



**Contribution à la Caractérisation hydrologique du bassin versant du MASSILI à GONSE au Burkina Faso à travers une approche multimodèle pluie débit (HEC-HMS, GR4J)**

MÉMOIRE POUR L'OBTENTION DU DIPLÔME D'INGENIEUR 2IE AVEC GRADE DE  
MASTER 2

SPÉCIALITÉ : GÉNIE CIVIL ET HYDRAULIQUE  
OPTION : INFRASTRUCTURES ET RESEAUX HYDRAULIQUES

Présenté et soutenu publiquement le 26 Janvier 2021 par

**Steve Isaï BATIENON (20140489)**

Sous la direction de **Dial NIANG**

Maître Assistant

Laboratoire Eaux Hydro-Systèmes et Agriculture (LEHSA)

et du maître de stage : **Soumahila SANKANDE**

Ingénieur du Génie Rural

Direction Générale des Ressources en Eau (DGRE)

Jury d'évaluation du mémoire :

**Président :** Pr Harouna KARAMBIRI

**Membres et correcteurs :** Dr Mounirou LAWANI  
M. Axel BELEMTOUGRI

Promotion [2020/2021]

## Dédicaces

*Je dédie ce travail à :*

*Feu Dr Mamadou TOURE qui a été toujours présent  
pour des conseils, orientations, motivations et  
encouragements à m'intéresser à la programmation.*

*Toute ma très chère famille pour votre amour, votre  
soutien et vos prières à mon égard*

## **Remerciements**

L'occasion me semble appropriée pour remercier et témoigner ma profonde reconnaissance à toutes les personnes physiques ou morales qui ont assisté de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire. Il s'agit de :

- ✓ L'Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE) et l'ensemble du corps professoral qui ont contribué à notre formation ;
- ✓ Mon Directeur de mémoire Dr. Dial NIANG qui a suivi avec intérêt ce travail malgré ses multiples occupations. Ses encouragements et suggestions nous ont permis à avancer dans la rédaction du mémoire.
- ✓ Monsieur le Directeur Général des Ressources en eau (DGRE) pour l'opportunité de stage qu'il nous a accordé ;
- ✓ Monsieur le Directeur des Etudes et de l'Information sur l'Eau (DEIE) pour son accueil chaleureux et sa disponibilité à nous accompagner.
- ✓ Monsieur Soumahila SAKANDE, notre maître de stage, pour la qualité de son encadrement, sa disponibilité, ses conseils et l'appui technique durant le stage.

Nous tenons à remercier également l'ensemble du personnel de la DGRE et tous ceux ou celles qui ont contribué à la réalisation de ce mémoire.

## **Résumé**

D'une superficie d'environ 2640 km<sup>2</sup> le bassin versant du Massili à Gonsé est une zone à forte croissance des villes (Ouagadougou et Ziniaré) et de développement des activités. Ce bassin devient alors de plus en plus imperméable ce qui conduit à l'augmentation et l'accélération des écoulements. Dans l'optique d'éviter les catastrophes liées à l'eau, la gestion des ressources en eau s'avère nécessaire. D'où la nécessité de développer un outil de gestion des ressources en eau adapté au bassin versant qui permet d'estimer raisonnablement les débits à l'exutoire. Pour bien comprendre le fonctionnement hydrologique du bassin selon la représentation spatiale, nous avons étudié dans le présent rapport le modèle global GR4J et le modèle semi-distribué HEC-HMS. Il ressort de cette étude que HEC- HMS est plus adapté au bassin versant du Massili à Gonsé et il simule bien les écoulements dans les conditions climatiques différentes (périodes sèche et humide). Les critères de Nash pour le calage et la validation de ce modèle sont respectivement 0,717 et 0,631. Quant au modèle GR4J, la simulation est moyenne avec des critères de Nash pour le calage et la validation qui sont respectivement 0,52 et 0,42. Les crues sont reproduites tardivement et il a du mal à toutes les reproduire.

### **Mots Clés :**

**1 – Bassin versant**

**2 – GR4J**

**3 – HEC-HMS**

**4 – Massili**

**5 – Modélisation hydrologique**

## **Abstract**

Covering an area of about 2640 km<sup>2</sup>, the Massili à Gonsé watershed is an area of strong growth of cities (Ouagadougou and Ziniaré) and development of activities. This basin becomes more and more impermeable, which leads to increased and accelerated runoff. In order to avoid water-related disasters, water resource management is necessary. Hence the need to develop a water resource management tool adapted to the catchment area that allows a reasonable estimate of flows at the outlet. In order to fully understand the hydrological functioning of the basin according to the spatial representation, we have studied in this report the global model GR4J and the semi-distributed model HEC-HMS. It appears from this study that HEC-HMS is better adapted to the Massili à Gonsé watershed and it simulates flows under different climatic conditions (dry and wet periods). The Nash criteria for the calibration and validation of this model are respectively 0.717 and 0.631. As for the GR4J model, the simulation is average with Nash criteria for calibration and validation which are respectively 0.52 and 0.42. Floods are reproduced late and it has difficulty in reproducing all of them.

### **Key words :**

**1 - Watershed**

**2 – GR4J**

**3 – HEC-HMS**

**4 - Massili**

**5 – Hydrological modeling**

## Liste des abréviations

<b>ACP</b>	: Analyse des Composantes Principales
<b>AEP</b>	: Alimentation en Eau Potable
<b>ANAM</b>	: Agence Nationale de la Météorologie
<b>Arc-hydro-tools</b>	: Hydrology Tools in Arcgis
<b>ASTER</b>	: Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer
<b>BDOT</b>	: Base de Données d'Occupation des Terres
<b>BNDT</b>	: Base Nationale de Données Topographiques
<b>BRAKINA</b>	: Brasseries du Burkina
<b>CEMAGREF</b>	: Centre National du Machinisme Agricole du Génie Rural, des Eaux et Forêts
<b>CN</b>	: Curve Number
<b>DEIE</b>	: Direction des Etudes et de l'Information sur l'Eau
<b>DGRE</b>	: Direction Générale des Ressources en Eau
<b>GDEM</b>	: Global Digital Elevation Model
<b>GR1A</b>	: Génie Rural à 1 Paramètre Annuel
<b>GR2M</b>	: Génie Rural à 2 Paramètres Mensuels
<b>GR4J</b>	: Génie Rural à 4 Paramètres Journaliers
<b>HEC-GeoHMS</b>	: Hydrologic Engineering Center - Geospatial Hydrologic Modeling System
<b>HEC-HMS</b>	: Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System
<b>IGB</b>	: Institut Géographique du Burkina
<b>INSD</b>	: Institut National de la Statistique et de la Démographie
<b>MNT</b>	: Modèle Numérique du Terrain
<b>NRCS</b>	: Natural Resources Conservation Service
<b>ODD</b>	: Objectifs de Développement Durable
<b>ONEA</b>	: Office National de l'Eau et de l'Assainissement
<b>SCS</b>	: Soil Conservation Service
<b>SIG</b>	: Système d'Information Géographique
<b>SOGEAO</b>	: Société de Gestion de l'Abattoir de Ouagadougou
<b>USACE</b>	: US Army Corps of Engineers
<b>USGS</b>	: United States Geological Survey
<b>UTC</b>	: Temps Universel Cordonné

## **Table des matières**

Dédicaces .....	i
Remerciements .....	ii
Résumé .....	iii
Abstract .....	iv
Liste des abréviations .....	v
Table des matières .....	vi
Liste des tableaux .....	viii
Liste des figures .....	ix
I. Introduction.....	1
II. Etat de l’art .....	2
2.1. Modélisation pluie débit.....	2
2.1.1. Définitions .....	2
2.1.2. But de la modélisation pluie débit.....	2
2.1.3. Classification des modèles selon la représentation spatiale .....	2
2.1.4. Classification des modèles selon le lien entre les entrées et les sorties .....	3
2.1.5. Classification des modèles selon la description des processus.....	3
2.1.6. Classification des modèles selon la représentation spatiale .....	4
2.1.7. Synthèse de quelques études hydrologiques menées dans la zone .....	4
III. Matériel et méthodes.....	5
3.1. Présentation de la zone d’étude .....	5
3.1.1. Situation géographique et localisation .....	5
3.1.2. Réseau hydrographique .....	6
3.1.3. Caractéristiques climatiques du bassin du Massili.....	7
3.1.4. Géologie et pédologie.....	8
3.1.5. Configuration administrative.et territorialité du bassin.....	8
3.1.6. Population et dynamique humaine .....	9
3.1.7. Activités économiques .....	10
3.2. Matériel .....	13
3.2.1. Collecte de données.....	13
3.2.2. Choix des modèles .....	14

3.2.3. Logiciels utilisés .....	14
3.3. Méthodes .....	15
3.3.1. Comblement des données .....	15
3.3.2. Caractérisation hydro-géomorphologique du bassin versant.....	17
3.3.3. Mise en route du modèle HEC-HMS .....	20
3.3.4. Mise en route du modèle GR4J.....	28
3.3.5. Quelques Critères de performances des modèles.....	33
IV. Résultats et discussions.....	35
4.1. Comblement de données .....	35
4.2. Caractérisation hydro-géomorphologique du bassin versant .....	36
4.2.1. Courbe hypsométrique .....	37
4.2.2. Indices de pluies.....	38
4.3. Schématisation du bassin versant avec le logiciel HEC-GeoHMS .....	39
4.4. Echantillons de calage et de validation des modèles .....	41
4.5. Calage du modèle HEC-HMS .....	41
4.6. Validation du modèle HEC-HMS.....	44
4.7. Calage du modèle GR4J.....	45
4.8. Validation du modèle GR4J .....	46
4.9. Comparaison des modèles HEC-HMS et GR4J appliqués au bassin versant .....	47
4.10. Simulation sur une période humide (de 1986 à 1987) .....	47
4.11. Simulation sur une période sèche (1996-1997).....	48
V. Conclusion et recommandations.....	50
Bibliographie.....	51
Annexes .....	i

## **Liste des tableaux**

Tableau I : Stations hydrométriques et piézométriques suivies du bassin du Massili à Gonsé ..	7
Tableau II : Spéculations vivrière et de culture de rente dans le bassin du Massili .....	11
Tableau III : liste des carrières et exploitants de carrières dans le Massili à Gonsé .....	12
Tableau IV : Indicateurs de critères de performance.....	35
Tableau V : Taux de lacunes des débits.....	36
Tableau VI : Caractéristiques morphométriques du bassin du Massili à Gonsé.....	36
Tableau VII : Répartition altimétrique du bassin versant de Massili à Gonsé.....	37
Tableau VIII : Calcul des indices de pluies de 1985 à 1997.....	38
Tableau IX : Paramètres déterminés par HEC- GeoHMS .....	40
Tableau X : Périodes de mise en route, de calage et de validation des modèles .....	41
Tableau XI : Liste des paramètres d'entrée du modèle HEC-HMS .....	41
Tableau XII : Récapitulatif des valeurs des paramètres avant et après optimisation .....	42
Tableau XIII : Paramètres calés du modèle GR4J .....	45

## **Liste des figures**

Figure 1 : Carte de localisation du Bassin du Massili à Gonsé .....	6
Figure 2 : Carte du réseau hydrographique du bassin du Massili à Gonsé .....	7
Figure 3 : Carte des sols du bassin du Massili à Gonsé.....	8
Figure 4 : Carte d'occupation du sol du bassin du Massili à Gonsé .....	10
Figure 5 : Processus de transformation de la pluie brute en débit du modèle HEC-HMS .....	21
Figure 6 : Schéma de la structure du modèle GR4J .....	29
Figure 7 : Carte des pentes du bassin du Massili à Gonsé.....	37
Figure 8: Courbe hypsométrique du bassin du Massili à Gonsé .....	38
Figure 9 : Indices des pluies du Massili à Gonsé de 1985 à 1997 .....	39
Figure 10 : Schématisation du bassin versant avec HEC-GeoHMS .....	40
Figure 11 : Hydrogrammes simulé et observé pour le calage du modèle HEC-HMS .....	43
Figure 12 : Résultats du calage du modèle HEC-HMS .....	43
Figure 13 : Hydrogrammes simulé et observé pour la validation du modèle HEC-HMS.....	44
Figure 14 : Résultats de la validation du modèle HEC-HMS .....	45
Figure 15 : Hydrogrammes simulé et observé pour le calage de GR4J .....	46
Figure 16 : Hydrogrammes simulé et observé pour la validation de GR4J .....	46
Figure 17 : Hydrogrammes simulé et observé sur une période humide .....	47
Figure 18 : Résultats de la simulation sur une période humide .....	48
Figure 19 : Hydrogrammes simulé et observé sur une période sèche .....	48
Figure 20 : Résultats de la simulation sur une période sèche .....	49

## **I. Introduction**

Le Burkina Faso à l'instar des pays de l'Afrique de l'Ouest a subi les effets des changements climatiques qui sévissent depuis les années 1970 et qui affectent beaucoup les ressources en eau. A ces maux, s'ajoute la surexploitation des ressources naturelles. Ainsi, la quantité et la qualité de ces ressources posent des problèmes de plus en plus complexes à résoudre, et le sixième Objectif du Développement Durable (ODD) « Garantir l'accès de tous à l'eau et à l'assainissement et assurer une gestion durable des ressources en eau » devient de plus en plus difficile à atteindre.

Le bassin versant du Massili dont l'économie se repose en grande partie sur les ressources en eau ne fait pas exception. En effet, avec une population estimée à 1 524 280 habitants dans ce bassin versant, les défis sont énormes à relever. Le flux migratoire de ce bassin est estimé à 6% (INSD, 2006). En 2011, on dénombrait environ dans le bassin de Massili à Gonsé 112 retenues d'eau dont 57 barrages (4 permanents et 53 temporaires); et 55 lacs dont un seul permanent et 54 lacs temporaires (DGRE/DEIE, 2011). Ce bassin est aussi une zone à forte activité industrielle avec la présence de quelques grandes sociétés telles que ONEA, BRAKINA, SOGEO, etc. La croissance des villes (Ouagadougou et Ziniaré) et le développement des activités entraînent, l'imperméabilisation du bassin qui conduit à une augmentation et une accélération des écoulements et qui ont pour conséquences, des catastrophes naturelles à l'image de l'inondation du 1<sup>er</sup> septembre 2009. Une bonne gestion des ressources en eau s'impose donc pour le développement socio-économique, environnemental et sanitaire du pays. Pour y parvenir l'application d'un modèle hydrologique est nécessaire pour l'utilisation rationnelle des ressources en eau,

C'est dans ce contexte que s'inscrit la présente étude dont le thème est : « **Contribution à la Caractérisation hydrologique du bassin versant du Massili à Gonsé au Burkina Faso à travers une approche multimodèle pluie débit (HEC-HMS, GR4J)** ». L'objectif global de cette étude est de développer un outil de gestion durable des ressources en eau du bassin du Massili à Gonsé. Il s'agira spécifiquement de, (i) évaluer les caractéristiques hydro-géomorphologiques du bassin versant du Massili à Gonsé, (ii) analyser la performance du modèle global GR4J et du modèle semi-distribué HEC-HMS à simuler les écoulements sur le bassin versant du Massili à Gonsé (iii) juger la reproductibilité du modèle le plus performant dans des conditions climatiques différentes.

Pour ce faire le présent rapport est structuré en cinq (5) grandes parties. La première et la

deuxième partie seront consacrées respectivement à l'introduction et à l'état de l'art. La troisième partie concernera le matériel et la méthodologie adoptée pour l'atteinte des objectifs. Quant à la quatrième partie les résultats seront présentés et discutés. Enfin nous tirerons une conclusion et nous reformulerons des recommandations qui ressortent de cette étude.

## **II. Etat de l'art**

### **2.1. Modélisation pluie débit**

#### **2.1.1. Définitions**

- ✓ La modélisation hydrologique est définie comme la représentation simplifiée de tout ou une partie des processus du cycle hydrologique par un ensemble de concepts hydrologiques, exprimés en langage mathématique et reliés entre eux dans des séquences temporelles et spatiales correspondant à celles que l'on observe dans la nature (Mathevet, 2005).
- ✓ Un modèle pluie débit est un outil qui permet de générer à partir des données de pluie, d'évapotranspiration et des caractéristiques du bassin versant, les débits les plus proches possibles à ceux réellement ou potentiellement observables sur ce bassin versant.

#### **2.1.2. But de la modélisation pluie débit**

Dans la plupart des cas comme le nôtre, il y'a insuffisance de données de débits tandis que les données pluviométriques sont généralement disponibles ; la modélisation hydrologique permet de reconstituer ces données manquantes. De plus elle permet d'avoir des connaissances bien fondées sur les processus intervenants dans le cycle de l'eau et de prévoir des risques de crues et d'étiages dans les projections futures.

Il existe dans la littérature de nombreux modèles hydrologiques dont chacun possède sa spécificité et son domaine d'application. Une fois le modèle choisi, il faut évaluer sa capacité à représenter la réalité. Les modèles sont classés selon les critères suivants (AMIAR, 2014) :

#### **2.1.3. Classification des modèles selon la représentation spatiale**

##### **➤ Modèle global**

Ce type de modèle considère le bassin comme une seule entité. Les valeurs des paramètres sont considérées comme homogènes dans la zone.

##### **➤ Modèle distribué**

C'est un modèle qui subdivise le bassin versant à l'aide des critères hydrologiques en plusieurs entités spatiales. Les paramètres hydrologiques peuvent varier d'une entité à

l'autre. Il est efficace parce qu'il permet de déterminer les caractéristiques hydrologiques à l'intérieur du bassin versant.

➤ **Modèle semi-distribué**

Le fonctionnement de ce modèle est similaire au modèle distribué. La différence est qu'il regroupe les entités spatiales du modèle distribué en sous bassins versants.

**2.1.4. Classification des modèles selon le lien entre les entrées et les sorties**

➤ **Modèle déterministe**

Un modèle est dit déterministe si aucune de ses grandeurs n'est considérée comme aléatoire. La plupart des modèles hydrologiques sont déterministes ils supposent que le système conduit, pour un ensemble d'évènements donnés, à une issue unique. Ils sont donc caractérisés par l'unicité de leur réponse à une sollicitation extérieure. Les données d'entrée sont parfaitement définies.

➤ **Modèle stochastique**

C'est un modèle dont les variables d'entrée sont considérées comme des variables aléatoires caractérisées par des fonctions de densités de probabilités. Toute solution particulière n'est qu'une réalisation d'un ensemble de solutions possibles. L'avantage de tels modèles est que l'incertitude sur les données d'entrée se reflète sur les résultats de la modélisation.

**2.1.5. Classification des modèles selon la description des processus**

➤ **Modèle empirique**

Ce modèle établit une relation entre la variable simulée et d'autres variables sur la base d'une série d'expériences ou d'une série de données historiques. Il est construit autour des relations mathématiques directes établies entre les entrées et les sorties.

➤ **Modèle à base physique**

Le modèle à base physique est basé uniquement sur des équations aux dérivées partielles établies à partir des lois physiques que l'on considère impliquées dans les transferts. Il n'existe pas de modèle à base physique au sens strict en hydrologie.

➤ **Modèle conceptuel**

C'est un modèle basé sur une schématisation simplifiée de la réalité. En effet il intègre des facteurs complexes en essayant de décrire le concept physique du comportement du système par une représentation plus simple et traite le bassin versant comme un ensemble de réservoirs interconnectés.

### **2.1.6. Classification des modèles selon la discétisation temporelle**

#### ➤ **Modèle évènementiel**

Ce modèle vise à reproduire la réponse du bassin versant lors d'un épisode pluvieux. Il n'est actif qu'au moment des pluies et nécessite de pouvoir préciser l'état initial du bassin en fonction des conditions climatiques antécédentes.

#### ➤ **Modèle continu**

Il permet de suivre l'évolution des variables à long terme. Dès lors, certains processus ne peuvent plus être négligés dans les modèles continus en particulier l'évapotranspiration. Ce modèle nécessite donc des variables supplémentaires par rapport au modèle évènementiel pour expliquer l'évolution des stocks d'eau sur le bassin pour une ou plusieurs années hydrologiques.

### **2.1.7. Synthèse de quelques études hydrologiques menées dans la zone**

Le bassin de Massili à Gonsé a suscité beaucoup d'intérêt vu les études qui ont été menées dans la zone. Nous en distinguons quelques-unes réalisées :

- ✓ (Tie & Girard, 1998) a proposé une nouvelle approche qui tente d'intégrer la variabilité spatio-temporelle pour l'estimation de la pluie journalière en application sur le bassin de Massili. Le mode de calcul s'appuie dans une première phase sur une discrétisation spatiale du domaine en mailles carrées emboîtées, de tailles variables pour délimiter les aires d'influence. Puis la pluie spatiale d'un poste s'estime en fonction des enregistrements ponctuels au niveau dudit poste et de ceux des stations voisines suivant des critères basés sur les conditions climatiques de la région.
- ✓ (Nguetora et al., 2000) a utilisé des outils modernes (SIG et Powersim) d'aide à la gestion des ressources en eau dans le bassin de Massili. Le but est de remplacer l'approche traditionnelle d'estimation des paramètres hydrologiques par un logiciel de simulation du comportement d'un réseau de nœuds et de mailles (Powersim).
- ✓ (OUANDAOGO, 2008) dans sa thèse a fait un état de la ressource en eau souterraine et de sa vulnérabilité dans les zones périphériques de la ville de Ouagadougou, qui sont confrontées aux problèmes d'alimentation en eau, en quantité et surtout en qualité. Des outils hydrogéochimiques ont été utilisés permettant de comprendre la complexité des aquifères du socle de Ouagadougou, leur fonctionnement et d'identifier la pollution au niveau des eaux de puits.
- ✓ Par les études de thèse de (Diallo, 2014), l'importance de la crue fluviale pour les

écosystèmes et pour les populations riveraines dans le bassin du Nakanbé a été démontrée. Pour ce faire une partie de l'étude a été réalisée dans le bassin de Massili qui est un sous bassin versant du Nakanbé. Il s'agit spécifiquement de montrer l'importance socio-économique des ressources, d'évaluer les impacts des barrages sur le régime d'écoulement et de déterminer les besoins en eau des écosystèmes humides qui, s'ils sont pris en compte dans un modèle d'allocation de l'eau, permettraient de parvenir à une meilleure gestion de l'eau au niveau du bassin.

Les chercheurs sont souvent confrontés au manque de données de débits de longue durée dans le bassin du Massili à Gonsé. Vu ces difficultés, les modèles étudiés dans le présent rapport permettent d'estimer raisonnablement les débits.

### **III. Matériel et méthodes**

#### **3.1. Présentation de la zone d'étude**

##### **3.1.1. Situation géographique et localisation**

Le bassin versant du Massili limité à la station de Gonsé est situé entre les longitudes 1°15'W et 1°55'W et les latitudes 12° 17' N et 12° 50' N (Figure 1). Il est caractérisé par une dénivelé d'une centaine de mètres. Le lit majeur s'étend jusqu'à 150 m de largeur en période de crue et le lit mineur est de 3m en période d'étiage. Sa superficie est d'environ 2640 Km<sup>2</sup> et couvre les régions du Centre, du Plateau Central et du Centre Ouest.

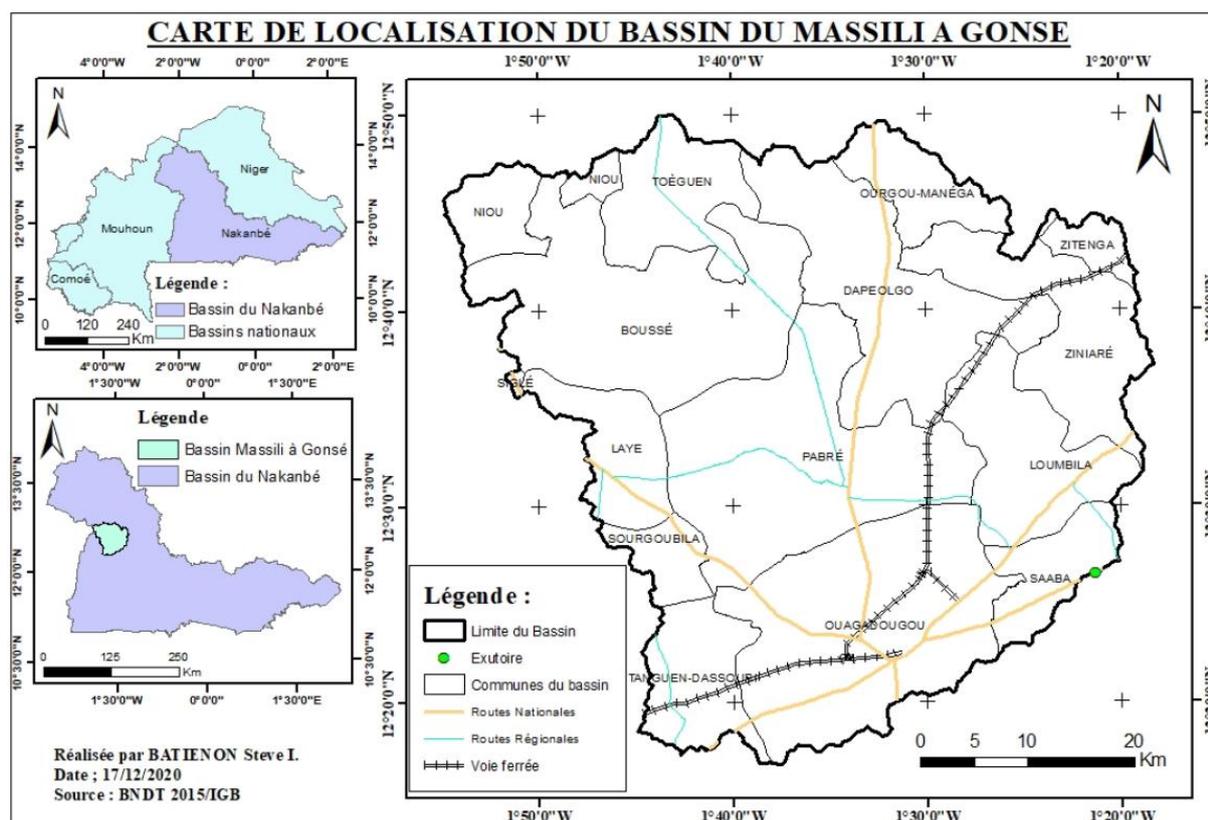


Figure 1: Carte de localisation du Bassin du Massili à Gonsé

### 3.1.2. Réseau hydrographique

Le Massili draine trois affluents en sa rive droite. Le premier affluent prend sa source plus au Sud après la mare de Bazoulé et draine des marigots de la région du Centre dont les principaux sont le thalweg de Boulmigou et le marigot temporaire du Nabaouli. Sur le lit de ce dernier, sont réalisés les barrages de Ouaga 1, 2 et 3, qui constituent le réceptacle d'une partie des eaux pluviales de la ville. Le deuxième affluent constituant le bras médian sur lequel est construit le barrage de Gaskay et le troisième affluent moins marqué plus au nord sur lequel est construit le bouli de Sandogo.

Après avoir drainé ces 3 affluents en sa rive droite le Massili reçoit ensuite les eaux de Loumbila en sa rive gauche à Gonsé ; continue ensuite sa course pour rejoindre le Nakanbé en sa rive droite après avoir traversé Saaba et Nagreongo, en aval du barrage de Ziga (Figure 2).

A ce réseau hydrographique correspond un réseau hydrométrique et piézométrique mis en place par les agences et institutions de suivi des ressources en eau (Tableau I)

Tableau I : Stations hydrométriques et piézométriques suivies du bassin du Massili à Gonsé

Stations	Année de mise en service	type	coordonnées	
			X	Y
Loumbila	1992	Hydrométrique	01°24'05"W	12°29'34"N
Barrage N°3	1992	Hydrométrique	01°33'20"W	12°23'04"N
Gonsé	1975	Hydrométrique	01° 19'W	12°28'N
Bassenko	1984	Piézométrique	01°38'10"-W	12°23'30"-N

Source : (DGRE/DEIE, 2011)

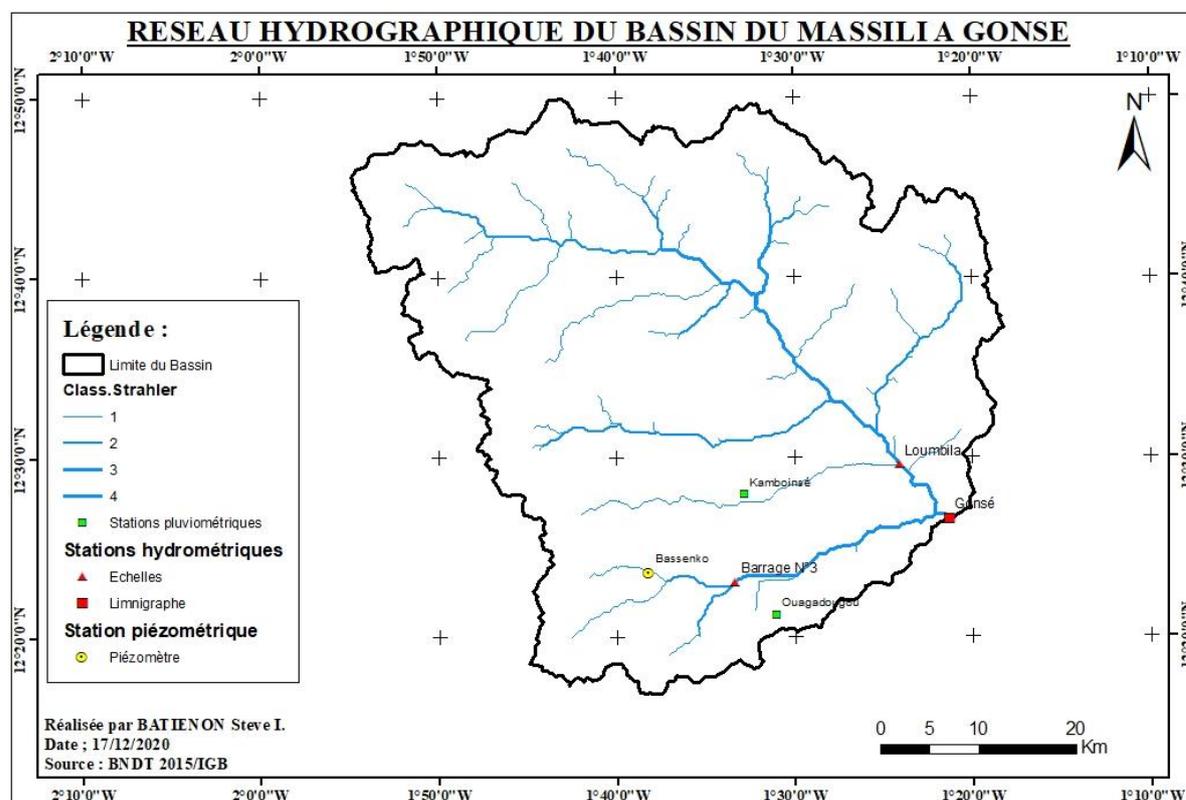


Figure 2 : Carte du réseau hydrographique du bassin du Massili à Gonsé

### 3.1.3. Caractéristiques climatiques du bassin du Massili

Le bassin versant du Massili est situé dans la zone climatique de type Nord Soudanien (Fontès & Guinko, 1995) où la pluviométrie varie entre 700 et 900 mm avec des saisons sèches de 6 à 7 mois. En dépit de l'apparent regain pluviométrique de ces dernières années, la plupart des

estimations et simulations climatiques montrent une tendance générale à la baisse avec une importante variabilité interannuelle. Les maxima des précipitations se situent entre août et septembre. Les températures sont assez élevées et varient d'un minimum journalier de 16°C en Décembre à un maximum de 40°C en mars et avril.

### 3.1.4. Géologie et pédologie

Le sous bassin du Massili repose sur un substratum imperméable granito-gneissique précambrien qui est recouvert par endroit d'une couche épaisse d'altération latéritique. Sa partie Nord est prédominée par le granite syntectonique à texture porphyroïde. D'où, aucun espoir des nappes souterraines de grande importance (causé par les matériaux en décomposition). Son relief est composé de vieux matériaux rigides appelés socles anciens et des buttes latéritiques accidentant le paysage dans le Nord-Est et le Nord-Ouest du pays. On y rencontre principalement les sols argileux, les sols ferrugineux et les sols gravillonnaires (Figure 3)

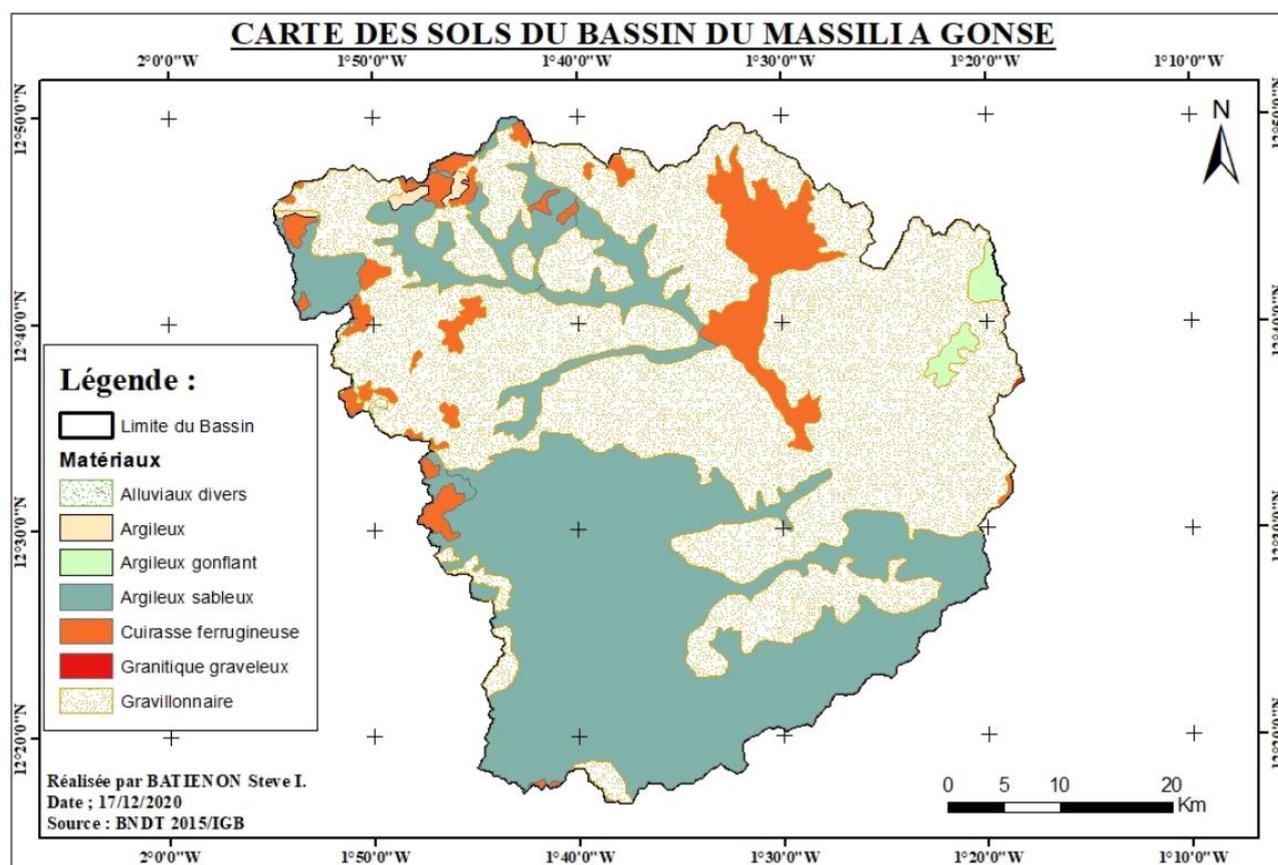


Figure 3 : Carte des sols du bassin du Massili à Gonsé

### 3.1.5. Configuration administrative et territorialité du bassin

Le Massili Supérieur, s'étend sur 3 régions administratives.

#### ➤ La Région du Centre

Elle couvre six communes administratives (la commune urbaine de Ouagadougou et les communes rurales de Saaba, Tanghin Dassouri, Koubri, Komsilga et Pabré) de la province du Kadiogo

➤ **La Région du Plateau Central**

Elle couvre six (06) communes (Ziniaré, Zitenga, Nagreongo, Ourgou Manega, Dapelogo et Loumbila) de la province d'Oubritenga et cinq (05) communes (Boussé, Niou, Toéghin, Laye et Sourgoubila) de la province de Kourwéogo

➤ **La Région du Centre Ouest,**

La province concernée est le Boulkiemdé très partiellement représentée par une petite partie de la commune rurale de Siglé.

### **3.1.6. Population et dynamique humaine**

Dans le bassin versant de Massili il apparait que les communes les plus densément peuplées sont celles de la province du Kadiogo ou certaines communes rurales (Saaba, Tanghin Dassouri). Elles sont plus peuplées que les communes urbaines de l'Oubritenga et du Kourwéogo. Plus généralement les densités de population pour les provinces de l'Oubritenga, du Kourwéogo et du Kadiogo sont respectivement 80,75 hab/km<sup>2</sup>, 88,30 hab/km<sup>2</sup> et 407,75 hab/km<sup>2</sup> (INSD, 2006). Ces densités sont très supérieures à la moyenne nationale (50 hab./km<sup>2</sup>). Les principales langues parlées sont le Mooré (83,7%) le fulfuldé (2,4%) le bissa (1,2%), le dioula (2,9%) et le français (5,3%). (INSD, 2006).

La population du bassin est très dynamique vu le flux migratoire de cette entité (5160 hab/an) montrant l'évolution de l'occupation du sol du bassin (Figure 4).

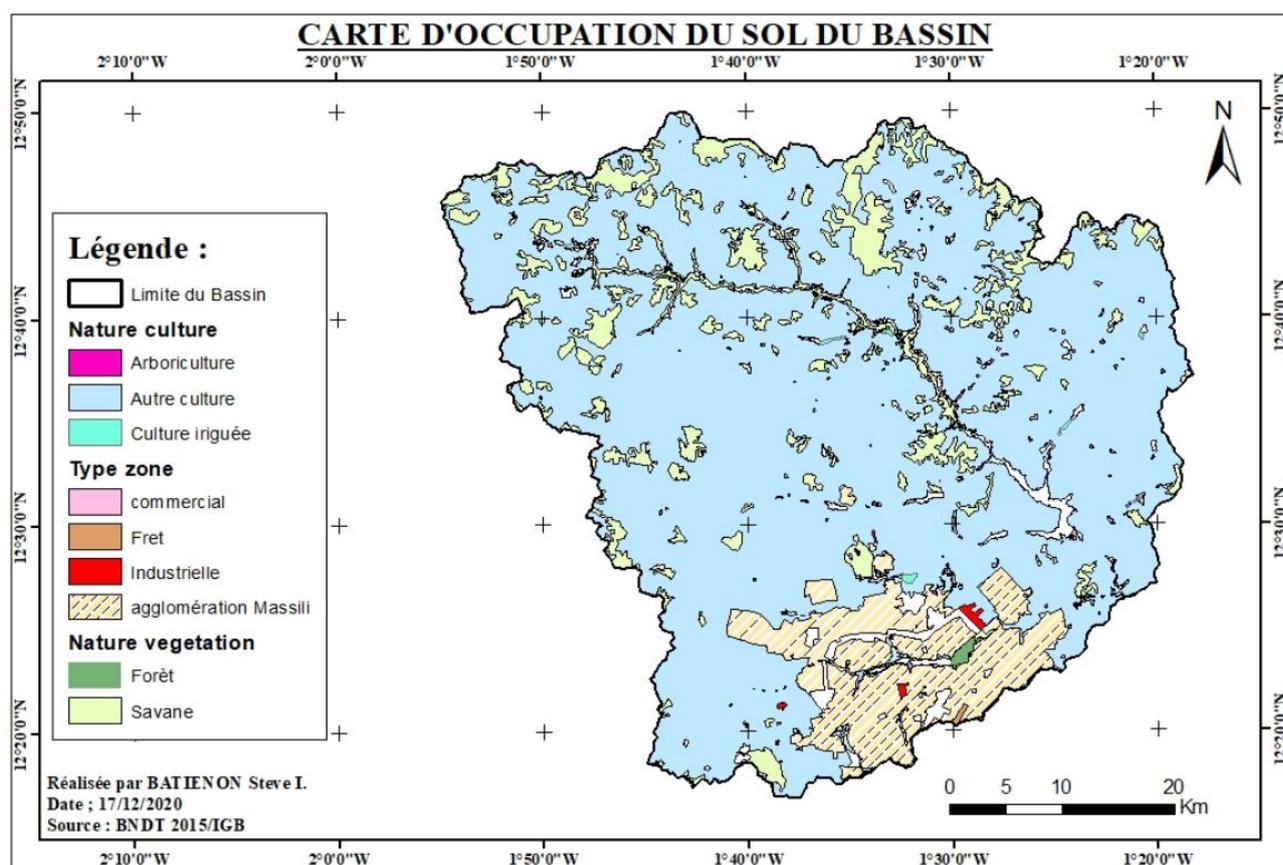


Figure 4 : Carte d'occupation du sol du bassin du Massili à Gonsé

### 3.1.7. Activités économiques

#### ➤ Activités agricoles et pastorales

La partie centrale du pays à forte concentration humaine est caractérisée par la prépondérance des cultures vivrières (Tableau II) et la forte poussée du maraîchage/agriculture le long des berges des retenues d'eau des communes du bassin. En 1996, il a été dénombré dans la ville de Ouagadougou 48 sites agricoles regroupés en 18 zones et couvrant une superficie maximale (toute saison confondue) de 178,78 ha, alors qu'en 2009, on comptait sur l'ensemble des secteurs de la ville, 62 sites maraîchers répartis en 26 zones et couvrant une superficie de 561,95 ha. Lorsqu'on ajoute l'inventaire des villages périphériques qui mettent en œuvre cette activité, notamment les villages de Kamboinsè et de Doumtenga (proche de Loumbila), le nombre de sites maraîchers s'élève à 71 sites maraîchers pour 28 zones et une superficie de 581,81 ha pour la seule commune de Ouagadougou. En 13 ans, la superficie maraîchère à Ouagadougou a augmenté de plus de 225 % (elle a plus que triplé).

Tableau II : Spéculations vivrière et de culture de rente dans le bassin du Massili

Localités	Terres aménagées par spéculation céréalière en Ha (campagne 2009/2010)					Terres aménagées par culture de rente en Ha (campagne 2009/2010)		
	Mil	Maïs	Riz	Sorgho blanc	Sorgho rouge	Coton	Arachide	Sésame
<b>Kadiogo</b>	22 587	4 864	1 250	18008	10 796	564	7079	926
<b>Oubritenga</b>	26 976	4 494	835	21 462	14740		6 005	1 356
<b>Kourweogo</b>	15 920	718	945	13 125	2 837		2 588	285
<b>Boulkiemde</b>	39 414	3 345	807	63 668	20 487		21 459	
<b>Massili à Gonsé</b>	104 897	13 421	3 837	116 263	48 860	564	37 131	2 567
<b>Burkina</b>	1 255 085	585230	92 243	1 286 587	366528	406 278	458222	93 384

Source : (Soulama et al., 2013)

L'élevage est peu développé dans le bassin. En effet en dehors de la commune de Ouagadougou où il se résume à un petit élevage de type sédentaire, l'élevage se positionne comme la seconde activité occupant les populations après l'agriculture dans les autres communes du bassin et prend les caractéristiques d'un élevage extensif.

#### ➤ Activités de pêche et de foresterie

La pêche se pratique de façon traditionnelle sur les sites des principales retenues du bassin. La province de l'Oubritenga est la plus grande pourvoyeuse de poissons (plus de 50%) avec le barrage de Loumbila comme le plus grand site de pêche. Elle est succédée par la province du Kadiogo dont les sites de pêche sont les barrages N°1, N°2, et N°3 de Ouagadougou.

L'implication des privés et des collectivités dans le secteur de la foresterie dans le bassin est à un stade embryonnaire. Les plus grands aménagements forestiers sont du domaine de l'Etat. Il s'agit notamment de la forêt classée du barrage (240 ha) et la forêt classée de Gonsé (6000 ha avec un plan d'aménagement et des gestions couvrant la période 2004-2018). Il existe de plus en plus des initiatives essentiellement communautaires soutenues par le secrétariat permanent des engagements nationaux et son programme 8000 villages 8000 forêts. Toutes les communes disposent chacune d'une forêt communale, la région du Plateau Central dispose d'une forêt régionale.

#### ➤ Activités industrielles et minières

Le territoire du bassin versant du Massili est une zone à forte activité industrielle, c'est lui qui porte la totalité des zones et unités industrielles de la ville de Ouagadougou. Les

industries manufacturières de la zone industrielle de Kossodo, les plus connues et ayant des rapports directs avec les ressources en eau sont ONEA, BRAKINA, et SOGEAO. Cependant sur les 234 industries manufacturières répertoriées par la Direction Générale de l'Industrie du Ministère en charge de l'industrie, seulement une petite moitié (115 industries) n'est pas dans la commune de Ouagadougou. Parmi ces industries manufacturières dans le bassin, nous dénombrons des brasseries, des unités de fabrication de jus ou autres types de boissons, des unités de production d'eau minérale ou de distribution d'eau y compris l'ONEA.

L'activité minière n'est pas développée dans le bassin, cependant d'importantes carrières ont été ouvertes par les entreprises de travaux publics. Les plus importantes carrières du bassin sont listées dans le (Tableau III).

Tableau III : liste des carrières et exploitants de carrières dans le Massili à Gonsé

Société/Entreprise	Localisation	Superficie (m <sup>2</sup> )	Substance
AZIMO	Yagma/Kadiogo	50186,4	Granite
FADOUL Technibois	Pousziga Oubritenga	292000	Granite
	Bazoulé/Kadiogo	150000	
Compaoré T Félix	Yimdi/Kadiogo	35250	Granite
Oumarou Kanazoé	Yagma zone B Kadiogo	125117	Granite
Compagnie de Transport et de Commerce	Nomgana/oubritenga	600000	Granite
Société des Pierres Naturelles du Faso	Yimdi/Kadiogo	85900	Latérite
	Laye/Kourweogo	30000	Latérite
Kanazoé Frères	Manegsombo/Kadiogo	140000	Granite
Société des Carrière du Burkina Faso	Pissi/Kadiogo	95000	Granite
Globex Construction	Gonsé/Saaba/Kadiog	562300	Granite

Source : (Soulama et al., 2013)

#### ➤ Activités de tourisme et de loisir

Plusieurs sites touristiques existent dans le bassin. Cependant pour les besoins du présent diagnostic nous nous intéressons aux sites à caractère éco touristique. En plus des sites traditionnellement connus comme la mare aux crocodiles de Bazoulé à Tanghin Dassouri, des espaces récréatifs sont de plus en plus aménagés et contribuent à animer et faire évoluer le secteur du tourisme et des loisirs.

Les cas les plus illustratifs sont le Loumbila Beach aménagé à titre privé à la périphérie du barrage de Loumbila, le Parc Bangréweogo en aval du barrage N°3 de Ouagadougou.

Par ailleurs la quasi-totalité des plans d'eau de l'espace sont des sites potentiels de la pratique de la pêche de loisir.

### **3.2. Matériel**

#### **3.2.1. Collecte de données**

Dans le cadre de cette étude, la base de données constituée renferme des données provenant de différentes sources. Ce sont essentiellement des données hydrométriques, climatiques, cartographiques, le MNT, et le CN grid.

##### ➤ **Les données hydrométriques**

Ces données ont été obtenues auprès de la DEIE qui est une des directions techniques de la DGRE. Elles concernent une série de débits de 13 ans (de 1985 à 1997) à pas de temps journalier de la station hydrométrique de Gonsé. Par ailleurs ces données sont entachées de lacunes que nous comblerons par la suite.

##### ➤ **Les données climatiques**

Ces données ont été fournies par l'ANAM et proviennent de la station synoptique de Ouagadougou et de la station pluviométrique de Kamboinsé. Elles comprennent les valeurs de précipitations (en mm), de l'évapotranspiration potentielle (en mm) et sont au pas de temps journalier. Elles couvrent la période de 1985 à 1997, soit une durée de 13 ans.

##### ➤ **Les données cartographiques ;**

Elles ont été fournies par l'IGB qui est un établissement public à caractère administratif chargé de la conception, la mise en œuvre et le suivi de la politique nationale en matière de cartographie. Ce sont essentiellement des données vectorielles sous forme de « **shapefile** » provenant de la BNDT,2015.

##### ➤ **Le MNT ;**

Le modèle numérique de terrain (MNT) est du type ASTER GDEM de résolution 30 m. Il a été obtenu sur le site de l'USGS (<https://earthexplorer.usgs.gov/>).

##### ➤ **Le CN grid**

Le CN grid est une grille de numéros de courbes où chacun correspond à une utilisation de sol différente. Plus le numéro est élevé plus le ruissellement est grand. Sa valeur varie entre 100 (surface d'eau) et 30 pour des sols très perméables à haut potentiel d'infiltration. Le CN grid a été obtenu grâce aux données sur l'occupation des sols et les types de sols. Ces données proviennent de la BDOT de l'IGB.

### **3.2.2. Choix des modèles**

Le choix d'un modèle hydrologique n'est pas aisé pour les scientifiques vu sa grande diversité. Pour une meilleure application donnée, il est nécessaire d'effectuer le choix en fonction des objectifs de l'étude et de quelques critères qui sont les suivants :

- ✓ La disponibilité des données,
- ✓ Les possibilités de simulation,
- ✓ La facilité d'utilisation avec des interfaces conviviales,
- ✓ La complexité du modèle, avec plus ou moins de paramètres d'entrée,
- ✓ Le coût du modèle et l'équipement nécessaire pour son bon fonctionnement

Dans le cas de notre étude, nous avons choisi le HEC-HMS (modèle semi-distribué), et le GR4J (modèle global) pour comprendre la réponse hydrologique de chaque type de modèle sur le bassin versant. Les raisons qui nous ont poussées à faire ce choix sont les suivantes :

- ✓ Le HEC-HMS possède une diversité de formalismes pour son application. En effet, il intègre les différents paramètres caractérisant les écoulements et le bassin versant. HEC-HMS permet à l'utilisateur de choisir la combinaison modulaire de son choix en fonction de ses données, ses objectifs mais surtout de son expérience. En plus c'est un logiciel gratuit avec une interface conviviale dont le renseignement des données d'entrée est simple.
- ✓ Le modèle GR4J est un modèle adapté pour les régions arides et semi-arides. Il est le plus souvent appliqué pour la gestion et l'exploitation rationnelle des ressources en eau. Nous avons utilisé la version de GR4J implémentée dans le logiciel R avec le package AirGR. C'est un package souple (permet l'acceptation de critères d'efficacité ou d'algorithmes d'optimisation définis par l'utilisateur), simple à utiliser (à travers l'exemple d'utilisation de R) avec des possibilités de modification du code source.

### **3.2.3. Logiciels utilisés**

Les logiciels utilisés lors de cette étude à l'exception des modèles hydrologiques et du logiciel R sont Arcgis 10.4.1 (avec ses extensions Arc-hydro-tools, et HEC-GeoHMS), Excel et Word. En effet Le logiciel Arcgis 10.4.1 nous permettra de réaliser la cartographie de la zone d'étude, et éventuellement d'autres cartes qui permettront de caractériser l'environnement du bassin versant. Une de ses extensions Arc-hydro-tools sera utilisée pour délimiter le bassin versant et déterminer ses caractéristiques physiques. Une autre HEC-GeoHMS est spécialement élaboré pour préparer l'importation du modèle à HEC-HMS, il fonctionne en couplage avec Arc-hydro-

tools.

Quant aux logiciels Excel et Word, ils seront utilisés respectivement pour le traitement de certaines données et le traitement de texte.

### 3.3. Méthodes

#### 3.3.1. Comblement des données

Les données hydro-climatiques utilisées pour la modélisation hydrologique couvrent la 1985 à 1997. Parmi ces données les débits présentent des lacunes, nécessitant ainsi d'être comblés pour le calage et la validation des modèles. De ce fait nous allons utiliser la méthode de Laborde & Mouhous, (1998) par la technique de « **bouche trou** » qui à travers l'ACP permet de combler les lacunes pour une matrice contenant à la fois des valeurs mesurées et des lacunes. C'est la méthode utilisée dans le logiciel Hydrolab et elle prend en compte le maximum d'information de base des données des différentes variables.

L'ACP est une méthode de statistique multivariée. A l'origine, c'est une méthode descriptive permettant de réduire la taille de l'ensemble de l'information apportée par les variables d'origine en un nombre réduit de nouvelles variables qui sont des indices synthétiques.

Ces nouvelles variables (les composantes principales) ont les caractéristiques suivantes :

- ✓ Elles apportent un pourcentage d'explication décroissant ;
- ✓ Elles sont indépendantes entre elles (les composantes sont orthogonales) ;

L'ACP. est un outil de travail particulièrement performant en hydrologie lorsque les problèmes exigent un regroupement de variables. L'une des utilisations des ACP. est la reconstitution des données manquantes. La procédure est la suivante :

#### ➤ **Ecriture de la matrice [X] :**

Les données des variables de la matrice [X] sont classées par colonne. Dans le cas de notre étude, ces données sont les débits par année.

$$[X] = \begin{bmatrix} x_{1,1} & \text{Lacune} & x_{1,3} & x_{1,4} & \cdots & x_{i,j} \\ x_{2,1} & x_{2,2} & x_{2,3} & x_{2,4} & \cdots & x_{2,j} \\ \text{Lacune} & x_{3,2} & x_{3,3} & x_{3,4} & \cdots & x_{3,j} \\ x_{4,1} & x_{4,2} & \text{Lacune} & \text{Lacune} & \cdots & x_{4,j} \\ x_{5,1} & \text{Lacune} & x_{5,3} & x_{5,3} & \cdots & \text{Lacune} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{i,1} & x_{i,2} & x_{1,2} & x_{1,2} & \cdots & x_{i,j} \end{bmatrix}$$

- **Détermination des moyennes expérimentales,  $M_x(j)$  et des écart-types expérimentaux,  $\sigma_x(j)$  des variables  $j$  et sur les seules années réellement observées**

$$[M_x] = [M_{x,1} \quad M_{x,2} \quad M_{x,3} \quad M_{x,4} \quad \dots \quad M_{x,j}]$$

$$[\sigma_x] = [\sigma_{x,1} \quad \sigma_{x,2} \quad \sigma_{x,3} \quad \sigma_{x,4} \quad \dots \quad \sigma_{x,j}]$$

- **Matrice centrée réduite des valeurs réellement observées :  $u_{i,j} = \frac{x_{i,j} - M_{x,j}}{\sigma_{x,j}}$**

$$[u] = \begin{bmatrix} u_{1,1} & \text{Lacune} & u_{1,3} & u_{1,4} & \dots & u_{i,j} \\ u_{2,1} & u_{2,2} & u_{2,3} & u_{2,4} & \dots & u_{2,j} \\ \text{Lacune} & u_{3,2} & u_{3,3} & u_{3,4} & \dots & u_{3,j} \\ u_{4,1} & u_{4,2} & \text{Lacune} & \text{Lacune} & \dots & u_{4,j} \\ u_{5,1} & \text{Lacune} & u_{5,3} & u_{5,3} & \dots & \text{Lacune} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ u_{i,1} & u_{i,2} & u_{1,2} & u_{1,2} & \dots & u_{i,j} \end{bmatrix}$$

- **pour chaque observation, la moyenne des valeurs centrées réduites disponibles :**

$$\overline{u_j} = \begin{bmatrix} u_{1,} \\ u_{2,} \\ u_{2,} \\ u_{4,} \\ u_{5,} \\ \vdots \\ u_{i,} \end{bmatrix}$$

- **Nous remplaçons chaque valeur inconnue  $x_{i,j}$  par une valeur  $x_{e0(i,j)} = M_{x,j} +$**

$$\sigma_{x,j} * \overline{u_j}$$

$$[X_0] = \begin{bmatrix} x_{1,1} & \mathbf{x_{e0(1,2)}} & \mathbf{x_{e0(1,3)}} & x_{1,4} & \dots & x_{i,j} \\ x_{2,1} & x_{2,2} & x_{2,3} & x_{2,4} & \dots & x_{2,j} \\ \mathbf{x_{e0(3,1)}} & x_{3,2} & x_{3,3} & x_{3,4} & \dots & x_{3,j} \\ x_{4,1} & x_{4,2} & \mathbf{x_{e0(4,3)}} & \mathbf{x_{e0(4,4)}} & \dots & x_{4,j} \\ x_{5,1} & \mathbf{x_{e0(5,2)}} & x_{5,3} & x_{5,3} & \dots & \mathbf{x_{e0(5,j)}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{i,1} & x_{i,2} & x_{1,2} & x_{1,2} & \dots & x_{i,j} \end{bmatrix}$$

Nous effectuons une ACP sur cette matrice  $[X_0]$  et nous obtenons les moyennes  $M_{x0}(j)$ , les

écart-types  $\sigma_{x0}(j)$ , les valeurs propres  $\lambda_{0i}$ , les vecteurs propres unitaires  $V_{0i}$  associés à chaque valeur propre, et les projections des observations  $C_{0i}$  sur k premières composantes principales pouvant avoir une signification physique.

Il est recommandé de retenir que les composantes qui présentent une structure spatiale ( $k=3$ )

$$[M_{x0}] = [M_{x0,1} \quad M_{x0,2} \quad M_{x0,3} \quad M_{x0,4} \quad \dots \quad M_{x0,j}]$$

$$[\sigma_{x0}] = [\sigma_{x0,1} \quad \sigma_{x0,2} \quad \sigma_{x0,3} \quad \sigma_{x0,4} \quad \dots \quad \sigma_{x0,j}]$$

$$V_0 = \begin{bmatrix} V_{0(1,1)} & V_{0(1,2)} & \dots & \dots & V_{0(1,j)} \\ V_{0(2,1)} & V_{0(2,2)} & \dots & \dots & V_{0(2,j)} \\ V_{0(3,1)} & V_{0(3,2)} & \dots & \dots & V_{0(3,j)} \end{bmatrix} \quad C_0 = \begin{bmatrix} C_{1,1} & C_{1,2} & C_{1,3} \\ C_{2,1} & C_{2,2} & C_{2,3} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ C_{i,1} & C_{i,2} & C_{i,3} \end{bmatrix}$$

➤ **Estimation pour chaque observation manquante  $x_{i,j}$  une nouvelle valeur**

$$x_{e1(i,j)} = M_{x0}(j) + \sigma_{x0}(j) * (C_{i,1} * V_{0(1,j)} + C_{i,2} * V_{0(2,j)} + C_{i,3} * V_{0(3,j)}).$$

$x_{e1(i,j)}$  est une meilleure estimation que  $x_{e0(i,j)}$  parce qu'elle tient compte des observations aux autres variables. Nous obtenons alors une matrice  $[X_1]$  :

$$[X_1] = \begin{bmatrix} x_{1,1} & x_{e1(1,2)} & x_{e1(1,3)} & x_{1,4} & \dots & x_{1,j} \\ x_{2,1} & x_{2,2} & x_{2,3} & x_{2,4} & \dots & x_{2,j} \\ x_{e1(3,1)} & x_{3,2} & x_{3,3} & x_{3,4} & \dots & x_{3,j} \\ x_{4,1} & x_{4,2} & x_{e1(4,3)} & x_{e1(4,4)} & \dots & x_{4,j} \\ x_{5,1} & x_{e1(5,2)} & x_{5,3} & x_{5,3} & \dots & x_{e1(5,j)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{i,1} & x_{i,2} & x_{1,2} & x_{1,2} & \dots & x_{i,j} \end{bmatrix}$$

Nous recommençons alors l'ACP sur la matrice  $[X_1]$  permettant d'obtenir de nouvelles matrices  $M_{x1}$ ,  $\sigma_{x1}$ ,  $V_1$ , et  $C_1$  d'où l'on tirera de nouvelles estimations de  $x_{e2(i,j)}$ . Le calcul est répété jusqu'à ce que la matrice soit stabilisée. Les valeurs manquantes sont ainsi déterminées.

### 3.3.2. Caractérisation hydro-géomorphologique du bassin versant

➤ **Délimitation du bassin versant**

Le bassin versant en un point ou plus précisément dans une section droite d'un cours d'eau est défini comme la surface topographique drainée par ce cours d'eau et ses affluents à

l'amont de ladite section. Tous les écoulements prenant naissance à l'intérieur de cette surface doivent traverser la section droite considérée pour suivre leur trajet vers l'aval. En d'autres termes, il s'agit d'un domaine dans lequel tous les écoulements des eaux convergent vers un même point dénommé exutoire de ce bassin. La limite du bassin est tracée suivant les lignes de crêtes et ne traverse le cours d'eau qu'au droit de son exutoire. La délimitation a été faite à l'aide du logiciel Arcgis 10.4.1 (extension Arc-Hydro-Tools)

➤ **La superficie**

Elle traduit l'emprise du bassin et elle influence beaucoup sur le débit car plus la surface est importante, plus la quantité d'eau que récolte le bassin est importante.

➤ **La forme du bassin versant**

La forme du bassin versant est caractérisée par son coefficient de Gravelius ( $K_G$ ). En effet, plus ce coefficient est supérieur à 1, plus le bassin versant est allongé. La forme du bassin versant affecte le temps de concentration car plus il est allongé, plus le temps mis par l'eau pour arriver à l'exutoire est long. Le Coefficient de Gravelius se détermine par l'Équation 1.

<p>Équation 1 :</p> $K_G = \frac{P}{2\sqrt{\pi S}}$	<p><math>K_G</math> : Coefficient de Gravelius  <math>P</math> : Périmètre du bassin en km  <math>S</math> : Superficie du bassin en km<sup>2</sup></p>
---	---

➤ **Longueur et largeur du rectangle équivalent**

C'est un rectangle assimilé au bassin versant, qui la même superficie, le même indice de compacité et la même distribution hypsométrique que le bassin. Sa longueur et sa largeur se calculent respectivement par les équations 2 et 3.

<p>Équation 2 :</p> $L = S^{\frac{1}{2}} \times \left( \frac{K_G}{1,128} \right) \times \left[ 1 + \left( 1 - \left( \frac{1,128}{K_G} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \right]$	<p><math>L</math> : longueur du rectangle équivalent en km  <math>l</math> : largeur du rectangle équivalent en km</p>
<p>Équation 3 :</p> $l = S^{\frac{1}{2}} \times \left( \frac{K_G}{1,128} \right) \times \left[ 1 - \left( 1 - \left( \frac{1,128}{K_G} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \right]$	<p><math>K_G</math> : Coefficient de Gravelius  <math>S</math> : Superficie du bassin en km<sup>2</sup></p>

➤ **Densité de drainage**

Elle est définie comme étant la longueur totale de tous les talwegs d'ordre  $i$  à  $n$  " $L_i$ ", rapportée à la surface totale " $S$ " du bassin. Elle caractérise l'état du couvert végétal, du relief et du sol. En général, des faibles densités de drainage sont souvent caractéristiques aux régions où le sol et le sous-sol sont fortement perméables, où la couverture végétale est dense et où le relief est faible Mardhel et al., (2020). Dans les conditions inverses, on rencontre le plus souvent des densités très élevées. Elle est donnée par l'Équation 4

<p>Équation 4 :</p> $D_d = \frac{\sum_{i=1}^n L_i}{S}$	<p><math>D_d</math> : Densité de drainage en km/km<sup>2</sup>,  <math>S</math> : Superficie du bassin versant en km<sup>2</sup>,  <math>\sum_{i=1}^n L_i</math> : Longueur totale de tous les talwegs en km</p>
--	--

➤ **Détermination de la courbe hypsométrique.**

Elle permet d'expliquer la forme du relief du bassin versant. Elle change avec le temps, au fur et à mesure que le bassin est consommé par l'érosion. Pour l'obtenir on procède d'abord à la répartition des superficies partielles du bassin par tranche d'altitude et les surfaces cumulées ramenées en pourcentage (Tableau VII).

La courbe hypsométrique est alors une représentation graphique des altitudes en fonction des surfaces cumulées ramenées en pourcentage (Figure 8).

➤ **Indice global de pente**

Il est défini comme étant le rapport entre l'altitude comprise entre 5% et 95% de la surface du bassin et la longueur du rectangle équivalent. Il est donné par l'Équation 5.

<p>Équation 5 :</p> $I_g = \frac{H_{5\%} - H_{95\%}}{L}$	<p><math>I_g</math> : Indice global de pente (m/km),  <math>L</math> : Longueur du rectangle équivalent (km),  <math>H_{5\%}</math> : Altitudes à 5% des surfaces cumulées (m)  <math>H_{95\%}</math> : Altitudes à 95% des surfaces cumulées (m)</p>
--	---

➤ **Pente moyenne du bassin versant**

Elle est donnée par l'Équation 6.

<p>Équation 6 :</p> $I_m = \frac{Z_{max} - Z_{min}}{\sqrt{S}}$	<p><math>I_m</math> : Pente moyenne km/km</p> <p><math>Z_{max}</math> : Altitude maximale en km,</p> <p><math>Z_{min}</math> : Altitude minimale en km</p> <p><math>S</math> : Surface du bassin versant en km<sup>2</sup></p>
--	--

### ➤ Indices de pluie

Les indices de pluies sont des coefficients qui caractérisent les années humides et sèches. Les années humides sont caractérisées par des indices positifs, contrairement aux années sèches qui correspondent aux indices négatifs.

La formule pour calculer les indices de pluies est donnée par l'Équation 7

<p>Équation 7 :</p> $i = \frac{P_{an} - \overline{P_{an}}}{\sigma}$	<p><math>I</math> = Indice des pluies</p> <p><math>P_{an}</math> = Pluie annuelle (mm)</p> <p><math>\overline{P_{an}}</math> = Moyenne des pluies annuelles (mm)</p> <p><math>\sigma</math> = Ecart type (mm)</p>
---	---

### 3.3.3. Mise en route du modèle HEC-HMS

#### a. Description du modèle

HEC-HMS est un modèle déterministe et conceptuel qui a été développé par les ingénieurs de l'armée américaine (USACE). C'est une version améliorée de l'ancien programme HEC 1 qui pendant longtemps a été utilisé pour la simulation événementielle. Les versions récentes permettent la modélisation continue sur une longue période grâce à l'intégration de modules de calculs des différents processus d'évapotranspiration, et d'humidité.

HEC-HMS est un modèle semi-distribué qui permet de subdiviser un bassin versant en plusieurs sous bassins versants, qui sont considérés comme ayant chacune des caractéristiques homogènes.

Dans l'optique de s'adapter à différents contextes d'études, HEC-HMS possède différents modules dont chacun est représenté par un aspect particulier du processus pluie débit qui agit sur l'hydrogramme de l'écoulement. Ces modules sont choisis librement par l'utilisateur, en fonction de ses besoins et de ses données.

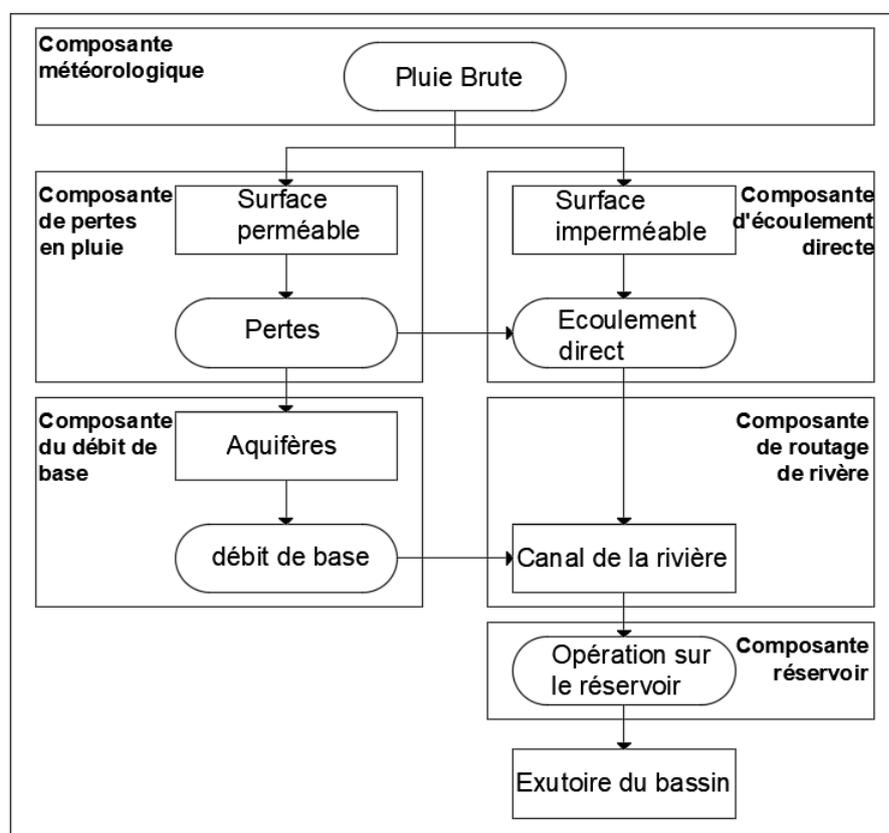
### b. Choix du type de modélisation :

Dans la suite de notre étude, notre choix est porté sur la **modélisation continue et journalière** pour plusieurs raisons.

D'abord un des objectifs de la modélisation est de comprendre le fonctionnement hydrologique du bassin versant de Massili à Gonsé et la modélisation continue est bien adapté (Scharffenberg & Fleming, 2006). De plus d'une part nous disposons des données indispensables pour la modélisation continue à savoir les pluies, les débits et surtout les évapotranspirations et d'autre part nous ne disposons pas des données qui déterminent les caractéristiques des évènements pluvieux (dureés et débits).

### c. Processus de fonctionnement du modèle

Le HEC-HMS attribut à chaque module, une étape de transformation pluie-débit. La combinaison des résultats des modules les uns aux autres donne l'hydrogramme de l'écoulement final. La Figure 5 décrit le processus de transformation de la pluie brute pour aboutir au débit à l'exutoire.



Source : (Feldman, 2000)

Figure 5 : Processus de transformation de la pluie brute en débit du modèle HEC-HMS

La première composante est le premier module à intervenir. Elle répartit la pluie brute de façon uniforme dans le temps et dans l'espace sur la surface du bassin versant. Ensuite le processus diffère selon la perméabilité de la surface :

- ✓ Pour les surfaces perméables, les précipitations subissent des pertes provoquées par des phénomènes d'interception, d'infiltration et d'évapotranspiration. Les précipitations nettes ainsi obtenues participent à l'écoulement direct. Les pertes liées à l'infiltration se transforment à l'écoulement de base c'est à dire à l'écoulement souterrain.
- ✓ Pour les surfaces imperméables, les précipitations sont exonérées de toutes pertes liées à l'infiltration, et rejoignent immédiatement la composante de l'écoulement direct où elles se transformeront en écoulement de surface.

Les écoulements de surface et souterrain intègrent tous les deux le canal de la rivière où se manifeste les phénomènes d'atténuation par la composante de routage. Enfin les constructions hydrauliques naturelles et artificielles (réservoirs, barrages, boulis, lacs, etc) influencent l'écoulement avant de se diriger vers l'exutoire.

#### **d. Organisation du modèle**

La modélisation avec HEC-HMS peut être décomposée en trois grandes parties qui sont la modélisation du bassin versant, la modélisation de la pluviométrie et les spécifications particulières de modélisation. Ces dernières sont sélectives parce qu'elles sont fonctions du type de modélisation choisie (continue dans notre cas), des données disponibles et des objectifs de la modélisation.

##### **➤ Modélisation du bassin versant**

La modélisation du bassin versant consiste à découper le bassin versant en plusieurs sous bassins versants élémentaires, afin de déterminer les paramètres physiques exigés par HEC-HMS. Pour ce faire nous avons utilisé le logiciel HEC-GeoHMS

Le logiciel HEC-GeoHMS est une extension de Arcgis qui fonctionne en couplage avec Arc-Hydro-Tools. C'est un logiciel développé spécifiquement pour être utilisé en association avec HEC-HMS. En effet Il permet la schématisation du bassin versant à travers la réalisation de plusieurs étapes successives du MNT dont le but est de l'importer dans HEC-HMS pour le calage et la validation du modèle (Fleming & Doan, 2013). Ces étapes sont les suivantes :

##### **Etape 1 : Prétraitement du terrain**

Les opérations réalisées dans cette étape sont :

- ✓ Correction du MNT par le remplissage des vides (**FillSinks**) : Lors de la réalisation du MNT plusieurs erreurs ont été commises provoquant ainsi des zones de dépressions. Dans cette opération on procède au remplissage de ces zones de dépressions en augmentant l'altitude des cellules afin de déterminer le sens de l'écoulement ;
- ✓ Sens de l'écoulement (**Flow Direction**) : Dans cette opération on détermine la direction de chaque cellule suivant huit (8) directions possibles (Nord, Nord-Est, Est, Sud, Sud-Est, Sud-Ouest, Ouest, Nord-Ouest) ;
- ✓ Accumulation de l'écoulement (**Flow accumulation**) : Cette opération détermine le nombre de cellules ascendantes s'écoulant dans une cellule donnée ;
- ✓ Définition des cours d'eau (**Stream Définition**) : Dans cette opération toutes les cellules sont classifiées dont l'accumulation de l'écoulement est plus grande qu'un seuil défini par l'utilisateur. Le seuil personnalisé peut être une surface ou un nombre de cellules ;
- ✓ Segmentation des cours d'eau (**Stream Segmentation**) : Dans cette opération les cours d'eau sont divisés en des segments ;
- ✓ Délimitation des sous bassins-versants (**Catchment Grid Delineation**) : Dans cette opération, les limites des sous bassins versants ou les lignes de partage des eaux sont tracées pour chaque segment ;
- ✓ Polygones des sous bassins versants (**Catchment Polygone Processing**) : Cette opération convertit la représentation en grille des sous bassins versants en représentation vectorielle ;
- ✓ Traitement des segments de cours d'eau (**Drainage Line Processing**) : Cette opération convertit les ruisseaux de la représentation en grille en représentation vectorielle.
- ✓ Agrégation des lignes de partage (**Adjoint Catchment Processing**) : Cette opération agrège les sous bassins à chaque confluence de ruisseaux;
- ✓ Création de l'exutoire (**batch point**) : Dans cette opération on crée l'exutoire pour la délimitation du bassin versant;
- ✓ Délimitation du bassin versant (**Batch watershed Delineation**) : Cette opération délimite le bassin versant à travers l'exutoire déjà créé ci-dessus.

## **Etape 2 : Génération du projet**

Les opérations réalisées dans cette étape sont :

- ✓ Commencement d'un nouveau projet (**Start New Project**) : Il s'agit dans cette opération

de créer un nouveau projet.

- ✓ Génération du projet (**Generate project**) : Cette opération prend plus de temps à se réaliser, puisqu'elle génère tous les éléments du prétraitement de terrain dans ce nouveau projet.

### **Étape 3 : Extraction des caractéristiques du bassin versant**

Les opérations réalisées dans cette étape sont énumérées comme suites :

- ✓ Détermination des longueurs des cours d'eau (**River length**) ;
- ✓ Détermination des pentes des cours d'eau (**River Slope**) ;
- ✓ Détermination de la pente de chaque sous bassin versant (**Basin Slope**) ;
- ✓ Détermination du plus long chemin hydraulique de chaque sous bassin versant (**Longest FlowPath**) ;
- ✓ Détermination des centroïdes des sous bassins versants (**Basin Centroid**) ;
- ✓ Détermination des altitudes de ces centroïdes (**Centroid Elevation**) ;
- ✓ Détermination du long chemin hydraulique, allant du centroïde à l'exutoire de chaque sous bassin versant (**Centroid Longest FlowPath**) ;

### **Étape 4 : Paramétrage du modèle HEC-HMS**

Les opérations réalisées dans cette étape sont énumérées comme suites :

- ✓ Sélection des modules (**Select HMS Process**) : Il s'agit de choisir la fonction de production, la fonction de transfert, l'écoulement de base et l'écoulement Fluvial ;
- ✓ Auto-nomination des cours d'eau : (**River Auto Name**) ;
- ✓ Auto nomination des sous bassins versants (**Basin Auto Name**) ;
- ✓ Paramètres des sous bassins (**Sub Basin Parameters from Raster**) : Les paramètres diffèrent en fonction du choix des modules ;

### **Étape 5 : Schématisation du bassin versant**

Les opérations réalisées de cette étape sont :

- ✓ Définition des unités du HEC-HMS (**Map to HMS Units**) ;
- ✓ Contrôle de toutes les opérations déjà réalisées (**Check Data**) : vérifier la concordance de ces opérations à travers le résumé proposé ;
- ✓ Schématisation du bassin versant (**HMS schematics**) : Cette opération permet de construire un réseau hydrologique simple qui contient les éléments du modèle. Elle crée une couche qui montre les nœuds des sous-bassins (placés aux centres des sous-bassins),

les nœuds de jonction, l'exutoire, et la connexion entre ces éléments.

- ✓ Ajout des coordonnées géographiques (**Add coordinates**): les coordonnées seront ajoutées aux nœuds et aux liaisons créés par la schématisation du bassin.
- ✓ Préparation des données pour l'exportation dans HEC-HMS (**Prepare Data for Model Export**)
- ✓ Enregistrement des sous bassins versants et des cours d'eau dans le dossier du projet (**Background Shape File**)
- ✓ Création du projet HMS (**Create HEC-HMS Project**): C'est l'opération finale HEC-GeoHMS, qui consiste à créer le projet pour préparer l'importation de HEC-HMS.

#### ➤ **Modélisation de la météorologie**

Après avoir effectué la modélisation du bassin, on importe le modèle dans HEC-HMS pour la modélisation de la météorologie. Elle regroupe les données de précipitations et d'évapotranspirations nécessaires pour le calcul de la réponse hydrologique.

Dans le cas de notre étude, nous disposons des données de la station synoptique de Ouagadougou et de la station pluviométrique de Kamboinsé. Nous allons donc affecter ces données à tous les sous bassins versants de façon manuelle en les introduisant à partir de HEC-HMS.

#### ➤ **Spécifications particulières**

##### **Module de la fonction de production**

La fonction de production assure la transformation de la pluie brute en pluie nette, dépourvue de toutes les pertes éventuelles causées par l'interception (obstacles, végétation, cuvettes ...), l'infiltration et l'évapotranspiration (en cas de modélisation continue). Il existe six (6) formalismes pour représenter cette fonction, à savoir :

- ✓ « **Initial and Constant Loss** » : Pertes initiales, à taux constant, ce formalisme considère un taux de pertes constant, et une perte initiale à saturer avant que le ruissellement commence ;
- ✓ « **Deficit and Constant Loss** » : Déficit et taux de perte constant, ce formalisme offre une possibilité de régénération des pertes initiales durant une période sans pluie au cours de l'événement modélisé ;
- ✓ « **Green and Ampt Loss** » : Ce formalisme s'intéresse plutôt aux pertes par infiltration et il repose sur l'équation de Darcy et la conservation de masse.
- ✓ « **Soil Moisture Accounting Loss** » : Formalisme très poussé qui calcule les "pertes"

par évapotranspiration, infiltration et percolation profonde.

- ✓ « **SCS Curve Number Loss** » : Formalisme qui relie les pertes en pluie à l'occupation du sol et le type de sol ;
- ✓ « **Gridded SCS Curve Number Loss** » : C'est un format maillé du formalisme précédent. La sélection de l'une de ces formalismes est guidée par le type de modélisation. En effet nous avons choisi le formalisme « **Initial and Constant Loss** » qui est adapté pour la modélisation continue ; associé à la méthode « **Canopy Method** » pour l'estimation de l'évapotranspiration.

#### Module de la fonction de transfert

La fonction de transfert s'intéresse à la manière dont l'eau va s'écouler jusqu'à l'exutoire. Elle permet de déterminer l'hydrogramme résultant de la pluie nette. La fonction offre six (6) formalismes qui sont les suivants :

- ✓ « **User-Specified Unit Hydrograph** » : Hydrogramme unitaire spécifié par l'utilisateur, ce formalisme consiste à déterminer l'hydrogramme unitaire à partir de données complètes d'un événement pluvieux ;
- ✓ « **Snyder Unit Hydrograph** » : Hydrogramme unitaire de Snyder.
- ✓ « **Kinematic Wave** » : Onde cinétique considérant les versants du bassin comme des canaux à surface libre dont le débit entrant correspond à la pluie nette.
- ✓ « **SCS Unit Hydrograph** » : Hydrogramme unitaire de la SCS, résultant de la combinaison des hydrogrammes de plusieurs bassins versants.
- ✓ « **Clark Unit Hydrograph** » : Hydrogramme unitaire de Clark, prend en compte les deux phénomènes de translation et d'atténuation.
- ✓ « **ModClark** » : Forme maillée du dernier formalisme.

Parmi ces différents formalismes, nous avons choisi l'hydrogramme unitaire de la SCS (« **SCS Unit Hydrograph** ») parce que ce formalisme est recommandé lorsque le formalisme de la fonction de production « **Initial and Constant Loss** » est utilisé (Scharffenberg & Fleming, 2006). De plus l'hydrogramme unitaire de la SCS présente un (1) seul paramètre qui est le temps de retard entre le pic de la crue et le pic des précipitations (« **Lag Time** »), et est calculé avec les valeurs de CN. Ces valeurs sont disponibles pour chaque sous bassin versant.

Le CN est un indice de ruissellement développé par NRCS pour analyser les quantités de ruissellement. Il dépend de l'occupation du sol et du type de sol. Il a été généré en utilisant la

commande « **Subasin Parameters From Raster** » de HEC-GeoHMS avec en input le **CNgrid**. Les Équation 8 et 9 permettent de calculer le « **Lag Time** » selon la méthode de la SCS (Rocha, 2014)

Équation 8 :	$T_{lag}$ : Lag time (min)
$T_c = \frac{0,1362 * L^{0,8} \left( \frac{1000}{CN} - 9 \right)^{0,7}}{p^{0,5}}$	L : Plus long chemin hydraulique du bassin (m)
	CN : CN du bassin versant
Équation 9 :	P : pente du sous bassin (%)
$T_{lag} = 0,6 * T_c$	$T_c$ : Temps de concentration

### Fonction objective

La fonction objective mesure la qualité de l'ajustement de l'hydrogramme simulé à l'hydrogramme observé. Le HEC-HMS comporte 7 fonctions objectives :

- ✓ « **Peak weighted RMS error** » : L'erreur sur la racine des carrés de débit, elle attribut plus de poids aux débits en dessus de la moyenne et moins de poids aux débits en dessous ;
- ✓ « **Sum of squared residuals** » : La somme des résidus au carré, elle donne plus de poids aux larges erreurs et moins aux petits erreurs ;
- ✓ « **Sum of Absolute Residuals** » : La somme des résidus absolus, elle ne différencie pas entre les erreurs larges et celles restreintes ;
- ✓ « **Percent Error in Peak Flow** » : Le pourcentage d'erreur sur le débit de pointe, il met l'accent sur l'ajustement des débits de pointe ;
- ✓ « **Percent Error in Volume** » : Le pourcentage d'erreur sur le volume, il met l'accent sur l'ajustement du volume de ruissellement ;
- ✓ « **RMS Log Error** » : Utilise l'erreur sur la moyenne de la racine carrée des log des débits pour mettre l'accent sur les faibles débits ;
- ✓ « **Time weighted** » : Donne du poids aux erreurs proches de la fin de l'événement et moins aux erreurs du début.

Le fonction objective « Peak weighted RMS error » est recommandée pour la modélisation continue.

### Fonction d'optimisation automatique

L'utilité de cette fonction est de rapprocher le mieux possible le débit observé sans l'intervention de l'utilisateur. Pour ce faire deux (2) méthodes sont proposées :

- ✓ « *Univariate Gradient* » : Le gradient uni-varié, ajuste un seul paramètre en gardant les autres constants.
- ✓ « *Nelder et Mead* » : Utilise la méthode du simplexe qui consiste à optimiser plusieurs les paramètres simultanément.

L'optimisation s'arrête si l'une des conditions suivantes est remplie :

- ✓ La valeur de la fonction objective est nulle,
- ✓ Le nombre d'itérations maximal est atteint,
- ✓ La valeur de variation de la fonction objective est inférieure à la tolérance.

Le calage des paramètres nécessite d'abord la manipulation manuelle avant l'utilisation de la fonction automatique. Cela permet d'éviter l'arrêt de l'optimisation par faute de valeur nulle de la fonction objective et de réduire le temps de la simulation.

### 3.3.4. Mise en route du modèle GR4J

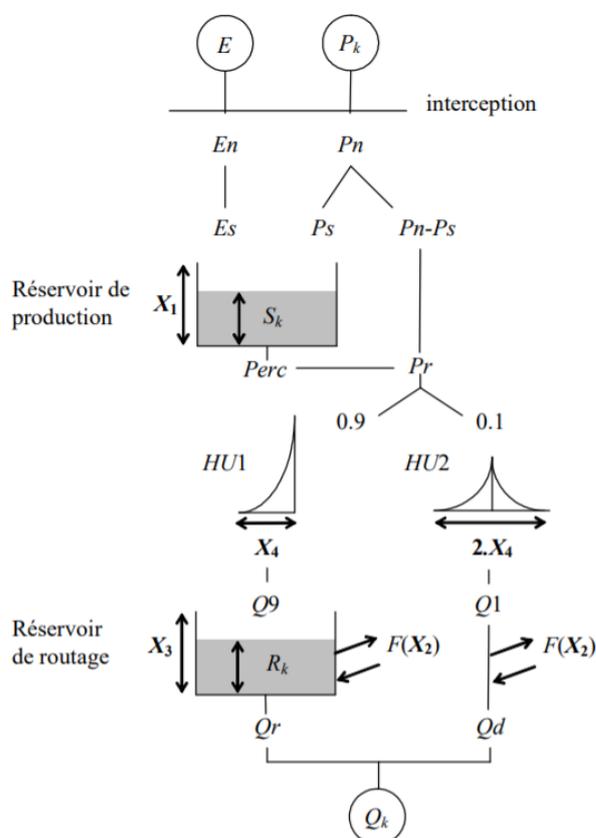
#### a. Présentation du modèle GR4J

Le modèle GR4J (Génie Rural à 4 paramètres Journalier) est un modèle pluie- débit global à quatre paramètres optimisables. Ces paramètres sont **X1, X2, X3 et X4**. X1, représente la capacité du réservoir de production (mm), X2, le coefficient d'échanges souterrains (mm), X3, la capacité à un jour de réservoir routage (mm), X4 le temps de base de l'hydrogramme unitaire HUI (j). Ce modèle est global et a connu plusieurs versions qui ont permis d'améliorer progressivement les performances du modèle. La première version est proposée par (N. Edijatno & Michel, 1989). Puis elle a été améliorée successivement par (Michel & Edijatno & Leviandier, 1991), (Nascimento, 1995), (Nascimento Edijatno & NO, 1999), (Perrin, 2000), (Perrin, 2002) et (Perrin et al., 2003)

Le modèle GR4J requiert en entrée les précipitations et les évapotranspirations potentielles à pas de temps journalier, et simule en sortie le débit à l'exutoire du bassin versant. Son développement a été initié au Cemagref, avec pour objectif de mettre au point un modèle de simulation pluie-débit robuste et fiable en vue de l'utiliser pour la gestion des ressources en eau et d'ingénierie (dimensionnement d'ouvrage, prévision des crues et d'étiages, gestion de réservoirs, etc.).

### b. Description mathématique du modèle

La Figure 6 présente la structure du modèle GR4J.  $P_k$  est la pluie journalière du jour  $k$  et  $E$  l'évaporation potentielle moyenne pour le même jour calendaire.



Source : (Perrin et al., 2003)

Figure 6 : Schéma de la structure du modèle GR4J

#### ➤ Neutralisation

La première opération est la neutralisation de  $P_k$  par  $E$  pour déterminer une pluie nette  $P_n$  et une évapotranspiration nette  $E_n$  calculée par l'Équation 10.

Équation 10 :		
{	<b>Si <math>P_k \geq E</math> alors, <math>P_n = P_k - E</math> et <math>E_n = 0</math></b>	$P_k$ = Pluie journalière (mm)
	<b>Si <math>P_k \leq E</math> alors <math>P_n = 0</math> et <math>E_n = E - P_k</math></b>	$P_n$ = Pluie nette (mm)
		$E_n$ = Evapotranspiration nette (mm)
		$E$ = Evapotranspiration moyenne (mm)

#### ➤ Fonction de rendement

Dans le cas où  $P_n$  est différente de zéro, une partie  $P_s$  de  $P_n$  alimente le réservoir de production et est calculé par l'Équation 11.

<p>Équation 11 :</p> $P_s = \frac{X_1 \left( 1 - \left( \frac{S_k}{X_1} \right)^2 \right) \tanh \left( \frac{P_n}{X_1} \right)}{1 + \frac{S_k}{X_1} \tanh \left( \frac{P_n}{X_1} \right)}$	<p><math>X_1</math> : Capacité maximum du réservoir de production (mm)</p> <p><math>S_k</math> : Contenu du réservoir de production au début du jour k.(mm)</p> <p><math>P_s</math> : Alimentation du réservoir de production(mm)</p> <p><math>P_n</math>= Pluie nette (mm)</p>
--	---

Dans le cas contraire lorsque  $E_n$  est différent de zéro, une quantité d'évaporation  $E_s$  est retirée du réservoir de production. Elle est donnée par l'Équation 12.

<p>Équation 12 :</p> $E_s = \frac{S_k \left( 2 - \frac{S_k}{X_1} \right) \tanh \left( \frac{E_n}{X_1} \right)}{1 + \left( 1 - \frac{S_k}{X_1} \right) \tanh \left( \frac{E_n}{X_1} \right)}$	<p><math>X_1</math> : Capacité maximum du réservoir de production (mm)</p> <p><math>S_k</math> : Contenu du réservoir de production au début du jour k.(mm)</p> <p><math>E_s</math> : Retrait du réservoir de production(mm)</p> <p><math>E_n</math>= Evapotranspiration nette (mm)</p>
--	---

### ➤ Percolation

Une percolation  $P_{erc}$  issue du réservoir de production est alors calculée par l'Équation 13.

<p>Équation 13 :</p> $P_{erc} = S' \left\{ 1 - \left[ 1 + \left( \frac{4 S'}{9 X_1} \right)^4 \right]^{\frac{1}{4}} \right\}$ <p>Avec <math>S' = S_k + P_s - E_s</math>.</p>	<p><math>S'</math> : Contenu du réservoir de production issu des équation 10 et 11 (mm)</p> <p><math>X_1</math> : Capacité maximum du réservoir de production (mm)</p> <p><math>P_{erc}</math> : Percolation (mm)</p>
--	---

La quantité d'eau  $P_r$  qui atteint finalement la partie routage du modèle est donnée par l'Équation 14.

<p>Équation 14 :</p> $P_r = P_{erc} + (P_n - P_s)$	<p><math>P_{erc}</math> : Percolation (mm)</p> <p><math>P_n</math>= Pluie nette (mm)</p> <p><math>P_s</math> : Alimentation du réservoir de production(mm)</p> <p><math>P_r</math> : la quantité d'eau atteignant la partie routage(mm)</p>
--	---

### ➤ Hydrogrammes unitaires

La quantité d'eau  $P_r$  est divisé en deux composantes d'écoulement ; d'une part 90% étant routé par un hydrogramme unitaire  $HU1$  et un réservoir de routage, d'autre part 10% par un hydrogramme unitaire symétrique  $HU2$ . Elles dépendent du même paramètre  $X_4$ , temps de base de  $HU1$  exprimé en jours.

Les ordonnées des hydrogrammes  $HU1$  et  $HU2$  sont calculées à partir des courbes en  $S$  notées respectivement  $SH_1$  et  $SH_2$ . Elles sont respectivement définies en fonction du temps par les Équation 15 et 16.

<p>Équation 15 :</p> $SH_1(t) = \begin{cases} 0, & t \leq 0 \\ \left(\frac{t}{X_4}\right)^{\frac{5}{2}}, & 0 < t < X_4 \\ 1, & t \geq X_4 \end{cases}$	<p><math>SH_1(t)</math> : Equation de l'hydrogramme <math>HU1</math></p> <p><math>SH_2(t)</math> : Equation de l'hydrogramme <math>HU2</math></p>
<p>Équation 16 :</p> $SH_2(t) = \begin{cases} 0, & si t \leq 0 \\ \frac{1}{2}\left(\frac{t}{X_4}\right)^{\frac{5}{2}}, & 0 < t \leq X_4 \\ 1, & 0 < t < 2X_4 \end{cases}$	<p><math>X_4</math> : le temps de base de l'hydrogramme unitaire <math>HU1</math> (j)</p>

Les ordonnées de  $HU1$  et  $HU2$  sont alors calculées par l'Équation 17.

<p>Équation 17 :</p> $UH_i(j) = SH_i(j) - SH_i(j - 1)$	<p><math>SH_i(t)</math> : Equation de l'hydrogramme <math>HU_i</math></p> <p><math>UH_i(j)</math> : Ordonnée de <math>HU_i</math></p>
--	---

A chaque pas de temps  $k$ , les sorties  $Q_9$  et  $Q_1$  des deux hydrogrammes sont calculées par les Équation 18 et 19.

<p>Équation 18 :</p> $Q_9(k) = 0,9 \sum_{j=1}^l UH_1(j) \cdot Pr(k - j + 1)$	<p><math>P_r</math> : la quantité d'eau atteignant la partie routage</p> <p><math>UH_i(j)</math> : Ordonnée de <math>HU_i</math></p> <p><math>Q_9(k)</math> : sortie de <math>HU1</math> (mm)</p>
<p>Équation 19 :</p> $Q_1(k) = 0,1 \sum_{j=1}^m UH_2(j) \cdot Pr(k - j + 1)$	<p><math>Q_1(k)</math> : sortie de <math>HU2</math>(mm)</p> <p><math>l = \text{int}(X_4)+1</math> et <math>m = \text{int}(2 \cdot X_4)+1</math></p>

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

Le fonction d'échange est caractérisée par le coefficient d'échange en eau qui peut être positif dans le cas d'apport et négatif dans le cas de pertes vers des nappes profondes ou nul. L'échange souterrain en eau est calculé par l'Équation 20.

Équation 20 :	<b>X3</b> : Capacité à un jour de réservoir routage (mm)
$F = X_2 \cdot \left(\frac{R_k}{X_3}\right)^{\frac{7}{2}}$	<b>R<sub>k</sub></b> : Niveau dans le réservoir en début de pas de temps (mm)
	<b>F</b> : Echange souterrain (mm)

### ➤ Réservoir de routage

Le niveau dans le réservoir de routage est modifié en ajoutant la sortie  $Q_9$  de l'hydrogramme  $HU1$  et  $F$ . Le niveau dans le réservoir de routage est donné par l'Équation 21.

Équation 21 :	<b>R<sub>k</sub></b> : Niveau dans le réservoir en début de pas de temps (mm)
$R' = \max(0; R_k + Q_9(k) + F)$	<b>Q<sub>9</sub>(k)</b> : sortie de $HU1$ (mm)
	<b>F</b> : Echange souterrain (mm)
	<b>R'</b> = Niveau réservoir de routage en ajoutant $Q_9$ (mm)

Il se vidange ensuite en une sortie  $Q_r$  donnée par l'Équation 22.

Équation 22 :	<b>R'</b> = Niveau réservoir de routage en ajoutant $Q_9$ (mm)
$Q_r = R' \left\{ 1 - \left[ 1 + \left(\frac{R'}{X_3}\right)^4 \right]^{\frac{1}{4}} \right\}$	<b>X3</b> : Capacité à un jour de réservoir routage (mm)
	<b>Q<sub>r</sub></b> = sortie du réservoir de routage (mm)

### ➤ Ecoulement total

La sortie  $Q_1$  de l'hydrogramme  $HU2$  est soumise au même échange pour donner la composante d'écoulement  $Q_d$  : La sortie total est donné alors par l'Équation 23.

Équation 23 :	<b>Q<sub>r</sub></b> = sortie du réservoir de routage (mm)
$Q = Q_r + Q_d$	<b>Q</b> = La sortie totale (mm)
Avec	<b>Q<sub>1</sub>(k)</b> : sortie de $HU2$ (mm)
$Q_d = \max(0; Q_1(k) + F)$	<b>F</b> : Echange souterrain (mm)

### c. Package « airGR »

« AirGR » est un package du logiciel R qui regroupe des procédures nécessaires permettant la simulation hydrologique à l'échelle d'un bassin versant à différents pas de temps (horaire, journalier, mensuel et annuel). Il incorpore dans R des outils de modélisation hydrologique tels que GR4J, GR2M, GR1A etc.

Les avantages d'utilisation du package « AirGR » nous a poussé à le choisir pour la simulation de GR4J. En effet c'est un outil simple à comprendre par les utilisateurs non-experts en modélisation ou en programmation. L'exemple développé dans l'aide de R est très illustratif pour son application. De plus c'est un outil souple en ce qui concerne l'ajout des critères, de modèles ou d'algorithmes de calage.

Le code pour le calage et la validation du modèle GR4J se trouvent en Annexe 1

#### 3.3.5. Quelques Critères de performances des modèles

##### ➤ Coefficient de Nash-Sutcliffe (NSE)

Le Coefficient d'efficacité de Nash-Sutcliffe est utilisé pour évaluer la puissance prédictive des modèles hydrologiques. Il exprime la proportion de la variance résiduelle entre les valeurs simulées et les valeurs observées par rapport à la variance expliquée des valeurs observées

En hydrologie, il est le plus utilisé pour mesurer la qualité de l'ajustement et est défini comme l'Équation 24 (Nash & Sutcliffe, 1970)

Équation 24 :	$Q_{obs}$ : Débits observés
$NSE = 1 - \frac{\sum(Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum(Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})^2}$	$\overline{Q_{obs}}$ : Moyenne des débits observés
	$Q_{sim}$ : Débits simulés

Ce coefficient varie entre  $-\infty$  et 1. La valeur optimale est 1 c'est-à-dire l'hydrogramme simulé est parfaitement corrélé à l'hydrogramme observé.

Ce modèle est décomposé en trois composantes qui permettent de mieux expliquer la performance d'un modèle (Gupta et al., 2009) .

La première composante est le rapport des variances des débits simulés et observés. Elle évalue la dispersion des débits simulés et observés. Elle est décrite par l'Équation 25.

Équation 25 :	$\alpha^2 = \frac{\sigma_{sim}^2}{\sigma_{obs}^2}$	$\alpha^2$ = Rapport des variances des débits simulés et observés $\sigma_{sim}^2$ = Variance des débits simulés $\sigma_{obs}^2$ = Variance des débits observés
---------------	--	--

La deuxième composante est l'erreur du bilan normé. Elle évalue globalement la différence entre les débits simulés et les débits observés. Elle est décrite par l'Équation 26.

Équation 26 :	$\beta_n = \frac{(\overline{Q_{obs}} - \overline{Q_{sim}})^2}{\sigma_{obs}^2}$	$\beta_n$ = L'erreur du bilan normé $\overline{Q_{obs}}$ = Moyenne des débits observés $\overline{Q_{sim}}$ = Moyenne des débits simulés $\sigma_{obs}^2$ = Variance des débits observés
---------------	--	---

La troisième composante est le coefficient de corrélation linéaire entre les débits observés et simulés. Elle traduit la relation linéaire qu'il existe entre ces débits et est défini par l'Équation 27

Équation 27 :	$r = \frac{1}{n} \sum \frac{(Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})(Q_{sim} - \overline{Q_{sim}})}{\sigma_{sim}\sigma_{obs}}$	$r$ = Coefficient de corrélation $Q_{obs}$ = Débits observés $\overline{Q_{obs}}$ = Moyenne des débits observés $Q_{sim}$ = Débits simulés $\overline{Q_{sim}}$ = Moyenne des débits simulés $\sigma_{sim}$ = Ecart type des débits simulés $\sigma_{obs}$ = Ecart type des débits observés
---------------	--	---

La décomposition du Nash est donnée alors par l'Équation 28.

Équation 28 :	$NSE = -\beta_n - \alpha^2 + 2r\alpha$	$\beta_n$ = L'erreur du bilan normé $\alpha^2$ = Rapport des variances des débits simulés et observés $r$ = Coefficient de corrélation
---------------	--	--

➤ **RMSE observation standard deviation ratio(RSR)**

C'est le rapport entre la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) et l'écart

type des débits simulés et observés (Moriassi et al., 2007). Sa valeur optimum est 0 et il est décrit par l'Équation 29.

Équation 29 :	$Q_{obs}$ : Débits observés
$RSR = \frac{\sqrt{\sum(Q_{obs} - Q_{sim})^2}}{\sqrt{\sum(Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})^2}}$	$\overline{Q_{obs}}$ : Moyenne des débits observés
	$Q_{sim}$ : Débits simulés

#### ➤ Le pourcentage de biais (PBIAIS)

C'est le pourcentage de la variation totale entre les valeurs simulées et les valeurs observées (Moriassi et al., 2007). Sa valeur optimale est de 0 et il est exprimé par l'Équation 30

Équation 30 :	$Q_{sim}$ = Débits simulés
$PBIAIS = \frac{\sum(Q_{obs} - Q_{sim}) * 100}{\sum Q_{obs}}$	$Q_{obs}$ =Débits observés

Parmi les critères cités ci-dessus, le critère de **Nash-Sutcliffe** mesure mieux la qualité de l'ajustement de l'hydrogramme simulé vu sa décomposition. Nous utiliserons donc ce critère pour chaque modèle.

Le Tableau IV ci-dessous présente les intervalles des critères de performance pour juger la qualité de l'ajustement.

Tableau IV : Indicateurs de critères de performance

Critères	RSR	NSE	PBIAIS
<i>Très bon</i>	0,00<RSR≤0,60	0,65<NSE≤1,00	PBIAIS<±15
<i>Bon</i>	0,60<RSR≤0,70	0,55<NSE≤0,65	±15≤PBIAIS<±20
<i>passable</i>	0,70<RSR≤0,80	0,40<NSE≤0,55	±20≤PBIAIS<±30
<i>Mauvais</i>	RSR>0,80	NSE≤0,40	PBIAIS≥±30

Source : (Moriassi et al., 2007)

## IV. Résultats et discussions

### 4.1. Comblement de données

La méthode de Laborde (1998) avec la technique du « **bouche trou** » utilisé pour le comblement de données est efficace pour un taux de lacunes inférieur à **25%**. Le

Tableau V présente les résultats de calcul des taux de lacunes.

Tableau V : Taux de lacunes des débits

Années	Lacunes (%)	Moyenne
1985	24,11%	<b>12,54%</b>
1986	1,92%	
1987	20,82%	
1988	21,31%	
1989	22,74%	
1990	24,66%	
1991	17,26%	
1992	0,00%	
1993	0,00%	
1994	0,00%	
1995	30,14%	
1996	0,00%	
1997	0,00%	

L'année 1995 est la seule à avoir un taux de lacunes des débits légèrement supérieur à 25%. Cela ne remet pas en cause la qualité du comblement de données parce que les 12 autres années sont dans la marge (inférieur à 25%) ainsi que la moyenne des taux de lacunes de toutes les années (12,54%). Les résultats des données comblées sont en Annexe 2.

#### 4.2. Caractérisation hydro-géomorphologique du bassin versant

Les caractéristiques du bassin versant du Massili à Gonsé résumé dans le Tableau VI montre un grand bassin versant de forme peu allongé (compacité supérieur à 1). Son relief est légèrement incliné avec une pente moyenne autour de 0,22% (Figure 7).

Tableau VI : Caractéristiques morphométriques du bassin du Massili à Gonsé

Caractéristiques morphométriques	Valeurs	Unités
Superficie (S)	2643,65	Km <sup>2</sup>
Périmètre (P)	283	km
Indice de compacité (KG)	1,55	
Longueur du rectangle équivalent (L)	119,41	km
Longueur du rectangle équivalent (l)	22,14	km
Densité de drainage (Dd)	0,30	km/km <sup>2</sup>
Altitude maximum (Hmax)	375	m
Altitude moyenne (Hmoy)	309,04	m
Altitude minimum (Hmin)	264	m
Altitude 5% de superficie cumulée (H(5%))	336	m
Altitude 95% de superficie cumulée (H(95%))	276	m
Indice global de pente (Ig)	0,50	m/km
Pente moyenne (Im)	0,22%	

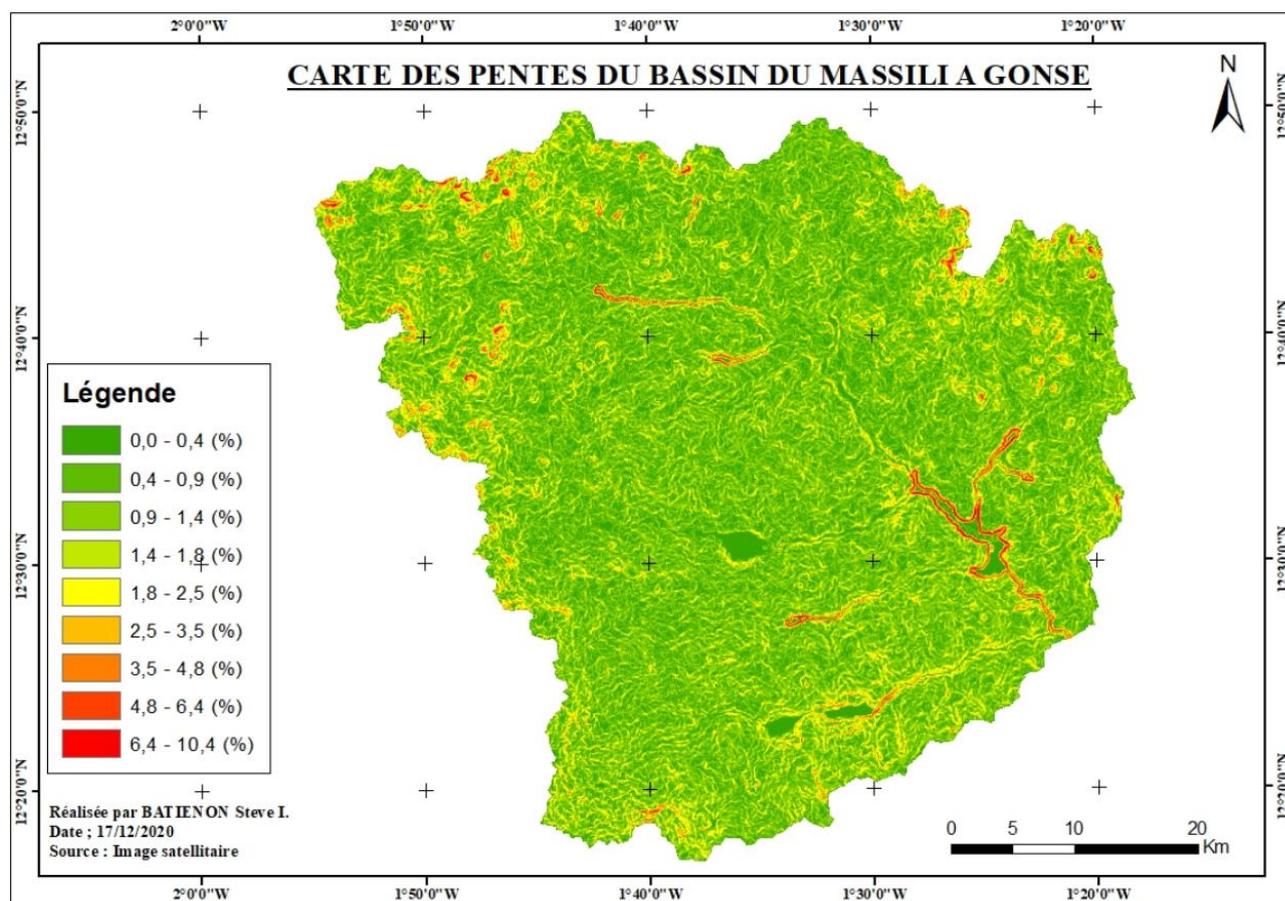


Figure 7 : Carte des pentes du bassin du Massili à Gonsé

#### 4.2.1. Courbe hypsométrique

Tableau VII : Répartition altimétrique du bassin versant de Massili à Gonsé

Altitudes	Surfaces partielles (km <sup>2</sup> )	Surfaces cumulées (km <sup>2</sup> )	%Surfaces cumulées
375 - 350	19,53	19,53	0,00%
350 - 335	193,41	212,94	0,74%
335 - 320	466,41	679,35	8,06%
320 - 305	854,01	1533,36	25,71%
305 - 290	802,75	2336,10	58,04%
290 - 264	305,97	2642,08	88,42%

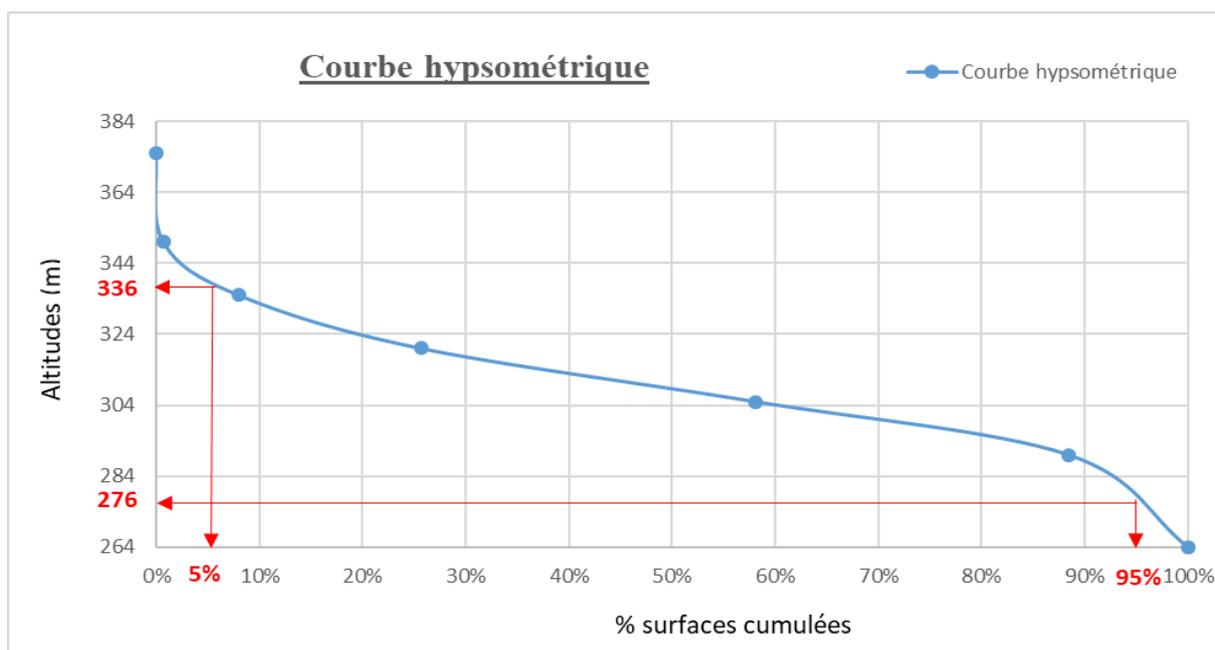


Figure 8: Courbe hypsométrique du bassin du Massili à Gonsé

L'indice global de pente trouvé à l'issue de cette courbe est de 0,5 m/km. Sa faible valeur justifie le relief peu incliné du bassin versant.

#### 4.2.2. Indices de pluies

Les indices de pluies indiquent l'abondance des pluies pour une période donnée. En effet les indices positifs indiquent des périodes humides et les indices négatifs des périodes sèches (Tableau VIII). La Figure 9 présente les indices en fonction des années.

Tableau VIII : Calcul des indices de pluies de 1985 à 2019

Années	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996
<b>Pan (mm)</b>	978	803,2	771,2	740,2	792,3	676,3	900,3	708,1	742,9	726,1	700,2	726,6
<b>Indices</b>	1,77	0,22	-0,06	-0,33	0,13	-0,90	1,08	-0,62	-0,31	-0,46	-0,69	-0,46
Années	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
<b>Pan (mm)</b>	538,6	669	799,5	594,1	618,7	680,5	823,4	772,5	839,4	596,8	717,6	763,3
<b>Indices</b>	-2,12	-0,97	0,19	-1,63	-1,41	-0,86	0,40	-0,05	0,54	-1,60	-0,53	-0,13
Années	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	
<b>Pan (mm)</b>	923,3	852,3	673,2	1003	795,3	844,9	898,6	974,1	874,1	860,2	852,7	
<b>Indices</b>	1,29	0,66	-0,93	1,99	0,15	0,59	1,07	1,74	0,85	0,73	0,66	

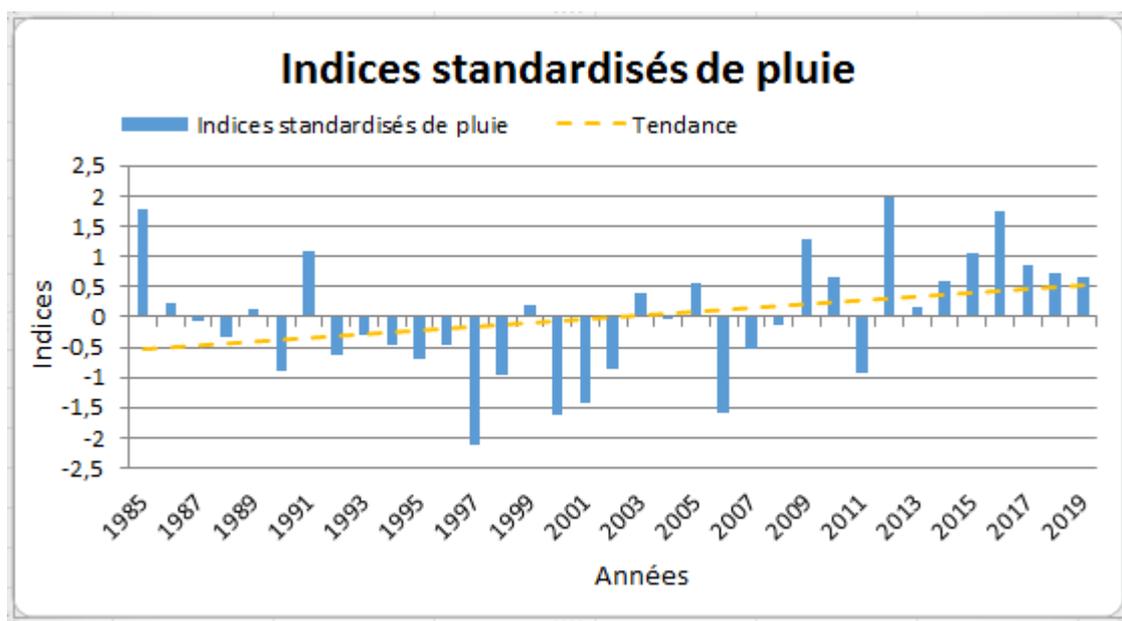


Figure 9 : Indices des pluies du Massili à Gonsé de 1985 à 2019

D'une manière générale, la tendance des pluies croit de 1985 à 2019. Les plus longues périodes humide et sèche sont respectivement de 2013 à 2019 et de 1993 à 1998 (Figure 9).

#### 4.3. Schématisation du bassin versant avec le logiciel HEC-GeoHMS

La schématisation en utilisant le logiciel HEC-GeoHMS se définit comme la représentation simplifiée des éléments d'un bassin versant tels que les sous bassins versants, les exutoires et le réseau hydrographique, en des objets utilisables dans HEC-HMS (Figure 10).

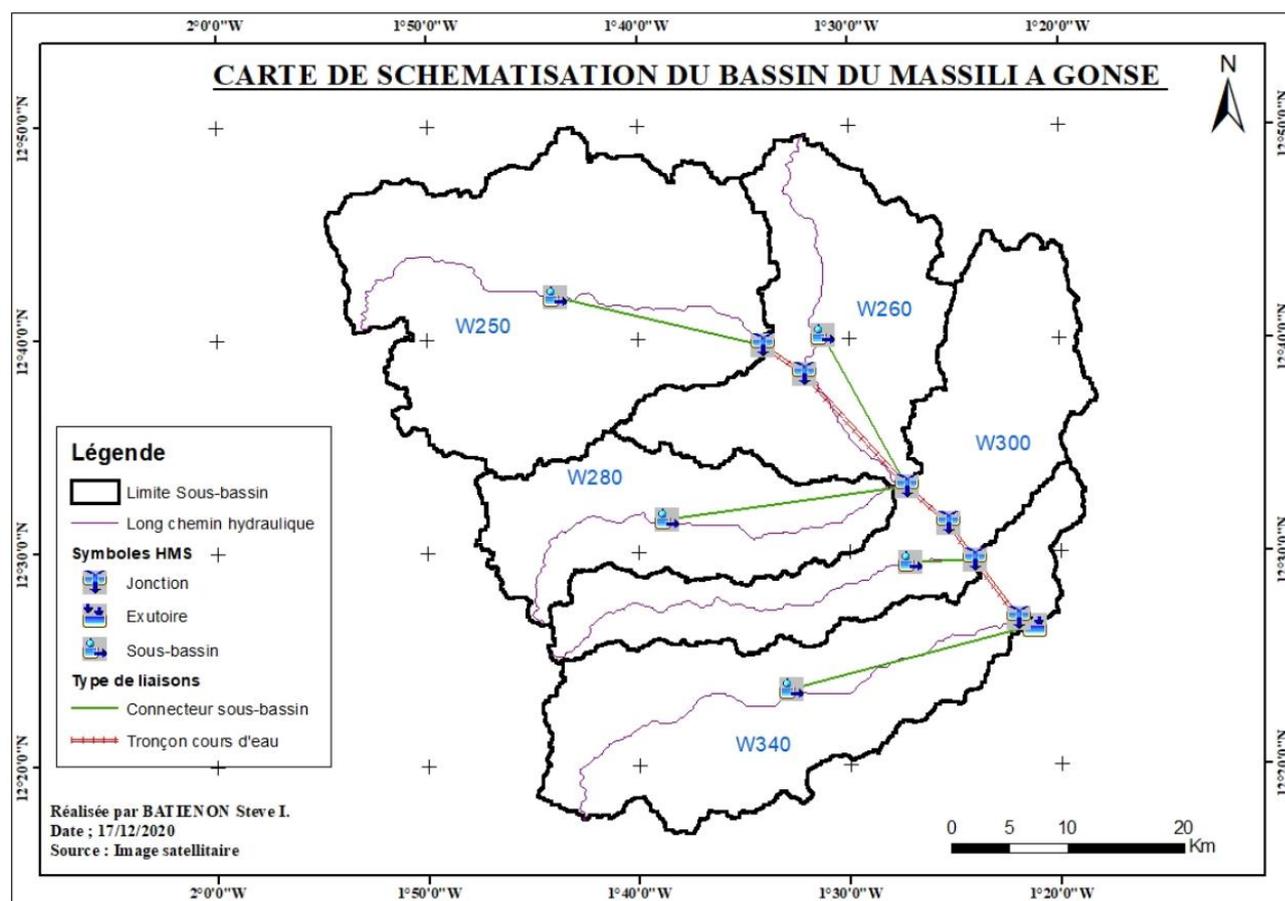


Figure 10 : Schématisation du bassin versant avec HEC-GeoHMS

Le logiciel HEC-GeoHMS permet également de déterminer les paramètres morphométriques de chaque sous bassin versant (Tableau IX).

Tableau IX : Paramètres déterminés par HEC- GeoHMS

Sous-bassins	Aire (km <sup>2</sup> )	CN	Plus long chemin hydraulique (m)
W250	763,66	68,81	41065,54
W260	457,01	65,17	47396,24
W280	336,88	75,45	45679,46
W300	514,05	73,37	44118,11
W340	556,52	81,40	52330,03

Les aires sont directement introduites dans HEC-HMS tandis que les CN, les pentes et les plus longs chemins hydrauliques permettent de calculer le temps de retard entre le pic de la crue et le pic de la précipitation (« Lag Time ») de chaque sous bassin versant à l'aide de l'Équation 9.

#### 4.4. Echantillons de calage et de validation des modèles

La série de données utilisée pour la simulation est de 13 ans (de 1985 à 1997). Elle est divisée principalement en deux sous séries. Le calage des paramètres se fera sur la première qui correspond aux deux tiers de la période d'observation puis validés sur la seconde correspondant au un tiers restant. La première année de la période de calage sera considérée comme la période de mise en route des modèles (Tableau X).

Tableau X : Périodes de mise en route, de calage et de validation des modèles

<b>Période d'observation</b>	<b>Début</b>	01/01/1985	13 ans
	<b>Fin</b>	31/12/1997	
<b>Mise en route du modèle</b>	<b>Début</b>	01/01/1985	1 ans
	<b>Fin</b>	31/12/1985	
<b>Période de calage</b>	<b>Début</b>	01/01/1986	7 ans
	<b>Fin</b>	31/12/1992	
<b>Période de validation</b>	<b>Début</b>	01/01/1993	5 ans
	<b>Fin</b>	31/12/1997	

#### 4.5. Calage du modèle HEC-HMS

Le calage d'un modèle consiste à estimer ses paramètres optimaux de façon à obtenir des résultats simulés qui approchent aux mieux les données de base observées. Les paramètres à optimiser sont ceux qui sont sensibles au modèle. Ils sont récapitulés dans le Tableau XI.

Tableau XI : Liste des paramètres d'entrée du modèle HEC-HMS

Modules	Formalismes utilisés	Paramètres	Etat de sensibilité
Estimation évapotranspiration	Méthode de la canopée	Etat initial de la canopée (%)	Non sensible
		Stockage maximum de la canopée (mm)	sensible
		Coefficient de culture	sensible
Fonction de production	Déficit et taux de pertes constant	Déficit initial (mm)	Non sensible
		Stockage maximum d'eau dans le sol (mm)	Non sensible
		Taux d'infiltration constant (mm/h)	Non sensible
		Surface imperméable (%)	sensible
Fonction de transfert	Hydrogramme unitaire de la SCS	temps de retard entre le pic de la crue et le pic de la précipitation (min)	sensible

Après avoir déterminer les paramètres sensibles au modèle, nous procéderons d'abord au calage manuel pour se rapprocher de l'hydrogramme observé et surtout ramener la fonction objective à une valeur **positive** si nécessaire, puis nous les optimiserons automatiquement par la méthode

du simplexe. Les résultats avant et après l'optimisation sont récapitulés dans le Tableau XII

Tableau XII : Récapitulatif des valeurs des paramètres avant et après optimisation

Sous bassins versants	W250		W260		W280		W300		W340	
	Avant	Après	Avant	Après	Avant	Après	Avant	Après	Avant	Après
Calage										
Stock. Max. de la canopée (mm)	100	<b>240</b>	100	<b>250</b>	100	<b>270</b>	100	<b>30</b>	100	<b>270</b>
Coéf. de culture	1,1	<b>1</b>	1,1	<b>1,1</b>	1,1	<b>1</b>	1,1	<b>0,5</b>	1,1	<b>1</b>
Surf. Imper. (%)	10	<b>11</b>	10	<b>8</b>	10	<b>13</b>	10	<b>15</b>	10	<b>12</b>
Tlag(min)	665,55	<b>5600</b>	692,68	<b>3000</b>	362,7	<b>10000</b>	359,8	<b>3200</b>	273,52	<b>6500</b>

Le stockage maximal de la canopée après optimisation des sous bassins versants W250, W260, W280 et W340 sont presque homogènes (autour de 260 mm). Par contre celui du sous bassin versant W300 est faible (30 mm). Cette différence est due par la forte densité de la végétation des sous bassins W250, W260, W280 et W340 par rapport au sous bassin W300. Les coefficients de culture et les surfaces imperméables rejoignent cette explication. En effet les coefficients de culture des sous bassins W250, W260, W280 et W340 dont les valeurs tournent autour 1, sont très supérieurs à celui du sous bassin versant W300 qui est de 0,5. Cette faible valeur du coefficient de culture traduit la faible densité de la végétation. De plus, le pourcentage de surfaces imperméables de W300 est plus grand que ceux des autres sous bassins restants.

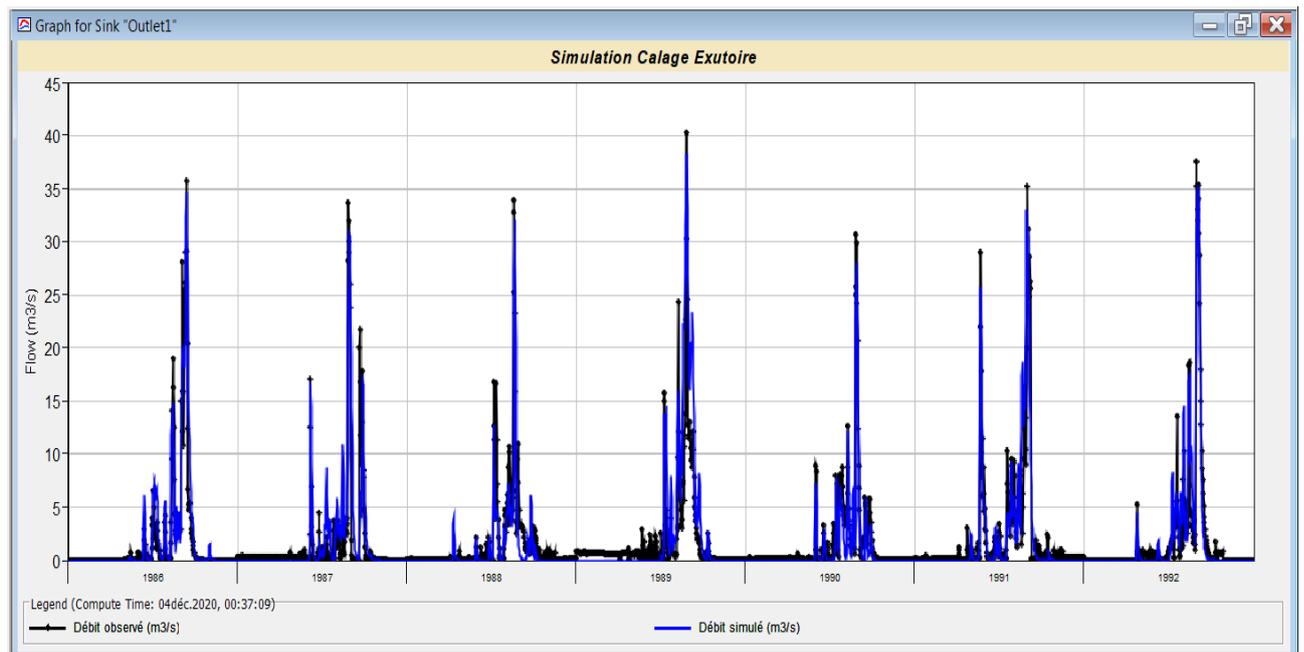


Figure 11 : Hydrographes simulé et observé pour le calage du modèle HEC-HMS

La Figure 11 montre que L'hydrogramme simulé reproduit très bien les pics de l'hydrogramme observé même s'ils sont peu sous-estimés. Nous remarquons que à chaque crue les deux hydrographes croient et décroissent au même moment. Le modèle est alors capable de bien simuler les crues. Par contre il a du mal à simuler les étiages, qui peut être expliquer par le rejet d'eau de l'ONEA, BRAKINA et d'autres entreprises dans le réseau hydrographique.

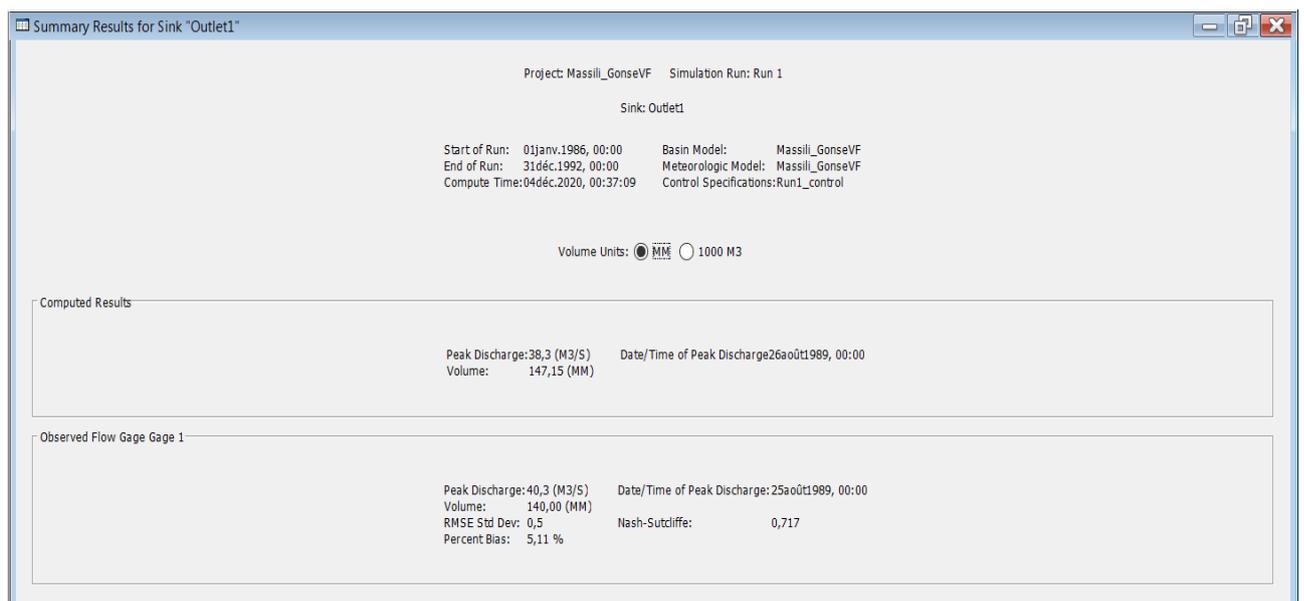


Figure 12 : Résultats du calage du modèle HEC-HMS

Les résultats du calage présentés à la Figure 12 montrent effectivement que les hydrographes

simulé et observé sont très bien rapprochés. D'après le tableau des indicateurs de critères de performance (Tableau IV), le coefficient de Nash qui est de **0,717** est compris entre **0,65** et **1**. Par conséquent le calage des paramètres est de très bonne qualité. Les autres coefficients RSR et le PBIAS indiquent également la même interprétation.

Le taux de variation entre les volumes observé et simulé est de **5,1%** et celui entre les pics des débits observé et simulé est de **4,96%**. Ces deux faibles valeurs indiquent que les volumes et la crue maximale sont également bien simulés.

En résumé le calage du modèle HEC-HMS a été très bien exécuté. Pour confirmer la performance du modèle, nous procéderons sa validation.

#### 4.6. Validation du modèle HEC-HMS

La validation consiste à tester la performance du modèle en utilisant le jeu de paramètres obtenu par la calibration pour simuler sur une période différente à celle du calage. Elle permet de juger la reproductivité du modèle et la représentativité des paramètres calés.

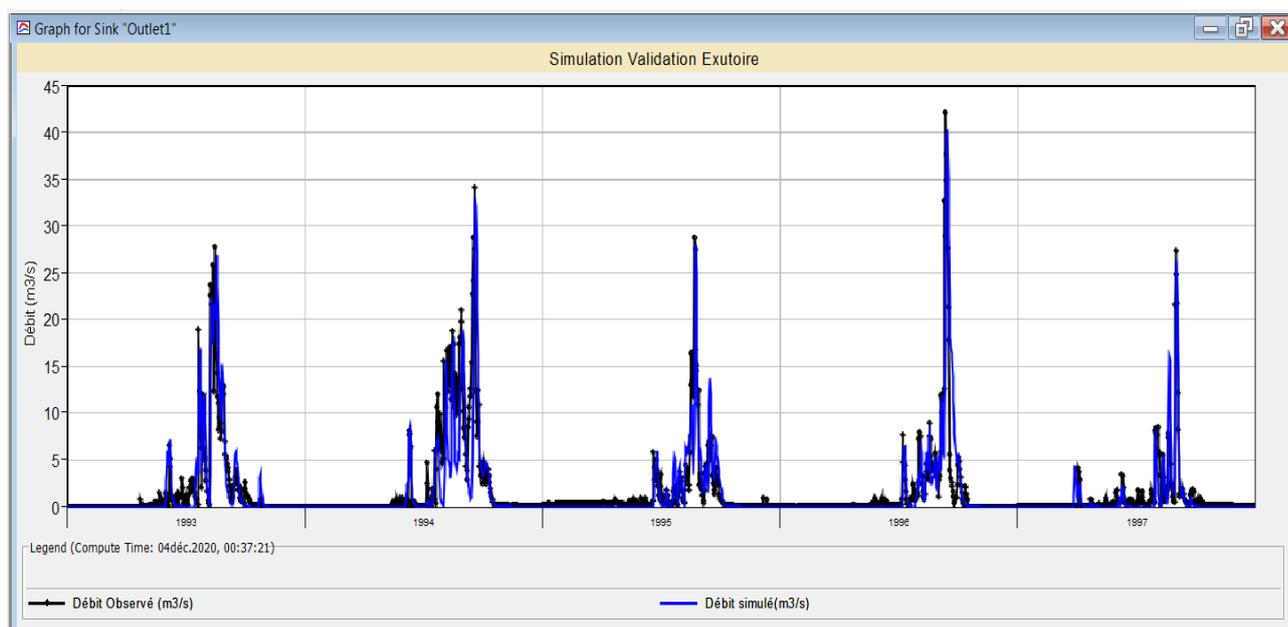


Figure 13 : Hydrogrammes simulé et observé pour la validation du modèle HEC-HMS

La Figure 13 montre que l'hydrogramme simulé reproduit bien l'hydrogramme observé avec moins de précision par rapport au calage. Malgré quelques crues et les étiages qui ne sont pas très bien reproduits, globalement les deux hydrogrammes se rapprochent bien.



Figure 14 : Résultats de la validation du modèle HEC-HMS

Les résultats de la validation présentés à la Figure 14 montrent que l'hydrogramme observé est bien rapproché. D'après le Tableau IV, le coefficient de Nash qui est de **0,631** est compris entre **0,55 et 0,65**. Par conséquent la validation des paramètres est de bonne qualité. Les autres coefficients RSR et le PBIAS indiquent également la même interprétation.

Le taux de variation entre les volumes observé et simulé est de **8,58%** et celui entre les pics des débits observé et simulé est de **4,74%**. Les volumes et la crue maximale sont alors bien simulés compte tenu des faibles valeurs des taux des variations.

Nous pouvons donc conclure que sur une période différente à celle du calage, le modèle HEC-HMS simule bien les écoulements du bassin. C'est alors un modèle performant.

#### 4.7. Calage du modèle GR4J

Tableau XIII : Paramètres calés du modèle GR4J

Paramètres	X1 (mm)	X2 (mm)	X3 (mm)	X4 (j)
Valeurs	820,57	-1,88	19,3	1,18

Le Tableau XIII indique une grande capacité de réservoir de production (820,57 mm) tandis que celle du réservoir de routage est petite (19,3 mm). Le bassin peut alors regorger une importante quantité d'eau avant de laisser une partie couler vers l'exutoire. De plus nous enregistrons des pertes vers la nappe qui équivaut à 1,88 mm. Le temps de base de l'hydrogramme unitaire HU1 est estimé à 1,18 jours.

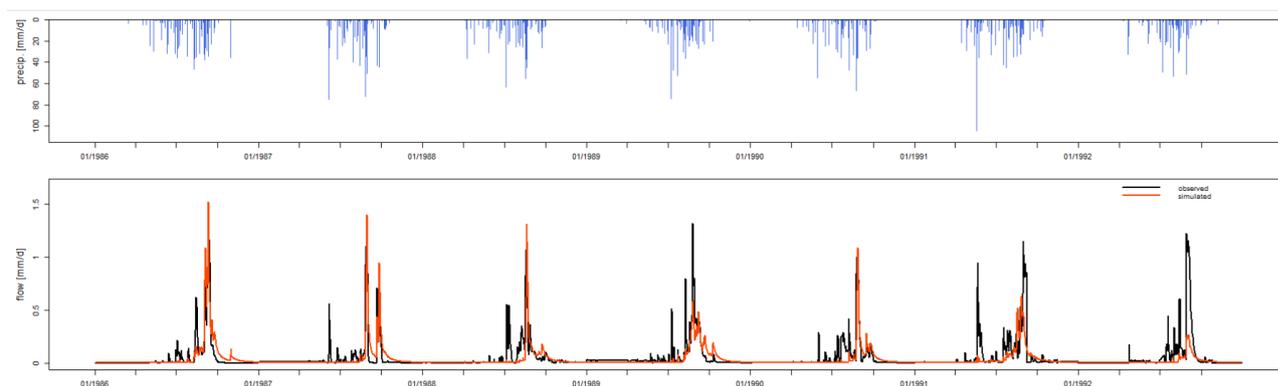


Figure 15 : Hydrogrammes simulé et observé pour le calage de GR4J

La Figure 15 montre que L'hydrogramme simulé reproduit moyennement l'hydrogramme observé sur la période du calage. Le coefficient de Nash issu de cette simulation est **0,52**. Cette valeur est passable d'après la classification du Tableau IV. Les pics des hydrogrammes simulés pour les années 1989, 1991 et surtout 1992 sont très inférieurs aux pics des hydrogrammes observés. De plus le modèle ne réagit pas dès les premières crues. Toutes ces imprécisions peuvent être expliquées par le faite que GR4J considère le bassin versant comme homogène ce qui n'est pas vrai dans la réalité.

#### 4.8. Validation du modèle GR4J

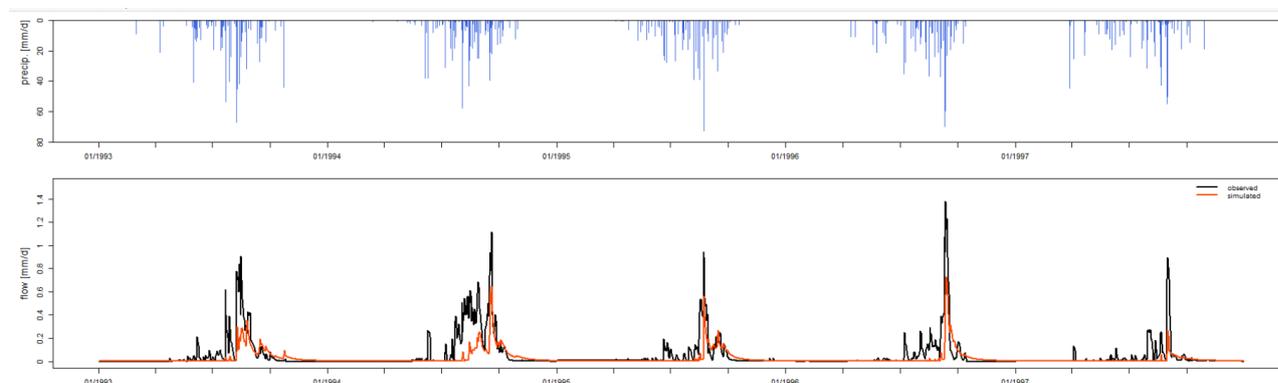


Figure 16 : Hydrogrammes simulé et observé pour la validation de GR4J

La Figure 16 montre que L'hydrogramme simulé reproduit moyennement l'hydrogramme observé sur la période de validation. Le coefficient de Nash de la validation du modèle est **0,42**. Ce coefficient est aussi moyen d'après le Tableau IV. Comme nous l'avons expliqué pour le calage, certains pics sont très sous-estimés et le modèle a du mal à simuler les premières crues. D'après les résultats du calage et de la validation du modèle GR4J nous pouvons donc conclure qu'il simule moyennement les écoulements du bassin.

#### 4.9. Comparaison des modèles HEC-HMS et GR4J appliqués au bassin versant

Le bassin versant de Massili à Gonsé est plus adapté au modèle semi-distribué HEC-HMS qu'au modèle global GR4J. En effet les critères de performance Nash de GR4J sont inférieurs à ceux de HEC-HMS. Les raisons qui peuvent expliquer cette différence sont les suivantes :

- ✓ Le modèle HEC-HMS possède plus de paramètres d'entrée que GR4J et offre cependant plus de possibilités à renseigner les caractéristiques du bassin versant.
- ✓ GR4J considère les caractéristiques du bassin versant comme homogènes, ce qui ne tend pas vers la réalité parce que la superficie de notre bassin versant est grand (environ 2640 km<sup>2</sup>).

Pour mieux comprendre le fonctionnement hydrologique, nous allons simuler le débit à l'aide du modèle le plus adapté HEC-HMS sur des périodes humide et sèche pour mesurer sa performance dans les conditions climatiques différentes.

#### 4.10. Simulation sur une période humide (de 1986 à 1987)

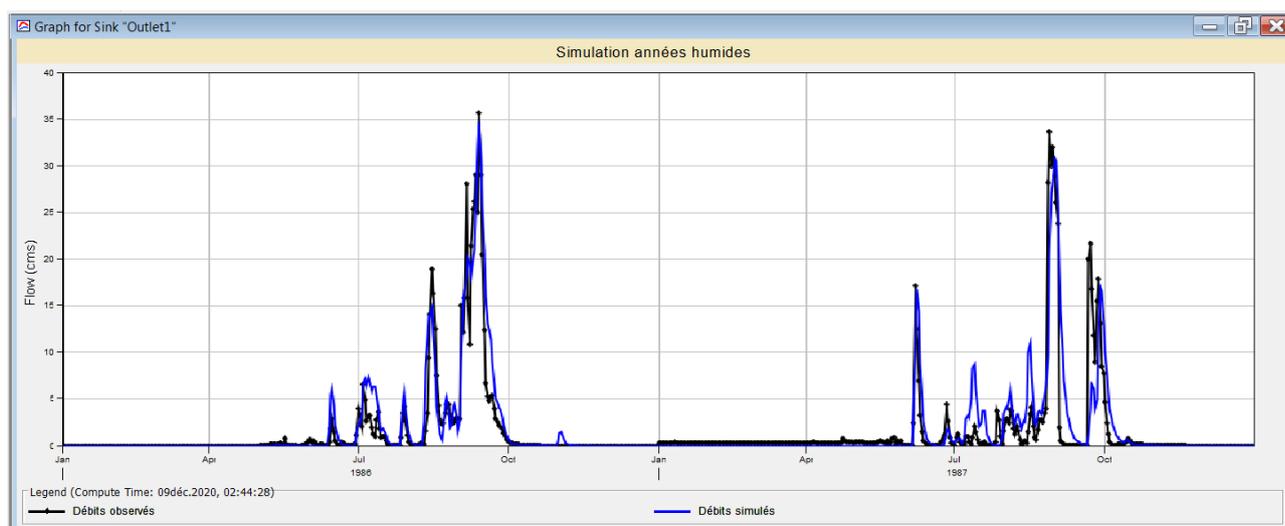


Figure 17 : Hydrogrammes simulé et observé sur une période humide

La Figure 17 montre que l'hydrogramme simulé reproduit très bien l'hydrogramme observé sur la simulation exécutée sur une période humide. Par ailleurs nous remarquons que le modèle surestime peu les étiages.

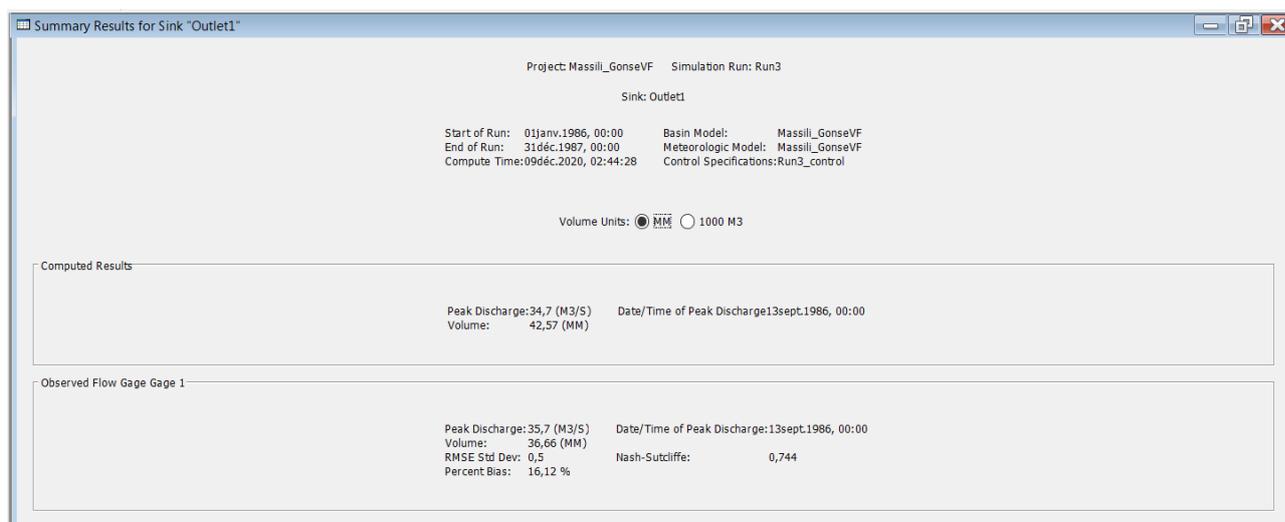


Figure 18 : Résultats de la simulation sur une période humide

La Figure 18 confirme la très bonne simulation sur une période humide de 1986 à 1987, avec une valeur de **0,744** comme critère de Nash. En effet d'après le tableau des indicateurs de critères de performance (Tableau IV), ce coefficient est compris entre **0,65 et 1**, par conséquent la simulation est de très bonne qualité.

Le taux de variation entre les volumes observé et simulé est de **16,2%** et celui entre les pics des débits observé et simulé est de **2,8%**. En période humide, le volume simulé (**42,57 mm**) est très élevé par rapport au volume observé (**36,66 mm**) à cause de l'abondance des pluies, traduisant ainsi la grande valeur du taux des variations des volumes (16,2%). Quant 'à la crue maximale, la simulation est de bonne qualité.

#### 4.11. Simulation sur une période sèche (1996-1997)

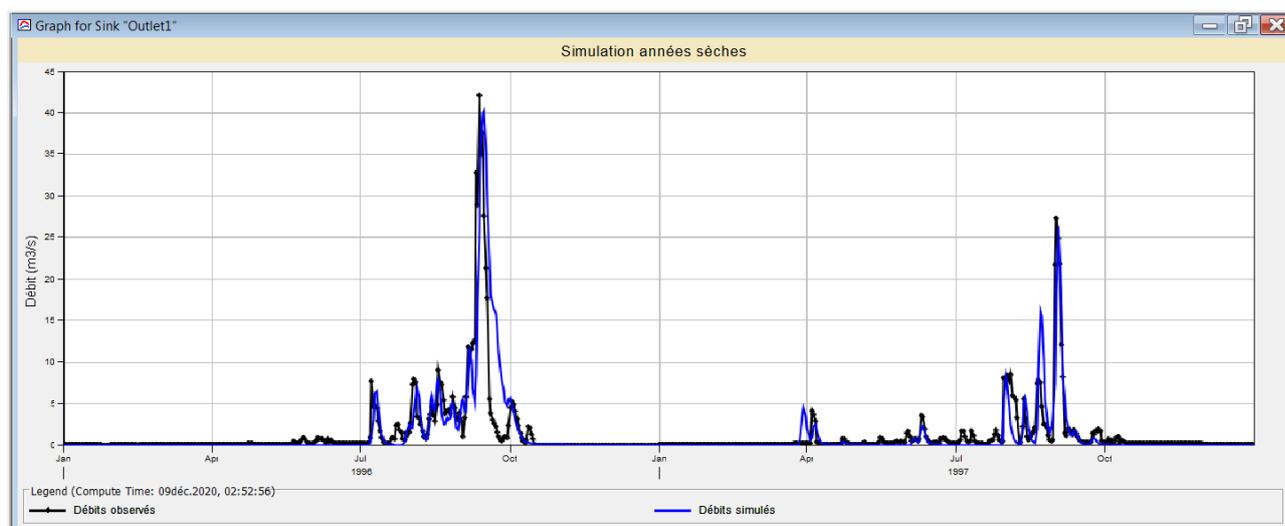
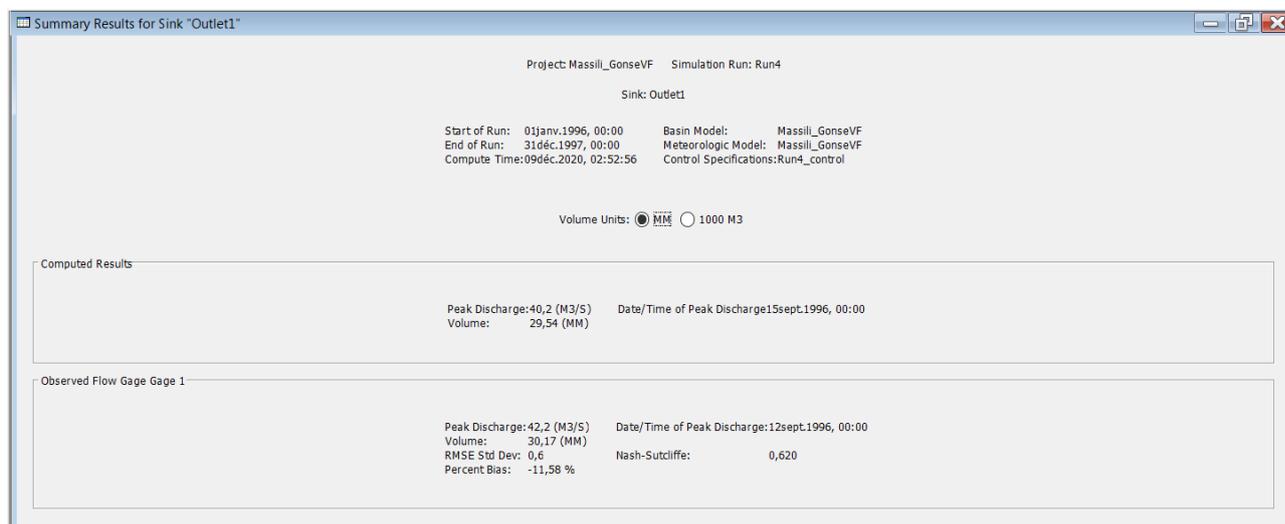


Figure 19 : Hydrogrammes simulé et observé sur une période sèche

La Figure 19 montre que l'hydrogramme simulé reproduit bien l'hydrogramme observé. Contrairement à la période humide, le modèle sous-estime peu les étiages sur une période sèche.



*Figure 20 : Résultats de la simulation sur une période sèche*

La Figure 20 confirme la bonne simulation sur une période sèche de 1996 à 1997, avec une valeur de **0,62** comme critère de Nash. En effet d'après le tableau des indicateurs de critères de performance (Tableau IV), ce coefficient est compris entre **0,65 et 1**, par conséquent la simulation est de bonne qualité.

Le taux de variation entre les volumes observé et simulé est de **2,1%** et celui entre les pics des débits observé et simulé est de **4,7%**. En période sèche, le volume simulé (**29,54 mm**) est peu inférieur au volume observé (**30,17 mm**) à cause de la rareté des pluies. Mais les faibles taux de variations indiquent que les volumes et la crue maximale sont alors bien simulés

En résumé, le modèle répond bien sur les deux périodes, mais il simule mieux sur la période humide (**Nash=0,744**) que sur la période sèche (**Nash=0,620**). Les écoulements sont surestimés en période humide tandis qu'ils sont sous-estimés en période sèche.

Nous pouvons donc conclure que notre modèle est **robuste** parce qu'en plus du calage et de la validation, le modèle reste performant sur les périodes humide et sèche.

## **V. Conclusion et recommandations**

Ce travail traite la modélisation pluie débit du bassin versant du Massili à Gonsé à l'aide d'un modèle semi-distribué (HEC-HMS) et d'un modèle global (GR4J). Il ressort des résultats des simulations que le modèle HEC-HMS est le plus performant et le plus robuste. Il a les meilleurs critères de Nash pour le calage et la validation qui sont respectivement 0,717 et 0,631. Par contre GR4J présente des résultats moyens avec des critères de Nash de 0,52 pour le calage et 0,42 pour la validation. Quant aux étiages, les deux modèles ont du mal à reproduire les débits observés à cause des rejets des différentes entreprises (ONEA, BRAKINA etc.) dans le réseau hydrographique.

Nous avons également analysé la capacité du modèle le plus performant (HEC-HMS) à réagir dans des conditions climatiques différentes (périodes humide et sèche). Nous en venons que HEC-HMS globalement simule bien les écoulements sur les deux périodes, mais avec une préférence sur la période humide.

Pour améliorer les résultats de la modélisation pluie-débit du bassin du Massili à Gonsé, il est important de prendre en compte les recommandations suivantes.

- ✓ Implantation des stations hydrométriques à l'intérieur du bassin afin de mesurer les débits observés aux exutoires des sous bassins versants.
- ✓ Suivis permanent des écoulements au niveau des exutoires

## Bibliographie

- AMIAR, S. (2014). *Modélisation pluie-débit : Outil de prévision des crues le Mieux adapté par le modèle hydrologique GR*. Abou Bekr Belkaid.
- DGRE/DEIE. (2011). *Etat des lieux des ressources en eau du bassin du Nakanbé, Ministère de l'Agriculture de l'Hydraulique et des Ressources Halieutiques, Ouagadougou Burkina Faso*.
- Diallo, B. M. (2014). *IMPACT DE LA CRUE FLUVIALE SUR LES ECOSYSTEMES ET LES CONDITIONS DE VIE DES POPULATIONS RIVERAINES DU NAKANBE (BURKINA FASO)*.
- Edijatno, N., & Michel, C. (1989). Un modèle pluie-débit journalier à trois paramètres. *La Houille Blanche*, 2, 113-121.
- Edijatno, Nascimento, & NO, Y. (1999). X., Makhlouf, Z. et Michel, C.(1999). *GR3J: a daily watershed model with three free parameters. Hydrological Sciences Journal*, 44(2), 263-278.
- Feldman, A. D. (2000). HEC HMS Technical reference manual. *CPD-74B US Army Corps of Engineers. March*.
- Fleming, M. J., & Doan, J. H. (2013). HEC-GeoHMS Geospatial Hydrologic Modeling Extension User's Manual. *California: US Army Corps of Engineers*.
- Fontès, J., & Guinko, S. (1995). *Carte de la végétation et de l'occupation du sol du Burkina Faso*.
- Gupta, H. V., Kling, H., & Yilmaz, koray k. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance implications for improving hydrological modelling. *Journal of hydrology*, 80-91.
- INSD. (2006). *Recensement général de la population en 2006 : Structure par age et sexe des*

*villages du Burkina Faso. Institut National de la Statistique et de la Démographie (INSD) : Ministère de l'Economie et des Finances, Ouagadougou, Burkina Faso.*

Kagoné, H. (2000). *Gestion durable des écosystèmes pâturés en zone nord-soudanienne du Burkina Faso*. Thèse de doctorat, Faculté Universitaire des Sciences agronomiques de ....

Laborde, J. P., & Mouhous, N. (1998). Notice d'utilisation du logiciel Hydrolab. *Université de Nice Sophia Antipolis*.

Mardhel, V., Pinson, S., & Allier, D. (2020). Description of an indirect method (IDPR) to determine spatial distribution of infiltration and runoff and its hydrogeological applications to the French territory. *Journal of Hydrology*, 592, 125609.

Mathevet, T. (2005). *Quels modèles pluie-débit globaux au pas de temps horaire ? Développements empiriques et comparaison de modèles sur un large échantillon de bassins versants*. Doctorat spécialité Sciences de l'eau, ENGREF Paris.

Michel, C., & Edijatno & Leviandier, T. (1991). Progrès et application de la modélisation conceptuelle pluie-débit. *Rapport quadriennal 1987-1990 pour la XXème Assemblée Générale de l'Union Géodésique et Géophysique Internationale*, 219-222.

Moriasi, D. N., Arnold, J. G., & Van Liew, M. W. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Soil & Water Division of ASABE*, 50(3), 885-900.

Nascimento, N. D. O. (1995). *Appréciation à l'aide d'un modèle empirique des effets d'actions anthropiques sur la relation pluie-débit à l'échelle d'un bassin versant*.

Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models. *Journal of hydrology*, 10, 282-290.

Nguetora, M., Musy, A., & Caloz, R. (2000). *Modélisation d'un bassin versant pour la gestion des ressources en eau à l'aide d'un système d'information géographique : Application*

*au bassin versant du Massili au Burkina Faso.*

OUANDAOGO, S. (2008). *RESSOURCES EN EAU SOUTERRAINE DU CENTRE URBAIN DE OUAGADOUGOU AU BURKINA FASO QUALITE ET VULNERABILITE.*

Université d'Avignon.

Perrin, C. (2000). *Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit.* Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG.

Perrin, C. (2002). *Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative.*

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

Rocha, N. R. (2014). *Débits de crue et analyse hydrologique de petits bassins versants.* Université Laval.

Scharffenberg, W. A., & Fleming, M. J. (2006). *Hydrologic modeling system HEC-HMS: user's manual.* US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center.

Soulama, D., Dango, L., & Ouedraogo, S. (2013). *Diagnostic conjoint du sous bassin du Massili supérieur : Etat des lieux et enjeux de gestion en vue de la mise en place d'un comité local de l'eau.* (p. 8-22) [Etude de Diagnostic]. AEN.

Tie, A. G. B., & Girard, G. (1998). Nouvelle approche pour l'estimation spatiale de la pluie journalière en zone soudano-sahélienne. *Hydrological sciences journal*, 43(6), 905-919.

## **Annexes**

Annexe 1 : Codes de calage et de validation sur R .....	ii
Annexe 2 : Comblement des lacunes.....	vi

## Annexe 1 : Codes de calage et de validation sur R

### Code calage

```
rm(list=ls())
library(airGR)
#! Repertoire de travail
setwd("C:/Users/User/Documents/GR4J_Gonse")
#! Lecture des donnees
BasinObs<-
read.csv("C:/Users/user/Documents/S10/DEIE/stage_DEIE/Données_combléesVF.csv",
header = T,sep = ";",dec=",")
BasinInfo<-list(BasinArea=2643.65)
# ! reformatage des dates
BasinObs$DatesR <- as.POSIXct(as.character(BasinObs$DatesR), format = "%d/%m/%Y", tz
= "UTC")
## preparation of InputsModel object
InputsModel <- CreateInputsModel(FUN_MOD = RunModel_GR4J, DatesR = dd.Input$Date,
Precip = dd.Input$P, PotEvap = dd.Input$E)
## calibration period selection (La période de mise en route est par défaut l'année avant de
debut de la période de calage
Ind_Run <- seq(which(format(dd.Input$Date, format = "%d/%m/%Y
%H:%M")=="01/01/1986 00:00"), which(format(dd.Input$Date, format "%d/%m/%Y
%H:%M")=="31/12/1992 00:00"))
## preparation of RunOptions object
RunOptions <- CreateRunOptions(FUN_MOD = RunModel_GR4J, InputsModel =
InputsModel,
IndPeriod_Run = Ind_Run)
##
=====
=====#
##! calibration criterion: preparation of the InputsCrit object
InputsCrit <- CreateInputsCrit(FUN_CRIT = ErrorCrit_NSE, InputsModel = InputsModel,
RunOptions = RunOptions, Qobs = dd.Input$Qmm[Ind_Run])
```

### ## preparation of CalibOptions object

```
CalibOptions <- CreateCalibOptions(FUN_MOD = RunModel_GR4J, FUN_CALIB = Calibration_Michel)
```

### ## calibration

```
OutputsCalib <- Calibration_Michel(InputsModel = InputsModel, RunOptions = RunOptions, InputsCrit = InputsCrit, CalibOptions = CalibOptions, FUN_MOD = RunModel_GR4J, FUN_CRIT = ErrorCrit_NSE)
```

```
# # ===== END OF CALIBRATION PART =====#
```

### ## simulation

```
Param <- OutputsCalib$ParamFinalR  
OutputsModel <- RunModel_GR4J (InputsModel = InputsModel, RunOptions = RunOptions, Param = Param)
```

### ## results preview

```
plot(OutputsModel, Qobs = BasinObs$Qmm[Ind_Run],lwd=1.3)
```

### # efficiency criterion: Nash-Sutcliffe Efficiency

```
InputsCrit <- CreateInputsCrit(FUN_CRIT = ErrorCrit_NSE, InputsModel = InputsModel, RunOptions = RunOptions, Qobs = dd.Input$Qmm[Ind_Run])
```

```
OutputsCrit <- ErrorCrit_NSE(InputsCrit = InputsCrit, OutputsModel = OutputsModel)
```

```
##!
```

```
=====  
=====
```

### #!Sauvegarde des résultats

```
Res1 <- OutputsModel[names(OutputsModel) != "StateEnd"] # restait de l'element de taille differente
```

```
Res1$DatesR <- as.character(Res1$DatesR) # conversion des dates du format POSIX en caracteres
```

```
Res1 <- do.call("cbind", Res1) # concatenation des elements de la liste en colonnes de data.frame
```

```
#! export du data.frame
```

```
write.table(Res1, file="Gonse_Output.txt", row.names = FALSE, quote = FALSE, sep = ";")
```

## **Code Validation**

```
rm(list=ls())
library(airGR)
#! Repertoire de travail
setwd("C:/Users/User/Documents/GR4J_Gonse")
#! Lecture des donnees
BasinObs<-
read.csv("C:/Users/user/Documents/S10/DEIE/stage_DEIE/Données_combléesVF.csv",
header = T,sep = ";",dec=",")
BasinInfo<-list(BasinArea=2643.65)
# ! reformatage des dates
BasinObs$DatesR <- as.POSIXct(as.character(BasinObs$DatesR), format = "%d/%m/%Y", tz
= "UTC")
## preparation of InputsModel object
InputsModel <- CreateInputsModel(FUN_MOD = RunModel_GR4J, DatesR = dd.Input$Date,
Precip = dd.Input$P, PotEvap = dd.Input$E)
## calibration period selection
Ind_Run <- seq(which(format(dd.Input$Date, format = "%d/%m/%Y
%H:%M")=="01/01/1993 00:00"), which(format(dd.Input$Date, format = "%d/%m/%Y
%H:%M")=="31/12/1997 00:00"))
## preparation of RunOptions object
RunOptions <- CreateRunOptions(FUN_MOD = RunModel_GR4J, InputsModel =
InputsModel,
IndPeriod_Run = Ind_Run,IndPeriod_WarmUp=0L)
## simulation
Param <- c(X1 = 820.571, X2 = -1.883, X3 = 19.298, X4 = 1.183)
OutputsModel <- RunModel_GR4J (InputsModel = InputsModel,
RunOptions = RunOptions, Param = Param)
## results preview
plot(OutputsModel, Qobs = BasinObs$Qmm[Ind_Run],lwd=1.3)
# efficiency criterion: Nash-Sutcliffe Efficiency
InputsCrit <- CreateInputsCrit(FUN_CRIT = ErrorCrit_NSE, InputsModel = InputsModel,
```

```
RunOptions = RunOptions, Qobs = dd.Input$Qmm[Ind_Run])
OutputsCrit <- ErrorCrit_NSE(InputsCrit = InputsCrit, OutputsModel = OutputsModel)
##!
=====
=====
##!Sauvegarde des résultats
Res1 <- OutputsModel[names(OutputsModel) != "StateEnd"] # retraits de l'élément de taille
différente
Res1$DatesR <- as.character(Res1$DatesR) # conversion des dates du format POSIX en
caractères
Res1 <- do.call("cbind", Res1) # concaténation des éléments de la liste en colonnes de
data.frame
##! export du data.frame
write.table(Res1, file="Gonse_Output.txt", row.names = FALSE, quote = FALSE, sep = ";")
```

## Annexe 2 : Comblement des lacunes

Jours	Années												
	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997
1	0,00	0,00	0,29	0,10	0,89	0,00	0,22	0,00	0,00	0,00	0,24	0,02	0,08
2	0,02	0,00	0,30	0,08	0,86	0,02	0,18	0,00	0,00	0,00	0,25	0,02	0,08
3	0,05	0,00	0,30	0,07	0,86	0,03	0,22	0,00	0,00	0,00	0,25	0,02	0,08
4	0,07	0,00	0,31	0,07	0,83	0,05	0,14	0,00	0,00	0,00	0,25	0,02	0,08
5	0,10	0,00	0,31	0,06	0,81	0,07	0,12	0,00	0,00	0,00	0,26	0,02	0,08
6	0,12	0,00	0,32	0,04	0,80	0,08	0,13	0,00	0,00	0,00	0,26	0,03	0,08
7	0,14	0,00	0,32	0,02	0,77	0,10	0,10	0,00	0,00	0,00	0,27	0,03	0,08
8	0,17	0,00	0,32	0,01	0,75	0,12	0,08	0,00	0,00	0,00	0,28	0,03	0,09
9	0,19	0,00	0,33	0,00	0,73	0,13	0,06	0,00	0,00	0,00	0,28	0,03	0,09
10	0,22	0,00	0,34	0,00	0,72	0,15	0,03	0,00	0,00	0,00	0,28	0,03	0,08
11	0,24	0,00	0,41	0,15	0,53	0,37	0,12	0,00	0,00	0,00	0,34	0,03	0,08
12	0,26	0,00	0,34	0,02	0,67	0,17	0,06	0,00	0,00	0,00	0,29	0,02	0,09
13	0,29	0,00	0,31	0,04	0,73	0,09	0,05	0,00	0,00	0,00	0,28	0,02	0,11
14	0,31	0,00	0,31	0,04	0,73	0,07	0,05	0,00	0,00	0,00	0,28	0,02	0,11
15	0,34	0,00	0,31	0,05	0,73	0,07	0,09	0,00	0,00	0,00	0,27	0,02	0,10
16	0,36	0,00	0,31	0,05	0,73	0,07	0,09	0,00	0,00	0,00	0,27	0,02	0,10
17	0,38	0,00	0,30	0,06	0,73	0,06	0,11	0,00	0,00	0,00	0,27	0,02	0,10
18	0,04	0,00	0,31	0,05	0,81	0,06	0,15	0,00	0,00	0,00	0,26	0,02	0,10
19	0,17	0,00	0,30	0,06	0,80	0,06	0,09	0,00	0,00	0,00	0,26	0,01	0,10
20	0,30	0,00	0,30	0,07	0,77	0,05	0,04	0,00	0,00	0,00	0,27	0,01	0,10
21	0,43	0,00	0,31	0,07	0,72	0,06	0,16	0,00	0,00	0,00	0,28	0,01	0,10
22	0,56	0,00	0,34	0,00	0,59	0,16	0,33	0,00	0,00	0,00	0,31	0,01	0,11
23	0,69	0,00	0,34	0,01	0,56	0,17	0,39	0,00	0,00	0,00	0,31	0,01	0,11
24	0,67	0,00	0,34	0,01	0,56	0,17	0,39	0,00	0,00	0,00	0,31	0,00	0,11
25	0,28	0,00	0,34	0,01	0,67	0,16	0,10	0,00	0,00	0,00	0,29	0,00	0,11
26	0,11	0,00	0,34	0,01	0,72	0,16	0,05	0,00	0,00	0,00	0,28	0,00	0,11
27	0,05	0,00	0,34	0,02	0,73	0,16	0,10	0,00	0,00	0,00	0,28	0,00	0,11
28	0,03	0,00	0,34	0,02	0,73	0,16	0,10	0,00	0,00	0,00	0,28	0,00	0,11
29	0,01	0,00	0,35	0,01	0,73	0,16	0,09	0,00	0,00	0,00	0,28	0,00	0,11
30	0,41	0,00	0,33	0,00	0,66	0,16	0,16	0,00	0,00	0,00	0,29	0,01	0,11
31	0,41	0,00	0,33	0,01	0,66	0,16	0,11	0,00	0,00	0,00	0,30	0,02	0,11
32	0,41	0,00	0,33	0,01	0,66	0,16	0,11	0,00	0,00	0,00	0,30	0,02	0,11
33	0,41	0,00	0,33	0,01	0,66	0,16	0,11	0,00	0,00	0,00	0,30	0,03	0,11
34	0,41	0,00	0,33	0,01	0,66	0,16	0,11	0,00	0,00	0,00	0,30	0,03	0,11
35	0,41	0,00	0,33	0,01	0,66	0,16	0,11	0,00	0,00	0,00	0,30	0,03	0,11
36	0,41	0,00	0,33	0,01	0,66	0,16	0,11	0,00	0,00	0,00	0,30	0,02	0,11
37	0,41	0,00	0,33	0,01	0,66	0,16	0,11	0,00	0,00	0,00	0,30	0,02	0,11
38	0,41	0,00	0,33	0,01	0,66	0,16	0,11	0,00	0,00	0,00	0,30	0,02	0,11
39	0,42	0,00	0,33	0,00	0,66	0,16	0,15	0,00	0,00	0,00	0,30	0,02	0,11
40	0,42	0,00	0,33	0,00	0,66	0,16	0,15	0,00	0,00	0,00	0,30	0,01	0,11
41	0,42	0,00	0,33	0,00	0,66	0,16	0,15	0,00	0,00	0,00	0,30	0,01	0,11

*Contribution à la Caractérisation hydrologique du bassin versant du Massili à Gonsé au Burkina Faso à travers  
une approche multimodèle pluie débit (HEC-HMS, GR4J)*

42	0,42	0,00	0,33	0,00	0,66	0,16	0,15	0,00	0,00	0,00	0,30	0,01	0,11
43	0,42	0,00	0,33	0,00	0,66	0,16	0,15	0,00	0,00	0,00	0,30	0,01	0,12
44	0,42	0,00	0,33	0,00	0,66	0,16	0,15	0,00	0,00	0,00	0,30	0,01	0,12
45	0,42	0,00	0,33	0,00	0,66	0,16	0,15	0,00	0,00	0,00	0,30	0,00	0,12
46	0,42	0,00	0,33	0,00	0,66	0,16	0,15	0,00	0,00	0,00	0,30	0,00	0,12
47	0,42	0,00	0,33	0,00	0,66	0,16	0,15	0,00	0,00	0,00	0,30	0,00	0,12
48	0,42	0,00	0,33	0,00	0,66	0,16	0,15	0,00	0,00	0,00	0,30	0,00	0,12
49	0,42	0,00	0,33	0,00	0,66	0,16	0,15	0,00	0,00	0,00	0,30	0,00	0,12
50	0,42	0,00	0,33	0,00	0,66	0,16	0,15	0,00	0,00	0,00	0,30	0,00	0,12
51	0,42	0,00	0,33	0,00	0,66	0,16	0,15	0,00	0,00	0,00	0,30	0,00	0,12
52	0,42	0,00	0,33	0,00	0,66	0,16	0,15	0,00	0,00	0,00	0,30	0,00	0,12
53	0,42	0,00	0,33	0,00	0,66	0,16	0,15	0,00	0,00	0,00	0,30	0,00	0,12
54	0,42	0,00	0,33	0,00	0,66	0,16	0,15	0,00	0,00	0,00	0,30	0,00	0,12
55	0,42	0,00	0,33	0,00	0,66	0,16	0,15	0,00	0,00	0,00	0,30	0,00	0,12
56	0,42	0,00	0,33	0,00	0,66	0,16	0,15	0,00	0,00	0,00	0,30	0,00	0,12
57	0,42	0,00	0,33	0,00	0,66	0,16	0,15	0,00	0,00	0,00	0,30	0,00	0,12
58	0,42	0,00	0,33	0,00	0,66	0,16	0,15	0,00	0,00	0,00	0,30	0,00	0,12
59	0,42	0,00	0,33	0,00	0,66	0,16	0,15	0,00	0,00	0,00	0,30	0,00	0,12
60	0,42	0,00	0,33	0,00	0,66	0,16	0,15	0,00	0,00	0,00	0,30	0,00	0,12
61	0,43	0,00	0,33	0,01	0,64	0,16	0,16	0,00	0,00	0,00	0,30	0,00	0,12
62	0,43	0,00	0,33	0,01	0,64	0,16	0,16	0,00	0,00	0,00	0,30	0,00	0,12
63	0,43	0,00	0,33	0,01	0,64	0,16	0,16	0,00	0,00	0,00	0,30	0,00	0,12
64	0,43	0,00	0,33	0,01	0,64	0,16	0,16	0,00	0,00	0,00	0,30	0,01	0,13
65	0,43	0,00	0,33	0,01	0,64	0,16	0,16	0,00	0,00	0,00	0,30	0,01	0,13
66	0,43	0,00	0,33	0,01	0,64	0,16	0,16	0,00	0,00	0,00	0,30	0,01	0,13
67	0,43	0,00	0,33	0,01	0,64	0,16	0,16	0,00	0,00	0,00	0,30	0,01	0,13
68	0,43	0,00	0,33	0,01	0,64	0,16	0,16	0,00	0,00	0,00	0,30	0,01	0,13
69	0,43	0,00	0,33	0,01	0,64	0,16	0,16	0,00	0,00	0,00	0,30	0,01	0,13
70	0,43	0,00	0,33	0,01	0,64	0,16	0,16	0,00	0,00	0,00	0,30	0,01	0,13
71	0,42	0,00	0,34	0,01	0,64	0,16	0,18	0,00	0,00	0,00	0,30	0,01	0,13
72	0,43	0,00	0,33	0,01	0,64	0,16	0,16	0,00	0,00	0,00	0,30	0,01	0,13
73	0,43	0,00	0,33	0,01	0,64	0,16	0,16	0,00	0,00	0,00	0,30	0,01	0,13
74	0,43	0,00	0,33	0,01	0,64	0,16	0,16	0,00	0,00	0,00	0,30	0,01	0,13
75	0,43	0,00	0,33	0,01	0,64	0,16	0,16	0,00	0,00	0,00	0,30	0,01	0,13
76	0,43	0,00	0,33	0,01	0,64	0,16	0,16	0,00	0,00	0,00	0,30	0,01	0,13
77	0,43	0,00	0,33	0,01	0,64	0,16	0,16	0,00	0,00	0,00	0,30	0,01	0,13
78	0,43	0,00	0,33	0,01	0,64	0,16	0,16	0,00	0,00	0,00	0,30	0,01	0,13
79	0,43	0,00	0,33	0,01	0,64	0,16	0,16	0,00	0,00	0,00	0,30	0,01	0,13
80	0,43	0,00	0,33	0,01	0,64	0,16	0,16	0,00	0,00	0,00	0,30	0,01	0,13
81	0,43	0,00	0,33	0,01	0,64	0,16	0,16	0,00	0,00	0,00	0,30	0,01	0,13
82	0,43	0,00	0,33	0,01	0,64	0,16	0,16	0,00	0,00	0,00	0,30	0,01	0,13
83	0,43	0,00	0,33	0,01	0,64	0,16	0,16	0,00	0,00	0,00	0,30	0,01	0,13
84	0,43	0,00	0,33	0,01	0,64	0,16	0,16	0,00	0,00	0,00	0,30	0,01	0,13
85	0,43	0,00	0,33	0,01	0,64	0,16	0,16	0,00	0,00	0,00	0,30	0,01	0,13
86	0,43	0,00	0,33	0,01	0,64	0,16	0,16	0,00	0,00	0,00	0,30	0,01	0,14

*Contribution à la Caractérisation hydrologique du bassin versant du Massili à Gonsé au Burkina Faso à travers  
une approche multimodèle pluie débit (HEC-HMS, GR4J)*

87	0,43	0,00	0,33	0,01	0,64	0,16	0,16	0,00	0,00	0,00	0,30	0,01	0,14
88	0,43	0,00	0,33	0,01	0,64	0,16	0,16	0,00	0,00	0,00	0,30	0,01	0,14
89	0,43	0,00	0,33	0,01	0,64	0,16	0,16	0,00	0,00	0,00	0,30	0,01	0,14
90	0,43	0,00	0,33	0,01	0,64	0,16	0,16	0,00	0,00	0,00	0,30	0,01	0,14
91	0,43	0,00	0,33	0,01	0,64	0,16	0,16	0,00	0,00	0,00	0,30	0,01	0,14
92	0,43	0,00	0,33	0,01	0,64	0,16	0,16	0,00	0,00	0,00	0,30	0,01	0,14
93	0,43	0,00	0,33	0,01	0,64	0,16	0,16	0,00	0,00	0,00	0,30	0,01	0,14
94	0,44	0,00	0,33	0,02	0,63	0,16	0,18	0,00	0,00	0,00	0,30	0,01	4,14
95	0,91	0,00	0,37	0,24	0,12	0,24	1,00	0,00	0,00	0,00	0,43	0,01	3,70
96	0,06	0,00	0,38	0,31	0,04	0,26	1,25	0,00	0,00	0,00	0,47	0,01	2,87
97	0,66	0,00	0,35	0,12	0,39	0,20	0,55	0,00	0,00	0,00	0,36	0,02	0,39
98	0,48	0,00	0,33	0,03	0,59	0,16	0,24	0,00	0,00	0,00	0,31	0,02	0,19
99	0,43	0,00	0,33	0,01	0,64	0,16	0,16	0,00	0,00	0,00	0,30	0,02	0,13
100	0,41	0,00	0,33	0,01	0,66	0,16	0,11	0,00	0,00	0,00	0,30	0,02	0,11
101	0,41	0,00	0,33	0,01	0,66	0,16	0,11	0,00	0,00	0,00	0,30	0,02	0,11
102	0,40	0,00	0,33	0,01	0,66	0,16	0,12	0,00	0,00	0,00	0,30	0,02	0,10
103	0,39	0,00	0,33	0,00	0,67	0,16	0,10	0,00	0,00	0,00	0,29	0,02	0,10
104	0,39	0,00	0,33	0,00	0,67	0,16	0,10	0,00	0,00	0,00	0,29	0,02	0,10
105	0,39	0,00	0,33	0,00	0,67	0,16	0,10	0,00	0,00	0,00	0,29	0,02	0,09
106	0,39	0,00	0,33	0,00	0,67	0,16	0,10	0,00	0,00	0,00	0,29	0,02	0,08
107	0,38	0,00	0,33	0,01	0,69	0,15	0,09	0,00	0,00	0,00	0,29	0,02	0,08
108	0,39	0,00	0,33	0,00	0,67	0,16	0,10	0,00	0,00	0,00	0,29	0,02	0,08
109	0,39	0,00	0,33	0,00	0,67	0,16	0,10	0,00	0,00	0,00	0,29	0,02	0,10
110	0,40	0,00	0,32	0,01	0,67	0,15	0,09	0,00	0,00	0,00	0,29	0,02	0,10
111	0,39	0,00	0,33	0,00	0,67	0,16	0,10	0,00	0,00	0,00	0,29	0,02	0,09
112	0,49	0,00	0,33	0,04	0,58	0,17	0,26	0,00	0,00	0,00	0,31	0,02	0,21
113	0,94	0,00	0,37	0,26	0,08	0,24	1,02	0,00	0,00	0,00	0,44	0,02	0,74
114	1,43	0,00	0,75	0,81	1,11	0,52	2,99	5,31	0,81	0,00	0,72	0,17	0,74
115	0,82	0,00	0,51	0,41	0,12	0,32	1,24	0,79	0,30	0,00	0,49	0,25	0,33
116	0,58	0,00	0,41	0,16	0,33	0,23	0,65	0,64	0,06	0,00	0,38	0,18	0,18
117	0,54	0,00	0,38	0,08	0,45	0,20	0,52	0,37	0,01	0,00	0,34	0,14	0,14
118	0,51	0,00	0,37	0,05	0,50	0,19	0,47	0,27	0,03	0,00	0,33	0,11	0,13
119	0,49	0,00	0,37	0,03	0,54	0,18	0,41	0,17	0,06	0,00	0,32	0,10	0,11
120	0,47	0,00	0,35	0,02	0,58	0,17	0,33	0,99	0,07	0,00	0,31	0,11	0,10
121	0,46	0,00	0,36	0,00	0,59	0,17	0,36	0,07	0,08	0,00	0,31	0,10	0,10
122	0,46	0,02	0,36	0,00	0,59	0,17	0,36	0,07	0,08	0,00	0,31	0,09	0,10
123	0,49	0,04	0,36	0,01	0,56	0,17	0,43	0,20	0,07	0,00	0,31	0,08	0,11
124	0,47	0,06	0,36	0,01	0,59	0,17	0,39	0,14	0,08	0,00	0,30	0,08	0,10
125	0,62	0,07	0,36	0,05	0,50	0,17	0,72	0,67	0,05	0,00	0,32	0,08	0,27
126	0,69	0,09	0,38	0,03	0,42	0,18	0,93	0,09	0,02	0,00	0,33	0,07	0,31
127	0,47	0,11	0,31	0,01	0,73	0,12	0,33	0,92	0,17	0,00	0,26	0,07	0,15
128	0,43	0,13	0,29	0,00	0,81	0,11	0,19	0,63	0,21	0,00	0,24	0,07	0,12
129	0,42	0,15	0,29	0,03	0,81	0,11	0,16	0,57	0,21	0,00	0,25	0,07	0,10
130	0,42	0,17	0,29	0,06	0,81	0,11	0,16	0,57	0,21	0,00	0,25	0,06	0,10
131	0,42	0,18	0,29	0,09	0,79	0,11	0,17	0,60	0,20	0,00	0,25	0,06	0,10

*Contribution à la Caractérisation hydrologique du bassin versant du Massili à Gonsé au Burkina Faso à travers  
une approche multimodèle pluie débit (HEC-HMS, GR4J)*

132	0,41	0,20	0,29	0,12	0,79	0,11	0,14	0,54	0,20	0,00	0,25	0,05	0,10
133	0,41	0,22	0,29	0,14	0,79	0,11	0,14	0,54	0,20	0,00	0,25	0,05	0,09
134	0,42	0,24	0,29	0,17	0,78	0,12	0,16	0,57	0,19	0,00	0,26	0,05	0,09
135	0,76	0,19	0,41	0,20	0,26	0,22	1,12	0,48	0,07	0,00	0,37	0,04	0,34
136	1,20	0,10	0,56	0,23	0,50	0,38	0,80	0,31	0,47	0,41	0,57	0,04	0,85
137	1,29	0,74	0,58	0,26	0,52	0,36	1,60	0,04	0,46	0,20	0,56	0,04	0,69
138	0,79	0,22	0,42	0,15	0,26	0,21	0,99	0,73	0,06	0,52	0,37	0,04	0,30
139	0,55	0,06	0,34	0,10	0,60	0,15	0,34	0,37	0,11	0,17	0,29	0,03	0,18
140	0,48	0,03	0,32	0,07	0,70	0,13	0,17	0,05	0,15	0,36	0,27	0,03	0,15
141	0,97	0,02	0,58	0,06	0,51	0,08	21,94	0,67	0,29	0,49	0,78	0,03	0,15
142	0,25	0,01	0,06	0,05	0,07	0,15	28,97	0,18	0,01	0,28	0,05	0,41	0,15
143	3,69	0,01	0,44	0,04	2,87	0,19	17,80	0,35	1,42	0,78	0,82	0,33	0,15
144	1,86	0,00	0,79	0,03	0,79	0,13	7,86	0,47	0,49	0,17	0,49	0,19	0,15
145	2,43	0,00	0,94	0,18	1,41	0,08	10,13	0,91	0,77	0,60	0,61	0,18	0,36
146	2,71	0,00	0,03	0,25	1,79	0,07	11,47	0,59	0,95	0,25	0,69	0,37	0,41
147	1,44	0,05	0,54	0,17	0,14	0,06	6,00	0,10	0,17	0,93	0,02	0,64	0,31
148	1,25	0,10	0,34	0,12	0,01	0,06	4,59	0,80	0,11	0,66	0,06	0,89	0,38
149	1,68	0,14	0,50	0,18	0,45	0,06	6,34	0,40	0,32	0,27	0,12	0,67	0,52
150	2,08	0,19	0,14	2,12	0,87	0,06	8,77	0,20	0,50	0,67	0,19	0,38	0,37
151	1,46	0,24	0,05	1,28	0,85	0,96	4,82	0,00	0,63	0,85	0,19	0,16	0,33
152	1,82	0,70	0,09	0,38	0,72	8,83	2,96	0,00	1,39	0,13	0,15	0,14	1,44
153	2,20	0,65	0,06	0,17	0,96	8,38	2,77	0,24	1,43	0,10	0,88	0,13	1,72
154	1,49	0,25	0,04	0,13	0,42	0,95	1,60	0,70	0,58	0,09	0,76	0,14	0,99
155	0,98	0,51	0,03	0,12	0,51	0,35	0,67	0,10	0,07	0,08	0,25	0,28	0,49
156	0,84	0,18	0,02	0,12	0,31	0,09	0,36	0,05	0,07	0,57	0,16	0,41	0,47
157	0,47	0,04	2,43	0,16	0,17	0,24	0,29	0,30	0,90	0,29	0,14	0,89	0,79
158	1,40	0,04	17,11	0,14	0,14	0,17	0,23	0,78	6,47	0,95	0,13	0,68	0,68
159	0,61	0,21	12,51	0,08	2,46	0,11	0,22	0,69	5,12	0,64	0,98	0,78	0,44
160	0,10	0,15	6,95	0,25	1,41	0,09	0,21	0,08	4,29	0,19	0,65	0,71	0,73
161	2,51	0,10	3,23	1,18	1,81	0,08	0,25	0,49	1,03	8,13	0,33	0,43	3,48
162	2,50	0,05	1,45	0,57	1,52	0,07	0,29	0,18	0,85	7,65	0,20	0,23	3,35
163	1,57	0,04	0,51	0,16	0,89	0,05	0,32	0,10	0,65	7,81	0,17	0,80	1,99
164	1,04	0,40	0,31	0,07	0,55	0,91	0,37	0,08	0,54	6,42	0,16	0,28	1,03
165	0,94	1,87	0,13	0,05	0,10	0,88	0,26	0,06	0,27	0,54	0,16	0,61	0,57
166	0,91	2,91	0,09	0,17	0,42	0,34	0,22	0,05	0,07	0,18	0,21	0,29	0,30
167	0,08	1,49	0,05	0,41	0,23	0,85	0,68	0,05	0,14	0,08	0,21	0,22	0,19
168	0,59	0,50	0,04	0,14	1,42	3,31	0,51	0,04	1,22	0,04	0,19	0,20	0,25
169	0,31	0,16	0,03	0,11	0,89	2,48	0,28	0,04	0,88	0,22	0,25	0,19	0,37
170	0,12	0,06	0,03	0,09	0,31	1,68	0,21	0,04	0,52	0,45	0,24	0,18	0,36
171	0,08	0,18	0,02	0,08	0,12	0,72	0,62	0,03	0,20	0,20	0,68	0,17	0,28
172	0,10	0,41	0,01	0,45	2,26	0,27	1,02	0,03	1,54	0,15	5,88	0,17	0,22
173	0,16	0,29	0,00	1,55	1,80	0,09	2,16	0,02	1,22	0,14	4,16	0,17	0,77
174	0,16	0,11	0,37	1,55	1,21	0,04	1,69	0,01	0,92	0,13	2,87	0,17	0,76
175	0,10	0,05	0,74	0,63	0,32	0,03	2,16	0,00	1,05	0,11	3,57	0,18	0,82
176	0,05	0,05	1,13	0,24	0,76	0,71	1,68	0,19	1,19	0,10	2,70	0,21	0,75

*Contribution à la Caractérisation hydrologique du bassin versant du Massili à Gonsé au Burkina Faso à travers  
une approche multimodèle pluie débit (HEC-HMS, GRAJ)*

177	0,03	0,12	4,50	0,96	0,52	1,65	0,87	0,32	3,01	0,09	4,93	0,23	0,48
178	1,28	0,09	2,69	2,08	0,16	1,06	0,53	0,22	2,10	0,08	3,92	0,19	0,30
179	1,63	0,16	0,84	1,74	0,07	0,58	0,45	0,13	0,93	0,07	2,22	0,19	0,22
180	3,43	0,13	0,26	0,71	0,03	0,27	0,49	0,09	0,35	0,06	1,24	0,18	0,19
181	2,57	1,09	0,12	0,19	0,29	0,10	0,74	0,06	0,08	0,05	0,78	0,17	0,16
182	2,87	3,92	0,06	0,13	0,61	0,05	2,62	0,74	0,65	0,04	2,97	0,16	0,15
183	2,85	3,36	0,91	0,18	2,47	0,11	3,47	0,90	1,18	0,04	3,39	0,15	0,15
184	1,47	2,07	1,22	0,10	2,59	0,16	2,28	1,05	0,94	0,03	2,23	0,15	0,15
185	0,70	6,53	0,43	0,07	1,03	0,22	1,13	1,20	0,40	0,03	1,35	0,15	0,56
186	0,33	4,96	0,14	0,05	0,30	0,27	0,54	1,36	0,33	0,02	0,76	0,15	1,73
187	0,28	2,63	0,05	0,04	0,12	0,33	0,35	1,51	0,22	0,04	0,37	0,15	1,67
188	3,92	3,12	0,15	12,62	0,08	1,38	0,22	1,67	1,38	2,45	0,25	0,18	0,98
189	3,19	3,26	1,02	16,81	0,07	3,44	0,17	1,82	2,02	4,68	0,23	0,81	0,53
190	1,70	1,96	1,05	11,32	15,70	2,49	0,34	1,97	2,69	1,92	0,31	7,70	0,29
191	0,71	1,23	0,44	6,80	15,01	1,55	0,53	2,13	2,03	0,68	1,01	4,65	0,49
192	0,72	1,04	0,17	3,96	3,32	0,60	0,31	2,28	1,66	0,18	1,82	4,72	1,61
193	2,72	2,77	0,90	6,97	1,35	1,21	0,18	1,10	1,96	0,07	1,22	4,41	1,09
194	1,85	3,58	2,09	16,63	2,01	1,73	0,15	0,36	2,99	0,04	0,68	2,85	0,48
195	1,05	1,89	1,47	11,37	4,70	7,92	0,13	0,25	2,84	0,03	0,44	1,64	0,20
196	0,61	0,88	0,66	7,20	2,29	7,23	0,13	3,02	2,14	0,92	0,28	0,84	0,16
197	0,33	0,99	0,25	5,49	1,06	2,60	0,22	4,63	1,53	1,90	0,20	0,36	0,15
198	3,43	0,96	0,09	3,86	0,78	1,70	0,93	5,49	1,03	1,01	0,18	0,20	0,15
199	3,17	0,52	0,24	2,11	0,49	1,01	7,15	3,33	0,75	1,11	0,18	0,17	0,14
200	2,97	0,21	0,38	1,08	0,16	0,61	10,34	4,06	0,76	6,00	0,16	0,16	0,13
201	1,95	0,10	0,19	0,41	0,43	0,32	6,41	13,58	0,32	0,78	0,16	0,17	0,12
202	3,40	0,05	0,09	0,15	0,78	7,11	3,87	5,58	0,28	0,38	0,57	0,77	0,12
203	3,23	0,03	0,05	0,07	1,13	7,59	4,42	3,23	18,92	3,97	1,66	0,93	0,44
204	1,59	0,02	0,04	0,03	3,91	7,81	5,15	2,17	12,30	10,69	2,05	0,71	0,59
205	1,26	0,02	0,03	0,02	1,82	8,11	3,46	1,02	8,36	11,95	2,13	2,33	0,54
206	0,57	0,02	0,02	0,02	1,95	7,98	2,30	0,45	7,71	9,03	1,29	2,48	1,30
207	0,44	0,02	0,45	0,01	2,08	6,09	4,53	0,32	6,31	6,20	0,60	1,86	1,81
208	3,48	0,87	3,70	0,01	1,29	8,79	9,51	2,50	2,10	6,34	0,30	1,52	1,13
209	4,64	3,51	2,77	0,01	0,78	6,97	8,83	3,63	12,04	6,81	0,19	0,75	0,57
210	6,91	4,24	0,95	0,21	0,55	6,99	5,09	2,86	8,55	9,87	0,18	0,60	0,40
211	8,71	2,66	0,17	1,12	0,55	5,17	3,46	1,68	6,30	7,34	1,07	1,42	0,44
212	6,99	1,13	1,56	3,16	0,65	4,24	5,98	1,15	5,32	5,80	3,79	1,18	8,14
213	4,35	0,38	2,84	4,75	0,44	4,89	9,20	1,35	5,01	4,68	3,11	1,53	7,78
214	2,70	0,13	2,89	4,16	0,34	3,31	9,35	7,59	3,93	5,11	3,22	2,57	8,36
215	2,31	0,06	2,47	2,60	0,27	3,91	7,93	10,34	2,79	15,50	2,69	7,28	7,65
216	2,60	0,04	3,82	3,33	0,54	3,69	4,50	5,79	1,58	7,70	1,63	7,99	8,46
217	2,13	0,02	3,73	6,11	1,96	3,48	3,59	3,93	0,60	10,61	0,97	7,57	5,91
218	1,70	0,03	1,86	5,43	2,92	3,31	2,68	2,47	0,31	12,96	0,58	3,38	5,74
219	2,48	0,03	1,21	3,50	3,22	3,43	2,03	2,32	0,24	16,61	0,37	3,28	5,46
220	4,12	0,34	2,02	5,09	9,67	12,67	1,54	3,93	0,23	12,39	0,44	2,52	3,31
221	4,85	0,16	1,65	8,80	24,33	8,73	1,21	5,56	23,72	14,70	3,15	1,66	0,24

*Contribution à la Caractérisation hydrologique du bassin versant du Massili à Gonsé au Burkina Faso à travers  
une approche multimodèle pluie débit (HEC-HMS, GRAJ)*

222	4,31	0,21	0,61	10,70	12,12	6,28	3,85	4,47	22,56	12,28	4,39	1,02	0,38
223	4,04	1,63	0,18	10,13	6,96	4,88	4,76	3,08	21,58	16,96	3,16	0,72	2,16
224	3,65	3,50	0,28	7,61	5,81	3,00	5,91	2,47	18,26	12,95	3,94	1,33	5,52
225	4,69	9,48	0,51	6,92	4,78	2,05	4,73	3,37	25,76	17,13	3,63	3,14	3,21
226	4,70	14,06	0,28	7,39	3,35	1,35	4,19	18,31	18,62	11,44	2,29	3,69	1,01
227	3,76	18,98	1,50	5,46	3,26	1,36	6,46	18,61	12,27	15,34	1,80	4,58	0,60
228	3,08	16,34	3,35	3,81	3,87	1,95	8,43	7,03	27,73	18,80	5,77	3,60	0,97
229	3,16	12,50	4,09	4,73	3,03	2,16	8,01	4,49	21,63	17,35	12,95	2,93	1,33
230	3,58	7,57	2,10	5,86	7,17	1,93	6,24	4,35	16,44	10,58	16,35	4,83	1,69
231	3,47	4,33	0,91	25,20	11,97	1,86	1,43	4,55	14,29	14,22	16,48	8,95	2,05
232	3,17	2,85	0,60	32,70	7,43	3,32	6,24	4,03	11,70	13,21	13,40	7,54	7,42
233	2,98	2,34	1,76	33,94	5,67	3,76	5,05	3,21	11,04	12,60	12,23	7,30	7,78
234	2,76	2,39	2,74	23,25	10,68	2,27	2,54	2,10	8,16	9,72	11,69	5,42	7,51
235	3,74	3,47	2,79	15,93	13,77	1,09	9,50	1,60	9,43	13,78	28,79	3,84	4,57
236	4,68	4,47	2,52	6,53	22,61	0,54	12,35	2,76	8,93	12,00	27,52	4,02	2,46
237	4,73	4,40	3,47	3,52	40,31	25,79	16,29	3,58	7,26	10,08	16,83	4,24	2,41
238	4,26	3,33	3,94	2,49	30,29	30,67	14,56	3,89	8,02	13,02	14,59	3,87	2,04
239	4,95	2,73	28,19	3,48	22,18	24,93	13,36	2,44	12,99	17,37	15,15	4,41	1,08
240	4,87	2,43	33,64	9,52	24,63	29,92	9,06	1,54	12,54	18,05	10,89	5,75	0,63
241	4,19	2,67	29,99	11,01	12,74	24,21	10,48	1,02	12,06	21,05	12,47	4,50	0,44
242	3,88	3,03	31,97	7,38	11,70	20,70	20,09	37,49	12,85	19,69	2,27	3,47	0,55
243	3,51	2,96	28,92	4,70	11,47	12,32	35,17	35,19	6,90	14,06	2,99	3,02	21,64
244	2,92	2,93	26,02	3,28	11,75	8,91	26,91	33,02	5,61	12,53	3,46	3,84	27,36
245	2,40	15,00	23,82	3,16	13,01	6,79	31,18	31,93	5,35	10,24	2,78	2,84	24,87
246	7,25	12,17	1,95	3,40	11,96	4,72	25,04	35,28	5,09	8,33	1,86	1,05	21,77
247	18,86	15,90	0,49	3,28	9,34	0,96	24,83	33,99	4,59	7,45	1,15	3,31	12,15
248	17,99	28,11	0,29	3,16	10,57	0,50	28,61	30,78	4,18	5,49	0,62	5,85	8,19
249	20,41	15,89	0,16	3,16	10,74	0,27	25,64	28,75	3,67	4,35	0,37	11,88	1,40
250	18,26	10,87	0,11	3,22	8,77	0,27	26,25	24,24	2,84	3,85	1,80	10,01	1,10
251	17,26	21,42	0,08	3,16	10,86	1,06	0,20	17,91	2,17	2,87	3,61	11,51	1,92
252	11,18	25,32	0,06	2,87	12,16	2,05	0,12	14,96	1,58	8,52	4,30	12,16	1,86
253	8,74	26,14	0,05	2,60	10,45	1,46	0,08	12,75	1,11	9,30	4,55	12,63	1,73
254	7,01	28,96	0,04	2,17	7,79	1,46	0,06	10,25	0,77	10,67	3,45	32,75	1,27
255	5,64	25,02	0,03	1,62	5,91	1,99	0,05	8,66	1,13	12,60	6,51	28,96	1,83
256	5,57	35,71	0,02	1,24	4,97	1,79	0,07	7,60	2,14	11,70	6,53	42,16	1,39
257	5,21	29,08	0,01	1,01	4,27	1,94	0,09	6,33	2,29	15,36	5,75	34,87	0,98
258	4,31	20,44	0,01	0,94	3,68	5,94	0,12	5,14	1,97	11,88	7,02	37,64	0,63
259	3,56	12,43	0,01	1,07	3,09	5,09	0,14	4,14	3,15	22,65	5,01	27,64	0,46
260	3,07	6,68	0,01	1,16	2,54	5,40	0,16	3,54	3,88	28,75	6,49	21,25	0,34
261	2,94	5,26	0,01	1,04	2,04	3,29	1,15	2,91	3,87	24,05	7,67	17,76	0,32
262	3,25	4,79	0,01	1,50	2,16	4,38	1,89	2,33	3,07	34,08	7,36	5,53	0,37
263	2,72	5,32	0,01	1,39	1,93	3,83	1,45	1,85	2,40	27,48	3,35	3,86	0,35
264	2,01	5,36	20,02	1,08	1,61	2,73	1,39	1,64	1,72	12,36	2,43	2,97	0,32
265	1,41	3,93	21,70	0,82	2,09	1,54	0,98	1,32	1,62	9,05	1,74	2,66	0,27
266	0,96	2,94	16,76	0,63	1,74	5,81	0,58	1,11	0,95	7,53	1,31	2,19	1,36

*Contribution à la Caractérisation hydrologique du bassin versant du Massili à Gonsé au Burkina Faso à travers  
une approche multimodèle pluie débit (HEC-HMS, GR4J)*

267	0,73	2,50	11,77	0,69	0,99	4,43	0,31	0,94	0,64	9,07	2,19	1,55	1,24
268	0,49	2,17	9,00	1,46	0,61	3,67	0,64	0,76	1,98	12,40	4,18	0,99	1,65
269	0,38	2,04	15,52	1,98	0,43	5,76	1,30	0,55	1,73	10,90	4,21	0,56	1,65
270	0,38	1,80	17,85	1,36	0,35	4,49	1,08	0,40	0,87	4,24	3,38	0,42	1,97
271	0,41	1,40	13,10	1,05	0,27	3,63	0,72	0,28	0,50	3,31	2,74	0,93	1,61
272	0,40	0,98	8,53	0,81	0,23	2,65	0,43	0,23	0,38	4,66	2,33	1,03	0,46
273	0,39	0,67	7,81	3,20	0,25	1,89	0,24	0,21	0,30	3,30	1,32	0,90	0,40
274	0,96	0,49	4,70	3,17	0,23	1,14	0,12	0,21	2,53	3,57	1,10	2,28	0,34
275	1,34	0,35	2,49	3,08	0,19	0,75	0,06	0,24	1,84	2,45	0,81	4,44	0,31
276	0,60	0,27	1,20	3,02	0,34	0,46	0,06	0,25	1,46	4,81	0,66	5,26	0,75
277	0,23	0,19	0,47	2,80	0,49	0,38	0,12	0,24	1,22	4,00	0,55	4,92	0,19
278	0,10	0,15	0,17	2,28	0,67	0,49	0,11	0,23	0,96	2,60	0,49	4,04	0,63
279	0,07	0,14	0,12	2,13	0,46	0,57	0,06	0,22	0,94	2,61	0,40	3,20	0,08
280	0,05	0,12	0,10	1,86	0,27	0,46	0,05	0,23	0,84	2,40	0,35	2,38	0,52
281	0,05	0,10	0,11	1,58	0,23	0,30	0,04	0,24	0,75	3,14	0,31	1,45	0,80
282	0,04	0,08	0,14	1,05	0,23	0,20	0,60	0,23	0,50	3,71	0,26	0,81	0,96
283	0,04	0,07	0,16	0,71	0,99	0,16	0,58	0,72	0,34	4,04	0,24	0,42	0,04
284	0,04	0,06	0,17	0,61	2,57	0,14	0,87	1,71	0,35	3,24	0,25	0,27	0,58
285	0,04	0,05	0,22	0,64	1,67	0,13	0,05	0,17	0,23	2,57	0,25	0,66	0,40
286	0,04	0,04	0,26	1,16	0,79	0,12	2,40	0,41	0,17	1,86	0,20	2,24	0,31
287	0,04	0,03	0,36	1,01	0,52	0,11	2,18	0,70	0,13	1,43	0,17	2,10	0,25
288	0,03	0,03	0,83	0,64	0,32	0,10	0,55	0,47	0,21	1,07	0,21	1,33	0,23
289	0,03	0,02	0,61	0,37	0,24	0,09	0,29	0,08	0,07	0,82	0,18	0,79	0,21
290	0,03	0,02	0,29	0,20	0,23	0,08	0,40	0,61	0,08	0,54	0,18	0,00	0,20
291	0,03	0,01	0,19	0,10	0,22	0,07	0,42	0,76	0,15	0,29	0,17	0,00	0,18
292	0,03	0,01	0,17	0,07	0,19	0,06	0,37	0,66	0,16	0,23	0,16	0,00	0,19
293	0,03	0,01	0,16	0,04	0,18	0,05	0,38	0,67	0,18	0,22	0,14	0,00	0,18
294	0,03	0,00	0,15	0,03	0,17	0,05	0,39	0,70	0,19	0,21	0,14	0,00	0,18
295	0,03	0,00	0,15	0,01	0,16	0,04	0,33	0,57	0,19	0,21	0,15	0,00	0,19
296	0,03	0,00	0,14	0,00	0,15	0,04	0,36	0,66	0,20	0,20	0,14	0,00	0,19
297	0,03	0,00	0,13	0,02	0,15	0,03	0,34	0,63	0,22	0,19	0,12	0,00	0,19
298	0,03	0,00	0,11	0,50	0,14	0,03	0,31	0,53	0,54	0,18	0,11	0,00	0,20
299	0,03	0,00	0,10	0,05	0,13	0,03	0,79	0,90	0,75	0,17	0,11	0,00	0,21
300	0,03	0,00	0,10	0,58	0,13	0,03	0,16	0,00	0,00	0,18	0,11	0,00	0,21
301	0,03	0,00	0,09	0,84	0,12	0,03	0,96	0,00	0,00	0,17	0,11	0,00	0,18
302	0,03	0,00	0,09	0,45	0,11	0,03	0,19	0,00	0,00	0,17	0,10	0,00	0,16
303	0,03	0,00	0,08	0,60	0,11	0,03	0,17	0,00	0,00	0,16	0,10	0,00	0,15
304	0,03	0,00	0,08	0,79	0,10	0,03	0,61	0,00	0,00	0,14	0,10	0,00	0,19
305	0,03	0,00	0,08	0,99	0,09	0,03	0,02	0,00	0,00	0,11	0,10	0,00	0,25
306	0,03	0,00	0,07	0,51	0,08	0,03	0,26	0,00	0,00	0,16	0,10	0,00	0,26
307	0,02	0,00	0,07	0,13	0,08	0,03	0,38	0,00	0,00	0,20	0,10	0,00	0,23
308	0,02	0,00	0,06	0,76	0,08	0,03	0,51	0,00	0,00	0,17	0,10	0,00	0,20
309	0,02	0,00	0,06	0,20	0,07	0,03	0,19	0,00	0,00	0,18	0,10	0,00	0,20
310	0,02	0,00	0,05	0,91	0,06	0,02	0,49	0,00	0,00	0,25	0,10	0,00	0,20
311	0,02	0,00	0,05	0,81	0,06	0,02	0,24	0,00	0,00	0,27	0,10	0,00	0,20

*Contribution à la Caractérisation hydrologique du bassin versant du Massili à Gonsé au Burkina Faso à travers  
une approche multimodèle pluie débit (HEC-HMS, GR4J)*

312	0,02	0,00	0,05	0,65	0,05	0,02	0,89	0,00	0,00	0,21	0,10	0,00	0,19
313	0,02	0,00	0,04	0,44	0,05	0,02	0,36	0,00	0,00	0,14	0,12	0,00	0,19
314	0,02	0,00	0,04	0,25	0,05	0,02	0,93	0,00	0,00	0,15	0,11	0,00	0,18
315	0,02	0,00	0,03	0,11	0,04	0,02	0,57	0,00	0,00	0,13	0,10	0,00	0,19
316	0,02	0,00	0,03	0,06	0,04	0,02	0,47	0,00	0,00	0,13	0,10	0,00	0,21
317	0,02	0,00	0,03	0,23	0,04	0,02	0,86	0,00	0,00	0,13	0,10	0,00	0,20
318	0,02	0,00	0,02	0,26	0,04	0,02	0,97	0,00	0,00	0,13	0,10	0,00	0,19
319	0,02	0,00	0,02	0,22	0,04	0,02	0,88	0,00	0,00	0,13	0,10	0,00	0,19
320	0,02	0,00	0,01	0,67	0,04	0,02	0,01	0,00	0,00	0,14	0,09	0,00	0,18
321	0,02	0,00	0,01	0,06	0,04	0,02	0,27	0,00	0,00	0,15	0,08	0,00	0,18
322	0,02	0,00	0,00	0,06	0,04	0,02	0,27	0,00	0,00	0,15	0,08	0,00	0,18
323	0,02	0,00	0,00	0,06	0,03	0,02	0,27	0,00	0,00	0,13	0,08	0,00	0,17
324	0,02	0,00	0,00	0,06	0,03	0,02	0,27	0,00	0,00	0,13	0,09	0,00	0,17
325	0,02	0,00	0,00	0,06	0,03	0,02	0,27	0,00	0,00	0,15	0,08	0,00	0,17
326	0,02	0,00	0,00	0,06	0,03	0,02	0,27	0,00	0,00	0,17	0,09	0,00	0,16
327	0,02	0,00	0,00	0,06	0,03	0,02	0,27	0,00	0,00	0,14	0,09	0,00	0,16
328	0,02	0,00	0,00	0,07	0,03	0,02	0,29	0,00	0,00	0,09	0,08	0,00	0,15
329	0,02	0,00	0,00	0,07	0,03	0,02	0,29	0,00	0,00	0,05	0,08	0,00	0,15
330	0,02	0,00	0,00	0,07	0,03	0,02	0,29	0,00	0,00	0,05	0,09	0,00	0,15
331	0,01	0,00	0,00	0,07	0,03	0,02	0,29	0,00	0,00	0,05	0,09	0,00	0,14
332	0,01	0,00	0,00	0,07	0,03	0,02	0,29	0,00	0,00	0,05	0,10	0,00	0,14
333	0,01	0,00	0,00	0,07	0,03	0,01	0,29	0,00	0,00	0,05	0,09	0,00	0,13
334	0,01	0,00	0,00	0,08	0,03	0,01	0,29	0,00	0,00	0,05	0,09	0,00	0,13
335	0,01	0,00	0,00	0,08	0,02	0,01	0,29	0,00	0,00	0,04	0,09	0,00	0,13
336	0,01	0,00	0,00	0,08	0,02	0,01	0,29	0,00	0,00	0,04	0,09	0,00	0,12
337	0,01	0,00	0,00	0,08	0,02	0,01	0,29	0,00	0,00	0,04	0,08	0,00	0,12
338	0,01	0,00	0,00	0,08	0,02	0,01	0,29	0,00	0,00	0,04	0,08	0,00	0,11
339	0,01	0,00	0,00	0,09	0,02	0,01	0,31	0,00	0,00	0,04	0,08	0,00	0,11
340	0,01	0,00	0,00	0,09	0,02	0,01	0,31	0,00	0,00	0,04	0,09	0,00	0,11
341	0,01	0,00	0,00	0,23	0,02	0,01	0,23	0,00	0,00	0,04	0,90	0,00	0,10
342	0,01	0,00	0,00	0,09	0,02	0,01	0,31	0,00	0,00	0,03	0,09	0,00	0,10
343	0,01	0,00	0,00	0,09	0,02	0,01	0,31	0,00	0,00	0,03	0,08	0,00	0,09
344	0,01	0,00	0,00	0,09	0,02	0,01	0,31	0,00	0,00	0,03	0,08	0,00	0,09
345	0,01	0,00	0,00	0,10	0,02	0,01	0,32	0,00	0,00	0,03	0,08	0,00	0,08
346	0,01	0,00	0,00	0,18	0,02	0,01	0,26	0,00	0,00	0,03	0,80	0,00	0,08
347	0,01	0,00	0,00	0,10	0,02	0,01	0,32	0,00	0,00	0,03	0,08	0,00	0,08
348	0,01	0,00	0,00	0,10	0,01	0,01	0,32	0,00	0,00	0,03	0,07	0,00	0,07
349	0,01	0,00	0,00	0,11	0,01	0,01	0,34	0,00	0,00	0,02	0,07	0,00	0,07
350	0,01	0,00	0,00	0,12	0,01	0,01	0,30	0,00	0,00	0,02	0,06	0,00	0,06
351	0,01	0,00	0,00	0,12	0,01	0,01	0,30	0,00	0,00	0,02	0,06	0,00	0,06
352	0,01	0,00	0,00	0,13	0,01	0,01	0,32	0,00	0,00	0,02	0,05	0,00	0,06
353	0,01	0,00	0,00	0,13	0,01	0,01	0,31	0,00	0,00	0,02	0,05	0,00	0,05
354	0,01	0,00	0,00	0,13	0,01	0,01	0,31	0,00	0,00	0,02	0,05	0,00	0,05
355	0,00	0,00	0,00	0,13	0,01	0,00	0,31	0,00	0,00	0,02	0,05	0,00	0,04
356	0,00	0,00	0,00	0,13	0,01	0,00	0,31	0,00	0,00	0,01	0,04	0,00	0,04

*Contribution à la Caractérisation hydrologique du bassin versant du Massili à Gonsé au Burkina Faso à travers  
une approche multimodèle pluie débit (HEC-HMS, GR4J)*

357	0,00	0,00	0,00	0,14	0,01	0,00	0,33	0,00	0,00	0,01	0,04	0,00	0,04
358	0,00	0,00	0,00	0,14	0,01	0,00	0,33	0,00	0,00	0,01	0,04	0,00	0,03
359	0,00	0,00	0,00	0,14	0,01	0,00	0,33	0,00	0,00	0,01	0,04	0,00	0,03
360	0,00	0,00	0,00	0,14	0,00	0,00	0,33	0,00	0,00	0,01	0,04	0,00	0,02
361	0,00	0,00	0,00	0,15	0,00	0,00	0,34	0,00	0,00	0,01	0,04	0,00	0,02
362	0,00	0,00	0,00	0,15	0,00	0,00	0,33	0,00	0,00	0,01	0,03	0,00	0,02
363	0,00	0,00	0,00	0,15	0,00	0,00	0,33	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00	0,01
364	0,00	0,00	0,00	0,15	0,00	0,00	0,33	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00	0,01
365	0,00	0,00	0,00	0,17	0,00	0,00	0,30	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00
366	-	-	-	0,166	-	-	-	0,000	-	-	-	0,000	-