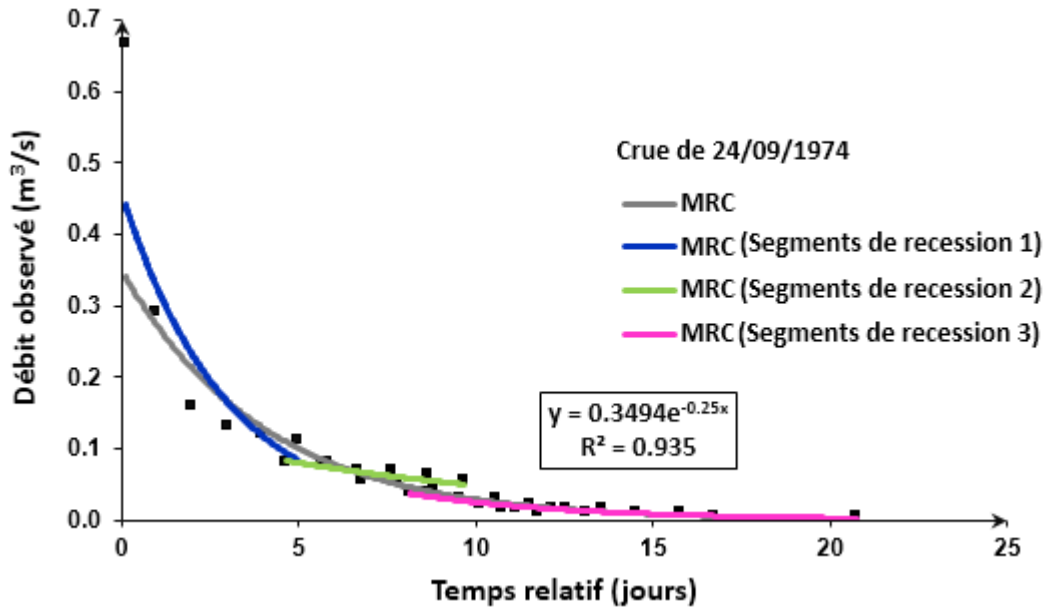


Figure 23 : Séparation automatisée des MRCs construites sous différentes formes

Les présents résultats ont été interprétés en se basant sur les valeurs de la pente  $\alpha$ , obtenues pour chaque MRC. Le coefficient de récession est calculé par l'(Eq.16) et (Eq.17).

$$Q_t = Q_0 e^{-\alpha(t-t_0)} \quad \text{Eq. 16}$$

$$Q_t = Q_0 K^{(t-t_0)} \quad \text{Eq. 17}$$

Les résultats de cette méthode montrent que les segments de récession individuels sont moins dispersés dans le temps et les valeurs de k sont représentées par deux types d'écoulement et avec tendance de représenter le temps de chaque composante sans refléter la vraie séparation en trois composantes (tableau 12).

## Chapitre III : Techniques d'identification des composantes de l'écoulement

**Tableau 12 :** Valeurs des coefficients de récession calculés par la méthode des segments individuels et classification des types d'écoulement contribuant à chaque évènement de crue continue

N°	Début	Fin	K <sub>1</sub>	K <sub>2</sub>	K <sub>3</sub>	Type d'écoulement
1	24/09/1973	29/05/1974	0.711	0.904	0.806	ES et ESs
2	25/12/1975	17/07/1976	0.770	0.909	0.858	ES et ESs
3	28/10/1983	26/06/1984	0.811	0.893	-	ESs
4	18/09/1984	02/07/1985	0.831	0.978	-	ESs et EB
5	19/01/1988	07/05/1988	0.922	0.945	-	ESs et EB
6	20/01/1989	12/06/1989	0.632	0.931	0.966	ES et EB
7	01/01/1990	21/02/1990	0.8	0.917	-	ES et ESs
8	23/01/1992	12/02/1993	0.844	0.88	-	ESs
9	01/01/1999	16/06/1999	0.69	0.855	0.907	ES et ESs
10	01/01/2000	23/06/2000	0.41	0.930	0.907	ES et ESs

ES : Ecoulement de surface      ESs : Ecoulement de subsurface  
EB : Ecoulement de base

### 3.3.4 Méthode du filtre récursif

Le bruit dans un écoulement est défini comme étant tout écoulement supplémentaire se produit naturellement ou par des activités humaines provoquant des erreurs indésirables dans les mesures. Parmi les solutions existantes, il est proposé de diminuer l'atténuation du débit de base et d'augmenter l'élimination de la fréquence de ruissellement en utilisant des méthodes de filtrage (Célleri et al. 2010; Rouhani and Malekian 2013), notamment, le filtre récursif. Ceci fait l'objet d'un test de l'adéquation des faibles débits et des régressions distribuées le long de l'axe d'analyse de la récession linéaire (Schilling and Jones 2019).

L'idée de concevoir un filtre récursif est soutenue par l'équation de (Lyne and Hollick 1979) et revient anciennement à l'effort de (Chapman 1987). Théoriquement, le choix de la méthode de filtrage est basé sur le numéro de paramètre des filtres sélectionnés, cette hypothèse était floue jusqu'à l'effort de (Eckhardt 2005) qui a expliqué que le filtre à paramètre unique n'est qu'un cas particulier du filtre à deux paramètres. Dans les mêmes contextes, (Li et al. 2014) ont effectué une analyse comparative entre les techniques de filtrage, à travers laquelle ils ont pu reconfirmer que le filtre de Lyne et Hollick (Eq.19) est plus efficace que celui d'Eckhardt en matière de l'analyse des récessions.

$$Q_T = B_T + F_T \quad \text{Eq. 18}$$

$$F(T) = aF(T - 1) + b(q(T) - \alpha q(T - 1)) \quad \text{Eq. 19}$$

$$B(T) = \alpha b(T-1) + c(1 - \alpha)(F(T-1) + F(T)) \quad \text{Eq. 20}$$

$$\alpha = e^{-\frac{1}{k}} \quad \text{Eq. 21}$$

$$V = \frac{1 - w}{W} \quad \text{Eq. 22}$$

$$a = \frac{3\alpha - 1}{3 - \alpha} \quad \text{Eq. 23}$$

$$b = \frac{2}{3 - \alpha} \quad \text{Eq. 24}$$

$$C = 0.5$$

L'effort de (Willems 2009) dans le même sujet a été l'objet d'une implémentation de l'équation de Lyne et Hollick dans l'outil WETSPRO (Water Engineering Time Series Proceeding). Ce dernier à multifonctions est destiné aux objectifs d'analyser des séries chronologiques dont les possibilités d'emploi sont différentes.

La séparation en sous-écoulements utilisée ici a été faite par le routage de deux paramètres : le temps de récession à 37% du débit original, plus un autre paramètre supplémentaire  $W$ . Les deux paramètres sont calibrés différemment, en ajustant la forme de l'hydrogramme (figure 24). Notez que le  $k$  réel dans ce cas est lié à l'inverse de la pente moyenne linéaire, évaluée par inspection visuelle. (Eq.25).

$$\frac{\ln(q(t-s) - \ln(q(t)))}{s} = \frac{1}{k} \quad \text{Eq. 25}$$

Le paramètre  $W$  varie dans le temps entre deux récessions avec des valeurs inférieures à 1 pour représenter : la moyenne de la fraction des volumes des sous-écoulements sur les volumes totaux. Il peut être calibré numériquement en optimisant la hauteur moyenne du sous-écoulement, ou les valeurs cumulées de la composante filtrée pendant les périodes de récession. Les coefficients de l'équation de (Lyne and Hollick 1979) après l'ajout du paramètre  $W$  deviennent :

$$a = \frac{(2 + V) \alpha - V}{2 + V - V \alpha} \quad b = \frac{2}{2 + V - V \alpha} \quad c = 0.5V$$

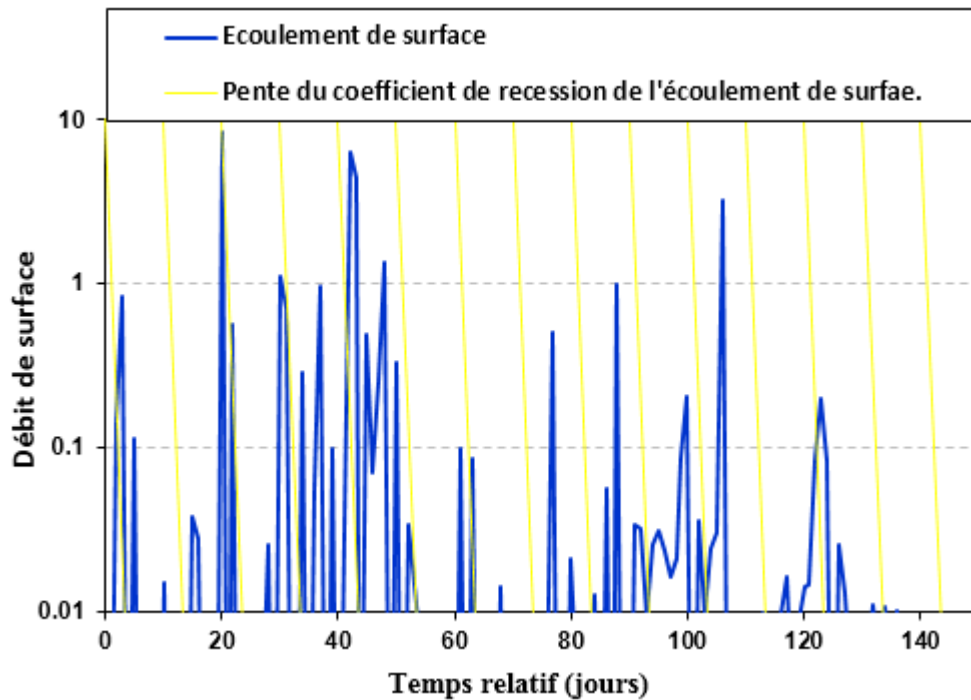
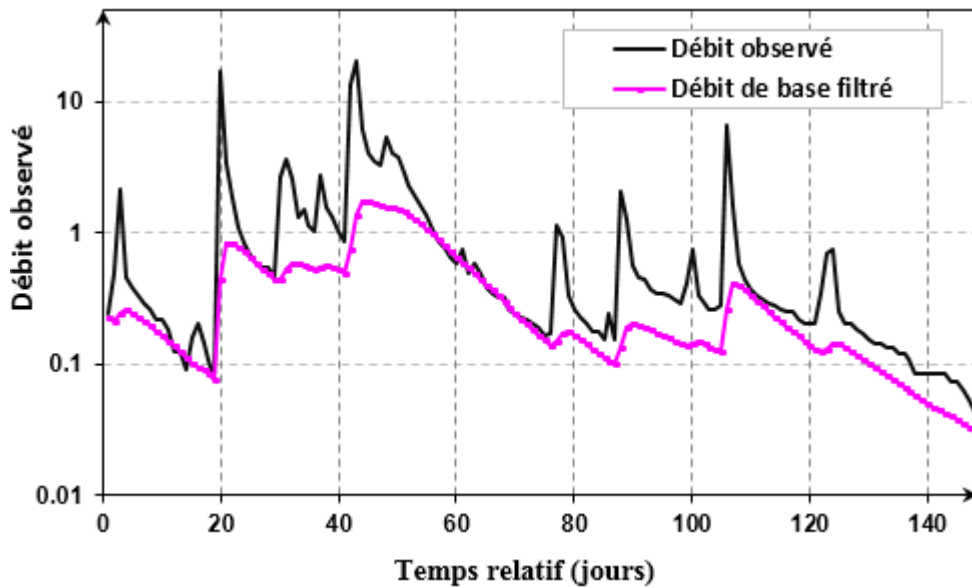


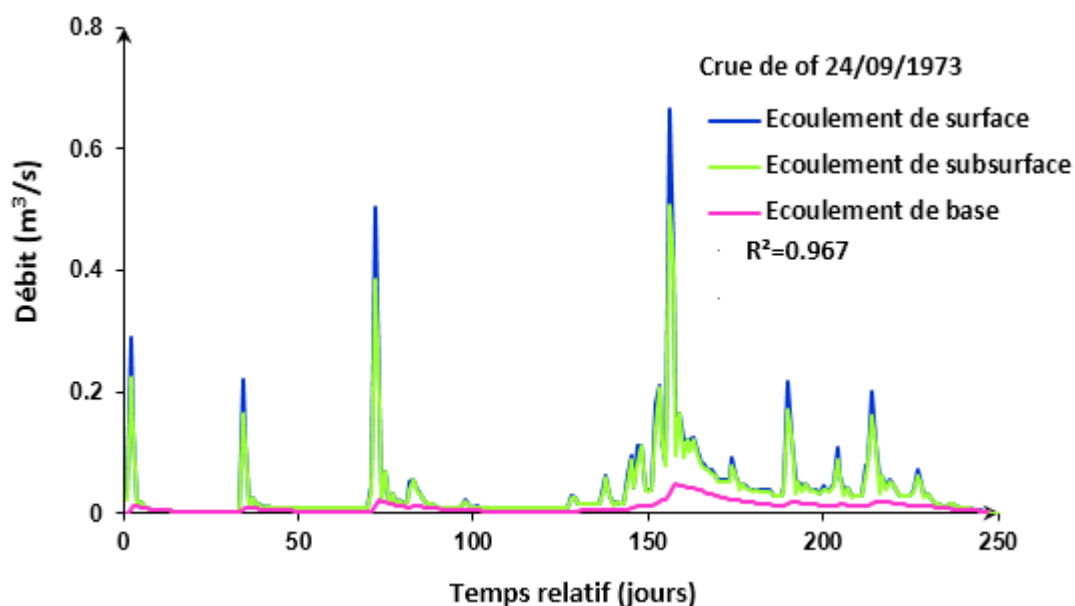
Figure 24 : Inspection visuelle et calage des composantes d'écoulement par rapport à la pente de récession



**Figure 24 :** Inspection visuelle et calage des composantes d'écoulement par rapport à la pente de récession

(Kabubi et al. 2005) ont conclu qu'une sélection des meilleurs K et W est la clé d'une meilleure validation du modèle. Cette indication semble être aussi assurée par l'approche passe-bas qui laisse passer les fréquences basses (tend vers zéro) et atténue les fréquences hautes lors de la séparation de l'hydrogramme en deux sous-écoulements : écoulement de base, et écoulement de subsurface.

Une fois les deux composantes sont déterminées, le débit de l'écoulement de surface résultant sera soustrait de leur somme et leurs entrées en série. La Figure 25 illustre un événement exemple, séparé en trois composants.



**Figure 25 :** Séparation de l'évènement du 24/09/1973 en trois sous écoulements par la méthode du filtre récursive

Les résultats de la séparation révèlent que l'inverse de la constante  $k$  reflète le temps nécessaire à chaque type d'écoulement pour s'écouler (tableau 13).

**Tableau 13 :** Valeurs des coefficients calibrés par la méthode du filtre récursif et classification des types d'écoulement contribuant à chaque évènement de crue continue

N°	Début	Fin	$W_2$	$W_3$	$K_1$	$K_2$	$K_3$	Type d'écoulement
1	24/09/1973	29/05/1974	0.08	0.73	0.368	0.513	0.905	ES et ESs
2	25/12/1975	17/07/1976	0.18	0.6	0.287	0.463	0.905	ES et ESs
3	28/10/1983	26/06/1984	0.3	0.8	0.189	0.368	0.931	ES et EB
4	18/09/1984	02/07/1985	0.1	0.68	0.135	0.819	0.913	ES et ESs
5	19/01/1988	07/05/1988	0.1	0.6	0.368	0.999	0.970	ES et EB
6	20/01/1989	12/06/1989	0.3	0.7	0.449	0.463	0.956	ES et EB
7	01/01/1990	21/02/1990	0.1	0.78	0.239	0.607	0.980	ES et EB
8	23/01/1992	12/02/1993	0.2	0.84	0.513	0.607	0.951	ES et EB
9	01/01/1999	16/06/1999	0.15	0.68	0.135	0.659	0.905	ES et ESs
10	01/01/2000	23/06/2000	0.3	0.5	0.469	0.435	0.819	ES et ESs

**ES : Ecoulement de surface**                      **ESs : Ecoulement de subsurface**

#### 3.3.5 Méthode des algorithmes génétiques (AGs)

La méthode des algorithmes génétiques (AGs) est à l'origine le fruit des recherches de (Holland 1975). La nouveauté apportée c'est l'intégration des principes naturels des organismes génétiques. Les techniques réelles impliquées dans la création des (AGs) sont théoriquement liées à la théorie de l'évolution de Darwin.

Au début, la plupart des applications concernant leur utilisation provenaient du domaine de l'intelligence artificielle (Jain and Srinivasulu 2009), aujourd'hui, elle s'étend à d'autres spécialités (tableau 14) pour la résolution des problèmes de changement de l'écoulement en fonction du temps. La description détaillée des (AGs) figure dans les documents de: (Goldberg and Holland 1988; Leardi et al. 1992; Lucasius and Kateman 1993; Melanie 1996; Shaffer and Small 1996; Leardi 2001).

**Tableau 14 :** Principaux domaines d'application des algorithmes génétiques

Domaine d'application	Références
Gestion des réseaux d'alimentation en eau potable	(Moneim et al. 2008),(Tanyimboh and Czajkowska 2018)
Diagnostic des canalisations de l'eau	(Sadeghioon et al. 2018)
Classification de la distribution de la pluie	(Şen and Oztopal 2001),(Bhattacharjya 2004), (Azahari et al. 2017)
Évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines	(Ahn et al. 2012), (Yang et al. 2017)
Prédiction des eaux contaminées	(Bashi-Azghadi et al. 2017)
Désinfection des réseaux de distribution de l'eau	(Zounemat-Kermani et al. 2018)

Pour la modélisation pluie-débit, il a été signalé que certains des processus hydrologiques sont non linéaires et difficiles à estimer. Telle situation n'ayant en outre besoin qu'une intervention des approches stochastiques à hautes

performances : Si les modèles de régression sont considérés essentiellement pour déterminer les paramètres par des méthodes classiques, les AGs ont une autre structure d'optimisation qui dépend de l'utilisation des paramètres définis au lieu des paramètres eux-mêmes (Reshma et al. 2018).

Le processus de la sélection naturelle des paramètres est sollicité par le choix des individus les plus aptes dans une population afin qu'une nouvelle progéniture soit produite. En procédant, nous pouvons hériter les caractéristiques des parents et ajouter cette progéniture à la prochaine génération : si les parents ont une meilleure condition physique, leur progéniture sera meilleure que les parents et aura de meilleures chances de survivre. Cette opération continue à se répéter et à la fin, une génération avec les individus les plus aptes sera trouvée.

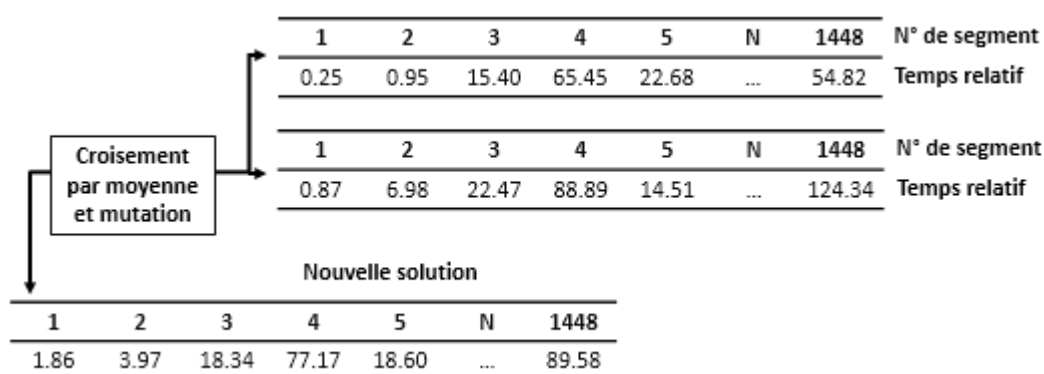
Pour la séparation des hydrogrammes de crues, créer une population se fait par la considération d'un ensemble de solutions, en sélectionnant les meilleurs.

La phase de simulation consiste à recombinaison génétiquement les meilleurs individus par des procédés d'enjambement (cross-over) en complément des mutations (Rizman 2019). C'est à partir de cette étape que les paires de chaque individu s'accouplent par un point de croisement arbitraire (Ibrahim et al. 2018). Le processus se répète jusqu'à ce que le point de croisement est atteint, à ce moment-là certains individus peuvent être soumis à une mutation de faible probabilité aléatoire. Cela implique l'inversement de certains assemblant de la chaîne. D'après (Lim et al. 2010; Eftimi and Malík 2019; Nurkholis et al. 2019), un tel processus révélera quand une grande ou petite valeur se converge ou diverge avec le développement des paramètres. Ainsi, il est raisonnable de tenir compte des techniques de calage dans le traitement des (AGs) pour optimiser les résultats finaux.

Dans le but est de construire une MRC facile à interpréter, (Gregor and Malik 2012) ont récemment tenté d'ajuster des paramètres à des séries chronologiques de débit

par l'opérateur de croisement en moyenne (figure 26). L'avantage principal de cette méthode est sa capacité à faire face à tous les obstacles liés aux erreurs de mesure des données et à la nature des segments de récessions particulièrement courtes ou non complètes (Lugten and Íslands 2013).

La mise en œuvre des principes susmentionnés sur le bassin versant de Madjez Ressoul a tendance à optimiser la distribution des MRCs et leurs séparations, pour cela nous avons testé la fiabilité de cette méthode sur notre bassin versant en suivant les démarches suivantes.



**Figure 26 :** Description de la méthode de croisement par moyenne utilisée pour créer une nouvelle solution. Inspirée de (Gregor and Malik 2012)

Néanmoins, l'ordre des étapes de base pour la création d'une MRC à l'aide des (AGs) doit être respecté.

- Les récessions individuelles sont sélectionnées manuellement de telle façon que chaque récession couvre la période de l'événement (figure 27).
- Le pas de temps qui aidera à diviser chaque récession individuelle en plusieurs segments est choisi journalier. L'importance de cette phase est de savoir générer la première solution des segments numérotés sous forme d'un tableau représentant leurs variations par rapport au temps de conversion aléatoire.

### Chapitre III : Techniques d'identification des composantes de l'écoulement

---

Visuellement, il semble que tous les segments de récession partagent un temps mutuel, mais en réalité, deux paramètres à caractéristiques relatives au bassin versant se manifestent dans chacun : le débit  $Q_0$ , et le temps dans lequel la pente de l'écoulement change ( $k$ ). Dans notre cas, cette dernière a été déterminée par un calage manuel du modèle sélectionné. C'est à ce stade-là qu'une première solution peut être marquée selon un ensemble de paramètres entrés pour valider la longueur de la MRC et sa valeur de probabilité (tableau 15).

**Tableau 15** : Paramètres de construction de la MRC avec les algorithmes génétiques

N°	Début	Fin	N° de génération	N° des récessions individuelles	Probabilité de croisement	Longueur de la MRC
1	24/09/1973	29/05/1974	20	08	0.9	10
2	25/12/1975	17/07/1976	07	09	0.9	10
3	28/10/1983	26/06/1984	20	08	0.9	12
4	18/09/1984	02/07/1985	07	05	0.9	12
5	19/01/1988	07/05/1988	05	04	0.9	12
6	20/01/1989	12/06/1989	20	08	0.9	12
7	01/01/1990	21/02/1990	15	03	0.9	10
8	23/01/1992	12/02/1993	20	12	0.9	10
9	01/01/1999	16/06/1999	20	06	0.9	10
10	01/01/2000	23/06/2000	07	04	0.9	10

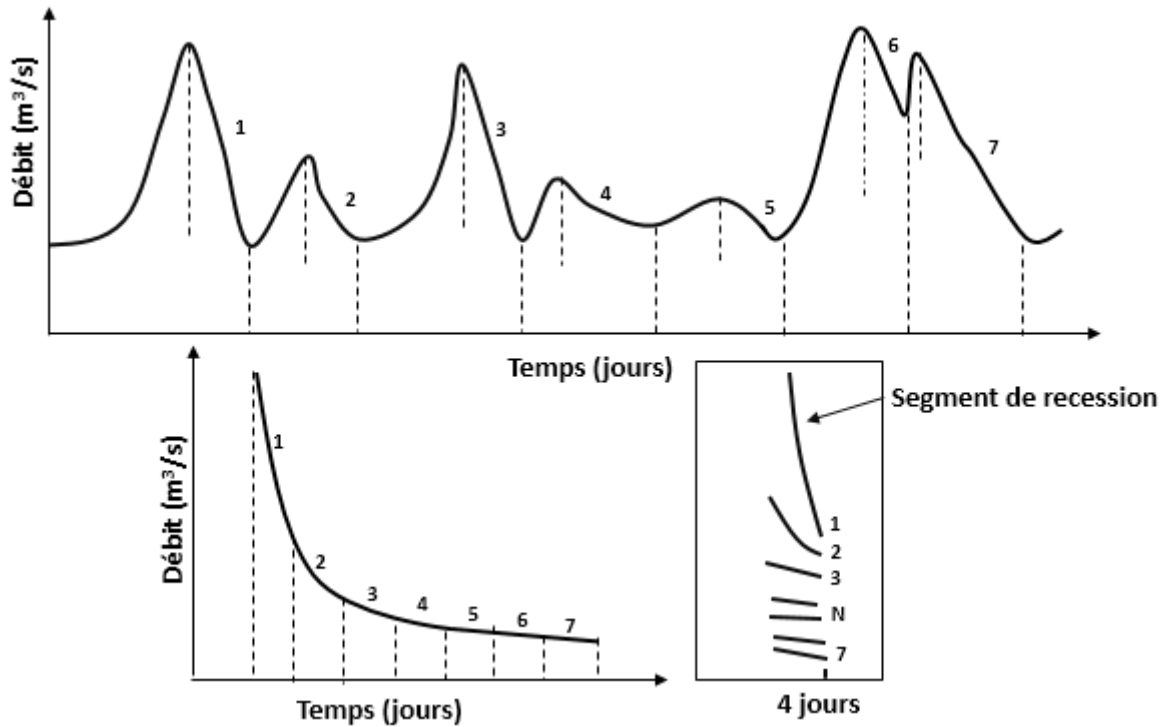
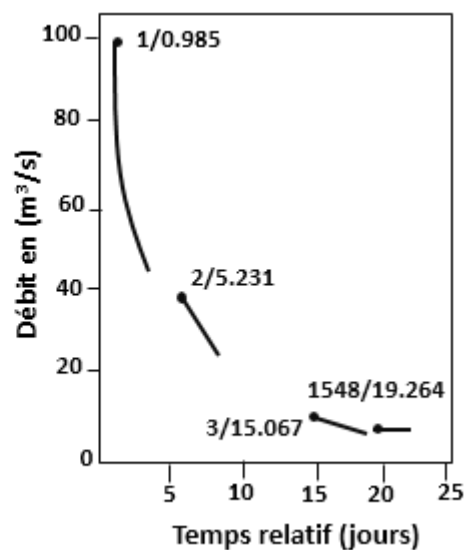


Figure 27 : Sélection des récessions individuelles et leur division en segments de N jours  
(Gregor and Malik 2012)

La représentation de la MRC est fondée sur la définition des segments individuels en tant que membre de la population. En faisant une organisation de la position de chaque segment en fonction de leurs valeurs numériques (figure 28), toutes les solutions de notre cas ont donné lieu à une première génération pseudo aléatoirement de la MRC, avec un temps maximal prédéfini. Le but de prendre en considération le décalage de temps entre la valeur initiale et maximale est alors de préjuger l'apparition des segments élevés avant les segments bas.

Numéro du segment	Temps relatif (Jours)
1	0.985
2	5.231
3	15.067
N	...
1548	19.264



**Figure 28 :** Définition de la structure des segments pour chaque solution individuelle dans la population de solution. Inspirée de (Gregor and Malik 2012)

L'adoption de cette méthode permet d'obtenir des représentations de la MRC suffisamment précises. Ne peuvent être calées dans leur intégralité, ces MRCs sont archivées et une seule est sélectionnée pour la séparation. Il en résulte des coefficients de décroissance  $\alpha$  étant la pente de chaque composante d'écoulement (tableau 16).

### Chapitre III : Techniques d'identification des composantes de l'écoulement

Tableau 16 : Coefficient de récession estimé par la méthode des Algorithmes génétiques

N°	Début	Fin	K <sub>1</sub>	K <sub>2</sub>	K <sub>3</sub>	Type d'écoulement
1	24/09/1973	29/05/1974	0.82	0.41	0.01	ES et ESs
2	25/12/1975	17/07/1976	0.9	0.61	0.02	ES et ESs
3	28/10/1983	26/06/1984	0.94	0.74	0.02	ES et EB
4	18/09/1984	02/07/1985	0.90	0.38	0.01	ES et ESs
5	19/01/1988	07/05/1988	0.99	0.74	0.01	ES et EB
6	20/01/1989	12/06/1989	0.94	0.74	0.61	ES et EB
7	01/01/1990	21/02/1990	0.93	0.74	0.02	ES et EB
8	23/01/1992	12/02/1993	0.95	0.67	0.02	ES et EB
9	01/01/1999	16/06/1999	0.92	0.74	0.01	ES et ESs
10	01/01/2000	23/06/2000	0.82	0.41	0.02	ES et ESs

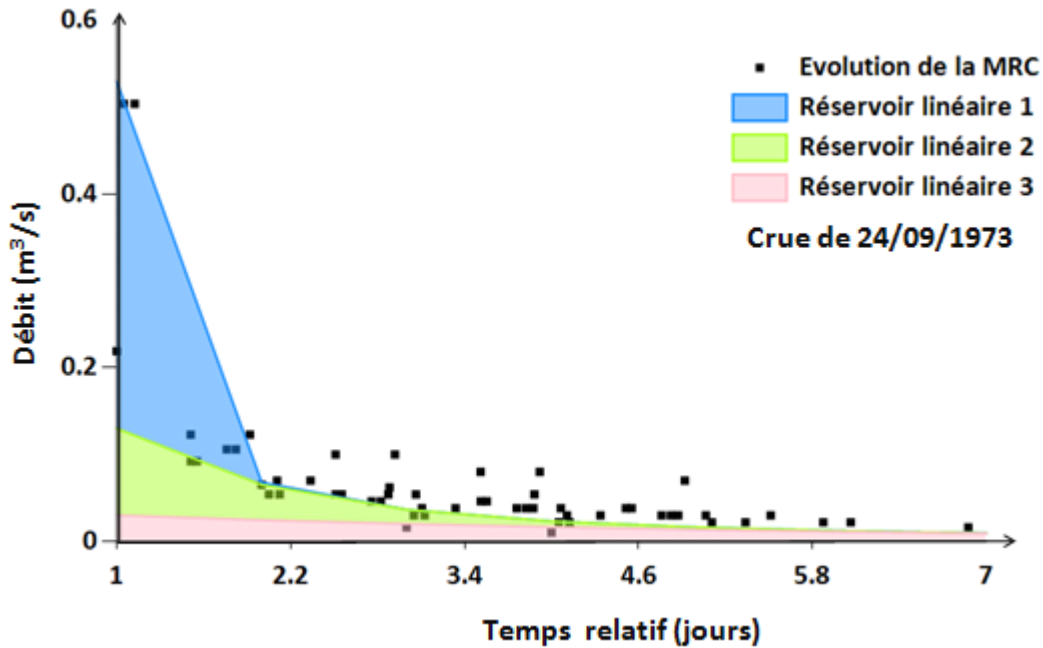
ES : Ecoulement de surface

ESs : Ecoulement de subsurface

EB : Ecoulement de base

Les composantes de débits peuvent être déterminées à partir d'un traitement visuel, la (Figure 29) montre la diminution de la pente de trois réservoirs linéaires : Le premier atteint la sortie avec un volume égal à la partie supérieure de la MRC. Tandis que les deux autres arrivent lentement à partir de la zone non saturée, et saturée respectivement.

Notons que l'idéal est de construire une MRC moyenne pour toute la période d'analyse, mais la présente technique présente certaines limites quant au nombre et longueur maximale des segments. La sélection manuelle des courbes de récession individuelles peut également confirmer l'objectivité de cette méthode et la forte intervention de l'utilisateur dans le choix du nombre de réservoirs séparés.



**Figure 29 :** Séparation de la MRC par la méthode des algorithmes génétiques pour l'événement du 24/09/1973

### 3.3.6 Discussions et conclusions

Dans cette étude nous avons procédé à un découpage des hydrogrammes journaliers de temps sec pour prendre en compte toute la dynamique des composantes des hydrogrammes de crue. Néanmoins, il faut comprendre que lorsqu'il s'agit des événements de crue continus, il y a des enjeux à gérer. Il s'agit principalement d'être capable de définir le plus précisément possible les temps de début et de fin des écoulements, la forme de l'hydrogramme n'étant pas toujours un critère suffisant.

La littérature établie dans la première partie montre que la construction des MRCs s'est avérée très performante pour la maîtrise du chevauchement associé aux segments individuels. En basant sur l'actuelle hypothèse, nous avons appliqué cette technique par deux méthodes : l'algorithme innovant basé sur les segments individuels et la méthode des (AGs).

### Chapitre III : Techniques d'identification des composantes de l'écoulement

---

Le calage de la régression exponentielle basée sur les segments individuels était bien représenté ( $R^2 \geq 0,7$ ). Les résultats du coefficient de récession ont permis de conclure qu'ils sont comparables, et montrent clairement une séparation en deux composantes dont le débit initial est classé entre (0,018-8) ( $m^3/s$ ) et les écoulements contributifs ont été dominés par :

- 50% : débit de surface et débit de subsurface.
- 20% : débit de base et débit de subsurface.
- 10% : débit de base et débit de surface.
- 20% : sont basés entièrement sur l'écoulement de subsurface : ce phénomène se produit le plus souvent lorsque l'eau s'écoule transversalement en pente et sature le bas d'un sol perméable (Klaus and Jackson 2018). Il est également justifié par la présence des roches sédimentaires, notamment de type gréseux, observées dans le bassin versant de Madjez Ressoul. Les événements du 23 janvier 1992 et du 28 octobre 1983 sont deux exemples vifs de cet écoulement.

Nous avons constaté par ailleurs que le niveau d'incertitudes détectées en associant l'écoulement de subsurface à l'écoulement rapide ou lent est extrêmement élevé par rapport aux deux autres méthodes. Cela pourrait être dû au consensus qu'un modèle de régression peut avoir des limites avérées vis-à-vis de sa capacité à caractériser efficacement la composante de l'écoulement proche de la surface.

Pour rester axer et éviter d'associer la composante intermédiaire à un écoulement qui est trop rapide ou trop lent à sa valeur réelle, certains auteurs considèrent que la récession est composée de deux processus principaux : un ruissellement direct, y compris l'écoulement de subsurface rapide et un écoulement souterrain qui génère la composante retardée de l'écoulement de subsurface. Malgré ça les résultats basés sur des simulations journalières ne peuvent jamais être généralisés à cause de l'inhabituelle surveillance des enregistrements de débit au niveau des bassins versants.

### Chapitre III : Techniques d'identification des composantes de l'écoulement

---

Le coefficient de récession du débit de base, issu de la méthode du filtre récursif a été comparé aux deux autres méthodes. Ces résultats prouvent de grandes similitudes avec ceux obtenus à l'aide des algorithmes génétiques et montrent clairement que l'écoulement de base prend des valeurs de K relativement élevées (0,93-0,99) lorsqu'il contribue à l'écoulement de surface, respectant le niveau négligeable quand il est moins de 0,2.

Du fait que la précision des résultats dépend de la longueur des enregistrements, qui n'était pas assurée par la méthode des (AGs), la création des MRCs était assez difficile. Malgré cela, la probabilité de croisement des MRCs a donné des valeurs beaucoup plus grandes, égales à 0,9 dans tous les cas du test. Les résultats montrent clairement que cette méthode sous-estime le faible débit et surestime le débit élevé. Ainsi, le débit de base à petite fluctuation au début des événements hivernaux du 01 Janvier 1999, 25 Décembre 1975, 28 Octobre 1983, et à évolution stable en septembre pour les deux années de 1973, et 1984 varie de 0,03 à 0,1 (m<sup>3</sup>/s). Le premier facteur limitant dans la séparation des hydrogrammes est la complexité du bassin versant. Les résultats de nos applications soulignent que l'efficacité des modèles réels est affectée différemment par d'autres conditions liées à la méthode elle-même.

Malgré le fait que les méthodes des (AGs) sont puissantes et nécessaires pour optimiser la séparation, elles présentent également d'autres inconvénients en ce qui concerne la longueur de recul. Cependant, les données de l'écoulement plus longues qui fournissent des longueurs de segment de récession plus importantes devraient être aussi petites que possible pour couvrir le nombre maximum de segments. Pour faire face à ce problème, l'actuelle méthode a permis de découper les segments de recul en fonction de la plage limitée et de les ajuster automatiquement aux MRCs, ceci minimise les incertitudes et améliore la description du bassin versant.

En essayant de diviser les courbes de récession en plusieurs composantes, il est souvent difficile de trouver les critères de détermination corrects. La méthode des segments individuels est une méthode entièrement automatisée qui sélectionne les paramètres optimaux de régression pour fournir une valeur bien élevée de  $R^2$ , même si la régression est mal évaluée. Dans ce cas, c'est la courbe de durée d'écoulement qui valide la performance du modèle de séparation.

En conclusion, l'Algérie, et en particulier le bassin versant de Madjez Ressoul, a un climat méditerranéen, ce qui signifie que les périodes de sécheresse sont susceptibles d'être enregistrées plusieurs fois au cours de l'année et rend la nécessité d'utiliser des algorithmes prédictifs évidente. Les résultats de chaque méthode peuvent être soit utilisés comme des entrants dans la modélisation pluie-débit ou pour s'informer sur la recharge souterraine et le nombre de réservoirs présents quand le but global est la prévision des périodes d'inondation ou de sécheresse.

---

**ESTIMATION DU TAUX  
D'INFILTRATION ET CHOIX DU  
MODELE ADEQUAT**

## Chapitre IV: Estimation du taux d'infiltration et choix du modèle adéquat

### 4.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons remplir ce que nous considérons comme un petit espace en hydrologie, des essais expérimentaux du taux d'infiltration sur le bassin versant de Madjez Ressoul pour fournir un guide à ceux qui sont intéressés à divers problèmes hydrologiques impliquent l'infiltration, en particulier les problèmes liés au développement approprié de la conception des terrains et d'autres scénarios qui nécessitent des estimations du ruissellement. Cependant, les complexités préférées à d'autres concernant le développement des modèles d'infiltration seront évitées.

Notons que l'effort est hydrologique, pour présenter des expériences significatives tant en applications in situ que théorie. En effet, les résultats de cette partie vont aider à choisir le modèle hydrologique pour le bassin versant de Madjez Ressoul.

### 4.2 Définitions et paramètres de l'infiltration

L'infiltration est la pénétration verticale de l'eau dans le sol sous l'effet de la gravité. Sa vitesse est appelée notamment le taux d'infiltration (aussi, potentiel et régime d'infiltration), est généralement exprimée soit en pouce ou en centimètre par heure.

Lorsque l'eau provenant des précipitations pénètre le sol après avoir rempli les interstices superficiels, elle devient plus importante à étudier. Son importance est liée à la définition de la capacité du sol à permettre le mouvement et le stock de l'eau à travers le profil du sol pour la rendre disponible à l'absorption des racines et d'habitat de ses organismes (Hingray et al. 2009).

La mauvaise définition de l'équation d'infiltration peut fournir un taux qui dépasse la capacité du sol à stocker l'eau, ce qui favorise le ruissellement sur des terrains en pente ou plats. Lorsque le ruissellement se produit, il donne lieu à d'autres problèmes du sol : une érosion si la surface est peu végétalisée, une diminution de la productivité si des produits chimiques sont transportés à travers le ruissellement, une sédimentation et par conséquent une décroissance de la capacité du stockage qui provoque soit des inondations soit des dégradations de la qualité de l'eau. Lors de l'infiltration, l'eau s'accumule dans les vides et entraîne une mauvaise aération au sol, cela influence la croissance de la fonction racinaire des plantes par la réduction des nutriments et du cycle logique du sol. Plus loin, lorsque ce dernier est à son état de saturation ses particules se détachent, sa résistance se diminue, et l'évaporation à la surface s'augmente en conséquence.

La valeur du taux d'infiltration régie les écoulements souterrains et l'occupation du sol : une valeur élevée est communément préférable pour la bonne croissance des végétaux. Dans certains cas, les sols aux comportements de mouvement illimité de l'eau peuvent servir à éliminer les nutriments mal appliqués qui atteignent la nappe souterraine et la surface (Lowery et al. 1997). Les termes descriptifs de l'infiltration peuvent être définis comme suit (tableau 17) :

Tableau 17 : Paramètres descriptifs de l'infiltration

Terme	Désignation	Définition
Taux d'infiltration	$f(t)$	Il désigne le flux vertical entrant au sol
Infiltration cumulative	$F(t)$	Notée et calculée par l'intégrale du taux d'infiltration dans une période de temps donnée
Capacité d'infiltration	$f_i$	C'est le taux d'infiltration final ou taux d'infiltration à la saturation ou encore infiltrabilité, elle dépend par plusieurs paramètres du type du sol, et des conditions aux limites de la teneur en eau
Conductivité hydraulique à la saturation.	$K_s$	Pour un sol homogène, elle est égale au taux d'infiltration final en phase de saturation

### 4.3 Etat de l'art de l'étude du taux d'infiltration

Le taux d'infiltration est le facteur le plus difficile à estimer car il peut être perturbé par de nombreux autres facteurs physiques et hydrologiques, à savoir : la variabilité des précipitations (Li and Shao 2006; Tsai and Yeh 2019) ; l'humidité (Hino et al. 1988; Schoener and Stone 2019) ; les propriétés des sols superficiels et profonds (Lipiec et al. 2006; Sajjadi et al. 2016; Barbosa et al. 2018) ; la morphologie des pentes (Biswas 2019) ; et la végétation des sols (Kalhor 2019).

Les observations déclenchées précocement ont suggéré que malgré le caractère décisif des lectures ci-dessus, l'infiltration est indépendante de la quantité et de l'intensité des précipitations lorsqu'elle est inférieure au taux d'infiltration du sol, et est conditionnellement associée à la teneur en eau.

En pratique, il est difficile d'obtenir des informations fiables sur les taux d'infiltration sans expérimentations in situ. En effet, les nombreuses tentatives menées pour évaluer les taux d'infiltration en utilisant des valeurs de perméabilité

en laboratoire ont donné de moins bons résultats même après combinaison avec des équations du bilan massique (Avellaneda 1985).

(Turbak and Morel-Seytoux 1988) ont développé un modèle d'infiltration basé sur une équation analytique avec deux conditions : une pour des taux d'infiltration constants dans l'espace et dans le temps, et la seconde est pour des taux d'infiltration variant uniquement dans le temps. Les résultats de cette étude indiquent de sérieuses limites dans la configuration du modèle. Dans ce même cadre, (Neris et al. 2013; Pingping et al. 2013; Zhao et al. 2018; Rahmana et al. 2019) ont confirmé encore qu'il n'est pas facile de mettre en évidence l'évaluation spatio-temporelle sans intervenir d'autres enjeux qui sont liés à l'incorporation de l'hétérogénéité du sol.

Également, (Vieux 2004) par son intérêt de comprendre comment le ruissellement est affecté par les propriétés du sol et les changements anthropiques, a conclu que la modélisation des précipitations indépendamment de l'infiltration et de l'humidité initiale du sol demeure cruciale dans le choix de la stratégie de calage, surtout que la variation entre les tracés des taux d'infiltration évalués directement à partir des mesures in situ, dépendaient des gradients de pente, des caractéristiques de surface et de l'angle géomorphologique des bassins versants (Fox et al. 1997; Chatterjee and Murali Krishna 2019).

Au vu de ce qui précède, de nombreux auteurs affirment que l'établissement des modèles d'infiltration basés principalement sur l'analyse de la régression serait la méthode la plus simple et la plus efficace (Patle et al. 2019; Sihag et al. 2020). Le processus est généralement effectué en adaptant des mesures expérimentales de champs linéaires ou non linéaires à des modèles théoriques d'infiltration bien établis et largement acceptés. Par conséquent, des graphiques et des paramètres de distribution peuvent être obtenus sur la base des analyses statistiques et géostatistiques multivariées (Cortes-D et al. 2018).

Parmi les études qui ont suscité des débats sur ce sujet, celles consacrées à évaluer la fiabilité des modèles d'infiltration nouveaux et conventionnels sur la base des critères statistiques (Mishra et al. 2003; Zakwan et al. 2016; Sihag et al. 2017; Singh et al. 2018; vand et al. 2018; Farid et al. 2019; Ebrahimiana et al. 2020). Les résultats de ces études confirment que le temps d'infiltration est le paramètre le plus important dans l'estimation des taux d'infiltration (Sihag and Singh 2018).

Réciproquement, les études sur les régions arides et semi-arides ont convenu que les modèles empiriques et semi-empiriques ont trouvé un grand terrain d'applications (Ramesh 2010; Farid et al. 2019).

Les premières distinctions des modèles d'infiltration se réfèrent au modèle d'Horton (Horton 1939), de nombreuses modifications de cette méthode ont été proposées pour considérer le stockage dans le sol (Holtan 1961), et les précipitations intermittentes lors des événements courts en saison sèche (Bauer 1974), ainsi que pour le calage à grande échelle des bassins versants (Gabellani et al. 2008). Des études similaires de (Green 1986; Aron 1990; Arnold et al. 1993; Diskin and Nazimov 1995) ont révélé que la limitation de ces modèles est généralement associée à l'étalonnage des caractéristiques physiques des paramètres du modèle.

Malgré les nombreuses critiques concernant la relation entre le taux d'infiltration et la quantité de pluie lors d'un orage (Verma 1982; Akan 1992; Esen and Almedeij 2013), l'équation d'Horton est aujourd'hui largement utilisée, en raison du bon accord qu'elle fournit avec les données pour refléter les bases physiques du sol. Cela est justifié par la mesure expérimentale de trois de ses paramètres.

D'autres études ont également montré qu'il est préférable d'utiliser des infiltromètres pour les expériences de base que d'autres méthodes (Filho et al. 2014). (Razzaghi et al. 2016) ont appliqué trois modèles empiriques d'infiltration, dont le modèle d'Horton est inclus pour évaluer l'efficacité de l'infiltration des

eaux usées et entretenir les infrastructures hydrauliques dans les bassins iraniens, ou la pénurie d'eau est un problème majeur. De même, (Li et al. 2019) ont évalué la rétention d'eau et la capacité du sol dans une partie de la Chine et, grâce à un certain nombre de modèles d'infiltration, peuvent améliorer le problème de la désertification, y compris la programmation de l'irrigation des cultures.

Pour les bassins tropicaux, la fiabilité des modèles traditionnels d'infiltration a été largement testée dans de nombreuses études (Mbagwu 1993; Askari et al. 2008; Suryoputro et al. 2018). Une attention particulière a été accordée à la variabilité des taux d'infiltration en fonction des changements des sols, vu qu'elle peut influencer la quantité du ruissellement et augmenter leur dégradation.

Lorsque (Mahapatra et al. 2020) ont trouvé une incertitude moindre des paramètres dans l'utilisation du modèle de Kostikov sur un bassin versant indien, (Oku and Aiyelari 2011) ont globalement constaté que le modèle de Philip était beaucoup plus approprié par rapport à celui de Kostikov dans la prédiction du taux d'infiltration pour un bassin forestier humide inspecté à Nigeria.

D'autre part, (Utin and Oguike 2018) ont déclaré que la fiabilité de ces deux modèles dépend du contexte géologique du sol. Les travaux ont conclu que le modèle de Kostikov était plus fiable pour les sols dérivés du grès et des sols alluviaux, tandis que le modèle de Philip était plus performant pour les sables des plaines côtières. Une connaissance détaillée de l'estimation des paramètres sur un sol sableux a également été réalisée par (Ogbe et al. 2011). Ils ont montré que les infiltrations cumulatives prévues à l'aide des modèles de Kostikov, Philip et Horton fonctionnaient aussi bien et étaient très proches des mesures sur le terrain.

Parmi toutes les méthodes disponibles pour effectuer des mesures expérimentales du taux d'infiltration, des efforts importants ont été consacrés à l'utilisation de l'infiltromètre à double anneau (Boers et al. 1992; Akinbile 2010; Mavimbela and Rensburg 2016; Lasisip et al. 2017; Ehiomogue et al. 2018). Ces études ont conclu

que cet instrument est toujours le dispositif de mesure le plus pratique en raison de sa capacité à réduire l'effet de l'écoulement latéral.

Il a également été démontré que la fiabilité pour évaluer la robustesse des modèles d'infiltration empiriques et semi-empiriques est contrôlée par l'efficacité de la méthode de mesure et de l'échelle de l'infiltromètre à double anneau (Ehiomogue et al. 2018; Mahapatra et al. 2020). (Robinson and Rohwer 1957) ont en outre souligné que lorsqu'on s'intéresse à la détermination du taux d'infiltration moyen, les anneaux de plus grands diamètres (c'est-à-dire pas moins de 6 pieds pour l'anneau intérieur et 18 pieds pour l'anneau extérieur) sont beaucoup plus robustes et fournissent généralement des données plus précises pour tout type de sol et même plus pertinent pour les particules de sol de grande taille.

En Algérie, les quelques études sur les taux d'infiltration étaient basées sur des tests en laboratoire utilisant un échantillon de sol extrait in situ (Rahmati et al. 2018), par exemple (Zadjaoui 2016) a développé un modèle numérique pour évaluer l'infiltration dans un sol sec non saturé en utilisant des méthodes d'homogénéisation. Les quelques autres se concentrent principalement sur l'évaluation de la conductivité hydraulique latérale et verticale sur le profil des sols d'une parcelle agricole (Smail et al. 2013). L'absence d'études en Algérie par rapport aux tendances de la recherche internationale sur ce sujet, met en évidence la nécessité des résultats pratiques pour la caractérisation des bassins nord-africains en général et des bassins algériens en particulier.

### 4.3.1 Objectifs des mesures du taux d'infiltration au sein de Madjez Ressoul

Les objectifs attendus des essais présents dans ce chapitre s'articulent autour de quatre points essentiels :

- L'estimation du taux d'infiltration à l'échelle du bassin versant et l'évaluation de l'eau en milieu non saturé.
- La production d'une infiltration à charge constante après saturation de la zone testée.
- La détermination des paramètres d'infiltration.
- L'analyse statistique des résultats de terrain qui permettent la comparaison entre les équations d'infiltration de différents sites.

### 4.3.2 Difficultés rencontrées

Les principales sources d'erreur peuvent être : la manière d'apporter l'eau et d'implémenter les anneaux. Le respect du niveau de la lame d'eau dans l'anneau intérieur, l'arrêt des mesures avant que le sol atteigne son gonflement maximum, la direction de l'écoulement, la qualité de l'eau utilisée et la réalisation du prélèvement.

D'autres difficultés relativement liées aux essais sur terrain sont :

- L'accessibilité aux sites.
- La disponibilité de l'eau
- La durée de l'essai d'infiltration.
- Le comportement rural de quelques points situant en régions payantes.

### 4.3.3 Protocole expérimental

L'importance de produire une lame écoulée à la même échelle que les débits mesurés, se voit dans la préparation d'une base de données représentative. Pour ce but, nous avons découpé le bassin versant de Madjez Ressoul en plusieurs sous-bassins, décidés en fonction des réseaux de drainage. Dans chaque sous-bassin versant, trois sites d'essais en moyenne ont été sélectionnés pour couvrir la plus grande occupation et types des sols. Cependant, en raison de la complexité du relief naturel et la difficulté d'y accéder à tous les points, seuls 25 emplacements

appropriés ont fait l'objet à des mesures du taux d'infiltration. L'accessibilité et la faisabilité des sites expérimentaux ont été vérifiées à l'aide de Google Earth.

Pour répondre aux besoins futurs des autorités locales de l'eau et vu que cette initiative est une première à l'échelle du bassin versant de Madjez Ressoul, nous présentons les coordonnées des lieux de mesure dans le (tableau 18).

**Tableau 18 :** Système de coordonnées UTM des sites de mesure

N°	X (m)	Y (m)	N°	X (m)	Y (m)
P1	375,119	4,058,736	P14	366,370	4,054,863
P2	374,484	4,057,915	P15	369,353	4,052,046
P3	374,457	4,056,521	P16	371,138	4,052,406
P4	373,830	4,055,395	P17	371,847	4,049,633
P5	372,642	4,054,681	P18	370,546	4,047,390
P6	371,631	4,054,461	P19	368,556	4,047,220
P7	369,858	4,053,936	P20	366,751	4,048,553
P8	368,220	4,054,283	P21	364,982	4,048,288
P9	367,515	4,054,119	P22	368,405	4,050,570
P10	367,005	4,054,069	P23	363,956	4,050,140
P11	365,767	4,053,631	P24	363,113	4,051,694
P12	365,915	4,052,625	P25	364,750	4,050,669
P13	366,435	4,051,943			

### 4.3.3.1 Intégration de la cartographie

Quelles que soient les contraintes du site, l'intégration du SIG (Système d'Information Géographique) permet toujours d'effectuer un contrôle simple sur les possibilités d'erreur et les démarches additionnelles avant de se procéder à l'infiltration. Il s'agit aussi de prédire les durées de mesure du taux d'infiltration vu que les valeurs de ce dernier sont liées directement à la structure et à la texture locales du sol, par exemple :

## Chapitre IV : Estimation du taux d'infiltration et choix du modèle adéquat

- Une mesure du taux d'infiltration effectuée sur un sol sableux prendra beaucoup moins de temps (quelques minutes à dizaines de minutes) qu'une même mesure effectuée sur un sol argileux (quelques heures à quelques jours).
- Pour une classe de texture similaire, une autre mesure du taux d'infiltration effectuée sur un sol aéré (labouré) prendra beaucoup moins de temps qu'une mesure sur un sol compact.

En basant sur ces deux facteurs, les sites d'implémentation du bassin versant de Madjez Ressoul ont été sélectionnés et leur distribution est montrée dans la figure 30 et la figure 31.

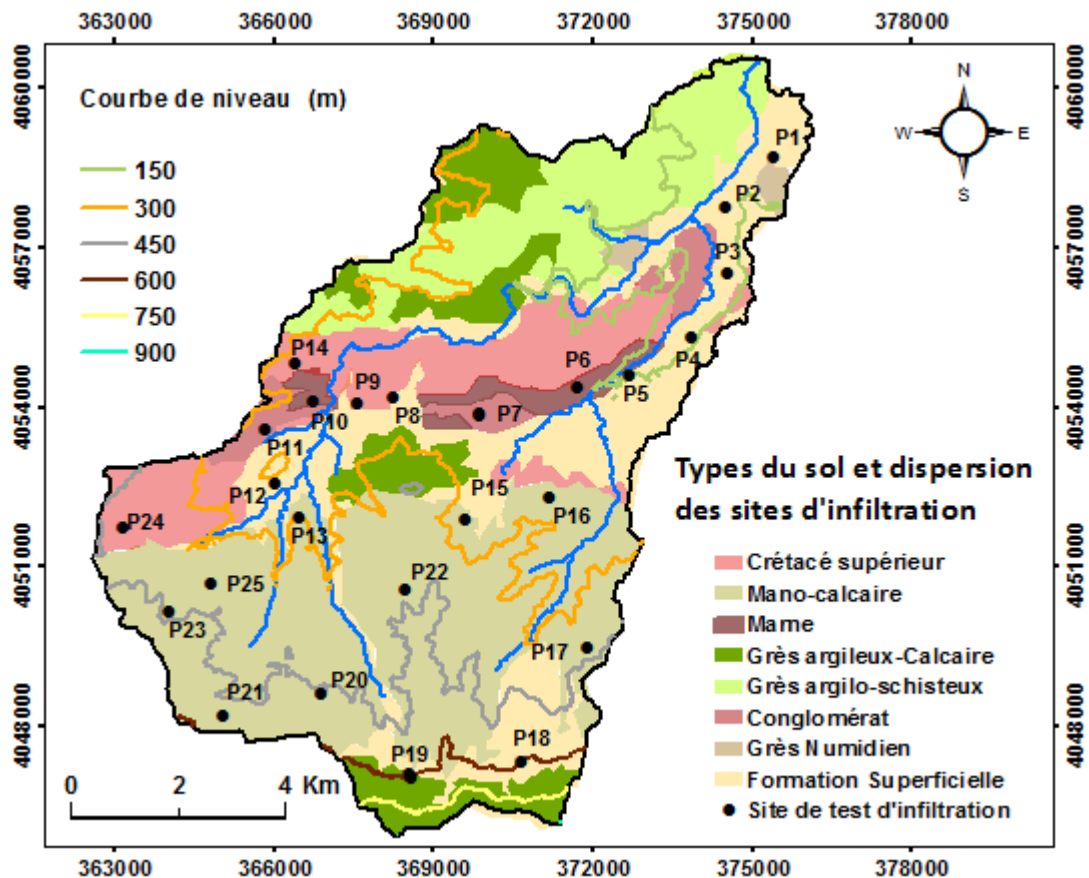


Figure 30 : Sélection des sites expérimentaux par rapport à la lithologie pour le bassin versant de Madjez Ressoul

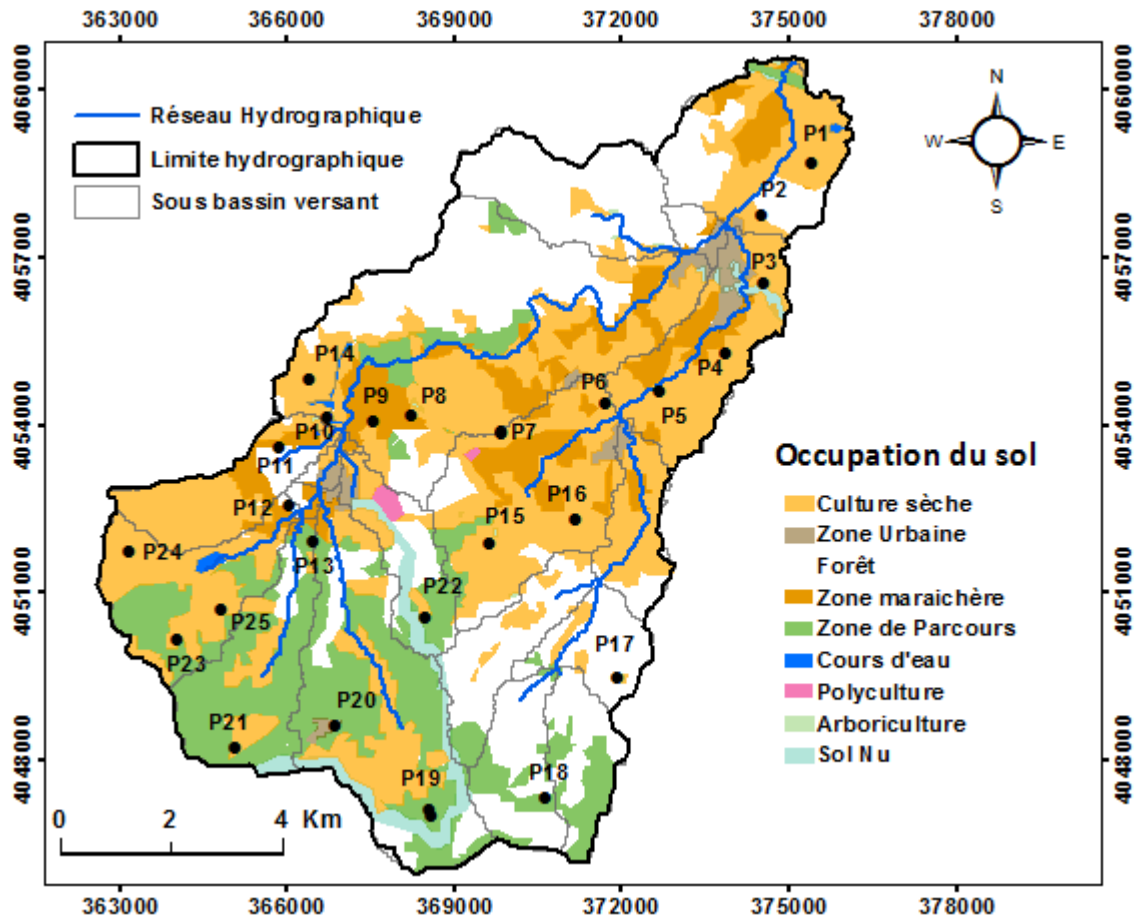


Figure 31 : Dispersion des sites sélectionnés pour les essais par rapport à l'occupation du sol au niveau de Madjez Ressoul

#### 4.3.3.2 Description de l'infiltromètre à double anneau

Dans les bassins versants consacrés à une agriculture diversifiée, les mesures du taux d'infiltration sont souvent étudiées au niveau des parcelles. La réalisation de telles expériences à l'échelle d'un bassin versant, en particulier dans les zones arides et semi-arides, est difficile en raison des effets de direction d'écoulement qui peuvent agir dans tous les sens et affecter les macropores (Weiler and Naef 2003). Les méthodologies expérimentales à base de cylindre sont affectées par la divergence du flux, l'infiltromètre à double anneau (figure 32) a été inventé par (ASTM 2009) pour surmonter cette difficulté, et mesurer les vitesses supérieures à

## Chapitre IV : Estimation du taux d'infiltration et choix du modèle adéquat

---

$10^{-6}$  (m/s). Dans notre cas, l'infiltromètre à double anneau est fabriqué localement avec des caractéristiques standards (tableau 19).

Lorsque les mesures unidirectionnelles ont été prélevées de l'anneau intérieur, l'anneau extérieur sert à contrôler la variation de l'eau transmise dans le sol, ainsi que pour créer une barrière verticale contre les flux divergents afin de contrôler les écoulements latéraux indésirables à l'approximation de la surface. En réalité, il n'est pas facile de garder la condition unidirectionnelle verticale sous l'anneau interne car cela est assuré immédiatement à la profondeur des couches du sol, au-dessous de l'anneau, et plus on s'écarte de la surface plus le volume d'écoulement doit s'orienter verticalement. Cependant, l'erreur commise sur le taux d'infiltration sera d'autant plus faible (éviter les anneaux très faibles pour ne pas risquer de compacter le sol) que le diamètre intérieur est petit et celui de l'anneau extérieur est grand.



**Figure 32 :** Infiltromètre à double anneau

**Tableau 19** : Caractéristique de l'infiltromètre à double anneau

<b>Ordre</b>	<b>Dimension</b>
Diamètre de l'anneau externe (PVC)	60 cm
Diamètre de l'anneau interne (PVC)	30 cm
Réglette de lecture graduée	(0-30 cm)
Longueur des deux anneaux	30 cm
Profondeur d'implémentation	2-10 cm

### 4.3.3.3 Equipement et déroulement de l'essai

Une campagne d'essais sur terrain a été réalisée durant la période de 14/04/2019 jusqu'à 13/05/2019. L'idéale c'est de faire les essais pendant des périodes différentes de l'année pour prendre en considération l'effet de la variation du climat, mais dans notre cas nous avons effectué par ailleurs des mesures de la teneur en eau en laboratoire pour rester axer au sujet traité.

C'est dans cette logique, que le bon déroulement de l'application in situ a été assuré par l'utilisation du matériel supplémentaire suivant (figure 33) :

- GPS pour localiser les sites.
- Pelle / houe pour prélever les échantillons du sol à la bonne profondeur.
- Eponge pour amorcer la vitesse de chute de l'eau
- Boîtes pour conserver l'échantillon du sol.
- Seaux de 5 litres (environ 100 litres pour chaque point).
- Chronomètre pour mesurer le temps.



**Figure 33 :** Préparation du matériel supplémentaire à l'implémentation de l'infiltromètre à double anneau

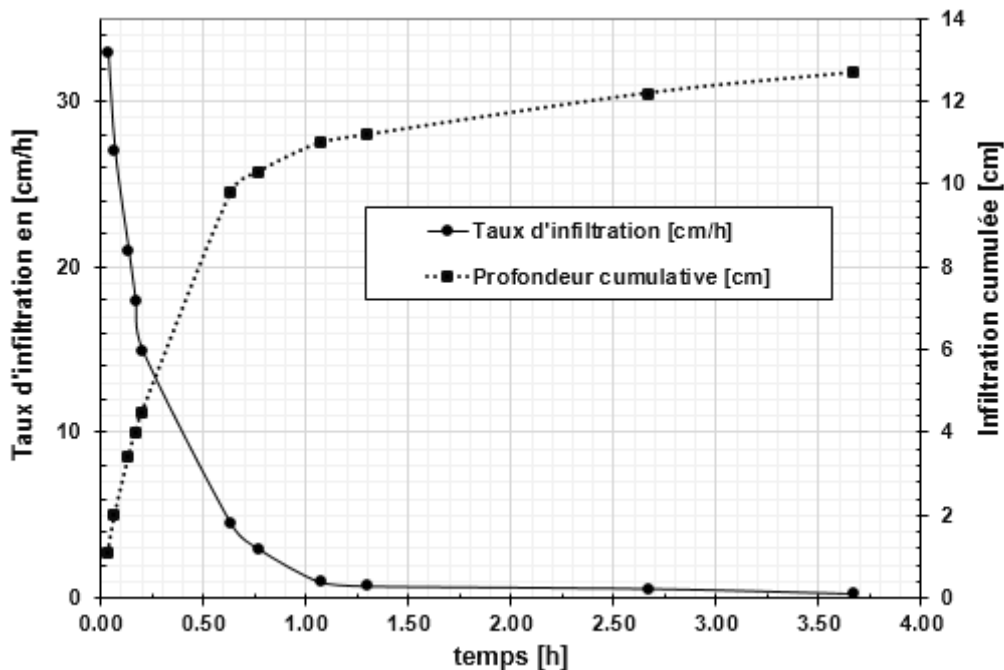
La mise en place des deux anneaux nécessite qu'ils restent centrés sur un sol horizontal. Cette condition d'implémentation a été respectée par enfoncer les deux anneaux également dans le sol à 5 cm de profondeur (en utilisant une plaque d'entraînement, un niveau maçon, et un marteau absorbant les chocs) à la même épaisseur de la lame d'eau tout au long de l'expérience.

Les essais ont été effectués sur des surfaces nues, non travaillées en veillant de ne pas creuser la surface des terrains lors du versement rapide de l'eau claire sur l'éponge jusqu'à atteindre un niveau fixe à l'infiltromètre. Les bornes de l'infiltromètre ont été colmatées avec de l'argile locale afin d'éviter toute perte d'eau latérale pourra changer la charge constante dans l'anneau externe.

En raison du manque de flotteur automatisé, une règle de mesure a été installée sur l'anneau intérieur, permet les prélèvements de la profondeur (en cm) de la lame d'eau qui peut pénétrer dans le sol en un pas de temps. Par exemple : un taux d'infiltration de 30 (cm / heure) signifie qu'une lame superficielle d'eau de 30 cm mettra une heure pour s'infiltrer dans le sol.

Cette stratégie de collecte des données repose essentiellement sur l'enregistrement de ce qu'on appelle le taux d'infiltration initial et final. Le premier c'est l'état du sol à  $t=0$  : dans un sol sec, l'eau s'infiltré rapidement au début de l'essai et au fur et à mesure que cette eau remplace l'air dans les pores, le sol atteint son taux d'infiltration final (figure 34).

Les enregistrements de la profondeur d'infiltration ont été répétés (à l'aide d'un chronomètre) régulièrement chaque 2 minutes jusqu'à la saturation du sol qui a duré de 1 à 4,5 heures. Le (tableau 20) présente les résultats des niveaux d'infiltration initial et final.



**Figure 34 :** Aspect de la courbe d'infiltration résultante des mesures du taux d'infiltration à l'aide de l'infiltromètre à double anneau

Tableau 20: Taux d'infiltration initial et final du bassin versant de Madjez Ressoul

N°	Taux d'infiltration initial ( $f_0$ ) à $t=2\text{min}$ [cm/min]	Taux d'infiltration final ( $f_c$ ) en [cm/min]
P1	1	0.6
P2	2.5	0.1
P3	1	0.2
P4	1	0.1
P5	0.9	0.1
P6	0.5	0.1
P7	1.1	0.1
P8	1.3	0.2
P9	1.1	0.1
P10	1.2	0.1
P11	1	0.2
P12	1.2	0.2
P13	1	0.1
P14	1.3	0.1
P15	1.5	0.1
P16	1	0.1
P17	1.2	0.1
P18	1	0.1
P19	1.1	0.1
P20	0.5	0.1
P21	1.1	0.1
P22	1	0.1
P23	1	0.2
P24	1.1	0.1
P25	1.5	0.1

Il convient d'être précis lors des prélèvements sur le terrain pour assurer la qualité de l'information obtenue. Dans ce qui suit, nous présentons les méthodes de calcul des paramètres d'infiltration et l'acquisition des mesures.

### 4.3.3.4 Méthodes de calcul et modélisation du processus d'infiltration

Selon (Schmit et al. 2001; Mishra et al. 2003), les modèles d'infiltration peuvent être classés en trois groupes (tableau 21) :

- Modèles théoriques ou à base physique : Ils reposent sur la loi de conservation de la masse et la loi de Darcy. Ils sont dérivés en fonction de la considération complexe de ces trois points : la dimensionnalité, la dynamique de l'écoulement, la conductivité hydraulique (capillarité ou teneur en humidité aux conditions initiales et limites).
- Modèles empiriques : utilisent des hypothèses simples du taux d'infiltration, souvent dérivés des équations de continuité et localisés spatialement.
- Modèles semi-empiriques : constituent un compromis entre les deux modèles précédents et se basent sur l'approche systémique des eaux de surface.

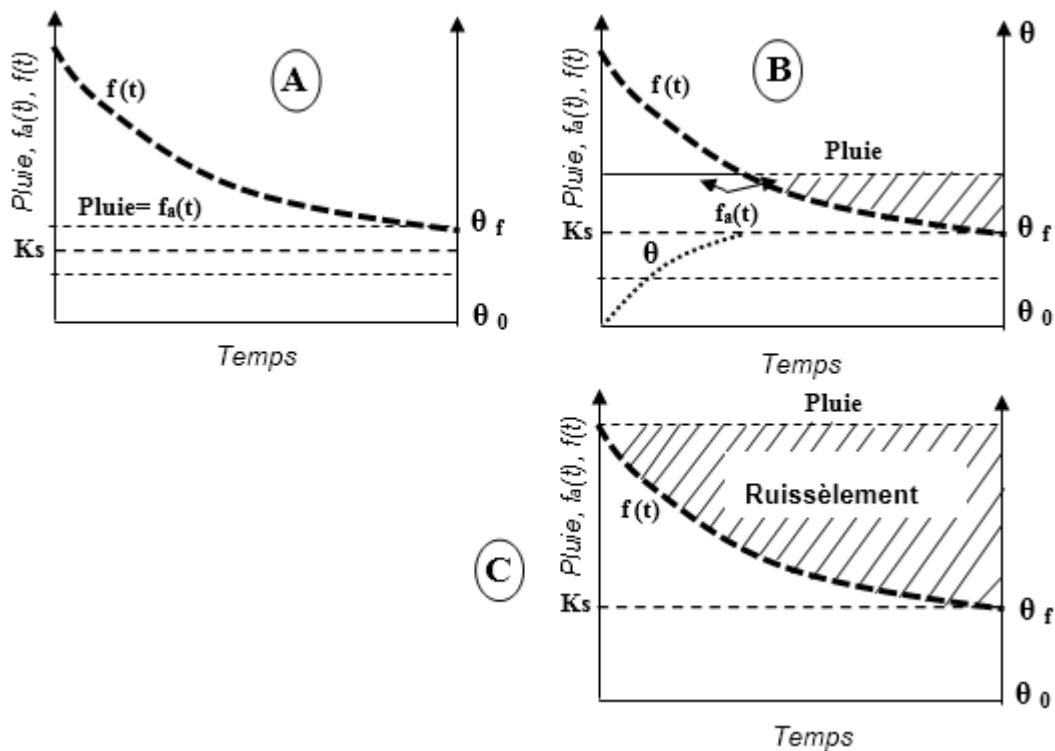
**Tableau 21** : Classification des modèles d'infiltration, selon (Schmit et al. 2001)

Modèles à base physique	Modèles empiriques	Modèles semi-empirique
(Green and Ampt 1911)	(Kostiakov 1932)	(Holtan 1961)
(Philip 1969a)	(Smith 1972)	(Singh and Yu 1990)
(Smith and Parlange 1978)	(SCS 1956, 1971)	(Horton 1941)
(Mein and Larson 1971)	(Huggins and Monke	(Overton 1964)
(Mein and Larson 1973)	1966)	(Grigorjev and Iritz 1991)
(Richards 1931)	(Collis-George 1977)	
(Smith 1972)		

Les relations empiriques expriment simplement une décroissance de l'infiltration à partir d'une valeur initiale (soit exponentielle, soit comme une fonction

quadratique du temps). Leurs paramètres sont dérivés au moyen d'un ajustement de la courbe de l'équation sélectionnée aux mesures expérimentaux de l'eau infiltrée.

Poursuivre la discussion de leurs applicabilités implique au préalable la compréhension du phénomène de passage de la pluie en débit en déduisant les autres facteurs physiques qui rentrent en jeu. Une schématisation classique considère le sol comme un profil perméable d'une distribution homogène en teneur en eau à l'état initial qui reçoit des précipitations constantes se fractionnent en taux d'infiltration et en pluie nette. La relation entre l'intensité de la pluie et la capacité du sol au stockage dépend de la conductivité hydraulique  $K_s$  (figure 35).



**Figure 35 :** Dépendance du taux d'infiltration  $f(t)$  et la pluie, avec  $f_a(t)$  : taux d'infiltration actuel. Tirée de (Rumynin 2011)

Théoriquement, la tendance des fonctions empiriques basées sur deux, trois, ou quatre paramètres néglige les aspects physiques de l'infiltration. Cependant, les fonctions de ce type (tableau 22) sont pratiquement très appliquées et toujours

populaires à cause de la simplification numérique qu'ils apportent au phénomène de pénétration de l'eau en fonction du temps.

## Chapitre IV : Estimation du taux d'infiltration et choix du modèle adéquat

Tableau 22 : Modèles d'infiltration empiriques basés sur le temps

Auteur	Fonction	Légende
Horton	$f(t) = f_c + (f_0 - f_c)e^{-kt}$	$f(t)$ : Taux d'infiltration au temps $t$ [ $LT^{-1}$ ] $f_c$ : Taux d'infiltration finale [ $LT^{-1}$ ] $f_0$ : Taux d'infiltration initiale [ $LT^{-1}$ ] $K$ : Constante empirique de décroissance de l'équation d'infiltration [ $T^{-1}$ ]
Kostiakov	$f(t) = at^{-b}$	$A, b$ : Paramètres de l'équation
Dvorak-Mezencev	$f(t) = f_0 + (f_1 - f_c).t^{-b}$	$f_1$ : Taux d'infiltration au temps $t=1\text{min}$ [cm/s] $t$ : temps [s] $b$ : constante
Holtan	$f(t) = f_c + c.w.((IMD) - F)^n$	$c$ : facteur variant de 0,25 à 0,8 $w$ : facteur d'échelle de l'équation d'Holtan $n$ : exposant expérimental proche de 1,4. $F$ : Hauteur d'infiltration à partir du début de l'infiltration $IMD$ : Déficit initial en eau
Philip	$f(t) = \frac{1}{2}St^{-0.5} + k_p$	$S$ : Paramètre de sorptivité en fonction de la teneur en eau aux conditions de limite [ $LT^{-0.5}$ ] $k_p$ : Fonction gravitaire, fonction de la conductivité hydraulique à saturation [ $LT^{-1}$ ]
Dooge	$f(t) = a.(Fmax - \theta(t))$	$a$ : valeur constante $Fmax$ : capacité de rétention maximale
Green-Ampt	$f(t) = Ks(1 + \frac{\Psi_w IMD}{F})$	$Ks$ : conductivité hydraulique à la saturation [mm/h] $\Psi_w$ : aspiration matricielle d'eau sur le front de mouillage

Les données proviennent des mesures in situ, présentées ci-dessous, constituent une base essentielle à l'élaboration de notre modèle. Toutefois, des sources d'erreurs aléatoires et/ou systématiques peuvent intervenir dans la chaîne

d'acquisition des données. Les résultats des mesures doivent donc subir à une analyse et procédure de critique avant d'être mis en évidence. Il a donc fallu, procéder à l'ajustement de trois modèles d'infiltration (Horton, Kostiakov, et Philip) par les résultats simulés.

Le modèle d'Horton (Horton 1941) est utilisé pour quantifier le taux d'infiltration comme une fonction de décroissance exponentielle en supposant des conditions de saturation à la surface du sol au fil du temps (Eq.26). Il fait partie des modèles les plus testés au monde pour des fins d'ingénierie (Beven 2004). Étant donné que l'équation d'Horton suppose que l'excès de la capacité d'infiltration est l'origine unique des eaux de surface, la détermination du taux d'infiltration restreint expérimentalement la constante de décroissance (k).

$$f(t) = f_c + (f_0 - f_c)e^{-kt} \quad \text{Eq. 26}$$

Le modèle de Kostiakov (Kostiakov 1932) est le premier modèle proposé pour l'analyse de l'infiltration dans les projets d'irrigation. Historiquement, ce modèle empirique fut développé pour estimer le taux d'infiltration, en supposant que la limite d'infiltration convergera vers zéro à mesure que le temps converge vers l'infini. Son équation (Eq.27) s'exprime mathématiquement comme suit :

$$f(t) = at^{-b} \quad \text{Eq. 27}$$

Le modèle à deux termes de Philip (Philip 1957) (Eq.28) est un modèle d'infiltration physique, qui est à l'origine dédié à un sol uniforme, où le taux d'infiltration dépend d'un nouveau paramètre, appelé la sorptivité. L'introduction de la sorptivité dans ce modèle a pour objectif de définir la lame infiltrée horizontalement.

$$f(t) = \frac{1}{2}St^{-0.5} + k_p \quad \text{Eq. 28}$$

### 4.3.3.5 Acquisition des mesures et paramétrisation des modèles d'infiltration

Les tests d'infiltration ont fourni 25 fiches techniques dont les résultats expérimentaux du taux d'infiltration sont brutes. Ces derniers ont été individuellement générés sous forme de courbe.

À partir de là, plusieurs démarches ont été assurées pour arriver à représenter graphiquement l'évolution du taux d'infiltration dans le temps. En débutant par l'ajustement linéaire de la variation des taux d'infiltration, le (tableau 23) récapitule les étapes de calcul de ce dernier pour le cas d'Horton.

**Tableau 23 :** Etapes de calcul de la capacité d'infiltration pour le modèle d'Horton

Temps (min)	Hauteur cumulative d'infiltration(cm)	Intervalle de temps (min)	Interval de l'hauteur incrémenté	Taux d'infiltration initiale (cm/h)	$\ln(f_0-f_c)$	Temps (h)
2	1,1	2	1,1	33	3,49	0,03
4	2	2	0,9	27	3,28	0,07
8	3,4	2	0,7	21	3,03	0,13
10	4	2	0,6	18	2,87	0,17
12	4,5	2	0,5	15	2,69	0,20
38	9,8	4	0,3	4,5	1,44	0,63
46	10,3	4	0,2	3	0,99	0,77
64	11	6	0,1	1	-	1,07
78	11,2	8	0,1	0,75	-	1,30
160	12,2	10	0,1	0,6	-	2,67
220	12,7	20	0,1	0,3	-	3,67

L'ajustement graphique de  $\ln(f_0-f_c)$  en fonction de  $t$  a permis la détermination des paramètres de l'équation d'Horton (tableau 24). Les (Figures 36, 37) donnent un exemple de régression linéaire des données observées après traitement, selon l'équation de Kostiakov et Philip.

Tableau 24 : Résultats préliminaires des paramètres de l'équation d'Horton

N°	f <sub>0</sub>	K	f <sub>c</sub>	t (heures)
P1	30	4,90	2,75	1,16
P2	75	2.65	0,05	3,33
P3	30	2,18	0,6	2,2
P4	30	2,33	0,3	3,9
P5	27	1,91	0,3	3,9
P6	15	1,51	0,3	4
P7	33	2,21	0,6	3,05
P8	39	2,68	0,6	2
P9	33	2,4	1	2,38
P10	36	2,42	0,3	3,71
P11	30	2,07	1	2,25
P12	36	3,41	1,2	1,83
P13	29,2	1,52	1	2,35
P14	39	2,97	0,4	4,18
P15	45	3,49	1,5	4,06
P16	30	2,6	0,3	4,16
P17	36	3,09	0,3	3,7
P18	30	2,74	0,75	3,73
P19	33	3,21	0,6	3,93
P20	15	2,02	0,75	4,33
P21	33	2,64	0,3	4,33
P22	30	2,92	0,3	4
P23	30	2,99	1,5	3,73
P24	33	3,25	0,3	3,66
P25	45	3,96	1,5	3,76

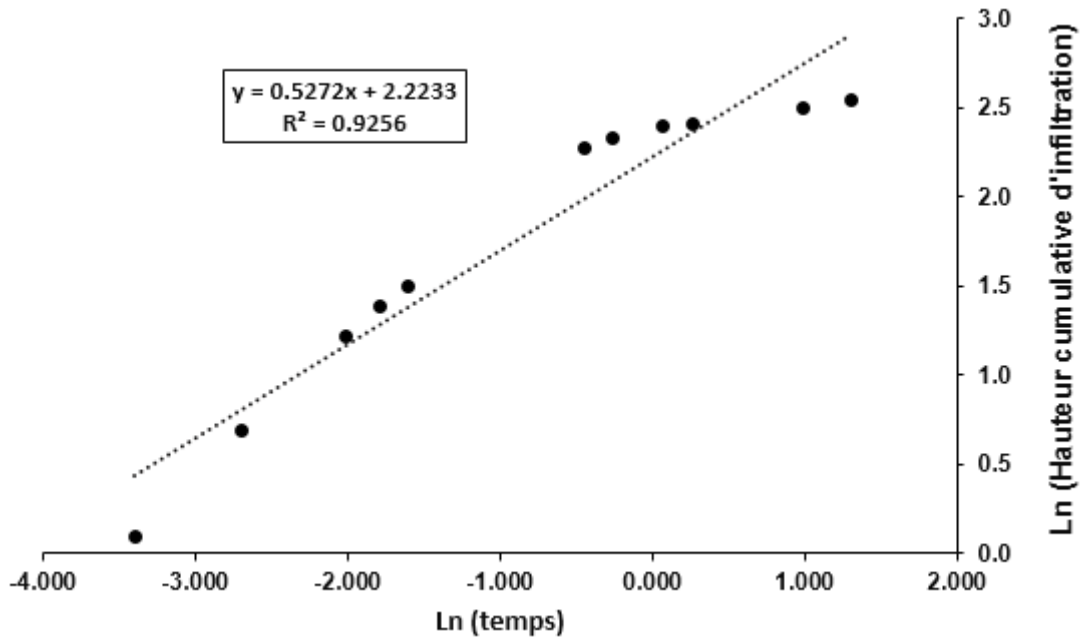


Figure 36 : Ajustement des données observées après traitement par l'équation de kostiakov

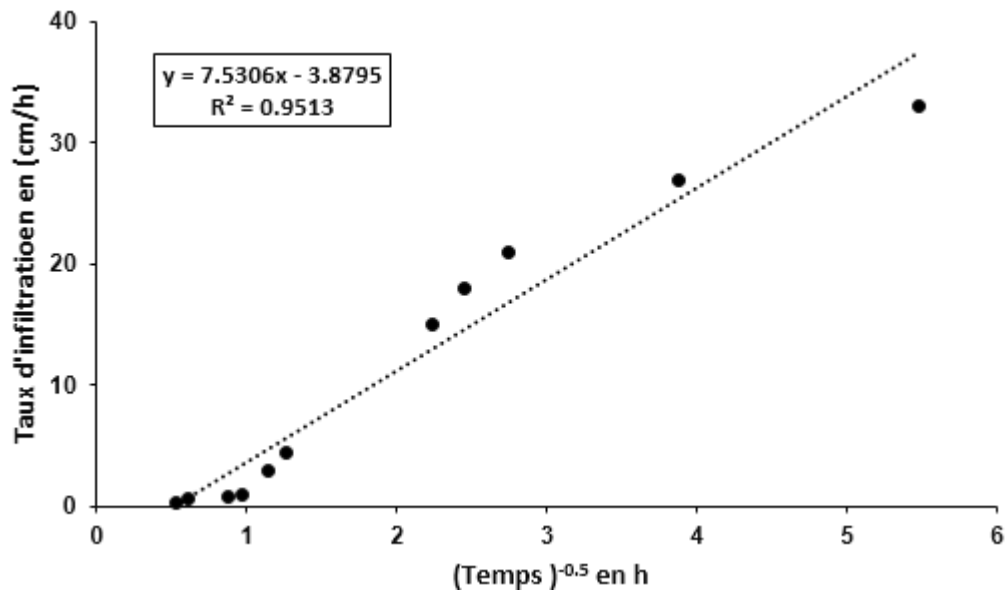


Figure 37 : Ajustement des données observées après traitement par l'équation de Philip

Pour optimiser au maximum l'ensemble des techniques appliquées pour ce travail, l'idée était d'adapter l'analyse des moindres carrés. Nous avons ainsi mis en évidence l'amélioration des paramètres obtenus par la minimisation de l'erreur

afin de décider quelle équation de régression (linéaire ou non linéaire) fournit le meilleur ajustement.

Cette méthode suggère d'estimer la somme minimale des résidus au carré (SSE<sub>i</sub>) entre les données observées et calculées du taux d'infiltration en utilisant une équation objective de la forme montrée en (Eq 29).

Les distributions ajustées des taux d'infiltration observés et calculés ont nécessité la configuration des paramètres évalués par routage selon les lignes de régression pour quantifier leur tendance. Dans le cas d'une régression non linéaire, capturer la meilleure courbe d'infiltration est relativement difficile. Pour obtenir des prévisions toujours meilleures et optimiser les résultats, un test des résidus entre les données observées et calculées a été exécuté. En revanche, la somme des carrés a été calculée avec précision pour voir si l'ensemble de données d'apprentissage est bien exécuté avec les ensembles de données calculées.

$$SSE_i = \sum_{j=1}^N (f(\text{Obs})_j - f(\text{pré})_j)^2 \quad \text{Eq. 29}$$

Où :  $f(\text{obs})_j$  : est le taux d'infiltration mesuré,  $f(\text{pré})_j$  : est le taux d'infiltration calculé par les modèles réels,  $i$  : Numéro du site, où  $j = 1, 2, \dots, N$ , avec  $N$ , est le nombre total de  $j$  taux d'infiltration enregistré au moment estimé.

### 4.3.3.6 Validation des modèles d'infiltration

La performance et la qualité de l'ajustement, entre les valeurs d'infiltration observées et calculées, pour les paramètres des trois modèles ont été évaluées à l'aide de quatre critères statistiques non dimensionnels : Nash-Sutcliffe (Nash), coefficient de corrélation de Pearson (CC), erreur quadratique moyenne (RMSE) et l'estimation du biais.

Soit,  $f(\overline{\text{obs}})$  est le taux d'infiltration moyen observé (cm/h), et  $N$  représente le nombre d'observations.

Le coefficient de Nash-Sutcliffe (Nash) est l'un des critères les plus couramment utilisés en hydrologie malgré son inconvénient connu (le fait que les différences entre les valeurs observées et les valeurs calculées sont ajustées sous forme de valeurs au carré. Par conséquent, des valeurs les plus grandes sont fortement surestimées alors que les valeurs inférieures sont négligées) (Eq.30). Les valeurs de Nash vont de 0 à 1, où un indice proche de 1 indique un meilleur ajustement. Pratiquement les valeurs de Nash sont fortement associées au coefficient de détermination ( $R^2$ ).

$$\text{Nash} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (f_{\text{Obs}} - f_{\text{Pré}})^2}{\sum_{i=1}^N (f_{\text{Obs}} - \overline{f_{\text{Obs}}})^2} \quad \text{Eq. 30}$$

Le coefficient de corrélation de Pearson (CC) est basé sur la méthode de la covariance (Eq.31). Il a été utilisé comme mesure de la force de l'association de linéarité entre les variables d'infiltration observées et calculées. Ses valeurs vont de -1 à +1 où une valeur de +1 indique une parfaite corrélation positive avec une robustesse égale à sa valeur absolue.

$$\text{CC} = \frac{N(\sum f_{\text{Obs}} * f_{\text{Pré}}) - (\sum f_{\text{Obs}})(\sum f_{\text{Pré}})}{\sqrt{[n(\sum f_{\text{Obs}}^2) - (\sum f_{\text{Obs}})^2][n(\sum f_{\text{Pré}}^2) - (\sum f_{\text{Pré}})^2]}} \quad \text{Eq. 31}$$

L'erreur quadratique moyenne (RMSE) est utilisée pour faciliter la comparaison entre les échantillons  $f(\text{obs})$  et  $f(\text{pré})$ , de manière standard. Comme il est toujours positif, il est considéré comme un indice de correspondance entre les taux d'infiltration observés et calculés (Eq. 32).

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (f_{\text{Obs}} - f_{\text{Pré}})^2}{N}} \quad \text{Eq. 32}$$

La fonction de biais (Eq.33) est estimée en divisant les erreurs entre les données observées et calculées sur le nombre d'estimations. Sa valeur montre la variance des échantillons et la source de l'erreur. Si la fonction du biais est égale à zéro,

l'estimateur est sans biais. Sinon, elle est biaisée et l'amélioration de la méthode estimée peut-être facilement réalisée en éliminant les résultats.

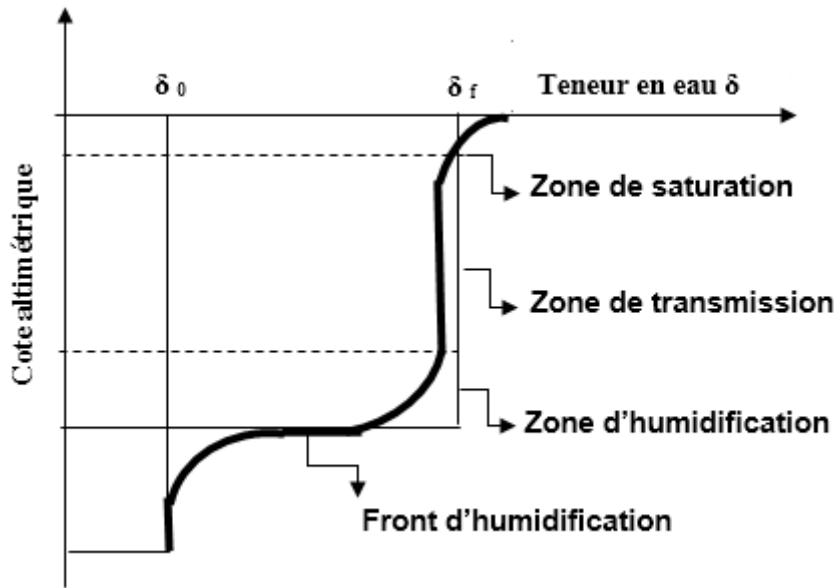
$$\text{Bias} = \frac{\sum_{i=1}^N (I_{\text{Obs}} - I_{\text{Pre}})}{N} \quad \text{Eq. 33}$$

### 4.4 Mesure de la teneur en eau et variation du taux d'infiltration dans le sol

La décroissance de la capacité du sol à recevoir les précipitations durant les évènements pluvieux est interprétée par la répartition de la charge hydraulique et son gradient de pression. Des facteurs incidents rentrent aussi en jeu et renforcent l'augmentation de la résistance du sol contre l'écoulement, tel que les travaux agricoles et l'utilisation des machines lourdes qui changent les caractéristiques de la matrice du sol en influençant les forces de capillarité et d'adsorption.

Le profil d'humidité hydrique (figure 38) est la seule schématisation qui caractérise l'infiltration au niveau des couches verticales du sol où le taux d'infiltration varie considérablement selon le mouvement de la teneur initiale en eau dans le sol (Musy and Soutter 1991). Il est constitué de trois couches superposées :

- Zone de saturation : c'est la partie dans laquelle l'eau occupe tous les pores de la nappe phréatique.
- Zone de transmission : située au-dessus de la zone de saturation et présente la teneur en eau proche à la saturation.
- Zone d'humidification : elle se caractérise par une fonction d'humidité qui décroît avec la profondeur du sol. Le front d'humidification est connu comme la partie sous-jacente qui sépare la zone saturée de la zone non saturée.



**Figure 38 :** Caractéristiques du profil hydrique au cours d'une infiltration avec  $\theta_0$  et  $\theta_f$  sont respectivement la teneur en eau initiale et finale. Inspirée de (Musy and Soutter 1991)

#### 4.4.1 Généralité et notions fondamentales

On désigne par teneur en eau d'un sol  $W$  le pourcentage d'eau liquide présent dans un échantillon de matière (sol ou roche). C'est un paramètre d'état physique, qui permet d'approcher d'autres caractéristiques de consistance d'un tel sol. Elle se calcule par le rapport entre la masse de l'eau ( $M_e$ ) évaporée et la masse sèche ( $M_s$ ) comprise dans le même volume d'eau d'un échantillon (Eq.17).

$$W = \frac{M_e}{M_s} \times 100 \quad \text{Eq. 34}$$

Selon la norme française NF P94-050 élaborée en 1995, et actuellement utilisée pour effectuer des essais en laboratoire, la teneur en eau se mesure par la méthode normalisée à l'étuve chauffée à 105°C. Par convention, cette température peut être baisser à moins de sa valeur standard dans le cas des matériaux plus fragiles, à savoir : certains types d'argile. Une température plus haute risque d'éliminer l'eau piégée et quelques fractions des minéraux argileux.

Malgré l'apparence simple de ces essais, des études en laboratoire ont montré des écarts d'une étude à une autre. Cela semble être causé par l'évolution des incertitudes sensibles lors des essais. Eviter la valeur de l'incertitude est nécessaire pour valider l'application des résultats surtout lorsque l'incertitude affecte la conformité aux limites d'une spécification, ce qui peut être le cas pour l'évaluation des états hydriques.

### 4.4.2 Précaution de l'essai

La principale précaution à prendre en considération c'est de laisser les échantillons refroidir avant de penser à les peser. Il est fortement déconseillé de les mesurer directement chaud à leurs sorties de l'étuve. En effet, les matériaux chauds provoquent une convection d'air consiste à monter l'air chaud en plafond alors que celui froid, à tendance de se descendre après le refroidissement. Le phénomène de convection allège systématiquement l'air contenu dans la matière et perturbe les mesures. C'est pour cette raison que les mesures ont été faites trois fois et les valeurs moyennes ont été prises.

### 4.4.3 Matériel utilisé

Pour déterminer la teneur en eau par la méthode de séchage au four, l'équipement suivant est requis.

- Etuve à séchage.
- Contenants hermétiques non corrodables (pour conserver les échantillons séchés)
- Balance numérique de précision professionnelle (précision de 0,04% de la masse de l'échantillon).
- Dessiccateur.
- Pinces.
- Récipients.

### 4.4.4 Déroulement de l'essai

L'échantillon du sol prélevé doit être en quantité suffisante pour trouver la teneur en eau. Environ (1kg) a été prélevé pour chaque site d'expérience, cette quantité requise dépend des caractéristiques du sol, spécifiquement la taille de ses particules.

La procédure de l'étuve à séchage consiste à suivre les étapes suivantes :

- Nettoyez et séchez les récipients, pesez-les et notez la masse de chaque récipient  $M_1$ . Notez également le numéro de chaque conteneur ainsi que son poids.
- Préparer l'échantillon du sol prélevé en retirant sa couche supérieure pour récupérer le sol humide des couches inférieures.
- Remplissez les conteneurs avec la quantité requise d'échantillon de sol (100g) et pesez chaque conteneur et notez sa masse  $M_2$ .
- Placez les récipients dans l'étuve à sécher, et réglez la température à  $105^{\circ}\text{C}$  et laissez-les sécher pendant 24 heures.
- Après 24 heures, éteignez le four et sortez les récipients à l'aide d'une pince.
- Refroidissez les récipients dans le dessiccateur pendant une heure.
- Ensuite, pesez les conteneurs et notez la masse ( $M_3$ ) de chaque conteneur.

### 4.4.5 Calcul de la teneur en eau

Les données collectées lors des essais sont notées dans des fiches techniques. À partir de ces données, la teneur en eau d'un échantillon de sol donné est calculée par la formule ci-dessous :

$$W = \frac{M_2 - M_3}{M_3 - M_1} \times 100 \quad \text{Eq. 35}$$

Les pourcentages de la teneur en eau des 25 sites d'expérience sont montrés dans le (tableau 25).

Tableau 25 : Calcul de la teneur en eau en pourcentage (%)

N° de site	Date	Masse solide $M_s$ Dans 100 g du sol	Masse de l'eau $M_e$	Teneur en eau $W$ (%)
P1	14/04/19	82,5	17,5	21,21
P2	15/04/19	71,4	28,6	40,06
P3	19/04/19	79	21	26,58
P4	17/04/19	77,5	22,5	29,03
P5	20/04/19	79,5	20,5	25,79
P6	20/04/19	87,1	12,9	14,81
P7	22/04/19	92,1	7,9	8,58
P8	22/04/19	89,2	10,8	12,11
P9	23/04/19	87,9	12,1	13,77
P10	23/04/19	85,6	14,4	16,82
P11	25/04/19	87,1	12,9	14,81
P12	25/04/19	89,2	10,8	12,11
P13	28/04/19	82,8	17,2	20,77
P14	28/04/19	81,3	18,7	23,00
P15	06/05/19	87,8	12,2	13,90
P16	06/05/19	82,5	17,5	21,21
P17	07/05/19	85,7	14,3	16,69
P18	07/05/19	91	9	9,89
P19	09/05/19	83,8	16,2	19,33
P20	09/05/19	83,5	16,5	19,76
P21	11/05/19	80,2	19,8	24,69
P22	11/05/19	87,6	12,4	14,16
P23	12/05/19	77,8	22,2	28,53
P24	12/05/19	85,7	14,3	16,69
P25	13/05/19	88,2	11,8	13,38

### 4.5 Résultats et discussion

Pour satisfaire les paramètres idéaux des solutions empiriques, l'écart entre les valeurs observées et calculées des taux d'infiltration a été établi en définissant le meilleur cas de distribution. Un tel type de modèle n'est pas moins important qu'un autre modèle physique vu qu'il peut effectuer de nombreuses tâches de

précision qui expriment le détail de la solution et sa dépendance vis-à-vis des paramètres.

Compte tenu des graphes obtenus, il a été observé une vitesse d'infiltration initialement rapide, a tendance à se stabiliser après différentes périodes. Cela peut prêter attention à l'influence des propriétés du sol qui étaient dominées par la pierre sablonneuse, le crétacé organique sédimentaire et le calcaire.

L'humidité du sol est une autre raison de la variation des taux d'infiltration, mais malheureusement, la description concise de la relation hydraulique entre les caractéristiques du sol et l'eau infiltrée est difficile à mettre à l'échelle et dépend généralement de l'équation d'infiltration choisie. Dans notre cas, les pourcentages de la teneur en eau initiale ont été déterminés sous des conditions normales avant que les expériences aient lieu.

Comme illustré dans les figures représentant l'infiltration observée et calculée, la teneur en eau initiale pour les sites N° : 2 et 7 a été respectivement observée élevée et faible avec une valeur de 40,06% et 8,58%, a pris différemment presque 0,4h et 3,6h pour saturer le sol (figure 39). C'est en particulier le cas du site N ° 21, a montré un temps plus long peut atteindre plus de 4h grâce à sa teneur en eau relativement importante (égale à 24,69%).

À partir des sites N ° 15, 17, 22, nous pouvons facilement comprendre la différence entre la mise rapide en mouvement de l'eau à travers un sol sableux par rapport à un sol argileux du site N ° 19 qui restreint par ses particules fines la percolation et augmente le temps de l'essai.

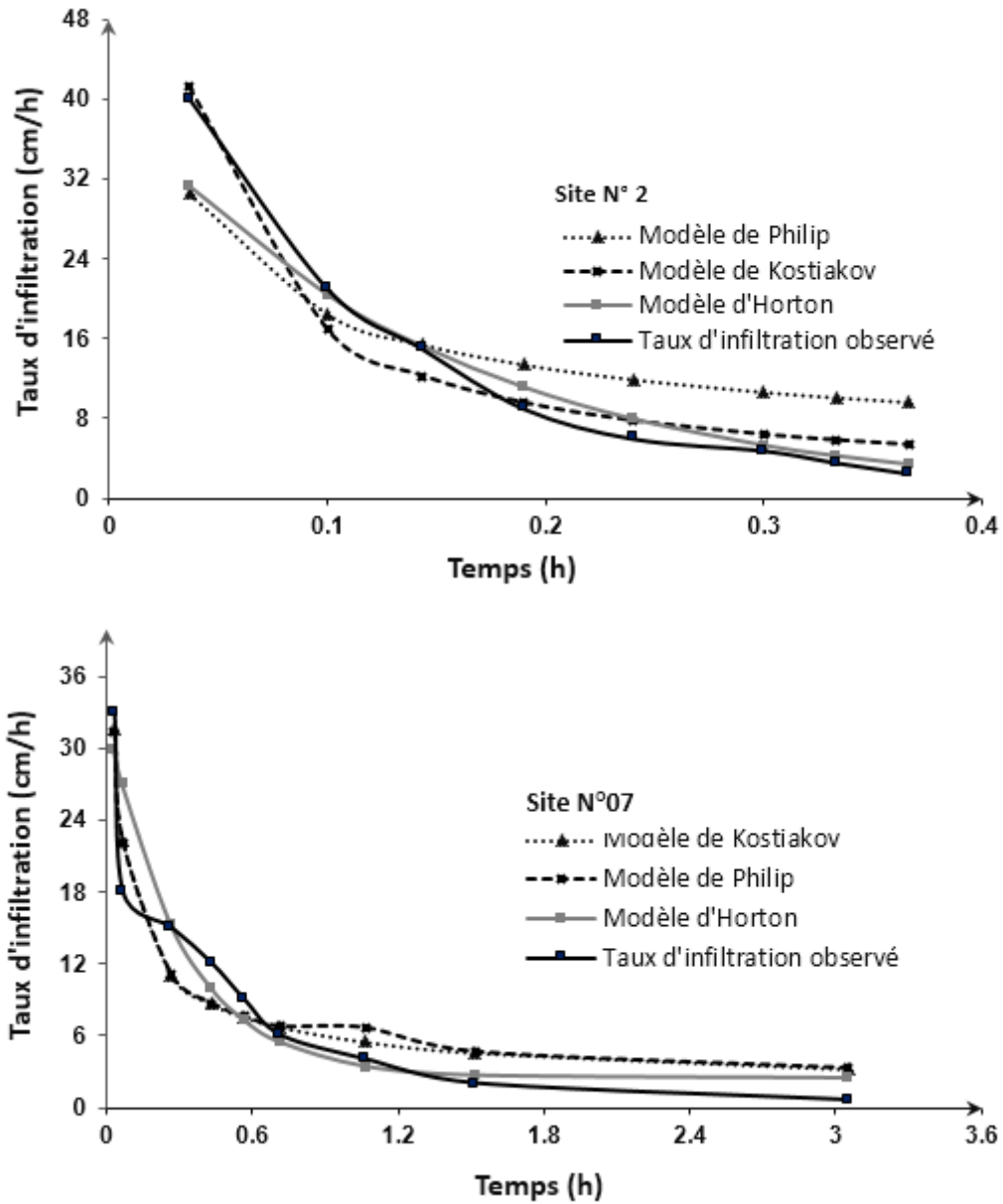


Figure 39 : Intercomparaison des taux d'infiltration observés in situ et estimés de divers modèles pour le bassin versant de Madjez Ressoul

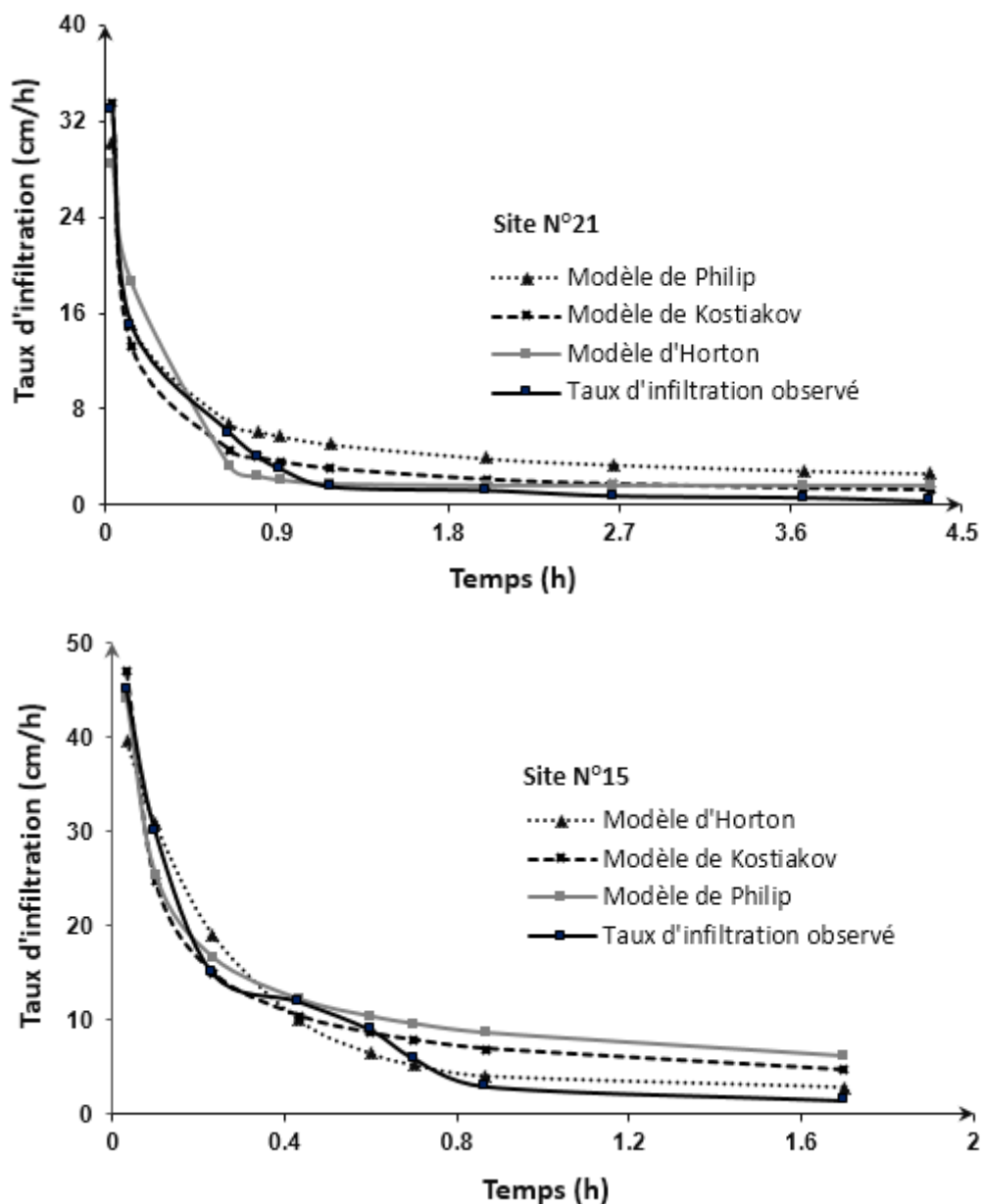


Figure 39 : Intercomparaison des taux d'infiltration observés in situ et estimés de divers modèles pour le bassin versant de Madjez Ressoul

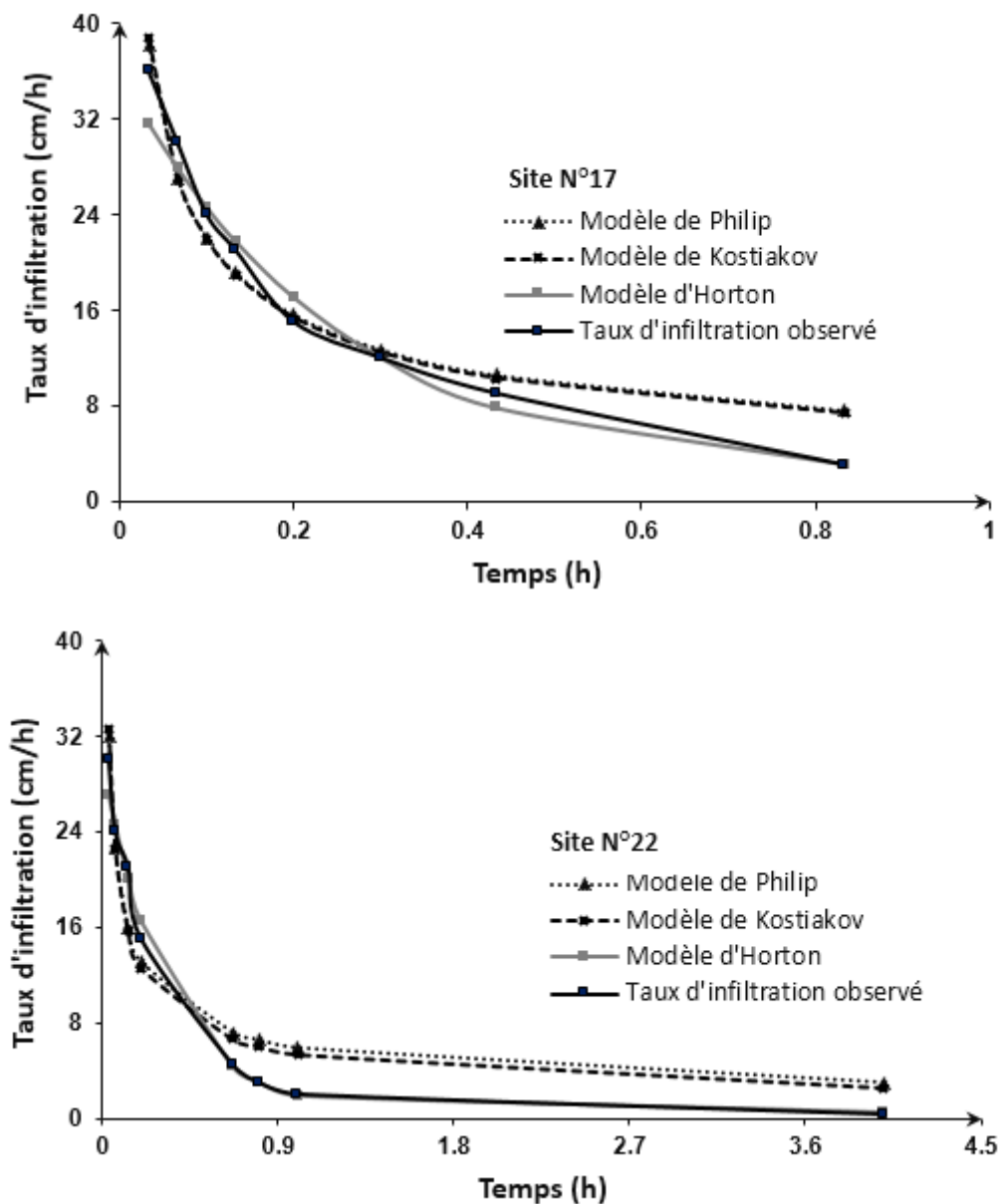
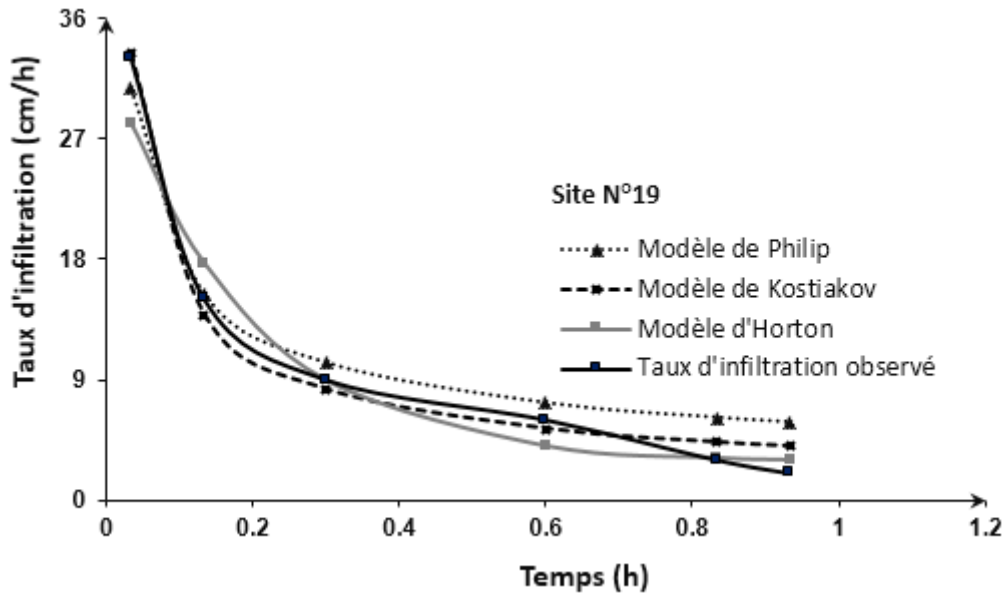


Figure 39 : Intercomparaison des taux d'infiltration observés in situ et estimés de divers modèles pour le bassin versant de Madjez Ressoul



**Figure 39 :** Intercomparaison des taux d'infiltration observés in situ et estimés de divers modèles pour le bassin versant de Madjez Ressoul

La figure (40) illustre la variation des paramètres des trois modèles (Horton, Kostiakov, Philip). Nous avons ainsi conclu que le paramètre B de Kostiakov et K de Philip présentent des caractéristiques similaires à plusieurs endroits de tests. En particulier, pour les sites N°: 4,5,6,7,8,10,13,16 et 17.

D'autre part, les autres paramètres soulèvent une variation remarquable. Cependant, nous rappelons que K est le paramètre unique évalué à partir des données mesurées pour le modèle d'Horton, étant trouvé variable dans une plage de 1,795 à 6,744 ( $h^{-1}$ ) à partir de la pente de  $\ln(f_p - f_c)$  en fonction du temps.

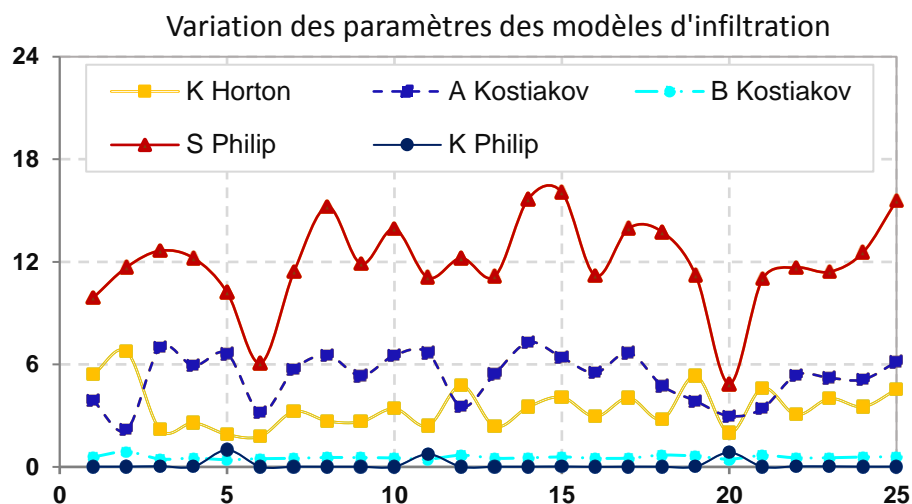


Figure 40 : Variation des paramètres d'infiltration pour le bassin versant de Madjez Ressoul

Les détails des paramètres d'infiltration retenus après le test linéaire et non linéaire ont été résumés dans le (tableau 26).

Le fait que le paramètre A de Kostiakov ait une valeur visuellement élevée, et B soit inférieur à l'unité nous indique un accord avec les résultats de (Mbagwu 1990). Cependant, placer le b entre zéro et un a fait l'objet d'un débat controversé dans la littérature lorsque d'autres chercheurs comme (Gosh 1985) ont confirmé mathématiquement qu'il peut être supérieur à un, dans le cas de l'égalité des deux fonctions de kostiakov et Philip.

Tableau 26 : Paramètres d'infiltration calculés après optimisation

N°	Modèle d'Horton	Modèle de kostiakov		Modèle de Philip	
	K (h <sup>-1</sup> )	A	B	S (cm/h <sup>0.5</sup> )	K <sub>p</sub> (cm/h)
P1	5.403	3.875	0.586	9.893	0.012
P2	6.744	2.174	0.890	11.688	0.014
P3	2.18	6.975	0.462	12.647	0.0379
P4	2.576	5.920	0.514	12.216	0.020
P5	1.897	6.625	0.425	10.211	0.990
P6	1.795	3.182	0.483	6.070	0.012
P7	3.243	5.695	0.503	11.429	0.012

**Tableau 26** : Paramètres d'infiltration calculés après optimisation

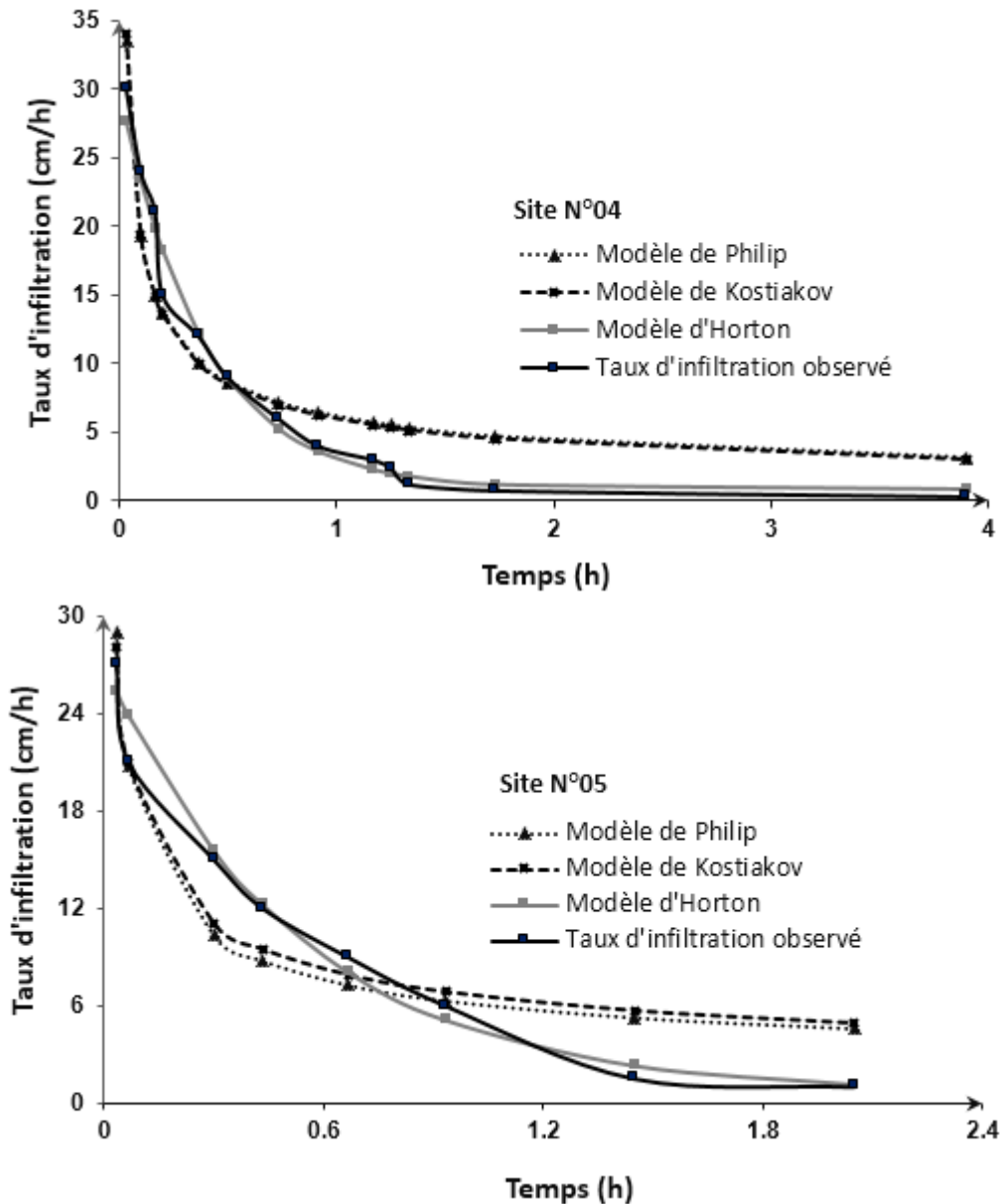
N°	Modèle d'Horton	Modèle de kostiakov		Modèle de Philip	
	K (h <sup>-1</sup> )	A	B	S (cm/h <sup>0.5</sup> )	K <sub>p</sub> (cm/h)
P8	2.682	6.527	0.554	15.218	0.010
P9	2.643	5.334	0.542	11.885	0.010
P10	3.411	6.529	0.524	13.930	0.010
P11	2.402	6.671	0.449	11.077	0.743
P12	4.774	3.529	0.687	12.218	0.010
P13	2.368	5.434	0.510	11.156	0.010
P14	3.504	7.290	0.530	15.682	0.010
P15	4.080	6.403	0.586	16.078	0.020
P16	2.939	5.512	0.506	11.182	0/013
P17	4.037	6.678	0.517	13.960	0.012
P18	2.786	4.747	0.689	13.748	0.010
P19	5.320	3.855	0.634	11.217	0.020
P20	1.987	2.975	0.454	4.854	0.841
P21	4.611	3.420	0.671	11.003	0.010
P22	3.055	5.371	0.531	11.668	0.030
P23	4.000	5.209	0.536	11.414	0.030
P24	3.517	5.110	0.579	12.553	0.012
P25	4.537	6.145	0.593	15.581	0.015

À la (figure 41) nous avons mis en évidence la comparaison du taux d'infiltration calculé par les différents modèles par rapport aux données observées sur terrain. Nous constatons que le taux d'infiltration maximum et minimum varie considérablement dans les plages de (39,64-0,44), (46,98-1,28) et (44,05-1,53) respectivement pour les modèles : d'Horton, Kostiakov et Philip.

D'autre part, les observations des paramètres de Kostiakov dans le tableau précédent montrent qu'une valeur plus élevée de B entraîne principalement une pente plus raide et un taux de déclin plus important. Ceci est déduit dans le même site N° : 12, 15, 21, 24. Par conséquent, le taux d'infiltration finale stable pour le modèle de Kostiakov a été difficilement estimé.

## Chapitre IV : Estimation du taux d'infiltration et choix du modèle adéquat

La sorptivité du sol (physiquement interprétée comme la capacité du sol à absorber l'eau par les forces matricielles dans les premiers stades de l'infiltration lorsque l'effet de la gravité est négligé), a indiqué des valeurs considérablement élevées et comprises entre 4.854-16.078  $\text{cm.h}^{-5}$ , contrairement aux valeurs de  $K_p$  comprises entre 0,01 et 0,99  $\text{cm.h}^{-1}$ .



**Figure 41** : Intercomparaison des taux d'infiltration observés in situ et estimés de divers modèles pour le bassin versant de Madjez Ressoul

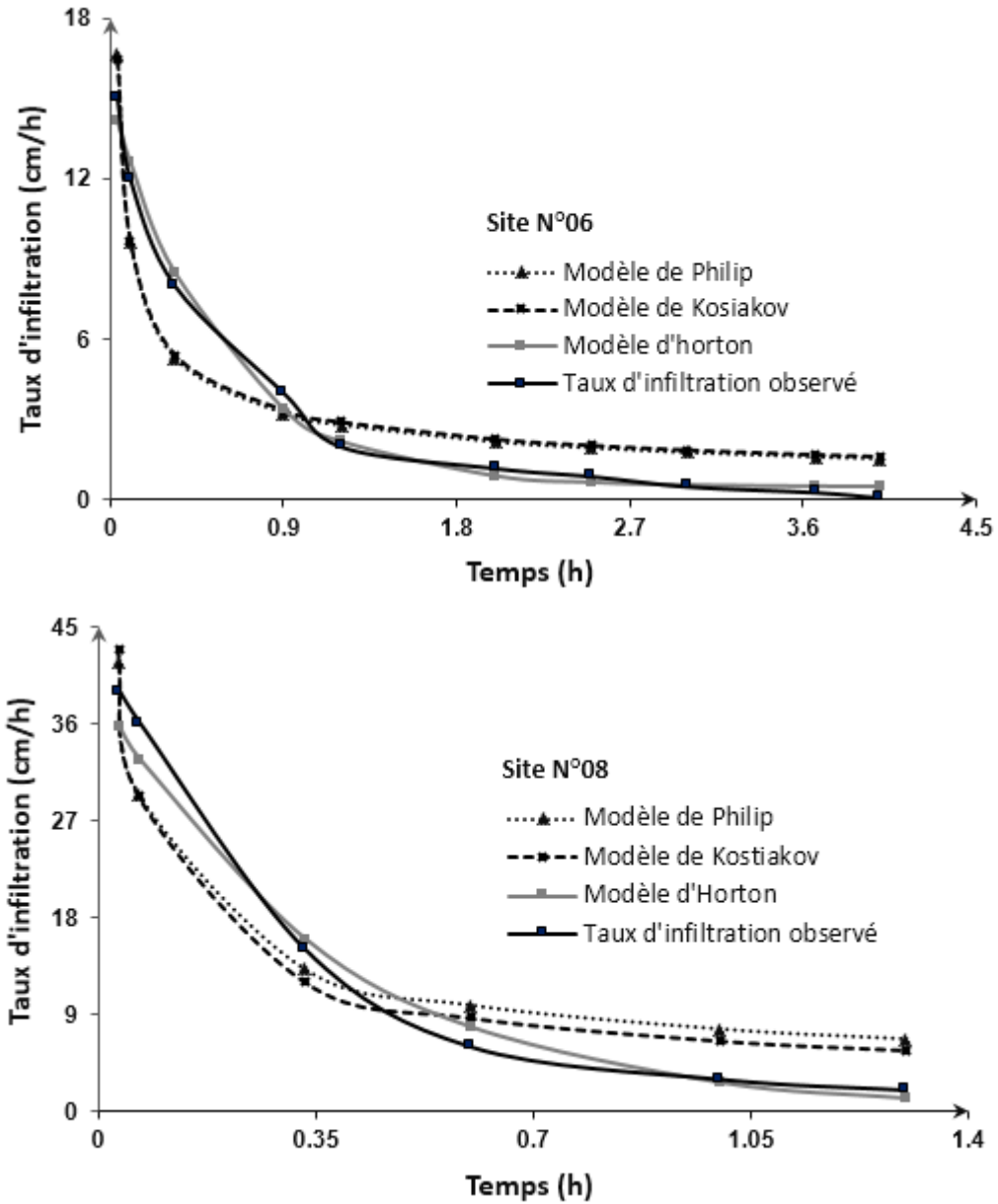


Figure 41 : Intercomparaison des taux d'infiltration observés in situ et estimés de divers modèles pour le bassin versant de Madjez Ressoul

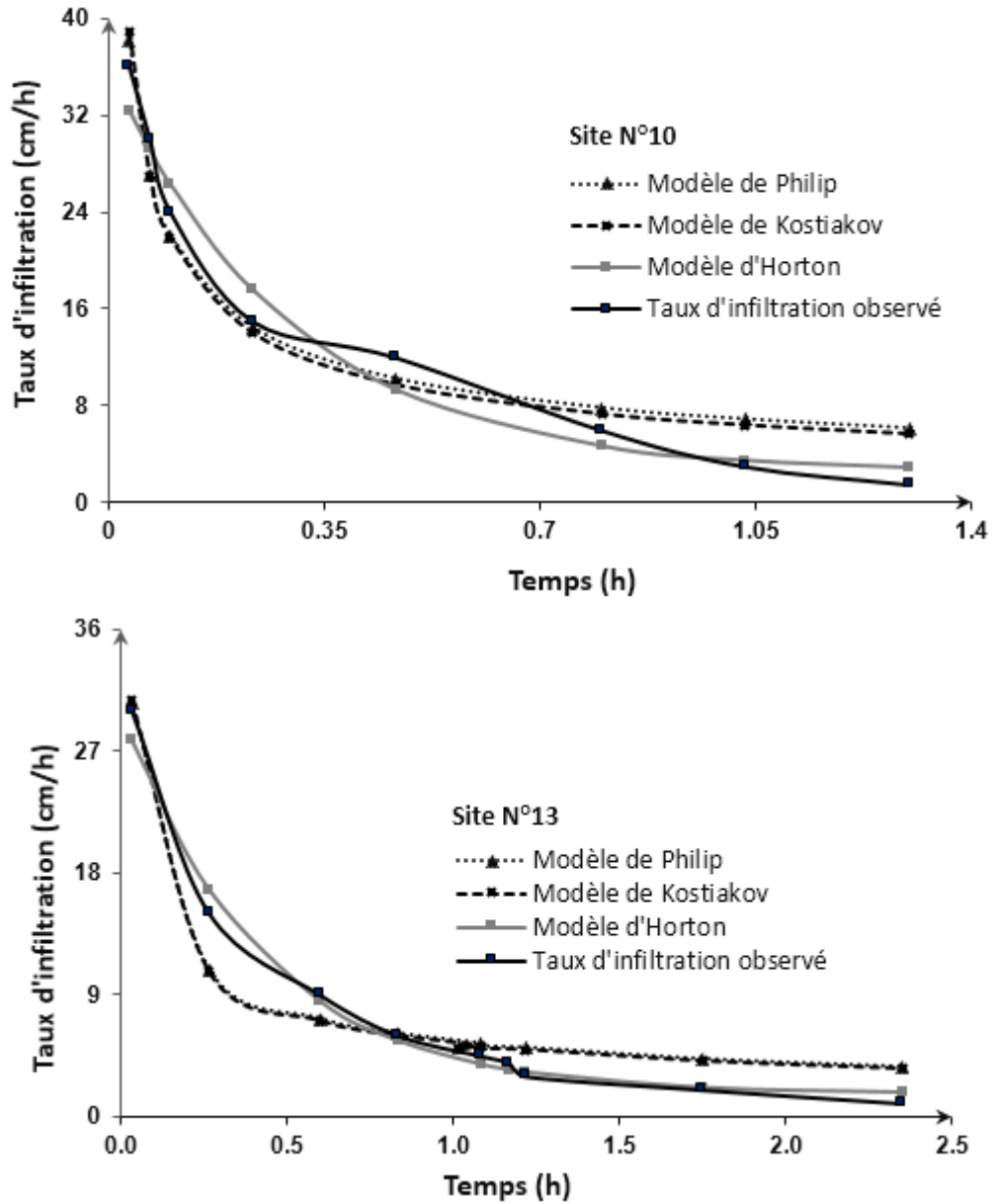


Figure 41 : Intercomparaison des taux d'infiltration observés in situ et estimés de divers modèles pour le bassin versant de Madjez Ressoul

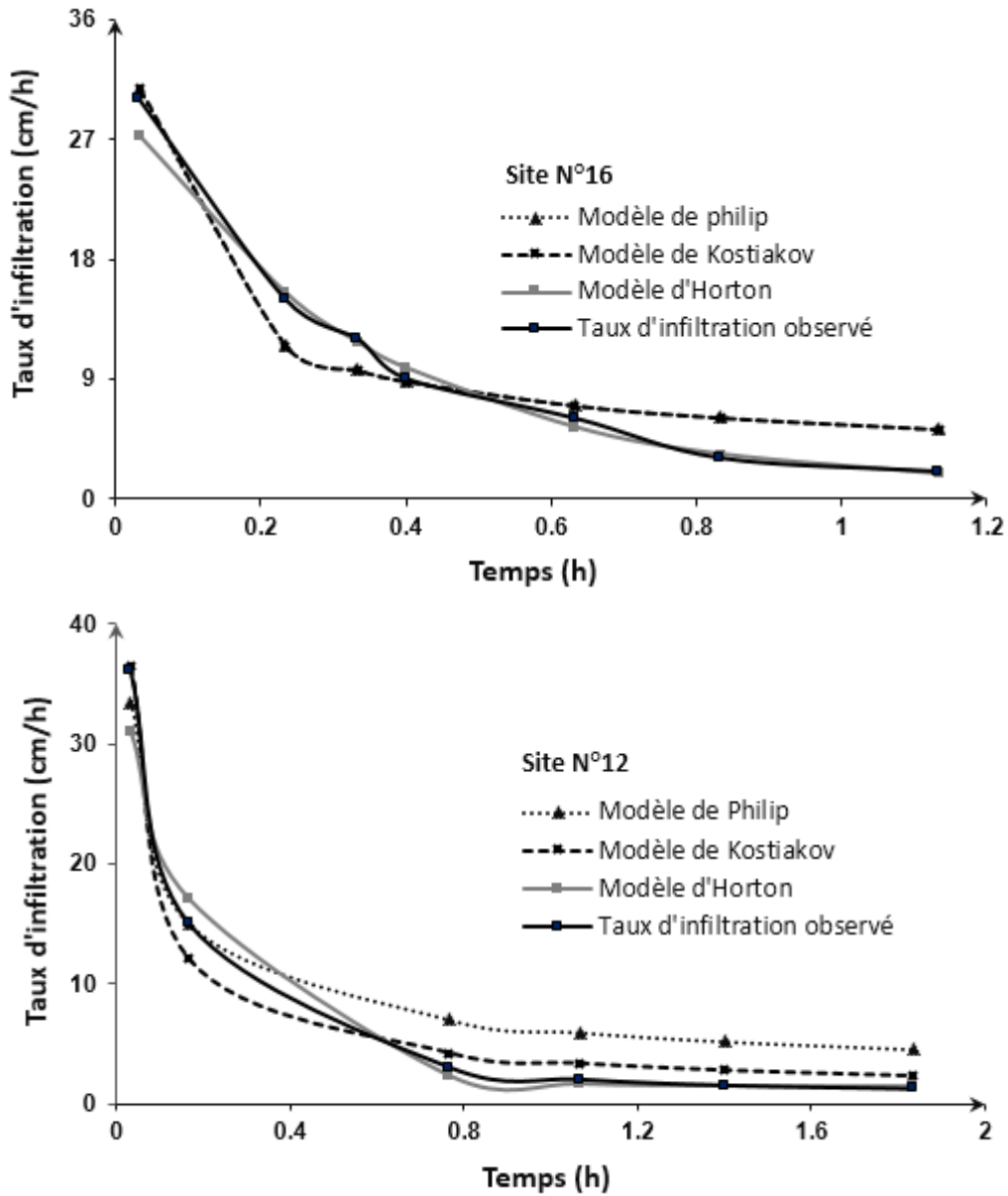


Figure 41 : Intercomparaison des taux d'infiltration observés in situ et estimés de divers modèles pour le bassin versant de Madjez Ressoul

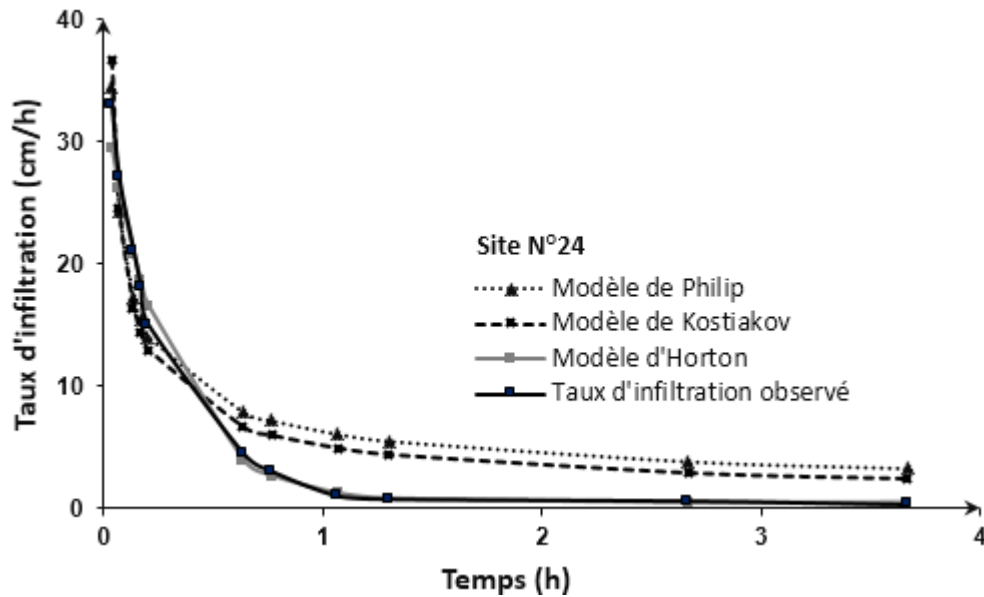


Figure 41 : Intercomparaison des taux d'infiltration observés in situ et estimés de divers modèles pour le bassin versant de Madjez Ressoul

La validation cruciale des modèles d'infiltration basée sur les données expérimentales a fourni des résultats de simulation fiables (figure 42), la crédibilité des paramètres a été ensuite effectuée en fonction de quatre coefficients de validation qui ont été utilisés eux même pour vérifier la représentation des modèles.

Parmi tous les traitements, le modèle d'Horton a donné le meilleur ajustement des taux d'infiltration avec un Nash égal à 0,992 et un coefficient de corrélation égal à 0,998. Les valeurs de l'erreur quadratique et du Biais étaient trouvées faibles et estimées respectivement par 0,457 (cm/h) et -0,418.

Ces résultats montrent clairement une bonne performance du modèle d'Horton, soutenue par son aspect semi-empirique, d'une faible signification physique. Sauf que les paramètres d'Horton obtenus sur site s'apparaissent avec une forte convergence pour les 25 sites. Pour cette raison, leurs optimisations étaient loin d'être applicable avec la méthode des moindres carrés et avec seulement quatre critères de validation, nous avons ainsi élaboré juste une analyse de sensibilité pour approximer les erreurs dans le tracé prédictif.

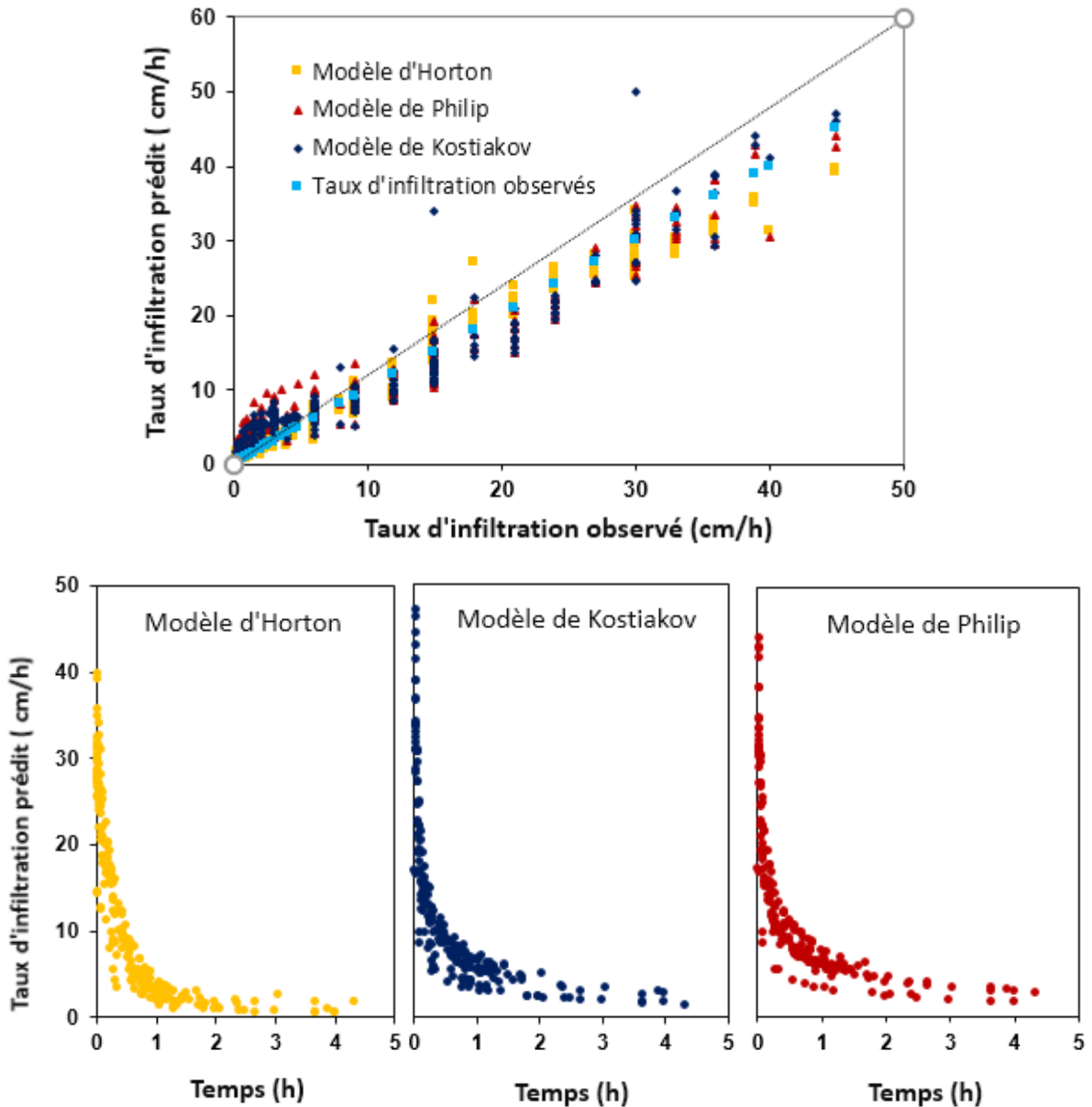


Figure 42 : Taux d'infiltration observés et simulés pour le modèle d'Horton, Kostiakov et Philip

Bien que le modèle d'Horton soit mieux dans la prédiction du taux d'infiltration final, on a observé une bonne performance présentée par le modèle de Kostiakov plutôt que par Philip pour une raison majeure est que les paramètres de Philip sont ajustés en fonction du temps et utilisés pendant toute la période d'estimation. De plus, même si le paramètre  $S$  reflète approximativement la sorptivité du sol, le paramètre  $K_p$  est trouvé par (Philip 1969b; Sir et al. 1988) comme indépendant

étroitement du taux d'infiltration, ce qui justifie sa faible capacité à exprimer avec précision les taux d'infiltration. Ainsi, mesurer ses paramètres expérimentalement est encore mieux que les estimations à partir d'un modèle.

Un travail similaire, en accord avec cette constatation, a été fait par de nombreux auteurs tels que (Zolfaghari et al. 2012) qui ont effectué une comparaison entre les deux modèles, et prouvé l'efficacité de cette méthode dans l'estimation de la profondeur et des taux d'infiltration.

Le plus mauvais accord avec les mesures d'infiltration observées est donné par le modèle de Philip d'où les valeurs moyennes de : Nash = 0,911, CC = 0,970, RMSE = 2,927 (cm /h) et Biais = -0,830 avec une estimation non biaisée du site N° 20.

(Mohamoud 1991; Igboekwe and Adindu 2014) ont déclaré que lorsque le modèle de Philip est dédié au routage des eaux de ruissellement, le modèle de Kostikov est préférable pour optimiser les projets d'irrigation, probablement, car il est moins limité quant à son application d'eau par rapport aux autres modèles.

Les variations des quatre coefficients statistiques pour tous les sites sont illustrées dans les (figures 43, 44, 45 et 46). D'après les coefficients de Nash, CC et RMSE, on observe que les modèles de Kostikov et Philip ont tendance à avoir des valeurs proches. Cependant, pour le biais, il a fourni des corrélations négatives. Les résultats statistiques indiquent des prévisions satisfaisantes car la différence entre les valeurs observées et calculées est due aux erreurs expérimentales, surtout que la variation de la teneur en eau initiale n'a pas été prise en compte par les trois modèles.

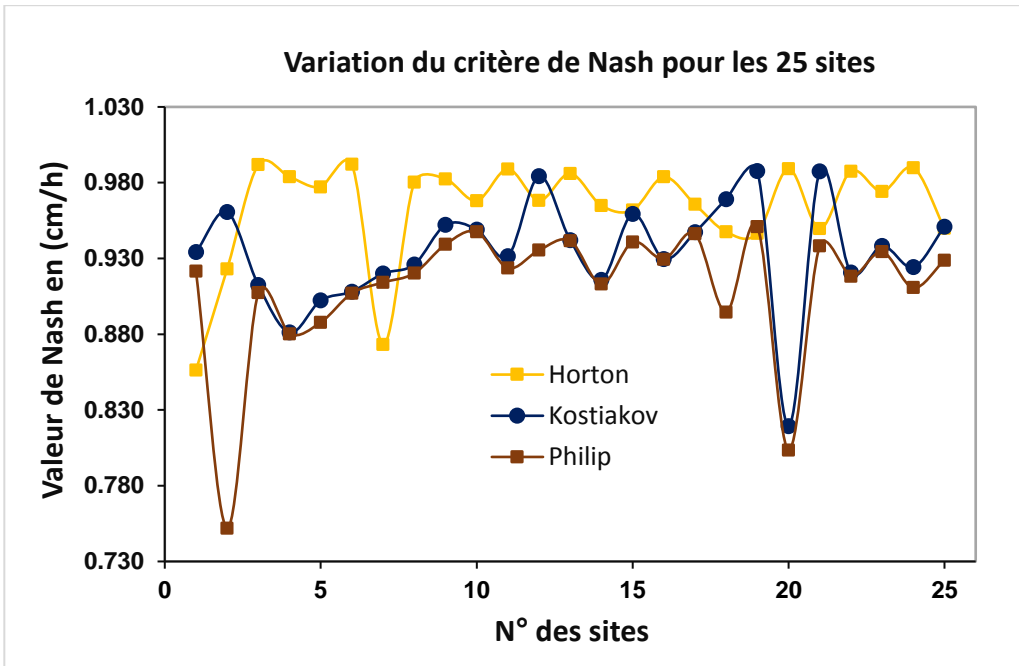


Figure 43 : Variation du coefficient de Nash des 25 sites pour le modèle d'Horton, Kostiakov, et Philip

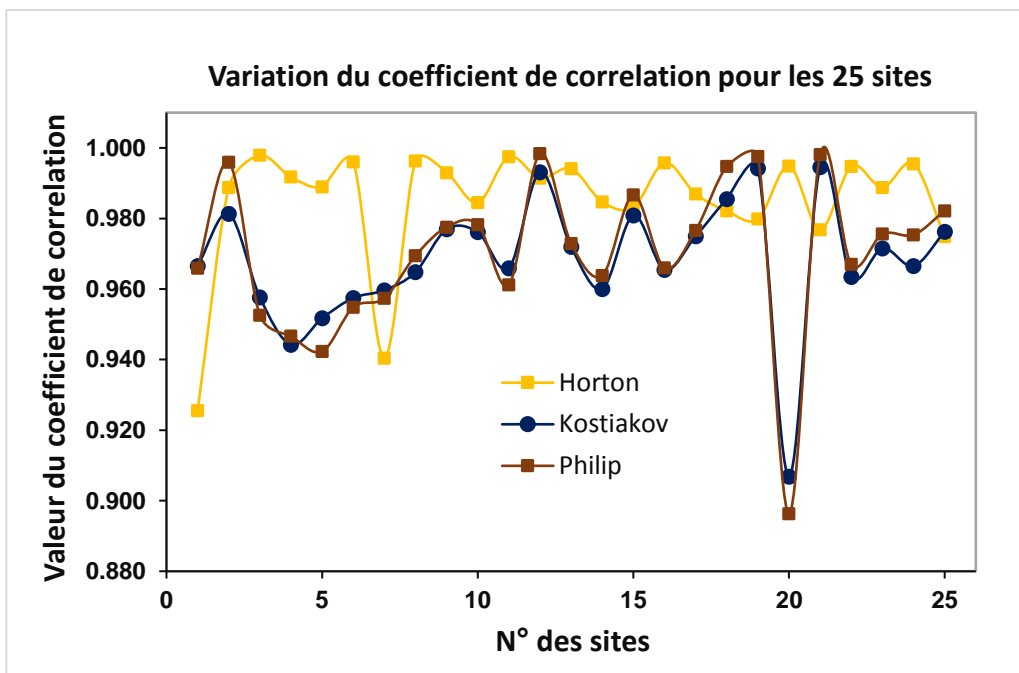


Figure 44 : Variation du coefficient de corrélation des 25 sites pour le modèle d'Horton, Kostiakov, et Philip

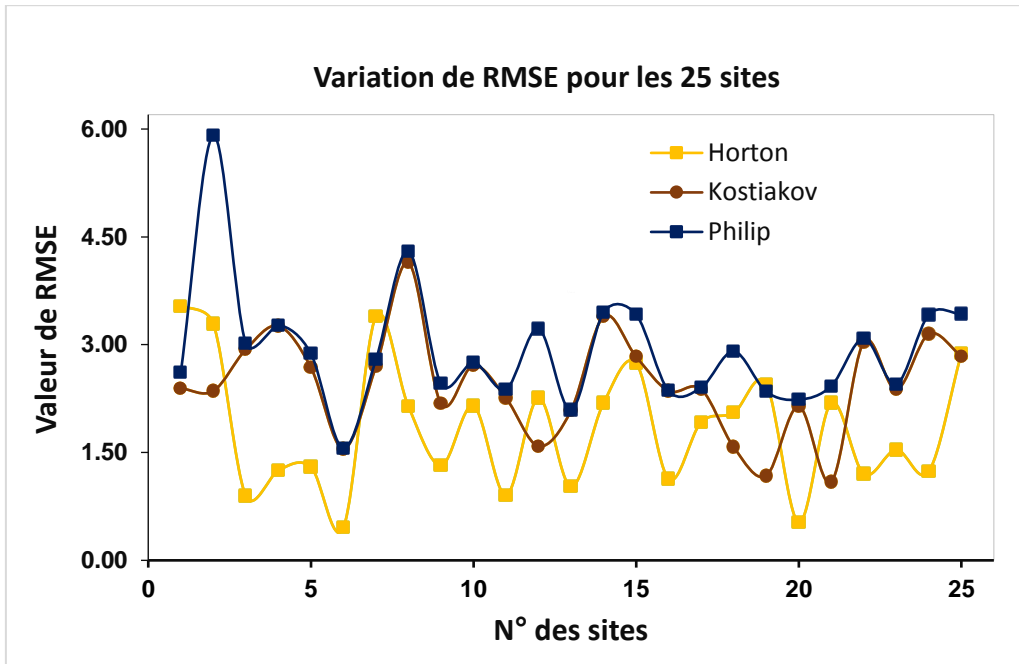


Figure 45 : Variation de l'erreur quadratique des 25 sites pour le modèle d'Horton, Kostiakov, et Philip

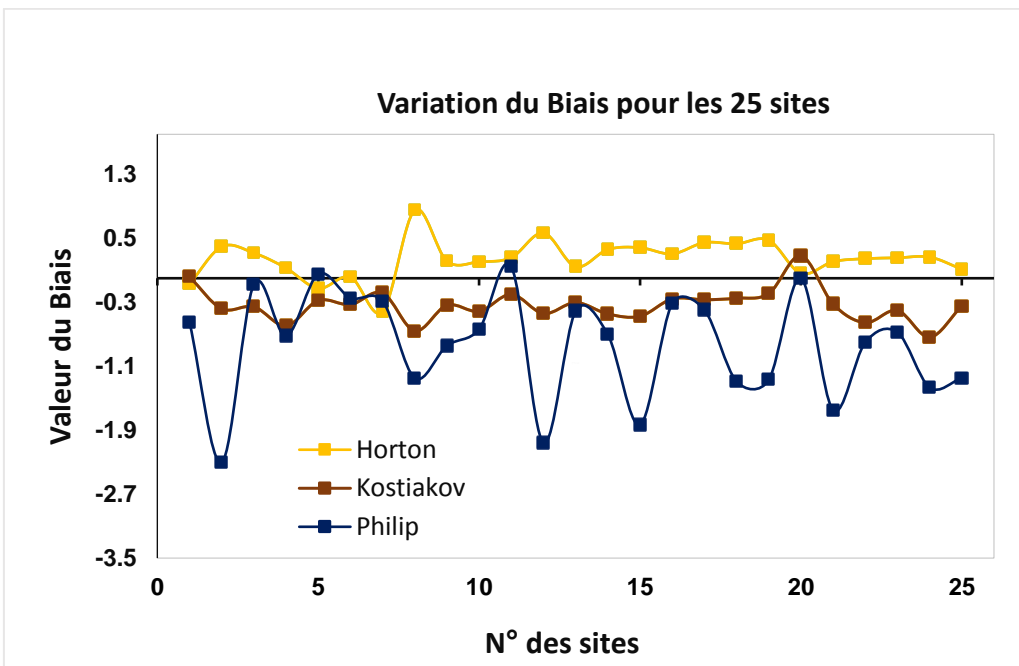


Figure 46 : Variation du Biais des 25 sites pour le modèle d'Horton, Kostiakov, et Philip

## 4.6 Conclusion

Des essais expérimentaux et des mesures en laboratoire ont fait l'objet d'une vue globale de la méthodologie analytique adoptée pour évaluer le taux d'infiltration

de trois modèles (Horton, Kostiakov et Philip) en tenant compte des conditions réelles du sol. Ce travail a été entravé par la disponibilité de l'eau et l'accessibilité à tous les points en raison du relief complexe qui caractérise la zone d'étude.

La sensibilité des paramètres et la précision des prédictions des modèles ont été estimées par des méthodes d'optimisation linéaire et non linéaire, telles que la méthode des moindres carrés et le Solveur d'Excel. La performance qualitative a été réalisée sur la base de quatre coefficients statistiques, y compris l'efficacité de Nash-Sutcliffe, le coefficient de corrélation, l'erreur quadratique moyenne et le biais.

Par rapport aux mesures observées des taux d'infiltration, le modèle d'Horton, et de Kostiakov donnent respectivement le premier et le deuxième meilleur ajustement, en raison de la flexibilité de leurs paramètres avec les taux d'infiltration. Néanmoins, ces résultats suggèrent que le modèle d'Horton est le mieux adapté pour évaluer les taux d'infiltration du bassin versant de Madjez Ressoul.

---

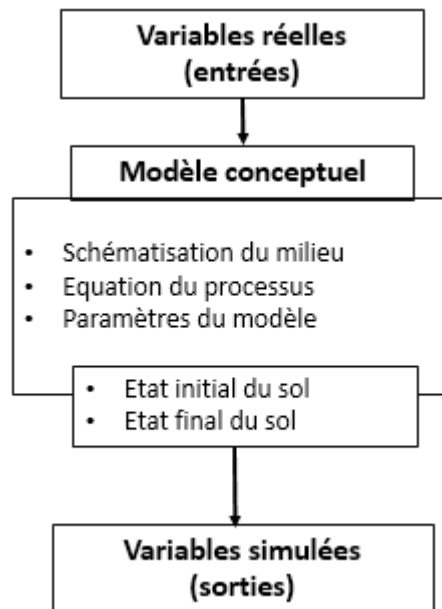
**PLAQUETTE HYDRO-  
INFORMATIQUE DU MODELE  
HYDROLOGIQUE**

# Chapitre V: Plaquette hydro-informatique du modèle hydrologique

## hydrologique

### 5.1 Introduction, but de la modélisation et domaine d'application

La modélisation hydrologique est un outil de simplification définie comme étant la programmation d'un monde réel (présent et passé) pour interpréter un monde futur (figure 47) en considérant : les caractéristiques morphologiques, les variables utilisées, les processus hydrologiques et les conditions aux limites (SCH 1979). Cet outil avec sa solution distincte vise à mieux comprendre le fonctionnement de l'hydrosystème et la dynamique des bassins versants, ce qui amène à résoudre les problèmes de gestion et de prévision des catastrophes naturelles.



**Figure 47 :** Etapes de construction d'un modèle hydrologique

De multiples modèles sont possibles pour simuler le transfert du ruissèlement à l'exutoire, le choix d'une méthode d'estimation dépend de trop nombreux critères, il

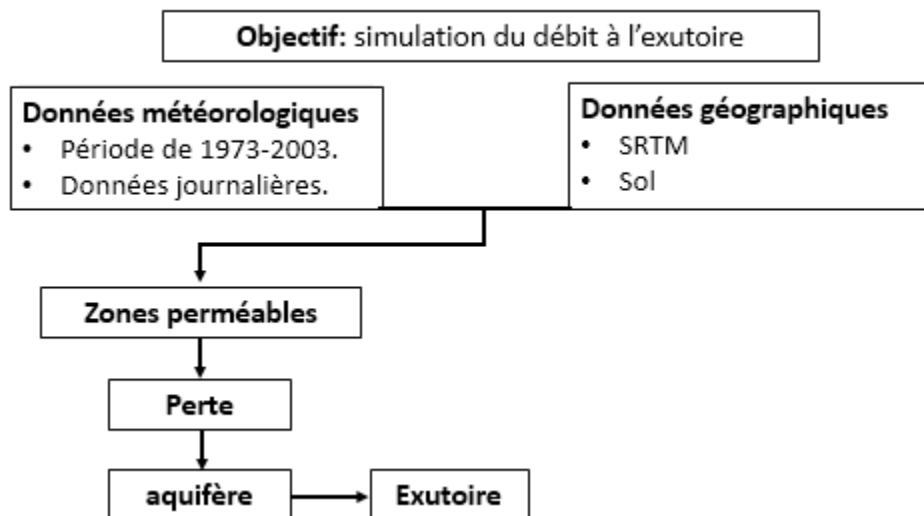
est néanmoins possible de mettre l'accent sur les lignes directrices pour son développement.

Dans ce chapitre nous formulons notre plaquette hydro-informatique qui va servir à la programmation d'un modèle pluie-débit spécifique aux zones rurales, en se basant essentiellement sur le volet de l'amélioration de la simulation continue.

### 5.2 Concept du modèle

Le modèle hydrologique conçu pour le bassin versant de Madjez Ressoul, est capable de simuler l'écoulement Hortonien, ainsi que l'écoulement par saturation du profil de sol. Le module de processus offre ainsi la possibilité de représenter plusieurs couches de sol aux propriétés différentes :

L'influence de l'évapotranspiration sur le sol doit être prise en compte. Les autres processus hydrologiques en fonction de l'occupation des sols, le type du sol et les propriétés hydrauliques ont aussi une importance dans la génération de débit et sont intégrés également avec les connaissances détaillées du SIG (figure 48).



**Figure 48 :** Principe de simulation d'un modèle pluie-débit dédié aux zones rurales

### 5.3 Structure du modèle

L'estimation des paramètres qui fait souvent référence à l'étape de calage des modèles constitue la phase la plus délicate de son développement (Hingray et al. 2009).

Pour être efficace, et en s'appuyant sur nos résultats de l'identification et la caractérisation précise des processus hydrologiques, notre modèle aura donc une structure à deux réservoirs, exécuté normalement sur des valeurs quotidiennes de précipitations et de débits. Les entrées du modèle seront liées aux sorties au moyen d'équations d'infiltration simples, régissent le stock d'eau moyen contenu dans le sol (figure 49).

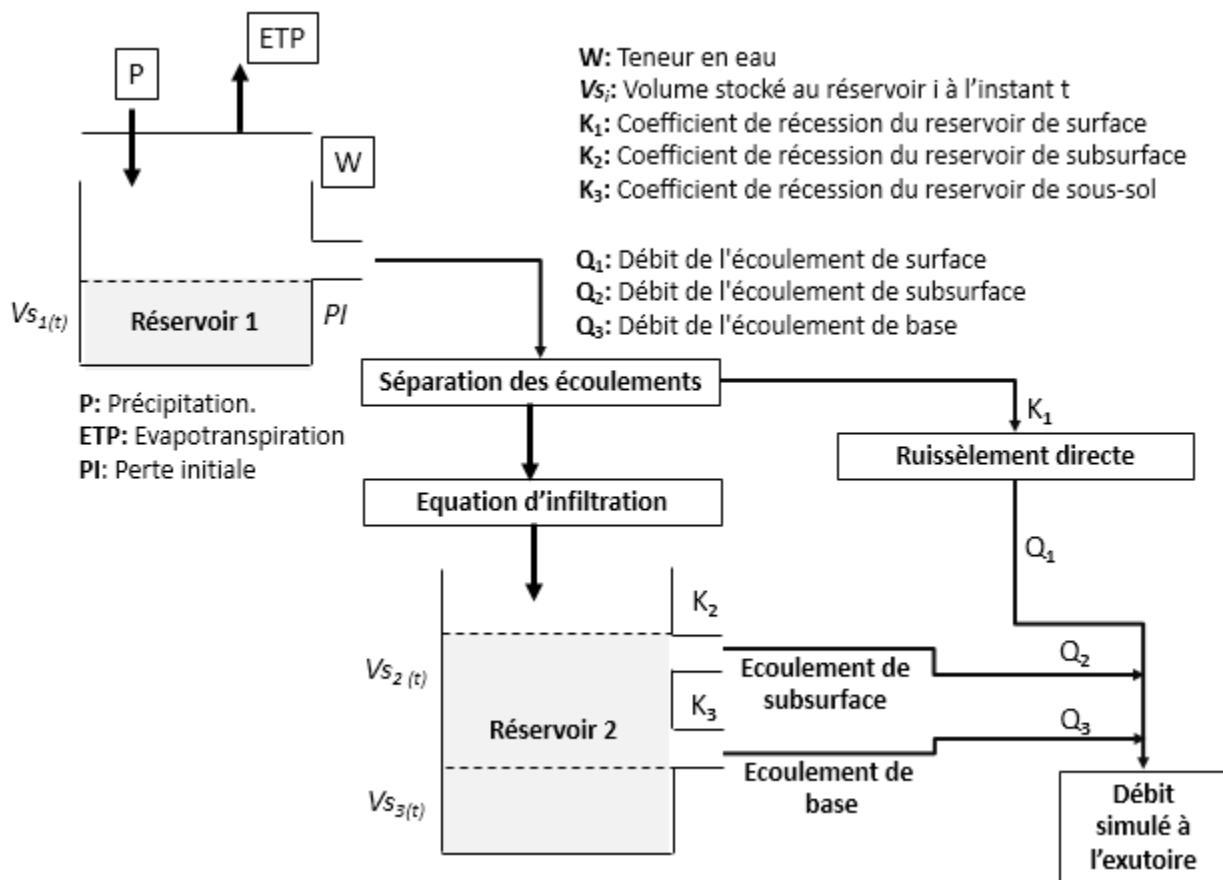


Figure 49 : Schéma structurel du modèle à deux réservoirs

## 5.4 Différentes équations du modèle

Le modèle désiré connecte des équations simplifiées du processus hydrologique physique. L'équation fondamentale utilisée c'est bien celle du bilan hydrique.

$$\frac{dS}{dt} = P - ET - R \pm Q_3 \quad \text{Eq. 36}$$

$dS/dt$  : Variation du stockage dans le réservoir.

La transformation des précipitations en ruissellement, évapotranspiration et eau souterraine passe par la représentation de l'hyétogramme de la pluie nette. Cette notion nécessite généralement une fonction de production qui permet effectivement de déterminer la différence entre la pluie brute et les pertes au ruissèlement (figure 50).

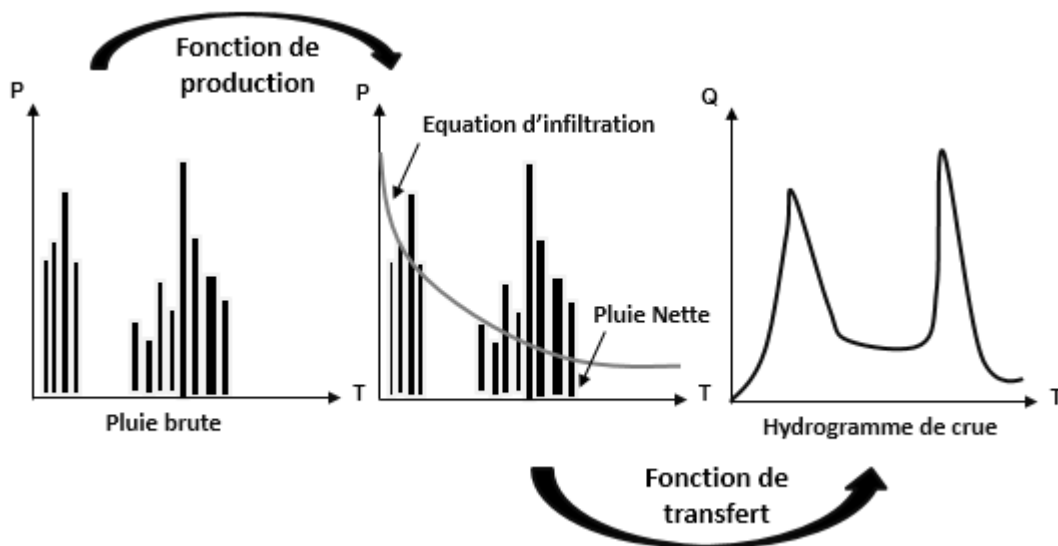


Figure 50 : Processus de transformation de la pluie en ruissèlement

### 5.4.1 Processus d'infiltration

Malgré la variation des modèles d'infiltration dans la littérature, il s'avère encore difficile de les lister d'une manière exhaustive. Certains disent que pour chaque hydrogéologue il y existe un modèle. Cette affirmation semble correcte vu qu'il a été

## Chapitre V : Plaquette hydro-informatique du modèle hydrologique

---

démontré dans cette étude que pour des sols testés sur le terrain, le modèle d'Horton présente les meilleurs résultats par rapport à ceux de Kostikov et Philip.

Il existe d'autres méthodes éprouvées pour intégrer le groupe du sol de chaque unité hydrographique, avec la couverture du sol et les conditions d'humidité initiales, telle que la méthode du Curve Number (CN) basée à la SCS (Soil Conservation Service).

Cette méthode générale est reconnue par son efficacité dans la détermination d'un volume approximatif du ruissèlement pendant un évènement pluvieux. Le CN dépend des groupes du sol classés en fonction de la valeur d'infiltration à saturation, d'où le ruissèlement se calcule par l'équation suivante :

$$V_R = \frac{(V_P - I_a)^2}{(V_P - I_a - S_h)} \quad \text{Eq. 37}$$

$I_a$  : Volume d'eau dans le sol avant le ruissèlement (Infiltration + pluie interceptée par la végétation.  $I_a = 0.2 * S$ ).

Les valeurs du CN pour le bassin versant de Madjez Ressoul (figure 51) sont estimées par l'équation suivante :

$$S_h = \frac{1000}{CN - 10} \quad \text{Eq. 38}$$

Le CN varie de 10 à 100 : les faibles valeurs correspondent à un sol dont la capacité de ruissèlement est faible (tableau 27).

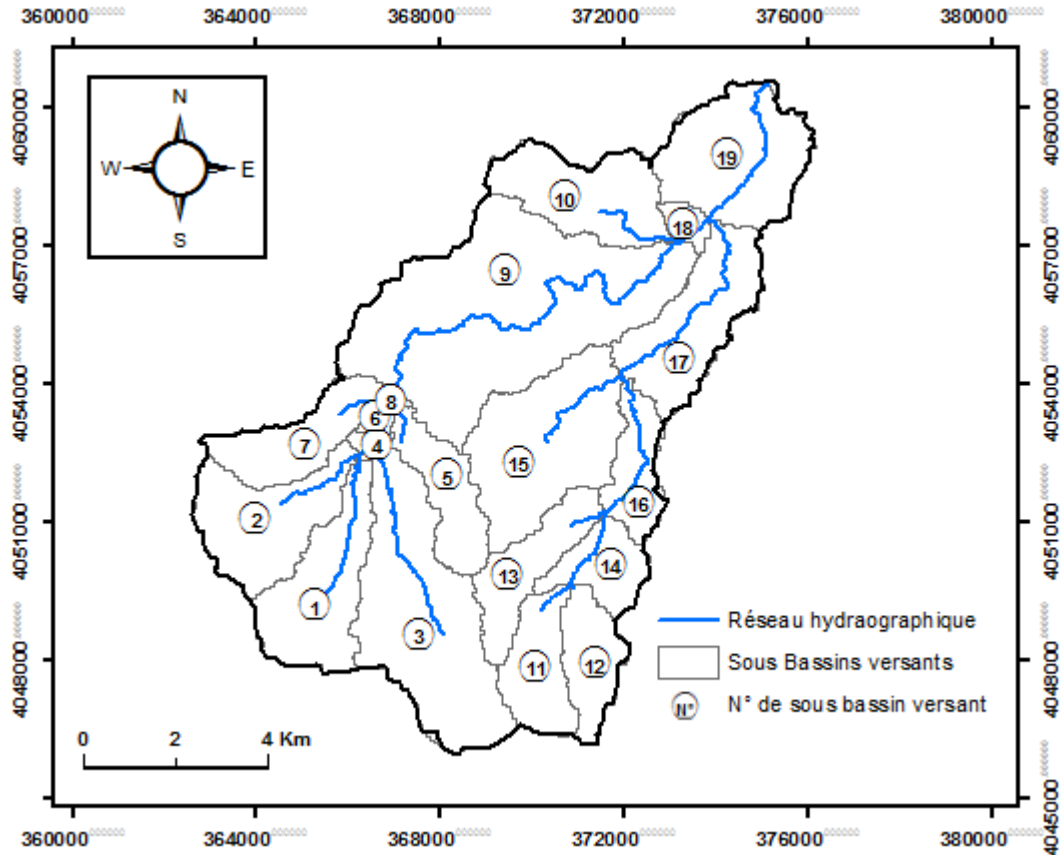


Figure 51: Représentation des sous bassins versants de Madjez Ressoul.

Tableau 27 : Valeurs du Curve Number du bassin versant de Madjez Ressoul

N°	S(km <sup>2</sup> )	Type du sol	CN
1	6.465	96.36% Marno-calcaire	70.919
		3.64% Formation superficielle	
2	6.365	73.31% Marno-calcaire	63.845
		9.31% Formation superficielle	
		17.38% Crétacé supérieur	
3	12.551	15.31% Formation superficielle	65.731
		16.02% Grés argileux-calcaire	
		68.69% Marno-calcaire	
4	0.278	100% Formation superficielle	72.719
5	3.717	14.39% Grés argileux-calcaire	67.530
		74.89% Marno-calcaire	
		10.72% Formation superficielle	
6	0.387	100% Formation superficielle	75.061

**Tableau 27 : Valeurs du Curve Number du bassin versant de Madjez Ressoul**

<b>N°</b>	<b>S(km²)</b>	<b>Type du sol</b>	<b>CN</b>
7	4.375	13.80% Formation superficielle 45.52% Crétacé supérieur 38.01% Conglomérats 2.67% Marne	97.356
8	0.111	99.09% Formation superficielle 0.90% Conglomérats	75.520
9	21.279	17.20% Grés argileux-calcaire 35.67% Grés argilo-schisteux 1.69% Grès Numidien 22.86% Formation superficielle 15.16% Crétacé supérieur 3.93% Conglomérats 3.50% Marne	82.600
10	5.914	34.92% Grés argileux-calcaire 3.06% Grès Numidien 0.96 % Formation superficielle 61.05% Grés argilo-schisteux	82.940
11	3.771	37.69% Marno-calcaire 18.91% Grés argileux-calcaire 43.41% Formation superficielle	70.937
12	3.263	16.43% Marno-calcaire 17.71% Grés argileux-calcaire 65.86% Formation superficielle	73.375
13	4.040	100% Marno-calcaire	62.518
14	2.866	100% Marno-calcaire	65.164
15	9.645	9.95% Crétacé supérieur 5.24% Marne 9.26% Grés argileux-calcaire 5.75% Conglomérats 33.36% Formation superficielle 36.44% Marno-calcaire	70.636
16	3.055	5.80% Crétacé supérieur 56.70% Marno-calcaire 37.50% Formation superficielle	67.125
17	6.700	16.72% Crétacé supérieur 8.70% Marne 14.62% Conglomérats 59.98% Formation superficielle	75.915
18	0.795	31.47% Grés argilo-schisteux 49.87% Formation superficielle 14.96% Conglomérats 3.70% Grès Numidien	74.364

**Tableau 27 :** Valeurs du Curve Number du bassin versant de Madjez Ressoul

N°	S(km <sup>2</sup> )	Type du sol	CN
19	7	67.52% Grès argilo-schisteux 6.23% Grès Numidien 26.25% Formation superficielle	94.104

### 5.4.2 Processus d'évapotranspiration

l'évapotranspiration réelle (ET) est une autre composante des processus hydrologiques les plus difficiles à quantifier, du fait du coût financier trop élevé de ses instruments de mesure, plus la complexité de son système sol-plante-terre (Ndiaye et al. 2017). À cet effet plusieurs formules simples et combinées basées sur : le bilan hydrique, l'aérodynamique, et la température ont été classées, pour la connaissance de l'ETP à l'échelle du bassin versant. Cependant, le choix de la meilleure méthode reste assez difficile spécialement en Algérie, compte tenu de la limite à l'accès des données climatiques. La représentation alternative la plus simple pour la modélisation pluie-débit est estimée par la formule suivante :

$$ET(t) = K_c \times K_s \times ETP(j) \quad \text{Eq. 39}$$

ETP(j) : Évapotranspiration journalière [mm/j].

$K_c$  : Coefficient cultural, fonction du type de culture et de son état végétatif, avec  $0 < K_c \leq 1$ .

### 5.4.3 Pertes initiales

Le stockage dans les dépressions du sol est considéré différemment dans la littérature, en suivant deux approches : la première estime que les dépressions du sol doivent être comblées par l'eau avant qu'il y ait ruissellement. Dans ce cas il s'agit d'établir des valeurs globales obtenues par des observations sur terrains perméables et imperméables. La deuxième hypothèse prend en considération la variation de la taille

des dépressions au fil du temps : d'où les petites dépressions se comblent plus vite que les grandes. Quoique pratiquement, et pour des raisons évidentes de simplicité, l'approche globale soit souvent préférée par les hydrogéologues, deux lois empiriques données par (Mitci 1974): permettent de distinguer la capacité totale de stockage des retenues collinaires et l'infiltration dans le bassin versant de Madjez Ressoul.

$$S_s = S_m(1 - e^{\frac{H}{S_m}}) \quad \text{Eq. 40}$$

$$S_s(t) = S_m(1 - e^{Ns(H(t)-Hf(t))}) \quad \text{Eq. 41}$$

### 5.5 Équation de transfert

La fonction de transfert est utilisée pour représenter les transformations de la forme de l'onde de débit lors de son passage à travers le même bassin versant.

Les opérateurs réalisant la temporisation des pluies pour en restituer du débit tout en conservant le volume sont :

$$V(t) = K \times Q_s(t) \quad \text{Eq. 42}$$

$$\frac{dV(t)}{dt} = Q_e(t) - Q_s(t) \quad \text{Eq. 43}$$

K : Coefficient unique de linéarité de la temporisation. Généralement on l'appelle le temps de réponse des bassins versants (Lag Time). Il est défini comme étant la durée en minutes, comprise entre le centre de gravité de l'hyétogramme d'entrée et celui de l'hydrogramme de sortie.

### 5.6 Débit de base

Les volumes de stockage du modèle  $V_s$  dans les deux réservoirs, et les constantes de récession ont été estimés par la technique de l'analyse des courbes de récession en adaptant trois méthodes populaires. L'intégration de ces paramètres dans le modèle permettra de reproduire au mieux les hydrogrammes observés et calculés.

### 5.7 Synthèse

Après avoir collecté un certain nombre de données essentielles, ce chapitre nous a permis de structurer les principales démarches d'un modèle d'infiltration pour le bassin versant de Madjez Ressoul.

Dans une seconde partie, nous avons accordé une certaine attention à la structure du modèle, en présentant les méthodes/équations à appliquer sorte du cadre que nous avons fixé sans trop détailler le concept physique.

## Conclusions et perspectives

L'objectif principal de cette recherche est de contribuer à la modélisation hydrologique en Algérie par le développement d'un modèle pluie-débit basant sur des données expérimentales et représentatives des processus de genèse d'écoulement au sein d'un bassin versant algérien.

Les travaux développés ici ont abouti au premier lieu à comprendre que l'étude des processus hydrologiques peut s'avérer déterminante, car les volumes d'eau qui s'écoulent dans la rivière du bassin versant peuvent changer de manière considérable et contrôler la lame ruisselée.

La base de données présentée pour le modèle développé englobe une vue générale sur le comportement hydrogéologique et physique du bassin versant de Madjez Ressoul. Ce dernier qui est reconnu par son contexte agricole et géologique perméable avec peu de contribution urbaine présente un milieu idéal pour la modélisation pluie-débit, surtout que les processus hydrologiques sont restés naturels, sans changement urbain, ou illimité Spatio-temporellement.

La structure du modèle est basée sur la conception des périodes de récessions, et de la variation du taux d'infiltration, prédéterminé expérimentalement, en parallèle avec la variation des paramètres antécédentes d'humidité, sur des surfaces perméables. D'après les résultats obtenus, ces surfaces sont schématisées par deux réservoirs, connectées par l'équation d'Horton, et se remplissent par les précipitations, et se vidangent par les processus d'évapotranspiration et d'autres processus.

## Conclusions et perspectives

---

Les présents résultats sont encourageants et peuvent être appliqués dans le calage de n'importe quel modèle pluie-débit, conçu à la prévision des ruissèlements, afin de juger la fiabilité des paramètres obtenus.

Le modèle rural dédié au bassin versant de Madjez Ressoul est encore en phase de développement. La programmation d'un modèle avec les paramètres trouvés permettra le test et la validation des résultats soulignés : des tests/améliorations des paramètres trouvés sur des événements continus sont importantes pour une complète configuration.

Le bassin versant de Madjez Ressoul dans le cadre du projet PRFU-MESRS intitulé : analyse de l'impact potentiel du changement climatique sur les pluies extrêmes, les inondations et les systèmes de drainage urbain, dispose des séries chronologiques passées de (1973-2003). Il serait intéressant d'appliquer le modèle sur le bassin durant cette même période. Cette étude souligne l'importance d'intégrer un maximum de processus hydrologiques à la modélisation pluie-débit sur de longues périodes.

## Références bibliographiques

- Abdelghani B, Mohammed H, Boutkhil M (2018) Hydrological modeling of floods in the Wadi Bechar watershed and evaluation of the climate impact in arid zones (southwest of Algeria). *Applied Water Science* 185 doi:10.1007/s13201-018-0834-3
- Ahn JJ, Kim YM, Yoo K, Park J, Oh KJ (2012) Using GA-Ridge regression to select hydrogeological parameters influencing groundwater pollution vulnerability. *Environmental Monitoring and Assessment* 184:6637–6645 doi:10.1007/s10661-011-2448-1
- Akan AO (1992) Horton infiltration equation revisited. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 118 doi:10.1061/(ASCE)0733-9437
- Akinbile CO (2010) Comparative analysis of infiltration measurements of two irrigated soils in akure, Nigeria. *Advances in Applied Science Research*:49-57
- Aksoy H, Bayazit M, Wittenberg H (2001) Probabilistic approach to modelling of recession curves *Hydrological Sciences Journal* 18:269-285 doi:https://doi.org/10.1080/02626660109492821
- Aksoy H, Unal NE, Pektas AO (2009) Smoothed minima baseflow separation tool for perennial and intermittent streams *Hydrol Process* 10:4467–4476 doi:https://doi.org/10.1002/hyp.7077
- Aksoy H, Wittenberg H (2011) Nonlinear baseflow recession analysis in watersheds with intermittent streamflow *Hydrol Sci* 56(2):226–237 doi:10.1080/02626667.2011.553614
- Ala-aho P et al. (2016) Using stable isotopes to assess surface water source dynamics and hydrological connectivity in a high-latitude wetland and permafrost influenced landscape *Journal of Hydrology* 556:279-293 doi:10.1016/j.jhydrol.2017.11.024
- Anderson SP, Dietrich WE, Montgomery DR, Torres R, Conrad ME, Loague K (1997) Subsurface flow paths in a steep, unchanneled catchment *Water resources research* 33:2637-2653 doi:0.1029/97WR02595
- Archibald JA, Buchanan BP, Fuka DR, Georgakakos CB, Lyon SW, Walter MT (2014) A simple, regionally parameterized model for predicting nonpoint source areas in the northeastern US *Journal of Hydrology: Regional Studies* 1:74-91 doi:https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2014.06.003
- Arnold J, Allen P, Bernhardt G (1993) A comprehensive surface-groundwater flow model. *J Hydrol Hydromech* 142:47-69 doi:10.1016/0022-1694(93)90004-S
- Arnold JG, Allen PM, Muttiah R, Bernhardt G (1994) Automated baseflow separation and recession analysis techniques *Ground water* 2-9:1010-1018 doi:https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1995.tb00046.x
- Aron G (1990) Adaptation of Horton and SCS infiltration equations to complex storms. *J Irrig and Drainage Eng* 118:275-284 doi:10.1061/(ASCE)0733-9437(1992)118:2(275)

## Références bibliographiques

---

- Askari M, Tanaka T, Setiawan BI, Saptomo SK (2008) Infiltration characteristics of tropical soil based on water retention data. *J Japan Soc Hydrol and Water Resour* 21:215 - 227  
doi:10.3178/jjshwr.21.215
- ASTM (2009) D3385-09, Standard Test Method for Infiltration Rate of Soils in Field Using Double-Ring Infiltrometer. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Avellaneda E (1985) Infiltration Through Roadside Swales (1985). Retrospective Theses and Dissertations Retrospective Theses and Dissertations. 4778.
- Azahari SNF, Saian R, Othman M (2017) Forecasting Rainfall Based on Fuzzy Time Series Sliding Window Model. Proceedings of the second international Conference on the Future of ASEAN (ICoFA) 2:143-153 doi:10.1109/ICoICT.2018.8528725
- Azeez NH, West LJ, Bottrell SH (2015) Numerical simulation of spring hydrograph recession curves for evaluating behavior of the East Yorkshire chalk aquifer. Proceedings of the 14th sinkhole conference, National Cave and Karst Research Institute.
- Baahmed D (2015) Bilan hydrique et évaluation des ressources en eau superficielle de la Macta. Université des sciences et de la technologie Mohamed Boudiaf d'Oran
- Back JO et al. (2018) Risk assessment to groundwater of pit latrine rural sanitation policy in developing country settings. *Science of The Total Environment* 613–614:592-610  
doi:10.1016/j.scitotenv.2017.09.071
- Badra AS (2010) Gestion optimisée des ressources en eau d'une nappe côtière : application à la plaine d'Annaba (Nord-est Algérien). 210.
- Bako MD, Hunt DN (1988) Derivation of baseflow recession constant using computer and numerical analysis *Hydrological Sciences* 12:357-369  
doi:https://doi.org/10.1080/02626668809491259
- Bako MD, Owoade A (1988) Field application of a numerical method for the derivation of baseflow recession constant. *Hydrological processes* 6:331-336  
doi:https://doi.org/10.1002/hyp.3360020404
- Bansah S, Quaye-Ballard J, Andam-Akorful S, Bam E, Anornu GK (2019) End-Member selection in two-component isotope-based hydrograph separation. *Open Journal of Modern Hydrology* 02:13 doi:10.4236/ojmh.2019.92003
- Barbosa LC, Souza ZMd, Franco HCJ, Otto R, Rossi Neto J, Garside AL, Carvalho JLN (2018) Soil texture affects root penetration in Oxisols under sugarcane in Brazil *Geoderma Regional* 13:15-25 doi:10.1016/j.geodrs.2018.03.002
- Barlow PM, Cunningham WL, Zhai T, Gray M (2015) U.S. Geological Survey Groundwater Toolbox, A Graphical and Mapping Interface for Analysis of Hydrologic Data (Version 1.0)-User Guide for Estimation of Base Flow, Runoff, and Groundwater Recharge From Streamflow Data *US Geological Survey Techniques and Methods* 3-B10 27  
doi:https://dx.doi.org/10.3133/tm3B10

## Références bibliographiques

---

- Barnes BS (1939) The structure of discharge recession curves Trans Am Geophys Union 20:721–725
- Barthold FK, Turner BL, Elsenbeer H, Zimmermann A (2016) A hydrochemical approach to quantify the role of return flow in a surface flow-dominated catchment. Hydrological processes 31:1018-1033 doi:10.1002/hyp.11083
- Barthold FK, Turner BL, Elsenbeer H, Zimmermann A (2017) A hydrochemical approach to quantify the role of return flow in a surface flow-dominated catchment Hydrological Processes 31:1018-1033 doi:10.1002/hyp.11083
- Bauer SW (1974) A modified horton equation for infiltration during intermittent rainfall. Hydrological Sciences Bulletin 19:219 - 225 doi:10.1080/02626667409493900
- Beasley RS (1976) Contribution of subsurface flow from the upper slopes of Forested watersheds to channel flow. Soil Science Society of America-Journal 40:955-957 doi:10.2136/sssaj1976.03615995004000060039x
- Belaroui A, Haouchine FZ, Haouchine A (2019) Rainfall-runoff modeling: flow characterization of Hammam Melouane Wadi Algeria. Arabian Journal of Geosciences 487:12 doi:10.1007/s12517-019-4610-y
- Berhail S, Ouerdachi L, Boutaghane H (2012) The use of the recession index as indicator for components of flow. Energy Procedia 18:741 – 750 doi:10.1016/j.egypro.2012.05.090
- Berk RA (2016) Statistical learning from a regression perspective. 2 edn. Springer International Publishing. doi:9783319440477
- Beven K (2004) Robert E. Horton's perceptual model of infiltration processes. Hydrological processes 18:3447-3460 doi:10.1002/hyp.5740
- Beven K, Germann P (1982) Macropores and water flow in soils. Water resources research 18:1311-1325 doi:10.1029/WR018i005p01311
- Bhattacharjya Rk (2004) Optimal design of unit hydrographs using probability distribution and genetic algorithms. Sadhana 29:499–508 doi:10.1007/BF02703257
- Biswas A (2019) Joint multifractal analysis for three variables: Characterizing the effect of topography and soil texture on soil water storage Geoderma 334:15-23 doi:10.1016/j.geoderma.2018.07.035
- Blavoux B, Gourcy L, Chery L (2014) L'utilisation des isotopes pour caractériser l'origine des pollutions dans les eaux souterraines. Géologues, Géologues, 2014, pp.9-14. <hal-00948005>:13
- Boers TM, Deurzen FJMPv, Eppink LAAJ, Ruytenberg RE (1992) Comparison of infiltration rates measured with an infiltrometer, a rainulator and a permeameter for erosion research in SE Nigeria. Soil technology 5:13-26 doi:10.1016/0933-3630(92)90003-J

## Références bibliographiques

---

- Bonito MD, Breward N, Crout N, Smith B, Young SD, Zhang H (2018) Extraction and characterization of pore water in contaminated soils. *Environmental Geochemistry (Second Edition)*:195-235 doi:10.1016/B978-0-444-63763-5.00011-2
- Bosch DD, Arnold JG, PGA, Lim K-J, Park YS (2017) Temporal variations in baseflow for the Little River experimental watershed in South Georgia, USA *Journal of Hydrology: regional studies* 12:110-121 doi:https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2017.02.002
- Bouanani R, Baba-Hamed K, Bouanani A (2011) Utilisation d'un modèle global pour la modélisation pluie-débit : cas du bassin d'Oued Sikkak (NW algérien). *Nature & Technologie* 5:61-66
- Bouchaou L, Warner N, Tagma T, Hssaisoune M, Vengosh A (2017) The origin of geothermal waters in Morocco: Multiple isotope tracers for delineating sources of water-rock interactions. *Applied Geochemistry* 84 doi:10.1016/j.apgeochem.2017.07.004
- Boughton JW, Pulay P (1993) Comparison of the boys and pipek-mezey localizations in the local correlation approach and automatic virtual basis selection *Journal of computational chemistry* 14:736-740 doi:10.1002/jcc.540140615
- Bouguerra H (2018) Quantification et modélisation des transports solides, cartographie des zones à risques d'érosion hydrique par utilisation d'un SIG: application aux bassins de Bouhamdane et Ressoul. *Badji Mokhtar Annaba*
- Boulmaiz T (2016) Single neural network and neuro-updating conceptual model for forecasting runoff. *International Journal of Hydrology Science and Technology* 15:344-358 doi:https://doi.org/10.1504/IJHST.2016.079344
- Boussinesq J (1904) Recherches théoriques sur l'écoulement des nappes d'eau infiltrées dans le sol et sur le débit des sources. *Journal de mathématiques pures et appliquées* 5e série, tome 10:5-78 doi:eudml.org/doc/235283
- Brighenti TM, Bonumá NB, Grison F, Mota AdA, Kobiyama M, Chaffe PLB (2019) Two calibration methods for modeling streamflow and suspended sediment with the swat model *Ecological Engineering* 127:103-113 doi:10.1016/j.ecoleng.2018.11.007
- Brodie R, Hostetler S (2005) A review of techniques for analysing baseflow from stream hydrographs *Proceedings of the NZHS – IAH – NZSSS 2005 Conference*, 28 November – 2 December, Auckland, New Zealand 13 doi:53e7/0d6591eb10f468d9c27929fb9945f3f29f00
- Brownlee KA (1965) *Statistical Theory and Methodology in Science and Engineering. Physics Today* 15:63 doi:10.1063/1.3058334
- Brutsaert W (1977) Vertical infiltration in dry soil. *Water resources research* 13:363-368 doi:10.1029/WR013i002p00363
- Brutsaert W, Nieber JL (1977) Regionalized drought flow hydrographs from a mature glaciated plateau *Water resources research* 13:637-643 doi:10.1029/WR013i003p00637

## Références bibliographiques

---

- Buckingham E (1907) Studies on the Movement of Soil Moisture United States. Department of Agriculture. United States. Bureau of Soils, 38.
- Cappus P (1960) Étude des lois de l'écoulement. Application au calcul et à la prévision des débits. Bassin expérimental d'Alrance. La Houille Blanche, No. A. Grenoble, France, 521-529. :493 - 520 doi:10.1051/lhb/1960007
- Carlotto T, Chaffe PLB (2019) Master Recession Curve Parameterization Tool (MRCPtool): Different approaches to recession curve analysis Computers and Geosciences 132:1-8 doi:10.1016/j.cageo.2019.06.016
- Célleri R, Willems P, Feyen J (2010) Evaluation of a data-based hydrological model for simulating the runoff of medium sized Andean basins. Maskana 17:61-78 doi:378.05;si5937
- Cerda A, GarciaFayos P (1997) The influence of slope angle on sediment, water and seed losses on badland landscapes. Geomorphology 18:77-90 doi:10.1016/S0169-555X(96)00019-0
- Chapman T (1999) A comparison of algorithms for stream flow recession and baseflow separation. Hydrological Processes 13:701-714 doi:10.1002/(SICI)1099-1085(19990415)13:5<701::AID-HYP774>3.0.CO;2-2
- Chapman TG (1987) Unit hydrograph identification using only streamflow data. TransInst Eng Aust, CE29 05:187-191
- Chatterjee D, Murali Krishna A (2019) Effect of slope angle on the stability of a slope under rainfall infiltration. Indian Geotechnical Journal 49:708–717 doi:10.1007/s40098-019-00362-w
- Chen B, Krajewski W (2016) Analysing individual recession events: sensitivity of parameter determination to the calculation procedure. Hydrological Sciences 50:2150-3435 doi:https://doi.org/10.1080/02626667.2016.1170940
- Chevallier P, Pouyaud B (1996) L'hydrologie tropicale: géoscience et outil pour le développement : tropical hydrology : a geoscience and a tool for sustainability : mélanges à la mémoire de Jean Rodier : dedicated to the memory of Jean Rodier : actes de la conférence de Paris, 2-4 mai 1995, organisée au Ministère de l ... vol 238.
- Chow VT, Maidment DR, Mays LW (1988) Applied hydrology. McGraw-Hill series in water resources and environmental engineering. 294:572
- Claudio B-L et al. (2018) First use of a compound-specific stable isotope (CSSI) technique to trace sediment transport in upland forest catchments of Chile. Science of The Total Environment 11:618 doi:10.1016/j.scitotenv.2017.09.163
- clerc SI (2004) Revisiter la notion de base des scénarios hydrologiques de référence pour la caractérisation des inondation.,
- Collis-George N (1977) Infiltration equations for simple soil systems. Water Resources Research 13:395-403 doi:10.1029/WR013i002p00395

## Références bibliographiques

---

- Cortes-D DL, Camacho-Tamayo JH, Giraldo R (2018) Spatial prediction of soil infiltration using functional geostatistics AUC Geographica 53:149-155  
doi:10.14712/23361980.2018.15
- Corzo G, Solomatine D (2007) Baseflow separation techniques for modular artificial neural network modelling in flow forecasting. Hydrological Sciences/ Journal des Sciences Hydrologiques 52:491-507 doi: 10.1623/hysj.52.3.491
- Cosandey C (1994) Formation des crues «cévenoles» dans des bassins élémentaires du Mont Lozère.
- Coutagne A (1948) Etude generale des debits et des facteurs qui les conditionnent. 2eme partie: les variations de debit en periode non influencee par les precipitations. Le debit d'infiltration (correlations fluviales internes). La Houille Blanche Meteorologie et hydrologie 5:416-436. doi:10.1051/lhb/1948053
- Cuthbert MO, Taylor RG, Kukuric N (2019) Observed controls on resilience of groundwater to climate variability in sub-Saharan Africa. Nature 572:230-234 doi:10.1038/s41586-019-1441-7
- Darcy HPG (1934) Rapport à monsieur le maire et au conseil municipal, de Dijon, sur les moyens de fournir L'eau nécessaire à cette ville". Douillier, Dijon.102.
- Dierauer JR, Whitfield PH, Allen DM (2017) Assessing the suitability of hydrometric data for trend analysis: The 'FlowScreen' package for R Canadian Water Resources Journal / Revue canadienne des ressources hydriques 07:269-275  
doi:https://doi.org/10.1080/07011784.2017.1290553
- Diskin MH, Nazimov N (1995) Linear reservoir with feedback regulated inlet as a model for the infiltration process. Journal of Hydrology 172:313-330 doi:10.1016/0022-1694(95)02709-X
- Djellouli F, Bouanani A, Baba-hamed K (2015) Caractérisation hydrologique du bassin d'Oued Louza à l'aide d'un modèle pluie-débit global. Larhyss Journal 12:275-286
- Dörfliger N et al. (2010) Guide méthodologique, Les outils de l'hydrogéologie karstique. Avec la collaboration de Ph. Crochet, R. Guerin, N. Jozja, B. Marsaud, P-H. Mondain, Ph. Muet, V. Plagnes; BRGM RP- 58237-FR, 230 pp., 82 ill., 5 ann.
- Dudaniec RY, Rhodes JR, Wilmer JW, Lyons M, Lee KE, McAlpine CA, Carrick FN (2013) Using multilevel models to identify drivers of landscape-genetic structure among management areas Molecular ecology:3752-3765 doi:10.1111/mec.12359
- Dunkerley D (2018) How is overland flow produced under intermittent rain? An analysis using plot-scale rainfall simulation on dryland soils. Journal of Hydrology 556  
doi:10.1016/j.jhydrol.2017.11.003
- Ebrahimiana H, Ghaffaria P, Ghameshloua AN, Tabatabaeib S-H, Dizaj AA (2020) Extensive comparison of various infiltration estimation methods for furrow irrigation under

## Références bibliographiques

---

- different field conditions. *Agricultural Water Management* 213  
doi:10.1016/j.agwat.2019.105960
- Eckhardt K (2005) How to construct recursive digital filters for baseflow separation. *Hydrological processes* 19:507–515 doi:10.1002/hyp.5675
- Eftimi R, Malík P (2019) Assessment of regional flow type and groundwater sensitivity to pollution using hydrograph analyses and hydrochemical data of the Selita and Blue Eye karst springs, Albania *Hydrogeology Journal* 27:2045–2059  
doi:https://doi.org/10.1007/s10040-019-01974-5
- Ehiomogbe P, S oO, ikechuchu-Ede CE, okosa I, orji FN, ahaneku IE (2018) Calibration of existing infiltration models on different amended soils. *American journal of engineering research (AJER)* 7:242-247
- Engelenburg Jv, Hueting R, Rijpkema S, Teuling AJ, Uijlenhoet R, Ludwig F (2017) Impact of Changes in Groundwater Extractions and Climate Change on Groundwater-Dependent Ecosystems in a Complex Hydrogeological Setting. *32:259-272* doi:10.1007/s11269-017-1808-1
- Esen II, Almedeij J (2013) Generalized Horton model for low-intensity rainfall. *Soil science* 178:174-179 doi:10.1097/SS.0b013e318299679f
- Eslamian S (2014) *Handbook of Engineering Hydrology (Three-Volume Set)*. In. Boca Raton: CRC Press,, p 1920. doi:10.1201/b16695
- Esscalaffier T (2003) Etude théorique de la formation des débits de crues à l'échelle du versant, DEA-STE : ENPC-ENGREF-UPVM, 45.
- Fang H, Sun L, Tang Z (2014) Effects of rainfall and slope on runoff, soil erosion and rill development: an experimental study using two loess soils. *Hydrological processes* 29:2649-2658 doi:10.1002/hyp.10392
- Farid HU et al. (2019) Estimation of infiltration models parameters and their comparison to simulate the onsite soil infiltration characteristics. *Agric & Biol Eng* 2 84-91  
doi:10.25165/j.ijabe.20191203.4015
- Filho TBO, Ottoni MV, Oliveira MBd, Macedo JRd (2014) Estimation of field capacity from ring infiltrometer-drainage data. *Revista Brasileira de Ciência Do Solo* 38:1765-1771  
doi:10.1590/s0100-06832014000600011
- Fiorotto V, Caroni E (2013) A new approach to master recession curve analysis. *Hydrological Sciences* 11:966-975 doi:10.1080/02626667.2013.788248
- Fox DM, Bryan RB, Price AG (1997) The influence of slope angle on final infiltration rate for interrill conditions. *Geoderma* 80:181 - 194 doi:10.1016/S0016-7061(97)00075-X
- Fu J et al. (2019) Importance of subsurface fluxes of water, nitrogen and phosphorus from rice paddy fields relative to surface runoff. *Agricultural water management* 213:627-635  
doi:10.1016/j.agwat.2018.11.005

## Références bibliographiques

---

- Gabellani S, Silvestro F, Rudari R, Boni G (2008) General calibration methodology for a combined Horton-SCS infiltration scheme in flash flood modeling. *Natural hazards and earth system sciences* 8:1317–1327 doi:10.5194/nhess-8-1317-2008
- Gao S et al. (2017) Estimating representative background PM<sub>2.5</sub> concentration in heavily polluted areas using baseline separation technique and chemical mass balance model. *Atmospheric Environment* 8:180–187 doi:10.1016/j.atmosenv.2017.11.045
- Gerald c, Dimitri S (2007) Baseflow separation techniques for modular artificial neural network modelling in flow forecasting. *Hydrological Sciences Journal* 52:491-507 doi:10.1623/hysj.52.3.491
- Gilbert.Jaccon (1986) tracé de la courbe de tarage et calcul des débits. l'Université de Californie
- Gnouma R (2006) Aide à la calibration d'un modèle hydrologique distribué au moyen d'une analyse des processus hydrologiques : application au bassin versant de l'Yzeron., INSA de Lyon
- Goldberg DE, Holland JH (1988) Genetic Algorithms and machine learning. *Machine learning* 3:95-99 doi:10.1023/A:1022602019183
- Gonzales AL, Nonner J, Heijkers J, Uhlenbrook S (2009) Comparison of different base flow separation methods in a lowland catchment. *Hydrology and Earth System Sciences* 13:2055–2068 doi:10.5194/hess-13-2055-2009
- Gosh RK (1985) A note on Lewis-Kostiakov's infiltration equation. *Soil Science* 139:193-196
- Green IRA (1986) An explicit solution of the modified Horton equation. *Journal of hydrology* 83:23-27 doi:10.1016/0022-1694(86)90180-0
- Green W, Ampt C (1911) Studies on soil physics, I. Flow of air and water through soils. *Journal of Agricultural Science* 4:1-24 doi:10.1017/S0021859600001441
- Gregor M, Malik P (2012) Construction of master recession curve using genetic algorithms. *Journal of Hydrology and Hydromechanics* 13:3–15 doi: 10.2478/v10098-012-0001-8
- Gremillion P, Gonyeau A, Wanielista M (2000) Application of alternative hydrograph separation models to detect changes in flow paths in a watershed undergoing urban development. 17 doi:10.1002/1099-1085(20000615)14:8<1485::AID-HYP988>3.0.CO;2-1
- Grigorjev V, Iritz L (1991) Dynamic simulation model of vertical infiltration of water in soil. *Journal of Hydrological Sciences* 36:171-179 doi:10.1080/02626669109492497
- Hadour A, Mahé G, Meddi M (2020) Watershed based hydrological evolution under climate change effect: An example from North Western Algeria. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 28 doi:10.1016/j.ejrh.2020.100671
- Hallouz F (2013) Etude des relations pluie-débit via les coefficients d'écoulement et le cumul de déficit du bassin d'oued Mina. *Revue scientifique et technique, LJEE N°21 et 22. Spécial colloque CIREDD'2013.*

## Références bibliographiques

---

- Hammond M, Han D (2006) Recession curve estimation for storm event separations. *Journal of Hydrology* 13:573– 585 doi:10.1016/j.jhydrol.2006.04.027
- Hingray B, Picouet C, Musy A (2009) *Hydrology: a science for engineering*. CRC Press; 1st edition (July 23, 2014).
- Hino M, Odaka Y, Nadaoka K, Sato A (1988) Effect of initial soil moisture content on the vertical infiltration process — A guide to the problem of runoff-ratio and loss. *Journal of Hydrology* 102:267-284 doi:10.1016/0022-1694(88)90102-3
- Holland JH (1975) *Adaptation in natural and artificial systems*. University of michigan press, Ann Arbor. (2nd Edition, MIT Press, 1992.). In.
- Hollis C, Lawrence D, Darmaki FA, Perriere MDd, Foote A, Kostic B (2017) Origin of complex carbonate pore systems and associated reservoir quality variations: an example from the arab formation upper jurassic, onshore United Arab Emirates. doi:10.2118/188739-MS
- Holtan HN (1961) A concept of infiltration estimates in watershed engineering. *Agricultural Research Service, US Department of Agriculture* 41-51:25 doi:ark:/13960/t24b4sw16
- Horton RE (1933) The role of infiltration in the hydrologic cycle. *Eos, Transactions American Geophysical Union* 14:446-460 doi:10.1029/TR014i001p00446
- Horton RE (1939) Analysis of runoff-plat experiments with varying infiltration-capacity. *Eos, Transactions American Geophysical Union* 20:693-711 doi:10.1029/TR020i004p00693
- Horton RE (1941) An approach toward a physical interpretation of infiltration-capacity. *Soil science society of american journal* 5:399-417 doi:10.2136/sssaj1941.036159950005000C0075x
- Huang Q, Rozelle SD, Howitt RE, Wilen JE (2019) *Optimal Allocation of Groundwater Resources: Managing Water Quantity and Quality*, *Natural Resource Management and Policy*, vol 50. Springer, Cham. doi:10.1007/978-3-030-13487-7\_6
- Hugenschmidt C, Ingwersen J, Sangchan W, Sukvanachaikul Y, Duffner A, Uhlenbrook S, Streck T (2014) A three-component hydrograph separation based on geochemical tracers in a tropical mountainous headwater catchment in northern Thailand. *Hydrology and Earth System Sciences* 13:525-537 doi:10.5194/hess-18-525-2014
- Huggins L, Monke E (1966) *The mathematical simulation of the hydrology of small watersheds technical. report No. 1*, purdue water resources research centre, lafayette.
- Huziy O, Sushama L (2017) Impact of lake–river connectivity and interflow on the Canadian RCM simulated regional climate and hydrology for Northeast Canada. *Climate Dynamics*:709–725 doi:10.1007/s00382-016-3104-9
- Ibrahim H, Aburukba RO, El-Fakih K (2018) An integer linear programming model and adaptive genetic algorithm approach to minimize energy consumption of cloud computing data centers. *Computers and electrical engineering* 67 doi:10.1016/j.compeleceng.2018.02.028

## Références bibliographiques

---

- Ichwana R, Sayed M, Zulkifli N, Ashfa A (2018) Hydrograph separation method and baseflow separation using Chapman method – A case study in Peusangan watershed. IOP Conf Series: Earth and Environmental Science 314 doi:10.1088/1755-1315/314/1/012026
- Igboekwe MU, Adindu RU (2014) Use of Kostiaikov's infiltration model on michael okpara university of agriculture, umudike soils, southeastern, nigeria. Water resource and protection 6:1-7 doi:10.4236/jwarp.2014.610083
- Institute of Hydrology (1980) Low Flow Studies. Research Report, Wallingford, Oxon.
- Iorgulescu I, Musy A (1997) Generalization of TOPMODEL for a power law transmissivity profile. Hydrological processes 11 doi:10.1002/(SICI)1099-1085(199707)11:9<1353::AID-HYP585>3.0.CO;2-U
- Iwasaki K, Masanori K, Tani M (2019) Factors affecting dominant peak-flow runoff-generation mechanisms among five neighbouring granitic headwater catchments. Hydrological Processes 13:1-13 doi:10.1002/hyp.13656
- Jafary F, Bradley C (2018) Groundwater Irrigation Management and the Existing Challenges from the Farmers' Perspective in Central Iran. Land 7(15) doi:10.3390/land7010015
- Jain A, Srinivasulu S (2009) Hydrologic model calibration using evolutionary optimisation In: Abraham R.J., see L.M., Solomatine D.P. (eds) Practical hydroinformatics. Water Science and Technology Library 68:291-301 doi:10.1007/978-3-540-79881-1\_21
- Jakeman AJ, Hornberger GM (1993) How much complexity is warranted in a rainfall-runoff model? Water resources research 29:2637-2649 doi:10.1029/93WR00877
- Jakeman AJ, Littlewood IG, Whitehead PG (1990) Computation of the instantaneous unit hydrograph and identifiable component flows with application to two small upland catchments. Journal of hydrology 30: 275-300 doi:10.1016/0022-1694(90)90097-H
- Jason JXB, Yee Yong T, Fu Ee T, Carrie H (2018) A tracer study in a vertical flow constructed wetland treating septage. World Journal of Engineering 15:345-353 doi:10.1108/WJE-09-2017-0306
- Jianbo L, Guangyao G, Shuai W, Lei J, Xing W, Bojie F (2018) The effects of vegetation on runoff and soil loss: multidimensional structure analysis and scale characteristics. Journal of Geographical Sciences 28:59-78 doi:10.5194/hess-13-2055-2009
- Jingwen W, Chiyuan M, Qingyun D, Xiaohui L, Xiaoyan L, Hu L (2019) Dynamics and Attributions of Baseflow in the Semiarid Loess Plateau. JGR Atmospheres 124:3684-3701 doi:10.1029/2018JD029775
- Jiří M, František Š, Marcela Ž, Jan K, Jaromír H (2016) Mechanisms of macro-pores origin in the MDF composites fabrication. Materials Science Forum 851:86-91 doi:10.4028/[www.scientific.net/MSF.851.86](http://www.scientific.net/MSF.851.86)
- Johst M, Casper M, Müller C, Schneider R (2013) Separation of stormflow hydrographs in surface and subsurface flow by perceptual based modelling of channel inflow components. The open hydrology journal 7:1-10 doi:10.2174/1874378120130626001

## Références bibliographiques

---

- Jordan J-p (1992) Identification et modélisation des processus de génération des crues : application au bassin versant de la haute Mentues. Thèse de doctorat. EPFL, Lausanne, 370.
- Junlong Z, Yongqiang Z, Jinxi S, Lei C (2017) Evaluating relative merits of four baseflow separation methods in Eastern Australia
- Kabubi J, Mutua F, Willems P, Mngodo RJ (2005) Low flow analysis using filter generated series for lake victoria basin. Paper presented at the FRIEND/NILE conference 12th to 14th November 2005 in Cairo, Egypt
- Kalhor SA, Ding, K., Zhang, B. et al (2019) Soil infiltration rate of forestland and grassland over different vegetation restoration periods at Loess Plateau in northern hilly areas of China. *Landscape and Ecological Engineering*:15-91 doi:10.1007/s11355-018-0363-0
- Karlsen RH, Bishop K, Grabs T, Ottosson-Löfvenius M, Laudon H, Seibert J (2019) The role of landscape properties, storage and evapotranspiration on variability in streamflow recessions in a boreal catchment. *Journal of hydrology* 570:315-328 doi:10.1016/j.jhydrol.2018.12.065
- Keefe SH, Barber LB, Hubbard LE, Bradley PM, Roth DA, Kolpin DW (2019) Behavior of major and trace elements in a transient surface water/groundwater system following removal of a long-term wastewater treatment facility source. *Science of a total environment* 668:867-880 doi:10.1016/j.scitotenv.2019.02.358
- ketrouci K, Meddi M (2016) Application des modèles Débit-durée-Fréquence QdF pour l'estimation des crues rares en Algérie : Cas du bassin versant de la Tafna. *Bulletin de l'institut scientifique, rabat, section sciences de la terre* 37:45-54
- Kienzle SW (2006) The use of the recession index as an indicator for streamflow recovery after a multi-year drought. *Water Resources Management* 20:991–1006 doi:10.1007/s11269-006-9019-1
- Killian CD, Asquith WH, Barlow JRB, Bent GC, Kress WH, Barlow PM, Schmitz DW (2019) Characterizing groundwater and surface-water interaction using hydrograph-separation techniques and groundwater-level data throughout the Mississippi Delta, USA. *Hydrogeology Journal* 27:2167–2179 doi:10.1007/s10040-019-01981-6
- Kim TB, Yang J-S (2017) Contribution of baseflow during dry spells in irregular channel cross section. *Hydrological processes* 31:1161-1173 doi:10.1002/hyp.11107
- Klaus J, Jackson CR (2018) Interflow is not binary: a continuous shallow perched layer does not imply continuous connectivity. *Water resources research* 54:5921-5932 doi:10.1029/2018WR022920
- Klaus J, McDonnell JJ (2013) Hydrograph separation using stable isotopes: Review and evaluation. *Journal of hydrology* 505:47–64 doi:10.1016/j.jhydrol.2013.09.006
- Koffler D, Laaha G Lfstat Low Flow Analysis in R. In: *Geophysical research abstracts*, Vienna, Austria, April 07–12, 2013.

## Références bibliographiques

---

- Kostiakov AN (1932) On the dynamics of the coefficient of waterpercolation in soils and on the necessity for studying it from a dynamic point of view for purposes of amelioration. Transactions of 6th committee international society of soil science, russia, part A 6:17-21 doi:10011005232
- Larkins C, Turunen K, Mänttari I, Lahaye Y, Hendriksson N, Forsman P, Backnäs S (2018) Characterization of selected conservative and non-conservative isotopes in mine effluent and impacted surface waters: implications for tracer applications at the mine-site scale. Applied Geochemistry 91:1-13 doi:10.1016/j.apgeochem.2018.01.005
- Larsbo M, Koestel J, Jarvis N (2014) Relations between macropore network characteristics and the degree of preferential solute transport. Hydrology and earth system sciences 18:5255–5269 doi:10.5194/hess-18-5255-2014
- Lasisip MO, P BOF, Awe BS (2017) Assessment of infiltration capacity of agricultural soil in ado-ekiti south western nigeria using selected empirical models. IJSET - International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology 4:111-117
- Learidi R (2001) Genetic algorithms in chemometrics and chemistry: a review. Journal of chemometrics 15:559-569 doi:10.1002/cem.651
- Learidi R, Boggia R, Terrile M (1992) Genetic algorithms as a strategy for feature selection. Journal of chemometrics 6:297-281 doi:10.1002/cem.1180060506
- Léonard J, Perrier E, L.Rajot J (2004) Biological macropores effect on runoff and infiltration: a combined experimental and modelling approach. Agriculture, Ecosystems & Environment 104:277-285 doi:10.1016/j.agee.2003.11.015
- Li L, Maier HR, Partington D, Lambert MF (2014) Performance assessment and improvement of recursive digital baseflow filters for catchments with different physical characteristics and hydrological inputs. Environmental modelling and software 54:39-52 doi:10.1016/j.envsoft.2013.12.011
- Li M et al. (2019) The scale effect of double-ring infiltration and soil infiltration zoning in a semi-arid steppe. Water 11:1457 doi:10.3390/w11071457
- Li Y, Shao M (2006) Effects of rainfall intensity on rainfall infiltration and redistribution in soil on Loess slope land. Ying Yong Sheng Tai Xue Bao 17:2271-2276
- Lim KJ et al. (2010) Development of genetic algorithm-based optimization module in WHAT system for hydrograph analysis and model application. Computers and geosciences 36:936-944 doi:10.1016/j.cageo.2010.01.004
- Linsley RK, Kohler MA, Paulhus JLH (1982) Hydrology for Engineers in water resources and Environmental engineering. McGraw-Hill College; Subsequent edition (January 1, 1982).
- Lipiec J, Kuś J, Lipiec J, Artur N (2006) Soil porosity and water infiltration as influenced by tillage methods. Soil and Tillage Research 89:210-220 doi:10.1016/j.still.2005.07.012

## Références bibliographiques

---

- Longobardi A, Villani P, Guida D, Cuomo A (2018) Regression Approaches for Hydrograph Separation: Implications for the Use of Discontinuous Electrical Conductivity Data. *Water* 10(9) doi:10.3390/w10091235
- Louamri A (2013) Le bassin versant de la seybouze (Algérie orientale): hydrologie et aménagement des eaux., Constantine 1, 315.
- Lowery B, Hickey WJ, Arshad MA, La R (1997) Soil water parameters and soil quality. vol 49. *Methods for assessing soil quality.* doi:10.2136/sssaspecpub49.c8
- Lucasius CB, Kateman G (1993) Understanding and using genetic algorithms Part 1. Concepts, properties and context *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems* 19:1-33 doi:10.1016/0169-7439(93)80079-W
- Lugten IW, Íslands V (2013) Application of the program hydroOffice 2010 on river discharge data in Iceland. vol 43. *Icelandic meteorological office.* doi:/library/Skrar/Einstaklingar/Vatnsgaedi/Vatnatilskipunin/iwl\_2013\_01\_Application\_HydroOffice
- Lyne V, Hollick M (1979) Stochastic time-variable rainfall-runoff modelling. *Hydrology and water resources symposium, perth, Australia, september 10-12, 1979, proceedings: perth, Australia, national committee on hydrology and water resources of institution of Engineers, no, 79/10 04:89-93*
- Mahapatra S, Jha MK, Biswal S, Senapati D (2020) Assessing Variability of Infiltration Characteristics and Reliability of Infiltration Models in a Tropical Sub-humid Region of India. *Scientific Reports* 10:1515 doi:10.1038/s41598-020-58333-8
- Maillet E (1905) Essais d'hydraulique souterraine et fluviale. *Nature* 72:25–26 doi:10.1038/072025a0
- Masselink RJH, Heckmann T, Temme AJAM, Anders NS, Gooren HPA, Keesstra SD (2016) A network theory approach for a better understanding of overland flow connectivity. *Hydrological processes* 31:207-220 doi:10.1002/hyp.10993
- Mavimbela SSW, Rensburg LDv (2016) Characterizing infiltration and internal drainage of South African dryland soils. *Earth surface processes and landforms* 12:1-12 doi:10.1002/esp.3991
- Mbagwu JSC (1990) Mulch and tillage effects on water transmission characteristics of an Ultisol and maize grain yield in S.B, Nigeria. *Pedologie* 40:155-168 doi:19911954625
- Mbagwu JSC (1993) Analysis of physical properties controlling steady-state infiltration rates on tropical savannah soils (IC--93/289). *International Atomic Energy Agency (IAEA)* 25:1-11
- Medane K (2012) Hydrologie et modélisation pluie-débit : Cas du bassin versant de l'Oued Boumessaoud (Tafna NW- Algérien). Abou Bekr Belkaid de Tlemcen.

## Références bibliographiques

---

- Mein R, Larson C (1971) Modeling the Infiltration Component of the Rainfall-Runoff Process. Water Resources Research Center, University of Minnesota. Retrieved from the University of Minnesota Digital Conservancy, doi:11299/92134.
- Mein R, Larson C (1973) Modeling infiltration during a steady rain. *Water Resources Research* 9:384-394. doi:10.1029/WR009i002p00384
- Melanie M (1996) An introduction to Genetic Algorithms. vol 158. vol ISBN 0-262-13316-4 (HB), 0-262-63185-7 (PB). MIT Press 55 Hayward St. Cambridge MA United States. doi:/fuzzy/ebook-fuzzy-mitchell
- Menzel L, Burger G (2002) Climate change scenarios and runoff response in the Mulde catchment (Southern Elbe, Germany). *Journal of Hydrology* 267:53-64 doi:10.1016/S0022-1694(02)00139-7
- Messak A (2012) Modélisation pluie-débit des bassins versants de l'Oued Mina : Application du modèle hydrologique HEC-HMS. Université des Sciences et de la Technologies d'Oran Mohamed Boudiaf
- Miller MP, Buto SG, Susong DD, Rumsey CA (2016) The importance of base flow in sustaining surface water flow in the Upper Colorado River Basin. *Water resources research* 16:1-16 doi:10.1002/2015WR017963
- Mishra SK, Tyagi JV, Singh PVP (2003) Comparison of infiltration models. *Hydrological processes* 17:2629-2652 doi:10.1002/hyp.1257
- Mitci C (1974) Sur une nouvelle méthode de calcul des débits d'orage et des hydrogrammes de ruissellement dans les bassins de drainage urbain. *TSM*:59-74
- Mohamoud YM (1991) Evaluating the green and ampt infiltration parameter values for tilled and crusted soils. *Journal of Hydrology* 123:25-38 doi:10.1016/0022-1694(91)90066-Q
- Moneim MA, Moawad A, Attia A-F, Anas EM (2008) A new genetic algorithm approach for water distribution networks optimization. Annual conference of the canadian society for civil engineering 2008: CSCE 2008 annual conference, at canada, volume: proceedings of a meeting held 10-13 June 2008, quebec city, quebec, canada 06:849-855
- Mrad D, Dairi S, Djebbar Y (2014) Rainfall – Rain off Modeling Using Artificial Neural Network. *APCBEE Procedia* 10:251-256 doi:10.1016/j.apcbee.2014.10.048
- Mrad D, Djebbar Y, Hammar Y (2016) Calibrating Conceptual Rainfall Runoff Models using Artificial Intelligence. *Journal of Environmental Science and Technology*:257-267 doi:10.3923/jest.2016.257.267
- Musy A (1998) Hydrologie appliquée. Edition HGA, Bucarest.368p.
- Musy A, Soutter M (1991) Physique du sol. Édit. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, collection "Gérer l'environnement", 335p

## Références bibliographiques

---

- Nathan RJ, McMahon TA (1990) Evaluation of automated techniques for base flow and recession analyses. *Water resources research* 26:1465-1473  
doi:<https://doi.org/10.1029/WR026i007p01465>
- Ndiaye PM, Bodian A, Diop L, Djaman K (2017) Évaluation de vingt méthodes d'estimation de l'évapotranspiration journalière de référence au Burkina Faso. *géographie physique et environnement* 11:129-146 doi:10.4000/physio-geo.5369
- Neris J, Tejedor M, Rodríguez M, Fuentes J, Jiménez C (2013) Effect of forest floor characteristics on water repellency, infiltration, runoff and soil loss in Andisols of Tenerife (Canary Islands, Spain). *Catena* 108:50–57 doi:10.1016/j.catena.2012.04.011
- Niemczynowicz J (1999) Urban hydrology and water management - present and future challenges. *Urban Water* 1:1-14 doi:10.1016/S1462-0758(99)00009-6
- Ninghu S (1995) The unit-hydrograph model for hydrograph separation. *Environment International* 21:509-515 doi:10.1016/0160-4120(95)00050-U
- Nurkholis A et al. (2019) Analysis of master recession curve (MRC) and flood hydrograph components for karstification degree estimation in Kiskendo Cave, Jonggrangan Karst System, Indonesia. *International Conference on Environmental Resources Management in Global Region IOP Conf Series: Earth and Environmental Science* 256 (2019) 012011; 10:1-10 doi:10.1088/1755-1315/256/1/012011
- Nwakpuda NI (2017) Comparative analysis of methods of baseflow separation of Otamiri Catchment. *International journal of scientific and technology research* 06:314-318
- Ogbe VB, Jayeoba OJ, Ode SO Comparison of four soil infiltration models on a sandy soil In lafia, southern Guinea savanna zone of Nigeria. ISSN: 0794-5213. In, 2011. pp 116-126
- Ogunkoya OO, Jenkins A (1993) Analysis of storm hydrograph and flow pathways using a three-component hydrograph separation model. *Journal of hydrology* 142:71-88  
doi:10.1016/0022-1694(93)90005-T
- Okello AMLS, Uhlenbrook S, Jewitt GPW, Masih I, Riddell ES, Zaag PVd (2018) Hydrograph separation using tracers and digital filters to quantify runoff components in a semi-arid meso-scale catchment. *hydrological processes* 46:1334-1350  
doi:<https://doi.org/10.1002/hyp.11491>
- Oku E, Aiyelari A (2011) Predictability of philip and kostiakov infiltration models under inceptisols in the humid forest zone, Nigeria. *Kasetsart Journal - Natural Science* 45:594-602
- Oudin L, Hervieu F, Michel C, Perrin C, Andréassian V, Anctil F, Loumagne C (2005) 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: 290-306.
- Overton D (1964) Mathematical refinement of an infiltration equation for watershed engineering. ARS 41-99, U.S. Department of Agricultural Service, Washington, DC.

## Références bibliographiques

---

- Park YJ, Sudicky EA, Brookfield AE, Jones JP (2011) Hydrologic response of catchments to precipitation: Quantification of mechanical carriers and origins of water. *Water resources research* 47:11 doi:10.1029/2010WR010075
- Patle GT, Sikar TT, Rawat KS, Singh SK (2019) Estimation of infiltration rate from soil properties using regression model for cultivated land. *Geology, Ecology, and Landscapes* 3:1-13 doi:10.1080/24749508.2018.1481633
- Pelletier A, Andreassian V (2019) Hydrograph separation: an impartial parametrization for an imperfect method. *Hydrology and earth system sciences* 26:1-26 doi:10.5194/hess-2019-503
- Pelletier A, Andréassian V (2020) Hydrograph separation: an impartial parametrization for an imperfect method. *Hydrology and earth system sciences* 24:1171–1187 doi:10.5194/hess-24-1171-2020
- Penna D, Meerveld IJV (2019) Spatial variability in the isotopic composition of water in small catchments and its effect on hydrograph separation. *Wires Water* 6 doi:10.1002/wat2.1367
- Philip J (1969a) Theory of infiltration. In *Advances in Hydrosience*, Chow VT (ed.). Academic Press: New York; 215-296 doi:10.1016/B978-1-4831-9936-8.50010-6
- Philip JR (1969b) The theory of infiltration. *Advances in Hydrosience* 5:215-296 doi:10.1016/B978-1-4831-9936-8.50010-6
- Pingping H, Xue S, Zhanbin L (2013) Effect of vegetation cover types on soil infiltration under simulating rainfall. *Nature Environment and Pollution Technology* 12(2):193-198
- Pirastru M, Bagarello V, Iovino M, Marrosu R, Castellini M, Giadrossich F, Niedda M (2017) Subsurface flow and large-scale lateral saturated soil hydraulic conductivity in a Mediterranean hillslope with contrasting land uses. *Journal of Hydrology and Hydromechanics* 65 doi:10.1515/johh-2017-0006
- Posavec K, Bačani A, Nakić Z (2006) A Visual Basic Spreadsheet Macro for Recession Curve Analysis. *Ground Water* 44:764-767 doi:10.1111/j.1745-6584.2006.00226.x
- Posavec K, Giacometti M, Materazzi M, Birk S (2017) Method and excel VBA algorithm for modeling master recession curve using trigonometry approach. *Groundwater* 8:891-898 doi:10.1111/gwat.12549
- Posavec K, Parlov J, Nakić Z (2010) Fully Automated Objective-Based Method for Master Recession Curve Separation. *Groundwater* 48:598-603 doi:10.1111/j.1745-6584.2009.00669.x
- Pradhan NR, loney D (2018) An analysis of the unit hydrograph peaking factor: a case study in goose creek watershed, virginia. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 15:31-48 doi:10.1016/j.ejrh.2017.11.007

## Références bibliographiques

---

- Pressla A, Puchera B, Scharfb B, Langergrabera G (2019) Treatment of de-icing contaminated surface water runoff along an airport runway using in-situ soil enriched with structural filter materials. *Total environment* 07:321-328 doi:10.1016/j.scitotenv.2018.12.440
- Raffensperger JP, Baker AC, Blomquist JD, Hopple JA (2017) Optimal hydrograph separation using a recursive digital filter constrained by chemical mass balance, with application to selected chesapeake bay watersheds: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2017–5034, USGS West Trenton Publishing Service Center, 64 p.
- Rahmana MA, Moserb A, Andersona M, Zhangb C, Rötzerb T, Pauleit S (2019) Comparing the infiltration potentials of soils beneath the canopies of two contrasting urban tree species. *Urban forestry & urban greening* 38:22-32 doi:10.1016/j.ufug.2018.11.002
- Rahmati M, Weihermüller L, Vereecken H (2018) Soil water infiltration global (SWIG) database. PANGAEA doi:10.1594/PANGAEA.885492
- Ramesh VaB, K K and Sharma, K L and Bhattacharyya, T and Wani, S P (2010) Land use and soil management effects on infiltration model parameters in semi-arid tropical alfisols. *Annals of Arid Zone* 49:1-8
- Razzaghi S, Khodaverdiloo H, Dashtakib SG (2016) Effects of long-term wastewater irrigation on soil physical properties and performance of selected infiltration models in a semi-arid region. *Hydrological sciences journal* 61:1778-1790 doi:10.1080/02626667.2015.1051981
- Reshma T, Reddy KV, Pratap D, Agilan V (2018) Parameters optimization using fuzzy rule based multi-objective genetic algorithm for an event based rainfall-runoff model. *Water resources management* 23:1501–1516 doi:10.1007/s11269-017-1884-2
- Richards LA (1931) Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Journal of Applied Physics* 5:318-333 doi:10.1063/1.1745010
- Richter BD, Baumgartner JV, Powell J, Braun DP (1996) A method for assessing hydrologic alteration within ecosystems. *Conservation Biology* 10:163-174 doi:https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.1996.10041163.
- Rizman Žk (2019) Evolution Algorithm for Community Detection in Social Networks Using Node Centrality. In: Bembenik R, Skonieczny Ł, Protaziuk G, Kryszkiewicz M, Rybinski H (eds) *Intelligent Methods and Big Data in Industrial Applications Studies in Big Data* vol 40. Springer, Cham doi:10.1007/978-3-319-77604-0\_6
- Robinson AR, Rohwer C (1957) Measurement of canal seepage. *Transactions of the american society of civil engineers* 122:347-363
- Roche PA, Miquel J, Gaume E (2012) *Hydrologie quantitative: Processus, modèles et aide à la décision*, 1st ed vol 590.
- Rooij Gd (2016) *Subsurface Flow of Water in Soils and Geological Formations*. Oxford Research Encyclopedia of Environmental Science .

## Références bibliographiques

---

- Rouhani H, Malekian A (2013) Automated methods for estimating baseflow from streamflow records in a semi arid watershed. *Desert* 07:203-209 doi:10.22059/jdesert.2013.32036
- Rumynin VG (2011) Subsurface solute transport models and case histories. with applications to radionuclide migration. In. Dordrecht ; New York: Springer. doi:10.1007/978-94-007-1306-2
- Rupp DE, Selker JS (2005) Information, artifacts, and noise in  $dQ/dt$ - Q recession analysis. *Advances in water resources* 07:1-7 doi:10.1016/j.advwatres.2005.03.019
- Rutledge At (1998) Computer programs for describing the recession of ground-water discharge and for estimating mean ground-water recharge and discharge from streamflow records—Update, U.S. Geological survey, Reston, Virginia, 52p.
- Rutledge AT (2013) Use of groundwater levels with the PULSE analytical model. *Ground Water* 09:789-797 doi:10.1111/gwat.12131
- Sadeghioon AM, Metje N, Chapman D, Anthony C (2018) Water pipeline failure detection using distributed relative pressure and temperature measurements and anomaly detection algorithms. *Urban water journal* 15:287-295 doi:10.1080/1573062X.2018.1424213
- Sajikumar N, Remya RS (2014) Impact of land cover and land use change on runoff characteristics. *Journal of environmental management* 161:460-468 doi:10.1016/j.jenvman.2014.12.041
- Sajjadi S-A-H, Mirzaei M, Nasab AF, Sarkardeh H (2016) Effect of soil physical properties on infiltration rate. *Geomechanics and engineering* 10:727-736 doi:10.12989/gae.2016.10.6.727
- Sakaa B, Boulghobra N, Chaffai H, Hani A, Djabri L (2015) Application of GR2M for Rainfall-Runoff Modeling in Kébir Rhumel Watershed, North East of Algeria. *World applied sciences journal* 33 doi:10.5829/idosi.wasj.2015.33.10.367
- Sanford WE, Nelms DL, Pope JP, Selnick DL (2012) Quantifying components of the hydrologic cycle in Virginia using chemical hydrograph separation and multiple regression analysis. vol 76. U.S. Geological Survey, Reston, Virginia. doi:10.3133/sir20115198
- Sasal MC, Léonard J, Andriulo A, Boizard H (2017) A contribution to understanding the origin of platy structure in silty soils under no tillage. *Soil and tillage research* 1:42-48 doi:10.1016/j.still.2016.08.017
- SCH (1979) Schlesinger, S, Terminology for model credibility. *Simulation* 32:103-104 doi:10.1177/003754977903200304
- Schilling KE, Jones CS (2019) Hydrograph separation of subsurface tile discharge. *Environmental monitoring and assessment*:191-231 doi:10.1007/s10661-019-7377-4
- Schmit L, Maire G, Humbert J. (2001) La puissance fluviale : définition, intérêt et limites pour une typologie hydro-géomorphologique de rivières. *Zeitschrift für Geomorphologie* 45:201-224

## Références bibliographiques

---

- Schoener G, Stone MC (2019) Impact of antecedent soil moisture on runoff from a semiarid catchment. *Journal of Hydrology* 569:627-636 doi:10.1016/j.jhydrol.2018.12.025
- SCS (1956, 1971) *Hydrology*. National Engineering Handbook, Supplement A, Section 4, Chapter 10. Soil Conservation Service, USDA, Washington, DC
- Şen Z, Oztopal A (2001) Genetic algorithms for the classification and prediction of precipitation occurrence. *Hydrological Sciences journal* 46:2:2150-3435 doi:10.1080/02626660109492820
- Shaffer RE, Small GW (1996) Genetic algorithms for the optimization of piecewise linear discriminants. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems* 35:87-104 doi:10.1016/S0169-7439(96)00014-7
- Sihag P, Singh B (2018) Field evaluation of infiltration models. *Technogenic and ecological safety* 11:1-11 doi:10.5281/zenodo.1239447
- Sihag P, Tiwari NK, Ranjan S (2017) Estimation and intercomparison of infiltration models. *Water science & technology* 31:34-43 doi:10.1016/j.wsj.2017.03.001
- Sihag P, Tiwari NK, Ranjan S (2020) Support vector regression-based modeling of cumulative infiltration of sandy soil. *ISH journal of hydraulic engineering* 26:44-50 doi:10.1080/09715010.2018.1439776
- Singh B, Sihag P, Singh K (2018) Comparison of infiltration models in NIT Kurukshetra campus. *Applied water science* 8:63 doi:10.1007/s13201-018-0708-8
- Singh KP (1968) Some factors affecting baseflow. *Water resources research* 4(5):985-999
- Singh P, Huebl H, Weinmeister HW (2000) Use of the recession characteristics of snowmelt hydrographs in the assessment of snow water storage in a basin. *Hydrological processes* 14:91-101 doi:10.1002/(SICI)1099-1085(200001)14:1<91::AID-HYP912>3.0.CO;2-E
- Singh VP, Yu FX (1990) Derivation of infiltration equation using systems approach *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 116:837-858 doi:10.1061/(ASCE)0733-9437(1990)116:6(837)
- Sir M, Kutilek M, Kuraz V, Krejca M, Kubik F (1988) Field estimation of the soil hydraulic characteristics. *Soil Technology* 1:63-75 doi:10.1016/S0933-3630(88)80006-0
- Skhakhfa ID, Ouerdachi L (2016) Hydrological modelling of wadi ressoul watershed, Algeria, by HEC-HMS model. *Journal of Water and Land Development* 10:139-147 doi:10.1515/jwld-2016-0045
- Sklash MG, Farvolden RN (1979) The role of groundwater in storm event. *Developments in water science* 12:45-65 doi:10.1016/S0167-5648(09)70009-7
- Slotoand RA, Crouse MY (1996) A computer program for streamflow hydrograph separation and analysis: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations report 1996-4040, 46 p. doi:10.3133/wri964040

## Références bibliographiques

---

- Smail As, Bouheraoua A, Abdesselam M (2013) Caractérisation hydrodynamique des sols de la haute vallée de l'oued Sébaou (Algérie): étude expérimentale, numérique et analytique. *Physico-Géo* 7:261-283 doi:10.4000/physio-geo.3613
- Smakhtin VU (2001) Low flow hydrology: a review. *Journal of hydrology* 240:147-186 doi:10.1016/S0022-1694(00)00340-1
- Smith R (1972) The infiltration envelope: results from a theoretical infiltrometer. *Journal of hydrology* 17:1-21 doi:10.1016/0022-1694(72)90063-7
- Smith R, Parlange J-Y (1978) A parameter-efficient hydrologic infiltration model. *Water resources research* 14:533-538 doi:10.1029/WR014i003p00533
- Stewart MK (2014) New baseflow separation and recession analysis approaches for streamflow. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions* 11:7089-7131 doi:10.5194/hessd-11-7089-2014
- Stewart MK (2015) Promising new baseflow separation and recession analysis methods applied to streamflow at Glendhu catchment, New Zealand. *Hydrology and earth system sciences* 17:2587–2603 doi:10.5194/hess-19-2587-2015
- Subramanya K (1994) *Engineering hydrology*. Tata McGraw-Hill Publishing, Company Limited, New Delhi, India, Vol 392
- Sujono J, Shikasho S, Hiramatsu K (2004) A comparison of techniques for hydrograph recession analysis. *Hydrological processes* 18:403-413 doi:10.1002/hyp.1247
- Suryoputro N, Suhardjono, Soetopo W, Suhartanto ES, Limantara LM (2018) Evaluation of infiltration models for mineral soils with different land uses in the tropics. *KJournal of water and land development* 37:153–160 doi:10.2478/jwld-2018-0034
- Tallaksen LM (1995) A review of baseflow recession analysis. *Journal of hydrology* 165:349-370 doi:10.1016/0022-1694(94)02540-R
- Tan SBK, A.M.ASCE EY-ML, Shuy EB, Chua LHC, Lim WH (2009) Hydrograph separation and development of empirical relationships using single-parameter digital filters. *Journal of hydrologic engineering* 14:271-279 doi:10.1061/(asce)1084-0699
- Tanyimboh TT, Czajkowska A (2018) Self-adaptive solution-space reduction algorithm for multi-objective evolutionary design optimization of water distribution networks. *Water resources management* 32:3337–3352 doi:10.1007/s11269-018-1994-5
- Thibault M (2005) *Quels modèles pluie-débit globaux au pas de temps horaire? Développements empiriques et comparaison de modèles sur un large échantillon de bassins versants.*, l'Ecole nationale du génie rural, des eaux et forêts centre de : paris
- Tian L, Li H, Li F, Li X, Du X, Ye X (2018) Identification of key influence factors and an empirical formula for spring snowmelt-runoff: A case study in mid-temperate zone of northeast China. *Scientific Reports* 8 doi:10.1038/s41598-018-35282-x

## Références bibliographiques

---

- Tikhamarine Y, Souag-Gamane D, Kisi O (2019) A new intelligent method for monthly streamflow prediction: hybrid wavelet support vector regression based on grey wolf optimizer (WSVR–GWO). *Arabian journal of geosciences* 12:540 doi:10.1007/s12517-019-4697-1
- Touazi M, Laborde JP (2017) Modélisation pluie-débit à l'échelle annuelle en Algérie du nord. *Revue des sciences de l'eau* 17: 503–516 doi:10.7202/705546ar
- Tsai YJ, Yeh H-f (2019) Effect of variations in rainfall intensity and different return period rainfall events on unsaturated slope stability. *Journal of taiwan agricultural engineering* 65:34-50 doi:10.29974/JTAE.201906\_65(2).0004
- Turbak AS, Morel-Seytoux HJ (1988) Analytical solution for surface irrigation. 1: Constant infiltration rate. *Journal of irrigation and drainage engineering* 114:31-47 doi:10.1061/(ASCE)0733-9437
- Turner SWD, Galelli S (2016) Water supply sensitivity to climate change: An R package for implementing reservoir storage analysis in global and regional impact studies. *Environmental modelling and software* 07:13-19 doi:10.1016/j.envsoft.2015.11.007
- Utin UE, Oguike PC (2018) Evaluation of philip's and kostiakov's infiltration models on soils derived from three parent materials in akwa Ibom state, Nigeria. *The journal of scientific and engineering research* 5:79-87
- vand AS, Sihag P, Singh B (2018) Comparative evaluation of infiltration models. *KSCE journal of civil engineering* 22:4173-4184 doi:10.1007/s12205-018-1347-1
- Vasconcelos VV (2016) What maintains the waters flowing in our rivers? *Applied water science* 7:1579–1593 doi:10.1007/s13201-015-0373-0
- Verma SC (1982) Modified Horton's infiltration equation. *Journal of hydrology* 58 383-388 doi:10.1016/0022-1694(82)90047-6
- Verschuren JP (1973) *Handbook on the principles of Hydrology*, edited by D. M. Gray, Canadian National Committee for the International Hydrological Decade, Ottawa, Canada vol 691. .
- Vieux BE (2004) Infiltration Modeling. In: *Distributed Hydrologic Modeling Using GIS*. Water Science and Technology Library. In, vol 48. Springer, Dordrecht, pp 91-113. doi:10.1007/1-4020-2460-6\_5
- Vogel RM (1992) Regional geohydrologic-geomorphic relationships for the estimation of low-flow statistics. *Water resources research* 28:2451-2458 doi:10.1029/92WR01007
- Voutchkova DD, Miller SN, Gerow KG (2019) Parameter sensitivity of automated baseflow separation for snowmelt dominated watersheds and new filtering procedure for determining end of snowmelt period *Hydrological processes* 33:876-888 doi:10.1002/hyp.13369

## Références bibliographiques

---

- Wang L, Freyberg Jv, Meerveld Iv, Seibert J, Kirchner JW (2019) What is the best time to take stream isotope samples for event-based model calibration? *Journal of hydrology* 577:1-14 doi:10.1016/j.jhydrol.2019.123950
- Wang Y, Zhang B, Banwart S (2017) Reduced subsurface lateral flow in agroforestry system is balanced by increased water retention capacity: Rainfall simulation and model validation. *Advances in agronomy* 142:73-97 doi:10.1016/bs.agron.2016.10.005
- Waswa GW, Lorentz SA (2015) Energy considerations in groundwater-ridging mechanism of streamflow generation. *Hydrological processes* 29:4932-4946 doi:10.1002/hyp.10551
- Weiler M, J.Mcdonnell J, Meerveld IT-V, Uchida T (2005) Subsurface stormflow. *Encyclopedia of hydrological sciences* doi:10.1002/0470848944.hsa119
- Weiler M, Naef F (2003) An experimental tracer study of the role of macropores infiltration in grassland soils. *Hydrological processes* 17:477 - 493 doi:10.1002/hyp.1136
- Wels C, Cornett RJ, Lazerte BD (1991) Hydrograph separation: a comparison of geochemical and isotopic tracers. *Journal of hydrology* 122(1-4):253-274 doi:10.1016/0022-1694(91)90181-g
- Willems P (2009) A time series tool to support the multi-criteria performance evaluation of rainfall-runoff models. *Environmental modelling & software* 24:311-321 doi:10.1016/j.envsoft.2008.09.005
- Wittenberg H (1999) Baseflow recession and recharge as nonlinear storage processes. *Hydrological processes* 13:715-726
- Wood A, Beven KJ (2013) On runoff generation and the distribution of storage deficits. *Hydrology research* 44:673 doi:10.2166/nh.2013.119
- Wouter B, Simon M, Jon S, Edzer P, Dominik R (2015) Facilitating hydrological data analysis workflows in R: the RHydro package., 12-17 April, in Vienna, Austria. id.11033,
- Xue H, Sayama T, Takara K, He B, Huang G, Duan. W (2019) Non-point source pollution estimation in the Pingqiao River Basin, China, using a spatial hydrograph-separation approach. *Hydrological sciences journal* 64 doi:10.1080/02626667.2019.1617867
- Yan Li V, Lawrence MC, Lynden AA (2014) Nanoparticle tracers in calcium carbonate porous media. *Journal of nanoparticle research* 16 doi:10.1007/s11051-014-2541-9
- Yang J, Tang Z, Jiao T, Akhtar MM (2017) Combining AHP and genetic algorithms approaches to modify DRASTIC model to assess groundwater vulnerability: a case study from jiangnan plain, China. *Environmental earth sciences* 76:426 doi:10.1007/s12665-017-6759-6
- Yang W, Xiao C, Liang X, Zhang Z (2019) Study on the influence of water-rock interaction on streamflow conductivity based on hydrograph separation. 16th International symposium on water-rock interaction (WRI-16) and 13th international symposium on applied isotope geochemistry (1st IAGC international conference 98:4 doi:10.1051/e3sconf/20199811005

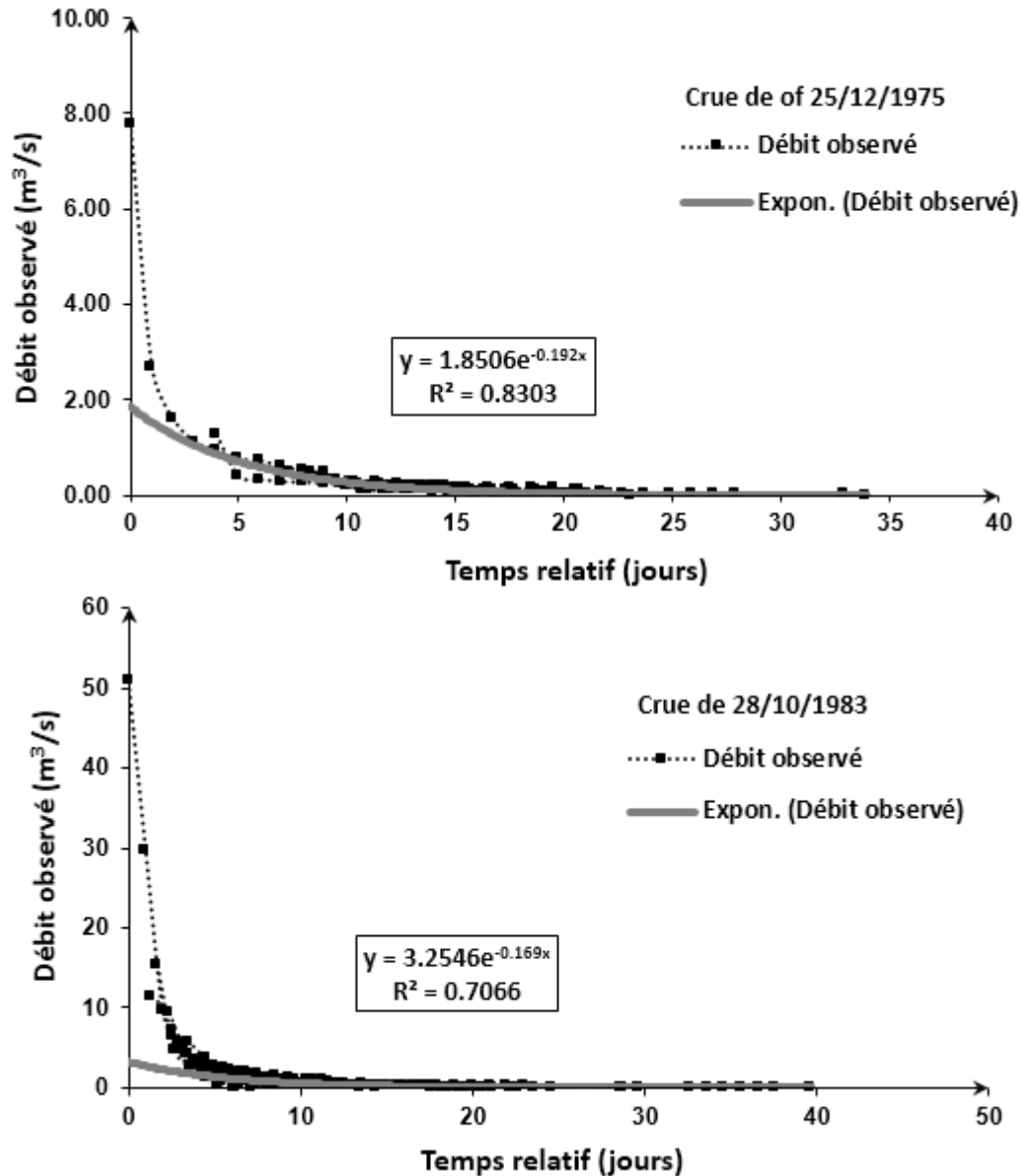
## Références bibliographiques

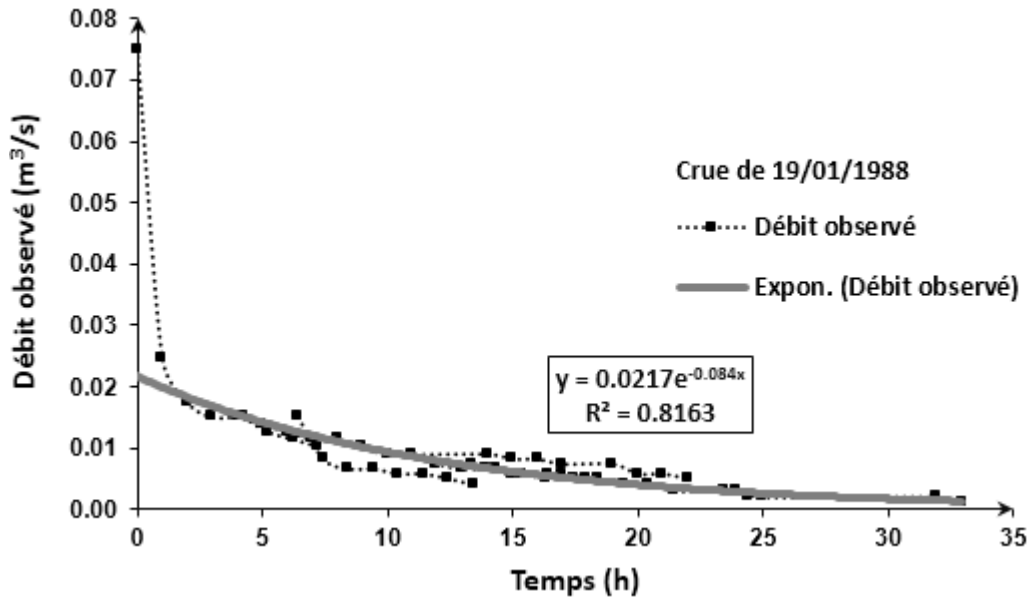
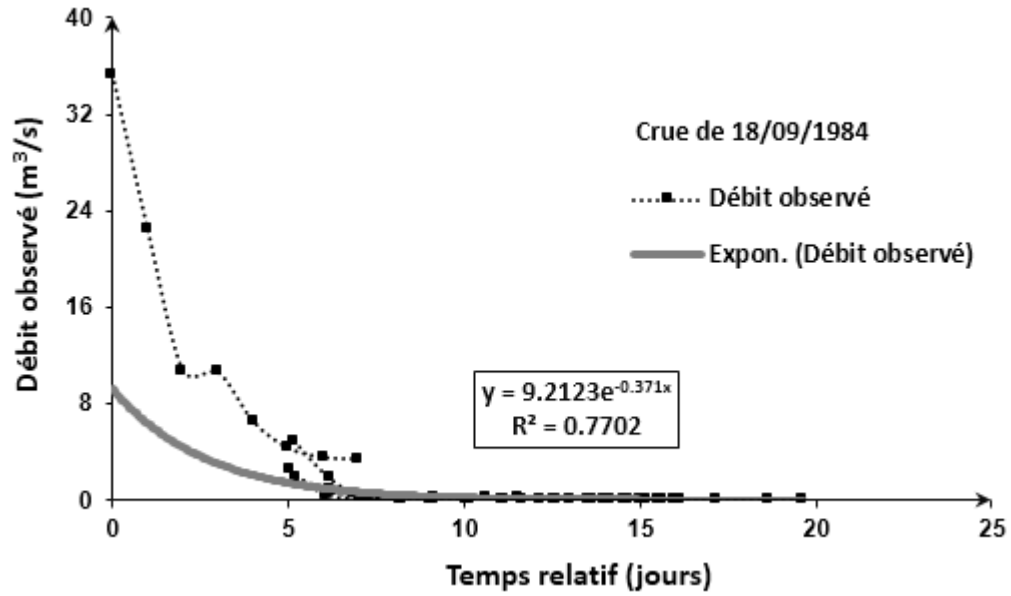
---

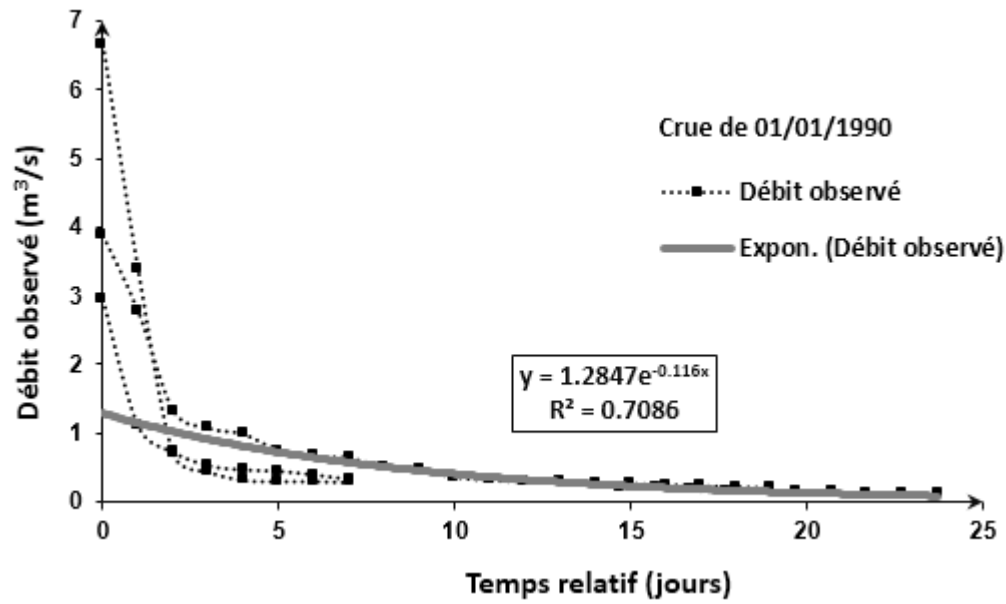
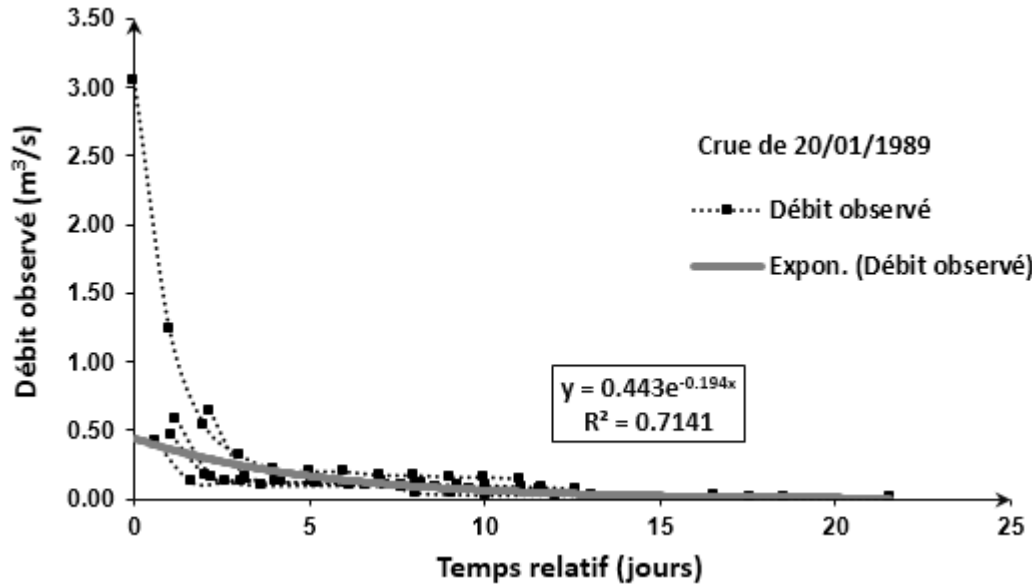
- Yeh H-F, Huang C-C (2019) Evaluation of basin storage-discharge sensitivity in Taiwan using low flow recession analysis. *Hydrological processes* 33:1434-1447  
doi:10.1002/hyp.13411
- Yles F (2014) Hydrologie et transport solide dans le bassin versant de l'oued Saida: Modélisation pluie-débit et débit liquide- transport solide., Abou Bekr Belkaid Tlemcen
- Ytoui Y (2014) Rainfall-Runoff modeling at monthly and daily scales using scales using conceptual models and Neur-Fuzzy inference system. 2nd international conference - water resources and wetlands 8:263-270
- Zadjaoui A (2016) Numerical modelling of infiltration profiles in the silt Tlemcen (Algeria). E3S web of conferences 9, 11015 (2016) E-UNSAT- 2016 6:1-6  
doi:10.1051/e3sconf/20160911015
- Zakwan M, Muzzammil M, Alam J (2016) Application of spreadsheet to estimate infiltration parameters. *Perspectives in science* 8:702-704 doi:10.1016/j.pisc.2016.06.064
- Zang Y, Feng SDP, Semprich S (2017) Numerical analysis of groundwater ridging processes considering water-air flow in a hillslope. *Ground water* 56 doi:10.1111/gwat.12602
- Zhang C et al. (2019) Occurrence, distribution and seasonal variation of five neonicotinoid insecticides in surface water and sediment of the pearl rivers, south china. *Chemosphere* 217:437-446 doi:10.1016/j.chemosphere.2018.11.024
- Zhang J et al. (2017) Comparing hydrological modelling, linear and multilevel regression approaches for predicting baseflow index for 596 catchments across australia *Hydrology and earth system sciences* doi:10.5194/hess-2017-737
- Zhao L, Hou R, Wu F, Keesstra S (2018) Effect of soil surface roughness on infiltration water, ponding and runoff on tilled soils under rainfall simulation experiments. *Soil & tillage research* 179:47-53 doi:10.1016/j.still.2018.01.009
- Zhiying L, Haiyan F (2016) Impacts of climate change on water erosion: a review. *Earth-science reviews* 163:94-117 doi:10.1016/j.earscirev.2016.10.004
- Živković N et al. (2015) Effects of vegetation on runoff in small bassins in serbia. *Fresenius Environmental Bulletin* 24:2082 - 2089
- Zolfaghari AA, Mirzaee S, Gorji M (2012) Comparison of different models for estimating cumulative infiltration. *International journal of soil science* 7 (3):108-115 doi: 10.3923/ijss.2012.108.115
- Zounemat-Kermani M, Ramezani-Charmahineh A, Adamowski J, Kisi O (2018) Investigating the management performance of disinfection analysis of water distribution networks using data mining approaches. *Environmental monitoring and assessment*:190:397  
doi:10.1007/s10661-018-6769-1

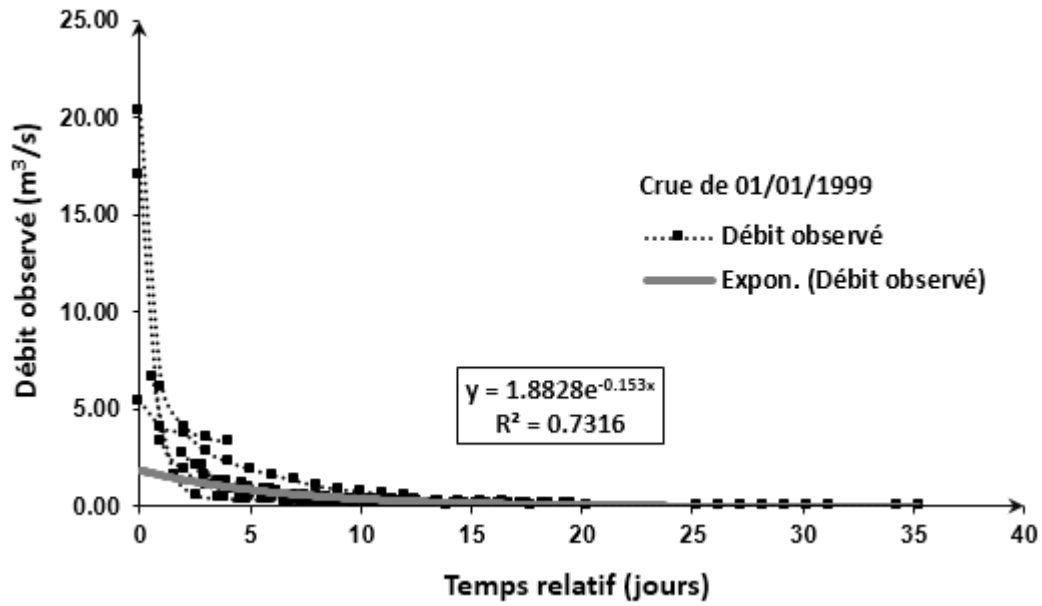
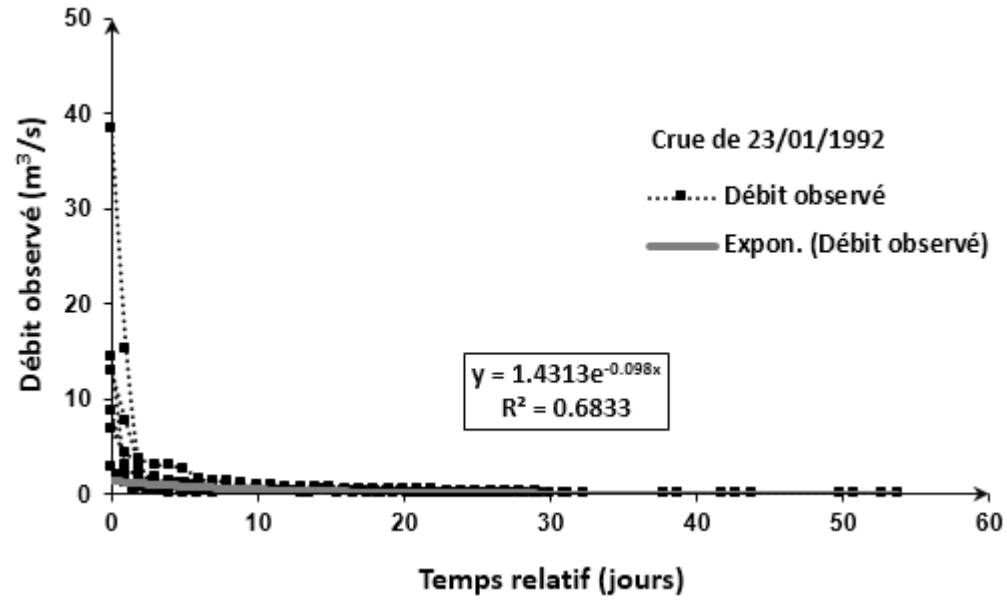
## Annexes

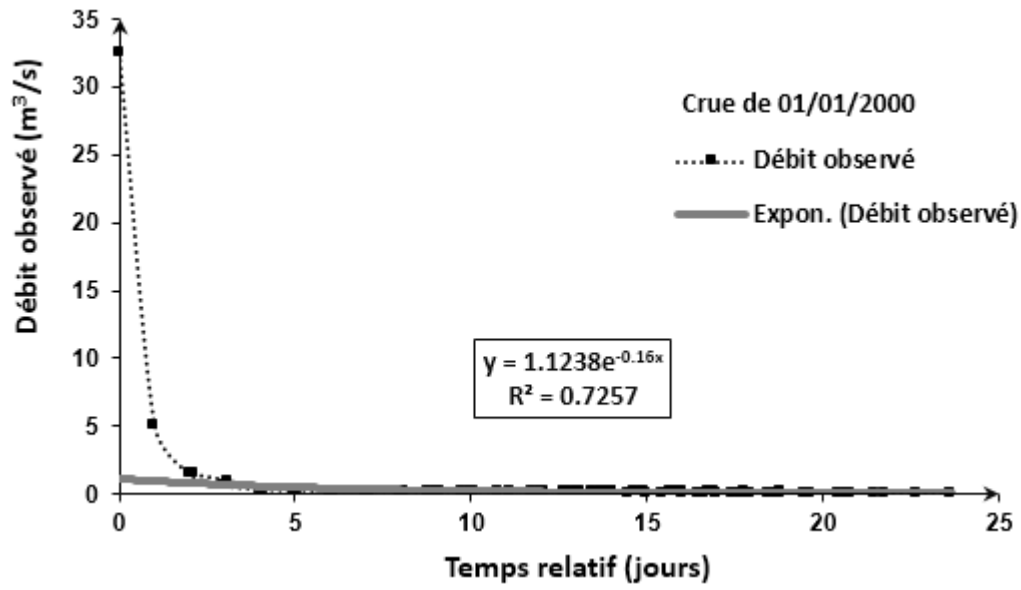
1 : CONSTRUCTION DES COURBES DE RESSION MOYENNES (MRCS) A L'AIDE DE LA METHODE DES RESSIONS INDIVIDUELLES





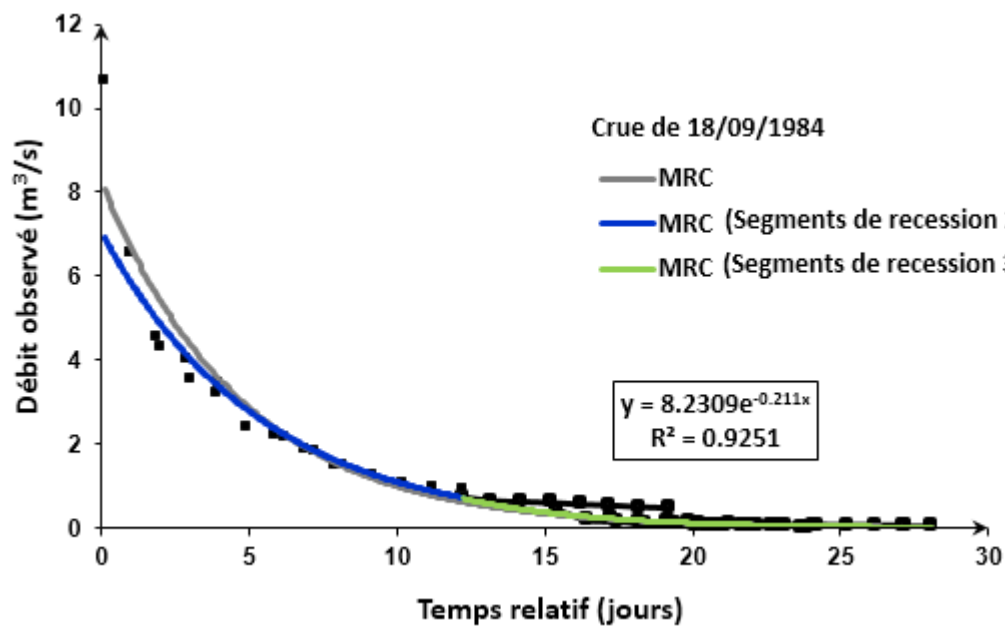
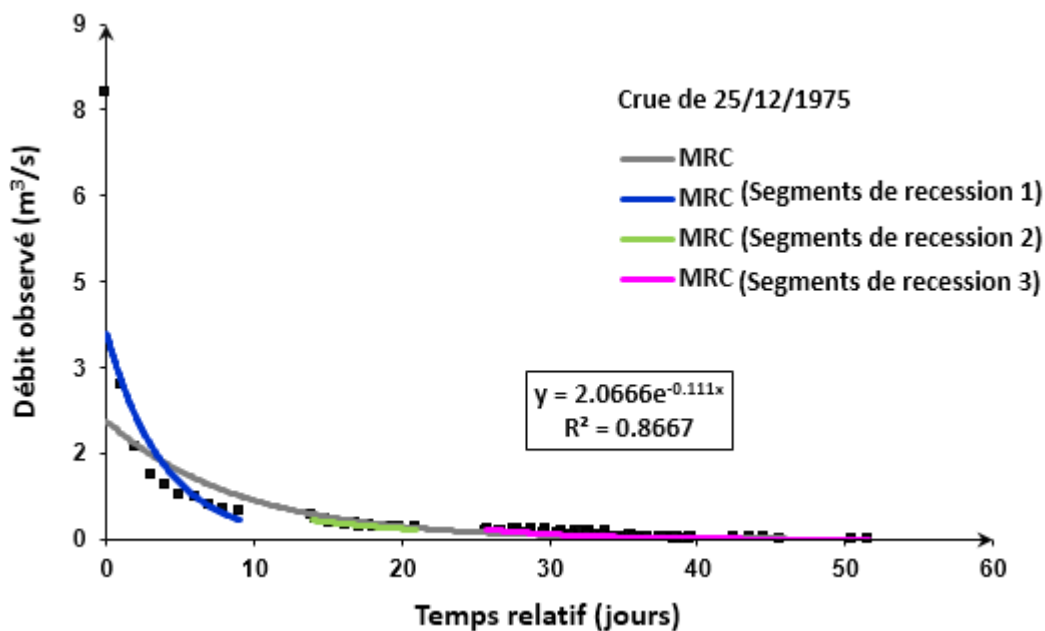


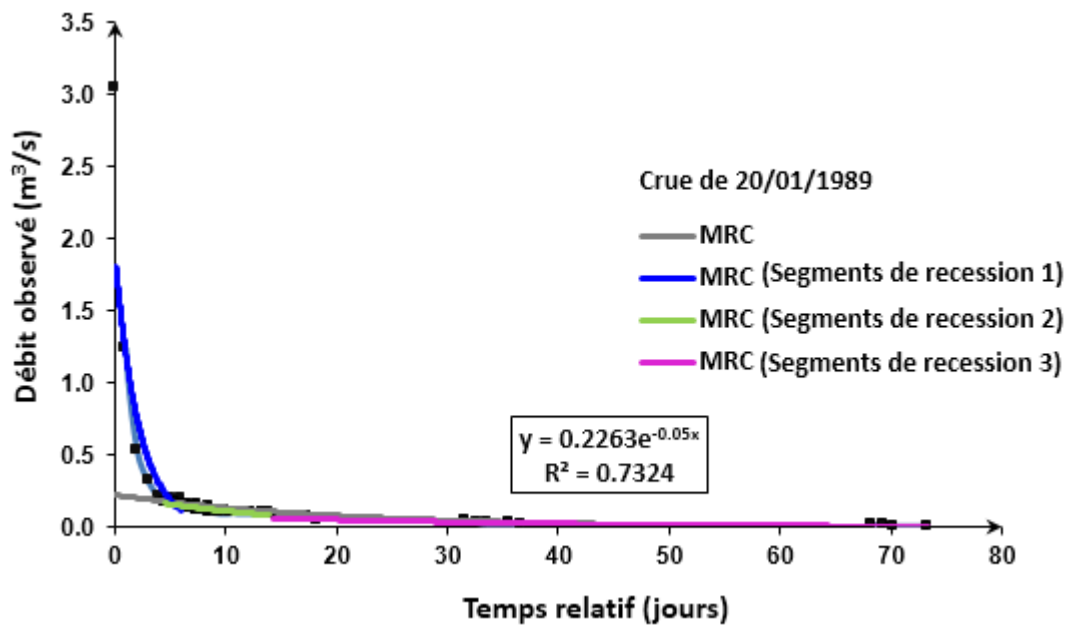
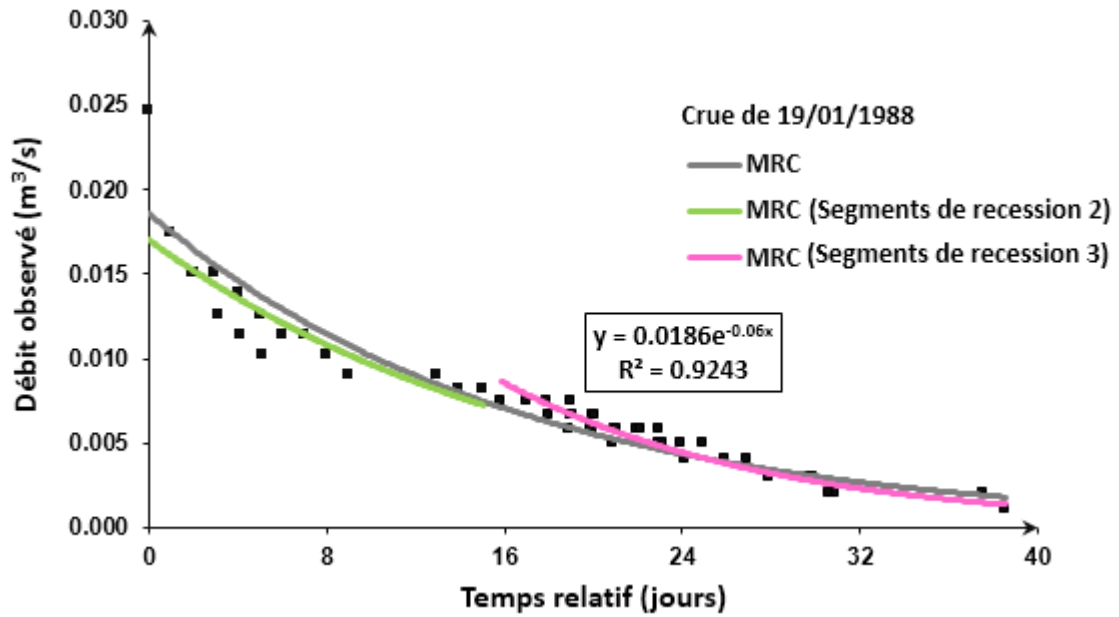


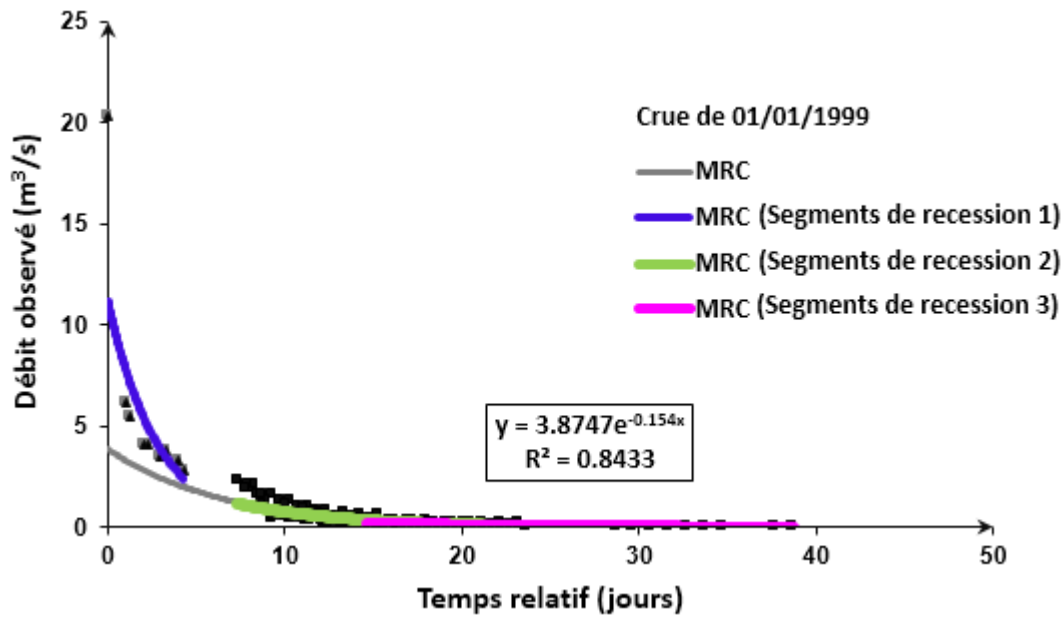
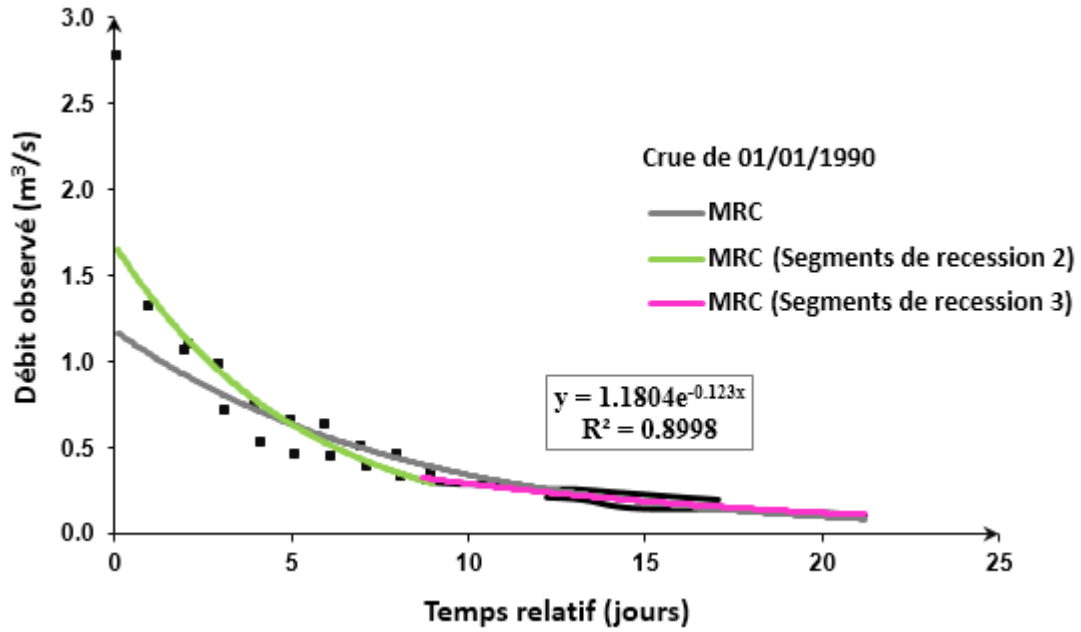


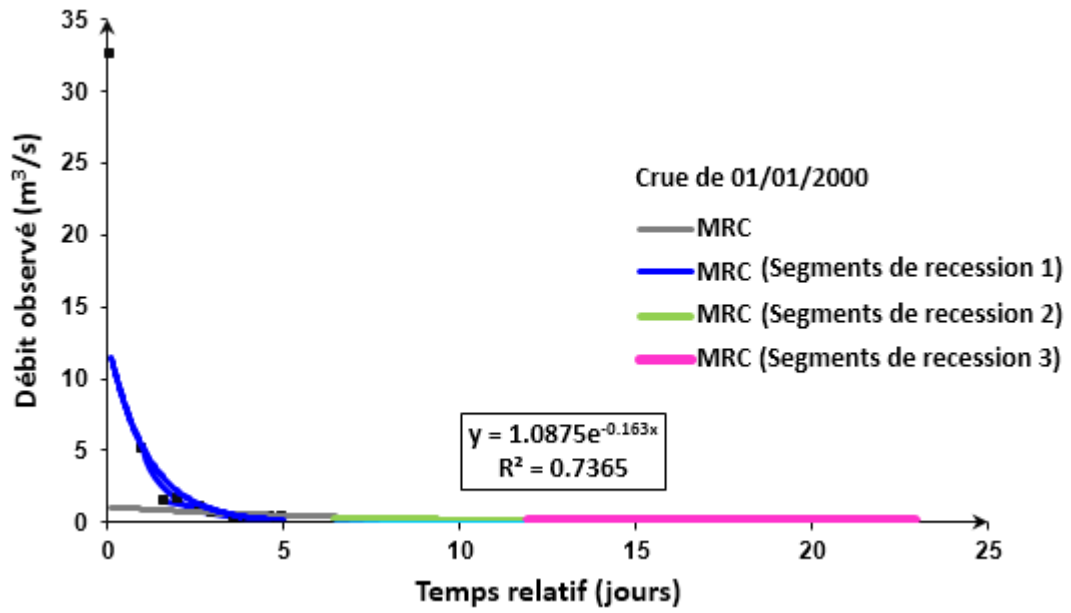
## Annexes

### 2 : SEPARATION DES COURBES DE RECESSION MOYENNES (MRC) CONSTRUITES A L'AIDE DE LA METHODE DES RECESSIONS INDIVIDUELLES

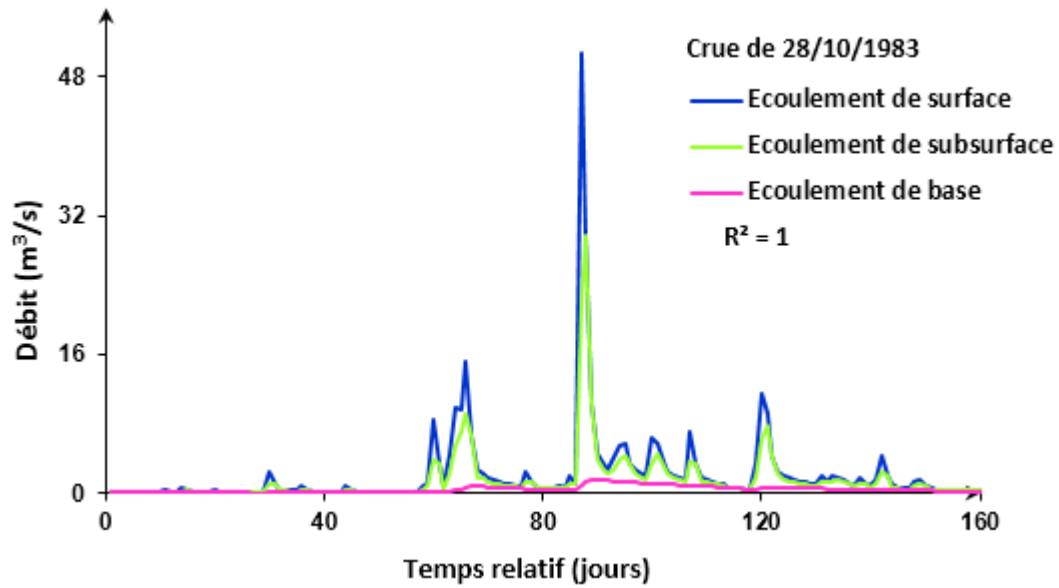
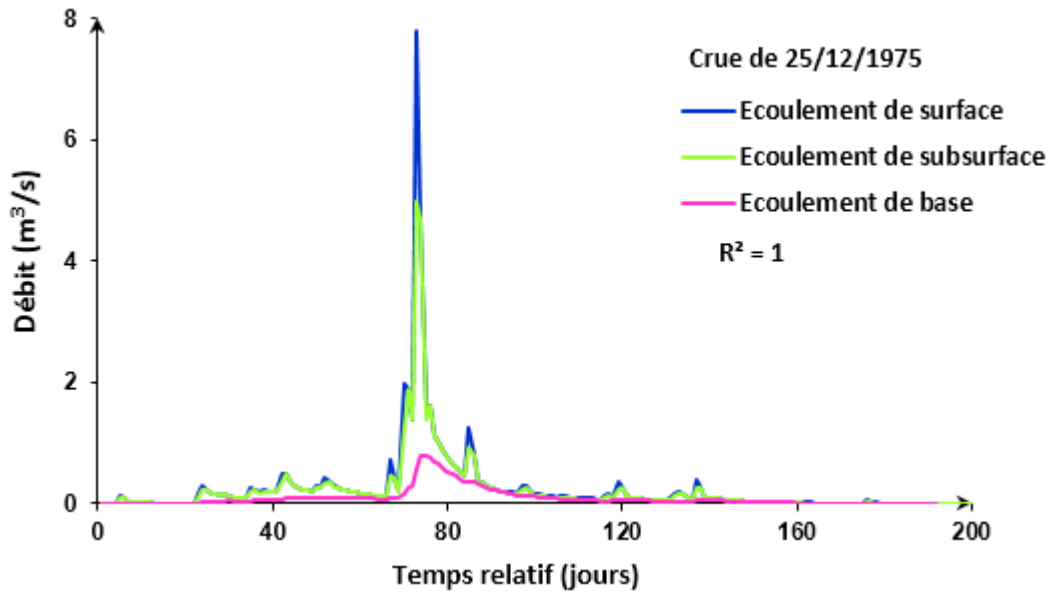


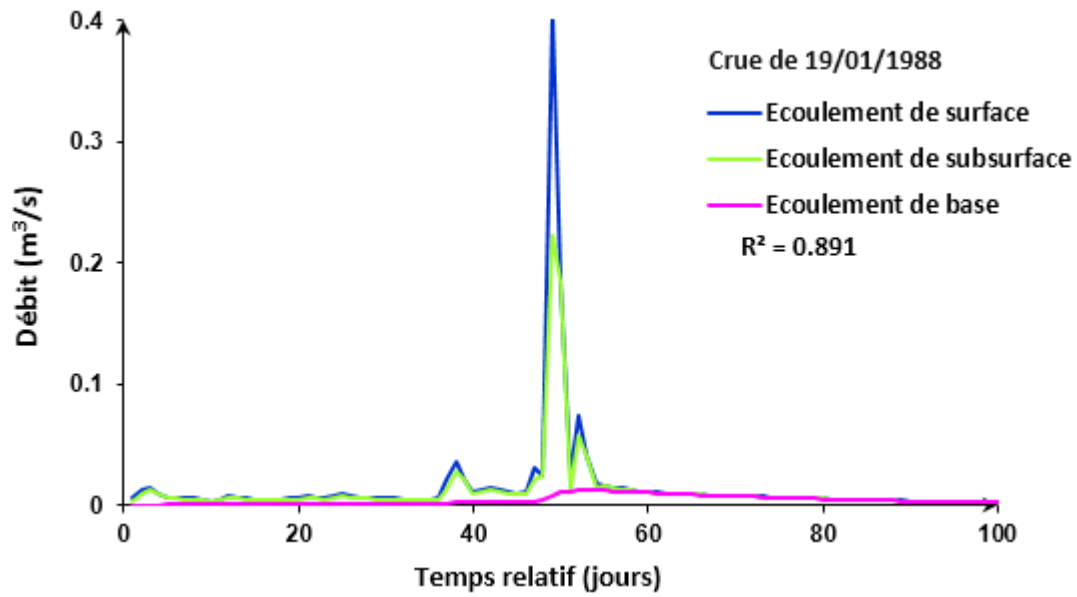
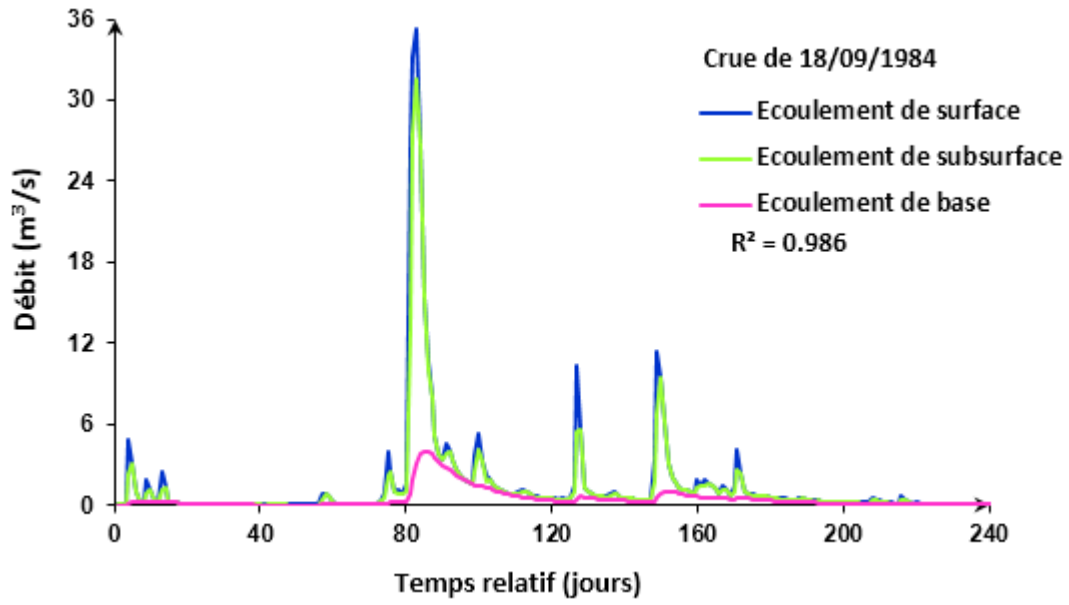


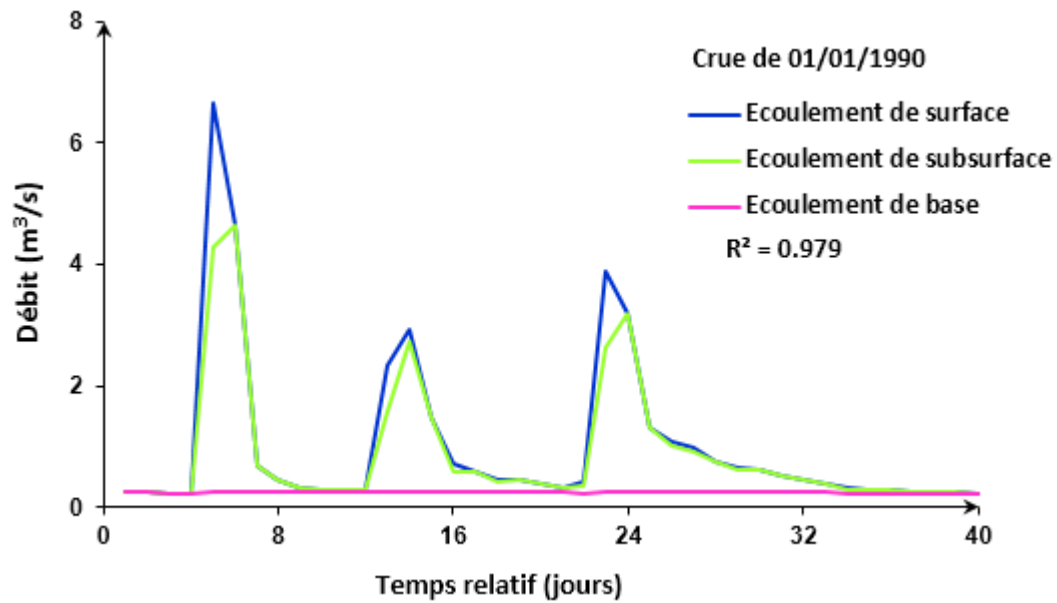
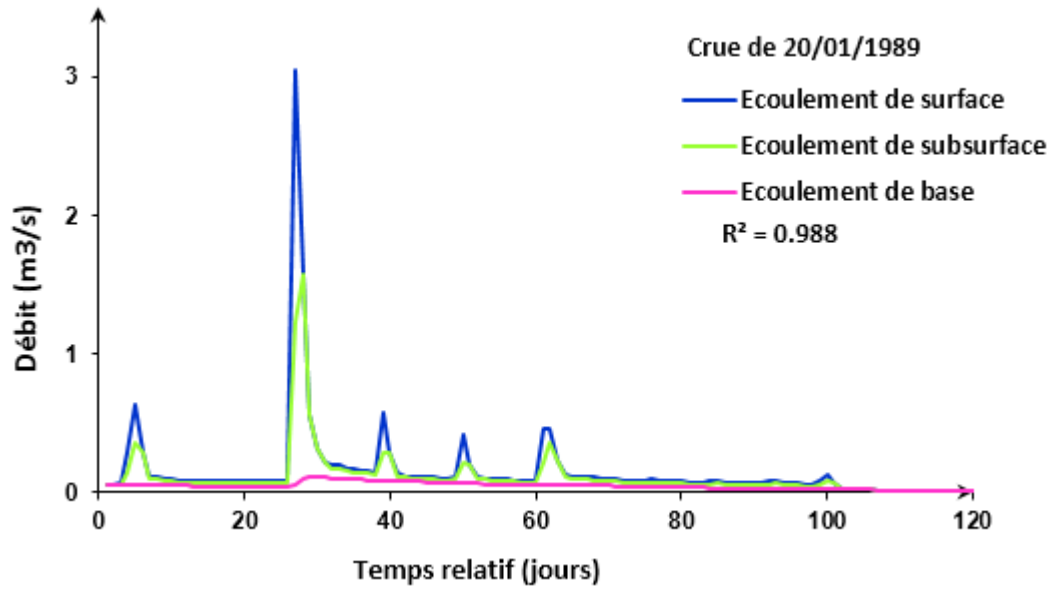


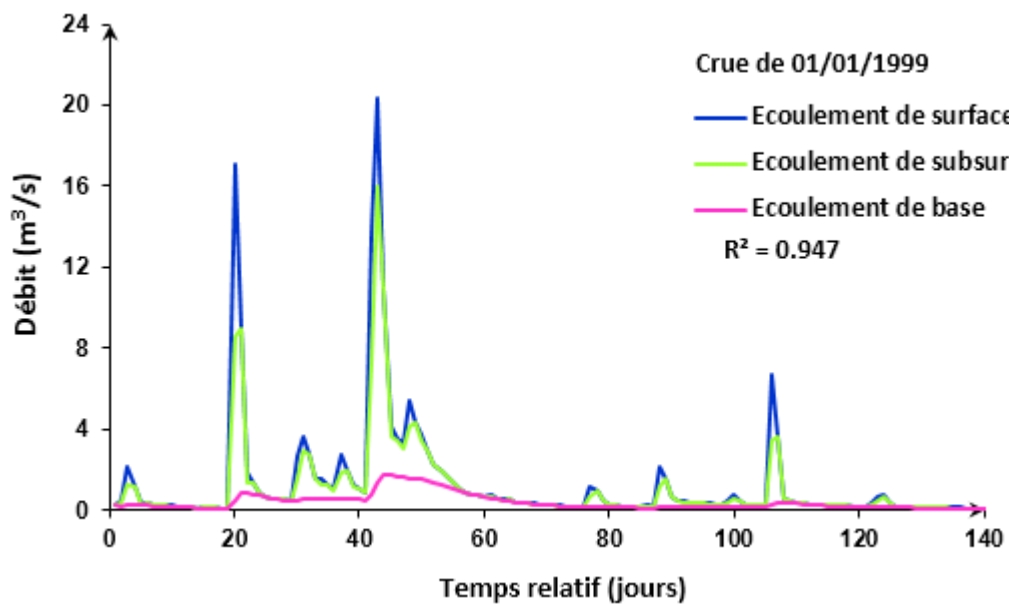
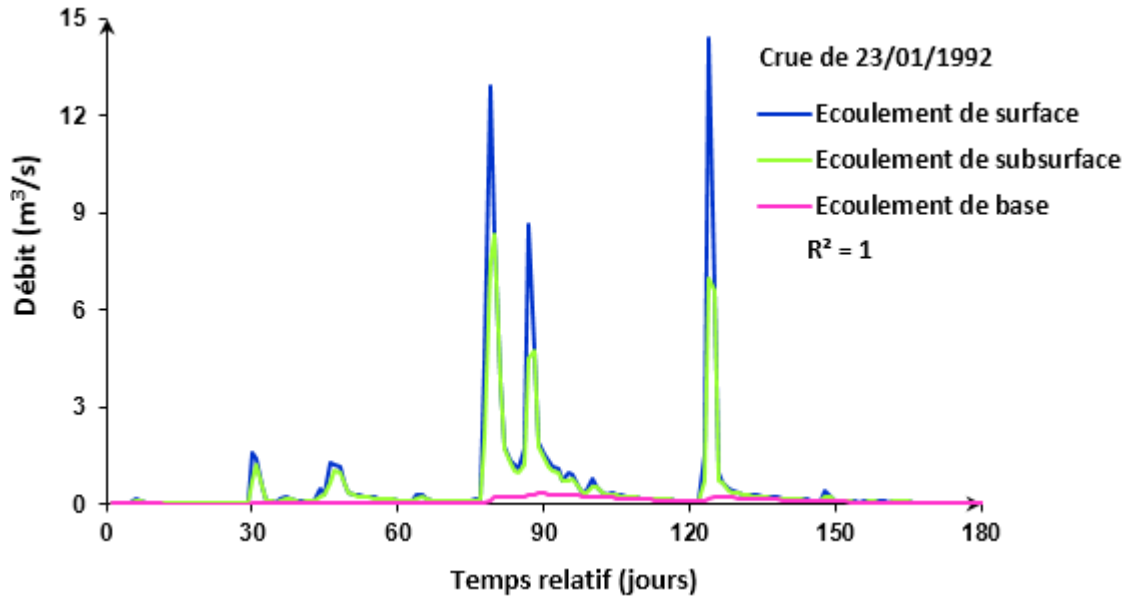


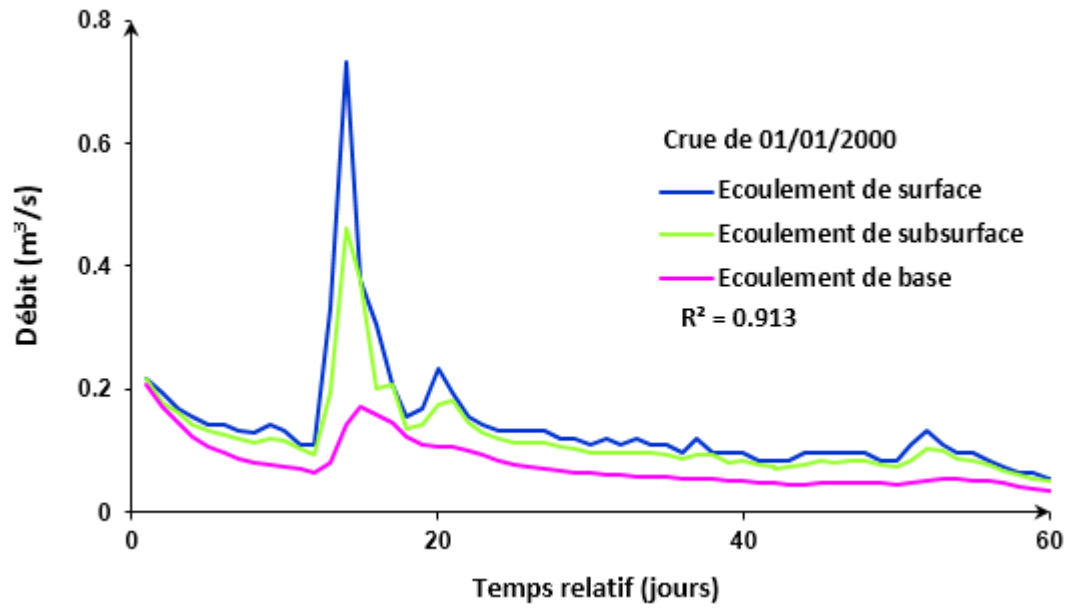
3 : SEPARATION DES HYDROGRAMMES DE CRUE PAR LA METHODE DU FILTRE RECURSIF



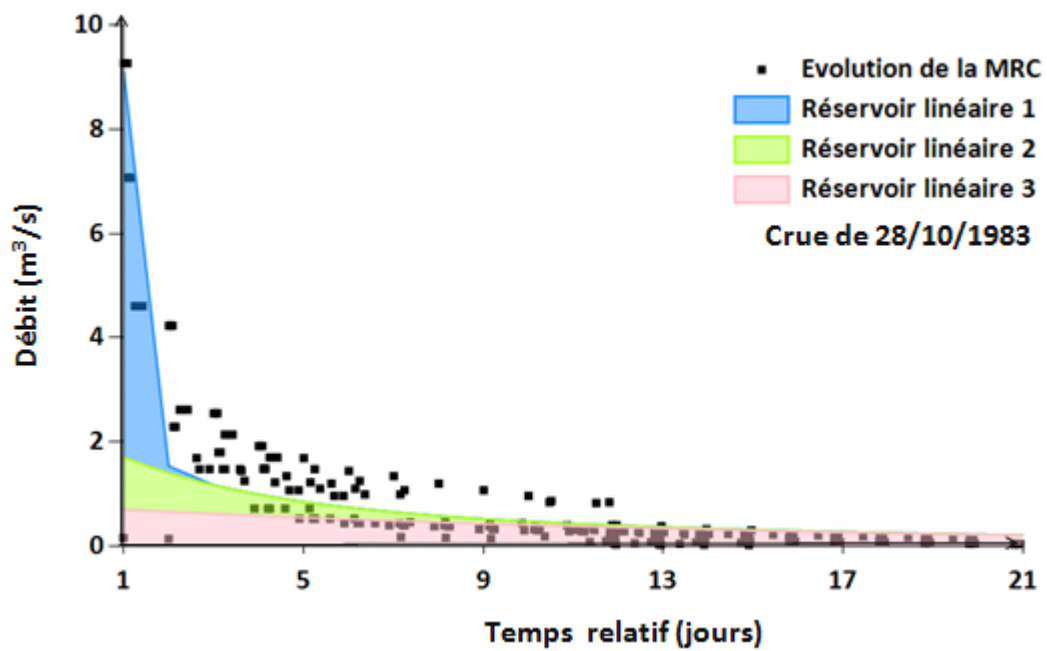
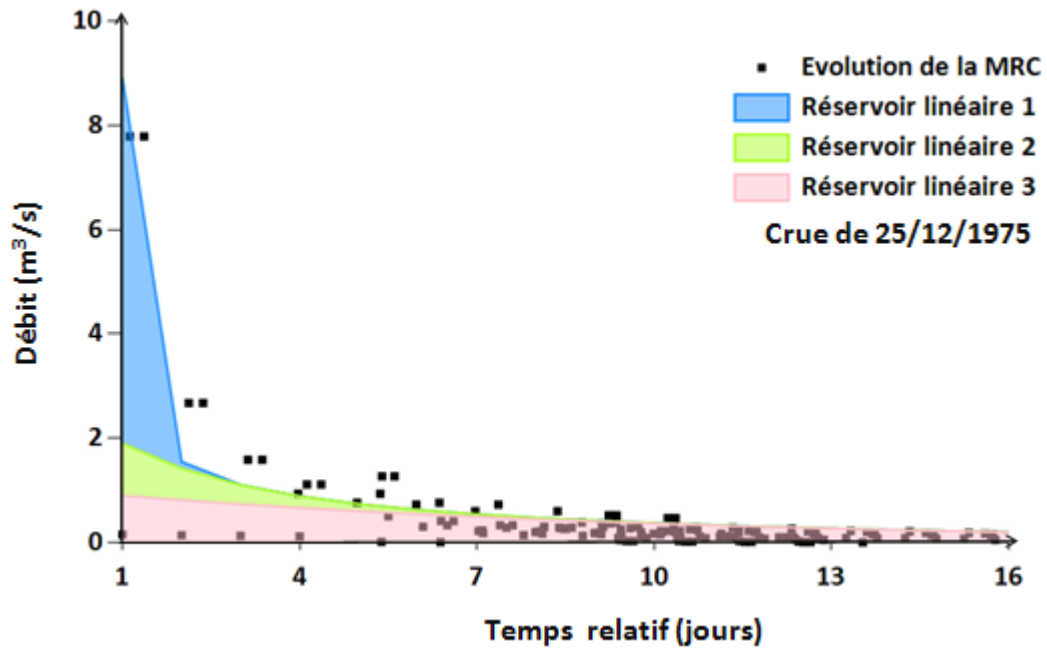


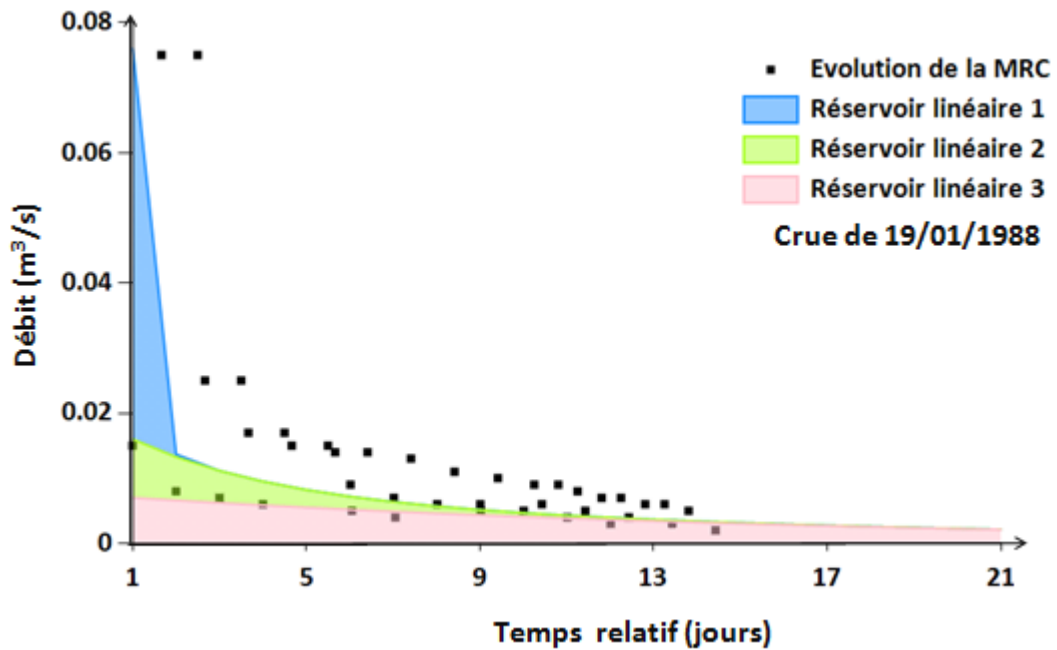
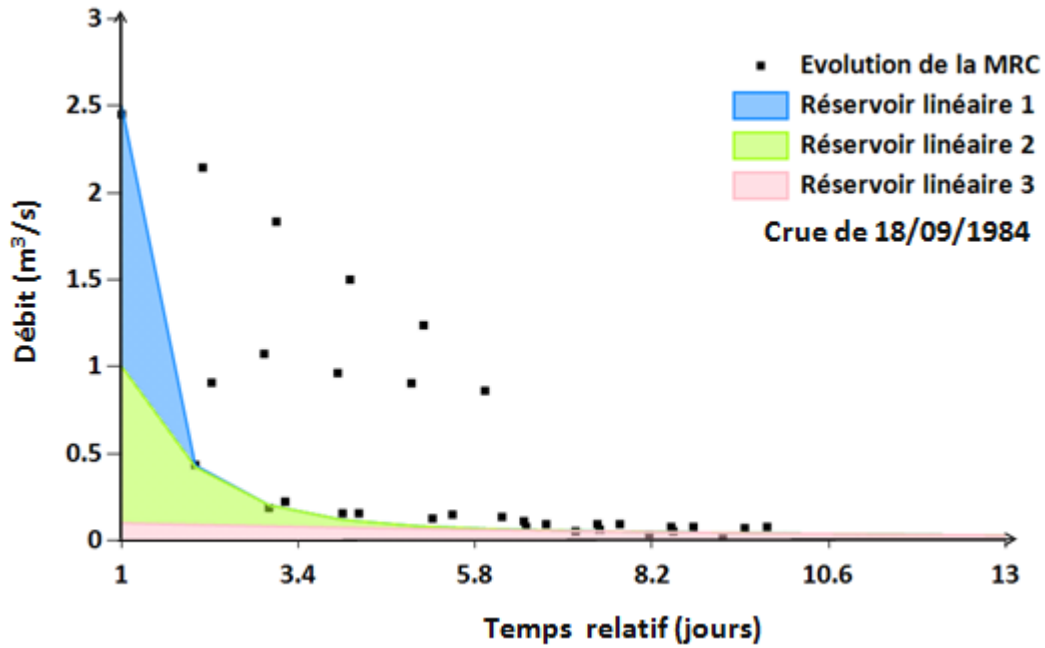


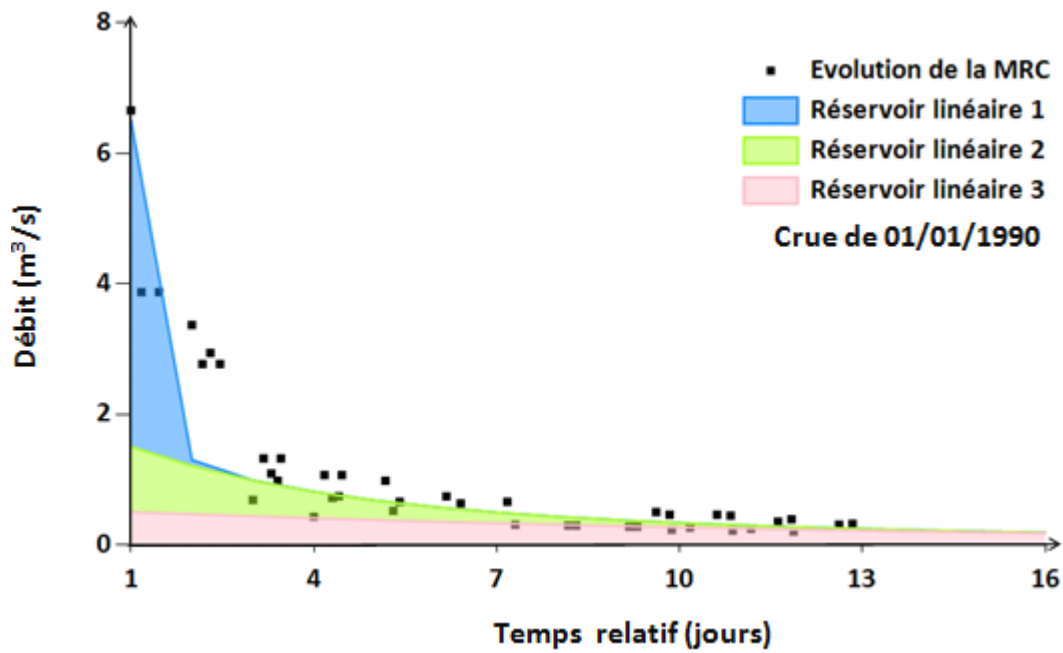
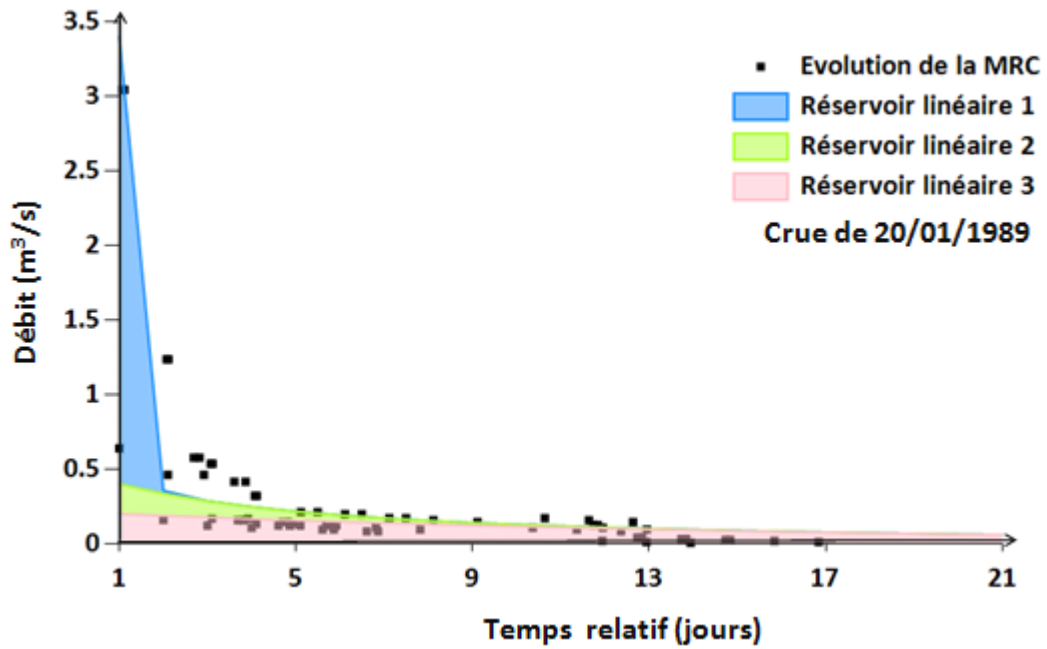


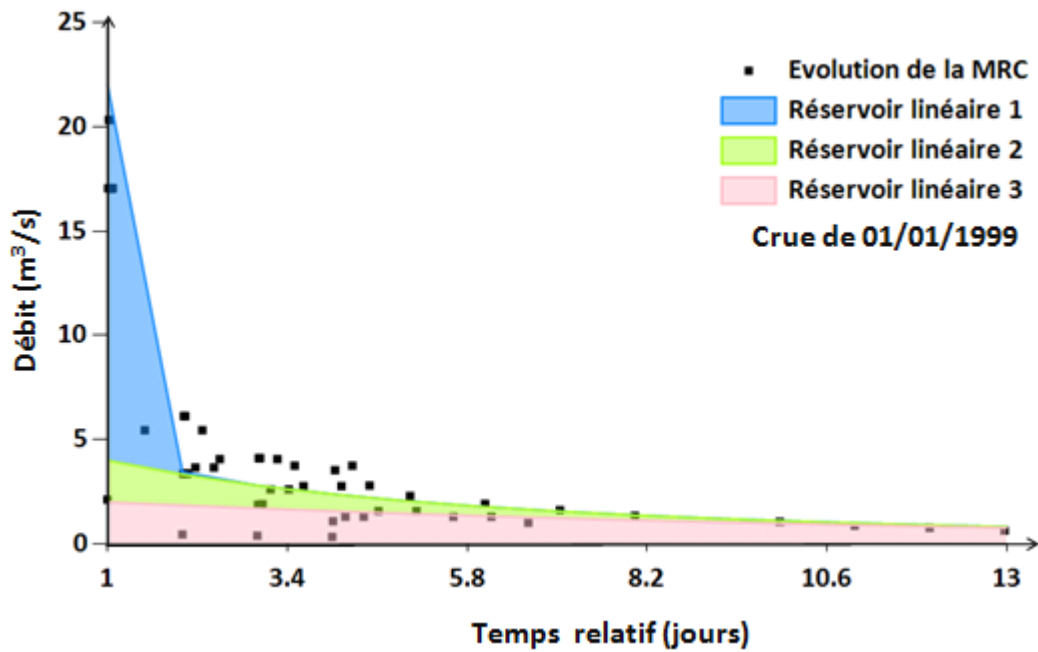
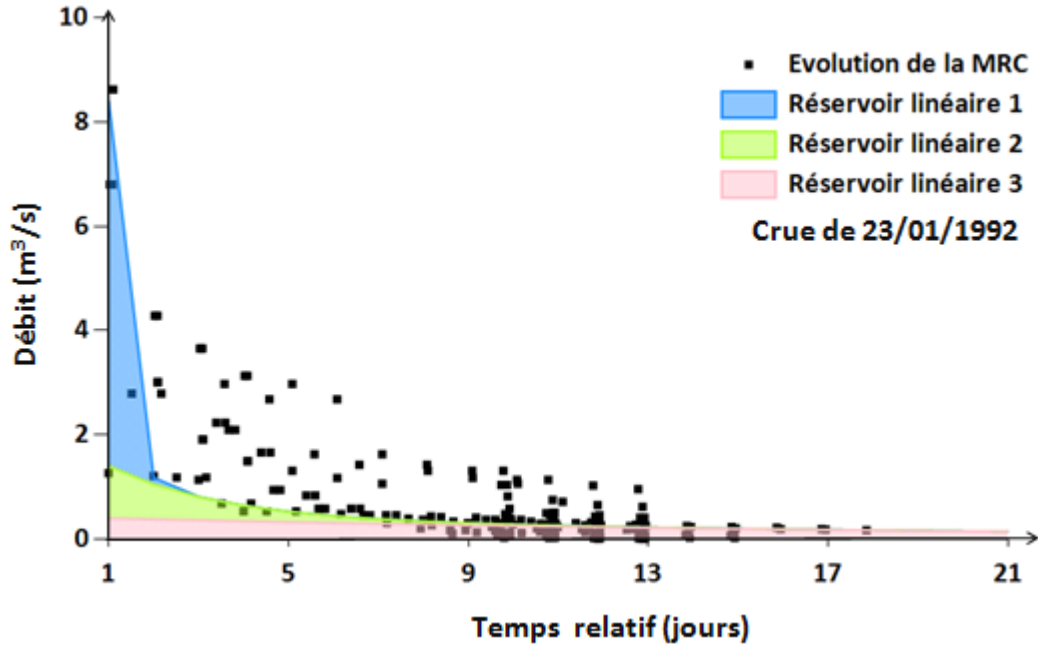


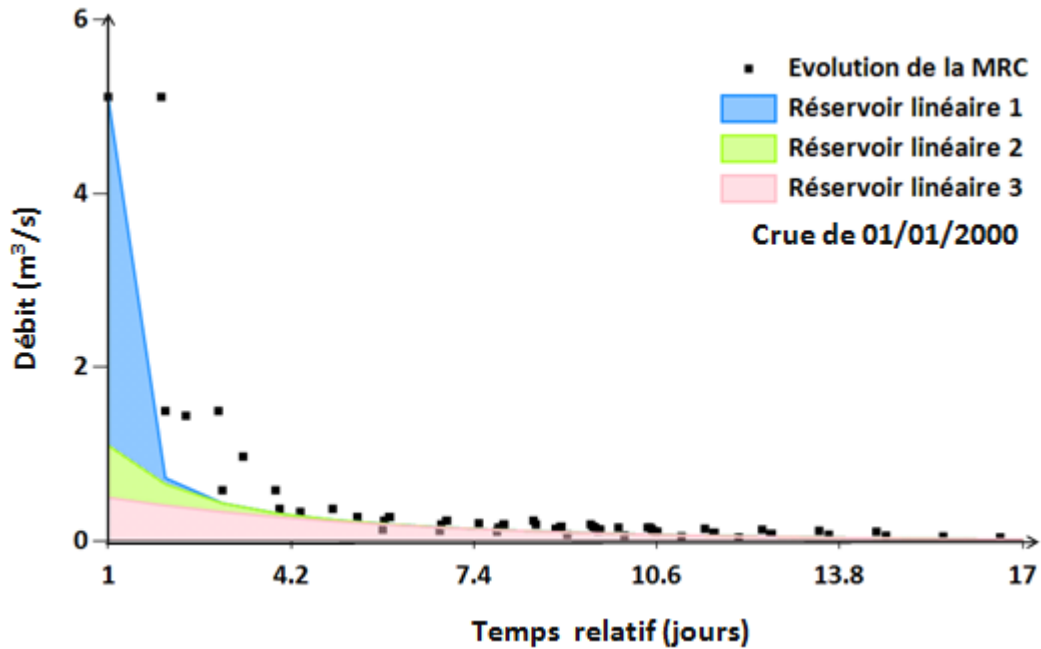
4 : SEPARATION DES HYDROGRAMMES DE CRUE PAR LA METHODE DES ALGORITHMES GENETIQUES



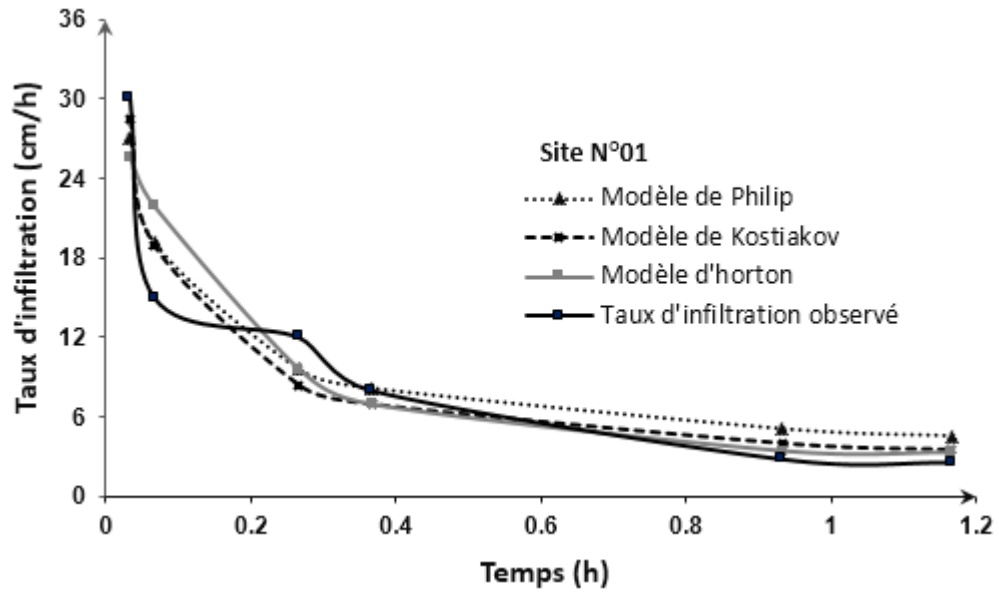


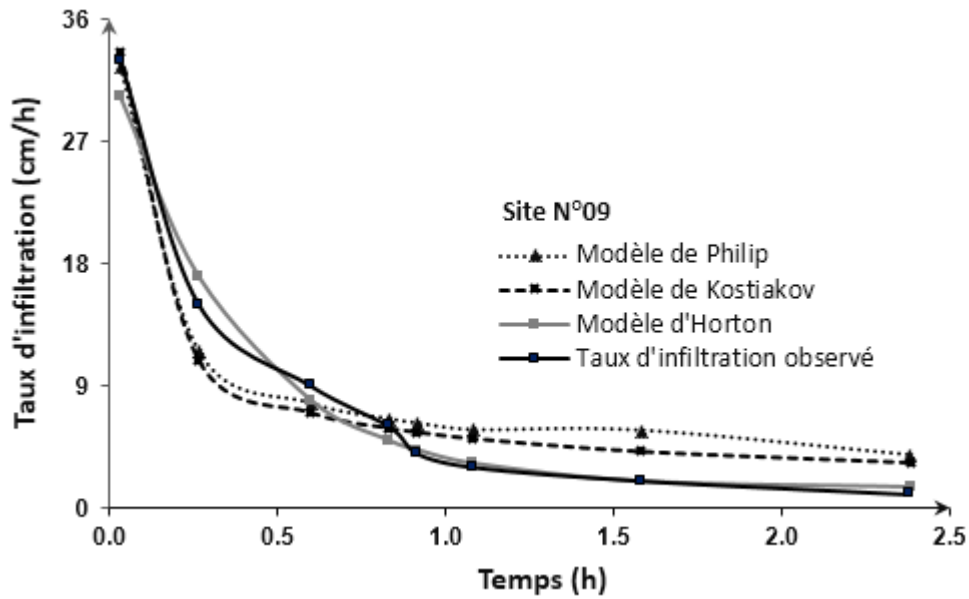
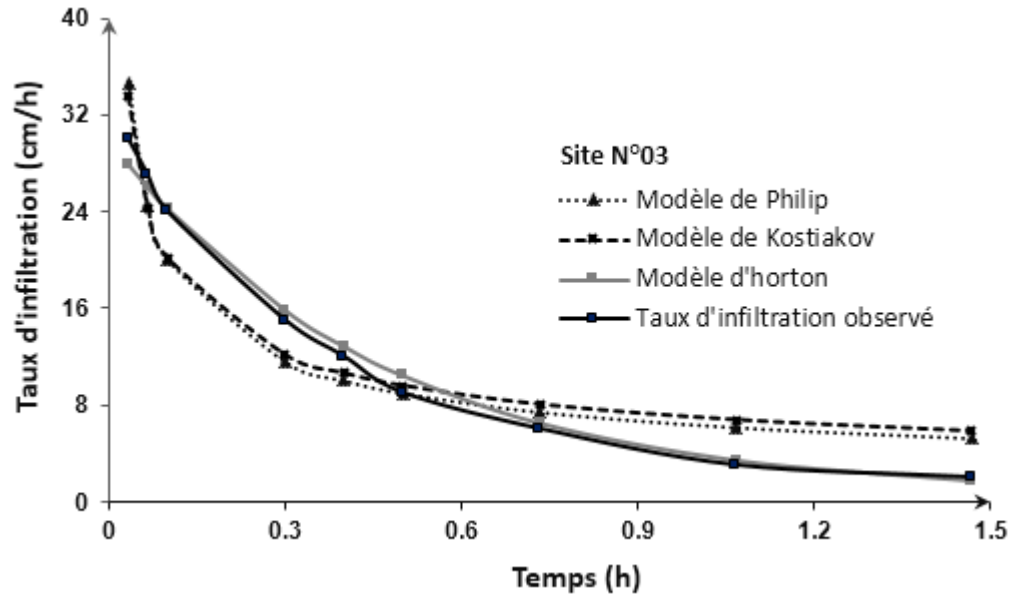


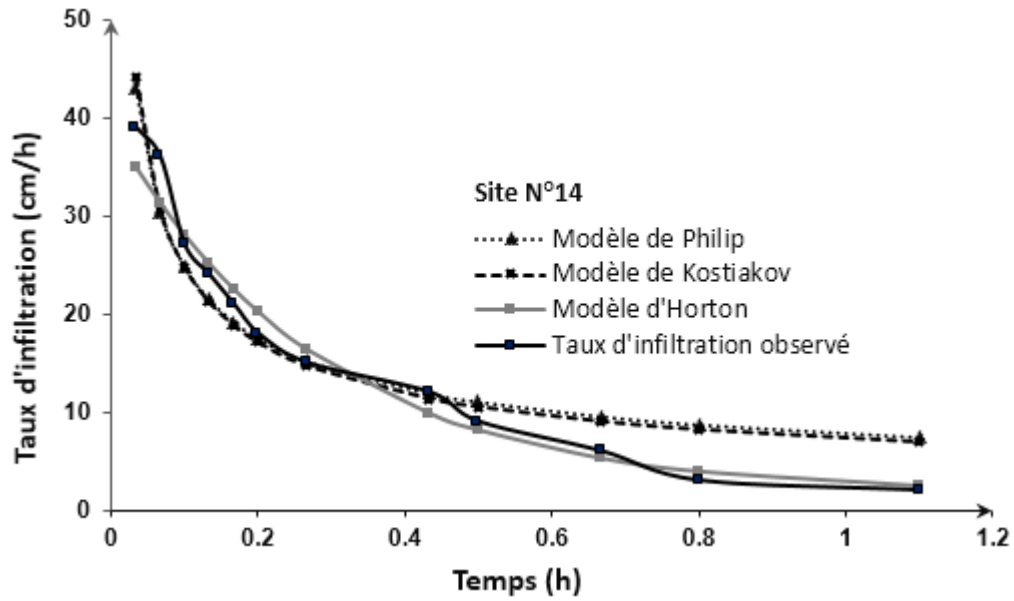
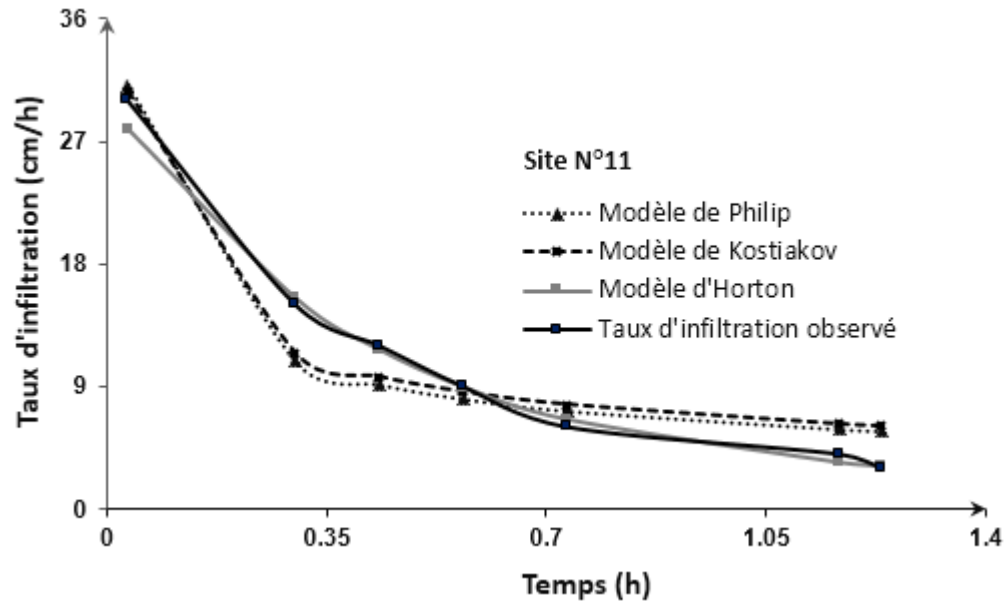


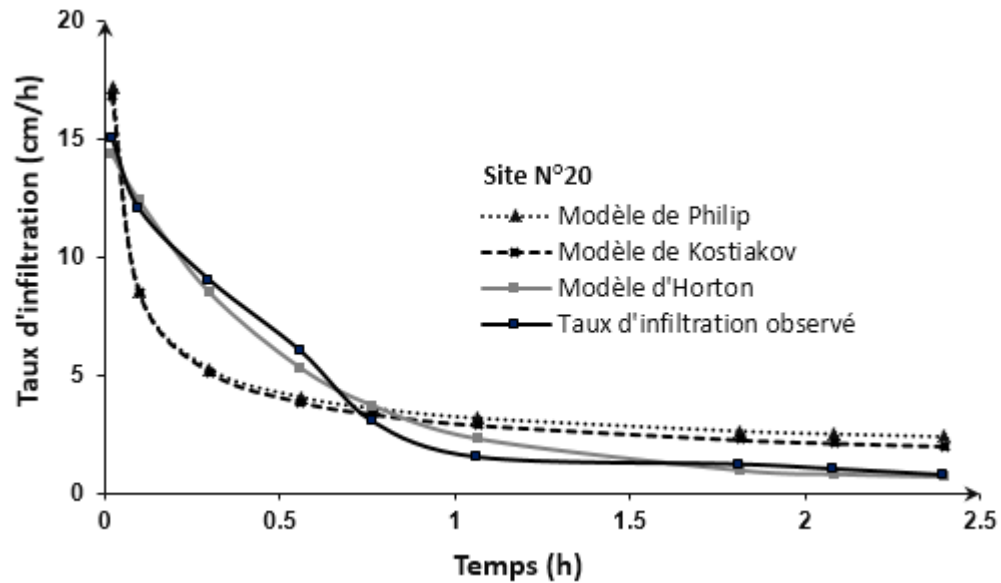
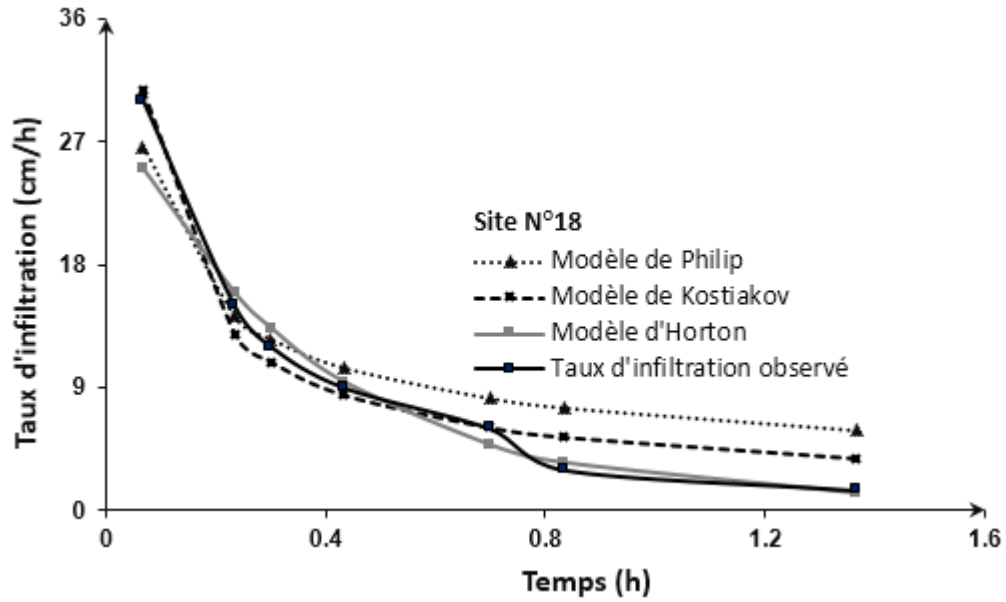


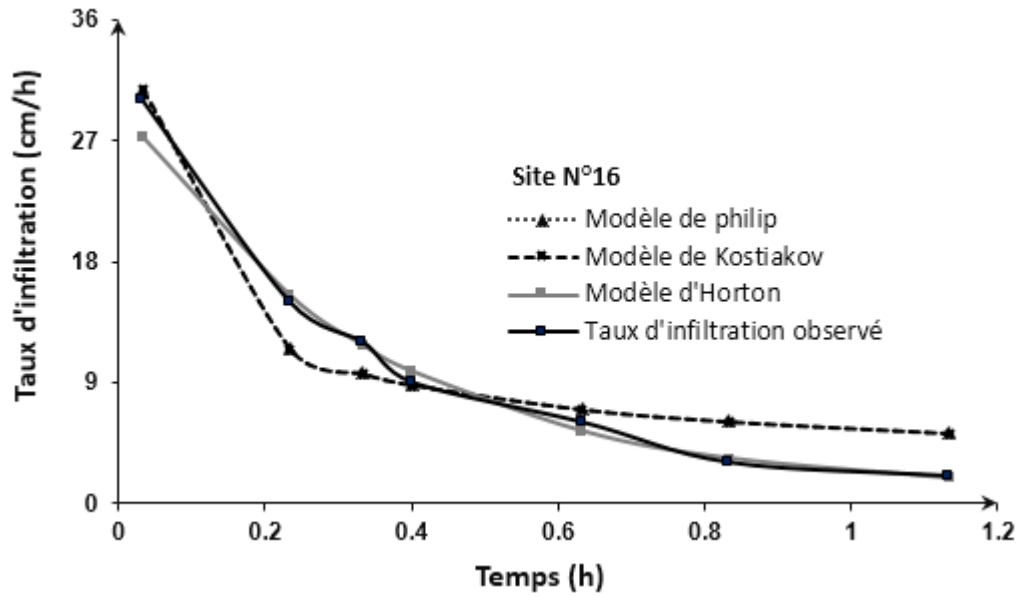
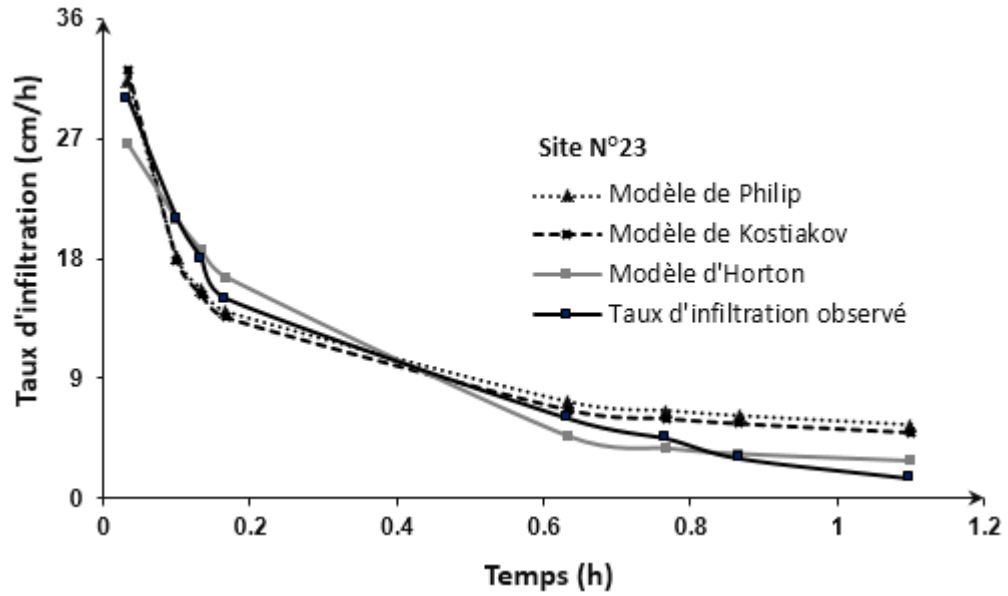
5 : TAUX D'INFILTRATION OBSERVE ET ESTIME PAR PLUSIEURS MODELES D'INFILTRATION.











## Publications internationales

- Dahak, A., Boutaghane, H.** Identification of flow components with the trigonometric hydrograph separation method: a case study from Madjez Ressoul catchment, Algeria. Arab J Geosci 12, 463 (2019). <https://doi.org/10.1007/s12517-019-4616-5>
- Dahak, A., Boutaghane, H.** Three techniques for flow component identification from daily discharge data in Madjez Ressoul catchment, Algeria. Arab J Geosci 13, 619 (2020). <https://doi.org/10.1007/s12517-020-05521-5>
- Dahak A., Boutaghane H.** (2019) New Use of Hydrograph Separation Method for Hydrological Process Identification. In: Chaminé H., Barbieri M., Kisi O., Chen M., Merkel B. (eds) Advances in Sustainable and Environmental Hydrology, Hydrogeology, Hydrochemistry and Water Resources. CAJG 2018. Advances in Science, Technology & Innovation (IEREK Interdisciplinary Series for Sustainable Development). Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-01572-5\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-030-01572-5_8)
- Dahak A., Boutaghane H, Tarek Merabtene** (2020) Parameters estimation and reliability of infiltration models for Madjez Ressoul Semi-Arid catchment in Algeria, GEODERMA.

## Communications internationales

- Dahak Asma and Boutaghane Hamouda**, International symposium on construction management and civil engineering (University 20 Août 1955-Skikda, Algeria, title: Contribution to the modeling with the rainfall-runoff relationship, 15-16/08/2017.
- Dahak Asma et Boutaghane Hamouda**, International conference on water, environment, energy and society" ICWEES 2018". Held in Zarzis-tunisia. In: Contribution to the modeling in Algeria: using the discharge -rainfall relationship, 08-10/05/2018.

- Dahak Asma et Boutaghane Hamouda**, 1<sup>st</sup> international conference of the Arabian Journal of Geosciences (CAJG), held in Hammamet, Tunisia, and for the paper they contributed to the conference proceeding published by Springer. New use of hydrograph separation method for hydrological processes identification, 12-15 /11/2018.
- Dahak Asma et Boutaghane Hamouda**, 4<sup>ème</sup> colloque international : les géosciences au Service du développement durable, Université Larbi Tebessi, Tébessa. Review and application of streamflow hydrograph separation, 22/11/2018.
- Dahak Asma et Boutaghane Hamouda**, The 2<sup>nd</sup> international association of water resources in the southern Mediterranean basin- Tunisia (WREIANA 2019). Review of streamflow hydrograph separation, 25-27/03/2019.
- Dahak Asma et Boutaghane Hamouda**, the 5th international Symposium on Flash Floods in Wadi system (ISFF), February 25-28, 2020, Kyoto, Japan: Experimental study for infiltration model choice: case of Madjez Ressoul catchment.

## Communications nationales

- Dahak Asma et Boutaghane Hamouda**, 1er séminaire national géologie, géotechnique et georressources à Jijel, Algérie, est intitulée : Contribution à la modélisation des bassins versants Algériens, 08-09/11/2017.
- Dahak Asma et Boutaghane Hamouda**, 6<sup>ème</sup> séminaire national sur l'eau SNE6-2019-UMMTO, Université de Mouloud Mammeri- Tizi Ouzo, Etude du potentiel d'infiltration : Cas du bassin de Madjez Ressoul. 12-14 juin 2019.
- Dahak Asma et Boutaghane Hamouda**, 1<sup>er</sup> sèminaire national sur l'eau, l'environnement et la santé (S.N.E.E.S. El-Tarf 2018), Contribution à la modélisation des bassins versants Algériens, 06-07/03/2018.



## Identification of flow components with the trigonometric hydrograph separation method: a case study from Madjez Ressoul catchment, Algeria

Asma Dahak<sup>1</sup> · Hamouda Boutaghane<sup>1</sup>

Received: 25 October 2018 / Accepted: 10 July 2019  
© Saudi Society for Geosciences 2019

### Abstract

Madjez Ressoul catchment constitutes an important source of fresh water and arable land in northeastern Algeria. In order to achieve better management of the catchments' natural resources, specifically water, an advanced flood recession analysis was conducted, using the recession analysis-based trigonometric approach, which was based completely on a mathematical solution. This approach provides very useful results for the master recession curves construction. The advantage of this method in the hydrograph separation is both its non-subjectivity related to the user, and then its viability for initial use in the hydrograph separation field. Results in this real case give a better indication of groundwater flow during different drought periods, using many assessed parameters of initial discharge and relative recession time. A particular review of existing hydrograph separation techniques is used to situate the recession analysis and show its case of application relative to other techniques.

**Keywords** Hydrograph separation techniques · Recession curve · Runoff processes · Hydrological modeling · Recession segments · Trigonometry approach



## Three techniques for flow component identification from daily discharge data in Madjez Ressoul catchment, Algeria

Asma Dahak<sup>1</sup> · Hamouda Boutaghane<sup>1</sup>

Received: 12 November 2019 / Accepted: 3 June 2020  
© Saudi Society for Geosciences 2020

### Abstract

Empirical models of recession analysis provide information about surface and ground flow processes during periods of drought. The objective of this research is to evaluate the performance of three different techniques (individual segments, filtering method, genetic algorithms) in assessing the contribution of recession flow component in calculating runoff, using daily records of discharge. These techniques will focus on the values of the recession index covering ten flood events in the period of 1973–2003. The outputs of these models were then compared and their results appeared to validate two particular techniques: the filtering method with one parameter and the genetic algorithm method. The coefficient of determination ( $R^2 = 0.7324–0.935$ ) and the cross probability which equals 0.9 confirm the best separation of all events. Absolute similarities between flow types in the filtering method and genetic algorithms present systematic differences in the calibration form and on the consideration of obstacles and limitations.

**Keywords** Recession analysis · Base flow · Flow component · Hydrograph separation · Flow identification



# New Use of Hydrograph Separation Method for Hydrological Process Identification

Asma Dahak and Hamouda Boutaghane

## Abstract

This study is a new application of the recession curve analysis with a new non-subjective method. Its objective is to construct master recession curves generated by placing, horizontally, the vertex of individual recession segments of the most suitable connection line defined by measurement points of a preceding recession segment. This proposed methodology was applied for a rural catchment with a low urban contribution, namely Madjez Ressoul, which is located in the Ain Berda region in Algeria. The results of separation always give an appropriate  $R^2$  coefficient; they confirm the ability to calculate the recession curve coefficient  $k$  of the three processes (surface flow, subsurface flow and baseflow).

## Keywords

Recession curve analysis • Hydrograph separation method • Master recession curve • Trigonometry method

(surface flow, base flow), or three (surface flow, subsurface flow, base flow) components, and taking into consideration the catchment and flood characteristics, this study is strongly aimed to select the processes contributing to a flood event by the hydrograph analysis techniques, seeing that this method had a quick development and very advanced theories.

## 2 Methods

The recognized function (see Eqs. (1) and (2)) of the recession curve analysis is the exponential demonstration given firstly by [1–4]. It explains that hydrographic recession modeling characterizes catchment aquifers by a quantitative parameter ( $K_i$ ), that describes: water, soil, and river system as a function of storage in the natural reservoir.

$$Q_t = Q_0 \cdot K^t \quad (1)$$

$$Q_t = Q_0 \cdot e^{-\alpha t} \quad (2)$$